

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

IGOR LOPES DE CASTRO

**CONTROLE DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS E
CONTÍNUOS EMBARCADOS EM CLP PARA
ACIONAMENTO DE PONTES ROLANTES**

São Luís

2017

IGOR LOPES DE CASTRO

**CONTROLE DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS E
CONTÍNUOS EMBARCADOS EM CLP PARA
ACIONAMENTO DE PONTES ROLANTES**

Trabalho destinado à obtenção de grau em Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Maranhão.

São Luís

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

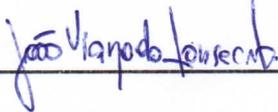
IGOR LOPES DE CASTRO

**CONTROLE DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS E
CONTÍNUOS EMBARCADOS EM CLP PARA
ACIONAMENTO DE PONTES ROLANTES**

Monografia apresentada como requisito necessário para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Maranhão - UFMA.

Monografia aprovada em 24 de julho de 2017.

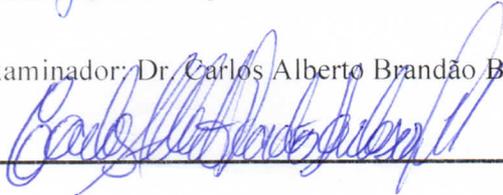
Orientador: Dr. João Viana da Fonseca Neto.



Coorientador: Me. José Pinheiro de Moura.



1º Examinador: Dr. Carlos Alberto Brandão Barbosa Leite.



2º Examinador: Me. Ernesto Franklin Marçal Ferreira



Coordenador Prof. Dr. Denivaldo Cícero Pavão Lopes.

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

Lopes de Castro, Igor.

CONTROLE DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS E CONTÍNUOS
EMBARCADOS EM CLP PARA ACIONAMENTO DE PONTES ROLANTES /
Igor Lopes de Castro. - 2017.

112 f.

Coorientador(a): Me. José Pinheiro de Moura.

Orientador(a): Dr. João Viana da Fonseca Neto.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2017.

1. Automação Industrial. 2. CLP. 3. PID. 4. Pontes
Rolantes. 5. Sistemas Embarcados. I. da Fonseca Neto,
Dr. João Viana. II. de Moura, Me. José Pinheiro. III.
Título.

Dedico este trabalho à minha amada família em especial ao meu querido avô, José Antônio Vigário de Castro, por todo o amor incondicional e inspiração.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão ao meu orientador Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto, que me acolheu e me deu a oportunidade de desenvolver este trabalho em um ambiente de profundo aprendizado e com todos os recursos necessários para que existisse o maior rendimento possível, obrigado por sua orientação e suporte ao longo de toda a graduação e por todo o conhecimento compartilhado.

Agradeço do fundo do coração aos meus amigos, Daniel Trovão, Deocarolo Guizzine, Guilherme SAVEDRA e a todos os outros que fizeram e fazem parte de minha história ao longo da graduação, a vocês desejo todo o sucesso do mundo e que nossa amizade perdure e se fortaleça.

Agradeço imensamente aos colegas de laboratório, Evandro Martins, Ana Caroline Meireles, Bruno França, Breno Pinheiro, por todo o suporte, companheirismo e por tornar essa jornada mais alegre e descontraída. Um agradecimento especial ao meu grande amigo Evandro Martins que desde sempre, foi totalmente prestativo e cortês e acompanhou-me desde o início neste trabalho e se tornou meu braço forte, amigo e referência profissional, você tem toda minha admiração e gratidão.

Manifesto minha profunda gratidão aos professores e amigos José Pinheiro Moura e Victor, por todo o suporte e auxílio técnico, financeiro e principalmente por todas as oportunidades de aprendizado e crescimento profissionais ofertadas de bom grado.

Agradeço a Naruna Aritana por todo amor, carinho, suporte e motivação sempre! Que Deus reserve momentos muito felizes a nós dois e que consigamos sempre apoiar um ao outro e alcançar juntos nossas vitórias.

Não existem palavras para agradecer à minha família que, desde o dia que nasci, acreditou no meu potencial e sempre sonharam junto comigo, apostando e se sacrificando para que eu pudesse ter sempre as melhores oportunidades possíveis em minha vida, sem vocês nada disso seria possível, sem todo esse suporte e amor eu jamais seria vitorioso, esta conquista é nossa.

Para finalizar os meus agradecimentos, elevo meu pensamento e espírito a Deus pai e seu filho Jesus Cristo e a meu São Pedro, para agradecer por minha vida e por todas as glórias e dádivas derramadas sobre minha vida e por tornar tudo isto possível. Obrigado pai por me permitir viver essa experiência tão bela e por cada amizade feita, cada lição aprendida e por cada vitória alcançada, louvado seja o Senhor!

“Muitas pessoas devem a grandeza de suas vidas aos problemas que tiveram de vencer.”

(LORD BADEN POWELL).

RESUMO

Nesta monografia apresenta-se a automação de uma ponte rolante utilizando técnicas de Sistemas de Controle Clássico baseadas em Controladores Proporcional, Integral e Derivativo (PID) embarcados em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), aplicados em um modelo de escala reduzida desenvolvido no Laboratório de Sistemas Embarcados e Controle Inteligente (LABSECI) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

O principal objetivo desta é o controle da oscilação da carga durante sua trajetória de deslocamento, visando assim garantir a segurança e a integridade dos operadores e da própria carga transportada durante este processo.

Em um primeiro momento é feita uma revisão sobre o modelo matemático adotado para descrever o movimento do carro e trilho no plano XY, com base nas teorias de Sistemas de Variáveis Contínuas (SVC) tomando como prerrogativa o comprimento fixo do cabo de suspensão durante o deslocamento da carga.

Em seguida são mostrados os métodos utilizados para traçar a estratégia de controle baseados em Sistemas a Eventos Discretos (SED) para controle automático da planta, assim como, o projeto do protótipo da ponte rolante. Em um ultimo momento são mostrados e discutidos os resultados obtidos neste projeto, comparando os resultados oriundos de simulação com os obtidos por ensaios com a planta.

Palavras-chave: *Pontes Rolantes; PID; Sistemas Embarcados; CLPs; Automação Industrial; SVC; SED.*

ABSTRACT

In this monograph we present the automation of a overhead crane using Classical Control Systems techniques based on Proportional, Integral and Derivative Controllers (PIDs) embedded in Programmable Logic Controllers (PLCs), applied in a reduced scale model developed in the Systems Laboratory Embarked and Intelligent Control (LABSECI) of the Federal University of Maranhão (UFMA).

The main objective is to control the oscillation of the load during its displacement trajectory, in order to guarantee the safety and the integrity of the operators and of the own load transported during this process.

At first, a review is made of the mathematical model adopted to describe the car and rail movement in the XY plane, based on the theories of Continuous Variable Systems (SVC) taking as prerogative the fixed length of the suspension cable during the load's displacement.

Then are shown the methods utilized to trace the control strategy based in Discrete Events Systems (SED) to automatic plant's control as so as the project of overhead crane prototype. In a last moment the results obtained in this project are shown and discussed, comparing the results from simulation with those obtained by tests with the plant.

Keywords: *Overhead Cranes; PID; Embedded Systems; PLCs; Industrial Automation; SVC; SED;*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ponte rolante suspensa.	2
Figura 2 - Diagrama de corpo livre de uma ponte rolante com três graus de liberdade.....	6
Figura 3 – Arquitetura de um CLP genérico.	16
Figura 4 - Diagrama de blocos do CLP.	17
Figura 5 - Detalhe dos módulos de E/S de um CLP genérico.	19
Figura 6 - Endereçamento de E/S em CLPs.	20
Figura 7 - Ciclo de SCAN de um CLP.	21
Figura 8 - Diagrama <i>Ladder</i> genérico.....	22
Figura 9 - Diagrama controlador PID.....	23
Figura 10 - Curva de resposta em forma de S.	24
Figura 11 - Sistema de malha fechada com um controlador proporcional.	26
Figura 12 - Oscilação sustentada com período P_{cr}	26
Figura 13 - Estrutura de controle em SVC malha fechada com realimentação negativa.....	28
Figura 14 - Modelo do objeto de controle no controle de SED.....	29
Figura 15 - Sinal de um sensor analógico.	30
Figura 16 - Sinal de um sensor digital.	31
Figura 17 - Chave fim de curso.	32
Figura 18 - Funcionamento de um encoder de quadratura.	32
Figura 19 - Princípio de operação de sensores indutivos.....	33
Figura 20 - Diagrama de blocos para resposta ao degrau em MA do subsistema (x- γ).	35
Figura 21 - Diagrama de blocos para resposta ao degrau em MA do subsistema (y- β).	35
Figura 22 - Resposta ao degrau da posição X em malha aberta.	35
Figura 23- Resposta ao degrau do ângulo γ em malha aberta.....	36
Figura 24 – Resposta ao degrau da posição Y em malha aberta.....	36
Figura 25 - Resposta ao degrau do ângulo β em malha aberta.	37
Figura 26 – Mapa de polos e zeros para FTu1(x).	38
Figura 27 – Mapa de polos e zeros para FTu1(γ).	39
Figura 28 – Mapa de polos e zeros para FTu2(y).	39

Figura 29 - Mapa de polos e zeros para FTu2(β).....	40
Figura 30 – Diagrama de blocos para resposta ao degrau em MF do subsistema (x,y).	40
Figura 31 - Diagrama de blocos para resposta ao degrau em MA do subsistema (y, β).	41
Figura 32 - Resposta ao degrau da posição X em malha fechada.....	41
Figura 33 - Resposta ao degrau do ângulo γ em malha fechada.....	42
Figura 34 – Lugar geométrico das raízes deslocamento X em MF.	43
Figura 35 - Lugar geométrico das raízes ângulo γ em MF.	43
Figura 36 - Estratégia de controle PID, problema (x-y).	45
Figura 37 - Diagrama de blocos dos controladores do subsistema (x-y), com saturação de ± 12 Vcc.....	46
Figura 38 - Esforço de controle do controlador PID para o subsistema (X-y), saturação de ± 12 Vcc.....	46
Figura 39 - Resposta ao degrau de 10 cm do PID 1, deslocamento em X.....	47
Figura 40 - Resposta ao degrau do controlador PID 2, para variação de γ	47
Figura 41 – Diagrama de ligações e montagem da ponte rolante.	49
Figura 42 – Projeto estrutural da ponte rolante.	50
Figura 43 – Detalhe do trilho e movimento da ponte no eixo Y.	51
Figura 44 – Detalhe do carro e deslocamento da ponte no eixo X.	52
Figura 45 – Detalhe do tambor de sustentação do cabo e movimento da carga no eixo Z.	53
Figura 46 – Estrutura de ferro do trilho e carro em detalhe.	53
Figura 47 – Estrutura em ferro da ponte.	53
Figura 48 – Estrutura da ponte rolante finalizada.	54
Figura 49 – Detalhe do conjunto trilho, carro e tambor, com seus respectivos motores acoplados.	54
Figura 50 – MicroLogix TM 1200.	55
Figura 51 – Módulo de expansão de I/O analógica 1762-IF20F2.....	55
Figura 52 – Motor CC, atuador do movimento nos eixos X e Y.....	56
Figura 53 – Encoder, sensor de posição escalar do conjunto carro e trilho da ponte rolante.	57
Figura 54 – Circuito de comutação dos <i>encoders</i> do eixo X e Y.....	58

Figura 55 – Sensor indutivo de rastreamento da condição da carga nos quadrantes de operação da ponte rolante.....	58
Figura 56 - Esquema elétrico do circuito de amplificador de tensão.	59
Figura 57 – <i>Driver</i> analógico para acionamento e controle de velocidade dos motores CC.....	60
Figura 58 - Configuração dos quadrantes de operação da ponte rolante.	61
Figura 59 - Relação de pulsos x deslocamento no eixo Y - (20cm).	65
Figura 60 - Relação de pulsos x deslocamento no eixo Y - (40cm).	65
Figura 61 - Relação de pulsos x deslocamento no eixo X - (10cm).	66
Figura 62 - Relação de pulsos x deslocamento no eixo X - (20cm).	66
Figura 63 - Fluxograma da estratégia de controle para implementação do <i>Ladder</i> . .	67
Figura 64 - <i>Ladder</i> automação da ponte, sub-rotina <i>LAD 2 - MAIN</i>	68
Figura 65 - <i>Ladder</i> de automação da ponte, função <i>START</i> , sub-rotina <i>LAD 4</i> , função <i>STAR</i>	68
Figura 66 - <i>Ladder</i> automação da ponte, sub-rotina <i>LAD 5</i> , acionamento do carro quadrante I.	69
Figura 67 - <i>Ladder</i> de automação da ponte, sub-rotina <i>LAD 6</i> , acionamento do trilho quadrante I.	70
Figura 68 - Comportamento cinemático do protótipo da ponte rolante.....	71
Figura 69 - Janela de projetos, <i>RSLogix 500</i>	91
Figura 70 - Janela de configuração padrão do <i>HSC:0</i>	92
Figura 71 - Janela de configuração do <i>HSC:0</i> para a ponte rolante.....	93
Figura 72 - Criação de um novo <i>LAD</i>	94
Figura 73- Janela de configurações avançadas das E/S do <i>MicroLogix 1200</i>	95
Figura 74- Janela de configurações avançadas das E/S do <i>MicroLogix 1200</i>	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de variáveis utilizadas nos cálculos para obtenção do modelo matemático da ponte rolante.	14
Tabela 2- Classificação das linguagens de programação para PLCs.	22
Tabela 3 - Estimação de ganhos para o primeiro método de Ziegler e Nichols, sintonia de controladores PID.	25
Tabela 4 - Regra de sintonia de Ziegler_Nichols baseada no ganho crítico K_{cr} e no período crítico P_{cr} (segundo método).	26
Tabela 5 - Eventos e ações do controle em SED da ponte rolante.	63
Tabela 6 - Relação de pulsos vs. deslocamento do carro no Eixo X.....	64
Tabela 7 - Relação deslocamento do carro em X vs. tempo.	64
Tabela 8 - Relação de pulsos vs. deslocamento do trilho no eixo Y.	64
Tabela 9 - Relação deslocamento do trilho em Y vs. tempo.	64
Tabela 10 - Classes e principais instruções em Ladder.	86
Tabela 11- Mapeamento de E/S do MicroLogix 1200.	90

