

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO-UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS-CCET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE-PPGEE

Wenllson Carlos Ferreira Leite

**Sistema de Controle Fuzzy-Ótimo Aplicado
ao Problema de Balanço Pendular da Carga
em Pontes Rolantes**

São Luís-MA

2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO-UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS-CCET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ELETRICIDADE-PPGEE



Wenllson Carlos Ferreira Leite

Sistema de Controle Fuzzy-Ótimo Aplicado ao Problema de Balanço Pendular da Carga em Pontes Rolantes

Orientador: Prof. João Viana da Fonseca Neto, Dr

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da UFMA (área de concentração: Automação e Controle) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

São Luís-MA

2019

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Ferreira Leite, Wenllson Carlos.

Sistema de Controle Fuzzy-Ótimo Aplicado ao Problema de Balanço Pendular da Carga em Pontes Rolantes / Wenllson Carlos Ferreira Leite. - 2019.

136 f.

Orientador(a): João Viana da Fonseca Neto.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Eletricidade/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luis, 2019.

1. Controlador Fuzzy-Ótimo. 2. Controle PID. 3. Ponte Rolante. 4. Sistemas Multivariáveis (MIMO). 5. Sistemas não-lineares. I. Fonseca Neto, João Viana da. II. Título.

Wenllson Carlos Ferreira Leite

Sistema de Controle Fuzzy-Ótimo Aplicado ao Problema de Balanço Pendular da Carga em Pontes Rolantes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Eletricidade da UFMA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Eletricidade. Área de concentração: Automação e Controle.

Dissertação aprovada, São Luís-MA, 10 de maio de 2019

Prof. João Viana da Fonseca Neto, Dr.
(Orientador)

**Prof. Francisco das Chagas de Souza,
Dr.**
(Membro da Banca Examinadora)

**Prof. Laurinda Lúcia Nogueira dos
Reis, Dra.**
(Membro da Banca Examinadora)

São Luís-MA
2019

*Este trabalho é dedicado (in memoriam), à Ciléia de Cassia (irmã),
que incentivou-me no caminho da verdade, dedicação e coragem para encarar os desafios
da vida.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus pela minha saúde e de meus familiares, permitindo assim conseguir os objetivos diários. Agradeço ao Professor Doutor João Viana da Fonseca Neto pela confiança, paciência, incentivo, amizade e excelente orientação nesses dois anos de estudo. Ao demais professores do departamento pelo aprendizado acadêmico durante o curso. Aos colegas de laboratório (LABSECI e LCP) pelo convívio, aprendizado e harmonia no ambiente diário de estudos e pesquisas.

Agradecimentos aos pós-graduandos do Laboratório de Automação e Controle - UFMA pelo suporte prestado do início ao fim do projeto de pesquisa e a CAPES pelo suporte financeiro.

“A máquina, que produz abundância, tem-nos deixado em penúria. Nossos conhecimentos fizeram-nos céticos; nossa inteligência, empedernidos e cruéis. Pensamos em demasia e sentimos bem pouco. Mais do que de máquinas, precisamos de humanidade. Mais do que de inteligência, precisamos de afeição e doçura. Sem essas virtudes, a vida será de violência e tudo será perdido. (...) Soldados! Não batalheis pela escravidão! Lutai pela liberdade! No décimo sétimo capítulo de São Lucas está escrito que o Reino de Deus está dentro do homem - não de um só homem ou grupo de homens, mas dos homens todos! Vós, o povo, tendes o poder de tomar esta vida livre e bela... de fazê-la uma aventura maravilhosa. Portanto - em nome da democracia - usemos desse poder, unamos-nos todos nós. Lutemos por um mundo novo... um mundo bom que a todos assegure o ensejo de trabalho, que dê futuro à mocidade e segurança à velhice. (...)”

Filme: O Grande Ditador

Autor: Charles Chaplin

Resumo

As pontes rolantes são equipamentos para o transporte de cargas que ao longo da história da humanidade vem viabilizando as atividades fins dos setores produtivos das civilizações. Praticamente em todos os setores das atividades humanas, tais como: portos, ferrovias e indústria automobilística, demandam pontes rolantes para o desenvolvimento de suas atividades. A operação de pontes rolantes é complexa e perigosa para o ser humano, como também uma operação inadequada pode danificar a carga. Entre os diversos problemas relacionados com a operação da ponte rolante, o problema de balanço pendular da carga é um fenômeno que compromete a qualidade do serviço e segurança na sua operação. Em face da problemática do controle de balanço pendular da carga, uma metodologia para o projeto de sistema de controle envolvendo a Lógica *Fuzzy* e Controle Ótimo para pontes rolantes é apresentada nesta dissertação de mestrado. A metodologia proposta para projeto do sistema de controle *Fuzzy-Ótimo* envolve as propriedades de otimalidade e *fuziness*. Para tanto, as abordagens de controle ótimo e lógica *Fuzzy* são combinadas para formar os controladores e inferir no comportamento das oscilações pendulares. A otimalidade é fornecida por meio da função de custo do projeto *LQR* (Regulador Linear Quadrático), no sentido que minimiza as variações dos estados da ponte com o esforço mínimo de controle. A *fuziness* é fornecida por meio de funções de pertinência, atuando para corrigir perturbações e variações paramétricas. Assim este trabalho aborda o problema de regulação de deslocamento pendular da carga em pontes rolantes, uma solução baseada na associação de lógica *Fuzzy* e controles ótimos são apresentados nesta dissertação de mestrado. A complexidade do processo em estudo que envolve múltiplas entradas e saídas, juntamente com carga variável ou altura do cabo, gera fenômenos não lineares que o controlador *PID* (Proporcional, Integrativo e Derivativo) não pode lidar. Como proposta de solução, é apresentado o desenvolvimento da metodologia de controle e algoritmos baseados no método *LQR* e controlador *Fuzzy* que atuando de forma conjunta promovem melhorias na dinâmica do posicionamento da ponte e movimento pendular da carga, levando em consideração as variações da altura do cabo. Um modelo matemático de espaço de estados multivariável de ponte rolante é adaptado para aplicações de controle ótimo, bem como algoritmos baseados nos modelos *Fuzzy-Ótimo*, desenvolvidos nesta dissertação, são usados para avaliar o desempenho da proposta e sua comparação com controladores *PID* clássicos.

Palavras-chave: Controle *Fuzzy* e Controle Ótimo, Ponte Rolante, Sistemas não-lineares, Sistemas Multivariáveis (MIMO), Controle *PID*, Modelagem de Sistemas Dinâmicos.

Abstract

Cranes are tools for transportation throughout the history of mankind, enabling the activities of the productive states of civilizations. Practically in all sectors of human activity, such as: ports, railways and the automotive industry, demanding platforms for the development of its activities. The operation of cranes is complex and dangerous to be human, as well as improper operation can damage the load. Among the problems related to the operation of the crane, the problem of load evaluation is a phenomenon that compromises the quality of service and safety in its operation. In view of the problem of pendular load control, since it is important for the ongoing control project of Logic and Control, the scales are presented in this dissertation. The purpose of the *Fuzzy-Optimal* control system design involves as optimality properties and *fuziness*. The physical data processing and control interfaces are combined for the generation of controllers and infer the behavior of the pendulum oscillations. Optimality is used by means of the joint adjustment function, but there is no sense in minimizing it as a bridge of states with minimum control. A *fuziness* is marked by the medium of pertinence functions, acting to correct perturbations and parametric effects. Thus, the work addressing the problem of pendulum load displacement in highways, a solution based on a Fuzzy logic and the optimal controls are presented in this dissertation. Since the process under study that involves the inputs and outputs, along with the variable of value and height, does not generate linear ones that can be controlled. As the solution is essential, the co-ordination principle and the base method is not an *LQR* method and the fuzzy controller that actuating together promote improvements in bridge movement and pendulum load movement, taking into account the cable height characteristics. A multivariate crossover state mathematical model is adapted for optimal control applications, as well as algorithms based on Fuzzy-Optimum models, under this dissertation, are used to evaluate the performance of the proposal and its comparison with the classic *PID* driver.

Keywords: Fuzzy Control, Optimal Control, Overhead Cranes, Non-Linear Systems, Multivariable System, PID control, Dynamic Systems Modelling.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ponte Rolante Industrial do tipo Pórtico.	22
Figura 2 – Metodologia para o Desenvolvimento de Controle <i>Fuzzy-Ótimo</i>	26
Figura 3 – Posição angular da carga em 3D	30
Figura 4 – Área de movimento horizontal da Ponte no eixo X e do trole em Y	31
Figura 5 – Área de movimento horizontal da Ponte no eixo X, Y e vertical em Z	32
Figura 6 – Diagrama do trole em 3D	33
Figura 7 – Balanço da carga no eixo Y.	39
Figura 8 – Configuração de controle moderno.	45
Figura 9 – Componentes de um Sistema de Controle Moderno.	46
Figura 10 – Função de Pertinência para altura (a) Conjunto Crisp. (b) Conjunto Fuzzy.	51
Figura 11 – Exemplo de variável linguística.	53
Figura 12 – Variável Fuzzy, altura de uma pessoa e seus conjuntos (baixo, mediano e alto).	54
Figura 13 – Processo de Defuzificação	56
Figura 14 – Estrutura básica de um controlador tipo Fuzzy	56
Figura 15 – Espaço de Estados de um Diagrama de Blocos	58
Figura 16 – Função de Pertinência de um controlador Fuzzy	60
Figura 17 – Diagrama de bloco do sistema <i>Fuzzy-Ótimo</i>	66
Figura 18 – Estrutura básica do Sistema <i>Fuzzy-Ótimo</i>	72
Figura 19 – Protótipo de uma Ponte Rolante	73
Figura 20 – Formação do vetor de base Fuzzy	74
Figura 21 – Condições iniciais para os estados	75
Figura 22 – Degrau para o eixo X_{ponte} , Y_{trole} e Z_{altura}	76
Figura 23 – Entrada ao degrau para o eixo X_{ponte}	76
Figura 24 – Entrada ao degrau para o eixo Y_{trole}	77
Figura 25 – Entrada ao degrau para o eixo X_{carga}	78
Figura 26 – Entrada ao degrau para o eixo Y_{carga}	79
Figura 27 – Aumento do comprimento do cabo de sustentação Z_{cabo} <i>PID</i> e <i>Fuzzy-Ótimo</i>	80
Figura 28 – Degrau para os eixos X_{ponte} e Y_{carga} <i>PID</i> e <i>Fuzzy-Ótimo</i>	81
Figura 29 – Sinais de entrada os eixos X_{ponte} , Y_{trole} e Z_{cabo} no <i>PID</i> e <i>Fuzzy-Ótimo</i>	81
Figura 30 – Degrau para os eixos X_{ponte} , Y_{trole} e Z_{cabo} em <i>PID</i> e <i>Fuzzy-Ótimo</i>	82
Figura 31 – Diagrama de blocos de Controle <i>Fuzzy-Ótimo</i> e <i>PID</i>	90
Figura 32 – Diagrama de Bloco de Controle <i>Fuzzy-Ótimo</i> no Simulink®	92
Figura 33 – Diagrama de Bloco de Controle <i>PID</i> no Simulink®	94

Figura 34 – Protótipo de uma Ponte Rolante em laboratório.	108
Figura 35 – Forma de onda por largura de pulso	109
Figura 36 – Circuito PWM típico	109
Figura 37 – Ponte H para reversão da tensão	110
Figura 38 – Fonte 12V chaveada	110
Figura 39 – Fim de curso-mecânico	111
Figura 40 – Fim de curso-Fotoelétrico.	112
Figura 41 – Encoder Rotativo.	112
Figura 42 – Sensor Angular	113
Figura 43 – Motor CC	114
Figura 44 – Chave Contatora	115
Figura 45 – CLP	115
Figura 46 – Segurança em sua Operação	117

Lista de tabelas

Tabela 1 – Descrição dos parâmetros do sistema dinâmico	33
Tabela 2 – Parâmetros levantados do Protótipo	73
Tabela 3 – Ganhos do Controlador PID Tuner	74
Tabela 4 – Ganhos do Controlador <i>Fuzzy-Ótimo</i>	74
Tabela 5 – Figuras de mérito para eixo X_{ponte}	77
Tabela 6 – Figuras de mérito para o eixo Y_{trole}	78
Tabela 7 – Figuras de mérito para o eixo X_{carga}	79
Tabela 8 – Figuras de mérito para o eixo Y_{carga}	80
Tabela 9 – Especificação do Motor CC	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PID	Proporcional, Integrativo e Derivativo
LQR	Linear Quadratic Regulator (Regulador Linear Quadrático)
MIMO	Multiple Input – Multiple Output (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas)
SVC	Sistemas de Variáveis Contínuas
MBC	Model Based Control (Controle baseado em Modelo)
NR	Norma Regulamentadora
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EDO	Equação Diferencial Ordinária
FO	<i>Fuzzy-Ótimo</i>
3D	Três Dimensões
ARE	Algebraic Riccati Equation (Equação Algébrica de Riccati)
SI	Sistema Internacional de Unidades
CLP	Controlador Lógico Programável
SIF	Sistema de Inferência Fuzzy
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
CC	Corrente Contínua

SED	Sistemas a Eventos Discretos
NEMA	National Electrical Manufacturers Association (Associação de Manufaturas Elétricas Nacional)
SMC	Sliding Mode Control (Controle por Modo Deslizante)

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo alfa entre a projeção ZY e o cabo l
β	Ângulo beta entre o eixo Z e a projeção do cabo l em XZ
b_l	Vetor de base Fuzzy
x_{ponte}	Posição da ponte no eixo X
y_{trole}	Posição da trole no eixo Y
z_{cabo}	Altura do cabo no eixo Z
x_{carga}	Posição da carga no eixo X
y_{carga}	Posição da carga no eixo Y
z_{carga}	Posição da carga no eixo Z
F_x	Força de direção da ponte no eixo X
F_y	Força de direção do trole no eixo Y
T_x	Força de tensão eixo X
T_y	Força de tensão eixo Y
m_{trole}	Massa do trole
m_{ponte}	Massa do ponte
m_{carga}	Massa do carga
S	Força de reação atuando no levantamento da carga
g	Aceleração da gravidade

l	Altura do levantamento da carga
$\mu(x)$	Função de pertinência
J	Índice de desempenho
\dot{p}	Momento generalizado
\dot{q}	Coordenada generalizada
b_l	Vetor de base Fuzzy
L	Lagrangeano
K	Energia Cinética
P	Energia Potencial
Θ	Vetor de Parâmetros

Sumário

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Justificativas	22
1.2	Motivação	23
1.3	Objetivos	23
1.3.1	Objetivo Geral	23
1.3.2	Objetivo Específicos	24
1.4	Estado da Arte	24
1.5	Metodologia do trabalho	25
1.6	Organização da Dissertação	27
2	MODELAGEM MATEMÁTICA DA PONTE ROLANTE	29
2.1	Modelo 3D da Ponte Rolante	29
2.2	Modelo Dinâmico de uma Ponte Rolante	30
2.3	Equações para a Posição da Carga	30
2.4	Parâmetros da Ponte Rolante	32
2.5	Equações Dinâmicas	33
2.5.1	Linearizações	35
2.6	Modelo Lagrangeano	36
2.7	Função Lagrangeana	36
2.8	Lagrange e o Princípio de Hamilton	37
2.9	Variáveis diferenciáveis	38
2.10	Velocidade da Carga em três dimensões (X , Y e Z)	39
2.11	Energia Cinética Total da Ponte Rolante	40
2.12	A Energia Potencial Total da Ponte Rolante	40
2.13	A Equação de Lagrange	41
2.14	Formulação Euler-Lagrange	41
2.15	Linearização para pequenos ângulos	42
3	CONTROLE ÓTIMO E FUZZY	44
3.1	Controle Ótimo	44
3.2	Sistema de Controle Moderno	45
3.2.1	Índice de desempenho	45
3.2.2	Equações de Hamilton	47
3.3	LQR-Regulador Linear Quadrático	48
3.4	Lógica Fuzzy	49
3.4.1	Histórico	49

3.4.2	Conjuntos Fuzzy	51
3.4.3	Operações Básicas entre Conjuntos Fuzzy	52
3.4.4	Funções de Pertinências	52
3.4.5	Variáveis linguísticas	52
3.4.6	Fuzificação	53
3.4.7	Regras Fuzzy	54
3.4.8	Defuzificador	55
3.4.9	Estruturas básicas para um controlador Fuzzy	56
	4 PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE FUZZY-ÓTIMO	57
4.1	Modelo da Ponte Rolante no Espaço de Estados	57
4.2	Controle Fuzzy Estável	60
4.3	Princípio Mínimo de Pontryagin	61
4.4	Controle <i>Fuzzy-Ótimo</i>	62
4.5	Arquitetura do Sistema de Controle <i>Fuzzy-Ótimo</i>	66
4.5.1	Diagrama de Bloco do Sistema	66
4.6	Algoritmos de Controle <i>Fuzzy-Ótimo</i>	67
4.6.1	Algoritmo 1- Condições Iniciais	67
4.6.2	Algoritmo 2- Lógica Fuzzy	68
4.6.3	Algoritmo 3-Otimização <i>Fuzzy-ótimo</i>	69
	5 EXPERIMENTOS DO CONTROLE FUZZY-ÓTIMO	71
5.1	Organização e Considerações das Simulações	72
5.1.1	Parâmetros Fixo da Ponte Rolante	73
5.1.2	Parâmetros dos Controladores PID Tune e <i>Fuzzy-Ótimo</i>	73
5.1.3	Geração da base vetorial Fuzzy	74
5.1.4	Condições iniciais aos Estados	75
5.2	Comparação entre os desempenhos de controle	75
5.2.1	Sinais de Entrada Simultâneos	76
5.2.2	Desempenho de controle para o eixo de translação X_{ponte}	76
5.2.3	Desempenho de controle para o eixo de translação Y_{trole}	77
5.2.4	Desempenho de controle para o balanço pendular da carga em X_{carga}	78
5.2.5	Desempenho de controle para o balanço pendular da carga em Y_{carga}	79
5.2.6	Respostas de controle do movimento do cabo I no eixo Z_{carga}	80
5.2.7	Respostas de controle para chaveamento do sinal simultâneos	81
5.2.8	Sinais de Controle Simultâneos Total	81
	6 CONCLUSÃO	83
6.1	Contribuições	83
6.2	Trabalhos Futuros	84

6.3	Produção Científica	84
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICES	88
	A – DIAGRAMA DE BLOCOS NO SIMULINK	89
	B – DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO COMPLEMENTAR . . .	96
	C – DISPOSITIVOS E ELEMENTOS DA PONTE ROLANTE . . .	108
C.1	PWM (Modulação por Largura de Pulso)	108
C.2	Ponte H	109
C.3	Fonte Chaveada 12V	110
C.4	Sensores	111
C.4.1	Fim de curso mecânico	111
C.4.2	Fim de curso fotoelétrico	111
C.4.3	Encoder rotativo	112
C.4.4	Sensor Angular	112
C.5	Atuadores	113
C.5.1	Motor CC	113
C.5.2	Chave Contatora	114
C.5.3	Controlador Lógico Programável	115
	D – NORMAS E PROCEDIMENTOS PARA PONTES ROLANTES	116
D.1	A Norma Regulamentadora 11 – NR 11	116
D.1.1	Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais	116
D.2	Norma Regulamentadora 12 - NR 12	118
D.2.1	Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos	118
D.3	Norma Regulamentadora 18 - NR18	120
D.3.1	Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção	120
D.4	NBR 8400	120
D.4.1	Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas	120
D.4.2	Componentes	121
	ANEXOS	122
	A – ARTIGO PUBLICADO RELACIONADO AO TEMA DA DIS- SERTAÇÃO	123

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias para mover objetos pesados e de grandes dimensões tem sido uma busca constante tendo em vistas facilitar o processo de transporte de tais materiais em ambientes industriais (MOHANLAL; KAIMAL, 2004). A ponte rolante é o sistema mais eficiente para realizar a locomoção de cargas pesadas em grandes ou pequenas distâncias, mas com algumas dificuldades, pois o movimento pendular da carga retarda o posicionamento preciso da mesma (HAYAJNEH et al., 2008). Além de dificultar o trabalho do operador, grandes balanços podem causar danos às cargas ou até provocar acidentes, pondo em risco a integridade física das pessoas. Deve-se evitar que as cargas venham a sofrer algum tipo de dano, causando prejuízos para operadores e cargas que podem ter um grande valor financeiro.

A importância da ponte rolante no transporte de cargas e as restrições que podem envolver a sua utilização são fatores motivantes para que sejam desenvolvidos sistemas sofisticados de controle capazes de regular a magnitude e a duração do balanço das cargas durante o transporte e assim, evitar possíveis danos são apresentadas em (HONG, 2019). Devido a estas características, o presente trabalho propõe uma revisão das metodologias empregadas para o controle do sistema e melhorias operacionais de desempenho, envolvendo propriedades multivariáveis. Como foi dito anteriormente há um grande interesse por parte dos pesquisadores na área de Engenharia de Controle e Automação em busca de soluções viáveis e satisfatórias para garantir o funcionamento mais seguro e produtivo das Pontes Rolantes industriais.

Além do mais, as pontes rolantes são qualificadas pela sua importância no deslocamento de cargas pesadas como na Figura 1, economizando no tempo e mão de obra, tanto na indústria como em oficinas e armazéns. Ademais, as pontes rolantes são largamente utilizadas tornando-se uma máquina de manuseio moderna e indispensável nos diversos setores produtivos da sociedade, tais como: industriais, aeroespacial, portuário, etc.

Em decorrência dos balanços provocados pelo deslocamento, o posicionamento torna-se impreciso e as operações repetitivas. O posicionamento impreciso e as oscilações da carga podem provocar danos aos equipamentos e colisões de peças, desta forma acarretando prejuízos. O propósito de um sistema de controle em pontes rolantes compreende o carregamento e o transporte de produtos com precisão, rapidez e segurança. Deste modo, pretende-se alcançar o controle de posicionamento do carro e da oscilação pendular da carga.

Em função dos problemas de oscilação pendular e suas consequências discutidos no parágrafos anteriores, tal como em (NAIDU., 2002) e (HONG, 2019), nesta dissertação almeja-se apresentar uma metodologia para projetar e aperfeiçoar o sistema de controle com esforço mínimo em sua trajetória de transporte. Nesse sentido, baseando-se em estudos de modelos de controle ótimo e na concepção da Lógica *Fuzzy* propõem-se desenvolver um sistema de controle *Fuzzy-Ótimo* em malha fechada, no qual baseia-se no princípio mínimo da ação em função do tempo determina a melhor trajetória.

A Equação Algébrica de *Riccati* assim como a base de regras *Fuzzy* compõem os cálculos que viabilizam os parâmetros de controle do sistema proposto. Portanto, a ação de controle necessária ao melhor desempenho é aprimorado durante o projeto de controlador, como encontrado em (WANG, 1997) e (AL-HADITHI et al., 2012). Assim, pretende-se construir e aperfeiçoar um algoritmo de controle via espaço de estados modificando-os em função do LQR (Regulador Linear Quadrático), deste modo determinando-se novos autovalores. Portanto as etapas de controle envolvem o algoritmo de controle *Fuzzy-Ótimo*, modificando as matrizes originais do sistema estudado. A base de regras *Fuzzy*, que será detalhada neste trabalho é a referência gaussiana para a otimização do sistema. Logo neste trabalho descreve-se uma modelagem matemática e um sistema de controle resultando em um algoritmo computacional. Os resultados apresentados são baseados em modelos que são avaliados no software MATLAB[®], Simulink[®]. Para avaliação de desempenho entre os sistemas de controle estes resultados são confrontados aos controladores do tipo *PID*.

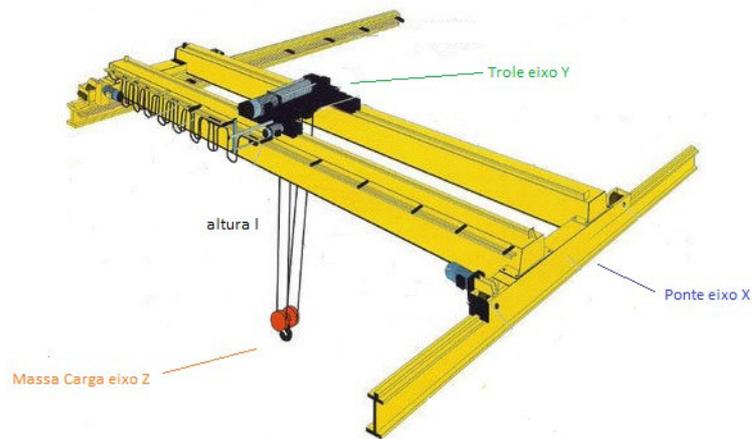


Figura 1 – Ponte Rolante Industrial do tipo Pórtico.

Nos parágrafos anteriores descreveu-se uma introdução a respeito das informações envolvendo os problemas, desafios e as necessidades em torno do processo de controle de uma ponte rolante, os estudos de controle propostos, a seguir reproduz-se a justificativa em relação ao projeto e a motivação necessária ao desenvolvimento do trabalho. Retratam-se os objetivos propostos para o trabalho, caracterizando os objetivos gerais e específicos necessários ao alcance final do trabalho. Ainda neste capítulo é mencionado o estado da arte, compreendendo as referências fundamentais do trabalho, bem como a metodologia praticada no desdobramento do projeto para cada etapa. A organização é referida adiante, retratando-se os capítulos elaborados durante o aperfeiçoamento do trabalho.

1.1 Justificativas

Há uma grande necessidade por sistemas de controle que diminuam o custo das operações e aumentem o desempenho do sistema. Baseando nestes argumentos justifica-se uma pesquisa para o desenvolvimento de uma metodologia para o projeto e análise de um sistema de controle com atuação para o esforço mínimo. Desta maneira adequando-se ao balanço pendular do movimento da carga de uma ponte rolante. Nestas condições faz jus desenvolver um algoritmo de controle multivariável para um processo não-linear contendo o transporte de cargas.

No intuito de contribuir para os avanços das tecnologias atualmente empregadas na automatização justifica-se a necessidade para estudar métodos e tecnologia de controle inteligente e factível na implementação de sistemas do mundo real. Muitas vezes o custo de construção e implantação depende do retorno financeiro, compensado com a eficiente produtividade empregada nas tarefas de controle. Assim sendo, é necessário o planejamento e diagnóstico de um sistema de controle que eventualmente poderá ser embarcado e

utilizado com maior frequência, comparar as análises de desempenho e justificar uma escolha que melhor satisfaz aos problemas (COSTA, 2010). Logo o controle ótimo bem como o controle Fuzzy e controle *PID* são alguns dos procedimentos que devem ser confrontados e ponderados com o intuito de melhorar o custo e benefício para o processo estudado em (CASTRO, 2017) e do mesmo modo em (ANAND; JAYASREE, 2017). Faz-se necessário, também a concepção de um protótipo de ponte rolante industrial, bem como as simulações por meio de modelos matemáticos que são implementados nas plataformas computacionais MATLAB® e Simulink®.

Um estudo a respeito das normas e procedimentos para pontes rolantes que é apresentado no Apêndice D, mostra a importância e a complexidade operacional destes dispositivos que é uma das justificativas da relevância em desenvolver pesquisa orientada para problemática destes equipamentos.

1.2 Motivação

O controle *PID* ainda é o modo mais utilizado devido a sua simplicidade e praticidade apesar das dificuldades de sintonia para sistemas multivariáveis. Portanto o sistema em Ponte Rolante tem sido estudado para buscar a melhor *performance* em termos de balanço, movimentação e robustez. Desta forma contorna-se os prejuízos inerentes aos problemas de deslocamento de cargas na área industrial. O problema é maior considerando-se o grau de liberdade de movimento em três dimensões ocasionando distúrbios não-lineares, provenientes das forças não modeladas no sistema. Motivado pelo exposto, apresenta-se nesta dissertação uma metodologia que pode refletir uma nova maneira de controle via algoritmo de controle utilizando a Lógica Fuzzy e o Regulador Linear Quadrático (LEITE; NETO; COSTA, 2018).

1.3 Objetivos

Os objetivos deste trabalho estão categorizados em gerais e específicos. Desta forma, distinguem-se os pontos abrangentes a serem alcançados para que sejam logrados os fins essenciais.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia para o projeto de sistema de controle que se baseia em controle ótimo do tipo *LQR* e Lógica Fuzzy para o controle de oscilações pendulares da carga durante sua trajetória de deslocamento

1.3.2 Objetivo Específicos

1. Levantar o modelo matemático de um ponte rolante que descreve o movimento da ponte (x_{ponte}) e do trole (y_{trole}) no plano X , Y e Z . O modelo baseia-se em sistemas de tempo contínuo.
2. Desenvolver uma metodologia para o projeto de um Sistema de Controle com propriedades ótimas e Fuzzy (Controlador *Fuzzy-Ótimo*) para ponte rolante em estudo.
3. Desenvolver Algoritmos para Controladores *Fuzzy-Ótimo* dedicados ao controle pendular da carga em pontes rolantes do tipo pórtico.
4. Avaliar o desempenho dos algoritmos de controle *Fuzzy-Ótimo* e comparar com um controlador *PID*.

1.4 Estado da Arte

Neste trabalho envolvendo os assuntos de pontes rolantes, modelagem de sistemas dinâmicos, métodos para o projeto de sistemas de controle e otimização, o estado da arte desta pesquisa abrange conhecimentos que são relatos provenientes de artigos, dissertações e contato com profissionais operadores destas pontes. Os principais trabalhos que contribuíram para o entendimento e desenvolvimento dos citados tópicos são descritos nos próximos parágrafos.

No trabalho de (AKSJONOV, 2015) é apresentado o modelo matemático que envolve a ponte rolante com três eixos X , Y e Z . Neste trabalho desenvolve-se um modelo matemático que envolve os principais parâmetros da ponte rolante. Baseando-se nessa dissertação, o artigo (AKSJONOV; VODOVOZOV; PETLENKOV, 2015) propõe continuidade ao projeto, porém utilizando o controle de lógica Fuzzy para controle de balanço da carga.

O artigo (AL-HADITHI et al., 2012) apresenta a ideia de como o controlador *Fuzzy-Ótimo* pode atuar em outros sistemas dinâmicos como o duplo pêndulo invertido onde os resultados apresentam um comportamento semelhante ao estudado nesse trabalho.

O livro de (WANG, 1997) é o guia para a teoria que ocasionou a escolha do controlador *Fuzzy-Ótimo*, em que o algoritmo de controle baseia-se na modelagem Hamiltoniana abordada no livro. Além do mais, apresenta a teoria de estabilidade Fuzzy que envolve o controle no algoritmo. A teoria de controle Fuzzy estudada baseia-se na obra do autor (WANG, 1997). Já o trabalho (LEITE et al., 2018) e principalmente o artigo (LEITE; NETO; COSTA, 2018), apresenta o modelo matemático e desenvolvimento do

algoritmo baseando-se na proposta de controle apenas usando os motores dos eixos X e Y considerando a altura l um valor fixo.

Os demais trabalhos que são referenciados ao longo do texto ajudam no entendimento do sistema estudado e controlado, entre os quais, podemos citar um controlador Fuzzy de precisão em (RAHMANI et al., 2015), controle anti-oscilação de cargas em (WANG; WANG; KONG, 2006) e controle anti-deslizante adaptativo de posição (CHANG et al., 2006) e (ANAND; JAYASREE, 2017). Entre os mais utilizados são controle Fuzzy, adaptativo, PID , Sliding Mode Control (SMC) e robusto.

A técnica de controle Fuzzy e ótimo já utilizada em (AL-HADITHI et al., 2012) envolve o controle *Fuzzy-Ótimo* que pode ser encontrado com mais detalhes em (WANG, 1997) e (WANG; WANG; KONG, 2006). A escolha da lógica Fuzzy, assim como o princípio ótimo como formas de melhorar o desempenho do sistema, ainda está em estudo (WANG, 1997), pois o mesmo apresenta estudos preliminares sobre o tema. Portanto o presente trabalho propõe apresentar o desenvolvimento alternativo de controle via espaço de estados usando métodos de controles Fuzzy e Ótimo, considerando o balanço da carga.

Na referência (SMOCZEK; SZPYTKO, 2017) é apresentado um estudo sobre a modelagem e implementação de técnicas de controle de sistemas tipo ponte rolante, através de controladores PID e controlador por realimentação de estados, para um sistema com dois graus de liberdade. Em (CASTRO, 2017), o autor propõe um sistema de controle com controlador proporcional, integral e derivativo (PID) para efetuar o transporte de cargas em pontes rolantes.

Em (LEITE et al., 2018), um sistema de controle não-linear para a ponte rolante é proposto, visando controlar a posição do carro e minimizar as oscilações da carga utilizando o método de *Lyapunov* para gerar uma lei de controle estável. Em (CHANG et al., 2006), os autores apresentam um modelo de controle dinâmico e não linear de uma ponte rolante em três dimensões. Na referência (CHANG et al., 2006), os autores propuseram um modelo de controle contra o balanço de cargas em pontes rolantes utilizando aprendizado interativo.

Todos os trabalhos, citados nos parágrafos anteriores, tiveram como principal objetivo propor uma solução de controle envolvendo a posição de movimentação e atenuação das oscilações, durante o processo de transporte de cargas em pontes rolantes. Logo a proposta de dissertação segue nessa diretriz, em que o estudo de controle de vários métodos contribuam para promover melhorias para a operação de pontes rolantes.

1.5 Metodologia do trabalho

Neste dissertação, apresenta-se uma metodologia de controle *Fuzzy-Ótimo* para Pontes Rolantes. O projeto envolve a simulação em software MATLAB[®] bem como a

possibilidade de implantação no mundo real. O projeto original envolve a aplicação em uma ponte rolante em escala reduzida, desenvolvida em laboratório. Tais objetivos podem ser simulados e comparados aos meios convencionais de controle como o *PID*. Os meios para a implantação real, depende exclusivamente do código fonte para a aplicação do algoritmo de controle. É necessário apresentar as condições de confiabilidade, eficiência e robustez para o sinal de entrada do sistema e comparar como os sinais de controle convencionais. Existem diversas possibilidades de averiguar as respostas de controle de uma sistema, entretanto é explorado o método de deslocamento ao degrau unitário como resposta ao movimento da ponte rolante. A Figura 2 apresenta as metodologias e as etapas para a solução dos problema de balanço de carga.

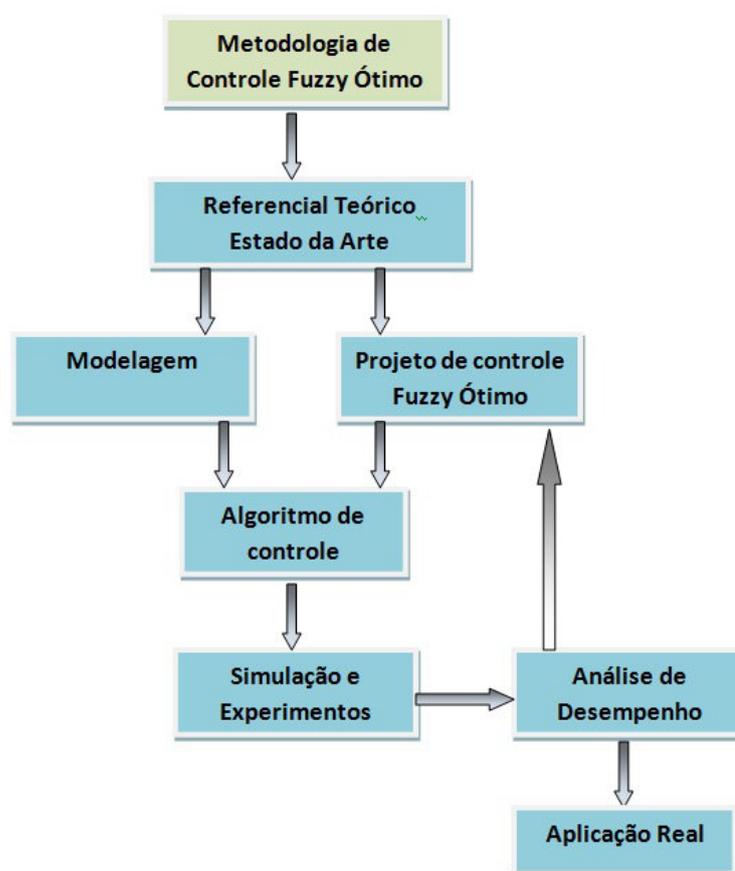


Figura 2 – Metodologia para o Desenvolvimento de Controle *Fuzzy-Ótimo*

Após a etapa do referencial teórico a metodologia para o desenvolvimento do sistema de controle é constituída das etapas de modelagem e controle. Observando-se a Figura 2, verifica-se que o projeto de controladores *Fuzzy-Ótimo* está em um ciclo que é formado pelo blocos do algoritmo de controle, simulações e experimentos. O bloco Aplicação-Real é relacionado com a implantação do controle *Fuzzy-Ótimo* proposto em sistemas do mundo real.

1.6 Organização da Dissertação

O restante da dissertação contém cinco capítulos que tratam a respeito do estado da arte, sistemas de controle, modelagem e normas de pontes rolantes. Os referidos capítulos estão associados com apêndices que são elaborados para complementar a compreensão desta dissertação.