LISTA DE SIGLAS

BIBO	BOUNDED INPUT BOUNDED OUTPUT
CC	CORRENTE CONTÍNUA
CLP	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL
E/S	ENTRADA/SAÍDA
EPROM	ERASABLE PROGRAMABLE READ ONLY MEMORY
FBD	FUNCTION BLOCK DIAGRAM
FT	FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA
I/O	INPUT/OUTPUT
IL	INSTRUCTION LIST
LABSECI	LABORATÓRIO DE SISTEMAS EMBARCADOS E CONTROLE INTELIGENTE.
LD	LADDER DIAGRAM
LIT	LINEAR INVARIANTE NO TEMPO
MA	MALHA ABERTA
MF	MALHA FECHADA
NA	NORMALMENTE ABERTO
NBR	NORMA BRASILEIRA
NF	NORMALMENTE FECHADO
NR	NORMA REGULAMENTADORA
PID	PROPORCIONAL, INTEGRAL E DERIVATIVO
PLC	PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER
RAM	RANDON ACCESSE MEMORY
SED	SISTEMAS DE CONTROLE A EVENTOS DISCRETOS
SFC	SEQUENTIAL FUNCTION CHART
ST	STRUCTURED TEXT
SVC	SISTEMAS DE CONTROLE A VARIÁVEIS CONTÍNUAS
UCP	UNIDADE CENTRAL DE PROCESSAMENTO
UFMA	UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação do Trabalho	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Histórico de Pesquisa	3
1.4. Organização do Trabalho	4
2. MODELO MATEMÁTICO E FUNDAMENTOS DE PONTES ROLANTES.....	5
2.1. Modelo Matemático do Sistema Ponte Rolante	5
2.1.1. Modelagem Matemática do Movimento da Carga no Eixo - XY	5
2.1.2. Modelos $(x - \gamma)$ e $(y - \beta)$	13
2.1.3. Parâmetros de Modelagem do Sistema.....	14
2.1.4. Equações do Movimento no Plano - XY	14
2.2. Controladores Lógicos Programáveis	15
2.2.1. Características Gerais	16
2.2.2. Arquitetura dos CPLs	17
2.2.3. Ciclo de Execução dos CLPs.....	21
2.2.4. Linguagem de Relés ou Ladder	22
2.3. PID em SVC	23
2.3.1. Método de Ziegler–Nichols	24
2.4. Sistemas a Variáveis Contínuas & Sistemas a Eventos Discretos	27
2.4.1. Sistemas de Controle a Variáveis Contínuas (SVC)	27
2.4.2. Sistemas de Controle a Eventos Discretos (SED)	29
2.5. Sensores e Automação	30
3. MODELOS E EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS EM SVC PARA PONTES ROLANTES	34
3.1. Análise do Comportamento Dinâmico do Sistema em MA e MF	34
3.1.1. Análise em Malha Aberta dos Subsistemas $(x-\gamma)$ e $(y-\beta)$	34

3.1.2. Análise em Malha Fechada dos Subsistemas (x- γ) e (y- β).....	40
3.2. Projeto e Análise dos Controladores PID	44
3.3. Comentários	48
4. PROJETO DO MODELO EM ESCALA REDUZIDA DA PONTE ROLANTE AUTOMATIZADA.....	49
4.1. Estrutura Física da Ponte	49
4.2. Computador, Interface de Comunicação com CLP	54
4.3. CLP Micrologix 1200 Rockwell.....	54
4.4. Motores CC, Atuadores da Planta.....	56
4.5.1. Sensores de Posicionamento do Trilho e Carro da Ponte Rolante	57
4.5.2. Sensores de Rastreamento de Carga nos Quadrantes da Ponte Rolante.....	58
4.6. Circuito Amplificador de Tensão, Controlador Analógico dos Motores.....	59
5. METODOLOGIA, DESCRIÇÃO E RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS EM HARDWARE.....	61
5.1. Metodologia	61
5.2. Descrição e Resultados dos Experimentos.....	63
5.3. Comentários	71
6. CONCLUSÃO.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXOS	77
APÊNDICES	85

1. INTRODUÇÃO

Há nos dias de hoje uma grande mobilização dos principais centros de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias e equipamentos para a locomoção de cargas pesadas, motivadas pela necessidade de maior eficiência e segurança na execução desta tarefa, visando facilitar este processo no ambiente industrial.

Atualmente a ponte rolante é um dos sistemas mais utilizados e eficientes no transporte de cargas grandes e pesadas em pequenas distâncias. No Brasil, as pontes rolantes têm seus aspectos construtivos e de acionamento, regulamentados pela *Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT norma NBR 8400 - Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas*.

Esta norma visa nortear o projeto e a construção tanto quanto a utilização destes equipamentos vastamente encontrados nos ambientes industriais e seus operadores devem ser treinados segundo estipulado pela *NR 11 - Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais* de 8 de junho de 1978.

As pontes rolantes apresentam um grave problema quanto ao movimento angular que a carga executa durante o seu deslocamento, este movimento conhecido como efeito pendular é determinante quando tratamos dos riscos que este provoca às pessoas, à estrutura e à própria carga transportada.

Considera-se que estes balanços, além de dificultarem o transporte e posicionamento destas cargas também põem em risco a saúde e a vida dos operadores, assim como a integridade do equipamento e da carga, que na maioria das vezes são de grande valor econômico, portanto as empresas necessitam prevenir eventuais gastos com problemas desta natureza.

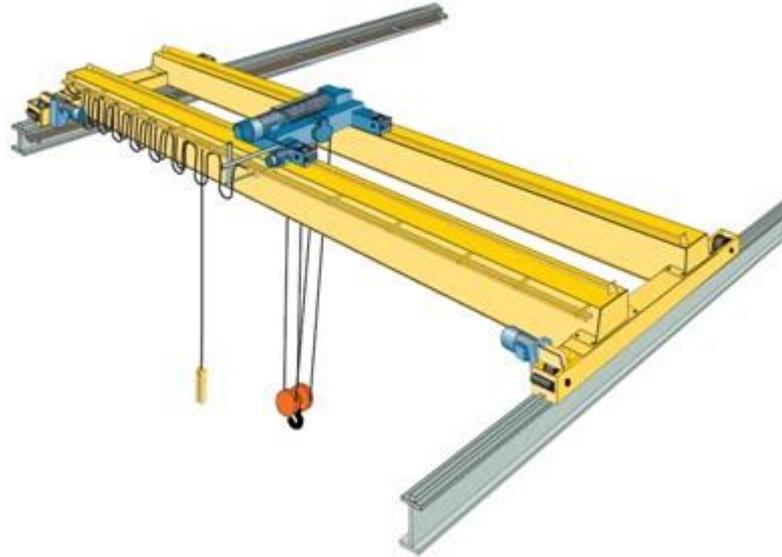
Neste capítulo são apresentados as motivações, objetivos, histórico de pesquisa e a organização desta monografia.

1.1. Motivação do Trabalho

Dada à suma importância destes sistemas no ambiente industrial e no valor que eles agregam quanto à praticidade e eficiência na execução desta árdua tarefa, fomos motivados a desenvolver um sistema de controle que nos permita estudar e prover uma solução, viável e eficaz para reduzir os efeitos causados pela amplitude e duração destas oscilações que acabam por restringir o uso destes equipamentos.

Desta forma construiu-se um protótipo de uma ponte rolante de duas vigas apoiadas, tal qual a ilustrada na Figura 1, no Laboratório de Sistemas Embarcados e Controle Inteligente (LABCESI) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

Figura 1 - Ponte rolante suspensa.



Fonte: www.blogsegvida.blogspot.com.br

Este sistema é composto pelo pórtico, formado por duas barras paralelas, que executa o movimento de translação no eixo - X, o carro que executa o movimento no eixo - Y e o guincho que executa o movimento de suspensão da carga no eixo - Z. Os movimentos nos eixos X, Y e Z, são executados por motores elétricos, que fornecem o conjugado necessário para movimentar a carga, portanto o modelo matemático a ser desenvolvido deve modelar o trabalho feito por estes motores.

1.2. Objetivos

Os principais objetivos traçados como norte para este trabalho de monografia são listados na seguinte ordem:

- Levantar o modelo da planta proposta buscando a reprodução do comportamento do sistema da ponte rolante;
- Avaliar o desempenho do sistema por meio de análises baseadas em modelos;
- Projetar e simular controlador Proporcional Integral e Derivativo (PID) para manter o controle da oscilação da carga durante o processo de transporte da mesma;
- Embarcar o controlador contínuo PID no controlador discreto CLP;

- Implementar o *Ladder* de acionamento automático da planta, através de sensores e atuadores controlados por um CLP;
- Construir um protótipo em escala reduzida da ponte rolante, para ensaios e testes do controle automático desenvolvido;
- Construir um circuito para efetuar o controle analógico de velocidade dos motores CC que irão atuar na planta.
- Verificar e comparar os resultados obtidos em ambiente simulado *MATLAB*® com os resultados obtidos na prática com o protótipo.

1.3. Histórico de Pesquisa

Como foi dito anteriormente, há um grande interesse por parte dos pesquisadores na área de Engenharia de Controle Industrial, em buscar por soluções viáveis e eficazes para garantir o funcionamento mais seguro e produtivo de Pontes Rolantes em ambientes industriais. Algumas das publicações científicas mostradas a seguir foram utilizadas como referências para este trabalho.

Em (SUZUKI M., 2000), foi proposto um controle semiautomático de pontes rolantes usando método de potenciais, na Universidade de Tecnologia de Toyohashi. Em (CHEN H., 2005), foi proposto um modelo de controle dinâmico e não linear de uma Ponte Rolante em três dimensões. No trabalho de (TOXQUI & LI, 2006), durante a Conferência Internacional sobre Redes Neurais, foi proposto um modelo de controle contra o balanço de cargas em Pontes Rolantes utilizando compensadores neurais.

Em (COSTA H., 2010), foi feito 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 seu trabalho de conclusão de curso, (LIMA, A. J. D., 2011), propõe um sistema de controle com controlador proporcional integral derivativo (PID) para efetuar transporte de cargas em pontes rolantes.

Em (MARCOS ELIZA, 2014), foi proposto a modelagem de uma ponte rolante com três graus de liberdade utilizando técnicas de controle por planejamento e rastreamento de trajetórias ótimas, com o intuito de controlar as oscilações numa carga esférica a fim de aperfeiçoar o processo e minimizar perdas. Em (Ferreira, E. e. Fonseca. N. João. V. d., 2011), foi feito um estudo sobre a linearização de sistemas pontes rolantes, para resolver o problema do controle de estabilidade durante a movimentação de cargas, baseado no modelo do pêndulo simples.

Todos estes trabalhos tiveram como principal objetivo propor uma solução de controle, da amplitude e frequência das oscilações, durante o processo de transporte de cargas em pontes rolantes. Alguns dos trabalhos citados acima são referências diretas para este trabalho de monografia como os trabalhos de (COSTA, 2010), (LIMA, A. J. D., 2011) e (Ferreira, E. e. Fonseca. N. João. V. d., 2011).

1.4. Organização do Trabalho

Nesta sessão é explicada a organização e a estruturação do conteúdo abordado neste trabalho de monografia.

No Capítulo 2 são introduzidos os fundamentos teóricos necessários para a total compreensão e desenvolvimento deste projeto. Serão abordados os mais variados tópicos dentro das Teorias de Controle e Automação Industrial, entre eles: modelagem matemática do sistema, determinando as equações que regem o movimento no plano XY; projeto de controlador PID; Controladores Lógicos Programáveis (CLP's); SVC e SED;

No Capítulo 3 são discutidos e analisados os resultados obtidos em simulação, do comportamento do sistema em malha aberta (MA), malha fechada (MF) e com os controladores projetados, assim como a análise da BIBO estabilidade do sistema pelo estudo dos polos e zeros da função de transferência.

No Capítulo 4 são discriminados os elementos necessários para a construção do protótipo proposto, onde mostraremos os equipamentos utilizados e suas especificações técnicas, as conexões do CLP com os elementos de sensoriamento e comunicação e a elaboração dos *drivers* analógicos para acionamento e controle dos motores CC.

No Capítulo 5 são mostrados a metodologia adotada para a execução dos testes com o protótipo da ponte, assim como, os resultados obtidos com nestes experimentos. Será mostrado os códigos *Ladder* para o controle automático da ponte e por fim será feito o cruzamento dos dados obtidos em experimento computacional, em ambiente *MATLAB & Simulink - MathWorks®*, com os obtidos nos experimentos em *hardware*.

No Capítulo 6 são feitas as considerações finais e as conclusões obtidas após a análise dos resultados, assim como as propostas para trabalhos futuros e melhorias.

Por fim, os Anexos e Apêndices complementam o conteúdo abordado nos capítulos de forma a facilitar a compreensão dos conceitos e tecnologias utilizadas na elaboração deste projeto.

2. MODELO MATEMÁTICO E FUNDAMENTOS DE PONTES ROLANTES

Nesta monografia são utilizadas as mais diversas técnicas e conhecimentos das áreas de Controle e Automação Industrial disponível na atualidade, como as de Controle Clássico baseado no uso de controladores PID, ainda muito utilizadas no ambiente industrial e no uso de Controladores Lógicos e Programáveis (CLPs), para embarcar sistemas de controle de plantas industriais.

A fim de proporcionar o entendimento e compreensão dos passos utilizados na metodologia adotada neste trabalho, para atingir os objetivos traçados inicialmente, são feitas introduções de forma resumida sobre cada tópico.

Neste capítulo é apresentado o modelo matemático da ponte rolante, que será utilizado para o projeto dos controladores para minimizar o efeito pendular na carga durante o deslocamento.

2.1. Modelo Matemático do Sistema Ponte Rolante

Nesta sessão é feita a descrição da modelagem matemática da ponte rolante, a fim de obter as equações que regem este sistema. As regras e a metodologia aqui empregadas, para obter estas equações, foram retiradas de (COSTA, 2010) e de (LIMA, 2011), desta maneira o modelo por eles obtido através da formulação de *Lagrange - Euler*, através das energias cinética e potencial do sistema, é o mais apropriado para alcançar os objetivos deste trabalho.

Para facilitar os cálculos e o entendimento do modelo matemático para análise do sistema ilustrado na Figura 2, decompõe-se o sistema principal em três 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 de um sistema chamado de Sistema Servo de Posição Vertical da Carga, (LIMA, 2011).

2.1.1. Modelagem Matemática do Movimento da Carga no Eixo - XY

Para se obter o modelo matemático que descreve o movimento do pórtico e do carro no plano XY, se faz o uso da formulação de *Lagrange*, que relaciona as energias cinéticas e potenciais do sistema com as forças que atuam sobre ele, segundo (COSTA, 2010) e (LIMA, 2011).

A expressão que descreve esta relação de forma generalizada é dada por

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

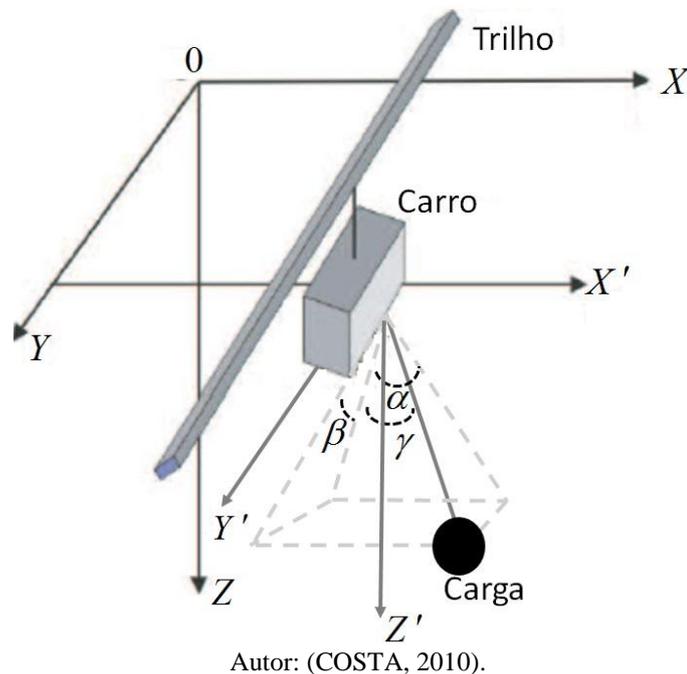
De forma pontual a expressão é dada por

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

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;
- Q_k é a função força generalizada associada a \dot{q}_k .

Figura 2 - Diagrama de corpo livre de uma ponte rolante com três graus de liberdade.



Observando a Figura 2 podemos estimar que:

- A massa m_1 do trilho se movimenta no plano XY permanecendo paralela ao eixo Y;
- A massa m_2 do carro se movimenta ao longo do trilho móvel, sempre perpendicular ao eixo X;

- Considerou-se que a massa m_3 da carga que não executa movimento no sentido vertical, exceto o causado pela oscilação;
- O cabo tem massa desprezível e comprimento fixo l durante os deslocamentos do carro e do trilho;
- 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 ;
- γ é o ângulo entre o cabo e a sua projeção ortogonal e o plano YZ .
- Os ângulos α e β são rastreados em tempo real. Com eles é possível calcular o ângulo γ através da expressão dada por

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

Para a obtenção do modelo do sistema são utilizadas como coordenadas generalizadas: x , y e os ângulos α e γ .

Analisando o diagrama de forças da Figura 2 podemos concluir que a energia cinética do sistema é dada pela expressão matemática:

$$T = \frac{1}{2}m_1\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}^2 - m_3l\dot{x}\dot{y}\cos(\gamma) + \frac{1}{2}m_3l^2\dot{\gamma}^2 + \frac{1}{2}m_3l^2\dot{\beta}^2\cos^2(\gamma) + m_3l\dot{y}\dot{\gamma}\operatorname{sen}(\gamma)\operatorname{sen}(\beta) - m_3l\dot{y}\dot{\beta}\cos(\gamma)\cos(\beta) + \frac{1}{2}m_3\dot{y}^2 \quad (4)$$

A energia potencial no sistema é dada por

$$V = -m_3g\cos(\beta)\cos(\gamma) \quad (5)$$

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

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

Ao isolar-se T_c substituindo na expressão

$$T_c = fr, \quad (7)$$

sendo f a força produzida pelo conjugado e r o raio da engrenagem acoplada ao eixo das rodas do carro. Ao isolarmos f obtêm-se as expressões para as forças generalizadas produzidas pelos motores, assim teremos:

$$f_x = \frac{AN_x K}{rR} e_x - \frac{K^2 N_x^2}{r^2 R} \dot{x} - \frac{JN_x^2}{r^2} \ddot{x} \quad (8)$$

$$f_y = \frac{AN_y K}{rR} e_y - \frac{K^2 N_y^2}{r^2 R} \dot{y} - \frac{JN_y^2}{r^2} \ddot{y} \quad (9)$$

Onde,

- A é o ganho de tensão do amplificador de potência;
- N é a relação de engrenagens da caixa de redução dos motores CC;
- K é a constante de torque dos motores CC;
- r é o raio da engrenagem acoplada ao eixo das rodas do carro;
- R é a resistência de armadura dos motores CC;
- f_x e f_y são as forças que atuam no movimento dos carros nos eixos X e Y;
- e_x e e_y são as tensões aplicadas aos motores DC que atuam no movimento dos carros nos eixos X e Y.

As forças generalizadas do sistema são dadas por Q_k e são descritas por

$$\begin{aligned} Q_x &= f_x(t) \\ Q_y &= f_y(t) \\ Q_\gamma &= 0 \\ Q_\beta &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Substituindo-se as expressões encontradas para a energia cinética (T), para a energia potencial (V) e a das forças generalizadas (Q_k), dadas pelas Equações (4), (5) e (10) respectivamente na fórmula de Lagrange, Equação (2), obtêm-se as equações que regem o modelo, dadas por

$$\left(m_1 + m_2 + m_3 + \frac{JN_x^2}{r^2}\right)\ddot{x} - m_3l\ddot{\gamma}\cos(\gamma) = \frac{N_xK}{rR}e_1 - \frac{K^2N_x^2}{r^2R}\dot{x} - m_3l\dot{\gamma}^2\sin(\gamma) \quad (11)$$

$$\left(m_2 + m_3 + \frac{JN_y^2}{r^2}\right)\ddot{y} - m_3l\ddot{\gamma}\sin(\gamma)\cos(\beta) - m_3l\ddot{\beta}\cos(\gamma)\cos(\beta) = \frac{N_yK}{rR}e_2 - \frac{K^2N_y^2}{r^2R}\dot{y} - m_3l(\dot{\gamma}^2 + \dot{\beta}^2)\cos(\gamma)\sin(\beta) - 2m_3l\dot{\gamma}\dot{\beta}\sin(\gamma)\cos(\beta) \quad (12)$$

$$\ddot{y}\sin(\gamma)\sin(\beta) - \ddot{x}\cos(\gamma) + l\ddot{\gamma} = -g\cos(\beta)\sin(\gamma) - l\dot{\beta}^2\cos(\gamma)\sin(\gamma) \quad (13)$$

$$l\ddot{\beta}\cos(\gamma) - \ddot{y}\cos(\beta) = 2l\dot{\beta}\dot{\gamma} - g\sin(\beta) \quad (14)$$

Podemos trabalhar estas equações na forma matricial, visando melhorar e facilitar os cálculos e operações nos computadores, desta forma a representação matricial para o sistema é representado por

$$B(q)\ddot{q} = H(q, \dot{q}), \quad (15)$$

sendo a matriz q o vetor de coordenadas generalizadas, a matriz $B(q)$ é denominada matriz de inércia do sistema, que pode ser invertida e a matriz $H(q, \dot{q})$ é a matriz que contém as forças e conjugados presentes no modelo.

Podemos reescrever a expressão da Equação (15) da seguinte maneira:

$$\ddot{q} = B^{-1}(q)H(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} f_x(q, \dot{q}) \\ f_\gamma(q, \dot{q}) \\ f_y(q, \dot{q}) \\ f_\beta(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Pode-se 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 Lineares Invariantes no Tempo (LIT). 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 (FRANKLIN, 2013).

Desta maneira determinamos um vetor \vec{X} contendo as variáveis de estado que são dadas por

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} x_1 = x \\ x_2 = \dot{x} \\ x_3 = \gamma \\ x_4 = \dot{\gamma} \\ x_5 = y \\ x_6 = \dot{y} \\ x_7 = \beta \\ x_8 = \dot{\beta} \end{bmatrix} \quad (17)$$

O vetor \vec{u} de entradas contém as tensões aplicadas aos motores CC nos eixos X e Y e é representado por

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} \quad (18)$$

Para se obter a representação do sistema em espaço de estado é necessário a derivada $\dot{\vec{X}}$, de forma que, as forças generalizadas que atuam no modelo fiquem em função das variáveis de estado e do vetor de entradas \vec{u} que é dado por

$$\dot{\vec{X}} = f(\vec{x}, \vec{u}) = \begin{bmatrix} f_1 = \dot{x}_1 = \dot{x} = x_2 \\ f_2 = \dot{x}_2 = \ddot{x} = f_x(q, \dot{q}) \\ f_3 = \dot{x}_3 = \dot{\gamma} = x_4 \\ f_4 = \dot{x}_4 = \ddot{\gamma} = f_\gamma(q, \dot{q}) \\ f_5 = \dot{x}_5 = \dot{y} = x_6 \\ f_6 = \dot{x}_6 = \ddot{y} = f_y(q, \dot{q}) \\ f_7 = \dot{x}_7 = \dot{\beta} = x_8 \\ f_8 = \dot{x}_8 = \ddot{\beta} = f_\beta(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \quad (19)$$

Os pontos de equilíbrio escolhidos para a linearização do sistema é um vetor coluna dado por

$$\vec{x}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

A linearização de um sistema não linear, seguindo abordagem de pequenos sinais é dada segundo a expressão a seguir.

$$\dot{\vec{X}} = A\dot{\vec{X}} + B\dot{\vec{u}} \quad (21)$$

$$A\dot{\vec{X}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_8} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_8} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_8}{\partial x_1} & \frac{\partial f_8}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_8}{\partial x_8} \end{bmatrix}_{\vec{x} \rightarrow \vec{x}_0 \text{ e } \vec{u} \rightarrow \vec{u}_0} \quad (22)$$

$$B\dot{\vec{u}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_8}{\partial u_1} & \frac{\partial f_8}{\partial u_2} \end{bmatrix}_{\vec{x} \rightarrow \vec{x}_0 \text{ e } \vec{u} \rightarrow \vec{u}_0} \quad (23)$$

Após o cálculo de todas as derivadas parciais das matrizes $A\dot{\vec{X}}$ e $B\dot{\vec{u}}$ e efetua-se a soma para obter as matrizes da descrição do sistema em espaço de estados linearizadas que são a representação do sistema em espaço de estado, dadas por

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 & | & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & | & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & a_{43} & 0 & | & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 & a_{66} & a_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 & a_{86} & a_{87} & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$B = \left[\begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ b_{21} & 0 \\ 0 & 0 \\ b_{41} & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ 0 & b_{62} \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{82} \end{array} \right] \quad (25)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Os elementos a_{22} , a_{23} , a_{42} , a_{43} , b_{21} , b_{41} , b_{62} e b_{82} das matrizes A e B são dados segundo as expressões algébricas mostradas na sequência.