No Capítulo 3, o modelo de controle ótimo, os conceitos para o projeto, assim como o estudo envolvendo a lógica Fuzzy são abordados. No mesmo capítulo apresenta-se o desenvolvimento do modelo matemático envolvendo a ponte rolante e as equações dinâmicas do movimento utilizando a equação de *Lagrange*.

O desenvolvimento da metodologia de projeto de controle *Fuzzy-Ótimo* para elaboração dos algoritmos de controle é apresentada no Capítulo 4. Continuando, a construção de um protótipo em laboratório de uma ponte rolante dentro das características de projeto são apresentados no Capítulo 4.

Os resultados promovidos pelas implementações dos algoritmos são analisados e discutidos no Capítulo 5. Como também as comparações do controle *PID* e do controle *Fuzzy-Ótimo* que fornecem subsídios para análise de desempenho.

No Capítulo 6 é apresentada a conclusão, comentários a respeito do sistema desenvolvido e suas consequências para a melhorias do comportamento dinâmico da planta. Como também, os trabalhos futuros que são advindos dos resultados desta pesquisa.

No Apêndice A é apresentado o diagrama de Blocos do Simulink® que está associado com os resultados de avaliação da proposta do Capítulo 5. No Apêndice B é apresentado o desenvolvimento matemático complementar de modelo da ponte rolante que é apresentado no Capítulo 3.

No Apêndice C é apresentado os dispositivos e elementos que compõem a ponte rolante, este apêndice é associado com o Capítulo 3 no sentido que ajuda o projetista a compreender o objeto a ser controlado, no caso a ponte rolante. Como também está associado com o Capítulo 5, fornecendo os parâmetros para simulação do comportamento da planta.

No Apêndice D as principais normas e procedimentos para pontes rolantes são descritas, tal como: Norma Regulamentadora 11 (NR 11) do Ministério do Trabalho e Emprego estabelece de procedimentos de segurança para operação de elevadores, guindastes, transportadores industriais e máquinas transportadoras. As normas de segurança envolvendo os equipamentos e materiais que promovem a segurança em pontes rolantes, onde são padronizados aspectos de inspeção e sinalização que são apresentadas e comentadas neste apêndice.

No Anexo A são apresentadas os principais artigos relacionados diretamente com o

trabalho e que sevem de base para o desenvolvimento teórico e experimental do projeto de controle.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM MATEMÁTICA DA PONTE ROLANTE

2.1 Modelo 3D da Ponte Rolante

O Modelo matemático proposto para o sistema representa o posicionamento da ponte no eixo X e do trole no eixo Y , bem como a posição da carga nos eixos X , Y e Z . Desta forma, define-se o sistema com três movimentos, simultaneamente possíveis, provocando um balanço da carga em três dimensões. Os ângulos associados com o balanço são dois, α (alpha) e β (beta). Portanto a ponte rolante é definida como um sistema que tem como atuadores de saída, três motores de corrente contínua (CC) e três sensores de movimento, chamados de *encoders*. Além do mais, há também os sensores de detecção dos ângulos α e β da carga.

A metodologia proposta é baseada na teoria de controle que baseia-se em modelos matemáticos que representam a dinâmica da planta para fins de projeto. Estes modelos são levantados por meio da teoria de identificação de sistemas a partir de medições das variáveis de interesse. Em um segundo momento, estes modelos podem ser descritos no espaço de estados e/ou função de transferência, a escolha da abordagem depende da técnica de controle que é escolhida para projeto.

Os tópicos abordados nesta seção conduzem ao modelo matemático da planta em estudo e o modelo da ponte rolante para fins de projeto de controladores *Fuzzy-Ótimo*. Os principais tópicos e seus conteúdos são listados e comentados para uma melhor compreensão do comportamento dinâmico da ponte rolante. Estes conteúdos são associados com o Apêndice C que trata dos dispositivos e elementos da ponte rolante, tais como: sensores, atuadores e sistemas de controle. Estes tópicos são organizados de acordo com a inserção no contexto do desenvolvimento da metodologia proposta. As diretrizes para

obtenção do Modelo 3D da ponte rolante que é utilizado nesta dissertação são dados por

1. Modelo Dinâmico de uma Ponte Rolante (Equações para a Posição da Carga. Parâmetros da Ponte Rolante, Equações Dinâmicas, Linearizações);
2. Modelo Lagrangeano;
3. Função Lagrangeana (Lagrange e o Princípio de *Hamilton*, Variáveis diferenciáveis, Velocidade da Carga em três dimensões (X, Y e Z), Energia Cinética Total da Ponte Rolante, A Energia Potencial Total da Ponte Rolante, A Equação de Lagrange, Formulação Euler-Lagrange Linearização para pequenos ângulos, Separação das variáveis de segunda ordem).

2.2 Modelo Dinâmico de uma Ponte Rolante

A equações para a posição da carga (2.3), parâmetros da ponte rolante (2.4), equações dinâmicas (2.5), linearizações (2.5.1) são os principais assuntos abordados nesta seção.

2.3 Equações para a Posição da Carga

Utilizando o desenho simplificado de posição da carga, obtêm-se os ângulos α e β através das projeções dos eixos x_1 , x_2 , y_1 e l na Figura 3.

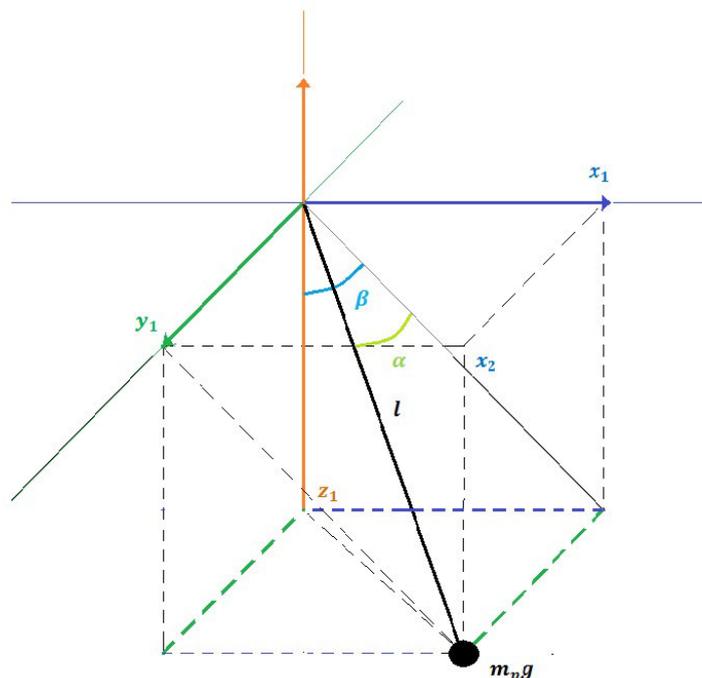


Figura 3 – Posição angular da carga em 3D

Assim, obtém-se a projeção trigonométrica dos senos e cossenos dos ângulos α e β que é dada por

$$\sin \beta = \frac{x_1}{x_2}, \quad (2.1)$$

$$\sin \alpha = \frac{y_1}{l}, \quad (2.2)$$

$$\cos \alpha = \frac{x_2}{l}, \quad (2.3)$$

e

$$\cos \beta = \frac{z_1}{x_2}. \quad (2.4)$$

A posição da carga vista dos eixos fixos horizontais e verticais x_1 , y_1 e z_1 são dados por

$$x_1 = l \cos \alpha \sin \beta, \quad (2.5)$$

$$y_1 = l \sin \alpha, \quad (2.6)$$

e

$$z_1 = l \cos \alpha \cos \beta. \quad (2.7)$$

A Figura 4 apresenta o limite de atuação horizontal de trabalho para os eixos X_{ponte} e Y_{trole} onde a ponte poderá movimentar-se até o limite de atuação.

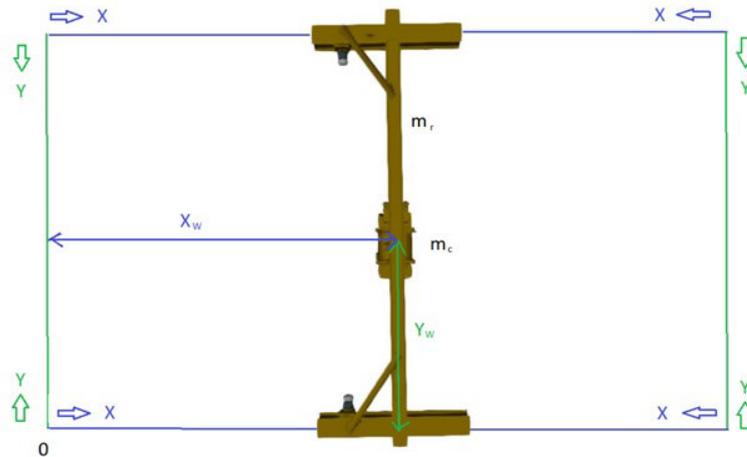


Figura 4 – Área de movimento horizontal da Ponte no eixo X e do trole em Y

Para calcular a posição da carga em cada eixo, deve-se considerar a posição da ponte X_{ponte} e a posição do trole Y_{trole} na área de atuação horizontal da ponte mais a

posição da carga vista dos eixos fixos horizontais e verticais x_1 , y_1 e z_1 . As equações de posição da carga são dadas por

$$x_{carga} = x_{ponte} + x_1 = x_{ponte} + l \cos \alpha \sin \beta, \quad (2.8)$$

$$y_{carga} = y_{trole} + y_1 = y_{trole} + l \sin \alpha, \quad (2.9)$$

e

$$z_{carga} = z_1 = l \cos \alpha \cos \beta. \quad (2.10)$$

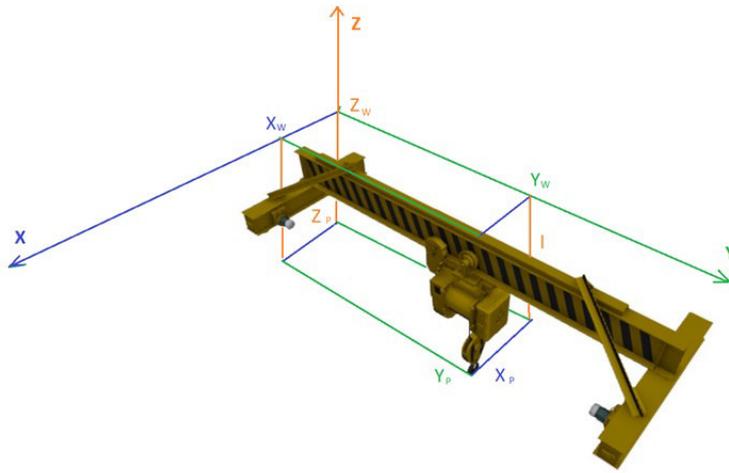


Figura 5 – Área de movimento horizontal da Ponte no eixo X, Y e vertical em Z

2.4 Parâmetros da Ponte Rolante

As variáveis necessárias para o modelo proposto, deve levar em consideração as massas da carga m_{carga} , a massa da ponte m_{ponte} e a massa do trole m_{trole} . Os parâmetros como a altura do içamento l , nesse modelo podem variar durante o movimento da carga. Os valores das massas da ponte devem ser medidas em kg e as posições X_{ponte} , Y_{trole} e l em metros, os ângulos α e β são medidos em radianos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição dos parâmetros do sistema dinâmico

Simbolo	Descrição
m_{trole}	Massa do trole
m_{carga}	Massa da carga
m_{ponte}	Massa da ponte
x_{carga}	Posição da carga no eixo X
y_{carga}	Posição da carga no eixo Y
z_{carga}	Posição da carga no eixo Z
S	Força de reação atuando no levantamento da carga
x_{ponte}	Posição da ponte no eixo X
y_{trole}	Posição do trole no eixo Y
α	Ângulo entre a projeção ZY e o cabo l
β	Ângulo entre o eixo Z e a projeção do cabo l em XZ
g	Aceleração da gravidade
F_x	Força de direção da ponte no trilho X
F_y	Força de direção do trole no trilho Y
l	Altura entre a ponte e a carga
T_x	Força de tensão no eixo X
T_y	Força de tensão no eixo Y

2.5 Equações Dinâmicas

Utilizando da segunda lei de Newton $\vec{F} = m\vec{a}$ para as forças do sistema, obtêm-se os vetores das forças na Figura 6 e da Tabela 1.

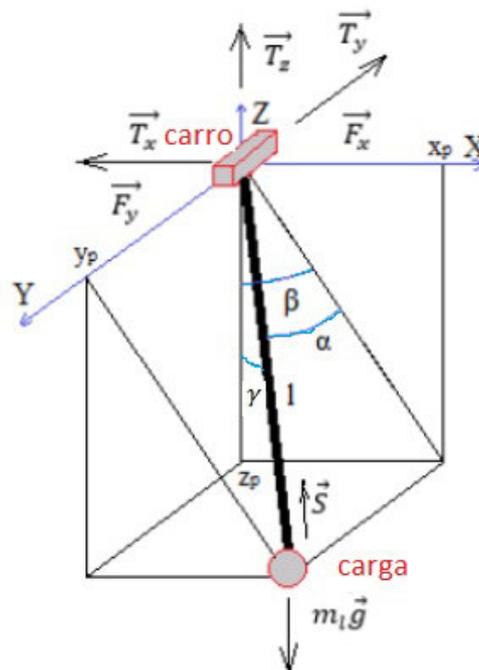


Figura 6 – Diagrama do trole em 3D

Para descrever a dinâmica do sistema da ponte rolante usamos a segunda lei de Newton para o movimento. As componentes das forças são:

– A componente S_x é a força de reação do cabo l no eixo X , sendo que essa força é igual a massa da carga m_{carga} vezes a aceleração da carga \ddot{x}_{carga} no eixo x_{carga} que é dada por

$$m_{carga}\ddot{x}_{carga} = S_x, \quad (2.11)$$

– A componente S_y é a força de reação do cabo l no eixo Y , sendo que essa força é igual a massa da carga m_{carga} vezes a aceleração da carga \ddot{y}_{carga} no eixo y_{carga} que é dado por

$$m_{carga}\ddot{y}_{carga} = S_y, \quad (2.12)$$

– A componente S_z é a força de reação do cabo l no eixo Z , sendo que essa força negativa é igual a massa da carga m_{carga} vezes a aceleração da carga \ddot{z}_{carga} no eixo z_{carga} que é dado por

$$m_{carga}\ddot{z}_{carga} = -S_z, \quad (2.13)$$

– A força resultante para o trilho X_{ponte} , envolve a massa da ponte m_{ponte} mais a massa do trole m_{trole} vezes a aceleração \ddot{x}_{ponte} , assim a resultante é igual à Força de direção F_x menos a a força de tração T_x mais a força de reação do levantamento da carga é dada por

$$(m_{trole} + m_{ponte})\ddot{x}_{ponte} = F_x - T_x + S_x, \quad (2.14)$$

– A força resultante para o trilho Y_{trole} , envolve a massa do trole m_{trole} vezes a aceleração \ddot{y}_{trole} , assim a resultante é igual à Força de direção F_y menos a a força de tração T_y mais a força de reação do levantamento da carga é dada por

$$m_{trole}\ddot{y}_{trole} = F_y - T_y + S_y, \quad (2.15)$$

sendo as componentes dos eixos da força de tração S no cabo l dados por

$$S_x = S \cos \alpha \sin \beta, \quad (2.16)$$

$$S_y = S \sin \alpha, \quad (2.17)$$

e

$$S_z = S \cos \alpha \cos \beta. \quad (2.18)$$

As Equações (2.16 – 2.18) são baseados nas funções $S = \{x_1, y_1, z_1\}$ onde S representa o cabo l . Tornando N_x , N_y e N_z como a forças de entrada do sistema Ponte Rolante e igualando a $N_z = S$, $N_x = F_x - T_x$ e $N_y = F_y - T_y$, substituindo nas Equações

(2.12 – 2.15), separando as variáveis diferenciáveis de segunda ordem \ddot{x}_{carga} , \ddot{y}_{carga} , \ddot{z}_{carga} , \ddot{x}_{ponte} e \ddot{y}_{trole} , tem-se que

$$\ddot{x}_{carga} = \frac{N_z \cos \alpha \sin \beta}{m_{carga}}, \quad (2.19)$$

$$\ddot{y}_{carga} = \frac{N_z \sin \alpha}{m_{carga}}, \quad (2.20)$$

$$\ddot{z}_{carga} = \frac{-N_z \cos \alpha \cos \beta}{m_{carga}}, \quad (2.21)$$

$$\ddot{x}_{ponte} = \frac{N_x + N_z \cos \alpha \sin \beta}{(m_{trolley} + m_{ponte})}, \quad (2.22)$$

e

$$\ddot{y}_{trole} = \frac{N_y + N_z \sin \alpha}{m_{trolley}}. \quad (2.23)$$

O modelo dinâmico com as Equações (2.19–2.23) é um sistema de equações diferenciais não-linear de segunda ordem.

2.5.1 Linearizações

Se assumir que o desvio da carga do eixo z for pequeno, o modelo dinâmico pode ser simplificado. Assuma que ambos os ângulos α e β são muito pequenos, quase insignificantes. As regras para a aproximação trigonométricas são desenvolvidas aplicando a relação trigonométrica do cosseno da soma de dois ângulos, linearizando em torno de 90 graus, as relações das aproximações são dadas por

$$\cos \alpha = \cos \left(\frac{\pi}{2} - (-\Delta\alpha) \right) = \cos \frac{\pi}{2} \cos (-\Delta\alpha) + \sin \frac{\pi}{2} \sin (-\Delta\alpha) = -\sin \Delta\alpha \cong -\Delta\alpha, \quad (2.24)$$

$$\sin \alpha = \sin \left(\frac{\pi}{2} + \Delta\alpha \right) = \sin \frac{\pi}{2} \cos \Delta\alpha + \cos \frac{\pi}{2} \sin \Delta\alpha = \cos \Delta\alpha \cong 1, \quad (2.25)$$

$$\sin \alpha \cong \alpha, \quad (2.26)$$

$$\cos \alpha \cong 1, \quad (2.27)$$

$$\cos \beta \cong 1, \quad (2.28)$$

e

$$\sin \beta \cong \beta. \quad (2.29)$$

Utilizando a aproximação trigonométrica dadas por (2.26–2.29) simplifica-se as Equações (2.19–2.23), formando assim as novas equações dinâmicas dadas por

$$\ddot{x}_{carga} = \frac{N_z \beta}{m_{carga}}, \quad (2.30)$$

$$\ddot{y}_{carga} = \frac{N_z \alpha}{m_{carga}}, \quad (2.31)$$

$$\ddot{z}_{carga} = \frac{-N_z}{m_{carga}}, \quad (2.32)$$

$$\ddot{x}_{ponte} = \frac{N_x + N_z \beta}{(m_{trole} + m_{ponte})}, \quad (2.33)$$

e

$$\ddot{y}_{trole} = \frac{N_y + N_z \alpha}{m_{trole}}. \quad (2.34)$$

Observando as Equações (2.30–2.34), pode-se perceber a dinâmica de N_z nas demais equações. Como N_x , N_y e N_z são as forças de entrada do sistema, haverá uma mudança em todo o sistema se N_z variar com o tempo, ou seja o sistema com l fixo é linear, e quando l varia no tempo, o sistema torna-se não-linear.

2.6 Modelo Lagrangeano

A formulação da mecânica clássica postulada por Joseph-Louis de Lagrange relaciona a conservação de energia mecânica com a conservação do momento linear de um sistema dinâmico. É antecessora às formulações das mecânicas Hamiltoniana e Newtoniana, sendo assim, considerada de fundamental importância a estas.

2.7 Função Lagrangeana

Na mecânica clássica, a forma natural do Lagrangeano é definida como a energia cinética K do sistema menos sua energia potencial gravitacional P que é dada por

$$L(q, \dot{q}, t) = K(q, \dot{q}, t) - P(q), \quad (2.35)$$

Assim, o Lagrangeano (uma função de coordenadas) é igual à diferença entre as energias cinética (K) e potencial (P) de uma partícula em movimento, levando-se em consideração a taxa de variação das coordenadas generalizadas, das velocidades generalizadas

da partícula e do tempo: apenas a energia potencial é unidimensional, sendo esta baseada nas coordenadas de posição da partícula.

Assim a energia cinética do movimento da massa é dada por

$$K = \frac{1}{2}mv^2, \quad (2.36)$$

sendo $m =$ a massa, $v =$ é a velocidade e a energia potencial gravitacional é dada por

$$P = mgl. \quad (2.37)$$

sendo $m =$ massa, $g =$ aceleração da gravidade, $l =$ altura do içamento.

2.8 Lagrange e o Princípio de Hamilton

A mecânica Hamiltoniana defende que dentre os diversos caminhos que um sistema dinâmico dispõe para realizar movimento entre dois pontos, será escolhido espontaneamente àquele que torna menor a diferença entre as energias cinética e potencial (NAIDU., 2002). De modo que

$$\delta \int (K - P)dt = 0, \quad (2.38)$$

sendo δ a variação. Desse princípio Hamiltoniano, obtêm-se as equações diferenciais parciais de segunda ordem em t de Euler-Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0. \quad (2.39)$$

Dessas equações diferenciais parciais, conclui-se que, num sistema conservativo, a diferença entre as Lagrangeanas de dois pontos consecutivos em relação ao tempo é nula. Portanto, as perdas energéticas também são.

Para um sistema não conservativo (dissipativo), vale o seguinte:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F_i, \quad (2.40)$$

sendo

$i = 1,2,3,4,5$ os graus de liberdade;

L - O Lagrangeano de um sistema dinâmico;

q_i - coordenadas generalizadas;

F_i - Força reativa não conservativa;

Assim atribuindo a função Euler-Lagrange para cada estado x_i , y_i , z_i , α_i e β_i . A partir da Equação (2.40), obtém-se a formação do sistemas de equações que é dado por

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_i} = u_x \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial y_i} = u_y \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial z_i} = u_z \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \beta_i} = 0 \end{cases} \quad (2.41)$$

2.9 Variáveis diferenciáveis

De forma similar a Seção 2.3 a obtenção das variáveis de posição da carga na ponte rolante, deriva-se a posição da carga nos três eixos para a obtenção da velocidade nestes pontos, as posições são dadas por

$$x_1 = l \cos \alpha \sin \beta, \quad (2.42)$$

$$y_1 = l \sin \alpha, \quad (2.43)$$

e

$$z_1 = l \cos \alpha \cos \beta. \quad (2.44)$$

As posições da carga nas coordenadas cartesianas X , Y e Z são dadas por

$$x_{carga} = x_{ponte} + x_1, \quad (2.45)$$

$$y_{carga} = y_{trole} + y_1, \quad (2.46)$$

$$x_{ponte} = x, \quad (2.47)$$

$$y_{trole} = y, \quad (2.48)$$

$$x_{carga} = x + l \cos \alpha \sin \beta, \quad (2.49)$$

$$y_{carga} = y + l \sin \alpha, \quad (2.50)$$

e

$$z_{carga} = -l \cos \alpha \cos \beta. \quad (2.51)$$

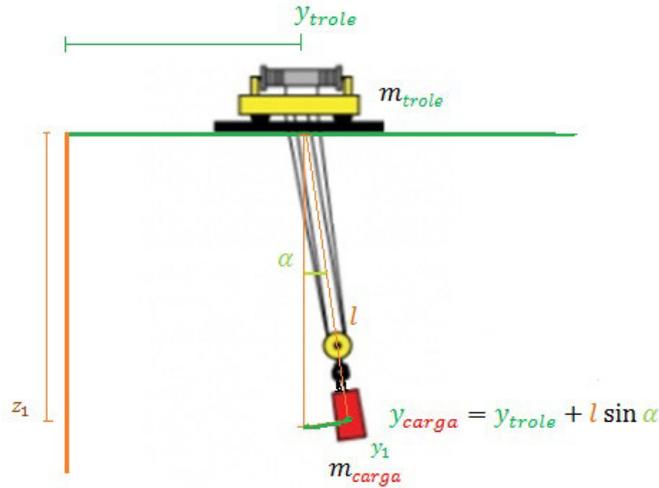


Figura 7 – Balanço da carga no eixo Y.

Assim derivando as posições da carga a Equação (2.49), Equação (2.50) e Equação (2.51) obtém-se as velocidades na carga dadas por

$$\dot{x}_{carga} = \dot{x} + \dot{l} \cos \alpha \sin \beta - l \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta, \quad (2.52)$$

$$\dot{y}_{carga} = \dot{y} + \dot{l} \sin \alpha + l \dot{\alpha} \cos \alpha, \quad (2.53)$$

e

$$\dot{z}_{carga} = -\dot{l} \cos \alpha \cos \beta + l \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta + l \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta. \quad (2.54)$$

Obtendo portanto, as velocidades na carga necessárias para o cálculo da energia cinética total do sistema.

2.10 Velocidade da Carga em três dimensões (X , Y e Z)

A velocidade da carga leva em consideração os eixos X , Y e Z da carga na equação abaixo, no entanto devemos elevar as velocidades obtidas ao quadrado e somá-las, assim obtém-se

$$v^2 = \dot{x}_{carga}^2 + \dot{y}_{carga}^2 + \dot{z}_{carga}^2, \quad (2.55)$$

na qual a Equação (2.52), Equação (2.53) e Equação (2.54) são inseridas na Equação (2.55) obtendo-se

$$v^2 = \left(\dot{x} + \dot{l} \cos \alpha \sin \beta - l \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \right)^2 + \left(\dot{y} + \dot{l} \sin \alpha + l \dot{\alpha} \cos \alpha \right)^2 + \left(-\dot{l} \cos \alpha \cos \beta + l \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta + l \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta \right)^2. \quad (2.56)$$

Velocidade da Carga total considerando no eixo X , Y e Z é dada por

$$\begin{aligned} v^2 = & \dot{x}^2 + 2\dot{x}\dot{l} \cos \alpha \sin \beta - 2l\dot{x}\dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + 2l\dot{x}\dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta + \dot{l}^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta \\ & - 2l\dot{l}^2 \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \alpha \sin^2 \beta + 2l\dot{l}\dot{\beta} \cos^2 \alpha \sin \beta \cos \beta + l^2 \dot{\alpha}^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta \\ & - 2l^2 \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \cos \alpha \sin \beta \cos \beta + l^2 \dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \dot{y}^2 + 2\dot{y}\dot{l} \sin \alpha \\ & + 2l\dot{y}\dot{\alpha} \cos \alpha + \dot{l}^2 \sin^2 \alpha + 2l\dot{l}\dot{\alpha} \sin \alpha \cos \alpha + l^2 \dot{\alpha}^2 \cos^2 \alpha \\ & + \dot{l}^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + 2l^2 \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \cos \alpha \sin \beta \cos \beta + l^2 \dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta. \end{aligned} \quad (2.57)$$

Sendo que a equação simplificada da velocidade é dada por

$$v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{l}^2 + 2\dot{x} \left(\dot{l} \cos \alpha \sin \beta - l \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \right) + 2\dot{y} \left(\dot{l} \sin \alpha - l \dot{\alpha} \cos \alpha \right) + l^2 \dot{\alpha}^2 + l^2 \dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha. \quad (2.58)$$

2.11 Energia Cinética Total da Ponte Rolante

Na energia cinética, podemos mensurar que as massas envolvidas ao eixo X_{ponte} são m_{trole} , m_{ponte} e m_{carga} ou seja considera-se a massa total para o motor X_{ponte} , já para o eixo Y_{trole} , deve-se considerar m_{trole} e m_{carga} . No caso do eixo $Z = l$ do içamento do cabo considera-se apenas a massa m_{carga} . Assim a energia cinética é formada por

$$K = \frac{1}{2} \left((m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga}) \dot{x}^2 + (m_{trole} + m_{carga}) \dot{y}^2 + m_{carga} \dot{l}^2 \right) + \frac{1}{2} m_{carga} v^2, \quad (2.59)$$

$$\begin{aligned} K = & \frac{1}{2} \left((m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga} + m_{carga}) \dot{x}^2 + (m_{trole} + m_{carga} + m_{carga}) \dot{y}^2 + 2m_{carga} \dot{l}^2 \right) \\ & + m_{carga} \dot{x} \left(\dot{l} \cos \alpha \sin \beta - l \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \right) + \\ & m_{carga} \dot{y} \left(\dot{l} \sin \alpha + l \dot{\alpha} \cos \alpha \right) + \frac{1}{2} m_{carga} l^2 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} m_{carga} l^2 \dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha. \end{aligned} \quad (2.60)$$

2.12 A Energia Potencial Total da Ponte Rolante

Considerando o referencial da ponte e trole zero para o eixo Z , a energia potencial total é definida. Abaixo do referencial sendo negativo, o comprimento do cabo l e a altura da ponte H , além da variação angular α e β de z_1 , a massa da carga m_{carga} e da gravidade g . A energia potencial total da ponte rolante é dada por

$$P = (m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga})gH - m_{carga}gl \cos \alpha \cos \beta. \quad (2.61)$$

2.13 A Equação de Lagrange

Ao obter as Equações (2.60) e (2.61) pode-se inserir na função de Lagrange ao subtraímos a energia cinética menos a energia potencial.

$$L = K - P. \quad (2.62)$$

O Lagrangeano (2.62) tem as mesmas dimensões da energia, ou seja, no Sistema Internacional sua unidade de medida é o Joule. Assim obtemos L a função de Lagrange para o sistema com as coordenadas generalizadas cartesianas x , y , z , e as coordenadas generalizadas angulares α e β , dados por

$$\begin{aligned} L = & \frac{1}{2} \left((m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga} + m_{carga}) \dot{x}^2 + (m_{trole} + m_{carga} + m_{carga}) \dot{y}^2 + 2m_{carga} \dot{l}^2 \right) \\ + & m_{carga} \dot{x} \left(\dot{l} \cos \alpha \sin \beta - l \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \right) + m_{carga} \dot{y} \left(\dot{l} \sin \alpha \right) \\ & + l \dot{\alpha} \cos \alpha + \frac{1}{2} m_{carga} l^2 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} m_{carga} l^2 \dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha - m_{carga} gl - m_{carga} gl \cos \alpha \cos \beta. \end{aligned} \quad (2.63)$$

2.14 Formulação Euler-Lagrange

A formulação do princípio da ação mínima é representado pela equações diferenciais parciais que são dadas por

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F_i. \quad (2.64)$$

A expressão que aparece na Equação (2.64) é denominada equações de Euler-Lagrange porque o matemático suíço Leonard Euler (1707-1783) contribuiu consideravelmente para a formulação do princípio da ação mínima.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_i} = u_x \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial y_i} = u_y \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial z_i} = u_z \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \beta_i} = 0 \end{cases} \quad (2.65)$$

Ao derivar as equações lagrangeanas para cada coordenada, pode-se encontrar as equações do sistema ao substituirmos na Equação (2.65), que são dadas por

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = & (m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga}) \ddot{x} + m_{carga} \dot{l} \cos \alpha \sin \beta - m_{carga} \dot{l} \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta \\ + & m_{carga} \dot{l} \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta - m_{carga} \dot{l} \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta - m_{carga} \dot{l} \ddot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta \\ - & m_{carga} l \dot{\alpha}^2 \cos \alpha \sin \beta - m_{carga} \dot{l} \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta + m_{carga} \dot{l} \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \\ + & m_{carga} l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta - m_{carga} l \dot{\beta} \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta - m_{carga} l \dot{\beta}^2 \cos \alpha \sin \beta, \end{aligned} \quad (2.66)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} = (m_c + m_{carga}) \ddot{y} + m_{carga} \ddot{l} \sin \alpha + m_{carga} \dot{l} \dot{\alpha} \cos \alpha + m_{carga} \dot{l} \dot{\alpha} \cos \alpha + m_{carga} \dot{l} \ddot{\alpha} \cos \alpha - m_{carga} l \ddot{\alpha}^2 \sin \alpha, \quad (2.67)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{l}} \right) - \frac{\partial L}{\partial l} &= 2m_{carga} \ddot{l} + m_{carga} \dot{x} \cos \alpha \sin \beta - m_{carga} \dot{x} \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta \\ &+ m_{carga} \dot{x} \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta + m_{carga} \ddot{y} \sin \alpha + m_{carga} \dot{y} \dot{\alpha} \cos \alpha - (-m_{carga} \dot{x} \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta \\ &+ m_{carga} \dot{x} \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta + m_{carga} \dot{y} \dot{\alpha} \cos \alpha + m_{carga} \dot{l} \dot{\beta} \cos^2 \alpha + m_{carga} \dot{l} \dot{\alpha}^2) \\ &- m_{carga} g \cos \alpha \cos \beta, \end{aligned} \quad (2.68)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} &= -m_{carga} \ddot{x} l \sin \alpha \sin \beta - m_{carga} \dot{x} \dot{l} \sin \alpha \sin \beta - m_{carga} l \dot{x} \dot{\alpha} \cos \alpha \cos \beta \\ &- m_{carga} l \dot{x} \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta + m_{carga} \ddot{y} l \cos \alpha + m_{carga} \dot{y} \dot{l} \cos \alpha - m_{carga} l \dot{y} \dot{\alpha} \sin \alpha \\ &+ m_{carga} l^2 \ddot{\alpha} + 2m_{carga} l \dot{l} \dot{\alpha} - (-m_{carga} \dot{x} \dot{l} \sin \alpha \sin \beta - m_{carga} l \dot{x} \dot{\alpha} \cos \alpha \sin \beta \\ &- m_{carga} l \dot{x} \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta + m_{carga} \dot{y} \dot{l} \cos \alpha - m_{carga} l \dot{y} \dot{\alpha} \sin \alpha - m_{carga} l^2 \dot{\beta}^2 \sin \alpha \cos \alpha), \end{aligned} \quad (2.69)$$

e

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \beta} &= m_{carga} \ddot{x} l \cos \alpha \cos \beta + m_{carga} \dot{x} \dot{l} \cos \alpha \cos \beta - m_{carga} l \dot{x} \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta \\ &- m_{carga} l \dot{x} \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta + m_{carga} l^2 \dot{\beta} \cos^2 \alpha - 2m_{carga} l^2 \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \cos \alpha \\ &+ 2m_{carga} l^2 \dot{\beta} \cos^2 \alpha + 2m_{carga} l \dot{l} \dot{\beta} \cos^2 \alpha - (m_{carga} \dot{x} \dot{l} \cos \alpha \cos \beta \\ &- m_{carga} l \dot{x} \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta - m_{carga} l \dot{x} \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta) + m_{carga} g l \sin \alpha \cos \beta. \end{aligned} \quad (2.70)$$

2.15 Linearização para pequenos ângulos

Considerando ângulos muito pequenos, pode-se simplificar a Equação (2.66), Equação (2.67), Equação (2.68) e Equação (2.70) para um sistema de equações menor como no Sistema (2.71). Assim a multiplicação entre ângulos ou ângulos elevados ao quadrado podem ser excluídos, pois formam valores ainda menores, tendendo a zero. Os cálculos referentes as simplificações linearizadas são apresentadas com mais detalhes no Apêndice B. O modelo do sistema linearizado é dado por

$$\begin{cases} (m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga}) \ddot{x} + m_{carga} l \ddot{\beta} = u_x \\ (m_{trole} + m_{carga}) \ddot{y} + m_{carga} \dot{l} \ddot{\alpha} = u_y \\ m_{carga} \ddot{l} - m_{carga} g = u_z \\ \ddot{y} + l \ddot{\alpha} + g \alpha = 0 \\ \ddot{x} + l \ddot{\beta} + g \beta = 0 \end{cases} \quad (2.71)$$

Explicitando o modelo linearizado da Equação (2.71) em termos das derivadas de ordem 2, tem-se que

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m_{trole}+m_{ponte}}u_x + \frac{m_{carga}g}{m_{trole}+m_{ponte}}\beta = 0 \\ \ddot{y} = \frac{1}{m_{trole}}u_y + \frac{m_{carga}g}{m_{trole}}\alpha = 0 \\ \ddot{\beta} = -\frac{1}{l(m_{trole}+m_{ponte})}u_x - \frac{g(m_{trole}+m_{ponte}+m_{carga})}{l(m_{trole}+m_{ponte})}\beta = 0 \\ \ddot{\alpha} = -\frac{1}{l(m_{trole})}u_y - \frac{g(m_{trole}+m_{carga})}{l(m_{trole})}\alpha = 0 \\ \ddot{l} = \frac{1}{m_{carga}}u_z + g \end{cases} \quad (2.72)$$

CAPÍTULO 3

CONTROLE ÓTIMO E FUZZY

No intuito de fornecer o embasamento teórico para o desenvolvimento da proposta de controladores *Fuzzy-Ótimo*, as abordagens de controle ótimo e lógica Fuzzy para o desenvolvimento de um sistema de controle com características de otimalidade e *fuzyness* são discutidas neste Capítulo. Como também, apresenta-se a modelagem da ponte para fins de projeto.

Este capítulo é formado por três seções principais que tratam dos elementos para compor o trabalho teórico para o desenvolvimento desta pesquisa. Estes elementos são a) teoria de controle Ótimo (NAIDU., 2002), b) Lógica Fuzzy (ZADEH, 1965) e b) Modelagem de Sistemas Dinâmicos. O controle linear quadrático (*LQR*) é a abordagem da teoria de controle ótimo que promove a otimalidade do sistema de controle. Os conceitos básicos de lógica fuzzy para o desenvolvimento das funções de pertinência e para embasar o projetista são apresentadas na segunda seção. Na última seção é apresentado em detalhes o desenvolvimento matemático do modelo 3D para a ponte rolante apresentada em (AKSJONOV, 2015).