$$a_{22} = -\frac{JK^2N_x^2N_y^2+m_2K^2N_x^2r^2}{Rm_2^2r^4+Rm_1m_2r^4+J^2N_x^2N_y^2R+JN_x^2Rm_2r^2+JN_y^2Rm_1r^2+JN_y^2Rm_2r^2} \quad (28)$$

$$a_{23} = -\frac{Jrgm_3N_y^2r^2+Rgm_2m_3r^4}{Rm_2^2r^4+Rm_1m_2r^4+J^2N_x^2N_y^2R+JN_x^2Rm_2r^2+JN_y^2Rm_1r^2+JN_y^2Rm_2r^2} \quad (29)$$

$$a_{42} = -\frac{JK^2N_x^2N_y^2+K^2N_x^2m_2r^2}{Rlm_2^2r^4+J^2N_x^2N_y^2Rl+Rlm_1m_2r^4+JN_x^2Rlm_2r^2+JN_y^2Rlm_1r^2+JN_y^2Rlm_2r^2} \quad (30)$$

$$a_{43} = -\frac{Rgm_2^2r^4+Rgm_1m_2r^4+Rgm_2m_3r^4+J^2N_x^2N_y^2Rg+JN_x^2Rgm_2r^2+JN_y^2Rgm_1r^2+JN_y^2Rgm_2r^2+JN_y^2Rgm_3r^2}{Rlm_2^2r^4+J^2N_x^2N_y^2Rl+Rlm_1m_2r^4+JN_x^2Rlm_2r^2+JN_y^2Rlm_1r^2+JN_y^2Rlm_2r^2} \quad (31)$$

$$a_{66} = -\frac{JK^2N_x^2N_y^2+K^2N_y^2m_1r^2+K^2N_y^2m_2r^2}{Rm_2^2r^4+Rm_1m_2r^4+J^2N_x^2N_y^2R+JN_x^2Rm_2r^2+JN_y^2Rm_1r^2+JN_y^2Rm_2r^2} \quad (32)$$

$$a_{67} = -\frac{Rgm_1m_3r^4+Rgm_2m_3r^4+JN_x^2Rgm_3r^2}{Rm_2^2r^4+Rm_1m_2r^4+J^2N_x^2N_y^2R+JN_x^2Rm_2r^2+JN_y^2Rm_1r^2+JN_y^2Rm_2r^2} \quad (33)$$

$$a_{86} = -\frac{JK^2N_x^2N_y^2+K^2N_y^2m_1r^2+K^2N_y^2m_2r^2+K^2N_y^2m_3r^2-K^2N_y^2m_3r^2}{Rlm_2^2r^4+Rlm_1m_2r^4+J^2N_x^2N_y^2Rl+JN_x^2Rlm_2r^2+JN_y^2Rlm_1r^2+JN_y^2Rlm_2r^2} \quad (34)$$

$$a_{87} = -\frac{Rgm_2^2r^4+Rgm_1m_2r^4+Rgm_2m_3r^4+J^2N_x^2N_y^2Rg+JN_x^2Rgm_2r^2+JN_y^2Rgm_1r^2+JN_y^2Rgm_2r^2+Rgm_1m_3r^2+JN_y^2Rgm_3r^2}{Rlm_2^2r^4+Rlm_1m_2r^4+J^2N_x^2N_y^2Rl+JN_x^2Rlm_2r^2+JN_y^2Rlm_1r^2+JN_y^2Rlm_2r^2} \quad (35)$$

$$b_{21} = \frac{JKN_xAN_y^2r+KN_xAm_2r^3}{Rm_2^2r^4+Rm_1m_2r^4+J^2N_x^2N_y^2R+JN_x^2Rm_2r^2+JN_y^2Rm_1r^2+JN_y^2Rm_2r^2} \quad (36)$$

$$b_{41} = \frac{KN_xAm_2r^3+JKN_xN_y^2Ar}{Rlm_2^2r^4+J^2N_x^2N_y^2Rl+Rlm_1m_2r^4+JN_x^2Rlm_2r^2+JN_y^2Rlm_1r^2+JN_y^2Rlm_2r^2} \quad (37)$$

$$b_{62} = \frac{KN_yAm_1r^3+KN_yAm_2r^3+JKN_x^2N_yAr}{Rm_2^2r^4+Rm_1m_2r^4+J^2N_x^2N_y^2R+JN_x^2Rm_2r^2+JN_y^2Rm_1r^2+JN_y^2Rm_2r^2} \quad (38)$$

$$b_{82} = \frac{KN_yAm_1r^3+KN_yAm_2r^3+JKN_x^2N_yAr}{Rlm_2^2r^4+J^2N_x^2N_y^2Rl+Rlm_1m_2r^4+JN_x^2Rlm_2r^2+JN_y^2Rlm_1r^2+JN_y^2Rlm_2r^2} \quad (39)$$

2.1.2. Modelos $(x - \gamma)$ e $(y - \beta)$

Como mencionado anteriormente, o sistema pode ser dividido em dois subsistemas 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

$$A_{(x-\gamma)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{42} & a_{43} & 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$B_{(x-\gamma)} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_{21} \\ 0 \\ b_{41} \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$A_{(y-\beta)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{66} & a_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{86} & a_{87} & 0 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$B_{(y-\beta)} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_{62} \\ 0 \\ b_{82} \end{bmatrix} \quad (43)$$

2.1.3. Parâmetros de Modelagem do Sistema

A seguir são mostrados os parâmetros necessários para obtenção do modelo matemático do protótipo da ponte rolante desenvolvida, dados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de variáveis utilizadas nos cálculos para obtenção do modelo matemático da ponte rolante.

ea	Definição	Valor	Unidade no SI
m_1	Massa do trilho	4,2	<i>Kg</i>
m_2	Massa do carro	1,5	<i>Kg</i>
m_3	Massa da carga	5	<i>Kg</i>
R	Resistência de armadura do motor	0,93	Ω
R	Raio da roda do carro e trilho	2	<i>Cm</i>
N_x	Relação de acoplamento de engrenagens do motor do eixo X	73:1	--
N_y	Relação de acoplamento de engrenagens do motor do eixo Y	73:1	--
K	Constante de torque do motor	$41 \cdot 10^{-3}$	
J	Momento de inércia do eixo do motor	$20 \cdot 10^{-5}$	<i>Kg.m²</i>
L	Comprimento do fio	0,5	<i>M</i>
A	Ganho de tensão do Amplificador de Potência	6	<i>V/V</i>
G	Aceleração da gravidade	9,81	<i>m/s²</i>

2.1.4. Equações do Movimento no Plano - XY

Substituindo os parâmetros da Tabela 1 nas Equações 28 a 39 obtêm-se os elementos a_{22} , a_{23} , a_{42} , a_{43} , b_{21} , b_{41} , b_{62} e b_{82} das matrizes A e B linearizadas assim, determinam-se as matrizes numéricas que representam a dinâmica do carro e do trilho são dadas por

$$A = \left[\begin{array}{cccc|cccc} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.4036 & -8.2210 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.8072 & -36.0619 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.3632 & -27.7676 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2.7265 & -75.1551 & 0 \end{array} \right] \quad (44)$$

$$B = \left[\begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ 1.6182 & 0 \\ 0 & 0 \\ 3.2364 & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ 0 & 5.4657 \\ 0 & 0 \\ 0 & 10.9313 \end{array} \right] \quad (45)$$

A partir da transformação das matrizes A e B, em espaço de estado para a representação em função de transferência em *Laplace* se obtêm quatro funções que representam os subsistemas $(x - \gamma)$ e $(y - \beta)$ dados por

- Funções de Transferência para o subsistema $(x - \gamma)$

$$FT_{u_1(x)} = \frac{1.618 s^2 - 6.662e - 33 s + 31.75}{s^4 + 0.4036 s^3 + 36.06 s^2 + 7.919 s} \quad (46)$$

$$FT_{u_1(y)} = \frac{3.236 s + 1.825e - 16}{s^3 + 0.4036 s^2 + 36.06 s + 7.919} \quad (47)$$

- Funções de Transferência para o subsistema $(y - \beta)$

$$FT_{u_2(y)} = \frac{5.466 s^2 - 2.286e - 30 s + 107.2}{s^4 + 1.363 s^3 + 75.16 s^2 + 26.75 s} \quad (48)$$

$$FT_{u_2(\beta)} = \frac{10.93 s - 7.737e - 15}{s^3 + 1.363 s^2 + 75.16 s + 26.75} \quad (49)$$

Estas equações podem ser acessadas através do *script* feito em ambiente *MATLAB & Simulink – MathWors®* disponibilizado no *ANEXO 1 – Código MATLAB®, Modelo Matemático da Ponte Rolante, Análise em Malha Aberta (MA) e Malha Fechada (MF), Diagrama de Bode, Lugar Geométrico das Raízes e Controlador PID.*

2.2. Controladores Lógicos Programáveis

Nesta sessão é feita uma revisão sobre as características e métodos de operação dos Controladores Lógicos Programáveis chamados usualmente de CLPs ou PLCs (*Programmable Logic Controller*), estes são vastamente utilizados no meio industrial para executar o controle de plantas e de grandes processos industriais, eles estão presentes também no comando e controle do objeto de estudo deste trabalho, as pontes rolantes.

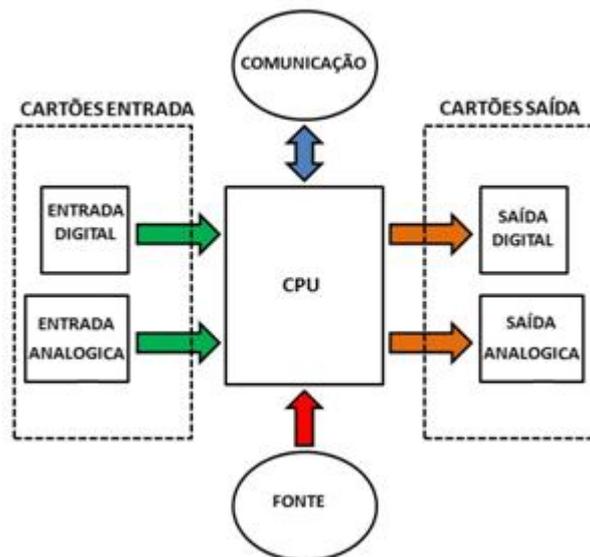
2.2.1. Características Gerais

Existe uma enorme variedade de marcas e modelos de CLPs no mercado da automação e estes são utilizados nas mais diversas ocasiões e tarefas.

O CLP é um controlador de grande poder de processamento, que executa instruções em tempo discreto e é capaz de gerenciar diversas entradas e saídas tratando os sinais de entradas (analógicas ou digitais), transformando em ações de comando para um determinado processo que controla. A arquitetura de um CLP genérico é mostrada na Figura 3.

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) o CLP é um equipamento eletrônico digital com hardware e software compatíveis com aplicações industriais.

Figura 3 – Arquitetura de um CLP genérico.



Fonte: Igor Castro.

Segundo a NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*), os PLCs são:

“Aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para o armazenamento interno de instruções para implementações específicas, tais como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, para controlar, através de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos.”

Segundo (COUTO, 2001), as principais características destes controladores são as seguintes:

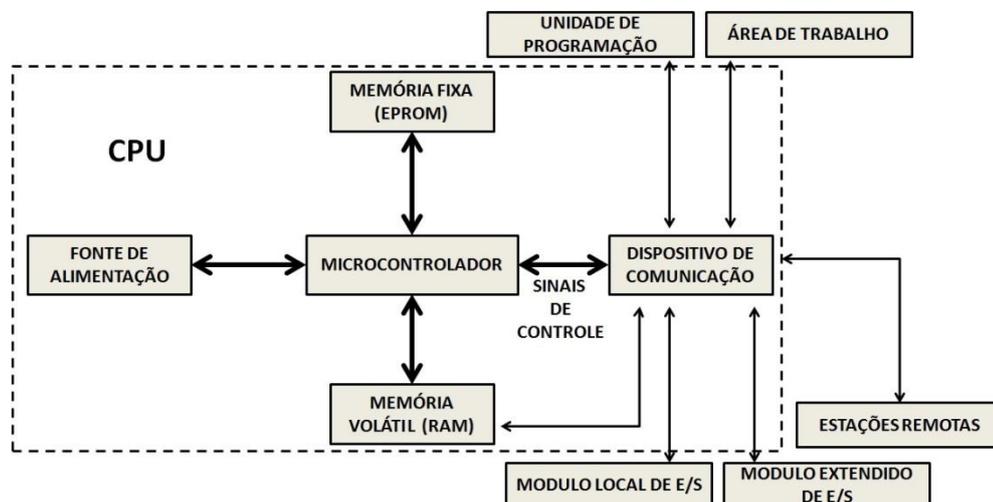
- Linguagem de programação em alto nível, o que facilita a manipulação pelo operador;

- Simplificação nos esquemas elétricos, pois os comandos destes ficam restritos a um conjunto de entradas e saídas, desta maneira qualquer alteração no sistema se torna mais simples e barata, pois demanda uma intervenção mínima em hardware;
- Confiabilidade operacional, devido à flexibilidade de alteração ou incremento do sistema sem necessitar de alterações físicas de grande porte, isto faz com haja uma redução dos erros garantindo sucesso nos desenvolvimentos ou melhorias a serem implementadas;
- Funções avançadas, que possibilita uma grande variedade de tarefas de controle;
- Comunicação em rede, que permite o intercâmbio de dados e informações sobre status de operação a todos os níveis da pirâmide de automação.

2.2.2. Arquitetura dos CPLs

No diagrama de blocos da Figura 4 é apresentada a arquitetura típica de CLP que é constituída basicamente por: fonte de alimentação, unidade central de processamento, memórias e módulos de entradas e saídas.

Figura 4 - Diagrama de blocos do CLP.



Fonte: (COUTO, 2001).

Nos próximos parágrafos, apresenta-se uma descrição detalhada dos componentes da arquitetura do CLP, segundo (COUTO, 2001).

- Fonte de alimentação

Esta fonte é responsável por prover a energia necessária para que o CPL opere. Existe ainda uma bateria extra que serve para garantir a integridade do programa do usuário caso haja falta de energia.

Existem dois tipos de fontes de alimentação:

- i. *Source* é aquela que está interna ao controlador e alimenta a UCP e *backplane*;
 - ii. *Sink* é uma fonte externa ao controlador que alimenta os cartões de E/S.
- Unidade Central de Processamento (UCP)

É a unidade responsável por executar o programa do usuário gravado na memória, atualizar a memória de dados e a memória imagem que armazenam os valores das entradas e saídas.

- Memórias fixas e voláteis

As memórias fixas do CLP são do tipo EPROM (*Erasable Programmable Read Only Memory*) e guardam instruções e trechos de códigos necessários para o funcionamento de todos os elementos do controlador, como por exemplo:

- i. Sistema Operacional;
- ii. *Start* do CLP;
- iii. Sequência de operações;
- iv. *Drivers*.

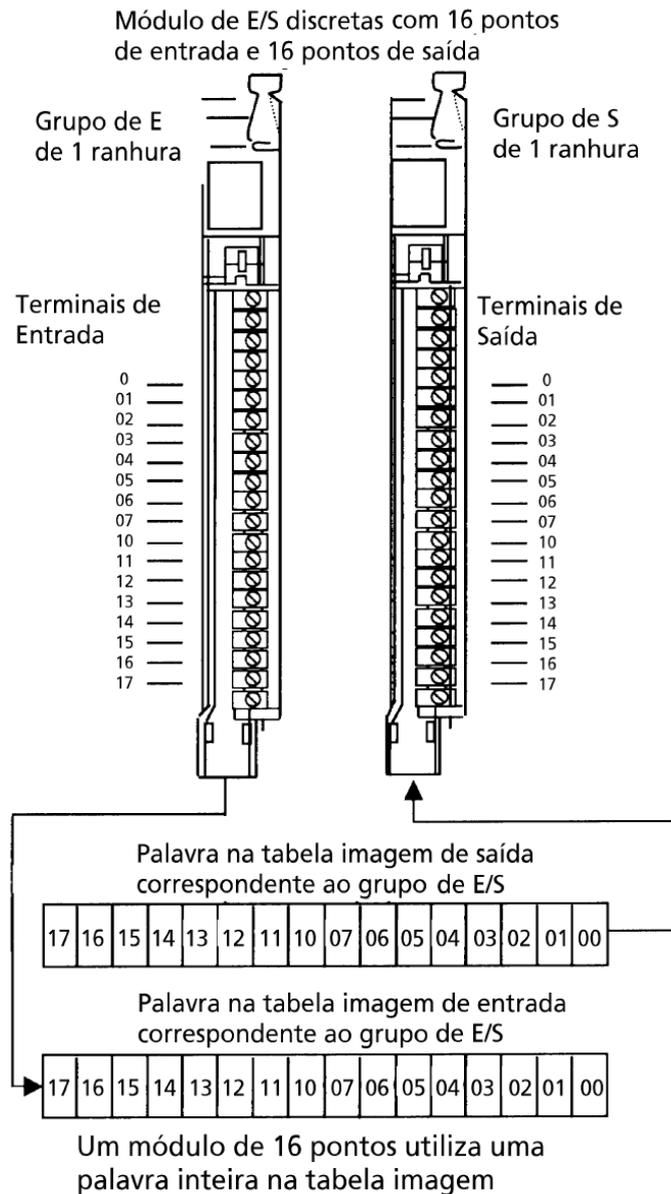
As memórias voláteis são do tipo RAM (*Random Access Memory*), estas memórias são as utilizadas pelo usuário para programar, assim como para alocar os dados de entrada e saída do sistema como, por exemplo:

- i. Programa usuário;
- ii. Configuração de dados;
- iii. Imagem de dados de E/S.

- Módulos de entrada e saída

Na Figura 5 são apresentadas com detalhes as barras dos terminais de conexão dos módulos de entrada e saídas do CLP.

Figura 5 - Detalhe dos módulos de E/S de um CLP genérico.

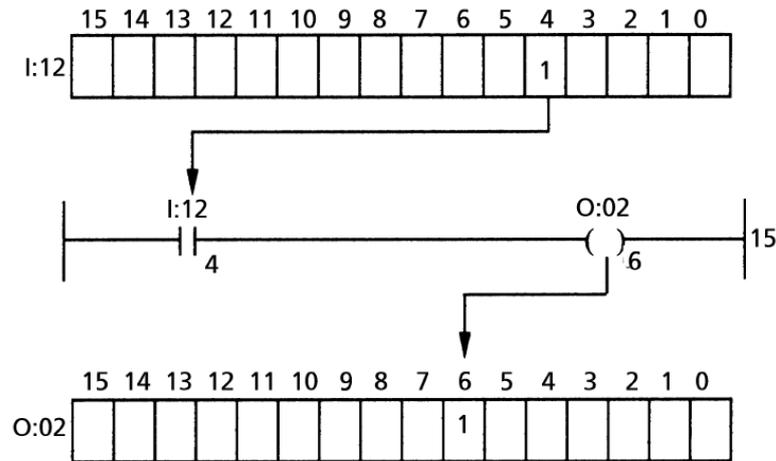


Fonte: (COUTO, 2001).

Ainda na Figura 5, observa-se que para um módulo de E/S discretas de 01 (uma) ranhura contendo 16 (dezesseis) entradas e saídas respectivamente, o tamanho do dado salvo na tabela imagem de entrada corresponde a um dado de 16 bits, ou seja, uma *word*.

Os métodos de endereçamento digital dos dados das entradas e saídas de um CLP são bem semelhantes e seguem a lógica exibida na Figura 6.

Figura 6 - Endereçamento de E/S em CLPs.



Endereços de entrada e de saída

Fonte: (COUTO, 2001).

Observando a Figura 6, verifica-se que os dados de entrada e saída se apresentam respectivamente como, “I:12/04” e “O:02/06”. A primeira letra da sequência se refere ao tipo de dado, sendo I (input/entrada) e O (output/saída). O número após o elemento “:” indica em que posição física do cartão de entrada ou saída o elemento está diretamente conectado, no exemplo os módulos são 12 e 02 para entrada e saída respectivamente. O número que aparece após o elemento “/” refere-se ao bit da imagem da palavra de entrada ou saída, no exemplo temos os bits 04 e 06 para entrada e saída respectivamente. É importante atentar que a imagem da palavra de entrada e saída são distintas, por exemplo, “I:12/04” tem endereço totalmente diferente de “O:12/04”.

- Terminal de programação

O terminal de programação é estabelecido por um computador ou qualquer outro dispositivo que permita estabelecer um elo de comunicação com o CLP, onde após a criação do canal de comunicação é possível executar:

- i. Autodiagnóstico;
- ii. Alterações online;
- iii. Programação de instruções;
- iv. Monitoração;
- v. Escrita e apagamento da memória.

A comunicação entre o terminal de programação e o CLP pode ser feita através de alguns tipos de protocolos de comunicação, dependendo da marca e modelo do controlador, podendo ser possível comunicar via:

- i. Serial;
- ii. Ethernet;
- iii. TCP/IP;
- iv. DeviceNet.

2.2.3. Ciclo de Execução dos CLPs

O ciclo de execução ou ciclo de *scan* de um PLC é mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Ciclo de SCAN de um CLP.



Em um Controlador Lógico Programável as instruções seguem uma sequência cíclica fechada, tal qual a demonstrada no diagrama de fluxo da Figura 7, estas etapas são:

- Atualização das entradas, onde todos os dados de entrada vindas, por exemplo, de sensores, são atualizadas instantaneamente;
- Processamento das instruções do programa usuário onde este se dá de forma sequencial;
- Atualização das saídas, fazendo que todos os sinais de comandos sejam enviados corretamente.

O controlador lê as entradas gravando todas as informações vinda dos sensores na imagem de entrada. Na sequência executa o código que está salvo na memória de programa, após isto ele transfere para a memória de saída todos os dados processados e assim todos os atuadores recebem as instruções para executar suas funções.

2.2.4. Linguagem de Relés ou Ladder

Há várias linguagens de programação, em alto e baixo nível feito para programação de Controladores Lógicos Programáveis. A classificação das linguagens de programação para CLP segundo (IEC-61131-3) é dada na Tabela 2.

Tabela 2- Classificação das linguagens de programação para PLCs.

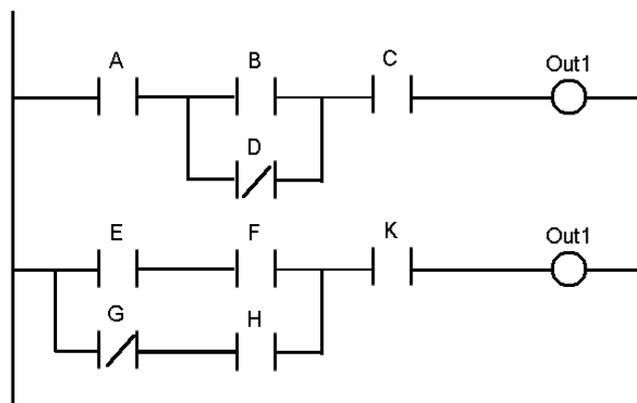
CLASSES	LINGUAGENS
Tabulares	Tabela de Decisão
Textuais	IL (<i>Instruction List</i>)
	ST (<i>Structred Text</i>)
	LD (<i>Ladder Diagram</i>)
Gráficas	FBD (<i>Function Block Diagram</i>)
	SFC (<i>Sequential Flow Chart</i>)

Autor: (IEC-61131-3).

Entre as linguagens citadas a cima a mais utilizada, pela sua facilidade de manuseio e entendimento, é o *Ladder*. Vemos uma vasta utilização desta linguagem de programação no meio industrial devido à praticidade que traz ao operador.

Uma lógica *Ladder* é ilustrada na Figura 8, sua idealização foi baseada nos Diagramas Elétricos, baseados nas lógicas de relés e contatos.

Figura 8 - Diagrama *Ladder* genérico.



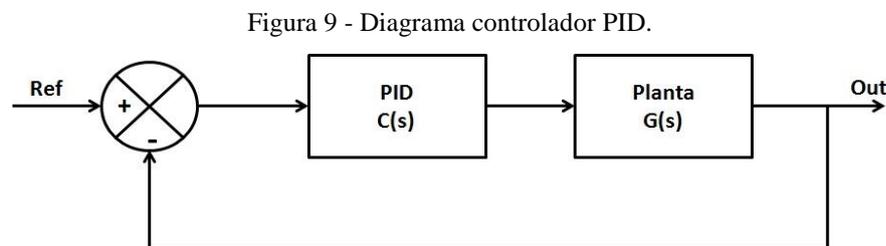
Fonte: <https://www.citisystems.com.br/linguagem-ladder/>

Uma sequência de contatos abertos e/ou fechados energiza ou não uma bobina deixando esta habilitada (nível lógico alto) ou desabilitada (nível lógico baixo).

As principais instruções em Ladder são listadas a seguir na Tabela 10, que podem ser encontradas no *APÊNDICE A – Configurações de Hardware e Endereçamento do MicroLogix™ 1200*.

2.3. PID em SVC

Os controladores de três termos, também conhecidos como controladores PID, ou seja, de ação proporcional, integral e derivativa, tem relevância histórica no contexto da engenharia de controle e é, até os dias de hoje, o controlador mais aplicado no meio industrial, por sua confiabilidade e praticidade de operação e ajustes, a Figura 9 mostra o diagrama de blocos de um controlador PID. Este método de controle foi desenvolvido segundo (FRANKLIN, 2013), baseado em experiências e por tentativa e erro dos engenheiros que, partindo de um controle proporcional realimentado, descobriram empiricamente a ação do controle integral que eliminava o erro em regime permanente, contudo o mesmo fornecia uma resposta dinâmica pobre, o que levou ao acréscimo de um termo derivativo para melhorar a resposta.



Autor: Igor Castro.

A função de transferência do controlador PID é dada por

$$D_{(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad (50)$$

ou

$$D_{(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (51)$$

sendo

- K_p o ganho proporcional;
- K_i é o ganho integral;
- K_d é o ganho derivativo;
- T_i é o tempo integrativo;
- T_d é o tempo derivativo.

2.3.1. Método de Ziegler–Nichols

Segundo (OGATA, 2005), tendo conhecimento do modelo matemático da planta é possível estimar os parâmetros do controlador aplicando diversas técnicas de projeto. Contudo se a planta for complexa, ao ponto de, não conseguirmos obter facilmente o seu modelo matemático, então não será possível determinar os parâmetros do controlador PID de forma analítica, será necessário então, aplicarmos técnicas de sintonia de controladores PID para garantirmos os parâmetros de projeto.