3.1 Controle Ótimo

De acordo com (ATHANS, 1966), o principal objetivo do controle ótimo é determinar os sinais de controle que fazem com que um processo satisfaça restrições físicas e ao mesmo tempo exponha (maximize ou minimize) um critério de desempenho escolhido (índice de desempenho ou função de custo). Referindo-se à Figura 8, o objetivo é determinar a lei do controle ótimo $u^*(t)$ (* indica a condição ótima) que irá conduzir a planta P do estado inicial para o estado final com algumas restrições nos controles e estados e ao mesmo tempo determinado índice de desempenho J . A formulação do problema de controle ótimo requer necessariamente:

1. A descrição matemática (ou modelo) do processo a ser controlado (geralmente em forma de variável de estado);
2. A especificação do índice de desempenho;
3. Uma declaração das condições de contorno e das restrições físicas nos estados e/ou controles.

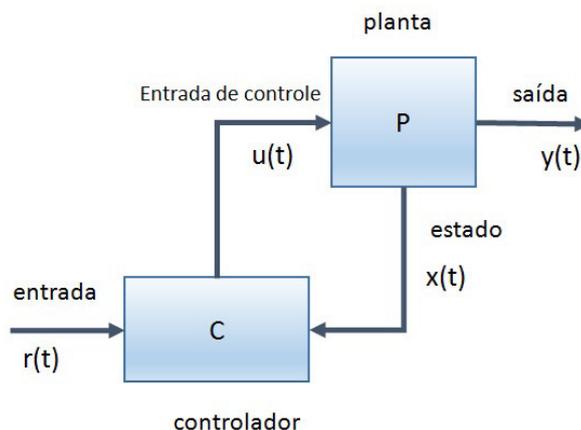


Figura 8 – Configuração de controle moderno.

3.2 Sistema de Controle Moderno

Os principais componentes para o projeto de sistemas de controle moderno são abordagens para modelagem, análise de desempenho e síntese, como pode ser visto na Figura 9. Os blocos da referida figura são comentados da esquerda para direita, a primeira etapa de qualquer teoria do sistema de controle é obter ou formular a dinâmica ou modelagem em termos de equações dinâmicas, como equações diferenciais ou diferenciáveis. A dinâmica do sistema é amplamente baseada na função Lagrangeana. Em seguida, o sistema é analisado por seu desempenho para descobrir principalmente a estabilidade do sistema e a função de *Lyapunov*. Finalmente, se o desempenho do sistema não estiver de acordo com nossas especificações, recorreremos ao projeto. Na teoria de controle ótimo, o projeto envolve a minimização de um índice de desempenho. Notamos que, embora os conceitos como a função de Lagrange e a função V de *Lyapunov* sejam antigos, as técnicas que utilizam esses conceitos são modernas (NAIDU., 2002). A seguir, defini-se os índices de desempenho mais utilizados que são dados por

3.2.1 Índice de desempenho

1. Índice de desempenho para o sistema de controle ótimo: Tentamos transferir um sistema de um estado inicial arbitrário $x(t_0)$ para um estado final especificado $x(t_f)$

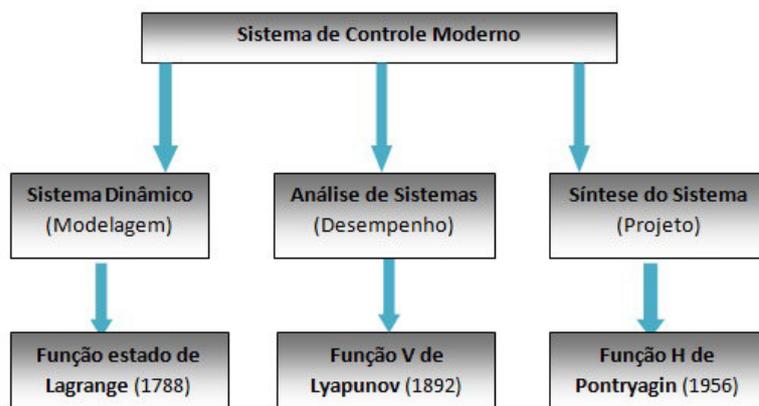


Figura 9 – Componentes de um Sistema de Controle Moderno.

no tempo mínimo. O índice de desempenho correspondente é dado por

$$J = \int_{t_o}^{t_f} dt = t_f - t_o = t^*. \quad (3.1)$$

2. Índice de desempenho para o sistema de controle ótimo para consumo de energia: Considere um problema de naves espaciais. Seja $u(t)$ o impulso de um motor de foguete e assumamos que a magnitude $|u(t)|$ do empuxo é proporcional à taxa de consumo de energia. Para minimizar o gasto total de energia, formula-se o índice de desempenho como em (NAIDU., 2002) que é dado por

$$J = \int_{t_o}^{t_f} |u(t)| dt. \quad (3.2)$$

Para vários controles, pode-se escrevê-lo como

$$J = \int_{t_o}^{t_f} \sum_{i=1}^m R_i |u_i(t)| dt, \quad (3.3)$$

sendo R um fator de ponderação.

3. Índice de Desempenho para o Sistema de Controle de Energia Mínima: Considere $u_i(t)$ como a corrente no i -ésimo laço de uma rede elétrica. Então $\sum_{i=1}^m u_i^2(t) r_i$ (onde, r_i é a resistência do i -ésimo laço) é a potência total ou a taxa total de gasto de energia da rede. Então, para minimizar a energia total consumida, têm-se um critério de desempenho

$$J = \int_{t_o}^{t_f} \sum_{i=1}^m u_i^2(t) r_i dt, \quad (3.4)$$

ou em geral,

$$J = \int_{t_o}^{t_f} u'(t) R u(t) dt, \quad (3.5)$$

sendo R uma matriz definida positiva

Da mesma forma, pode-se pensar na minimização da integral do erro quadrado de um sistema de rastreamento. Tem-se que,

$$J = \int_{t_o}^{t_f} x'(t) Q x(t) dt. \quad (3.6)$$

4. Para um sistema geral de controle ótimo tem-se o índice de desempenho dado por

$$J = x'(t_f) F x(t_f) + \int_{t_o}^{t_f} [x'(t) Q x(t) + u'(t) R u(t)] dt \quad (3.7)$$

ou

$$J = S(x'(t_f), t_f) + \int_{t_o}^{t_f} V(x(t), u(t), t) dt, \quad (3.8)$$

sendo R uma matriz definida positiva, Q e F são matrizes semidefinidas positivas, respectivamente. Note que as matrizes Q e R podem variar no tempo. A forma específica do índice de desempenho da Equação (3.8) é chamada de forma quadrática (em termos de estados e controles) como apresentado em (ATHANS, 1966).

3.2.2 Equações de Hamilton

De todos os caminhos possíveis nos quais um sistema dinâmico pode se mover de um ponto a outro em um intervalo de tempo específico (consistente com quaisquer restrições), o caminho real seguido é aquele que minimiza a integral de tempo da diferença entre as energias cinética e potenciais.

Em termos do cálculo de variações e na Equação (2.62), o Princípio de Hamilton torna-se

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (K - P) dt = 0, \quad (3.9)$$

sendo o símbolo δ uma notação abreviada para descrever a variação. Este procedimento variacional do princípio requer somente que a integral de $K - P$ seja um extremo, não necessariamente um mínimo. Mas em quase todas aplicações importantes em dinâmica, acontece a condição de mínimo. Assim um sistema fechado, a soma da energia cinética e potencial no sistema é representada por um conjunto de equações diferenciais conhecido como as equações de Hamilton. Hamiltonianos podem ser usados para descrever tais sistemas simples como uma bola quicando, um pêndulo ou uma mola oscilante, em que

há interconversão entre as energias potencial e cinética do sistema com o passar do tempo. Hamiltonianos podem também ser empregados para modelar a energia de outros sistemas dinâmicos mais complexos tais como órbitas planetárias e sistemas quânticos (THORNTON, 1995). As equações de Hamilton são geralmente descritas como segue:

$$\dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q} \quad (3.10)$$

e

$$\dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p}. \quad (3.11)$$

Nas Equações (3.10) e (3.11), o ponto acentuado denota a derivada ordinária com respeito ao tempo das equações $p = p(t)$ (chamado de momento generalizado) e $q = q(t)$ (chamado coordenadas generalizadas), tomando valores em algum espaço vetorial, e $H = H(p, q, t)$ é chamado de função Hamiltoniana, ou (valoração escalar) Hamiltoniano. Então explicitamente pode-se escrever de forma equivalente as Equações (3.10) e (3.11) que são dadas por

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial}{\partial q} H(p(t), q(t), t) \quad (3.12)$$

e

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial}{\partial p} H(p(t), q(t), t), \quad (3.13)$$

sendo específico o domínio de valores nos quais o parâmetro t ("tempo") varia. As Equações (3.12) e (3.12) são conhecidas como equações de movimento de Hamilton ou equações canônicas de Hamilton e formam um conjunto de $2n$ equações diferenciais de primeira ordem equivalentes ao sistema de n equações de segunda ordem de Lagrange. As quantidades (p, q) são chamadas variáveis canônicas e o espaço cartesiano de $2n$ dimensões cujos pontos são representados pelas $2n$ -uplas $(p, q) \equiv q_1, \dots, q_n, p_1, \dots, p_n$ é chamado de espaço de fase. Um ponto no espaço de fase define o estado do sistema (posições e velocidade das partículas) num dado instante.

3.3 LQR-Regulador Linear Quadrático

O Regulador Linear Quadrático é apresentado em (ATHANS, 1966), (OGATA, 2010) e (NAIDU., 2002) onde pode-se considerar um controlador linear de uma planta invariante no tempo onde as matrizes em espaço de estados são dadas por

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.14)$$

e

$$\dot{y}(t) = Cx(t) \quad (3.15)$$

A função custo é dada por

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x'(t)Qx(t) + u'(t)Ru(t)]dt. \quad (3.16)$$

A lei de ação do controle ótimo é dado por

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T Px^*(t). \quad (3.17)$$

Sendo, P com dimensão nxn , a simétrica é definida positiva, é a solução da equação não-linear. A equação algébrica de Riccati é dada por

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0. \quad (3.18)$$

A trajetória ótima (é a solução) é obtida pela substituição da solução da Equação (3.18) na Equação (3.17)

$$\dot{x}^*(t) = [A - BR^{-1}B^T P]x^*(t), \quad (3.19)$$

o custo ótimo é dado por

$$J^* = \frac{1}{2} x^{*'}(t) P x^*(t). \quad (3.20)$$

3.4 Lógica Fuzzy

Nesta seção aborda-se a introdução da teoria de controle envolvendo a lógica Fuzzy. O conteúdo baseia-se em (ZADEH, 1965) e (WANG, 1997), na qual uma breve introdução sobre as características da lógica Fuzzy são desenvolvidos.

A lógica Fuzzy, também denominada lógica nebulosa ou difusa é uma teoria que incorpora a experiência, a intuição, o conhecimento especialista e a natureza imprecisa do processo decisório humano através de um conjunto de regras ou heurísticas simples. Para o entendimento do procedimento adotado neste trabalho, faz-se uma introdução aos principais conceitos que envolvem a lógica Fuzzy.

3.4.1 Histórico

Teorias como a teoria clássica dos conjuntos e a teoria das probabilidades, embora úteis, nem sempre conseguem captar a riqueza da informação fornecida por seres humanos. A lógica Fuzzy tem como base a capacidade de raciocínio aproximado mostrando-se muito mais eficiente para uma grande variedade de problemas para os quais é difícil precisar informações.

Em 1965 (ZADEH, 1965), engenheiro eletrônico, professor de Teoria dos Sistemas na Universidade da Califórnia – Berkeley publicou o primeiro artigo sobre a teoria dos conjuntos nebulosos para tratar as incertezas não probabilísticas, o que foi denominado

Fuzzy Sets. Este trabalho contribuiu para o desenvolvimento da Lógica Fuzzy que, diferentemente da lógica tradicional, supera a ideia de um elemento pertencer ou não a um determinado conjunto, permitindo que um elemento pertença a um conjunto com certo grau de pertinência. Tinha-se como objetivo fornecer ferramentas matemáticas capazes de lidar com o raciocínio lógico que contemplassem aspectos imprecisos e ambíguos, tipo de raciocínio não passível de processamento na lógica computacional fundamentada na lógica de Boole.

A teoria de Zadeh por ser menos restritiva, pode ser considerada mais adequada para o tratamento de informações fornecidas por seres humanos do que a teoria de probabilidades. Tais teorias têm sido cada vez mais usadas em sistemas que utilizam informações fornecidas por seres humanos para automatização de processos.

Os sistemas que exigem altos níveis de precisão e exatidão consomem muito tempo e tem alto custo. Além do mais, sistemas muito complexos são de caracterização imprecisas e inexatas. Zadeh afirma que em muitos problemas, para um aperfeiçoamento do trabalho, é necessário que se aceite informações imprecisas em certo nível. A teoria da lógica Fuzzy oferece então, subsídios para sistemas convencionais cuja complexidade não é significativa. Soluções preliminares e aproximadas são rápidas e muitas vezes estão dentro do esperado, o que justifica a preferência por tal técnica, que trata de forma mais simples os sistemas de modelagem extremamente difícil por apresentarem características não lineares.

São dois os tipos de sistemas em que a lógica Fuzzy pode ser aplicada:- problemas muito complexos com comportamentos difíceis de serem compreendidos e problemas onde resultados aproximados são aceitáveis. Nas aplicações da lógica Fuzzy destacam-se o controle de processos, a aproximação funcional, o apoio à decisão, etc.

Em aplicações complexas, a tradução de informação imprecisa utilizando a teoria tradicional é inviabilizada em razão da complexidade matemática que poderia resultar. Entretanto, a teoria dos conjuntos Fuzzy proporciona grande facilidade para descrever e processar esse tipo de informação através de variáveis linguísticas e de uma base de conhecimento Fuzzy representada por um conjunto de regras.

Dentre as vantagens da utilização da lógica Fuzzy tem-se o mecanismo de raciocínio similar ao do ser humano, por meio do uso de termos linguísticos; modelagem de conhecimento de senso comum; conhecimento ambíguo e conhecimento impreciso, mas racional; técnica de aproximação universal; robustez e tolerância à falha; além do baixo custo de desenvolvimento e de manutenção. As limitações estão relacionadas à geração das regras Fuzzy e à definição das funções de pertinência; ambas, baseadas em uma avaliação subjetiva do conhecimento do especialista. Adiciona-se a isso a inexistência de técnicas de aprendizado.

3.4.2 Conjuntos Fuzzy

Um conjunto fuzzy F de um universo de discurso U é representado comumente por uma função de pertinência real mapeada por $\mu_F : U \rightarrow [0, 1]$, a qual associa cada elemento $x \in U$ a um número real $\mu_{(x)}$ pertencente ao intervalo fechado $[0, 1]$, o qual representa o grau de pertinência de x em F (WANG, 1997).

Na Figura 10 são mostradas duas funções de pertinência para o altura de indivíduos.

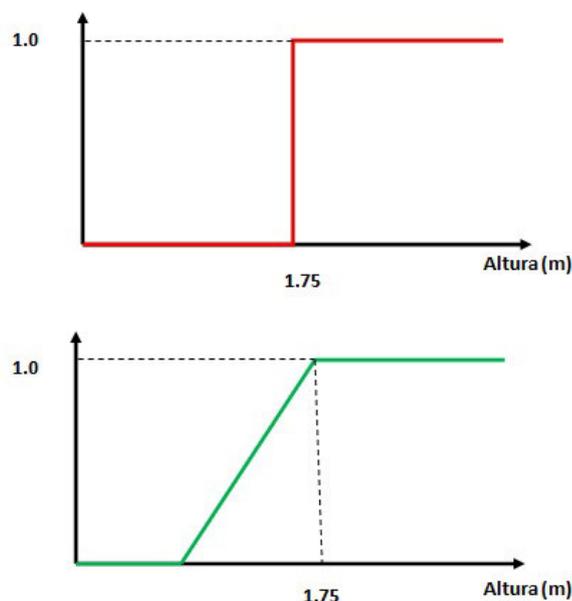


Figura 10 – Função de Pertinência para altura (a) Conjunto Crisp. (b) Conjunto Fuzzy.

Na Figura 10 (a) está representada a função de pertinência para o conjunto clássico também denominado conjunto crisp e na Figura 10 (b) representa-se a função de pertinência para o conjunto Fuzzy. Essas funções são definidas analiticamente pelas expressões (3.21) e (3.22) por

$$\mu_C = \begin{cases} 1, & \text{se altura} \geq 1.75 \\ 0, & \text{se altura} < 1.75 \end{cases} \quad (3.21)$$

$$\mu_F = \begin{cases} 1, & \text{se altura} \geq 1.75 \\ \text{se } 1.55 \leq h \leq 1.75 \\ 0, & \text{se altura} < 1.55 \end{cases} \quad (3.22)$$

Observa-se que no conjunto Fuzzy a transição entre as altura 1.75 de pessoas altas ($\mu_F = 1$) e as pessoas baixas, abaixo de 1.75 ($\mu_F = 0$) ocorre de forma suave; ao contrário do conjunto crisp no qual tal transição ocorre de forma abrupta, descontínua.

3.4.3 Operações Básicas entre Conjuntos Fuzzy

As operações básicas entre conjuntos Fuzzy propostas por Zadeh são a de complemento, união e interseção.

- *Complemento*: o complemento de um conjunto Fuzzy A possui função de pertinência dada por

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x). \quad (3.23)$$

O operador complemento corresponde ao conectivo *NÃO*.

- *União*: a união de dois conjuntos Fuzzy A e B podem ser representadas por $A \cup B$ ou por $A + B$. A união entre esses conjuntos Fuzzy possui função de pertinência definida por

$$\mu_{A \cup B} = \max[\mu_A(x_i), \mu_B(x_i)]. \quad (3.24)$$

O operador união corresponde ao conectivo *OU*.

- *Interseção*: a interseção entre os conjuntos Fuzzy A e B pode ser representada por $A \cap B$ ou por $A \cdot B$. Tal operação resulta na função de pertinência dada por

$$\mu_{A \cap B} = \min[\mu_A(x_i), \mu_B(x_i)]. \quad (3.25)$$

A interseção corresponde ao conectivo *E*. As definições apresentadas para a união e para a interseção de conjuntos Fuzzy são particulares e foram propostas por Zadeh.

3.4.4 Funções de Pertinências

As funções de pertinência são funções contínuas. Podem ter diferentes formas, no entanto, as mais comuns são as funções triangulares, trapezoidais, gaussianas e exponenciais (MINUSSI, 2009). Nos conjuntos Fuzzy a pertinência é gradual, ao contrário do que ocorrem com os conjuntos da teoria de conjuntos clássica denominada conjuntos crisp. Nesses a pertinência assume apenas dois estados: compatível ou incompatível.

3.4.5 Variáveis linguísticas

A base de regras junto com a base de dados constitui a base de conhecimento do sistema Fuzzy. Os conjuntos Fuzzy podem ser usados para construir conjuntos de termos linguísticos. Os conjuntos de termos representam abstrações dos valores da variável, isto é, são uma partição Fuzzy de seus possíveis valores. Em geral, uma variável linguística é associada a um conjunto de termos, no qual cada termo é definido no mesmo universo de discurso. A partição Fuzzy determina quantos termos existirão no conjunto.

Define-se uma variável linguística como uma entidade utilizada para representar de modo impreciso, através da linguagem cotidiana, um conceito ou uma variável de um dado problema (REZENDE, 2005). Em geral, a cada variável linguística, estão associadas expressões linguísticas. Tais expressões linguísticas qualificam as variáveis em termos linguísticos, portanto, de forma imprecisa. A capacidade de qualificar as variáveis de um problema de modo impreciso, em termos qualitativos em vez de quantitativos, fornece uma ideia do que é uma variável linguística. A altura de uma pessoa é um exemplo de variável linguística. Desta forma, esta variável pode ser expressa através de números obtidos de uma medição com uma trena ou de valores subjetivos não precisos, tais como *baixo*, *mediano*, *alto*, por exemplo. Esta variável é composta pelo nome (no caso do exemplo, a altura); pelos valores linguísticos (*baixo*, *mediano* e *alto*), que são os conjuntos nebulosos; pelo universo de discurso; e pelas funções de pertinência que associa um grau de pertinência a cada elemento do universo de discurso.

Um exemplo de aplicação da lógica Fuzzy, a classificação da altura de uma pessoa, é mostrado na Figura 11. Observa-se nesta Figura 11 a relação de altura (eixo horizontal) com o grau de pertinência (eixo vertical). Com este exemplo podemos concluir que uma pessoa com 1,70m é classificada como de altura média com grau de pertinência 1, e uma pessoa com 1,65m aproximadamente seria classificada como altura média com grau de pertinência de 0,5.

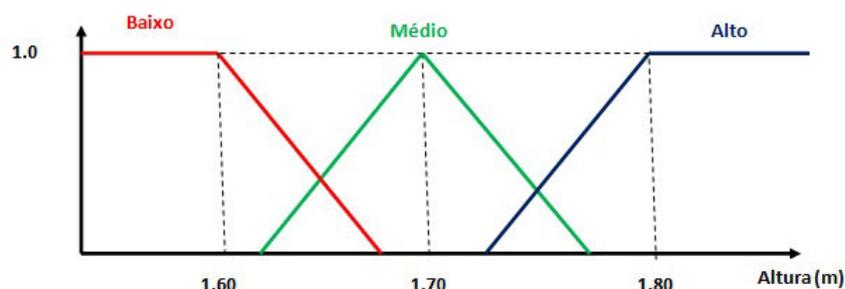


Figura 11 – Exemplo de variável linguística.

A caracterização das variáveis linguísticas pode ser tanto qualitativa, quando expressas pelo valor subjetivo e vago, quanto quantitativa, quando expressas pelo valor de pertinência.

3.4.6 Fuzificação

A Fuzificação é a codificação das entradas em graus de pertinência μ , para cada conjunto Fuzzy. Essa codificação é baseada no conhecimento do especialista. Tomando-se o exemplo da Figura 11, onde a variável Fuzzy é a altura de uma pessoa e chamando

$A_1 = \text{baixo}$, $A_2 = \text{mediano}$, $A_3 = \text{alto}$, rerepresenta-se a Figura 11, na forma mostrada na Figura 12. Desta figura, tem-se $\mu(x = A_1) = 0,7$; $\mu(x = A_2) = 0,2$; $\mu(x = A_3) = 0$.

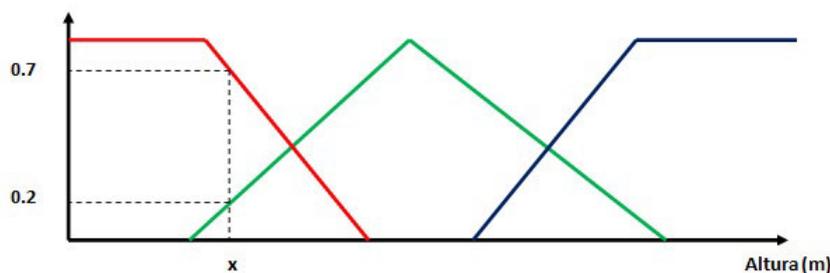


Figura 12 – Variável Fuzzy, altura de uma pessoa e seus conjuntos (baixo, mediano e alto).

3.4.7 Regras Fuzzy

As regras fuzzy fornecem uma descrição qualitativa do sistema em estudo. O conhecimento em um Sistema de Inferência Fuzzy (SIF) é armazenado em geral na forma de regras composta pelos termos antecedente e o conseqüente, **SE** <antecedente> **ENTÃO** <conseqüente> e também das operações nebulosas, como União, Interseção, entre outras (WANG, 1997).

O antecedente é composto por um conjunto de condições envolvendo variáveis Fuzzy e expressões linguísticas que, quando satisfeitas, mesmo que parcialmente, determinam o processamento da parte conseqüente da regra através de um mecanismo de inferência Fuzzy. Tal processo é chamado disparo da regra.

O conseqüente é composto por um conjunto de ações que são geradas com o disparo da regra. Os conseqüentes de todas as regras disparadas são processados em conjunto, para gerar uma resposta determinística para cada variável de saída do Sistema de Inferência Fuzzy (SIF). No SIF é importante que existam tantas regras quantas forem necessárias para mapear totalmente as combinações dos termos das variáveis, formando uma base de regras completa. As regras de controle são baseadas no conhecimento e expectativa do projetista sendo que cada uma delas demanda uma ação de controle. A ordem em que são dispostas as regras, não afeta o resultado, pois elas são declarativas e não sequenciais. O número total de regras em um sistema de controle difuso depende do número de entradas do controlador e do número de conjuntos difusos de cada entrada. Se em um controlador tem-se p entradas com a mesma quantidade de conjuntos difusos n , o número total de regras, R é dado (WANG, 1997) por

$$R = n^p. \quad (3.26)$$

Portanto, se um sistema tem duas variáveis de entrada e cada uma delas tem três conjuntos difusos, a quantidade de combinações de entrada é de nove regras de

controle. O processo de inferência propriamente dito é o responsável pela aplicação das regras apoiando-se em declarações do tipo Se-Então e operações nebulosas. Nesta etapa ocorre a tomada de decisões. A literatura classifica os controladores fuzzy considerando as características do método de tomada de decisão que eles empregam. Apesar dos muitos métodos citados e apresentados na literatura, (TAKAGI; SUGENO, 1985) os separa em dois grandes grupos: os chamados controladores do tipo MAMDANI e os controladores do tipo SUGENO.

Os controladores do tipo MAMDANI são frutos do trabalho publicado em 1973 por Mamdani onde é definido o algoritmo destes sistemas. Esses controladores convertem os valores quantitativos em qualitativos (Fuzzy) e após isso, através de inferência, em outros valores ainda qualitativos, sendo necessário o papel do defuzificador para a resposta final quantitativa. De fácil modelagem por basear-se na intuição, os controladores MAMDANI (E.H.MAMDANI, 1975) são bons quando um controle grosseiro é aceitável. Para controle mais fino, o controlador SUGENO apresenta desempenho superior, porém a modelagem tem o prejuízo de não ser mais intuitiva e sim matemática. Nos controladores SUGENO, o resultado da inferência de suas regras é dado por um valor numérico através de funções das variáveis linguísticas de entrada, isto é, cada regra conduz a consequências que são funções das variáveis nebulosas de entrada, em forma matemática têm-se que

- Se x é B , então y é $C \rightarrow$ tipo *Mamdani*
- Se x é B , então y é $f(x) \rightarrow$ tipo *Sugeno*

A resposta de um controlador do tipo SUGENO é dada pela média ponderada das respostas das regras não sendo necessário o defuzificador.

3.4.8 Defuzificador

No processo de defuzificação, é efetuada a interpretação do conjunto Fuzzy de saída inferida pelas regras, com o objetivo de obter um valor numérico. Isto se faz necessário porque em aplicações práticas são requeridas saídas precisas com algum significado físico. Por exemplo, no controle de uma planta utilizando um controlador Fuzzy, este deve fornecer à planta sinais precisos, já que apresentar um conjunto Fuzzy na entrada da planta não teria significado algum. Na prática, o método de defuzificação mais popular é o centro de Área(C-o-A), o qual retorna o centro da área debaixo da curva, como se mostra na Figura 13. Outros métodos utilizados são: Centro do Máximo (C-o-M), Média do Máximo (M-o-M) e o Maior do Máximos.

Cada método fornece respostas diferentes, sendo necessário então, que se escolha um método mais adequado visando a aplicação. Outro fator que acarreta em diferenças na

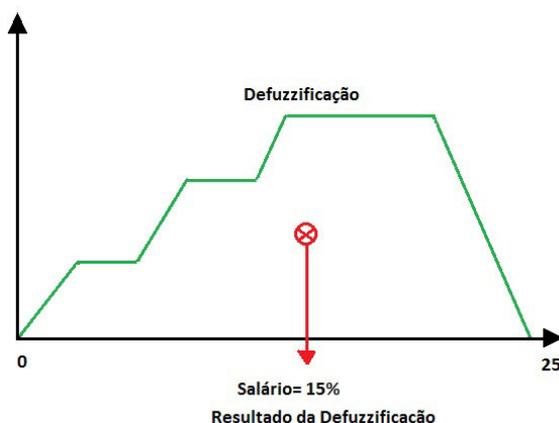


Figura 13 – Processo de Defuzzificação

resposta do sistema é a inclinação das retas das funções e as áreas onde há superposição destas funções.

3.4.9 Estruturas básicas para um controlador Fuzzy

A estrutura básica para um controlador Fuzzy pode ser visualizada pelo diagrama de blocos da Figura 14. Nesta figura observa-se que o controlador Fuzzy consiste de quatro principais unidades que são:

1. Fuzificador que converte uma entrada crisp em um conjunto termos Fuzzy;
2. Regras Fuzzy (base de dados) baseadas na execução do sistema;
3. Inferências Fuzzy que executam aproximadamente raciocínio associado as variáveis de entrada com regras Fuzzy;
4. Defuzificador o qual converte as saídas do controlador Fuzzy para um valor crisp para a entrada do sistema real sobre o alvo.



Figura 14 – Estrutura básica de um controlador tipo Fuzzy

CAPÍTULO 4

PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE *FUZZY-ÓTIMO*

A metodologia proposta para o projeto de controladores *Fuzzy-Ótimo* para o sistema anti-balanço de pontes rolantes é apresentada e discutida neste capítulo. Em termos das principais elementos que compõem o controle *Fuzzy-Ótimo*, abordagem proposta é apresentada e, no segundo momento, apresenta-se a união sequência destas teorias na formalização da proposta.

Inicialmente, apresenta-se o modelo linearizado da ponte rolante na descrição em espaço de estados que é adequada para o desenvolvimento de técnicas de controle ótimo, como também no caso a formulação do regulador linear quadrático (LQR). Em seguida, apresenta-se o desenvolvimento do sistema de controle Fuzzy estável por meio das funções de pertinência e da base regras associada. De forma generalizada, na terceira seção é abordado o método para projeto de controladores ótimos, consistindo da formulação do problema de controle ótimo e sua solução por meio da função Hamiltoniana, onde associa-se ao índice de desempenho de tempo finito. O projeto do Controle *Fuzzy-Ótimo* é apresentado na quarta seção, mostrando a união dos conteúdos das abordagens de controle ótimo e lógica Fuzzy que permitem a elaboração de algoritmos generalizados para sistemas dinâmicos. Na última seção, apresenta-se os algoritmos que executam as estratégias de otimalidade e *fuziness* propostas nesta dissertação.

4.1 Modelo da Ponte Rolante no Espaço de Estados

O modelo linearizado da ponte rolante que é representado pelo conjunto de Equações (2.72) do Capítulo 3 é descrito no espaço de estados.

Dentre as diversas maneiras de se representar um sistema dinâmico, pode-se

destacar a representação por meio de equações dinâmicas em termos de variáveis de estado, resultando na chamada representação em espaço de estados. O conjunto de variáveis de estado é dado pelo menor conjunto de variáveis independentes que descrevam um sistema. (DORF, 1998) afirma que, através do conhecimento desse conjunto, das funções de entrada e das equações dinâmicas, é possível obter os estados futuros e as saídas futuras do sistema. Desta forma, conhecendo-se os valores destas variáveis em um tempo fixo $t = t_0$, as funções de entrada e as equações dinâmicas, uma descrição completa do comportamento do sistema pode ser obtida, fornecendo então os estados futuros e as saídas futuras do sistema em um tempo $t \geq t_0$. O objetivo a ser atingido por meio da introdução de variáveis de estado adequadas é reescrever as equações de movimento do sistema como sendo um sistema maior de equações diferenciais de primeira ordem. Cada uma dessas equações diferenciais consiste da derivada no tempo de uma das variáveis de estado no lado esquerdo da igualdade e uma função algébrica das variáveis de estado, assim como das entradas do sistema no lado direito da igualdade (OGATA, 2010). O diagrama de bloco da Figura 15 está relacionada com o bloco P da Figura 8 como a representação da planta de controle.

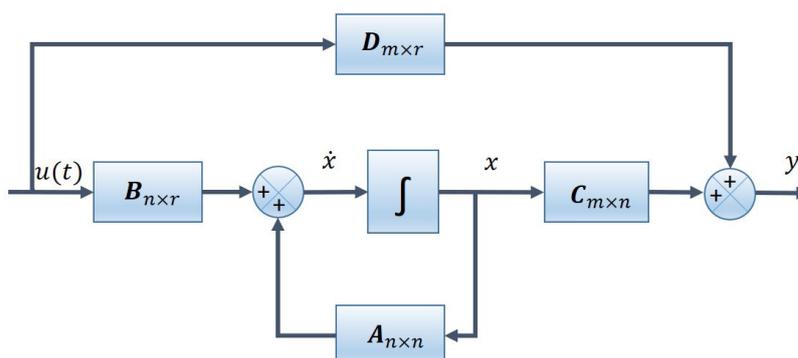


Figura 15 – Espaço de Estados de um Diagrama de Blocos

A representação do modelo em espaço de estados é a forma para descrever a dinâmica da planta ao longo do tempo, onde as massas da carga, ponte e do trole são representadas por m_{carga} , m_{ponte} , m_{trole} e o comprimento do cabo l do guincho.

Os estados abaixo serão utilizados no algoritmo de controle e formam a base das variáveis de controle. Entres as matrizes, A representa as matriz de estados, B representa a matriz de estados e entradas, C representa a matriz de saídas e estados e a matriz D a relação entre saídas e entradas. A partir da Equação (2.72), estas equações são colocadas na forma de espaço de estados dadas por

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.1)$$

e

$$y = Cx + Du \quad (4.2)$$

Desta forma a matriz A é formada pela dimensão $n \times n$, obtida da Equação (2.72), com mais informações no Apêndice B, sendo portanto apresentada como

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{m_{carga}g}{m_{trole}+m_{ponte}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{m_{carga}g}{m_{trole}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{g(m_{trole}+m_{ponte}+m_{carga})}{l(m_{trole}+m_{ponte})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{g(m_{trole}+m_{carga})}{l(m_{trole})} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Igualmente, a matriz B com dimensão $n \times r$ é obtida da Equação (2.72), com mais informações no Apêndice B, formando assim a matriz

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m_{trole}+m_{ponte}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_{trole}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{l(m_{trole}+m_{ponte})} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{l(m_{trole})} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_{carga}} + g \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

e

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

4.2 Controle Fuzzy Estável

Os principais elementos para o desenvolvimento do módulo fuzzy da proposta para projeto de um controladores Fuzzy-Ótimo são apresentados nessa seção. O conteúdo da Seção 3.4 do Capítulo 3 fornece o formalismo matemático para o desenvolvimento da base de regras. Destacando-se os conceitos de estabilidade fuzzy, a lei de controle fuzzy-ótimo e o algoritmo de controle. Em suma, apresenta-se nesta seção a função de pertinência fuzzy, e o controle Ótimo (ATHANS, 1966).

De acordo com (WANG, 1997) para o sistema ser exponencialmente estável as funções de pertinência devem apresentar

- Passo 1. Suponha que a saída $y(t)$ apresente valores no intervalo $U = [\alpha, \beta] \subset R$. Defina $2N + 1$ conjuntos Fuzzy A^l em U que são normais, consistentes e completos com as funções de associação triangular mostrado na Figura 16. Isto é, nós usamos os N conjuntos Fuzzy A^1, \dots, A^N para cobrir o intervalo negativo $[\alpha, 0)$, os outros N conjuntos Fuzzy A^{N+2}, \dots, A^{2N+1} para cobrir o intervalo positivo $(0, \beta]$, e escolher o centro \bar{x}^{N+1} do conjunto Fuzzy A^{N+1} em zero.