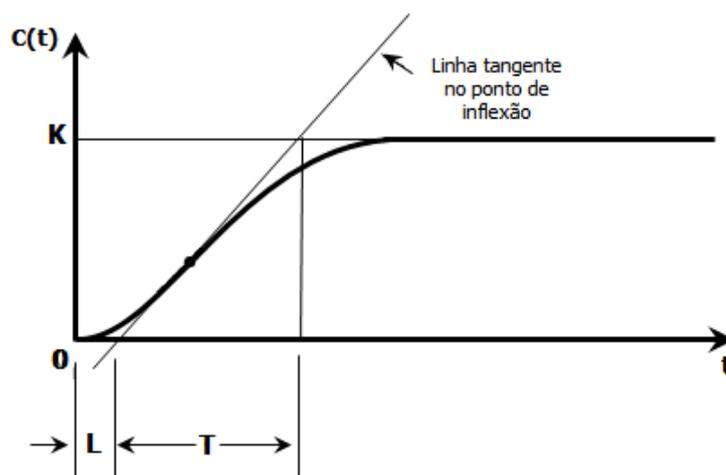
Ziegler–Nichols desenvolveram regras para os ajustes dos parâmetros do controlador PID (K_p , T_i , T_d), baseadas na resposta do sistema ao degrau unitário ou ao valor do ganho proporcional (K_p) que resulta em uma estabilidade marginal do sistema. Estas regras dão uma estimativa eficientes dos ganhos (K_p , K_i , e K_d) para um ponto de partida da sintonia fina do controlador, que vai garantir um ponto de operação aceitável em que o sistema seja estável.

O principal objetivo das regras de Ziegler – Nichols para a sintonia de controladores PID, é determinar ou estimar os valores do ganho proporcional (K_p), do tempo integral (T_i) e do tempo derivativo (T_d), com base no comportamento temporal da planta. As regras de Ziegler – Nichols são divididas em dois métodos, o primeiro baseado na resposta ao degrau unitário $u(t)$ da planta, e o segundo baseado no ganho proporcional puro (K_p) que leva o sistema a uma estabilidade marginal. A seguir, apresenta-se os métodos de curva de reação do processo e frequência limiar.

- **Primeiro método – Curva S:**

O primeiro método consiste em obter a curva de resposta do sistema a uma entrada tipo degrau unitária $u(t)$ como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Curva de resposta em forma de S.



Autor: (OGATA, 2005).

Pode-se observar na

Figura 10, se o sistema não apresentar integradores ou nenhum par de polos complexos conjugados dominantes a planta deverá ter um comportamento gráfico similar a um ‘S’. Esta curva é caracterizada pelo tempo de atraso L e pela constante de tempo T , que são obtidas mediante ao traçado de uma linha tangente ao ponto de inflexão da curva em ‘S’ e determinando o ponto de intersecção da linha tangente com o eixo dos tempos e a linha $c(t) = k$, segundo (OGATA, 2005).

A função de transferência para este sistema pode ser aproximada de um sistema de primeira ordem com um atraso, dada por

$$\frac{C_s}{U_s} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (52)$$

Ziegler e Nichols sugerem a escolha dos valores de K_p , T_i e T_d , através da Tabela 3.

Tabela 3 - Estimação de ganhos para o primeiro método de Ziegler e Nichols, sintonia de controladores PID.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Autor: Igor Castro.

Para o controlador PID sintonizado pelo primeiro método de Ziegler-Nichols obtêm-se a expressão para o controlador $G_{c(s)}$ dada por

$$G_{c(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$G_{c(s)} = 1,2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0,5Ls \right) \quad (53)$$

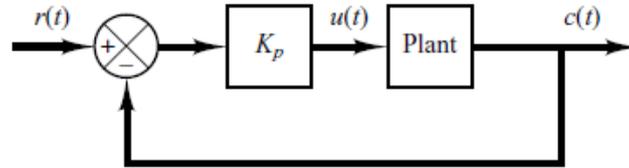
$$G_{c(s)} = 0,6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s}$$

- **Segundo método – K crítico:**

No segundo método inicialmente adota-se que ($T_i = \infty$) e ($T_d = 0$), e variando o ganho proporcional (K_p) de 0 (zero) até um valor crítico (K_{cr}), para o qual a saída apresenta uma forma representação gráfica oscilante sustentada pela primeira vez, como pode-se ver na

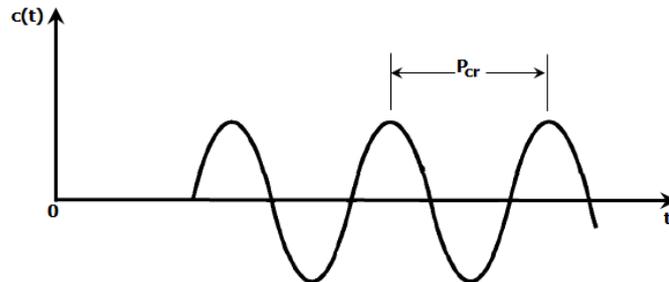
Figura 12. Caso a resposta do sistema não apresente uma oscilação sustentada para nenhum valor de K_p , logo concluímos que este método não se aplica. A Figura 11 representa a configuração do sistema para a aplicação do segundo método.

Figura 11 - Sistema de malha fechada com um controlador proporcional.



Autor: (OGATA, 2005).

Figura 12 - Oscilação sustentada com período P_{cr} .



Autor: (OGATA, 2005).

A escolha dos valores de K_p , T_i e T_d , são obtidos através dos parâmetros assinalados na Tabela 4.

Tabela 4 - Regra de sintonia de Ziegler_Nichols baseada no ganho crítico K_{cr} e no período crítico P_{cr} (segundo método).

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Autor: (OGATA, 2005).

Substituindo os os valores da Tabela 5 em (2.47), obtém-se na expressão final do controlador PID para o segundo método de Ziegler e Nichols que é dado por

(54)

$$G_{c(s)} = 0,075K_{cr}P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}}\right)^2}{s}$$

2.4. Sistemas a Variáveis Contínuas & Sistemas a Eventos Discretos

Os controladores baseados em sistemas a eventos discretos (SED) e a eventos contínuos (SVC) tem, segundo alguns pesquisadores, sua história iniciada entre o século XVIII e XIX, com a utilização de alguns mecanismos de controle de máquinas de tear com cartões perfurados e moendas automáticas por esteiras, por exemplo.

Segundo (MIYAGI, 1996), os controladores baseados em SVC têm como principal objetivo, igualar o valor de uma variável fixa (variável de controle) a um valor estimado (valor de referência), já nos controladores baseados em SED o principal objetivo é a execução de uma sequência de tarefas conforme um evento pré-determinado.

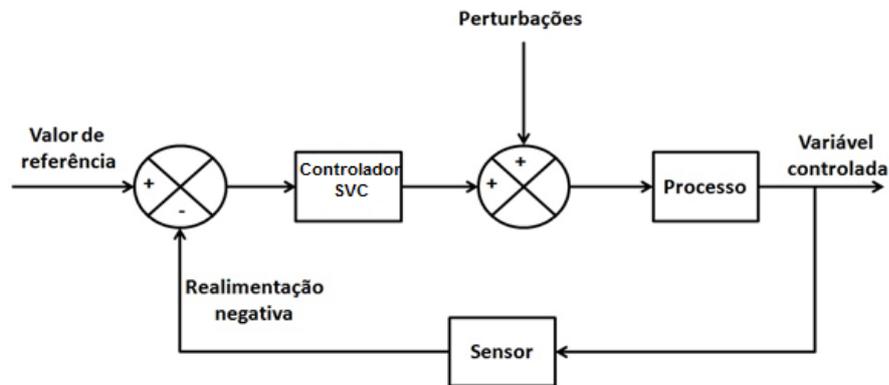
Ambos os tipos de técnicas de controle são muito utilizados no meio industrial para a elaboração e execução de controle de plantas e processos, contudo os controladores baseados em SED têm, cada vez mais, ganho força e espaço dentro deste cenário devido à praticidade e ao avanço dos CLPs que permitem condensar diversas funções e recursos de controle em um só equipamento, possibilitando ao programador inclusive mesclar técnicas de controle SVC com SED.

2.4.1. Sistemas de Controle a Variáveis Contínuas (SVC)

Como dito anteriormente esta abordagem de controle tem como principais características, segundo (MIYAGI, 1996):

- Seu objeto de controle são variáveis contínuas, ou seja, informações que se amostram continuamente no tempo;
- É um controle efetivo para controlar variáveis físicas de um processo como, temperatura, pressão, tensão, corrente e outras;
- Envolve os conceitos de controle em MA e MF, com realimentação negativa;
- É considerado um tipo de controle quantitativo;
- Sua estrutura de controle é basicamente em malha fechada como ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Estrutura de controle em SVC malha fechada com realimentação negativa.



Autor: Igor Castro.

Considerando u , o vetor coluna de entradas tal que, x é o vetor coluna de variáveis de estado e y é o vetor coluna de saídas, tal que

$$u = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_n(t) \end{bmatrix} \quad (55)$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_l(t) \end{bmatrix} \quad (57)$$

Desta maneira o objeto de controle no âmbito do controle em SVC é representado pelas seguintes expressões matemáticas.

$$\frac{dx}{dt} = F(x, u) \quad (58)$$

$$y = G(x, u) \quad (59)$$

De maneira que se, e somente, se o objeto de controle for linear ou linearizável, as expressões (58) e (59) podem ser rescritas da seguinte maneira:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (60)$$

$$y = Cx + Du \quad (61)$$

2.4.2. Sistemas de Controle a Eventos Discretos (SED)

O controle baseado em SED tem como principais características, segundo (MIYAGI, 1996):

- O objeto de controle trabalha com estados e eventos discretos, ou seja, manipula informações que se amostram discretamente no tempo;
- Este controle é classificado como qualitativo, pois se baseia em eventos ou estados;
- A estrutura de controle não é necessariamente em malha fechada.

Se:

- v é o vetor dos sinais de entradas de atuação sobre os m elementos estruturais;
- z é o vetor dos n estados dos m elementos estruturais;
- w é o vetor de saída referente a uma combinação dos m elementos estruturais e dos n estados assumidos por estes elementos.

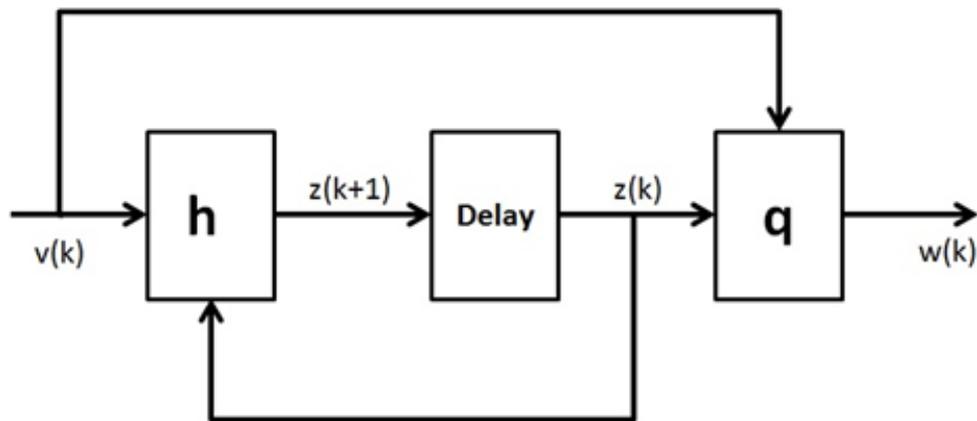
Então podemos dizer que, a representação matemática do objeto de controle para o controle baseado em SED s dados por

$$z(k + 1) = h\{z(k), v(k)\} \quad (62)$$

$$w(k) = q\{z(k), v(k)\} \quad (63)$$

Desta forma o objeto de controle para o sistema em SED se apresenta segundo ilustra a Figura 14.

Figura 14 - Modelo do objeto de controle no controle de SED.



Autor: (MIYAGI, 1996).

2.5. Sensores e Automação

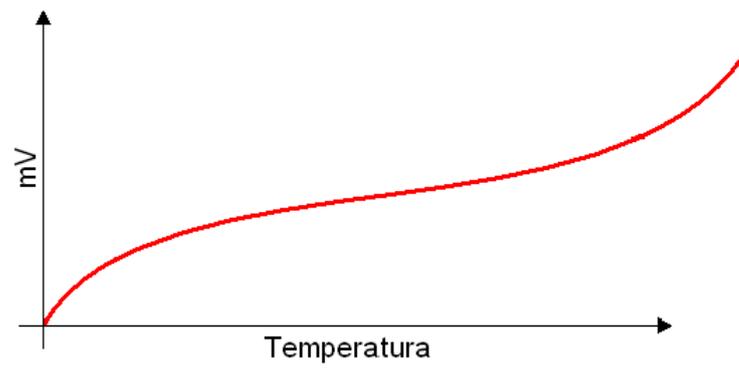
Os sensores são de suma importância nas atividades onde existe automação de qualquer que seja o processo, eles são responsáveis por enviar em tempo real, o *status* das variáveis ou parâmetros de controle de determinado processo onde, através deste *feedback* é possível tomar ações de controle ou correção de determinada tarefa que está sendo executada de forma automática.

Segundo Wendling M. (2010, p.04), a definição de sensor é:

“Termo empregado para designar dispositivos sensíveis à alguma forma de energia do ambiente que pode ser luminosa, térmica, cinética, relacionando informações sobre uma grandeza física que precisa ser mensurada (medida), como: temperatura, pressão, velocidade, corrente, aceleração, posição, etc.”

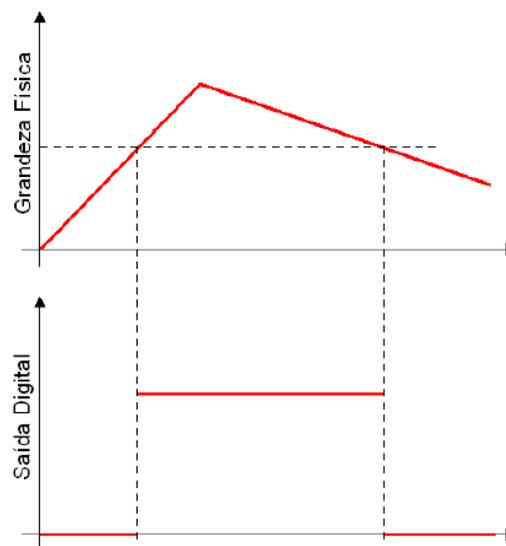
Os sensores podem ser classificados em duas grandes classes, os analógicos e os digitais. Os sensores analógicos são aqueles que podem assumir, em seu sinal de saída, qualquer valor ao longo do tempo desde que estejam dentro dos seus limites de operação como podemos observar na Figura 15, já os sensores digitais são aqueles que podem assumir, em seu sinal de saída, apenas dois valores ao longo do tempo, ou seja, um sinal discreto de nível alto ou nível baixo como, por exemplo -5 V ou +5 V, observa-se na Figura 16, segundo (WENDLING, 2010).

Figura 15 - Sinal de um sensor analógico.



Autor: (WENDLING, 2010).

Figura 16 - Sinal de um sensor digital.

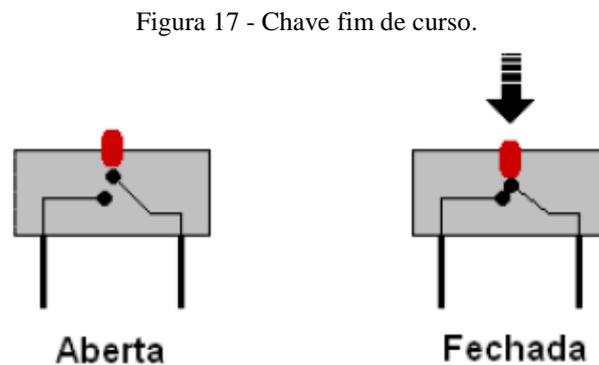


Autor: (WENDLING, 2010).

A seguir, descrevem-se as principais características e funcionalidade dos sensores que irão ser utilizados neste projeto, uma vez que a matéria de sensores é muito vasta e que existe uma infinidade de dispositivos de sensoriamento no mercado de automação industrial, residencial, automobilística e outros. Os sensores de que se irá tratar são: as chaves fim de curso, *encoders* analógicos, e os sensores indutivos.

- **Chave Fim de Curso**

As chaves fim de curso são sensores digital e analógico, que apresentam nível lógico alto ou baixo a depender do *status* de seu atuador mecânico. Uma chave fim de curso é ilustrada na Figura 17 abaixo, como seu próprio nome sugere este sensor funciona como uma chave ou um interruptor que liga ou desliga um circuito. Este sensor pode ser utilizado com diversas finalidades, porém a mais usualmente vista é o intuito de limitar o máximo avanço de um sistema que se move em um determinado sentido, como é o caso do carro e trilho da ponte rolante, portanto é neste contexto que as chaves fim de curso são empregadas no protótipo da ponte, com a finalidade de limitar o deslocamento do carro e trilho e garantir que os motores CC não permaneçam ligados após chegar a estes limites físicos.



Autor: (WENDLING, 2010).

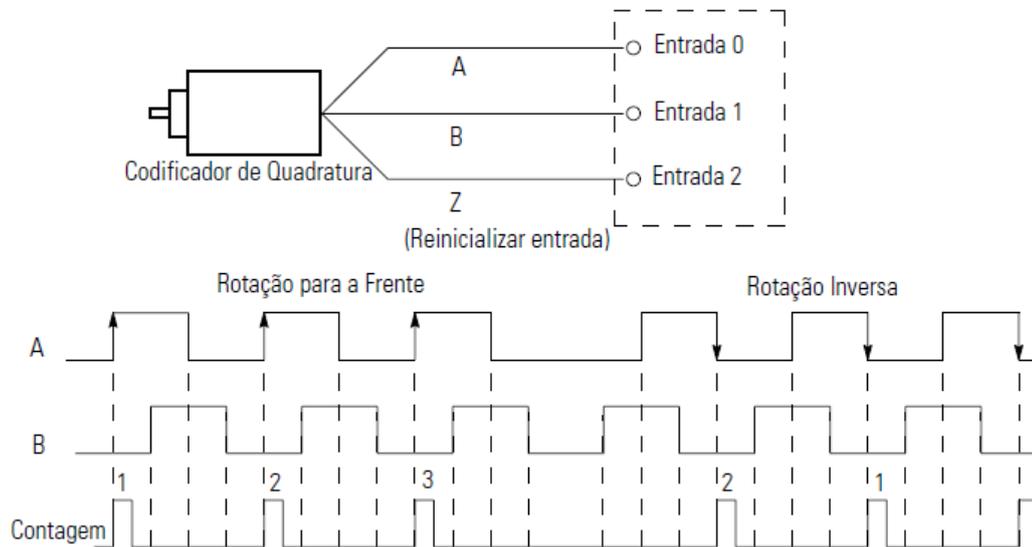
- **Encoders**

Os *encoders* são sensores do tipo analógico capaz de transformar movimentos lineares e ou angulares em sinais elétricos que podem ser utilizados para fazer o controle de velocidade, posição e até mesmo para fins de medição. Os *encoders* podem ser segundo (MELO, 2008) dos tipos regular, regular defasado (incremental) ou absoluto. O *encoder* incremental também pode ser chamado de *encoder* de quadratura e sua finalidade é determinar a direção e a posição da rotação, por exemplo, do eixo de um motor elétrico.

Um *encoder* de quadratura é ilustrado na Figura 18, podemos ver que quando o sinal da porta A antecede o da porta B defasados de um ângulo $\alpha = 90^\circ$ a contagem do pulso se dá de forma crescente e quando o sinal do canal B antecede o sinal da porta A o pulso é contado

de forma decrescente, desta maneira é possível determinar o sentido e posição da rotação do eixo de um motor CC.

Figura 18 - Funcionamento de um encoder de quadratura.

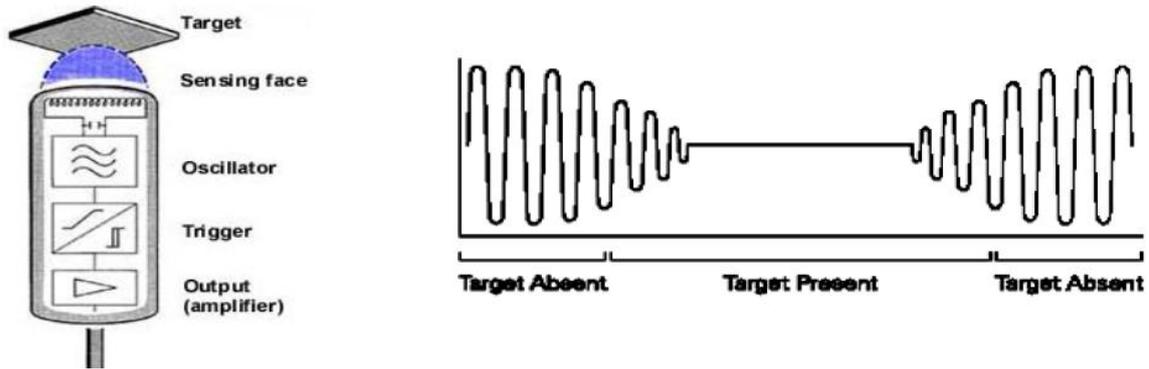


Autor: (ROCKWELL, 2000).

- **Sensores Indutivos**

Os sensores indutivos são sensores discretos de não contato, o que significa que eles não precisam estar em contato com algum objeto para que seu *status* seja alterado. Os sensores indutivos geram um campo magnético de alta frequência induzido por correntes em uma bobina e tem seu circuito NA quando não existe nenhum material dentro do raio de ação do campo magnético gerado, caso um objeto entre no campo magnético produzido pelo sensor, será gerado um rebatimento do sinal eletromagnético que por sua vez fecha o contato NA e gera um pulso binário na saída do sensor. O princípio de funcionamento de um sensor indutivo é demonstrado na Figura 19, observa-se o campo magnético gerado pelo mesmo. Estes sensores são geralmente utilizados para fazer contagem e ou posicionamento de objetos. No caso de aplicação no protótipo da ponte, estes sensores são os responsáveis por fazer a sinalização de presença de carga ou não nos quadrantes de operação.

Figura 19 - Princípio de operação de sensores indutivos.



Autor: (ROCKWELL).

3. MODELOS E EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS EM SVC PARA PONTES ROLANTES

Este capítulo trata sobre os experimentos computacionais feitos em ambiente *MATLAB & Simulink – MathWorks®*, com o intuito de levantar as equações e representação da dinâmica da ponte rolante através de sua função de transferência (FT), assim como, fazer o estudo comportamental do modelo dinâmico através da análise das respostas a entradas do tipo degrau unitário $u(t)$ e ao impulso $\delta(t)$ em malha aberta (MA) e malha fechada (MF). Também é realizado o estudo da estabilidade do sistema em MA e MF, mediante a análise do comportamento dos polos e zeros do polinômio característico no plano 'S' das FTs, para cada um dos subsistemas desacoplados da ponte rolante, segundo explicitado no *Capítulo 2, Tópico 2.1, Subtópico 2.1.1. Modelagem Matemática do Movimento da Carga no Eixo - XY, Movimento do Pórtico e Movimento do Carro*. Apresenta-se o projeto dos controladores PID para cada um dos subsistemas (X_Gama) e (Y_Beta) assim como a análise dos resultados obtidos com a aplicação destes controladores no modelo dinâmico da planta.

3.1. Análise do Comportamento Dinâmico do Sistema em MA e MF

Neste t3pico ser3o abordados os resultados e an3lises dos subsistemas $(x-\gamma)$ e $(y-\beta)$ em MA e MF, assim como o estudo da estabilidade segundo estudo do polos e r3izes dos subsistemas.

3.1.1. An3lise em Malha Aberta dos Subsistemas $(x-\gamma)$ e $(y-\beta)$

Segundo a modelagem matem3tica da ponte rolante desenvolvida no Cap3tulo 2 desta monografia, as fun33es de transfer3ncia que sintetizam a din3mica do modelo da ponte rolante s3o dadas pelas Equa33es (46). Observa-se que para as fun33es de transfer3ncia que modelam a din3mica do deslocamento do carro no eixo X, Equa33o (46) e do trilho no eixo Y, Equa33o (48) o polin3mio caracter3stico 3 de 4^a ordem. No caso das fun33es de transfer3ncia que modelam a din3mica do deslocamento dos 3ngulos γ e β , representadas pelas Equa33es (47) e (49), nota-se que o polin3mio caracter3stico 3 de 3^o ordem. Os sistemas das Figuras 20 e 21 ilustram os diagramas de blocos para an3lise dos subsistemas $(x-\gamma)$ e $(y-\beta)$ em MA.

Figura 20 - Diagrama de blocos para resposta ao degrau em MA do subsistema $(x-\gamma)$.

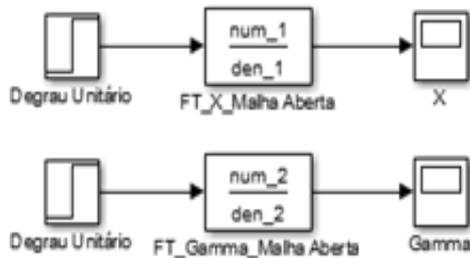
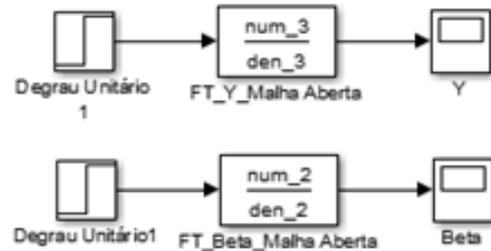


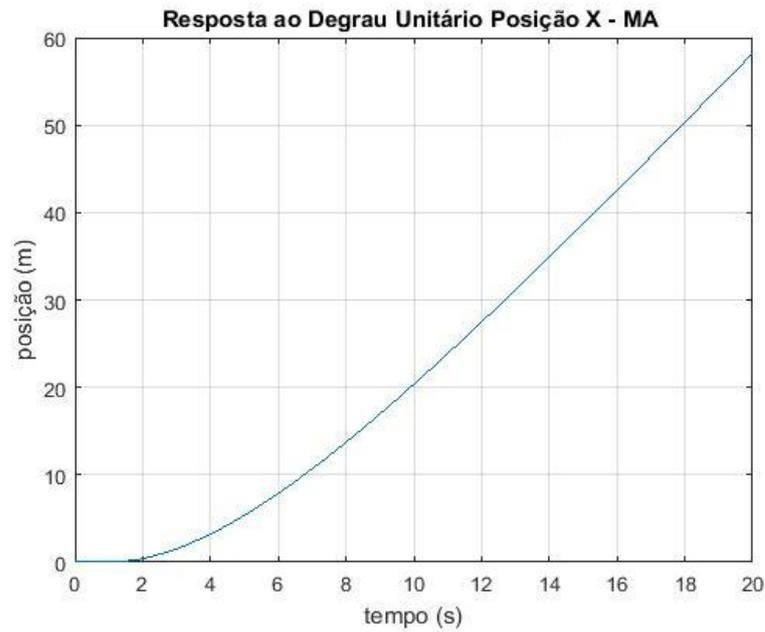
Figura 21 - Diagrama de blocos para resposta ao degrau em MA do subsistema $(y-\beta)$.