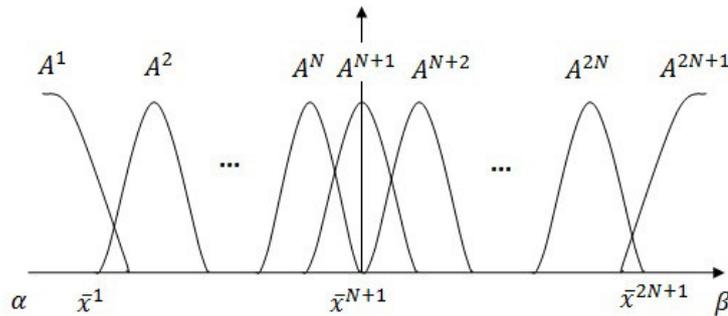


Figura 16 – Função de Pertinência de um controlador Fuzzy

- Passo 2. Considere as seguintes regras Fuzzy $2N+1$, SE-ENTÃO: SE y é A^l , ENTÃO u é B^l , sendo $l = 1, 2, \dots, 2N + 1$, e o centro \bar{y}^l dos conjuntos Fuzzy B^l são escolhidos como

Base de regras Fuzzy é dada por

$$\begin{aligned}
 R_1 : & \text{ Se } x_1 \text{ é } A_1^{l_1} \text{ e } x_1 \text{ é } A_2^{l_2} \dots \text{ e } x_n \text{ é } A_n^{l_n} \text{ então } y_1 \text{ é } B_1^{l_1} \text{ e } y_2 \text{ é } B_2^{l_2} \text{ e } \dots \text{ e } y_n \text{ é } B_n^{l_n} \\
 & \vdots \\
 R_t : & \text{ Se } x_1 \text{ é } A_{t1}^{l_1} \text{ e } x_1 \text{ é } A_{t2}^{l_2} \dots \text{ e } x_n \text{ é } A_{tn}^{l_n} \text{ então } y_1 \text{ é } B_{t1}^{l_1} \text{ e } y_2 \text{ é } B_{t2}^{l_2} \text{ e } \dots \text{ e } y_n \text{ é } B_{tn}^{l_n}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

$$y^{-l} \begin{cases} \leq 0 \text{ para } l = 1, \dots, N \\ = 0 \text{ para } l = N + 1 \\ \geq 0 \text{ para } l = N + 2, \dots, 2N + 1 \end{cases} \quad (4.8)$$

- Passo 3. Projetando o controle Fuzzy de $2N + 1$ regra Fuzzy *SE – ENTÃO* usando motor de inferência, fuzzificador singleton e defuzzificador de centro médio, o controlador Fuzzy é definido como

$$u = -f(y) = -\frac{\sum_{l=1}^{2N_1+1} y_j^{-l} \mu_{A^l}(y)}{\sum_{l=1}^{2N_1+1} \mu_{A^l}(y)} \quad (4.9)$$

4.3 Princípio Mínimo de Pontryagin

Princípio mínimo de Pontryagin (ou máximo) (ATHANS, 1966) é utilizado na teoria controle otimizado para encontrar o melhor controle possível para a tomada de sistemas dinâmicos de um estado para outro, especialmente na presença de restrições para os controles de estado ou de entrada. O princípio afirma que o Hamiltoniano deve ser minimizado sobre u , o conjunto de todos os controles permitidos. Se $u^* \in U$ é o controle ideal para o problema, então o princípio afirma que:

$$H(x^*(t), u^*(t), \lambda^*(t), t) \leq H(x^*(t), u, \lambda^*(t), t), \quad \forall u \in U, \quad t \in [t_0, t_f], \quad (4.10)$$

sendo que $x^* \in C^1[t_0, t_f]$ é o estado ideal de trajetória e $\lambda^* \in BV[t_0, t_f]$ é o coestado ideal de trajetória. O resultado foi aplicado com sucesso em problemas de tempo mínimo onde o controle de entrada é restringido, mas pode também ser útil no estudo de problemas estado limitado. Condições especiais para o Hamiltoniano também podem ser derivadas. Quando o tempo final t_f é fixo e o Hamiltoniano não depende explicitamente do tempo ($\frac{\partial H}{\partial t} \equiv 0$), então:

$$H(x^*(t), u^*(t), \lambda^*(t)) \equiv \text{constant} \quad (4.11)$$

e se o tempo final é livre, então:

$$H(x^*(t), u^*(t), \lambda^*(t)) \equiv 0. \quad (4.12)$$

Quando satisfeito ao longo de uma trajetória, o princípio mínimo de Pontryagin é uma condição necessária para um ótimo. A equação HJB fornece condições suficientes para um ótimo, mas essa condição deve ser satisfeita sobre a totalidade do estado do espaço. Baseado em (WANG, 1997) considere o sistema que é dado por

$$\dot{x}(t) = g[x(t), u(t)]. \quad (4.13)$$

Com condição inicial $x(0) = x_0$, onde $x \in R^n$ é o estado, $u \in R^m$ é o controle e g é uma função linear ou não-linear. O problema de controle ótimo para a Função (4.13) é a seguinte: determinando o controle $u(t)$ de tal forma que o critério de desempenho é dado por

$$J = S[x(t_f)] + \int_0^{t_f} L[x(t), u(t)] dt, \quad (4.14)$$

seja minimizado, onde S e L são algumas funções, e o tempo final t_f pode ser dado. Este problema de controle ótimo pode ser resolvido usando o Princípio Mínimo de Pontryagin, que é dado da seguinte maneira. Primeiro, definindo a função de Hamilton como

$$H[x, u, \lambda] = L[x(t), u(t)] + \lambda^T(t)g[x(t), u(t)], \quad (4.15)$$

e encontrando $u = h(x, \lambda)$ tal que $H(x, u, \lambda)$ é minimizado com este u . Substituindo $u = h(x, \lambda)$ na Equação (4.15) dado por

$$H^*[x, \lambda] = H[x, h(x, \lambda), \lambda]. \quad (4.16)$$

Então ao resolver as $2n$ equações diferenciais (com a condição de contorno de dois pontos), tem-se

$$\dot{x}(t) = \frac{\partial H^*}{\partial \lambda}, x(0) = x_0 \quad (4.17)$$

e

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H^*}{\partial x}, \lambda(t_f) = \frac{\partial S}{\partial x} \Big|_{x(t_f)} \quad (4.18)$$

e deixe $x^*(t)$ e $\lambda^*(t)$ ser a solução da Equação (4.17) e a Equação (4.18) (eles são chamados de trajetória ideal). Finalmente, o controle ótimo é definido como

$$u^*(t) = h[x^*(t), \lambda^*(t)]. \quad (4.19)$$

4.4 Controle Fuzzy-Ótimo

O desenvolvimento de um controle de múltiplas entradas e múltiplas saídas para sistemas *LTI* de um processo envolve a estabilidade de Liapunov e os pontos de equilíbrio (WANG, 1996), assim suponha que o sistema sob controle seja um sistema linear invariante no tempo dada por

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), x(0) = x_0, \quad (4.20)$$

sendo $x \in R^n$ e $u \in R^m$ o critério de desempenho é dado por

$$J = x^T(t_f) M x(t_f) + \int_0^{t_f} \left[x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t) \right] dt, \quad (4.21)$$

sendo as matrizes $M \in R^{n \times n}$, $Q \in R^{n \times n}$ e $R \in R^{m \times m}$ simétricas e definidas positiva, semi-positiva e positiva, respectivamente. A lei de controle de realimentação que minimiza o valor do custo é dado por

$$u = -R^{-1} B^T P x, \quad (4.22)$$

sendo P a solução da equação algébrica de *Riccati* que é dada por

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0, \quad (4.23)$$

Substituindo o multiplicador de *Lagrange* λ pela equação Algébrica de *Riccati* P onde manteremos as mesma condições da Equação (4.17) e Equação (4.18). Sendo as matrizes $Q \geq 0 \in R^{n \times n}$ e $R \geq 0 \in R^{m \times m}$ simétricas e definidas semi-positiva e positiva, respectivamente. Agora, supondo-se que o controlador $u(t)$ é um sistema Fuzzy na forma da Função (4.24), exceto se mudar a saída do sistema y da Função (4.24) para o estado x , isto é, $u(t) = (u_1, \dots, u_m)^T$ como é dado por

$$u_j = -f_j(x) = -\frac{\sum_{l_1=1}^{2N_1+1} \dots \sum_{l_n=1}^{2N_n+1} y_j^{-l_1 \dots l_n} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)}{\sum_{l_1=1}^{2N_1+1} \dots \sum_{l_n=1}^{2N_n+1} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)} \quad (4.24)$$

Assume-se que as funções de pertinência são fixas. Nossa tarefa é determinar os parâmetros $y_j^{-l_1 \dots l_n}$ de modo que J da Função (4.21) seja minimizado. Definindo as funções de base Fuzzy $b(x) = (b_1(x), \dots, b_N(x))^T$ resultando em

$$b_j(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i)}{\sum_{l_1=1}^{2N_1+1} \dots \sum_{l_n=1}^{2N_n+1} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)}, \quad (4.25)$$

sendo $l_i = 1, 2, \dots, 2N_i + 1$, $l = 1, 2, \dots, N$ e $N = \prod_{i=1}^n (2N_i + 1)$. A matriz de parâmetros $\Theta \in R^{m \times N}$ é dada por

$$\Theta = \begin{bmatrix} -\Theta_1^T \\ \dots \\ -\Theta_m^T \end{bmatrix}, \quad (4.26)$$

sendo $\Theta_j^T \in R^{1 \times N}$ formando N parâmetros $y_j^{-l_1 \dots l_n}$ para $l_i = 1, 2, \dots, 2N_i + 1$ na mesma ordem como $b_l(x)$ para $l = 1, 2, \dots, N$. Por meio dos parâmetros (4.26), pode-se reescrever o controlador Fuzzy $u(t) = (u_1, \dots, u_m)^T = (-f_1(x), \dots, -f_n(x))^T$ como dado por

$$u = \Theta b(x). \quad (4.27)$$

Para alcançar a otimização, assume-se que a matriz de parâmetros Θ é variante no tempo, ou seja, $\Theta = \Theta(t)$. Substituindo a Função (4.27) na Função (4.20) e na Função (4.21), obtêm-se o sistema de malha fechada dada por

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\Theta(t)b[x(t)] \quad (4.28)$$

e o critério de desempenho é dado por

$$J = x^T(T)Mx(T) + \int_0^T \left[x^T(t)Qx(t) + b^T(x(t))\Theta^T(t)R\Theta(t)b(x(t)) \right] dt. \quad (4.29)$$

Assim, o problema de projetar o melhor controlador Fuzzy consiste em determinar o $\Theta(t)$, de modo que J da Função (4.14) seja minimizado. $\Theta(t)$ como controle $u(t)$ no Princípio Mínimo de Pontryagin, pode-se determinar o ótimo $\Theta(t)$. Especificamente, definindo a função de Hamilton que é dado por

$$H[x, \Theta, P] = x^T Qx + b^T(x)\Theta^T R\Theta b(x) + P^T [Ax + B\Theta b(x)], \quad (4.30)$$

a partir de $\frac{\partial H}{\partial \Theta} = 0$, obtém-se

$$\frac{\partial H}{\partial \Theta} = 2R\Theta b(x)b^T(x) + B^T P b^T(x). \quad (4.31)$$

Manipulando com a Equação (4.31) obtém-se

$$\Theta = -\frac{1}{2}R^{-1}B^T P b^T(x) \left[b(x)b^T(x) \right]^{-1}. \quad (4.32)$$

Substituindo a Equação (4.32) na Equação (4.30) obtém-se

$$H[x, P] = x^T Qx + P^T Ax + \frac{1}{4}b^T(x) \left[b(x)b^T(x) \right]^{-1} b(x) P^T B R^{-1} B^T P b^T(x) \quad (4.33)$$

$$\left[b(x)b^T(x) \right]^{-1} b(x) - \frac{1}{2}P^T B R^{-1} B^T P b^T(x) \left[b(x)b^T(x) \right]^{-1} b(x)$$

$$H[x, P] = x^T Qx + P^T Ax + \left[\alpha^2(x) - \alpha(x) \right] P^T B R^{-1} B^T P, \quad (4.34)$$

Sendo $\alpha(x)$ definido como

$$\alpha(x) = \frac{1}{2}b^T(x) \left[b(x)b^T(x) \right]^{-1} b(x). \quad (4.35)$$

Usando H^* na Equação (4.17) e na Equação (4.18), obtêm-se as equações canônicas de Hamilton dado por

$$\dot{x} = \frac{\partial H^*}{\partial P} = Ax + 2 [\alpha^2(x) - \alpha(x)] BR^{-1}B^T P \quad (4.36)$$

e

$$\dot{P} = -\frac{\partial H^*}{\partial x} = -2Qx - A^T P - [2\alpha(x) - 1] \frac{\partial \alpha(x)}{\partial x} P^T BR^{-1}B^T P. \quad (4.37)$$

Com a condição inicial $x(0) = x_0$ e $P(T) = 2Mx(T)$. Deixe $x^*(t)$ e $p^*(t)$ ($t \in [0, T]$) ser a solução da Equação (4.36) e da Equação (4.37), então os parâmetros do controlador *Fuzzy-Ótimo* são

$$\Theta^*(t) = -\frac{1}{2} R^{-1} B^T P^*(t) b^T(x^*(t)) [b(x^*(t)) b^T(x^*(t))]^{-1} \quad (4.38)$$

Portanto a ação de controle *Fuzzy-Ótimo* é dado por

$$u^* = \Theta^*(t) b(x), \quad (4.39)$$

ou pode-se também destacar a ação de controle dado por

$$u^* = K(t) \alpha(x). \quad (4.40)$$

Sendo o ganho ótimo dado por $K = -\frac{1}{2} R^{-1} B^T P$ e $\alpha(x)$ é definido na Equação (4.35). Assim as novas matrizes A_{FO} , B_{FO} , C_{FO} e D_{FO} com dimensão quadrática são definidas como

$$A_{FO} = A - B \times K, \quad (4.41)$$

sendo que $A_{FO} \in R^{n \times n}$,

$$B_{FO} = B \times u, \quad (4.42)$$

sendo que $B_{FO} \in R^{n \times n}$,

$$C_{FO} = C, \quad (4.43)$$

sendo que $C_{FO} \in R^{n \times n}$ e

$$D_{FO} = 0. \quad (4.44)$$

sendo que $D_{FO} \in R^{n \times n}$.

Baseando-se na interpretação dos algoritmos 4.6.1, 4.6.2, 4.6.3 projeta-se através de um diagrama de blocos o processo de controle envolvendo o modelo dinâmico da Ponte rolante onde pode-se inferir que:

1. O Diagrama da Figura 17 apresenta a equação algébrica de Riccati (LQR) da Equação (4.23), bem como a criação das matrizes de estados modificadas como descrito no Algoritmo 4.6.3.
2. O algoritmo Fuzzy é descrito como bloco tendo como entrada o sinal do número de estados na entrada e a base vetorial Fuzzy como saída do bloco.
3. O vetor de parâmetros θ da Equação (4.32), assim como a base vetorial Fuzzy b_l da Função (4.25) influenciam na ação de esforço de controle u necessária para o desempenho eficiente característico do sistema.
4. O sinal de saída depende das novas matrizes A_{FO} , B_{FO} , C_{FO} e D_{FO} redimensionadas para o desenvolvimento do sistema de controle *Fuzzy-Ótimo*.

4.6 Algoritmos de Controle *Fuzzy-Ótimo*

A construção matemática da ponte rolante e do regulador *Fuzzy-Ótimo*, apresentada nas seções anteriores, é convertida em um algoritmo computacional. O algoritmo proposto é formado de quatro funções que são os módulos:

- Condições iniciais,
- Lógica Fuzzy,
- Solução da Equação Algébrica de Riccati,
- Cálculo da lei de controle *Fuzzy-Ótimo*.

4.6.1 Algoritmo 1- Condições Iniciais

Nessa seção é exposto as etapas do algoritmo das condições iniciais e as informações de elaboração passo à passo: Descreve-se primeiramente as condições iniciais e insere-se as matrizes do modelo matemático do sistema em espaço de estados.

1. Insere-se os valores medidos no protótipo da ponte rolante, como m_{trole} , m_{carga} , m_{ponte} e l_{cabo} , passos de (2–5).
2. Determina-se as condições iniciais que envolvem o sistema da Ponte Rolante para o estado estacionário, passos de (7–20).

3. Infere-se os valores calculados para o Espaço de Estados da Ponte Rolante, passo 21.

Algoritmo 1: Condições Iniciais

```

1 ▷ - Medições da Ponte Rolante
2  $m_{trole} = 4.0kg;$ 
3  $m_{carga} = 1.0kg;$ 
4  $m_{ponte} = 7.0kg;$ 
5  $l_{cabo} = 1.0m;$ 
6 ▷ - Espaço de Estados
7  $A = a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n};$ 
8  $a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2n};$ 
9 ...
10 ...
11  $a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nxn}$ 
12  $B = b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1r};$ 
13  $b_{21}, b_{22}, \dots, b_{2r};$ 
14 ...
15 ...
16  $b_{n1}, b_{n2}, \dots, b_{nxr}$ 
17  $C = c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1n};$ 
18  $c_{21}, c_{22}, \dots, c_{2n};$ 
19  $c_{m1}, c_{m1}, \dots, c_{mxn};$ 
20  $D = 0$ 
21  $F = ss[A, B, C, D]$ 

```

4.6.2 Algoritmo 2- Lógica Fuzzy

A seguir são definidos os passos para o desenvolvimento de um algoritmo para a construção das funções gaussianas que definirão os parâmetros de formação do vetor de base. Esse vetor é necessário para a formulação da pseudo-inversa utilizando o vetor de base Fuzzy.

1. Descreve-se o intervalo de discurso N do conjunto Fuzzy das funções de pertinência envolvendo os intervalos positivo e negativo como descrito na Figura 16, passo 2.
2. Determina-se a nomeação das variáveis da função gaussiana a_i e b_i para a formação das características de cada gaussiana no espaço, passo 3.
3. Computa-se o loop do algoritmo para a construção nas N funções $\mu_{A_i^{l_i}}$ necessárias para a construção da base vetorial $b_l(x)$ Fuzzy baseados na Equação (4.25), passos (5–22).
4. Na vetor b_l são atribuídas as razões entre o numerador M (acumulativo) e o denominador (acumulativo) D baseado na Equação (4.25), onde forma-se a matriz vetorial de base Fuzzy, passo 24.

Algoritmo 2: Lógica Fuzzy

```

1 ▷ - Formação de Funções Gaussianas
2  $X_i \leftarrow [-N : 0.01 : N]$ 
3  $[a, b] \leftarrow [a_1, \dots, a_n; b_1, \dots, b_n]$ 
4 ▷ - Lógica Fuzzy
5 inicio
6   for  $i \leftarrow 1:N$  do
7      $l(i) = i$ 
8   end
9    $z = 0$ 
10   $W = 1$ 
11  ▷ - Loop de
12  for  $i \leftarrow 1:N-1$  do
13     $c(i) \leftarrow a(i) + [b(i) * (l(i)-1)]$ 
14     $\mu_{X_x i} = \exp(-2 * (x_i - c(i))^2)$ 
15     $M \leftarrow \mu_{X_x i} * W$ 
16     $W \leftarrow \mu_{X_x i}(i)$ 
17    for  $i \leftarrow 1:N-1$  do
18       $D(i) \leftarrow M^i + z$ 
19       $z \leftarrow M^i$ 
20    end
21  end
22 fim
23 ▷ - Vetor de base Fuzzy
24  $b_l \leftarrow M/D$ 
25
```

4.6.3 Algoritmo 3-Otimização Fuzzy-ótimo

Nos passos a seguir são definidos as funções do algoritmo para a otimização do sistema após obter os valores do vetor de base Fuzzy do algoritmo anterior. O algoritmo 4.6.2 precisa convergir para valores não-singulares ou seja deve-se tomar cuidado com razões infinitesimais dos coeficientes do numerador e denominador.

1. Atribui-se os valores das matrizes Q a uma matriz identidade com o mesmo tamanho de A e R determina-se o mesmo tamanho da entrada vetor B porém com valores unitários, passo 2.
2. Encontra-se os valores da matriz P pela Equação (4.23) usando o Regulador linear quadrático pela função CARE no software MATLAB[®], passo 4.
3. Calcula-se o vetor de parâmetros θ que depende das matrizes R , da transposta de B , da matriz P e da pseudo inversa de $b_l(x)$, passo 6.
4. Define-se a ação de controle baseado na Função (4.40) e na Função (4.24), no qual obtém-se as funções dos passos anteriores ocasionando a ação de controle u , passo 8.
5. Calcula-se os ganhos K obtidos pela Equação Algébrica de Riccati baseados na matriz P , passo 10.

6. Define-se A_{FO} como a nova matriz baseado nos ganhos K , passo 12.
7. Define-se B_{FO} como a nova matriz de autovalores baseados em B multiplicado pela ação de controle u da Função (4.40), passo 14.
8. Define-se C_{FO} como uma matriz identidade com tamanho de A_{FO} , passo 16.
9. Define-se D_{FO} como uma matriz nula com tamanho de A_{FO} , passo 18.
10. Utiliza-se a função ss (space state) para obtermos as matrizes em espaço de estado do novo sistema Sys , passo 20.

Algoritmo 3: Otimização *Fuzzy-Ótimo*

- 1 ▷ - Matrizes Q e R , identidade e unitária, respectivamente
 - 2 $Q \leftarrow I$ e $R \leftarrow 1$
 - 3 ▷ - Solução Equação Algébrica de Riccati
 - 4 $P \leftarrow care(A, B, Q, R)$
 - 5 ▷ - Cálculo dos Parâmetros (Otimização)
 - 6 $\theta = -(1/2)inv(R) * B' * P * (b_i'inv(b_i.b_i'))$
 - 7 ▷ - Lei de Controle Fuzzy Ótimo
 - 8 $u \leftarrow \theta * b_i$
 - 9 ▷ - Ganho de Controle
 - 10 $K \leftarrow inv(R) * B' * P$
 - 11 ▷ - Redefinição da Matriz A através dos autovalores
 - 12 $A_{FO} \leftarrow A - B * K$
 - 13 ▷ - Redefinição da Matriz B através da ação de controle
 - 14 $B_{FO} \leftarrow B * u$
 - 15 ▷ - Redimensionamento da Matriz C
 - 16 $C_{FO} \leftarrow C$
 - 17 ▷ - Redimensionamento da Matriz D
 - 18 $D_{FO} \leftarrow null$
 - 19 ▷ - Sistema de Controle *Fuzzy-Ótimo* em malha fechada
 - 20 $Sys \leftarrow ss(A_{FO}, B_{FO}, C_{FO}, D_{FO})$
-

No sentido de facilitar o entendimento do algoritmo computacional, apresentou-se as etapas de construção e aplicação de um sistema de controle *Fuzzy-Ótimo* para o modelo matemático de uma ponte rolante, na qual explica-se as linhas de comando por etapas. Logo apresentou-se três etapas de desenvolvimento do algoritmo, no qual a primeira parte estabelecemos o modelo matemático em espaço de estados do sistema dinâmico, na segunda parte foi demonstrado o desenvolvimento do vetor de base Fuzzy e na terceira parte apresentou-se o algoritmo de controle RQL juntamente com o vetor de base Fuzzy para o redimensionamento das novas matrizes A_{FO} , B_{FO} , C_{FO} e D_{FO} . Deve-se destacar que o algoritmo computacional de controle poderá (de acordo com o problema) ser replicado para outros sistemas matemáticos como por exemplo sistemas que envolvem *MIMO* (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas).

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTOS DO CONTROLE *FUZZY-ÓTIMO*

Os resultados da avaliação proposta de controle *Fuzzy-Ótimo* resolve o problema de balanço pendular da carga em pontes rolantes apresentados neste capítulo. Estes resultados são baseados em modelos matemáticos da ponte rolante, onde são transformados em algoritmos e implementados em computadores digitais para fins de projeto e implementação no mundo real. Estes modelos computacionais implementados no MATLAB® e Simulink® são chamados de simuladores da planta, no caso a ponte rolante, são ligados ao sistema de controle *Fuzzy-Ótimo*. Desta maneira, realiza-se a avaliação das ações do controle proposto *Fuzzy-Ótimo*, havendo assim um baixo custo e sem as dificuldades de uma complexa e trabalhosa montagem para o momento de concepção do sistema de controle com as características de otimalidade e *fuzziness*.

Nas seções deste capítulo são apresentadas as funções de pertinência Fuzzy e as condições iniciais no contexto de setup. Como também, apresenta-se uma avaliação do comportamento do sistema para as condições iniciais de projeto. Tendo como referência as figuras de mérito, as seções restantes apresentam a comparação entre os controladores *Fuzzy-Ótimo* e controladores *PID Tuner*. Os resultados objetivam avaliar o comportamento operacional do sistema de controle *Fuzzy-Ótimo* e comparar com um controlador *PID Tuner*, uma ferramenta com a finalidade de sintonizar e facilitar os ganhos de controle K_p , K_i e K_d de forma prática para o controlador *PID*.

Na representação da Figura 18, exibe-se a estrutura resumida de blocos do sistema da Figura 17, em espaço de estados, matrizes e vetores, na qual analisa-se as características do controle *Fuzzy-Ótimo* do sistema da ponte rolante.

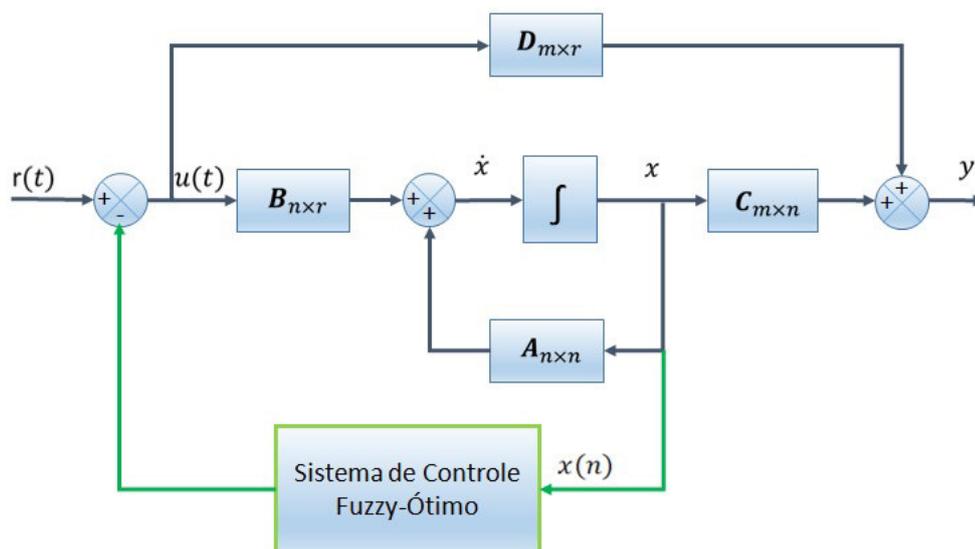


Figura 18 – Estrutura básica do Sistema *Fuzzy-Ótimo*.

No diagrama de bloco da Figura 18 é apresentado o comportamento do sistema, as funções envolvidas em cada etapa e as dimensões das matrizes para cada bloco. O bloco Fuzzy é baseado da Figura 14 onde é apresentada a estrutura básica.

Ainda, neste capítulo são evidenciadas as respostas de controle das simulações do Algoritmo 4.6.1, Algoritmo 4.6.2 e Algoritmo 4.6.3 no software simulador MATLAB[®] e no Simulink[®], os rendimentos dos sinais de entrada e saída são analisados e comparados aos controles do tipo *PID* e o Sistema de Controle *Fuzzy-Ótimo*, assim como desenvolvido em (LEITE et al., 2018).

5.1 Organização e Considerações das Simulações

Nesta seção é apresentado o *setup* e considerações a respeito das simulações, as funções de pertinência Fuzzy e a resposta a entrada zero da ponte rolante. O modelo matemático é implementado, para fins de projeto, no MATLAB[®] e Simulink[®], os diagramas do Simulink[®] e os scripts de inicialização do MATLAB[®] são apresentados no Apêndice A, assim antes de obter as respostas de controle deve-se considerar as massas do sistema como descrito na Figura 19 e considerar as seguintes observações:

1. Sinais de Entrada Simultâneos.
2. Desempenho de controle para o eixo de translação X_{ponte} .
3. Desempenho de controle para o eixo de translação Y_{trole} .
4. Desempenho de controle para o balanço pendular da carga em X_{carga} .

5. Desempenho de controle para o balanço pendular da carga em Y_{carga} .
6. Desempenho de controle para subida e descida do cabo l em Z_{carga} .
7. Sinais de Controle Simultâneos Total.

5.1.1 Parâmetros Fixo da Ponte Rolante

As informações específicas como massa da carga, massa do trole, massa e altura da ponte foram medidos no protótipo em laboratório da Figura 19 e inseridos no modelo matemático em espaço de estados.



Figura 19 – Protótipo de uma Ponte Rolante

Tabela 2 – Parâmetros levantados do Protótipo

Simbolo	Descrição	Medição
m_{trole}	Massa do trole	4 kg
m_{carga}	Massa da carga	1 kg
m_{ponte}	Massa da ponte	7 kg
H	altura da ponte em Z	1 m

Os dados da Tabela 2 são utilizados para reproduzir o comportamento dinâmico da ponte rolante por meio do modelo matemático. Nesta dissertação as descrições no espaço de estados das Equações (4.1) e (4.2) são utilizadas para o projeto do controle *Fuzzy-Ótimo* e avaliação do desempenho do sistema.

5.1.2 Parâmetros dos Controladores PID Tune e *Fuzzy-Ótimo*

Os dados usados para o controlar PID Tuner e o controlador *Fuzzy-Ótimo* são apresentados nas Tabelas 3 e 4 respectivamente. O PID Tuner foi utilizado para sintonizar os ganhos K_P , K_I e K_D e forma otimizada e o ganhos do controlador *Fuzzy-Ótimo* são obtidos através do algoritmo proposto do Capítulo 5 e apresentado na Tabela 4.

Tabela 3 – Ganhos do Controlador PID Tuner

PID Tuner			
Ganhos	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
K_P	0.5933	0.1110	284.9937
K_I	0.0016	0.0001	249.5407
K_D	3.8734	1.0129	81.1904

Tabela 4 – Ganhos do Controlador *Fuzzy-Ótimo*

Ganhos K									
1.0000	5.0083	0.0000	0.0000	-0.4067	-0.9243	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	0.0000	1.0000	3.3359	-0.0000	0.0000	-0.6304	-0.8719	-0.0000	-0.0000
-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	1.0000	1.0886

5.1.3 Geração da base vetorial Fuzzy

Inicialmente o sistema em malha fechada para a ponte rolante deve receber o sinal de controle Fuzzy através da estabilidade gaussiana, obedecendo às condições de existência para o sistema ser estável. Na Figura 20 pode-se iniciar as condições para a formação da base Fuzzy, envolvendo o número de estados e sua correspondências para o número de funções gaussianas correspondentes geradas.

Assim sendo, aplicando-se o algoritmo da Subseção 4.6, calcula-se as funções de pertinência Gaussianas como apresentadas na Figura 20. As funções de pertinência referem-se aos números de estados, onde a defuzzificação formará uma base vetorial (b_i) com uma média geométrica dos centros para cada parâmetro do espaço vetorial.

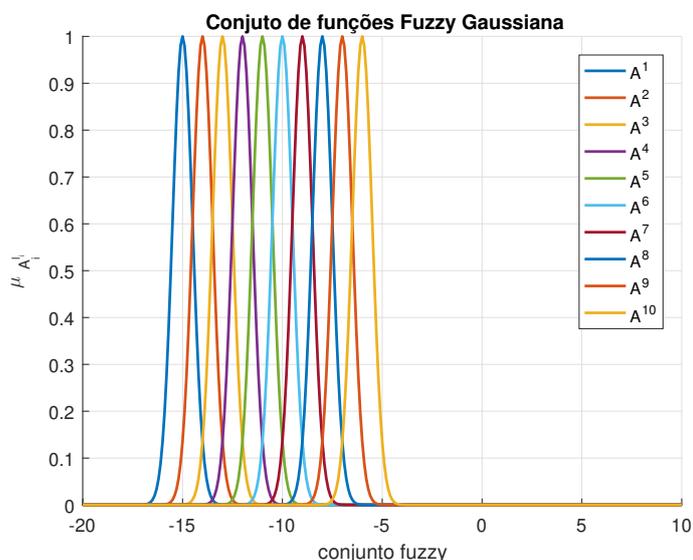


Figura 20 – Formação do vetor de base Fuzzy

Na Figura 20 apresenta-se as funções de pertinência gaussianas geradas a partir da Equação (4.45), desenvolvida em função da dimensão da matriz A , assim relaciona-se a quantidade de funções de pertinência ao número de estados gerando uma base vetorial Fuzzy (b_i), na sequência do algoritmo do sistema de controle *Fuzzy-Ótimo*.

5.1.4 Condições iniciais aos Estados

Para a formação do sistema de controle *Fuzzy-Ótimo*, analisa-se o comportamento dos estados após o controle em malha fechada. Nesta Figura 21 observa-se o comportamento de cada estado durante uma determinada condição inicial. Cada estado após o controle, apresentam um comportamento característico após o controle *Fuzzy-Ótimo*. Os estados x , y e l apresentam inicialmente um valor em 1(um), enquanto os demais estados iniciam em 0(zero).

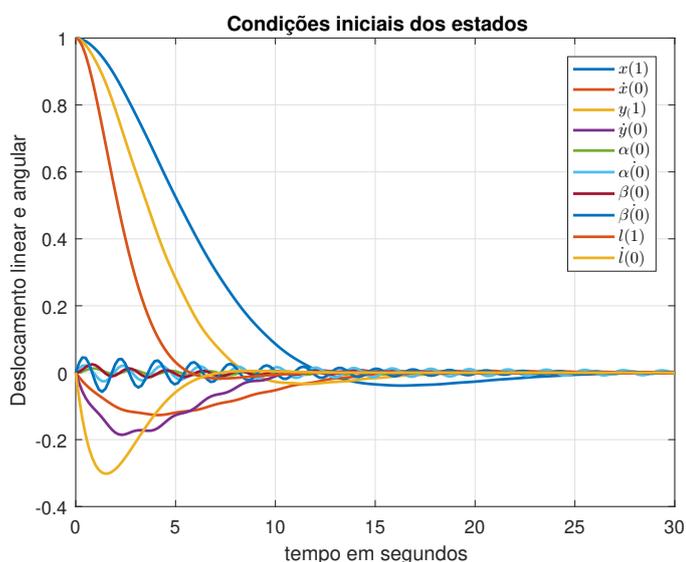


Figura 21 – Condições iniciais para os estados

5.2 Comparação entre os desempenhos de controle

Na Figura 23 até a Figura 26 são apresentadas as respostas de controle em relação ao degrau unitário em função do tempo de deslocamento, além do mais mostra-se a comparação entre as especificações de desempenho no qual podemos citar o tempo de subida, tempo de acomodação, *overshoot* ou sobressinal e o tempo de pico para o sinal de entrada do controle. Observa-se o comportamento entre dois tipos de sinais para o sistema. Primeiramente o sinal de entrada para o movimento é separado para um melhor entendimento como na Figura 22.

5.2.1 Sinais de Entrada Simultâneos

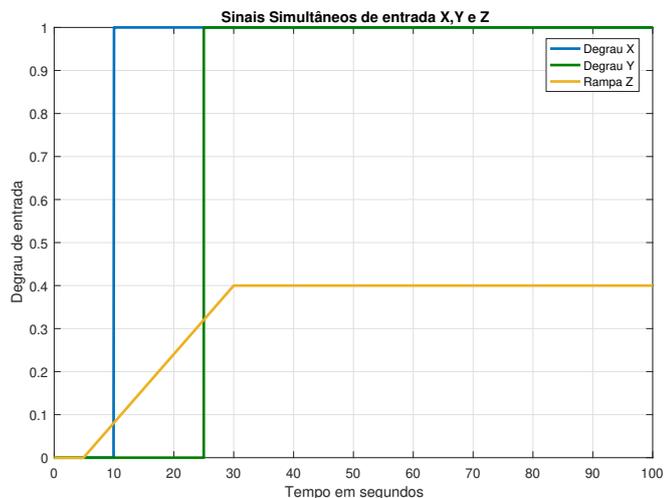


Figura 22 – Degrau para o eixo X_{ponte} , Y_{trole} e Z_{altura} .

Assim na Figura 22 apresenta-se o sinal de entrada para o movimento em direção ao eixo horizontal X iniciando em 10 segundos, o eixo horizontal Y iniciando em 25 segundos e a altura vertical Z iniciando em 5 segundos e estabilizando em 30 segundos. Tem-se três movimentos simultâneos provocando uma condição de difícil controle. O eixo Z onde representa o aumento do cabo de sustentação da carga, varia conforme o deslocamento em relação ao tempo. O movimento máximo do cabo é considerado como de 1 metro.

5.2.2 Desempenho de controle para o eixo de translação X_{ponte}

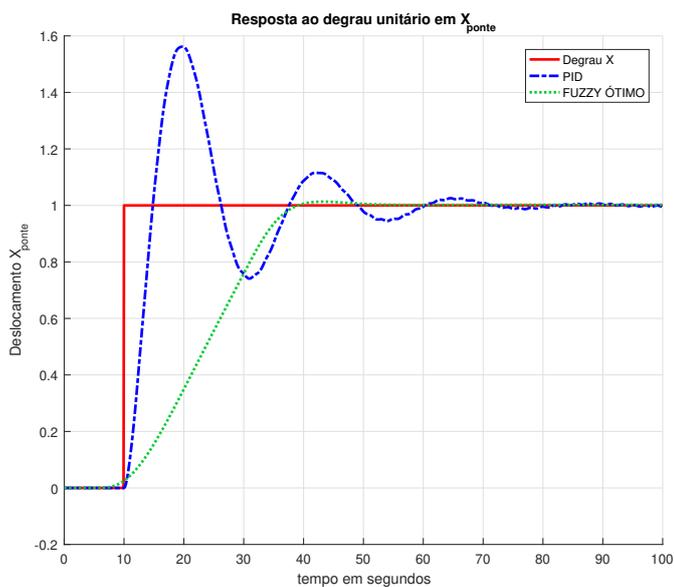


Figura 23 – Entrada ao degrau para o eixo X_{ponte} .

Tabela 5 – Figuras de mérito para eixo X_{ponte}

Características de Resposta ao Degrau		
Medidas de Desempenho	PID Tuner	Fuzzy-Ótimo
Tempo de subida	14.263s	38.659s
Tempo de acomodação	66.68s	37.16s
Amplitude mínima do sinal	0.7445	0.8998
Amplitude máxima do sinal	1.5628	1.0107
Sobressinal	56.7768	1.1023
Pico do sinal	1.5628	1.0107
Tempo de Pico	18.30s	41.6143s

Verifica-se na Figura 23 e na Tabela 5 que o degrau no eixo horizontal X inicia em 10 segundos, em consequência disso, observa-se que a resposta para tempo de acomodação, *overshoot*, amplitude máxima do sinal, pico do sinal são atenuados para a resposta de controle *Fuzzy-Ótimo*, no entanto o tempo de subida é maior em comparação ao controle *PID* onde apresenta um tempo de subida menor.

5.2.3 Desempenho de controle para o eixo de translação Y_{trole}

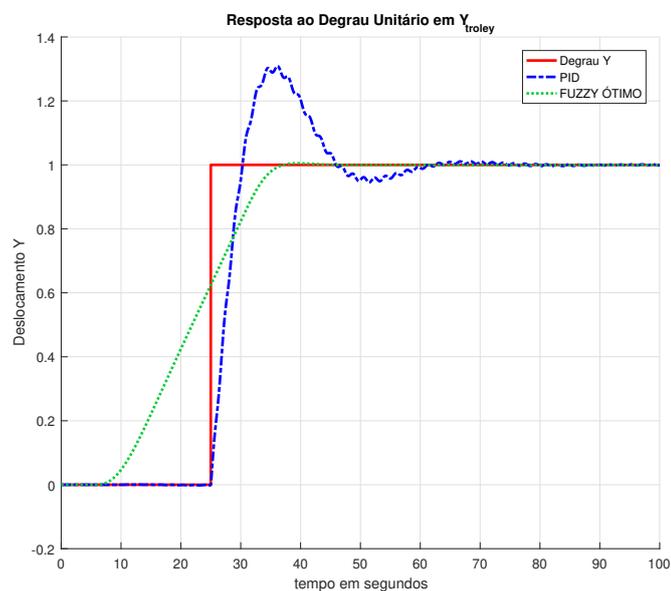
Figura 24 – Entrada ao degrau para o eixo Y_{trole} .

Tabela 6 – Figuras de mérito para o eixo Y_{trole}

Características de Resposta ao Degrau		
Medidas de Desempenho	PID Tuner	Fuzzy-Ótimo
Tempo de subida	4.981s	8.495s
Tempo de acomodação	39.488s	12.721s
Amplitude mínima do sinal	0.3951	0.9001
Amplitude máxima do sinal	1.8331	1.0054
Sobressinal	82.9990	0.5361
Pico do sinal	1.8331	1.0054
Tempo de Pico	11.143s	14.600s

Observa-se na Figura 24 o degrau unitário iniciando em 25 segundos e os controles atuando após o sinal de entrada. Novamente verificar-se a atuação do controlador *Fuzzy-Ótimo* como uma resposta de *overshoot* baixo e tempo de acomodação estável para o eixo Y do trole. O massa do trole (m_{trole}) sendo menor que a massa da ponte (m_{ponte}) como apresentado na Tabela 2 reflete na força do motor no eixo X e Y , onde a força no motor do eixo Y é menor em relação a motor do eixo X . O tempo de acomodação apresenta uma resposta melhor que no eixo X como mostra os dados da Tabela 6.

5.2.4 Desempenho de controle para o balanço pendular da carga em X_{carga}

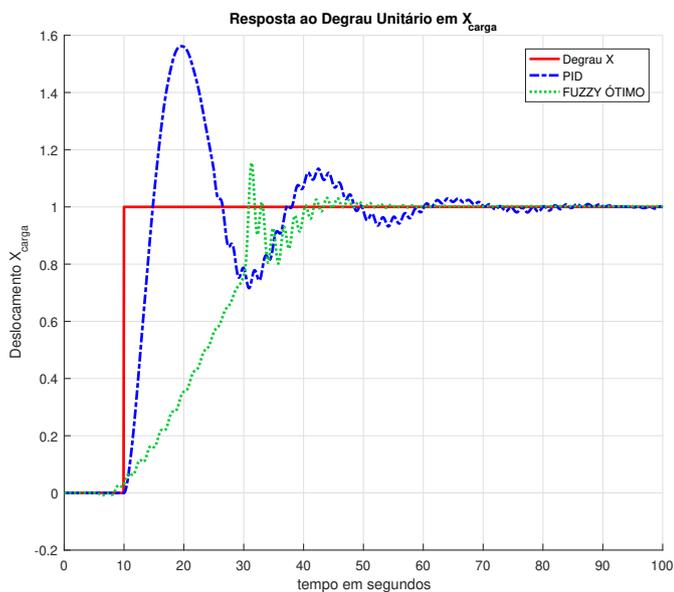


Figura 25 – Entrada ao degrau para o eixo X_{carga} .

Tabela 7 – Figuras de mérito para o eixo X_{carga}

Características de Resposta ao Degrau		
Medidas de Desempenho	PID Tuner	Fuzzy-Ótimo
Tempo de subida	4.328s	35.32s
Tempo de acomodação	51.174s	31.569s
Amplitude mínima do sinal	0.7411	0.9001
Amplitude máxima do sinal	1.5632	1.0577
Sobressinal	56.1322	5.8056
Pico do sinal	1.5632	1.0577
Tempo de Pico	6.204s	13.605s

Observa-se na Figura 25 o balanço da carga para o eixo X , novamente verifica-se a resposta ao controle sendo exercido pelos controladores como *Fuzzy-Ótimo* e *PID*, porém existe uma certa dificuldade de sintonia para o controlador *PID*. É importante observar que o controle *Fuzzy-Ótimo* tem características multivariáveis acompanhando o movimento Z e Y simultâneos como mostra os dados da Tabela 7.

5.2.5 Desempenho de controle para o balanço pendular da carga em Y_{carga}

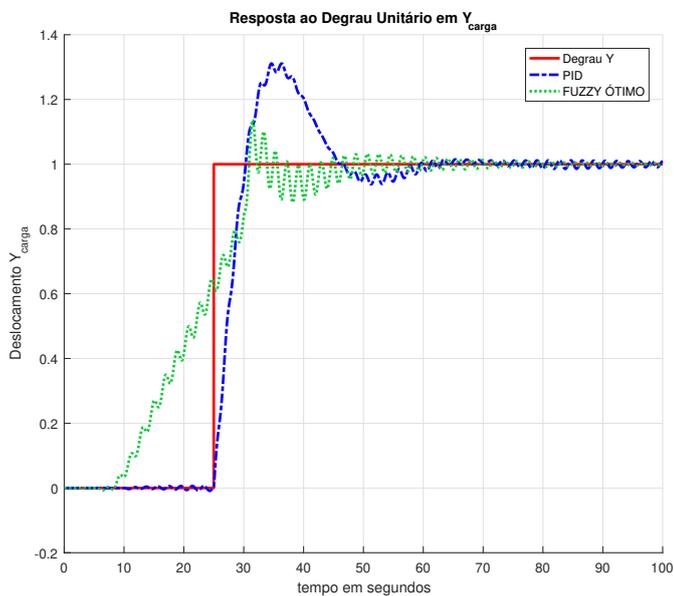


Figura 26 – Entrada ao degrau para o eixo Y_{carga} .

Tabela 8 – Figuras de mérito para o eixo Y_{carga}

Características de Resposta ao Degrau		
Medidas de Desempenho	PID Tune	Fuzzy-Ótimo
Tempo de subida	4.4683s	8.8001s
Tempo de acomodação	39.520s	21.748s
Amplitude mínima do sinal	0.3973	0.7369
Amplitude máxima do sinal	1.8271	1.3230
Sobressinal	80.9478	32.2994
Pico do sinal	1.8271	1.3230
Tempo de Pico	11.245s	14.309s

Na Figura 26 o movimento da carga no eixo Y provoca uma oscilação pendular da carga, a resposta de controle para a entrada ao degrau é apresentado tanto para o controle *Fuzzy-Ótimo* como para o *PID*, portanto podemos verificar o desempenho dos controladores e comparar a atuação de ambos como mostra os dados da Tabela 8. Como observado nas tabelas anteriores o controlador *Fuzzy-Ótimo* tem um desempenho satisfatório para o tempo de acomodação, amplitude máxima do sinal, sobressinal ou *overshoot*, pico de sinal e tempo de pico enquanto que o tempo de subida para o *PID* é satisfatório.

5.2.6 Respostas de controle do movimento do cabo I no eixo Z_{carga}

Na Figura 27 mostra-se o aumento vertical do cabo de sustentação da carga com *PID* e *Fuzzy-Ótimo*. Há um leve atraso do controle *Fuzzy-Ótimo* apresentado em verde. O atraso envolve o fator multivariável em relação ao outros eixos horizontais. O parâmetros do controle PID foram obtidos da ferramenta PID Tuner como apresenta-se na Tabela 3.

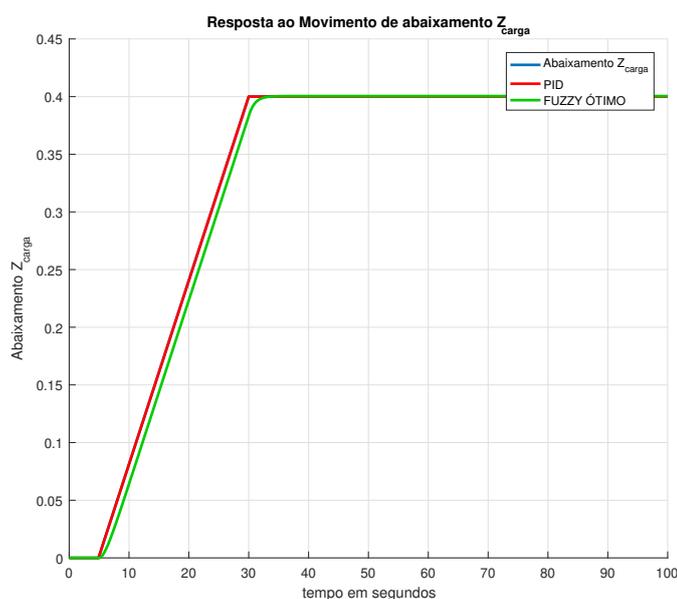


Figura 27 – Aumento do comprimento do cabo de sustentação Z_{cabo} *PID* e *Fuzzy-Ótimo*.

5.2.7 Respostas de controle para chaveamento do sinal simultâneos

Na Figura 28 apresenta o chaveamento do sinal de referência para o movimento de posicionamento simultâneo dos eixos horizontais X e Y , onde os mesmos partem ao mesmo tempo, a resposta de controle envolve uma massa de 1 kg de carga para a entrada ao degrau. Apresenta-se tanto para o controle *Fuzzy-Ótimo* como para o controle *PID*.

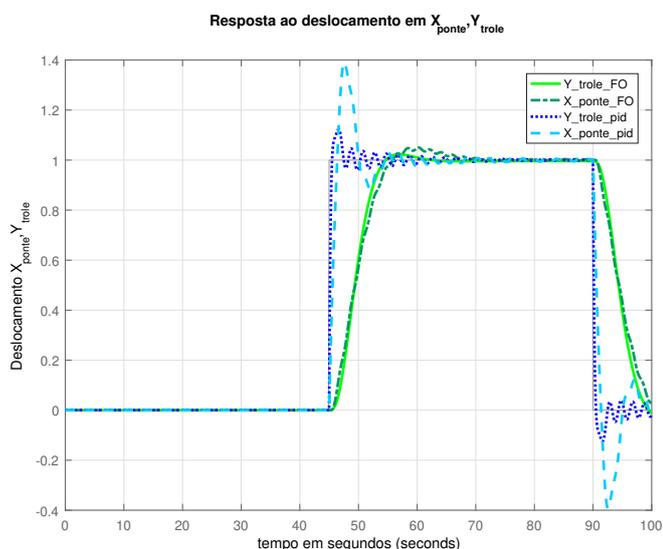


Figura 28 – Degrau para os eixos X_{ponte} e Y_{carga} *PID* e *Fuzzy-Ótimo*.

5.2.8 Sinais de Controle Simultâneos Total

Na Figura 29 apresenta-se o comportamento dos sinais envolvendo o posicionamento horizontais X , Y e vertical Z e para a comparação entre os controles *Fuzzy-Ótimo* e *PID*.

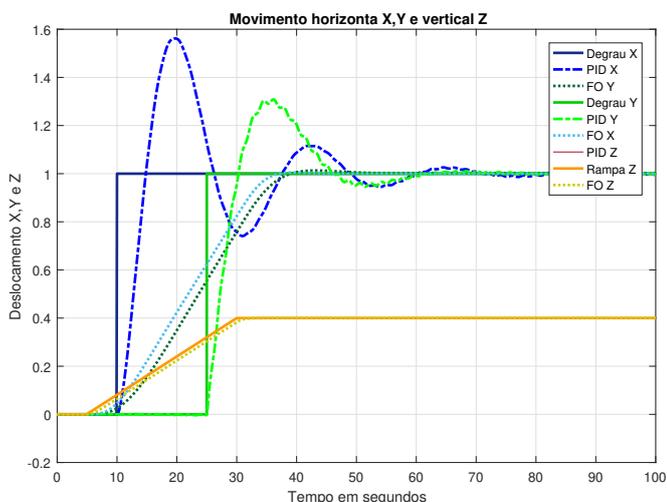


Figura 29 – Sinais de entrada os eixos X_{ponte} , Y_{trole} e Z_{cabo} no *PID* e *Fuzzy-Ótimo*.

Na Figura 30 apresenta-se a evolução de todos os sinais simultâneos envolvendo o balanço pendular da carga içada para os eixos X_{carga} , Y_{carga} e Z_{carga} , onde analisar-se o desempenho dos controles *Fuzzy-Ótimo* e *PID*.

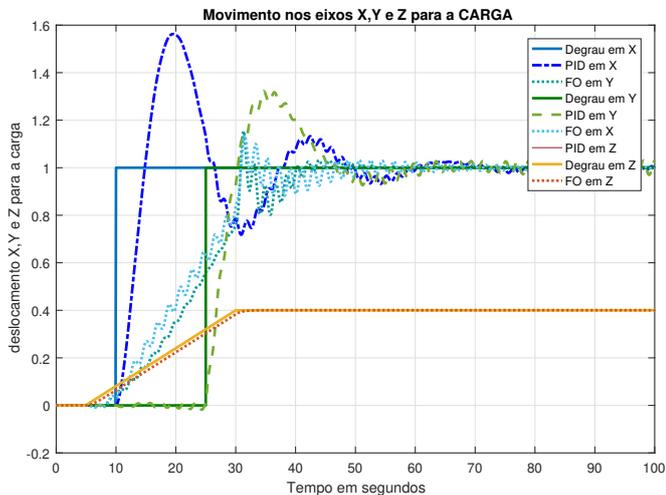


Figura 30 – Degrau para os eixos X_{ponte} , Y_{trole} e Z_{cabo} em *PID* e *Fuzzy-Ótimo*.

Observando o comportamento dos sinais de controle *Fuzzy-Ótimo* enfatiza-se que a sensibilidade dos outros sinais de entrada X , Y e Z são levados em consideração para o posicionamento em relação sinal de entrada, diferentemente do controle *PID* que responde apenas ao sinal de entrada solicitado.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Na perspectiva de reduzir as oscilações pendulares da carga e minimizar o custo do controle em pontes rolantes do tipo pórtico, nesta dissertação de mestrado foi apresentada uma metodologia para o projeto de sistemas controle com características de otimalidade e Fuzzy. Especificamente, os resultados apresentados nesta dissertação fazem parte da pesquisa em sistemas com múltiplas-entradas e múltiplas-saídas (*MIMO*) para resolver problemas que estão relacionados com as dificuldades envolvidas no controle de uma ponte rolante. O sistema de controle *Fuzzy-Ótimo* foi demonstrado uma resposta de atuação eficiente e comportamento aceitável, tanto para o balanço da carga, como para a posição da ponte e do trole. O método aplicado de controle é uma alternativa para aplicações em Pontes Rolante levando em consideração a atenuação oscilatória, estabilidade e rapidez de resposta.

Observou-se o comportamento das variáveis de estado controladas para uma dada condição de operação, assim conclui-se que o algoritmo proposto tem a habilidade em promover uma resposta satisfatória para uma dada posição de deslocamento angular. O controlador *Fuzzy-Ótimo* impõe um tempo de acomodação e *overshoot* aceitáveis, considerando um sistema não-linear, promovendo respostas rápidas e estáveis em torno do ponto de operação. Além do mais, as ações do controlador *Fuzzy-Ótimo* atenua as oscilações da curva de resposta do deslocamento para cada eixo e a variação angular do pêndulo. Os resultados do método proposto foram comparados com o controlador do tipo *PID Tune*, apresentando um comportamento aceitável para a atenuação do *overshoot* e o tempo de acomodação destacam-se nesse método.

6.1 Contribuições

As principais contribuições desta pesquisa estão em torno dos seguintes contextos:

- Uma metodologia para o projeto de controladores de alto desempenho que se baseia nas abordagens da teorias de controle Fuzzy e Ótimo;
- Algoritmos e Procedimento para o desenvolvimento de núcleos de sintonia com características de otimalidade e *fuzziness* para implementação em microcontroladores e *CLPs*.

6.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, enumera-se os seguintes desenvolvimentos em controle e sistemas embarcados que são:

- Discretização do processo/planta para o microprocessamento dos dados.
- Controlador poderá ser testado e avaliado, através do espaço de estados em aplicações envolvendo robótica, veículos não tripulados e aplicações militares.
- Estudos provenientes de controle *Fuzzy-Ótimo* poderá ter um desenvolvimento adaptativo para plantas desconhecidas via parâmetros através de redes adaptativas.
- Desenvolvimento e melhorias do algoritmo poderá ser comparado a outras plantas dinâmicas em espaço de estados contínuos e discretos para o controle.
- Desenvolver uma ferramenta *Toolbox*TM para ser acessível aos pesquisadores, professores e estudantes.

6.3 Produção Científica

Nessa seção encontra-se os artigos referentes ao trabalho já publicados entre os quais podemos citar:

- Artigo publicado em Jornal com o título: Event Discrete Control Strategy Design of Overhead Crane Embedded In Programmable Logic Controller, Journal: American Journal of Engineering Research (AJER), Ano: 2018, Autores: Wenllson Carlos Ferreira Leite, Geilson Abreu Costa, João Viana Da Fonseca Neto, José Pinheiro de Moura, Ernesto Franklin Marçal Ferreira, Igor Lopes de Castro;
- Artigo publicado em Congresso com o título: Controlador Fuzzy Ótimo Aplicado a uma Ponte Rolante, Congresso: Congresso Brasileiro de Automática 2018 (CBA 2018), Ano: 2018, Autores: Wenllson Carlos Ferreira Leite, João Viana Da Fonseca Neto, Geilson Abreu Costa;

REFERÊNCIAS

- AKSJONOV, A. *The Modelling and Control of 3D Crane*. Dissertação (Mestrado) — Tallinn University of Technology, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 44.
- AKSJONOV, A.; VODOVOZOV, V.; PETLENKOV, E. Sensorless control of the three-dimensional crane using the euler-lagrange approach with a built-in state-space model. In: *2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4. Citado na página 24.
- AL-HADITHI, B. M. et al. Fuzzy optimal control for double inverted pendulum. In: *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–5. ISSN 2156-2318. Citado 3 vezes nas páginas 21, 24 e 25.
- ANAND, M. L.; JAYASREE, P. R. Damping based anti-swing compensated fuzzy-pid controller for the overhead crane. In: *2017 International Conference on Circuit Power and Computing Technologies (ICCPCT)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- ATHANS, P. L. F. M. *Optimal control : an introduction to the theory and its applications*. New York ; Sydney: McGraw-Hill, 1966. 879 p. Citado 5 vezes nas páginas 44, 47, 48, 60 e 61.
- CASTRO, I. L. *Controle de Sistema a Eventos Discretos e contínuos embarcados em CLP para Acionamentos de Pontes Rolantes*. 2017. Monografia (Bacharel em Engenharia Eletrica), UFMA (Universidade Federal do Maranhao), Sao Luis, Brasil. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- CHANG, C. Y. et al. An enhanced adaptive sliding mode fuzzy control for positioning and anti-swing control of the overhead crane system. In: *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 2, p. 992–997. ISSN 1062-922X. Citado na página 25.
- COSTA, H. *Aplicação de Tecnicas de Modelagem e Controle em Sistemas Tipo Ponte Rolante*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia (IME), 2010. Citado na página 23.

- DORF, R. H. B. R. C. *Modern Control Systems*. Lake Street, Upper Saddle River, NJ, USA: Addison Wesley Longman, 1998. Citado na página 58.
- E.H.MAMDANI, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, v. 7, n. 3, p. 1–13, January 1975. Citado na página 55.
- HAYAJNEH, M. T. et al. Reductions of pendulations of overhead cranes under the effect of air resistance by a cable manipulation manner. In: *2008 5th International Symposium on Mechatronics and Its Applications*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6. Citado na página 20.
- HONG, U. H. S. K.-S. *Dynamics and Control of Industrial Cranes, Advances in Industrial Control*. 152 Beach Road; Singapore: Springer, 2019. 145 p. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- LEITE, W. C. F. et al. Event discrete control strategy design of overhead crane embedded in programmable logic controller. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 72.
- LEITE, W. C. F.; NETO, J. ao V. D. F.; COSTA, G. A. Controlador fuzzy ótimo aplicado a uma ponte rolante. *Congresso Brasileiro de Automática 2018*, 2018. ISSN 2525-8311. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 66.
- MINUSSI, C. R. Lógica nebulosa (lógica fuzzy). In: *Proceedings of IEEE 5th International Fuzzy Systems*. Ilha Solteira: Unesp/FE/DEEE: [s.n.], 2009. p. 119. Citado na página 52.
- MOHANLAL, P. P.; KAIMAL, M. R. Fuzzy modeling and optimal control of nonlinear second order systems. In: *2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE Cat. No.04CH37542)*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 2, p. 611–616 vol.2. ISSN 1098-7584. Citado na página 20.
- NAIDU., D. S. *Optimal control systems*. Pocatello. Idaho. USA: CRC PRESS, 2002. Citado 6 vezes nas páginas 21, 37, 44, 45, 46 e 48.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5 ed. ed. Rio de Janeiro, RJ: Prentice Hall do Brasil, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 58.
- RAHMANI, R. et al. A precise fuzzy controller developed for overhead crane. In: *2015 10th Asian Control Conference (ASCC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5. Citado na página 25.
- REZENDE, S. O. In: *Sistemas inteligentes: Fundamentos e Aplicações*. [S.l.]: Editora Manole, 2005. v. 1, p. 550p. Citado na página 53.
- SMOCZEK, J.; SZPYTKO, J. Constrained generalized predictive control with particle swarm optimizer for an overhead crane. In: *2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 756–761. Citado na página 25.
- TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-15, n. 1, p. 116–132, Jan 1985. ISSN 0018-9472. Citado na página 55.
- THORNTON, J. B. M. S. T. *Classical dynamics of particles and systems*. Fort Worth: Saunders College, 1995. Fifth Edition. Citado na página 48.

- WANG, L.; WANG, X.; KONG, Z. Anti-swing control of overhead cranes. In: *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 2, p. 8024–8028. Citado na página 25.
- WANG, L.-X. Stable and optimal fuzzy control of linear systems. In: *Proceedings of IEEE 5th International Fuzzy Systems*. [S.l.: s.n.], 1996. v. 2, p. 1453–1458 vol.2. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 66.
- WANG, L. X. *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Saddle River, NJ,USA: Prentice-Hall, 1997. Citado 8 vezes nas páginas 21, 24, 25, 49, 51, 54, 60 e 61.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, v. 8, n. 3, p. 338–353, November 1965. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 49.

Apêndices

APÊNDICE A

DIAGRAMA DE BLOCOS NO SIMULINK

Os diagramas de blocos que complementam o algoritmo de controle *Fuzzy-Ótimo* são apresentados neste apêndice. O projeto e simulação foram desenvolvidos no ambiente MATLAB® e Simulink®. Neste apêndice são apresentados diagramas de blocos que retratam três cenários: a) Os blocos de controle para fins de comparação de desempenho entre os controladores *Fuzzy-Ótimo* e *PID*, onde são representados na Figura 31, b) Na Figura 32 apresenta-se o diagrama de bloco do sistema *Fuzzy-Ótimo* e c) O diagrama de blocos da Figura 33 representa a implementação do controle *PID*. Os sinais de entrada e saída são comparados simultaneamente para cada tipo de controle. O modelo matemático da ponte rolante é obtido na descrição no espaço de estados por meio das matrizes A , B , C e D que são inicializadas via *script* do MATLAB®. Os gráficos dos experimentos foram obtidos utilizando o bloco *To Workspace* do Simulink®, onde os sinais são enviados do Simulink® para o MATLAB® e tratados para uma melhor compreensão dos dados simulados.

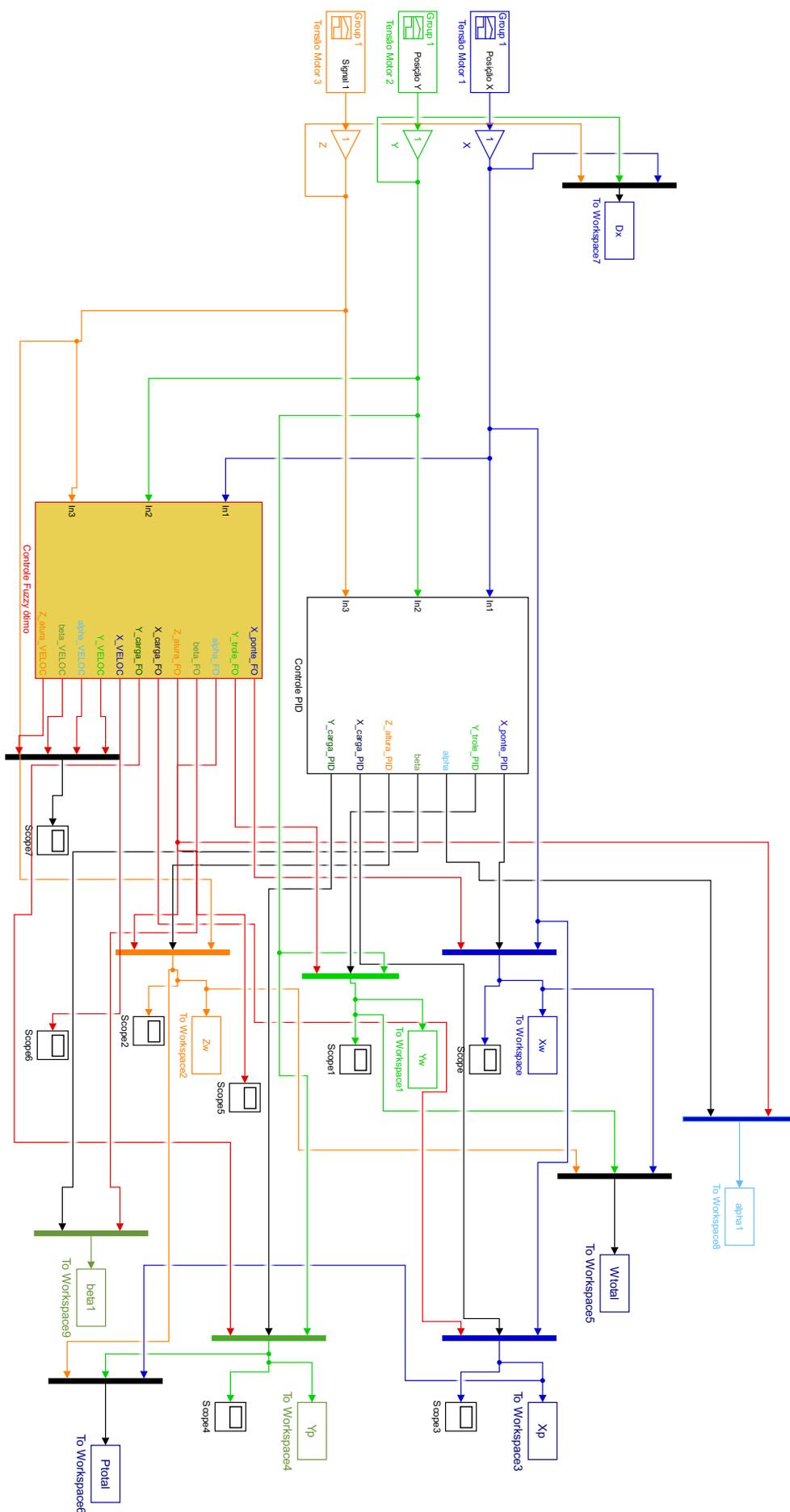


Figura 31 – Diagrama de blocos de Controle *Fuzzy-Ótimo* e *PID*

Como observa-se na Figura 31, a linha azul caracteriza-se pelos sinais em relação ao eixo X , a linha verde se refere aos sinais em relação ao eixo Y e conseqüentemente a cor laranja se refere aos sinais correspondente ao eixo Z . O bloco branco se refere ao controlador PID , já o bloco em laranja se refere ao sistema de controlador *Fuzzy-Ótimo*. Os blocos de controle são confrontados simultaneamente para a análise do sinal de resposta ao degrau unitário ao longo do tempo. Portanto deve ser necessário um ajuste e regulagem do sinal de saída para cada controlador, entretanto é imprescindível amplificar os sinais de saída. Existe a possibilidade de adicionar outros tipos de controle a nível de avaliação. Como observado nas figuras do Capítulo 5 o tempo de simulação total corresponde exatamente a 100 segundos. As grandezas de deslocamento estão sendo representados em metros, logo a velocidades e aceleração de deslocamento de cada eixo estão compreendidos em m/s e m/s^2 respectivamente.

No sistema de controle *Fuzzy-Ótimo* executado no bloco do Simulink® da Figura 32, descreve-se as entradas X em azul, Y em verde e Z em laranja. Como descrito no Apêndice B as entradas são descritas com o mesmo número de estados totalizando 10 entradas, porém apenas 3 sinais de entrada são utilizados e as demais entradas são nulas. As saídas do sistema compreendem exatamente em 10 saídas, contudo as saídas da posição pendular da carga esta adicionada na Figura 32 para o eixo X_{carga} e o eixo Y_{carga} . Os sinais de saída devem ser ajustados de forma amplificada para o sinal de entrada.

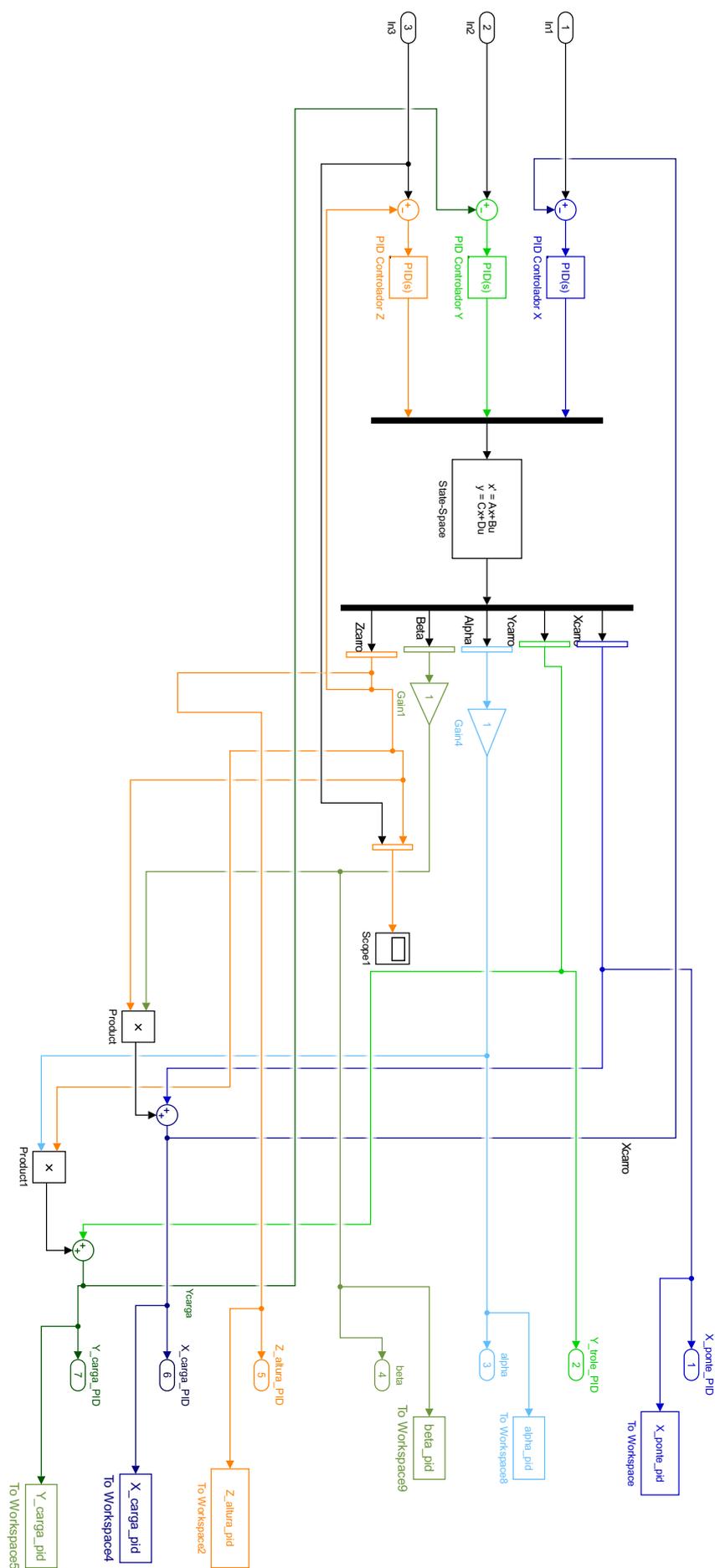


Figura 33 – Diagrama de Bloco de Controle *PID* no Simulink®

O controlador *PID* representado em diagrama de blocos na Figura 33, são executados os sinais de controle para a resposta à entrada da função degrau unitário. O bloco utiliza-se da ferramenta toolbox *PID Tuner* para sintonizar os ganhos K_p , K_i e K_d adequado a resposta de controle ao movimento da ponte rolante. Utiliza-se também o preenchimento dos ganhos (K_p , K_i e K_d) por tentativa e erro. São utilizados três controladores *PID*, onde cada controlador *PID* corresponde uma linha com uma cor diferente. A linha azul representa o deslocamento horizontal do eixo X , a linha verde representa o deslocamento horizontal no eixo Y , enquanto que a cor laranja indica o deslocamento vertical no eixo Z . Observa-se que o sistema mantém-se em malha fechada ao subtrair os sinais de entrada com os sinais de saída para cada cor correspondente.

APÊNDICE B

DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO COMPLEMENTAR

Neste apêndice são apresentados o desenvolvimento matemático complementar do sistema de ponte rolante. O modelo matemático é trabalho de forma completa passo à passo. Apresenta-se variáveis anuladas que não foram incluídas nas equações da modelagem matemática do capítulo 2 e que são fundamentais no entendimento das equações desenvolvidas. A equação de Euler-Lagrange e a energia cinética e potencial apresentam desenvolvimento completo. As variáveis de posição e ângulos são destacadas em cores diferentes para facilitar o entendimento dos cálculos.

Obtenção dos ângulos e posições associados ao balanço pendular da carga durante o deslocamento da ponte rolante.

Ângulos associados.

$$\sin \beta = \frac{x_1}{x_2}$$

$$\cos \beta = \frac{z_1}{x_2}$$

$$\sin \alpha = \frac{y_1}{l}$$

$$\cos \alpha = \frac{x_2}{l}$$

Posição da carga nos eixos.

$$x_1 = l \cos \alpha \sin \beta$$

$$y_1 = l \sin \alpha$$

$$z_1 = l \cos \alpha \cos \beta$$

Posição da carga na ponte Rolante com oscilações pendulares.

$$x_{carga} = x_{ponte} + l \cos \alpha \sin \beta$$

$$y_{carga} = y_{trole} + l \sin \alpha$$

$$z_{carga} = -l \cos \alpha \cos \beta$$

Velocidade da carga para cada eixo.

$$\dot{x}_{carga} = \dot{x}_{ponte} + \dot{l} \cos \alpha \sin \beta - l \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta$$

$$\dot{y}_{carga} = \dot{y}_{trole} + \dot{l} \sin \alpha + l \dot{\alpha} \cos \alpha$$

$$\dot{z}_{carga} = -\dot{l} \cos \alpha \cos \beta + l \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta + l \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta$$

Velocidade da carga total em três dimensões.

$$v^2 = \dot{x}_{carga}^2 + \dot{y}_{carga}^2 + \dot{z}_{carga}^2$$

$$v^2 = (\dot{x}_{ponte} + \dot{l} \cos \alpha \sin \beta - l \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta)^2 + (\dot{y}_{trole} + \dot{l} \sin \alpha + l \dot{\alpha} \cos \alpha)^2 + (-\dot{l} \cos \alpha \cos \beta + l \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta + l \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta)^2$$

$$v^2 = (\dot{x}_{ponte}^2 + \dot{l}^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta + l^2 \dot{\alpha}^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + 2\dot{x}\dot{l} \cos \alpha \sin \beta - 2\dot{x}l \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta \cos \alpha + 2l\dot{l} \dot{\alpha} \sin \alpha \sin^2 \beta \cos \alpha + 2l\dot{l} \dot{\beta} \cos^2 \alpha \sin \beta \cos \beta - 2l^2 \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \sin \beta \cos \alpha \cos \beta + 2\dot{x}l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta + l^2 \dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta) + (\dot{y}_{trole}^2 + \dot{l}^2 \sin^2 \alpha + 2\dot{y}_{trole} \dot{l} \sin \alpha + 2\dot{y}_{trole} l \dot{\alpha} \cos \alpha + 2l \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \alpha + l^2 \dot{\alpha}^2 \cos^2 \alpha) + (-\dot{l}^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta - 2l\dot{l} \sin \alpha \cos \alpha \cos^2 \beta - 2l\dot{l} \dot{\beta} \sin \beta \cos^2 \alpha \cos \beta + 2l^2 \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \sin \beta \cos \alpha \cos \beta + l^2 \dot{\alpha}^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \beta + l^2 \dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta)$$

$$v^2 = (\dot{x}_{ponte}^2 + \dot{l}^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta + l^2 \dot{\alpha}^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + 2\dot{x}\dot{l} \cos \alpha \sin \beta - 2\dot{x}l \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta \cos \alpha + 2l\dot{l} \dot{\alpha} \sin \alpha \sin^2 \beta \cos \alpha + 2l\dot{l} \dot{\beta} \cos^2 \alpha \sin \beta \cos \beta - 2l^2 \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \sin \beta \cos \alpha \cos \beta + 2\dot{x}l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta + l^2 \dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta) + (\dot{y}_{trole}^2 + \dot{l}^2 \sin^2 \alpha + 2\dot{y}_{trole} \dot{l} \sin \alpha + 2\dot{y}_{trole} l \dot{\alpha} \cos \alpha + 2l \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \alpha + l^2 \dot{\alpha}^2 \cos^2 \alpha) + (-\dot{l}^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta - 2l\dot{l} \sin \alpha \cos \alpha \cos^2 \beta - 2l\dot{l} \dot{\beta} \sin \beta \cos^2 \alpha \cos \beta + 2l^2 \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \sin \beta \cos \alpha \cos \beta + l^2 \dot{\alpha}^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \beta + l^2 \dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta)$$

$$v_{carga}^2 = \dot{x}_{ponte}^2 + \dot{y}_{trole}^2 + \dot{l}^2 + 2\dot{x}(\dot{l} \cos \alpha \sin \beta - l \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta) + 2\dot{y}_{trole}(\dot{l} \sin \alpha + l \dot{\alpha} \cos \alpha) + l^2 \dot{\alpha}^2 + l^2 \dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha$$

Energía Cinética Total.

$$K = \frac{1}{2} m v^2$$

$$K = K_{trole} + K_{ponte} + K_{carga}$$

$$K = \frac{1}{2} m_{trole} v_{trole}^2 + \frac{1}{2} m_{ponte} v_{ponte}^2 + \frac{1}{2} m_{carga} v_{carga}^2$$

$$K = \frac{1}{2} m_{trole} (\dot{x}_{ponte}^2 + \dot{y}_{trole}^2) + \frac{1}{2} m_{ponte} \dot{x}_{ponte}^2 + \frac{1}{2} m_{carga} v_{carga}^2$$

$$K = \frac{1}{2} m_{trole} \dot{x}_{ponte}^2 + \frac{1}{2} m_{trole} \dot{y}_{trole}^2 + \frac{1}{2} m_{ponte} \dot{x}_{ponte}^2 + \frac{1}{2} m_{carga} v_{carga}^2$$

$$K = \frac{1}{2} (m_{trole} + m_{ponte}) \dot{x}_{ponte}^2 + \frac{1}{2} m_{trole} \dot{y}_{trole}^2 + \frac{1}{2} m_{carga} v_{carga}^2$$

$$K = \frac{1}{2}(m_{trole} + m_{ponte})\dot{x}_{ponte}^2 + \frac{1}{2}m_{trole}\dot{y}_{trole}^2 + \frac{1}{2}m_{carga}[\dot{x}_{ponte}^2 + \dot{y}_{trole}^2 + \dot{l}^2 + 2\dot{x}(l \cos \alpha \sin \beta - l\dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + l\dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta) + 2\dot{y}_{trole}(l \sin \alpha + l\dot{\alpha} \cos \alpha) + l^2\dot{\alpha}^2 + l^2\dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha]$$

$$K = \frac{1}{2}(m_{trole} + m_{ponte})\dot{x}_{ponte}^2 + \frac{1}{2}m_{trole}\dot{y}_{trole}^2 + \frac{1}{2}m_{carga}\dot{x}_{ponte}^2 + \frac{1}{2}m_{carga}\dot{y}_{trole}^2 + \frac{1}{2}m_{carga}\dot{l}^2 + m_{carga}\dot{x}(l \cos \alpha \sin \beta - l\dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + l\dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta) + m_{carga}\dot{y}_{trole}(l \sin \alpha + l\dot{\alpha} \cos \alpha) + \frac{1}{2}m_{carga}l^2\dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2}m_{carga}l^2\dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha$$

$$K = \frac{1}{2}(m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga})\dot{x}_{ponte}^2 + \frac{1}{2}(m_{trole} + m_{carga})\dot{y}_{trole}^2 + \frac{1}{2}m_{carga}\dot{l}^2 + m_{carga}\dot{x}(l \cos \alpha \sin \beta - l\dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + l\dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta) + m_{carga}\dot{y}_{trole}(l \sin \alpha + l\dot{\alpha} \cos \alpha) + \frac{1}{2}m_{carga}l^2\dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2}m_{carga}l^2\dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha$$

Energia Potencial Total.

$$P = (m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga})gH - m_{carga}gl \cos \alpha \cos \beta$$

Lagrangiano ou função de Lagrange.

$$L = K - P$$

$$L = \frac{1}{2}(m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga})\dot{x}_{ponte}^2 + \frac{1}{2}(m_{trole} + m_{carga})\dot{y}_{trole}^2 + \frac{1}{2}m_{carga}\dot{l}^2 + m_{carga}\dot{x}(l \cos \alpha \sin \beta - l\dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + l\dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta) + m_{carga}\dot{y}_{trole}(l \sin \alpha + l\dot{\alpha} \cos \alpha) + \frac{1}{2}m_{carga}l^2\dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2}m_{carga}l^2\dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha + m_{carga}gl \cos \alpha \cos \beta - (m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga})gH_{ponte}$$

Equação de Euler-Lagrange é determinado para cada variável de estado, que é dado por:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = u_x \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} = u_y \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \beta} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{l}} \right) - \frac{\partial L}{\partial l} = u_l \end{cases}$$

Desenvolvimento matemático do sistema para cada variável de estado.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} &= \frac{d}{dt} (m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga}) \dot{x}_{ponte} + \frac{d}{dt} (m_{carga} l \cos \alpha \sin \beta) \\ &\quad - \frac{d}{dt} (m_{carga} l \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta) + \frac{d}{dt} (m_{carga} l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta) \\ &= (m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga}) \ddot{x}_{ponte} \\ &\quad + (m_{carga} \ddot{l} \cos \alpha \sin \beta - m_{carga} \dot{l} \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + m_{carga} l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta) \\ &\quad - (m_{carga} \dot{l} \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + m_{carga} l \ddot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + m_{carga} l \dot{\alpha}^2 \cos \alpha \sin \beta \\ &\quad + m_{carga} l \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta) + (m_{carga} l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta + m_{carga} l \ddot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \\ &\quad - m_{carga} l \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta - m_{carga} l \dot{\beta}^2 \cos \alpha \sin \beta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} &= \\ &= (m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga}) \ddot{x}_{ponte} \\ &\quad + (m_{carga} \ddot{l} \cos \alpha \sin \beta - 2m_{carga} \dot{l} \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + 2m_{carga} l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta) \\ &\quad - m_{carga} \dot{l} \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta - m_{carga} l \dot{\alpha}^2 \cos \alpha \sin \beta + m_{carga} l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \\ &\quad - 2m_{carga} l \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta - m_{carga} l \dot{\beta}^2 \cos \alpha \sin \beta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} &= \frac{d}{dt} (m_{carga}) \dot{y}_{trole} + \frac{d}{dt} (m_{carga} l \sin \alpha) + \frac{d}{dt} (m_{carga} l \dot{\alpha} \cos \alpha) \\ &\quad + \frac{d}{dt} (m_{carga} \dot{l} \sin \alpha) + \frac{d}{dt} (m_{carga} l \dot{\alpha} \cos \alpha) \\ &= (m_{trole} + m_{carga}) \ddot{y}_{trole} + (m_{carga} \ddot{l} \sin \alpha + 2m_{carga} l \dot{\alpha} \cos \alpha) \\ &\quad + m_{carga} \dot{l} \dot{\alpha} \cos \alpha - m_{carga} l \dot{\alpha}^2 \sin \alpha = u_y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{l}} \right) - \frac{\partial L}{\partial l} &= \frac{d}{dt} (m_{carga} \dot{l}) + \frac{d}{dt} (m_{carga} \dot{x} \cos \alpha \sin \beta) + \frac{d}{dt} (m_{carga} \dot{y}_{trole} \sin \alpha) \\
&\quad - [m_{carga} \dot{x} (-\dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta) + m_{carga} \dot{y}_{trole} (\dot{\alpha} \cos \alpha) \\
&\quad + m_{carga} l \dot{\alpha}^2 + m_{carga} l \dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha + m_{carga} g \cos \alpha \cos \beta] \\
&= m_{carga} \ddot{l} \\
&\quad + (m_{carga} \ddot{x} \cos \alpha \sin \beta - m_{carga} \dot{x} \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta + m_{carga} \dot{x} \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta) \\
&\quad + (m_{carga} \ddot{y}_{trole} \sin \alpha + m_{carga} \dot{y}_{trole} \dot{\alpha} \cos \alpha) + m_{carga} \dot{x} \dot{\alpha} \sin \alpha \sin \beta \\
&\quad - m_{carga} \dot{x} \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta - m_{carga} \dot{y}_{trole} (\dot{\alpha} \cos \alpha) - m_{carga} l \dot{\alpha}^2 \\
&\quad - m_{carga} l \dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha - m_{carga} g \cos \alpha \cos \beta
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} &= -m_{carga} \dot{x} l \sin \alpha \sin \beta - m_{carga} \dot{x} l \sin \alpha \sin \beta - m_{carga} \dot{x} l \dot{\alpha} \cos \alpha \sin \beta \\
&\quad - m_{carga} \dot{x} l \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta + m_{carga} \dot{y}_{trole} l \cos \alpha + m_{carga} \dot{y}_{trole} l \cos \alpha \\
&\quad - m_{carga} \dot{y}_{trole} l \dot{\alpha} \sin \alpha + 2m_{carga} l \dot{l} \dot{\alpha} + m_{carga} l^2 \ddot{\alpha} + m_{carga} \dot{x} l \sin \alpha \sin \beta \\
&\quad + m_{carga} \dot{x} l \dot{\alpha} \cos \alpha \sin \beta + m_{carga} \dot{x} l \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta - m_{carga} \dot{y}_{trole} l \cos \alpha \\
&\quad + m_{carga} \dot{y}_{trole} l \dot{\alpha} \sin \alpha + m_{carga} l^2 \dot{\beta}^2 \cos \alpha \sin \alpha + m_{carga} g l \sin \alpha \cos \beta
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} &= -m_{carga} \dot{x} l \sin \alpha \sin \beta - m_{carga} \dot{y}_{trole} l \cos \alpha + 2m_{carga} l \dot{l} \dot{\alpha} + m_{carga} l^2 \ddot{\alpha} \\
&\quad + m_{carga} l^2 \dot{\beta}^2 \cos \alpha \sin \alpha + m_{carga} g l \sin \alpha \cos \beta
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \beta} &= \frac{d}{dt} (m_{carga} l^2 \dot{\beta} \cos^2 \alpha) + \frac{d}{dt} (l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta) \\
&\quad - [m_{carga} \dot{x} l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta - m_{carga} \dot{x} l \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta \\
&\quad - m_{carga} \dot{x} l \dot{\beta}^2 \cos \alpha \sin \beta - m_{carga} g l \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta] \\
&= (2m_{carga} l \dot{\beta} \cos^2 \alpha + m_{carga} l^2 \dot{\beta} \cos^2 \alpha - m_{carga} l^2 \dot{\beta} \dot{\alpha} \sin 2\alpha) \\
&\quad - m_{carga} \dot{x} l \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta + m_{carga} \dot{x} l \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta \\
&\quad + m_{carga} \dot{x} l \dot{\beta}^2 \cos \alpha \sin \beta + m_{carga} g l \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta
\end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \beta}$$

$$\begin{aligned}
& m_{carga} \ddot{x} l \cos \alpha \cos \beta + m_{carga} \dot{x} \dot{l} \cos \alpha \cos \beta - m_{carga} \dot{x} \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta \\
& - m_{carga} \dot{x} \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta + 2m_{carga} l \dot{\beta} \cos^2 \alpha \\
& + m_{carga} l^2 \ddot{\beta} \cos^2 \alpha - 2m_{carga} l^2 \dot{\beta} \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \alpha - m_{carga} \dot{x} \dot{l} \cos \alpha \cos \beta \\
& + m_{carga} \dot{x} \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta + m_{carga} \dot{x} \dot{\beta} \cos \alpha \sin \beta + m_{carga} g l \cos \alpha \sin \beta
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \beta} &= m_{carga} \ddot{x} l \cos \alpha \cos \beta + 2m_{carga} l \dot{\beta} \cos^2 \alpha \\
&+ m_{carga} l^2 \ddot{\beta} \cos^2 \alpha - 2m_{carga} l^2 \dot{\beta} \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \alpha + m_{carga} g l \cos \alpha \sin \beta
\end{aligned}$$

Linearizando para os ângulos associados.

$$\begin{aligned}
(m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga}) \ddot{x}_{ponte} + (m_{carga} \ddot{\beta} - 2m_{carga} \dot{\alpha} \dot{\beta} + 2m_{carga} \dot{\beta}^2) \\
- m_{carga} l \ddot{\alpha} \dot{\beta} - m_{carga} l \dot{\alpha}^2 \dot{\beta} + m_{carga} l \ddot{\beta} - 2m_{carga} l \dot{\alpha} \dot{\beta} \dot{\alpha} - m_{carga} l \dot{\beta}^2 \dot{\beta} \\
= u_x
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga}) \ddot{x}_{ponte} + (m_{carga} \ddot{\beta} - 2m_{carga} \dot{\alpha} \dot{\beta} + 2m_{carga} \dot{\beta}^2) \\
- m_{carga} l \ddot{\alpha} \dot{\beta} - m_{carga} l \dot{\alpha}^2 \dot{\beta} + m_{carga} l \ddot{\beta} - 2m_{carga} l \dot{\alpha} \dot{\beta} \dot{\alpha} - m_{carga} l \dot{\beta}^2 \dot{\beta} \\
= u_x
\end{aligned}$$

$$(m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga}) \ddot{x}_{ponte} + m_{carga} l \ddot{\beta} = u_x$$

$$\begin{aligned}
(m_{trole} + m_{carga}) \ddot{y}_{trole} + (m_{carga} \ddot{l} \sin \alpha + 2m_{carga} l \dot{\alpha} \cos \alpha) + m_{carga} l \ddot{\alpha} \cos \alpha \\
- m_{carga} l \dot{\alpha}^2 \sin \alpha = u_y
\end{aligned}$$

$$(m_{trole} + m_{carga}) \ddot{y}_{trole} + (m_{carga} \ddot{l} \alpha + 2m_{carga} l \dot{\alpha}) + m_{carga} l \ddot{\alpha} - m_{carga} l \dot{\alpha}^2 \alpha = u_y$$

$$(m_{trole} + m_{carga}) \ddot{y}_{trole} + m_{carga} \ddot{l} \alpha + 2m_{carga} l \dot{\alpha} + m_{carga} l \ddot{\alpha} - m_{carga} l \dot{\alpha}^2 \alpha = u_y$$

$$(m_{trole} + m_{carga})\ddot{y}_{trole} + m_{carga}l\ddot{\alpha} = u_y$$

$$m_{carga}\ddot{l} + m_{carga}\ddot{x} \cos \alpha \sin \beta + m_{carga}\ddot{y}_{trole} \sin \alpha - m_{carga}l\dot{\alpha}^2 - m_{carga}l\dot{\beta}^2 \cos^2 \alpha - m_{carga}g \cos \alpha \cos \beta = u_l$$

$$m_{carga}\ddot{l} + m_{carga}\ddot{x}\beta + m_{carga}\ddot{y}_{trole}\alpha - m_{carga}l\dot{\alpha}^2 - m_{carga}l\dot{\beta}^2 - m_{carga}g = u_l$$

$$m_{carga}\ddot{l} - m_{carga}g = u_l$$

$$m_{carga}\ddot{x}l + 2m_{carga}l\dot{\beta} + m_{carga}l^2\ddot{\beta} - 2m_{carga}l^2\dot{\beta}\dot{\alpha}\alpha + m_{carga}gl\beta = 0$$

$$m_{carga}\ddot{x}l + 2m_{carga}l\dot{\beta} + m_{carga}l^2\ddot{\beta} - 2m_{carga}l^2\dot{\beta}\dot{\alpha}\alpha + m_{carga}gl\beta = 0$$

$$(\ddot{x} + l\ddot{\beta} + g\beta) = 0$$

$$-m_{carga}\ddot{x}l \sin \alpha \sin \beta + m_{carga}\ddot{y}_{trole}l \cos \alpha + 2m_{carga}l\dot{\alpha} + m_{carga}l^2\ddot{\alpha} + m_{carga}l^2\dot{\beta}^2 \cos \alpha \sin \alpha + m_{carga}gl \sin \alpha \cos \beta = 0$$

$$-m_{carga}\ddot{x}l\alpha\beta + m_{carga}\ddot{y}_{trole}l + 2m_{carga}l\dot{\alpha} + m_{carga}l^2\ddot{\alpha} + m_{carga}l^2\dot{\beta}^2\alpha + m_{carga}gl\alpha = 0$$

$$\ddot{y}_{trole} + l\ddot{\alpha} + g\alpha = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga})\ddot{x} + m_{carga}l\ddot{\beta} = u_x \\ (m_{trole} + m_{carga})\ddot{y} + m_{carga}l\ddot{\alpha} = u_y \\ m_{carga}\ddot{l} - m_{carga}g = u_l \\ \ddot{x} + l\ddot{\beta} + g\beta = 0 \\ \ddot{y} + l\ddot{\alpha} + g\alpha = 0 \end{array} \right.$$

Linearização para pequenos ângulos.

$$\left\{ \begin{array}{l} (m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga})\ddot{x} + m_{carga}l\ddot{\beta} = u_x \\ (m_{trole} + m_{carga})\ddot{y} + m_{carga}l\ddot{\alpha} = u_y \\ m_{carga}\ddot{l} - m_{carga}g = u_l \\ \ddot{x} + l\ddot{\beta} + g\beta = 0 \\ \ddot{y} + l\ddot{\alpha} + g\alpha = 0 \end{array} \right.$$

Modificação da equação para ser utilizada em espaço de estados.

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = \frac{u_x}{(m_{trole} + m_{ponte})} + \frac{m_{carga}g\beta}{(m_{trole} + m_{ponte})} \\ \ddot{y} = \frac{u_y}{m_{trole}} + \frac{m_{carga}g\alpha}{m_{trole}} \\ \ddot{\beta} = -\frac{1}{l(m_{trole} + m_{ponte})}u_x - \frac{g(m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga})}{l(m_{trole} + m_{ponte})}\beta \\ \ddot{\alpha} = -\frac{1}{lm_{trole}}u_y - \frac{g(m_{carga} + m_{trole})}{lm_{trole}}\alpha \\ \ddot{l} = \frac{u_l}{m_{carga}} + g \end{array} \right.$$

Separando os estados de segunda ordem.

$$\ddot{x} = \frac{u_x}{(m_{trole} + m_{ponte})} + \frac{m_{carga}g\beta}{(m_{trole} + m_{ponte})}$$

$$\ddot{y} = \frac{u_y}{m_{trole}} + \frac{m_{carga}g\alpha}{m_{trole}}$$

$$\ddot{\beta} = -\frac{1}{l(m_{trole} + m_{ponte})}u_x - \frac{g(m_{trole} + m_{ponte} + m_{carga})}{l(m_{trole} + m_{ponte})}\beta$$

$$\ddot{\alpha} = -\frac{1}{lm_{trole}}u_y - \frac{g(m_{carga} + m_{trole})}{lm_{trole}}\alpha$$

$$\ddot{l} = \frac{u_l}{m_{carga}} + g$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Considerando a tabela 2 do Capítulo 4, as massas medidas da ponte rolante resultam em

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8918 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.4525 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -53.5091 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -61.3125 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0.0909 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.4545 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.2500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10.8100 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

As Matrizes são modificadas após o controle Fuzzy-ótimo, assim sendo, após o processo de controle passam a ter suas dimensões determinadas pelo tamanho da matriz de estados A.

APÊNDICE C

DISPOSITIVOS E ELEMENTOS DA PONTE ROLANTE

No intuito de salientar os principais elementos de hardware que compõem o sistema de controle, dispositivos de controle e sensores utilizados para implantações do sistema de controle *Fuzzy-Ótimo* são apresentados neste apêndice.

Para fins de avaliação de sistemas de controle e capacitação de engenheiros na grande área de Automação e Controle, desenvolve-se no Laboratório de Controle de Processo (LCP) e Laboratório de Sistemas Embarcados e Controle Inteligente (LabSECI) da (PGEEE/CEET/UFMA) um protótipo. Nesse apêndice são apresentados os dispositivos necessários na construção do referido protótipo de ponte rolante. O projeto mecânico das pontes rolantes não é o foco desta dissertação, mas sim, a automação das mesmas, abrangendo todos os seus dispositivos eletroeletrônicos e eletromecânicos.



Figura 34 – Protótipo de uma Ponte Rolante em laboratório.

C.1 PWM (Modulação por Largura de Pulso)

A Ponte Rolante, assim como outros equipamentos envolvendo dispositivos como sensores e atuadores, necessita de um controle fino. O Protótipo tem atuadores do tipo

motor CC, que precisa de controle eletrônico na alimentação de tensão CC.

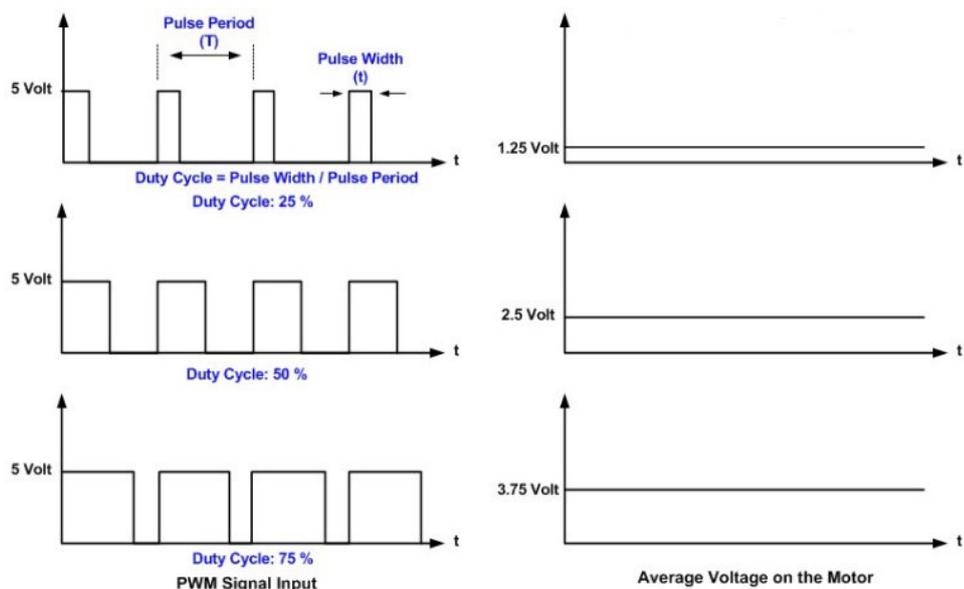


Figura 35 – Forma de onda por largura de pulso

Ao modificar a largura de pulso da tensão, a rotação do motor pode aumentar ou diminuir, de acordo com a variação de largura de pulso, como mostra a Figura 35. A velocidade de deslocamento é diretamente afetada pela variação do potenciômetro, que consequentemente varia a largura de pulso.

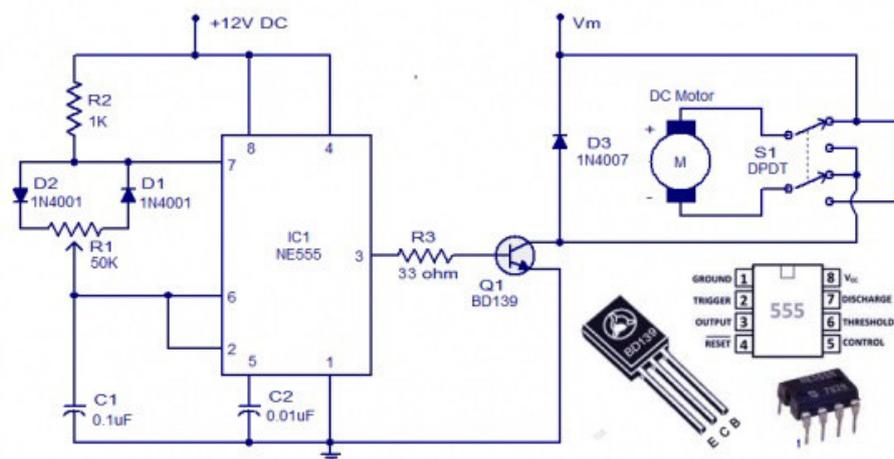


Figura 36 – Circuito PWM típico

C.2 Ponte H

A ponte H é um circuito eletrônico (um chopper classe E converte uma fonte fixa de corrente contínua fixa em uma tensão de corrente contínua variável abrindo e fechando

diversas vezes). Portanto, pode determinar o sentido da corrente, a polaridade da tensão e a tensão em um dado sistema ou componente.

Seu funcionamento dá-se pelo chaveamento de componentes eletrônicos usualmente utilizando do método de PWM para determinar além da polaridade, o módulo da tensão em um dado ponto de um circuito.

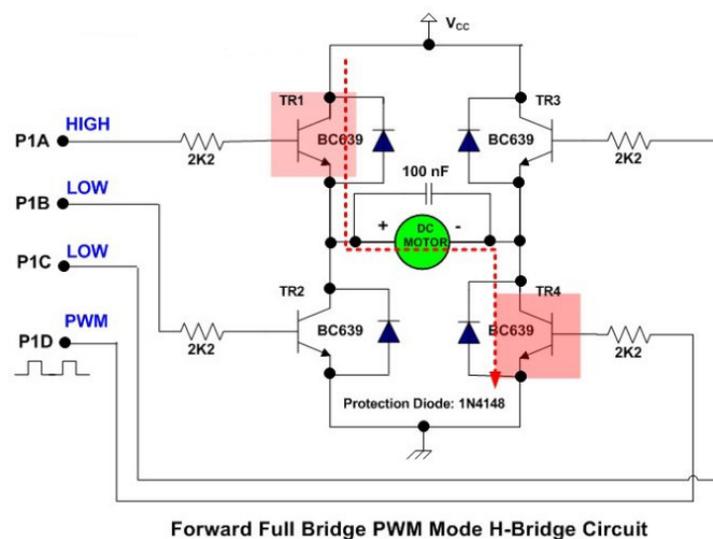


Figura 37 – Ponte H para reversão da tensão

C.3 Fonte Chaveada 12V

A fonte utilizada deve chavear a tensão 12V e -12V para a alimentação dos motores, substituindo a Ponte H. A Figura 38 apresenta as características do equipamento, onde o mesmo suporta correntes de até 30 amperes.



Figura 38 – Fonte 12V chaveada

C.4 Sensores

Um sensor é um dispositivo que responde a um estímulo físico/químico de maneira específica e que pode ser transformado em outra grandeza física para fins de medição e/ou monitoramento. Desta forma, o sensor associado a um módulo de transformação do estímulo em uma grandeza para fins de medição e/ou monitoramento pode ser definido como transdutor ou medidor, que converte um tipo de energia em outro.

C.4.1 Fim de curso mecânico

As chaves fim de curso podem determinar a presença ou ausência, passagem, posicionamento e término do curso de um objeto, por isso o nome de “chave fim de curso”.

Sensores de fim de curso, ou do inglês *microswitch*, são dispositivos eletromecânicos que tem como função indicar que um motor ou a estrutura ligada ao seu eixo (um portão automático, por exemplo) chegaram ao fim do seu campo de movimento. Este são sensores simples de trabalhar, principalmente na programação, já que funcionam como um interruptor de comandos elétricos.

O sensor de fim de curso é capaz de ser atuado por uma força física externa muito pequena, é um dispositivo de baixo custo e com alta durabilidade, geralmente projetados para suportar mais de 1 milhão de ciclos, e este valor pode chegar até 10 milhões de ciclos, para modelos destinados a aplicações mais robustas.



Figura 39 – Fim de curso-mecânico

C.4.2 Fim de curso fotoelétrico

A finalidade de um sensor fotoelétrico é converter um sinal luminoso (luz ou sombra) num sinal elétrico que possa ser processado por um circuito eletrônico. Ele funciona como uma chave liga e desliga no sistema.



Figura 40 – Fim de curso-Fotoelétrico.

C.4.3 Encoder rotativo

Encoder rotativo (ou encoder rotatório) na Figura 41, é um dispositivo eletromecânico que conta ou reproduz pulsos elétricos a partir do movimento rotacional de seu eixo. Pode ser definido também como um transdutor rotativo ou transdutor angular. No protótipo da ponte rolante é responsável por enviar informações de deslocamento, velocidade e aceleração. No projeto utilizamos três encoders para localização da carga e posicionamento da ponte.



Figura 41 – Encoder Rotativo.

C.4.4 Sensor Angular

Para o sensor angular utilizamos o transdutor que converte o movimento linear XY em um valor angular entre 30° e -30° para os ângulos α e β . Assim podemos converter um ângulo em sinal elétrico através de uma sensor analógico de movimento como na Figura 42.



Figura 42 – Sensor Angular

C.5 Atuadores

Atendendo a comandos que podem ser elétricos, mecânicos ou manuais, o atuador pode ser definido como um elemento que produz movimento. O mercado oferece diversos modelos desse produto, como por exemplo os atuadores por cilindros hidráulicos, pneumáticos ou dispositivos rotativos com acionamento de diferentes naturezas.

Nesse contexto, é importante ressaltar que sempre um servomecanismo deve obedecer a um comando. Na maioria das vezes, os servomecanismos são acoplados a um sistema conhecido como malha fechada, que informa ao sistema de comando se a tarefa pedida de fato foi realizada. Para fazer isso, existe a possibilidade de utilizar transdutores de posição como potenciômetros e encoders.

C.5.1 Motor CC

Um motor cc nada mais é do que um motor alimentado por corrente contínua (CC), sendo esta alimentação proveniente de uma bateria ou qualquer outra de alimentação CC. A sua comutação (troca de energia entre rotor e estator) pode ser através de escovas (escovado) ou sem escovas (brushless) e com relação a velocidade, o motor cc pode ser controlado apenas variando a sua tensão, diferentemente de um motor elétrico de corrente alternada (CA) cuja a velocidade é variada pela frequência. Vejamos na Figura 43.



Figura 43 – Motor CC

Na Tabela 9 apresenta as especificações do motor utilizado na Ponte Rolante. O Projeto deve considerar as correntes nominais e máximas para cada condição de trabalho. Assim a fonte deve suportar as variações da corrente ao longo dos esforços envolvidos.

Tabela 9 – Especificação do Motor CC

Especificações Técnicas	
Voltagem Nominal DC	12 V
Torque Nominal	3 N.m
Corrente Nominal	7,5 A
Velocidade Nominal	65+-15 rpm
Corrente (sem Carga)	$\leq 2,5$ A
Velocidade (sem carga)	≥ 80 rpm
Corrente (Motor Travado)	25 A
Torque (motor travado)	≥ 8 N.m
Ruído	≤ 55 dB

C.5.2 Chave Contatora

Contactador ou contator é um dispositivo eletromecânico que permite, a partir de um circuito de comando, efetuar o controle de cargas num circuito de potência. Essas cargas podem ser de qualquer tipo, de tensão diferente do circuito de comando, e até conter múltiplas fases como descrito na Figura 44.



Figura 44 – Chave Contatora

C.5.3 Controlador Lógico Programável

Controlador Lógico Programável segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), é um equipamento eletrônico digital com *hardware* e *software* compatíveis com aplicações industriais. Segundo a NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*), é um aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para armazenar internamente instruções e para implementar funções específicas, tais como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, controlando, por meio de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos.

Um CLP é o controlador indicado para lidar com sistemas caracterizados por eventos discretos (SEDs), ou seja, com processos em que as variáveis assumem valores zero ou um (ou variáveis ditas digitais, ou seja, que só assumem valores dentro de um conjunto finito). Podem ainda lidar com variáveis analógicas definidas por intervalos de valores de corrente ou tensão elétrica. As entradas e/ou saídas digitais são os elementos discretos, as entradas e/ou saídas analógicas são os elementos variáveis entre valores conhecidos de tensão ou corrente. A Figura 45 apresenta PLC com as características básicas para o controle de um protótipo de ponte rolante.



Figura 45 – CLP

APÊNDICE D

NORMAS E PROCEDIMENTOS PARA PONTES ROLANTES

Neste apêndice é retratado as normas e procedimentos para a definição de referências técnicas, princípios fundamentais e medidas de proteção aos operadores. As normas regulamentadoras (NRs) são observâncias obrigatórias pelas empresas privadas e públicas e pelos órgãos públicos de administração direta e indireta, que possuam empregados regidos pela Consolidação das Leis do Trabalho. São elaboradas e modificadas por comissões tripartites específicas compostas por representantes do governo, empregadores e trabalhadores. Tem como um dos principais objetivos, a padronização dos procedimentos de segurança e saúde do trabalho.

D.1 A Norma Regulamentadora 11 – NR 11

D.1.1 Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais

A Norma Regulamentadora 11 – NR 11 – do Ministério do Trabalho e Emprego estabelece de acordo com seu artigo **11.1** "Normas de segurança para operação de elevadores, guindastes, transportadores industriais e máquinas transportadoras".

11.1.3 "Os equipamentos utilizados na movimentação de materiais, tais como ascensores, elevadores de carga, guindastes, monta-carga, pontes-rolantes, talhas, empilhadeiras, guinchos, esteiras rolantes, transportadores de diferentes tipos, serão calculados e construídos de maneira que ofereçam as necessárias garantias de resistência e segurança e conservados em perfeitas condições de trabalho".

A única forma de assegurar que a ponte rolante, talha ou pórtico seja calculada e construída de maneira a oferecer as necessárias garantias de resistência e segurança

é adquirir estes equipamentos de fornecedores que possuam pessoal técnico qualificado, registrado e que forneçam a ART – Anotação de Responsabilidade Técnica – junto ao CREA do Estado onde o equipamento será instalado.

Para garantir que a ponte rolante, talha ou pórtico sejam conservados em perfeitas condições de trabalho é necessário que o usuário encontre empresas prestadoras de serviço qualificadas, experientes e equipadas para atuar neste tipo de equipamento. A Figura 46 apresenta a operação de uma ponte rolante com as condições mínimas de segurança.



Figura 46 – Segurança em sua Operação

11.1.3.1 e 11.1.8 Especial atenção será dada aos cabos de aço, cordas, correntes, roldanas e ganchos que deverão ser inspecionados, permanentemente, substituindo-se suas partes defeituosas.

Todos os transportadores industriais serão permanentemente inspecionados e as peças defeituosas, ou que apresentem deficiências, deverão ser imediatamente substituídas.

Além de assegurar que os prestadores de serviço realmente efetuem a substituição de peças defeituosas, pois, a qualquer momento pode ser necessário utilizar a ponte rolante, talha ou pórtico com sua carga máxima, é necessário que o treinamento proposto no artigo 11.1.5 habilite o operador a avaliar constantemente os itens presentes no artigo **11.1.3.1** avisando aos responsáveis imediatamente quando detectar algum item duvidoso.

11.1.3.2 Em todo equipamento será indicado, em local visível, a carga máxima de trabalho permitida.

A indicação da carga máxima de trabalho permitida, por si só, não garante a inexistência de sobrecargas durante a operação da ponte rolante, talha ou pórtico. É necessária a instalação de limitadores de carga para efetivamente impedir essas sobrecargas.

11.1.5, 11.1.6 e 11.1.6.1

Nos equipamentos de transporte, com força motriz própria, o operador deverá receber treinamento específico, dado pela empresa, que o habilitará nessa função.

Os operadores de equipamentos de transporte motorizado deverão ser habilitados e só poderão dirigir se durante o horário de trabalho portarem um cartão de identificação, com o nome e fotografia, em lugar visível.

O cartão terá a validade de 1 (um) ano, salvo imprevisto, e, para a revalidação, o empregado deverá passar por exame de saúde completo, por conta do empregador.

É importante que este treinamento seja ministrado por empresas e profissionais qualificados, que além de versar sobre a operação de ponte rolante, talha e pórtico, também habilitem o operador a inspecionar os itens previstos no artigo **11.1.3.1**.

11.1.7 Os equipamentos de transporte motorizados deverão possuir sinal de advertência sonora (buzina).

A instalação de sinal de advertência sonora (buzina) e de limitadores de carga é realizada no painel elétrico da ponte rolante, talha ou pórtico. Portanto, é imprescindível que a empresa prestadora de serviço e seus colaboradores atendam ao descrito na **NR 10** – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade que “estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade”.

Dentro do grupo de máquinas transportadoras pode-se encontrar a ponte rolante, a talha e o pórtico. Estes equipamentos são bastante utilizados nas indústrias metalúrgica, metal-mecânica, cimento e de pré-moldados, centros de distribuição de aço, entre outras empresas e segmentos.

D.2 Norma Regulamentadora 12 - NR 12

D.2.1 Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos

Resumidamente a Adequação **NR 12** em Pontes Rolantes refere-se a alterações e enquadramentos de máquinas e equipamentos a novas exigências estabelecidas na Adequação **NR 12** em Pontes Rolantes que prioriza a segurança no trabalho. Por tratar-se de maquinários de grande porte e de elevado peso, a ponte rolante pode colocar em risco a segurança de seu operador mesmo que o profissional seja experiente na função, devido a isso, e inúmeros fatores à Adequação **NR 12** em Pontes Rolantes foi elaborada. Todas as etapas são abordadas na Adequação **NR 12** em Pontes Rolantes desde a sua instalação, operação e manutenções adequadas, visando sempre à prevenção de acidentes no ambiente de trabalho. Para criar uma normativa ou realizar algumas ressalvas como

ocorreram na Adequação **NR 12** em Pontes Rolantes é preciso antes identificar pontos falhos ou que possam ser melhorados, tudo é levado em consideração após uma rigorosa avaliação feita por profissionais qualificados e experientes. O local de instalação, como operar o maquinário adequadamente e também preservá-lo por muito mais tempo com as características originais através de manutenções são pontos abordados na Adequação **NR 12** em Pontes Rolantes.

Esta Norma Regulamentadora e seus anexos definem referências técnicas, princípios fundamentais e medidas de proteção aos trabalhadores, estabelecendo requisitos mínimos para a prevenção de acidentes. O empregador (fabricante) deve adotar medidas de proteção para o trabalho em máquinas e equipamentos, capazes de garantir a saúde e a integridade física dos trabalhadores.

Soluções:

1. Sistema anti colisão LASER e RADAR para pontes rolantes que operam no mesmo caminho de rolamento;
2. Limitador de Carga com ou semi indicação de peso;
3. Inclinômetro que evita a inclinação do cabo de aço impedindo que o mesmo se acomode de maneira incorreta no tambor;
4. Luz de Segurança SAFETY ZONE CRANE;
5. Registrador de Eventos-Caixa Preta;
6. Limite de translação por meio de Chave Cruz;
7. Limite de elevação por meio de Chave Rotativa;
8. Sistema de Rádio Controle com 2 saídas independentes para PARADA DE EMERGÊNCIA;
9. Botoeira pendente;
10. Sinalização audiovisual para alerta durante o traslado;
11. Sirene Eletrônica ou Eletromecânica para aviso ao pedestre;
12. Anemômetro(para aplicações em céu aberto);

D.3 Norma Regulamentadora 18 - NR18

D.3.1 Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção

Desde de dezembro de 2011 a norma NR18 foi revisada no item 18.14.1 e aplica-se também a equipamentos de transporte vertical de materiais. Por conta desta mudança o item sobre Gruas passe a valer também para Pontes Rolantes. Entre outros pontos a destacar a instalação de limites de fim de curso e limitador de carga máxima para o movimento de subida tornam-se obrigatórios.

1. Sistema anti-colisão: por meio de sensores fotoelétricos instalados na ponte rolante é possível evitar a colisão entre pontes, o que poderia causar sérios danos ao equipamento e risco de acidentes.
2. Limites de translação magnéticos – por meio de sensores instalados no caminho de rolamento da ponte e do carro, é possível evitar a colisão em velocidade alta com os finais de curso, evitando assim quebra de rodas, batedores, batentes e principalmente risco de acidentes.
3. Sistema de falta e supervisão de fase – por meio da instalação de um componente eletrônico as fases de alimentação do equipamento são monitoradas, evitando assim que uma falta de fase gere perda de torque, o que no caso de um equipamento de elevação de carga levaria a um acidente. Outro risco prevenido é que no caso de uma inversão de fases os limites de subida e descida podem não operar, o que pode levar ao rompimento do cabo.
4. Redundância no limite de subida – por meio de uma chave de contato e um contrapeso no cabo de aço, um segundo limite de subida é instalado no sistema, a falha do único limite tem sido um grande gerador de acidentes graves com quebra do cabo de aço. Com a instalação de uma redundância neste sistema é possível diminuir significativamente este risco.
5. Limitador de carga – por meio de um sistema acoplado ao cabo de aço, a deformação do cabo em função da carga é avaliada de forma que, caso o operador tente içar uma carga acima da capacidade ajustada o sistema desabilita o movimento de elevação.

D.4 NBR 8400

D.4.1 Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas

Esta Norma fixa as diretrizes básicas para o cálculo das partes estruturais e componentes mecânicos dos equipamentos de levantamento e movimentação de cargas

a) solicitações e combinações de solicitações a serem consideradas; b) condições de resistência dos diversos componentes do equipamento em relação às solicitações consideradas; c) condições de estabilidade a serem observadas.

D.4.2 Componentes

1. Ponte

É a estrutura principal que realiza o movimento de translação (movimento de profundidade dentro de um barracão, por exemplo) da ponte rolante que cobre o vão de trabalho. Uma ponte rolante é constituída por duas cabeceiras e uma uni-viga ou bi-viga.

2. Cabeceiras

Estão localizadas nas extremidades da viga. Nas cabeceiras estão fixadas as rodas, uma das quais geralmente é acionada por uma caixa de engrenagem, que por sua vez é acionada por um motor elétrico, o que permite o movimento de translação da ponte rolante. Estas rodas se movem por sobre os trilhos que compõem o caminho de rolamento.

3. Viga(s)

É a viga principal da ponte rolante. Quando o projeto da ponte rolante utiliza apenas uma viga tem-se uma ponte chamada de uni-viga, e quando o projeto da ponte rolante utiliza duas vigas tem-se uma ponte chamada de ponte dupla-viga. Sobre ou sob esta viga, dependendo do tipo de ponte rolante desloca-se o carro da talha.

4. Carro talha

O carro talha se movimenta sobre as vigas principais da ponte e é o mecanismo onde se localiza o sistema de elevação (talha). É responsável pelo deslocamento transversal e vertical da carga. Pelos eixos X e Y é feito esse movimento.

5. Talha

A talha pode ser montada no carro ponte e é responsável pelo movimento de elevação da carga. Geralmente a talha utiliza um cabo de aço para levantar um bloco de gancho ou dispositivo de elevação. A parada do movimento de elevação utiliza um motor elétrico com freio eletromagnético, chamado de motofreio. A talha também pode ser montada sob a viga principal da ponte, com o auxílio de um Trolley para permitir o deslocamento na transversal da ponte, não sendo necessário o carro ponte.

6. Trolley

O trolley movimenta a talha sob a viga da ponte rolante. Geralmente o movimento do trolley é realizado por um motor elétrico que aciona uma caixa de engrenagens.

Anexos

ANEXO A

ARTIGO PUBLICADO RELACIONADO AO TEMA DA DISSERTAÇÃO

1. Artigo publicado em Congresso com o título: Controlador Fuzzy Ótimo Aplicado a uma Ponte Rolante, Congresso: Congresso Brasileiro de Automática 2018 (CBA 2018), Ano: 2018, Autores: Wenllson Carlos Ferreira Leite, João Viana Da Fonseca Neto, Geilson Abreu Costa;
2. Artigo publicado em Jornal com o título: Event Discrete Control Strategy Design of Overhead Crane Embedded In Programmable Logic Controller, Journal: American Journal of Engineering Research (AJER), Ano: 2018, Autores: Wenllson Carlos Ferreira Leite, Geilson Abreu Costa, João Viana Da Fonseca Neto, José Pinheiro de Moura, Ernesto Franklin Marçal Ferreira, Igor Lopes de Castro;

CONTROLADOR FUZZY ÓTIMO APLICADO A UMA PONTE ROLANTE

WENLLSON CARLOS FERREIRA LEITE*, JOÃO VIANA DA FONSECA NETO†, GEILSON ABREU COSTA‡

**Avenida do Portugueses, 1966
Universidade Federal do Maranhão
São Luis, Maranhão, Brasil*

Emails: welsoncarlos@hotmail.com, vianafonseca@gmail.com, geilson_abreu@hotmail.com

Abstract— Involving optimal fuzzy modeling applied to an overhead crane, control system design to improve its performance, related with the load displacement variations and angular swing, is presented in this article. The main focus is to improve the performance of the controller that leads with displacement of the load and angular movement, that is caused by the pendulum effect. After the optimal fuzzy design, the system becomes more stable to perturbations caused by non-linearity of the multivariate crane system. The method employed has shown to promote an effective control design to crane system.

Keywords— Fuzzy controller Optimal, overhead crane, stable system

Resumo— Envolvendo a modelagem fuzzy ótimo aplicada a uma ponte rolante, o projeto de um sistema de controle para melhorar o desempenho da ponte em relação as variações no deslocamento da carga e do movimento angular é apresentada neste artigo. Desta maneira, o sistema torna-se mais estável para comportamentos provocados pelas não-linearidades da ponte rolante que é um sistema multivariável. O método proposto mostra-se uma alternativa eficiente de controle para Pontes Rolantes.

Palavras-chave— Controlador fuzzy ótimo, ponte rolante, sistema multivariável

1 Introdução

As pontes rolantes são caracterizadas pela sua importância no deslocamento de cargas pesadas, economizando no tempo e mão de obra, tanto na indústria como em oficinas e armazéns. É largamente utilizada, tornando-se uma máquina de manuseio moderna, indispensável nos trabalhos. Por causa dos balanços provocados pelo deslocamento, o posicionamento se torna impreciso e as operações repetitivas, afetando a eficiência e provocando um grande risco a segurança. O posicionamento impreciso e as oscilações da carga podem provocar danos aos equipamentos e colisões de peças, assim provocando prejuízos. O objetivo do sistema de controle de pontes rolantes é o carregamento e descarregamento de mercadorias com precisão e eficiência, portanto o foco da pesquisa é o controle de posicionamento do carro e controle de oscilação da carga.

Existem técnicas de controle bastante empregadas ao sistema de ponte rolante nos últimos anos, entre os quais, podemos citar um controlador fuzzy de precisão em Rahmani et al. (2015), controle anti-oscilação de cargas em Wang et al. (2006) e controle anti-deslizante adaptativo de posição Chang et al. (2006) e Aksjonov et al. (2015). Entre os mais utilizados são controle fuzzy, adaptativo, PID, preditivo, robusto, entre outros. Uma técnica não muito conhecida porém já utilizada em Al-Hadithi et al. (2012) envolve o controle Fuzzy ótimo que pode ser encontrado com mais detalhes em Wang (1997) e Al-Hadithi et al. (2012). A escolha da lógica fuzzy, assim como o princípio ótimo como formas de melhorar o desempenho do sistema, ainda está em estudo Wang (1997), pois

o mesmo apresenta estudos preliminares sobre o tema. Portanto o presente trabalho propõe apresentar o desenvolvimento alternativo de controle via espaço de estados usando Fuzzy Ótimo, considerando certas condições iniciais como o desacoplamento de estados.

A seguir descreve-se o conteúdo das Seções do artigo. Portanto, na Seção 2 apresenta-se um protótipo de uma ponte rolante em escala reduzida desenvolvido em laboratório, o modelo matemático adotado, a linearização do sistema envolvendo os ângulos de carga e análise do comportamento dinâmico sem controle. Na Seção 3 são abordadas as funções para o controlador fuzzy, o desempenho ótimo e o algoritmo desenvolvido com os resultados gráficos. Já na Seção 4 apresentam-se os resultados envolvendo o comportamento dos estados após o controle. A Seção 5 apresenta-se a conclusão e comentários sobre o desempenho do sistema após o controlador fuzzy ótimo.

2 Projeto de uma Ponte Rolante

Inspirado, tendo por base o artigo Leite (2018) e a monografia Castro (2017), desenvolveu-se um protótipo de uma ponte rolante de duas vigas apoiadas, tal qual ilustrada na Figura 1, com o objetivo de estudar e pesquisar soluções de controle no balanço do transporte de cargas, na qual objetiva reduzir os efeitos causados pela amplitude e duração destas oscilações, dificultando o uso na indústria.

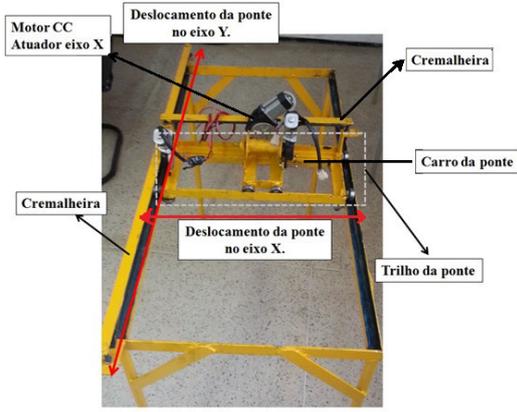


Figura 1: Detalhe do trilho e movimento da ponte no eixo X e Y

2.1 Modelo Matemático do Sistema

As regras e a metodologia aqui empregadas para obter estas equações, foram retiradas de Castro (2017) e Lima (2011). Desta maneira o modelo por eles obtido através da formulação de Lagrange - Euler, onde as energias cinética e potencial do sistema são expressas por derivadas parciais em relação ao tempo.

Para facilitar os cálculos e o entendimento do modelo matemático para análise do sistema ilustrado na Figura 2, decompõe-se o sistema principal em dois subsistemas desacoplados, o que significa que um age independente do outro, estes subsistemas descrevem os movimentos nos eixos X , Y e Z e a relação dos ângulos α , β e γ .

Os dois primeiros subsistemas descrevem matematicamente o movimento nos eixos X e Y e o terceiro modela o movimento vertical da carga no eixo Z através da modelagem chamado de Sistema Servo de Posição Vertical da Carga, Wang et al. (2006) e Rahmani et al. (2015), onde a formulação de Euler-Lagrange é dada por

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q_k} \right) + \left(\frac{\partial V}{\partial \dot{q}_k} \right) = Q_k \quad (1)$$

A expressão do Lagrangeano é dada por

$$L = T - V, \quad (2)$$

sendo L a função lagrangeana do sistema mecânico em estudo, T é a expressão que define a energia cinética do sistema mecânico em estudo; V é a expressão que define a energia potencial do sistema mecânico em estudo e Q_k é a função força generalizada associada a \dot{q}_k .

O diagrama de corpo Livre do sistema de forças da ponte rolante com três graus de liberdade é apresentado na Figura 2, observa-se que os parâmetros e ângulos do estudo: m_1, m_2 e m_3 são as massas do trilho, carro e da carga, respectivamente; α é o ângulo entre o eixo Z e a projeção

ortogonal do cabo no plano XZ ; β é o ângulo entre o eixo Z e a projeção ortogonal do cabo no plano YZ e γ é o ângulo entre o cabo e a sua projeção angular em relação a XZ e YZ .

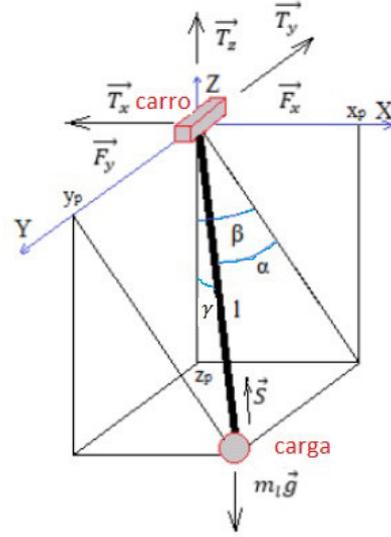


Figura 2: Diagrama de corpo livre de uma ponte rolante.

Os ângulos α e β são rastreados em tempo real. Com eles é possível calcular o ângulo γ através da expressão dada por

$$\gamma = \arcsen \left(\frac{\cos(\beta) \sen(\alpha)}{\sqrt{1 - \sen^2(\alpha) \sen^2(\beta)}} \right) \quad (3)$$

Para a obtenção do modelo do sistema são utilizadas como coordenadas generalizadas: x , y e os ângulos α e β . Analisando o diagrama de forças da Figura 2, pode-se concluir que a energia cinética do sistema é dada por

$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{x}^2 + \\ & + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}^2 - m_3 l \dot{x} \dot{y} \cos(\gamma) + \frac{1}{2} m_3 l^2 \dot{\gamma}^2 \\ & + \frac{1}{2} m_3 l^2 \dot{\beta}^2 \cos(\gamma) + m_3 l \dot{y} \dot{\gamma} \sen(\gamma) \sen(\beta) \\ & - m_3 l \dot{y} \dot{\beta} \cos(\gamma) \cos(\beta) + \frac{1}{2} m_3 \dot{\gamma}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

A energia potencial do sistema é dada por

$$V = -m_3 g \cos(\beta) \cos(\gamma) \quad (5)$$

A partir destas expressões podemos determinar as forças generalizadas do sistema que movem o carro no plano XY . Estas forças são produzidas pelo conjugado de motores CC que atuam em cada um dos eixos. Sabemos que o conjugado aplicado por um motor CC é dado pela expressão:

$$e_p = \frac{JRN}{AKr} \ddot{z} + \frac{KN}{Ar} \dot{z} - \frac{R}{AKN} T_c \quad (6)$$

$$f_x = \frac{AN_x K}{rR} e_x - \frac{K^2 N_x^2}{r^2 R} \dot{x} - \frac{JN_x^2}{r^2} \ddot{x} \quad (7)$$

$$f_y = \frac{AN_y K}{rR} e_y - \frac{K^2 N_y^2}{r^2 R} \dot{y} - \frac{JN_y^2}{r^2} \ddot{y} \quad (8)$$

Podemos agora fazer a linearização do sistema em torno de um ponto de operação fixo a fim de obter uma representação matemática mais simples para a aplicação das técnicas de controle linear disponíveis na literatura, uma vez que estas teorias se aplicam basicamente a Sistemas Invariantes no Tempo (SIT). Segundo o teorema de Lyapunov, existe uma pequena região de operação em um sistema não linear em torno de um ponto de equilíbrio em que este é estável, logo é possível projetar um controle linear de tal forma que se garante a estabilidade do modelo, pelo menos nas vizinhanças do ponto de equilíbrio da operação, segundo Nguyen and Nguyen (2017).

2.1.1 Modelos ($x - \gamma$) e ($y - \beta$)

Para fins de projeto os estados são: $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, $x_3 = \gamma$, $x_4 = \dot{\gamma}$, $x_5 = y$, $x_6 = \dot{y}$, $x_7 = \beta$ e $x_8 = \dot{\beta}$. O sistema pode ser dividido em dois sistemas desacoplados que representam a dinâmica completa da planta mostrando o movimento no eixo X e a relação com o ângulo γ no modelo ($x - \gamma$), o movimento no eixo Y e a relação com o ângulo β no modelo ($y - \beta$). Esses sistemas são representados por meio das matrizes do modelo em espaço de estados que são dados por

$$A_{(x-\gamma)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.4036 & -8.2210 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.8072 & -36.0619 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B_{(x-\gamma)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.6182 \\ 0 \\ 3.2364 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A_{(y-\beta)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1.3632 & -27.7676 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2.7265 & -75.1551 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B_{(y-\beta)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 5.4657 \\ 0 \\ 10.9313 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Os parâmetros envolvidos na Tabela 1 foram utilizados no sistema real da ponte rolante aplicados no CLP (Controlador Lógico Programável)

para a movimentação do carro ao longo dos eixos X e Y .

Tabela 1: Valores das constantes do sistema

Var	Definição	Valor	Uní
m_1	Massa do trilho	4,2	kg
m_2	Massa do carro	1,5	kg
m_3	Massa da carga	5	kg
R	Resistência da armadura do motor	0,93	Ω
r	Raio da roda do carro e trilho	2	cm
N_x	Relação de acoplamento das engrenagens do motor ao eixo X	73:1	-
N_y	Relação de acoplamento das engrenagens do motor ao eixo Y	73:1	-
K	Constante de torque do motor	$41 \cdot 10^{-3}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
J	Momento de inércia do eixo do motor	$20 \cdot 10^{-5}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
L	Comprimento do fio	0,5	m
A	Ganho de tensão do Amplificador de Potência	6	V/V
G	Aceleração da gravidade	9,81	m/s^2

2.1.2 Análise do Comportamento Dinâmico do Sistema em Malha Aberta

Os sinais de saída da Figura 3 e Figura 4 foram obtidas por medição dos sensores *Encodes*, acoplados aos eixos dos motores. Sendo assim, a Figura 3 apresenta o comportamento para uma resposta ao degrau em relação ao movimento X e o ângulo γ após a aplicação da entrada ao degrau unitário, já na Figura 4 mostra-se a resposta ao degrau unitário em relação ao movimento Y e o comportamento do ângulo β ao degrau.

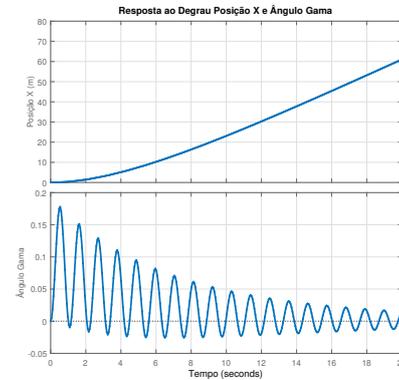


Figura 3: Resposta ao degrau da posição X e ângulo γ .

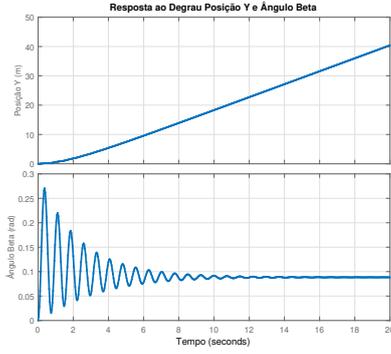


Figura 4: Resposta ao degrau da posição Y e ângulo β .

Analisando as saídas da planta para entradas do tipo degrau unitário das Figuras 3 e da Figura 4, observa-se que a mesma apresenta um comportamento operacional que não atende as especificações, necessitando de implementações de controladores.

3 Projeto de um controlador Fuzzy ótimo

Os principais elementos para o projeto do controlador Fuzzy Ótimo são apresentados nessa seção. Destacando-se os conceitos de estabilidade Fuzzy, a lei de controle Fuzzy ótimo e o algoritmo de controle.

3.1 Estabilidade Fuzzy

De acordo com Wang (1997) para o sistema ser exponencialmente estável as funções de pertinência devem apresentar características como

- Considere as seguintes regras fuzzy $2N + 1$ SE-ENTÃO:
- SE y é A^l , ENTÃO u é B^l
- Usando motor de inferência, fuzzificador singleton e defuzzificador de centro médio, o controlador fuzzy é definido como

$$u = -f(y) = -\frac{\sum_{l=1}^{2N_1+1} y_j^{-l} \mu_{A^l}(y)}{\sum_{l=1}^{2N_1+1} \mu_{A^l}(y)} \quad (13)$$

3.2 Controle Fuzzy Ótimo

Suponha que o sistema sob controle seja um sistema linear invariante no tempo

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), x(0) = x_0 \quad (14)$$

$x \in R^n$ e $u \in R^m$ e que o critério de desempenho é a função quadrática dada por

$$J = \int_0^T [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (15)$$

a lei de controle de realimentação que minimiza o valor do custo é

$$u = -R^{-1}B^T Px \quad (16)$$

Sendo P a equação de Riccati que é dado por

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (17)$$

Sendo as matrizes $Q \in R^{n \times n}$ e $R \in R^{m \times m}$ simétricas e definida positiva. Agora, supondo-se que o controlador $u(t)$ é um sistema fuzzy na forma da Função 13, exceto se mudarmos a saída do sistema y da Função 13 para o estado x ; isto é, $u(t) = (u_1, \dots, u_m)^T$ com

$$u_j = -f_j(x) = -$$

$$\frac{\sum_{l_1=1}^{2N_1+1} \dots \sum_{l_n=1}^{2N_n+1} y_j^{-l_1 \dots l_n} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)}{\sum_{l_1=1}^{2N_1+1} \dots \sum_{l_n=1}^{2N_n+1} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)} \quad (18)$$

Assumimos que as funções de pertinência são fixas. Nossa tarefa é determinar os parâmetros $y_j^{-l_1 \dots l_n}$ de modo que J da Função 15 seja minimizado.

Definindo as funções de base fuzzy $b(x) = (b_1(x), \dots, b_N(x))^T$ como

$$b_l = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i)}{\sum_{l_1=1}^{2N_1+1} \dots \sum_{l_n=1}^{2N_n+1} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)} \quad (19)$$

onde $l_i = 1, 2, \dots, 2N_i + 1, l = 1, 2, \dots, N$ e $N = \prod_{i=1}^n (2N_i + 1)$. Defina a matriz de parâmetros $\Theta \in R^{m \times N}$ como

$$\Theta = \begin{bmatrix} -\Theta_1^T \\ \dots \\ -\Theta_m^T \end{bmatrix} \quad (20)$$

onde $\Theta_j^T \in R^{1 \times N}$ consiste de N parâmetros $y_j^{-l_1 \dots l_n}$ para $l_i = 1, 2, \dots, 2N_i + 1$ na mesma ordem como $b_l(x)$ para $l = 1, 2, \dots, N$. Por meio dos parâmetros 20, pode-se reescrever o controlador fuzzy $u(t) = (u_1, \dots, u_m)^T = (-f_1(x), \dots, -f_n(x))^T$ como

$$u = \Theta b(x) \quad (21)$$

Para alcançar a otimização, assume-se que a matriz de parâmetros Θ é variante no tempo, ou seja, $\Theta = \Theta(t)$. Substituindo a Função 21 na Função 14 e na Função 15, obtemos o sistema de malha fechada

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\Theta(t)b[x(t)] \quad (22)$$

e o critério de desempenho é dado por

$$J = \int_0^T [x^T Q x + b^T (\Theta^T R \Theta) b] dt \quad (23)$$

Assim, o problema de projetar o melhor controlador fuzzy consiste em determinar o $\Theta(t)$, de modo

que J da Função 23 seja minimizado. $\Theta(t)$ como controle $u(t)$ no Princípio Mínimo de Pontryagin, podemos determinar o ótimo $\Theta(t)$. Especificamente, definindo a função de Hamilton a partir de $\frac{\partial H}{\partial \Theta} = 0$, que é

$$\frac{\partial H}{\partial \Theta} = 2R\Theta b(x) b^T(x) + B^T p b^T(x) \quad (24)$$

Obtenção para os parâmetros é

$$\Theta = \frac{1}{2} R^{-1} B^T p b^T(x) [b(x) b^T(x)]^{-1} \quad (25)$$

Portanto o controlador fuzzy ótimo é dado por

$$u^* = \Theta^*(t) b(x) \quad (26)$$

3.3 Função Gaussiana

Considerando $Q = I$, $R = I$, $T = 10s$ a função de pertinência é escolhida como uma função Gaussiana, sendo

$$\mu_{A_i^{l_i}}(x_i) = \exp\left[-2(x_i - \bar{x}_i^{l_i})^2\right] \quad (27)$$

Onde $i = 1, 2, 3, 4$, $l_i = 1, 2, \dots, 5$ e $\bar{x}_i^{l_i} = a_i + b_i(l_i - 1)$ com $a_1 = a_2 = -2$, $a_3 = a_4 = -1$, $b_1 = b_2 = 1$ e $b_3 = b_4 = 0, 5$

Nota-se que o controlador fuzzy ótimo da Equação 26 é um controlador de realimentação de estado com coeficientes variando no tempo. O procedimento de projeto deste controlador fuzzy ótimo agora é implementado via script no software MATLAB[®].

3.4 Algoritmo Fuzzy Ótimo

A modelagem da ponte rolante e do controlador fuzzy ótimo, apresentada nas seções anteriores, é convertida em um algoritmo de controle. O algoritmo proposto é formado de quatro funções que são os módulos: 1) Condições iniciais, 2) Lógica Fuzzy, 3) Solução da Equação Algébrica de Riccati, 4) Cálculo da lei de controle fuzzy-ótimo.

```

1 ▷ - Algoritmo Fuzzy-Ótimo
2 ▷ - Condições Iniciais
3 [A, B, C, D]
4  $X_i \leftarrow [-N : 0.01 : N]$ 
5 [a, b]  $\leftarrow [a_1, \dots, a_n; b_1, \dots, b_n]$ 
6 ▷ - Lógica Fuzzy
7 início
8   for  $i \leftarrow 1:N$  do
9     |  $l(i) = i$ 
10  end
11   $z = 0$ 
12   $W = 1$ 
13  for  $i \leftarrow 1:N-1$  do
14    |  $c(i) \leftarrow a(i) + [b(i) * (l(i)-1)]$ 
15    |  $\mu_{X_x} i = \exp(-2 * (x_i - c(i))^2)$ 
16    |  $M \leftarrow \mu_{X_x}(i) * W$ 
17    |  $W \leftarrow \mu_{X_x} i(i)$ 
18    | for  $i \leftarrow 1:N-1$  do
19      | |  $D(i) \leftarrow M^i + z$ 
20      | |  $z \leftarrow M^i$ 
21    | end
22  end
23 fim
24 ▷ - Vetor fuzzy base
25  $b_l \leftarrow M/D$ 
26 ▷ - Matrizes identidade e unitária
27  $Q \leftarrow I$  e  $R \leftarrow 1$ 
28 ▷ - Solução Equação Algébrica de Riccati
29  $P \leftarrow care(A, B, Q, R)$ 
30 ▷ - Cálculo dos Parâmetros
31  $\theta = -(1/2)inv(R) * B' * P * (b'_i inv(b_l, b'_i))$ 
32 ▷ - Lei de Controle Fuzzy Ótimo
33  $u \leftarrow \theta * b_l$ 
34 ▷ - Cálculo da Lei de Controle
35  $K \leftarrow inv(R) * B' * P$ 
36  $A_a \leftarrow A - B * K$ 
37  $B_a \leftarrow B * u$ 
38  $C_a \leftarrow C$ 
39  $D_a \leftarrow null$ 
40 ▷ - Espaço de estados otimizado
41  $Sys \leftarrow ss(A_a, B_a, C_a, D_a)$ 

```

4 Resultados

Os resultados apresentados nesta seção são provenientes dos modelos matemáticos da ponte rolante da Seção 2 associados com o projeto do controlador fuzzy ótimo da Seção 3 na malha fechada. A simulações foram realizadas na plataforma MATLAB[®].

4.1 Procedimentos da simulação

Considera-se apenas uma variável iniciando com valor 1 e as demais iniciando com valor 0 em cada figura, assim observa-se o comportamento dos quatro estados em relação ao tempo. Fez se necessário uma comparação entre a entrada ao degrau unitário para um controlador PID clássico e

o algoritmo Fuzzy ótimo, mostrando assim, as características de aplicação para cada controlador como mostra a Figura 15.

4.2 Simulações e Análises no eixo X

Os resultados representam o deslocamento linear, posição angular e suas respectivas velocidades que são provenientes de simulações do controlador desenvolvido e sua implementação no modelo para o eixo x da ponte rolante. Os resultados apresentados levam em consideração quatro situações, cada situação tem inicialmente uma condição diferente de zero e demais são nulas.

Inicialmente, de acordo com algoritmo da Subseção 3.4, computa-se as funções de pertinência Gaussianas que são apresentadas na Figura 5. Estas são referentes aos números de estados do sistema desacoplado, onde cada função de pertinência formará uma base vetorial b_l com defuzzificação média dos centros.

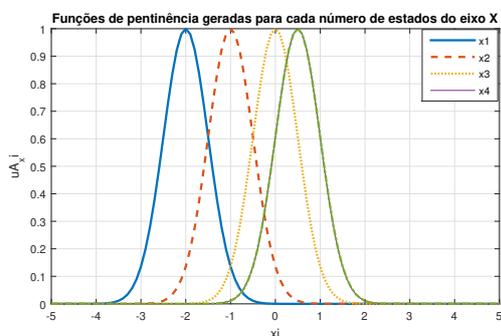


Figura 5: Funções de Pertinência para o eixo X

Apresenta-se na Figura 6 o estado inicial x em relação ao eixo X, o tempo de deslocamento do carro em relação ao eixo X em 5 segundos aproximadamente, onde denota que existe uma suavização da curva e melhora do tempo de resposta.

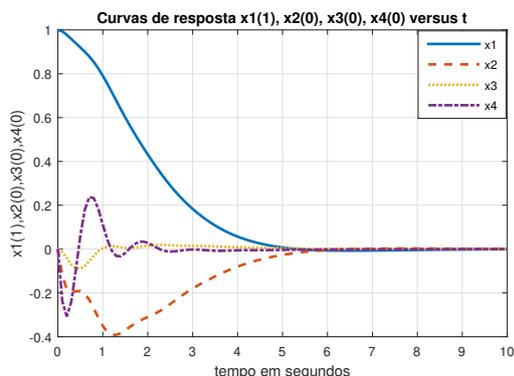


Figura 6: Deslocamento x , com condição inicial de 1 m e demais estados nulos.

Observa-se na Figura 7 que a velocidade \dot{x} em que o carro se desloca no eixo X para um determinado ponto, considerando como condições iniciais

em 1 m/s e o tempo de resposta semelhante ao da primeira Figura 6.

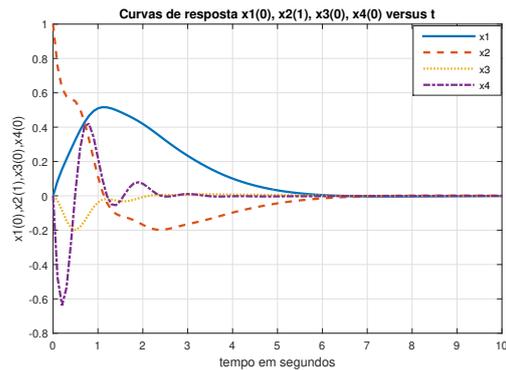


Figura 7: Velocidade \dot{x} , com condição inicial em \dot{x} 1 m/s e demais estados nulos.

Verifica-se na Figura 8 que as variações do ângulo γ em 1 rad apresenta um amortecimento considerável das oscilações e termina aproximadamente em 5 segundos.

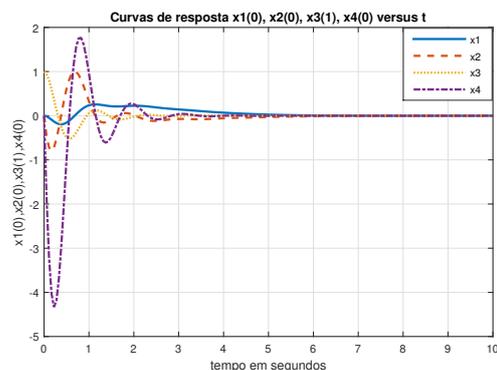


Figura 8: Deslocamento angular γ , com condição inicial de 1 rad e demais estados inicialmente nulos.

Verifica-se na Figura 9 que a velocidade angular $\dot{\gamma}$ inicia em 1 rad/s e termina em 3 segundos aproximadamente, considerando demais estados iniciando em 0.

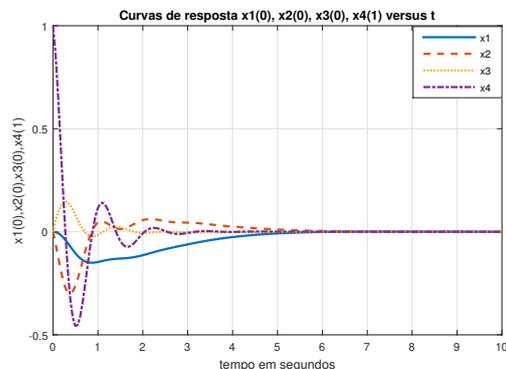


Figura 9: Velocidade angular $\dot{\gamma}$ e os demais estados inicialmente nulos.

4.3 Simulações e Análises no eixo Y

Os resultados representam o deslocamento linear y , o deslocamento angular β e suas respectivas velocidades \dot{y} e $\dot{\beta}$ que são provenientes de simulações do projeto desenvolvido e sua implementação no modelo do eixo Y. Os resultados levam em consideração quatro condições, cada situação tem inicialmente uma condição inicial para um estado diferente de zero e as demais variáveis de estado são nulas.

Inicialmente, de acordo com algoritmo da Subseção 3, computa-se as funções de pertinência Gaussianas que são apresentadas na Figura 10. Estas são referentes aos números de estados, onde cada função de pertinência formará uma base vetorial b_i com defuzzificação média dos centros. Observa-se que na Figura 10 as funções de pertinência para o eixo Y e o ângulo β , utilizando as mesmas características para o eixo X.

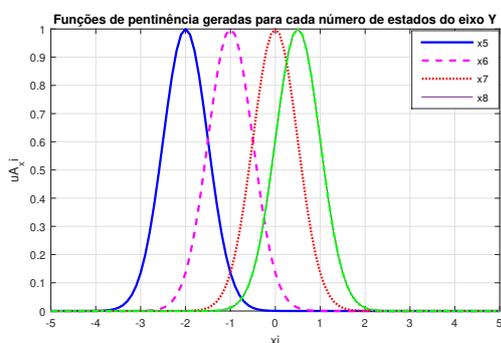


Figura 10: Funções de Pertinência para o eixo Y.

Verifica-se na Figura 11 o deslocamento y tem as mesmas características para a resposta ao tempo, próximo de 5 segundos.

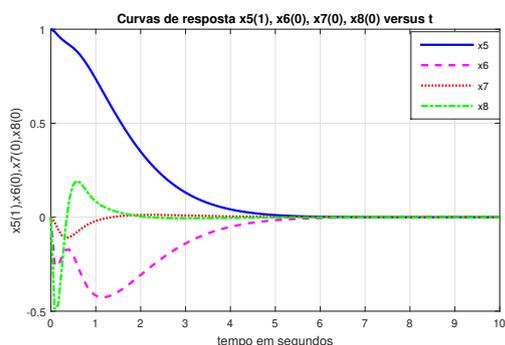


Figura 11: Deslocamento y em 1 m e demais estados inicialmente nulos.

Observa-se na Figura 12 a velocidade \dot{y} para uma condição inicial em 1 m/s e os demais estados em 0.

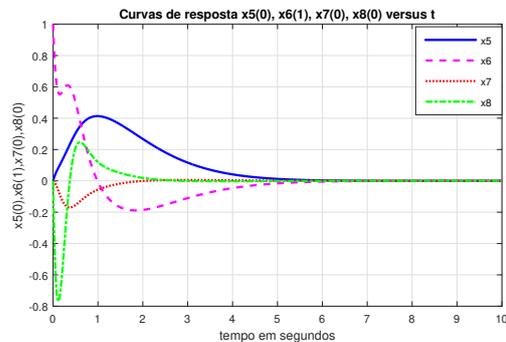


Figura 12: Velocidade \dot{y} em 1 m/s e demais estados inicialmente nulos.

Observa-se na Figura 13 a condição inicial em 1 rad para o ângulo β que estabiliza-se em 2,5 segundos aproximadamente.

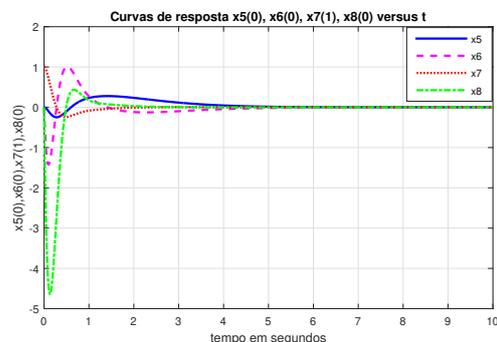


Figura 13: Deslocamento angular β , com condição inicial β em 1 rad e demais estados inicialmente nulos.

Observa-se na Figura 14 a condição inicial em 1 rad/s para a velocidade angular $\dot{\beta}$ que estabiliza-se em 2,5 segundos aproximadamente.

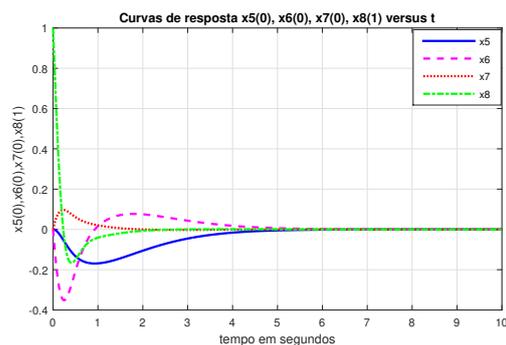


Figura 14: Velocidade angular $\dot{\beta}$ iniciando em 1 rad/s e demais estados inicialmente nulos.

4.4 Comparação PID x Fuzzy Ótimo

Na Figura 15 é apresentada a comparação entre o controle PID e o controle fuzzy ótimo, no qual se inicia o degrau unitário de deslocamento em 4 segundos.

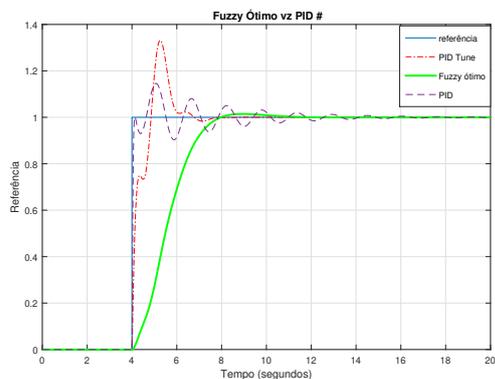


Figura 15: Comparação entre as curvas dos controles PID e Fuzzy Ótimo.

Os ganhos dos controladores são:

Tabela 2: Ganhos de controle

Fuzzy ótimo		PID	PID tune
Eixo X e Eixo Y			
$K_1 = 1.4142$	$K_5 = 1.4142$	$K_p = 30$	$K_p = 5.0$
$K_2 = 1.9648$	$K_6 = 1.4650$	$K_i = 3.0$	$K_i = 0.4$
$K_3 = 1.2596$	$K_7 = 1.3040$	$K_d = 15$	$K_d = 3.4$
$K_4 = 0.4680$	$K_8 = 0.4314$		

4.5 Observações

O controle fuzzy ótimo aloca novos autovalores e novos ganhos são computados utilizando o sistema da base fuzzy $b_l(x)$ para gerar novos parâmetros dentro da equação algébrica de *Riccati*, conforme pode ser observado no algoritmo proposto na Subseção 3.2. As matrizes Q e R são ajustadas para sintonizar e minimizar o custo da energia do sistema. Por meio da lógica fuzzy é montado um vetor referência para os novos autovalores e ganhos, ou seja impõem-se uma nova dinâmica.

5 Conclusão

No sentido de reduzir as oscilações pendulares e minimizar o custo com esforço de controle, neste artigo foi apresentado o projeto de um controlador fuzzy ótimo para melhorar o desempenho operacional da ponte rolante. Observando-se o comportamento das variáveis de estado controladas, conclui-se que o algoritmo desenvolvido promoveu uma resposta eficaz para uma dada posição de deslocamento, através de um controlador proposto que impôs um tempo de acomodação e *overshoot* satisfatórios, promovendo respostas rápidas e estáveis em torno do ponto de operação. Além do mais, as ações do controlador fuzzy ótimo suavizaram a curva de resposta do deslocamento e a variação angular do pêndulo. Os resultados do método propostos foram comparados com o controlador PID clássico.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Maranhão (UFMA), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade (PP-GEE) e ao Laboratório de Sistemas Integrados e Controle Inteligente (LABSECI), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

Referências

- Aksjonov, A., Vodovozov, V. and Petlenkov, E. (2015). Sensorless control of the three-dimensional crane using the euler-lagrange approach with a built-in state-space model, *2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, pp. 1–4.
- Al-Hadithi, B. M., Barragán, A. J., Andújar, J. M. and Jiménez, A. (2012). Fuzzy optimal control for double inverted pendulum, *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 1–5.
- Castro, I. L. (2017). Controle de Sistema a Eventos Discretos e contínuos embarcados em CLP para Acionamentos de Pontes Rolantes. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica), UFMA (Universidade Federal do Maranhão), São Luis, BraSil.
- Chang, C. Y., Hsu, K. C., Chiang, K. H. and Huang, G. E. (2006). An enhanced adaptive sliding mode fuzzy control for positioning and anti-swing control of the overhead crane system, *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 2, pp. 992–997.
- Leite, W. C. F. (2018). Event discrete control strategy design of overhead crane embedded in programmable logic controller, *American Journal of Engineering Research (AJER)*.
- Lima, A. J. D. (2011). *Controle proporcional integral derivativo para transporte de carga sem ponte rolante.*, Master’s thesis, Instituto Militar de Engenharia (IME).
- Nguyen, H. P. L. and Nguyen, Q. C. (2017). Nonlinear optimal control of a 3-d overhead crane with varying rope length, *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 760–765.
- Rahmani, R., Karimi, H., Yusof, R. and Othman, M. F. (2015). A precise fuzzy controller developed for overhead crane, *2015 10th Asian Control Conference (ASCC)*, pp. 1–5.
- Wang, L., Wang, X. and Kong, Z. (2006). Anti-swing control of overhead cranes, *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Vol. 2, pp. 8024–8028.
- Wang, L. X. (1997). *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall, Saddle River, NJ, USA.

Event Discrete Control Strategy Design of Overhead Crane Embedded In Programmable Logic Controller

*Wenllson Carlos Ferreira Leite¹, Geilson Abreu Costa¹, João Viana Da Fonseca Neto¹, José Pinheiro de Moura², Ernesto Franklin Marçal Ferreira³, Igor Lopes de Castro¹

¹(Department of Electrical Engineering/ Federal University of Maranhão, Brazil)

²(Center of Technological Sciences/ State University of Maranhão, Brazil)

³(Department of Professional Education / Institute of Technology of Maranhão, Brazil)

Corresponding Author: Wenllson Carlos Ferreira Leite

ABSTRACT: The main objective of this article is a control strategy for a crane. Specifically, reduce as load oscillations during their displacement trajectory, in order to ensure the safety of the operators and the own load carried during the displacement. Moreover, as overhead cranes are most often complete and difficult to be mathematically modeled, seen in the industrial process, Classic Control Systems techniques based on Proportional, Integral and Derivative Controllers (PIDs) embedded in Programmable Logic Controllers (PLCs). The general proposal of this article is a system, instead of C.E.S(Continuous Event System) and D.E.S(Discrete Event System), able to control the dynamic effect of the load and of the production of the prototype in a reduced scale, through a Programmable Logic Controller.

Keywords: Industrial Processes, Crane Control, PID Control, Programmable Logic Controllers

Date of Submission: 28-12-2017

Date of acceptance: 14-01-2018

I. INTRODUCTION

The Crane is an equipment used by several industry segments to carry out the lifting of loads for a certain period of time, the main objective of this project is that in an industrial environment it helps the transport of loads, reducing the physical efforts preventing wear, aiming at the health and avoiding diseases acquired at work. The cranes present a serious problem with the angular movement that the load performs during its displacement, this movement known as pendulum effect is decisive when we deal with the risks that this causes to the people, the structure and the own load transported. It is considered that these balances, in addition to hindering the transport and positioning of these loads, also endanger the health and life of the operators, as well as the integrity of the equipment and cargo, which are often of great economic value. The main objective of this paper is to raise the model of the proposed plant seeking to reproduce the behavior of the crane system, evaluating the performance of the system through model-based analysis, designing and simulating Proportional Integral and Derivative (PID) controllers to maintain control of the oscillation of the load during the transport process of the same, to construct a small scale prototype of the crane, for tests and tests of the automatic control developed.

II. THE OVERHEAD CRANE SYSTEM

In this section we present the crane system that was developed. This system consists of the gantry, formed by two parallel bars, that performs the translation movement on the X - axis, the carriage that performs the movement on the Y - axis the winch that performs the suspension movement of the load on the Z - axis. movements on the X, Y and Z axes are performed by electric motors, which designate the torque needed to move the load. The crane was designed according to the project, as shown below.

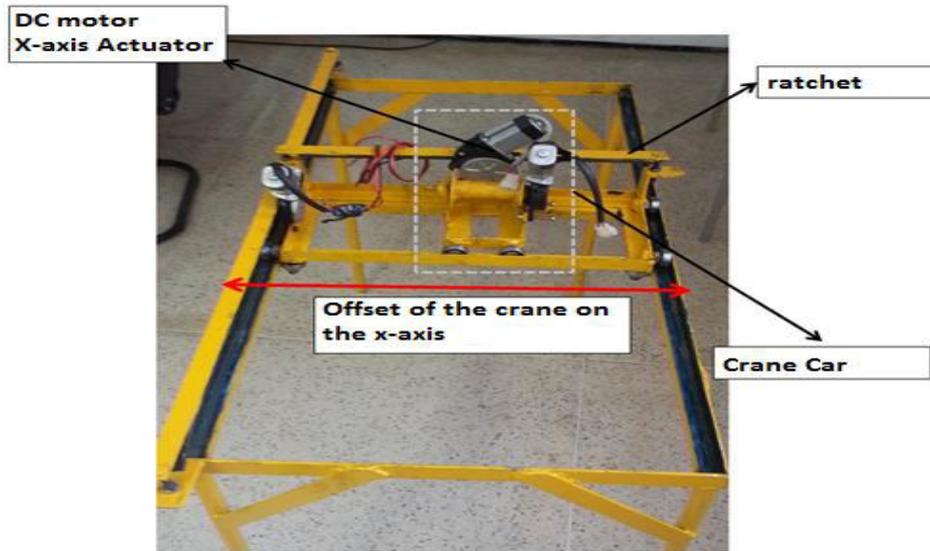


Figure 1-Detail of the carriage and displacement of the crane on the X axis

A [1], study was carried out on a linearization of crane systems, in order to solve the problem of stability control during a car movement, not read simple pendulum model.

Model obtained according to an analysis made by [2] and [3]; Cable length remains constant in Z, Model of overhead crane in XY plane; Subsystems $(x - \gamma)$ and $(y - \beta)$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k}\right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q_k}\right) + \left(\frac{\partial V}{\partial q_k}\right) = Q_k \quad (1)$$

Punctually the expression is given by: $L = T - V$,

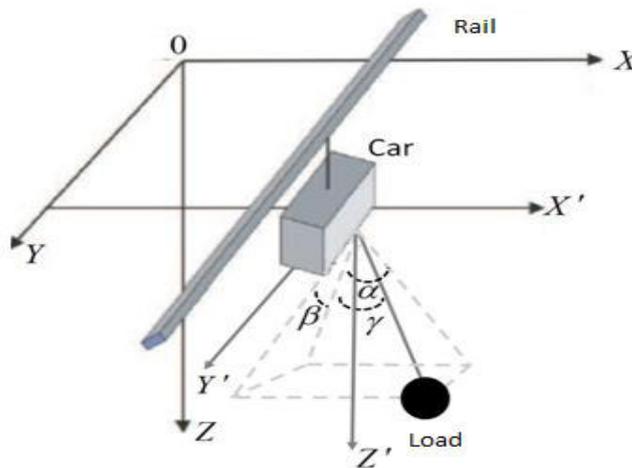


Figure 2-Body diagram free of a crane with three degrees of freedom

Modelos $(x - \gamma)$ and $(y - \beta)$

$$A_{(x-\gamma)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{42} & a_{43} & 0 \end{bmatrix} B_{(x-\gamma)} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_{21} \\ 0 \\ b_{41} \end{bmatrix} A_{(y-\beta)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{66} & a_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{86} & a_{87} & 0 \end{bmatrix} B_{(y-\beta)} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_{62} \\ 0 \\ b_{82} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 TF_{u_1(x)} &= \frac{1.618s^2 - 6.662e^{-33}s + 31.75}{s^4 + 0.4036s^3 + 36.06s^2 + 7.919s} & TF_{u_2(y)} &= \frac{5.466s^2 - 2.286e^{-30}s + 107.2}{s^4 + 1.363s^3 + 75.16s^2 + 26.75s} \\
 TF_{u_1(y)} &= \frac{3.236s^2 + 1.825e^{-16}}{s^3 + 0.4036s^2 + 36.06s + 7.919} & TF_{u_2(\beta)} &= \frac{10.93s - 7.737e^{-15}}{s^3 + 1.363s^2 + 75.16s + 26.75}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

III. CRANE CONTROL PROJECT

It was analyzed by MATLAB & Simulink-MathWors® environment, Dynamic behavior analysis based on models and representation by transfer function, Analysis in Open Loop and Closed Loop, Step response $u(t)$, Stability analysis, $TF_{u_1(x)}$ and $TF_{u_1(y)}$ poles and zeros $(x - \gamma)$ and $(y - \beta)$, present similar answers, subsystem approach $(x - \gamma)$.

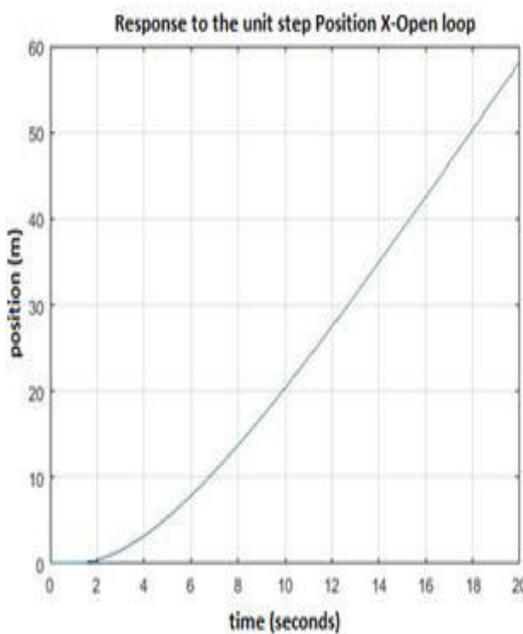


Figure 3: Response to the level of the open-loop Y position

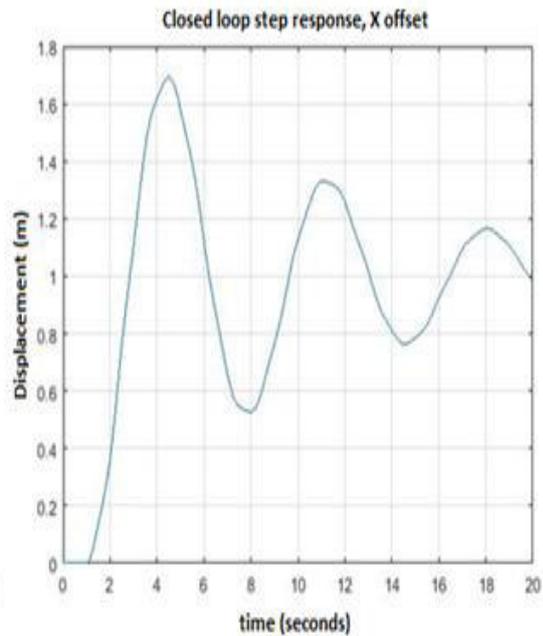


Figure 4: Response to the step of the X position in closed loop.

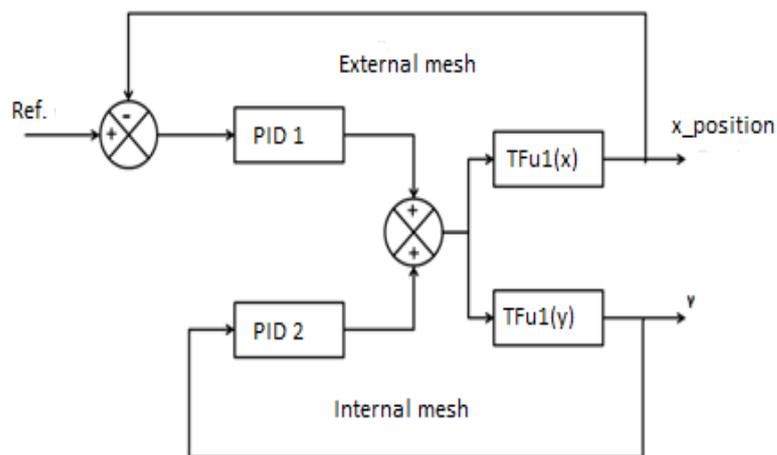


Figure 5-PID control strategy, problem $(x - \gamma)$.

- Cable length is fixed in Z;
- The angular variation module $|\Delta\gamma|$ and $|\Delta\beta|$ should be a maximum of 10 degrees or 0.1745 radians;

- The Overshoot must not exceed 20%, the accommodation time must not exceed 10 seconds and the control effort of the controlled system must comply with $\pm 2 V_{DC}$ saturation due to the operating voltage limit of the DC motors.

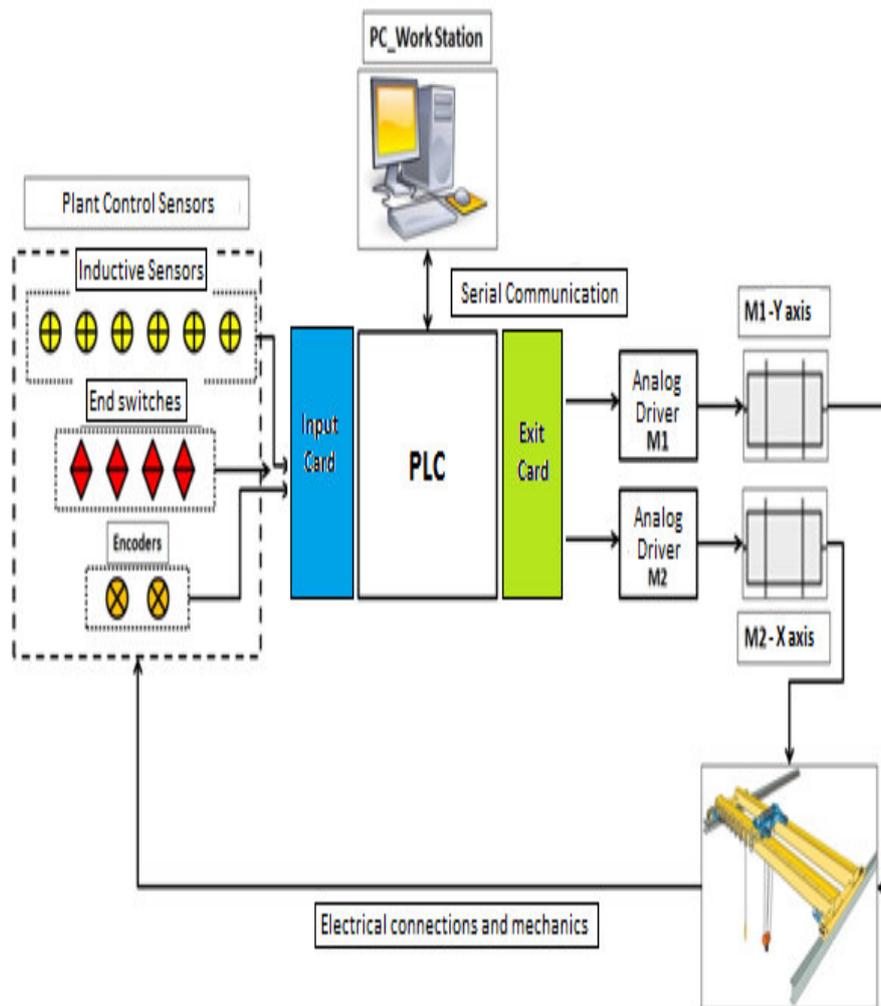


Figure 6: Diagram of connections and assembly of the crane

The control of the crane's automatic drive commands uses a Rockwell © MicroLogix™ 1200 1762-L24BWA CLP, with 14 ($24 V_{DC}$) digital inputs and 10 (ten) digital relay outputs ($24 V_{DC}$), with possibility of expansion of up to 6 (six) digital and analog *I/Os* cards depending on the current demand of each card. The X_0 and X_1 ports of the PLC input card were used to connect the encoders that sense the position of the rail on the Y axis and the carriage on the X axis. These ports are high and were configured via the HSC (High Speed Channel) function with a sampling period of $25\mu s$, so that the encoder pulse count could be read correctly. Two types of sensors were used basically to perform the task of scalar positioning of the rail and crane car in the quadrants, the other to signal the presence of object (load) in one of the six operating quadrants of the Positioning Sensor bridge of the Track and Car of the Crane. In order to make the scalar position sensing in the car and rail set in the XY plane, ROTARY type LPD3806 - 60BM - G5 - 24C, ($24 V_{DC}$) and 20 KHz sampling frequency were used, with a resolution of 400 *pulse/revolution* and the plant actuators used to perform the crane movements are Mabuchi DC motors, eight-tooth $12 V_{DC}$ gear, 6 A rated current and 16.9 Nm torque. The operating area of the crane was divided into six zones, called quadrants I through VI, as shown in the table below. Quadrant (k) = (Number of pulses in $X(k)$, Number of pulses in $Y(k)$) for $k = 1, 2 \dots, 6$ where k is the number of quadrants.

Table 1 Events and actions of the control in SED of crane

EVENTS						
	CHARGE QUADRANT I	CHARGE QUADRANT II	CHARGE QUADRANT III	CHARGE QUADRANT IV	CHARGE QUADRANT V	CHARGE QUADRANT VI
ACTIONS	M2_LEFT (ON)	M1_LEFT (ON)	M2_LEFT (ON)	M1_LEFT (ON)	M2_LEFT (ON)	M1_RIGHT (ON) & M2_RIGHT(ON)
	ENCODER 02 = 1195 pulse	ENCODER 01 = 4824 pulse	ENCODER 02 = 1195 pulse	ENCODER 01 = 2559 pulse	ENCODER 02 = 1195 pulse	FC_01_X(ON) & FC_01_Y(ON)
	M2_LEFT (OFF)	M1_LEFT (OFF)	M2_LEFT (OFF)	M1_LEFT (OFF)	M2_LEFT (OFF)	M1_RIGHT (OFF) & M2_RIGHT(OFF)
	M1_LEFT (ON)	M1_RIGHT (ON) & M2_RIGHT(ON)	M1_LEFT (ON)	M1_RIGHT(ON) & M2_RIGHT(ON)	M1_RIGHT(ON) & M2_RIGHT(ON)	
	ENCODER 01 = 4824 pulse	FC_01_X(ON) & FC_01_Y(ON)	ENCODER 01 = 2559 pulse	FC_01_X(ON) & FC_01_Y(ON)	FC_01_X(ON) & FC_01_Y(ON)	
	M1_LEFT (OFF)	M1_RIGHT(OFF) & M2_RIGHT (OFF)	M1_LEFT (OFF)	M1_RIGHT(OFF) & M2_RIGHT(OFF)	M1_RIGHT (OFF) & M2_RIGHT (OFF)	
	M1_RIGHT(ON) & M2_RIGHT(ON)		M1_RIGHT(ON) & M2_RIGHT(ON)			
	FC_01_X(ON) & FC_01_Y(ON)		FC_01_X(ON) & FC_01_Y(ON)			
	M1_RIGHT(OFF) & M2_RIGHT(OFF)		M1_RIGHT(OFF) & M2_RIGHT (OFF)			

Each of the six quadrants is directly monitored by an inductive sensor, which is intended to signal presence of charge or not in the quadrant. The movement of the car and the rail on the X and Y axes are monitored by individually coupled encoders on the motors of each axle, where it is possible to position the car and rail on any of the six operating quadrants by the pulse ratio of the encode of each motor and the displacement in meters in the X and Y axis. As shown in Fig. 07 and 08 below.

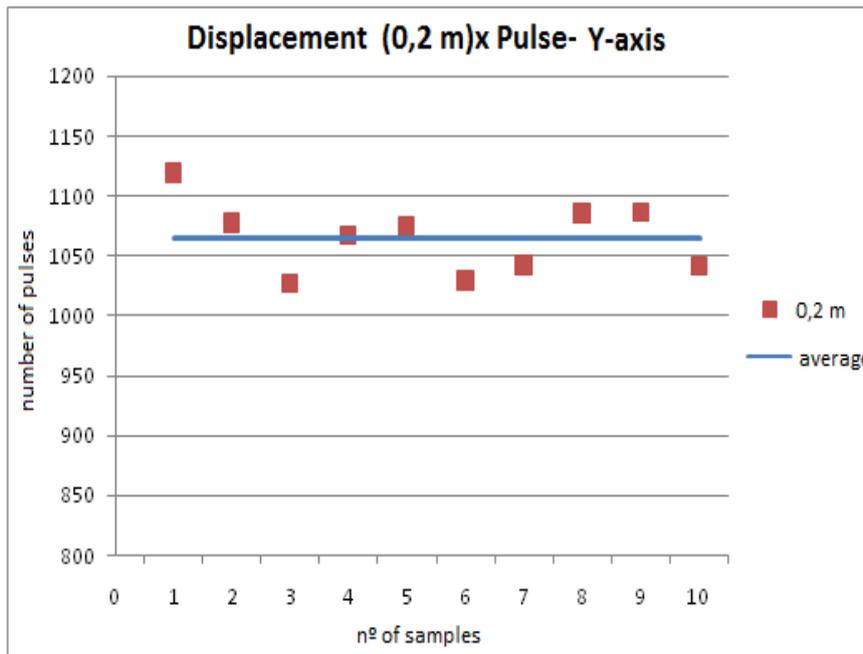


Figure 7: Relation of pulses x displacement in the Y axis - (20cm)

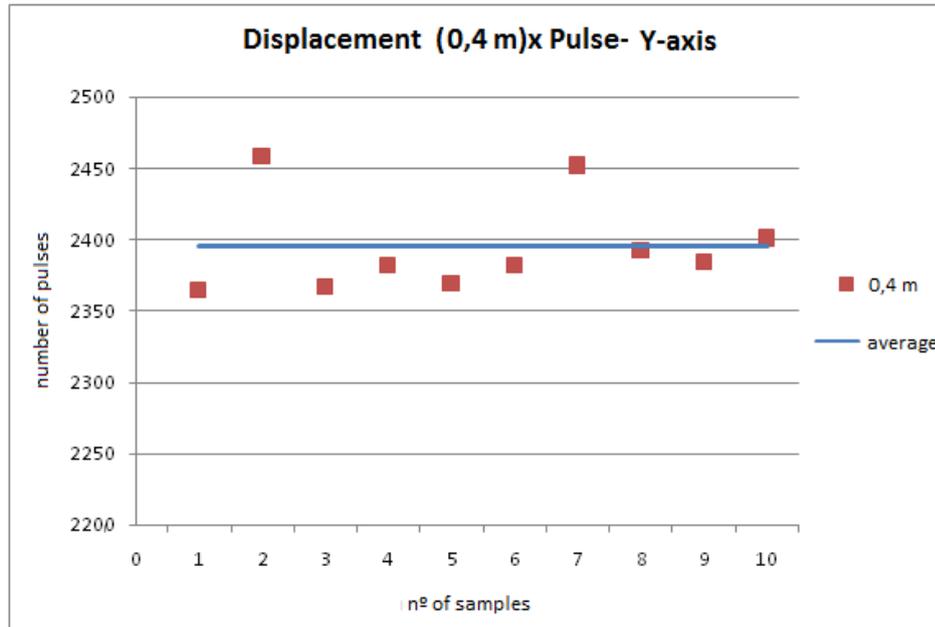


Figure 8: Relation of pulses x displacement in the Y axis - (40cm)

IV. EXPERIMENTS

The results presented are obtained from four tests with the crane. These tests served to survey the relationship between the number of encoder pulses of each of the axes, with the displacement in centimeters of the car and rail respectively and with the travel time according to the Table below.

Pulses vs. Displacement on X-axis		
n	0.10 m	0.20 m
1	871	1548
2	881	1549
3	847	1548
4	854	1549
5	860	1547
6	847	1550
7	854	1550
8	883	1552
9	871	1551
10	786	1549
Pulse Average	855	1549

Table 2 Relation of pulses vs displacement of the car in the Axis X

Displacement vs. X-axis time		
n	0.10 m	0.20 m
1	1.75	2.84
2	1.5	2.9
3	1.53	2.85
4	1,59	2.82
5	1.5	2.82
6	1.68	2.93
7	1.42	3.09
8	1.69	2.79
9	1.51	2.77
10	1.47	2.84
Average in seconds	1.56	2.87

Table 3 Relation of the displacement of the car in X vs. time

Pulses vs. Displacement on Y-axis				
N	0.20 m	0.40 m	0.60 m	0.80 m
1	1119	2364	3738	5144
2	1077	2458	3746	5144
3	1027	2367	3784	5076
4	1067	2382	3788	5102
5	1074	2369	3809	5071
6	1029	2382	3745	5126
7	1042	2452	3785	5089
8	1085	2392	3753	5089
9	1086	2384	3758	5113
10	1041	2401	3788	5073
Pulse Average	1065	2395	3769	5103

Table 4 Relationship of pulses vs. rail offset on Y-axis

Displacement vs. Y-axis time				
N	0.20 m	0.40 m	0.60 m	0.80 m
1	2.34	4.06	6.29	8.55
2	1.75	4.21	6.48	8.49
3	1.56	4.22	6.36	8.47
4	1.81	4.17	6.39	8.58
5	1.86	4.22	6.39	8.55
6	1.88	4.23	6.27	8.53
7	1.81	4.18	6.41	8.55
8	1.9	4.14	6.46	8.66
9	1.76	4.19	6.29	8.52
10	2	4.18	6.46	8.52
Average in seconds	1.87	4.18	6.38	8.54

Table 5 Rail displacement ratio in Y vs. time

The Ladder follows the control strategy described in the flowchart shown in Fig. 9 below.

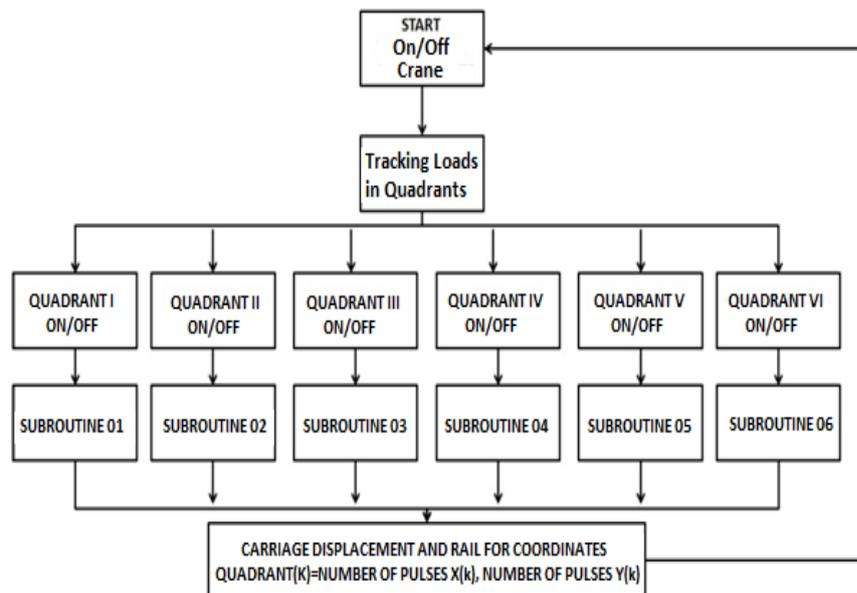


Figure 9: Flow diagram of control strategy for Ladder implementation

V. CONCLUSION

In this article, the system information proposals through four tests, to obtain the relations of pulses versus displacement of the car in the X axis and of the rail in the Y axis, as well as displacement relations versus time of the car and rail, whose results are demonstrated. Finally, a strategy of automatic control of the system was developed, based on DES (Discrete Event System). For a deployment of the control strategy, the Ladder code to be shipped in a CLP was developed. The study of the dynamics of the crane showed the system to be unstable by nature and that an oscillating characteristic of the load angle interferes with the displacement dynamics of the as expected, of the PID controller in S.C.V (System Continues Variables) designed with the purpose of limiting the variation of the angle and minimizing its effect on the dynamic displacement of the system, showing itself in conformity with the pre-design requirements and taking the system to the desired operating point, small-scale prototype of the crane, proved to be very robust and with excellent operation; a

strategy of automatic control in D.E.S. and effective and the Ladder developed from prominence, was able to execute of efficient form the automatic control of prototype.

REFERENCES

- [1]. O. Boutalbi, K. Benmahammed and M. Boubezoula, "Robust feedback linearizing controller design for an overhead crane system," *2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, Batna, 2017, pp. 640-645
- [2]. H. Aschemann, A. Wache and O. Kraegenbring, "A discrete-time inversion-based approach to iterative learning control of an overhead crane," *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, Dalian, 2017, pp. 3419-3424.
- [3]. Hai Le Xuan, Thai Nguyen Van, Anh Le Viet, Nga Vu Thi Thuy and Minh Phan Xuan, "Adaptive backstepping hierarchical sliding mode control for uncertain 3D overhead crane systems," *2017 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, Ho Chi Minh City, 2017, pp. 438-443.
- [4]. N. S. Rogova and V. D. Yurkevich, "Anti-sway tracking control for an overhead crane via singular perturbation technique," *2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Novosibirsk, 2016, pp. 576-581.
- [5]. J. Smoczek and J. Szpytko, "Constrained generalized predictive control with particle swarm optimizer for an overhead crane," *2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, Miedzyzdroje, 2017, pp. 756-761.
- [6]. M. L. Anand and P. R. Jayasree, "Damping based anti-swing compensated fuzzy-PID controller for the overhead crane," *2017 International Conference on Circuit ,Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Kollam, 2017, pp. 1-5.
- [7]. P. Chandran, A. Vivek and S. Amritha, "Optimisation of overhead crane," *2017 International Conference on Circuit ,Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Kollam, 2017, pp. 1-8.
- [8]. J. Smoczek and J. Szpytko, "Particle Swarm Optimization-Based Multivariable Generalized Predictive Control for an Overhead Crane," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 258-268, Feb. 2017.

Wenllson Carlos Ferreira Leite."Event Discrete Control Strategy Design Of Overhead Crane Embedded In Programmable Logic Controller." *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 7, no. 1, 2018, pp. 144-151.