Autor: Igor Castro.

As respostas gr3ficas para o subsistema $(x-\gamma)$ s3o apresentadas nas Figuras 22 e 23 em sequ3ncia.

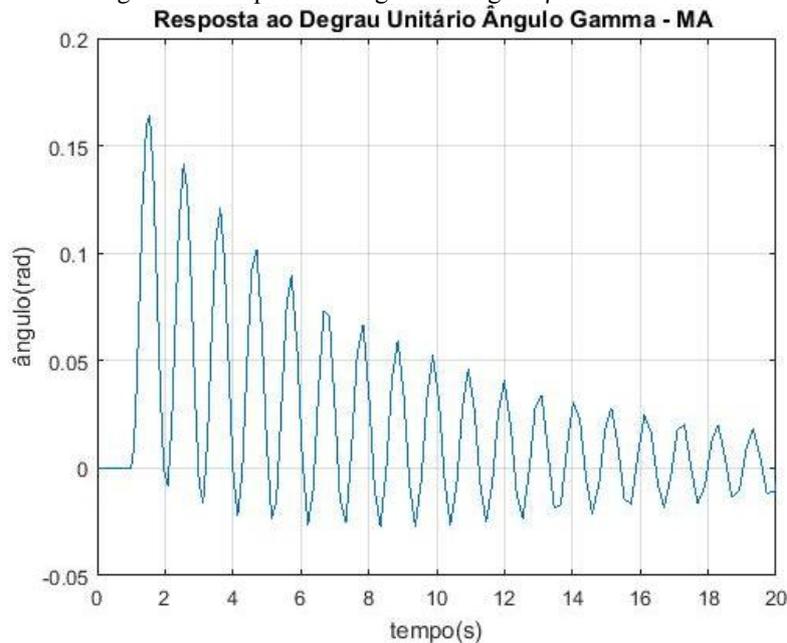
Figura 22 - Resposta ao degrau da posição X em malha aberta.



Autor: Igor Castro.

Na Figura 22 pode-se observar que, para a resposta ao degrau unitário, o deslocamento do carro no eixo X cresce indefinidamente sem conseguir atingir o ponto de operação.

Figura 23- Resposta ao degrau do ângulo γ em malha aberta.

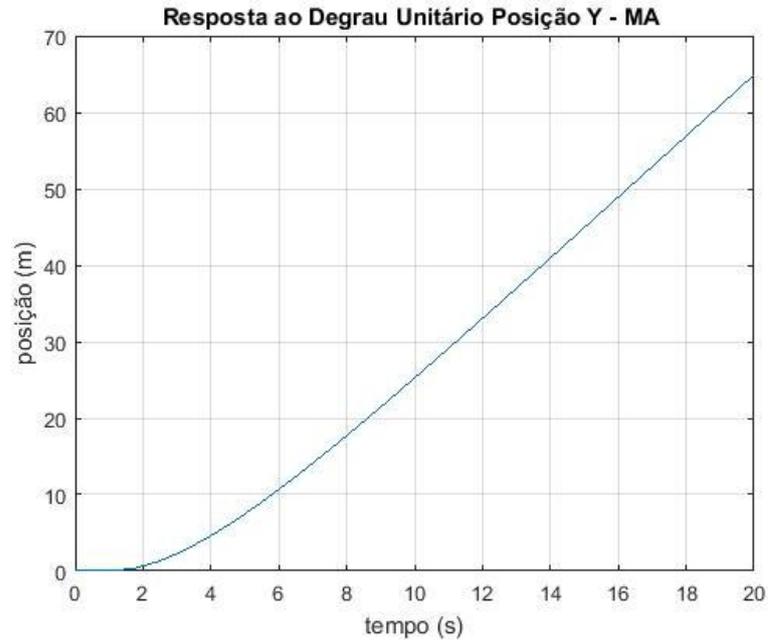


Autor: Igor Castro.

Observa-se na Figura 23 que o ângulo γ varia em torno de zero aproximadamente 0,15 rad e -0,04 rad, mas não consegue estabilizar.

A seguir as Figuras 24 e 25 demonstram as formas gráficas obtidas para a resposta a uma entrada $u(t)$ no subsistema ($y-\beta$).

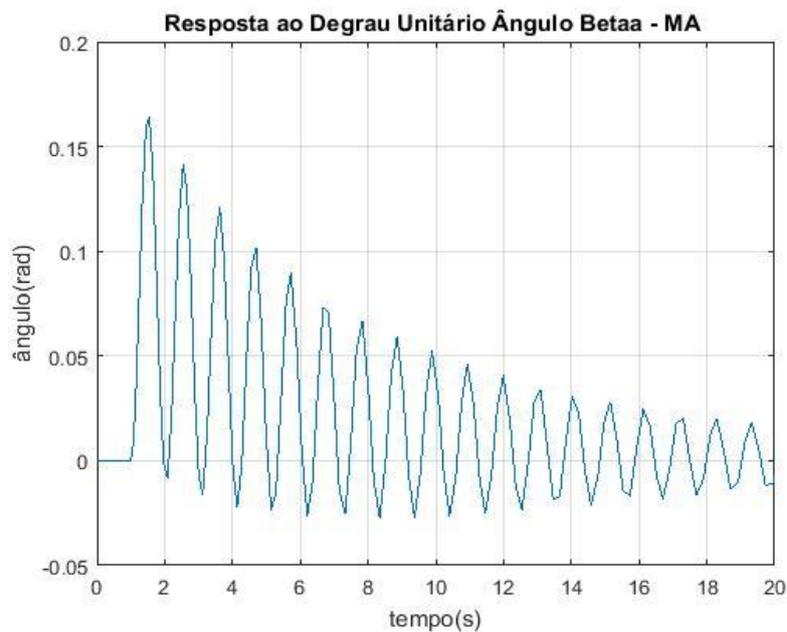
Figura 24 – Resposta ao degrau da posição Y em malha aberta.



Autor: Igor Castro.

O comportamento gráfico do deslocamento Y do trilho da ponte rolante mediante uma entrada do tipo degrau unitário apresentou um comportamento similar ao do deslocamento do carro X, onde este cresce indefinidamente e não atinge o *set point*.

Figura 25 - Resposta ao degrau do ângulo β em malha aberta.



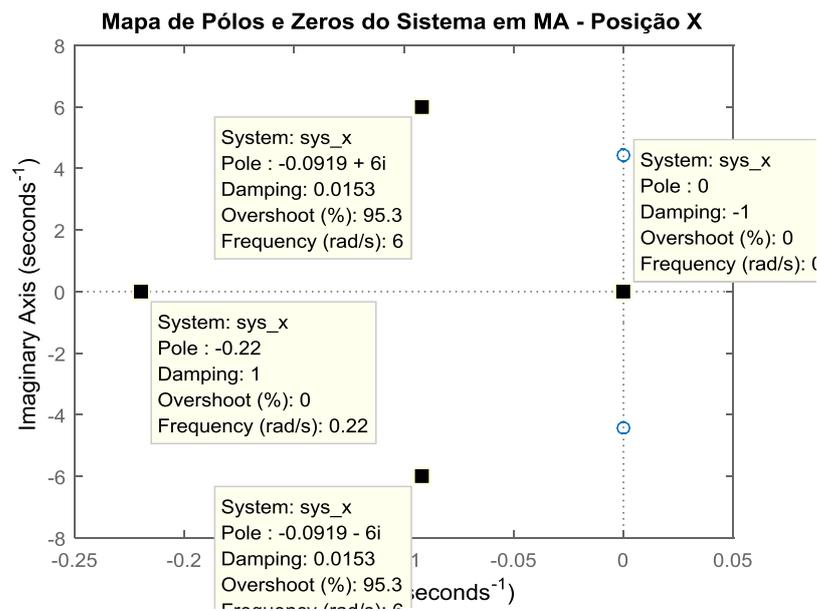
Autor: Igor Castro.

De forma análoga ao comportamento visto na Figura 23, observa-se que o ângulo β , na Figura 25, também oscila em torno de zero sem estabilizar assumindo valores aproximadamente entre 0,15 rad e -0,04 rad.

Se igualarmos o polinômio característico das funções de transferência de cada subsistema, que modelam a dinâmica da planta à zero, para obtermos suas raízes, temos como resposta os polos para cada função de cada subconjunto de equações, segundo (OGATA, 2005).

No subsistema $(x-\gamma)$ a $FT_{ul(x)}$ existem dois polos reais alocados em $p1 = 0$, $p2 = -0.2198$ e um par de polos complexos conjugados alocados em $p3 = -0.0919 + 6.0011i$ e $p4 = -0.0919 - 6.0011i$, observa-se esta situação com mais clareza no mapa de polos e zeros da $FT_{ul(x)}$ ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Mapa de polos e zeros para $FT_{ul(x)}$.



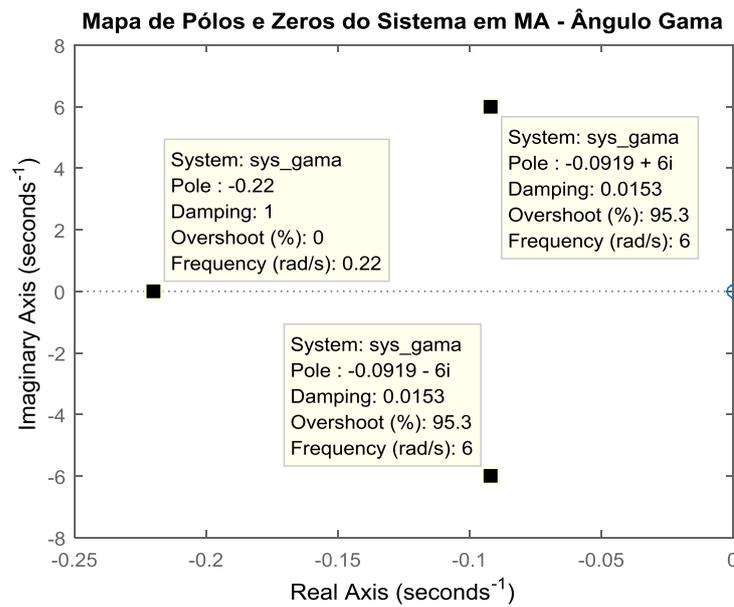
Autor; Igor Castro.

Além dos dois polos reais e um par de polos complexos conjugados, a $FT_{ul(x)}$ apresenta um par de zeros complexos conjugados alocados em $z1 = 2,06e-33 + 4,43i$ e $z2 = 2,06e-33 - 4,43i$.

Analogamente se fizermos o mesmo procedimento para a $FT_{ul(\gamma)}$ veremos que ela apresenta três polos, sendo um real alocado em $p1 = -0,22$ e um par de polos complexos conjugados alocados em $p2 = -0,0919 + 6i$ e $p3 = -0,0919 - 6i$, além de um zero posicionado em $z1 = -5,64e-17$ como observado na Figura 27.

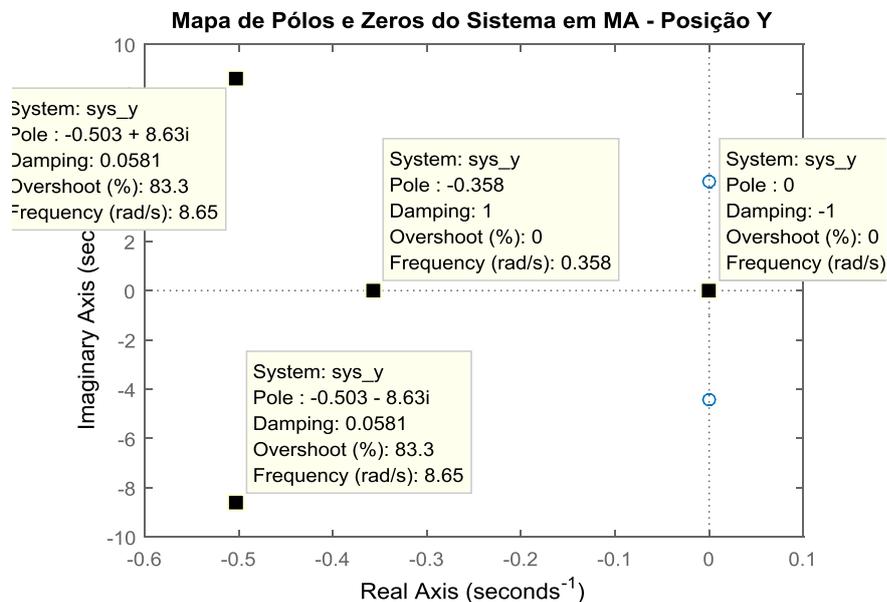
No subsistema $(y-\beta)$ a $FT_{u2(y)}$ possui 4 polos sendo dois polos alocados sobre o eixo real onde o primeiro está sobre a origem do plano 'S' em $p1 = 0$ e o segundo à esquerda do eixo imaginário em $p2 = -0,358$, os outros dois polos são complexos conjugados alocados em $p3 = -0,503 + 8,63i$ e $p4 = -0,503 - 8,63i$. A $FT_{u2(y)}$ possui ainda um par de zeros complexos conjugados alocados em $z1 = 2,09e-31 + 4,43i$ e $z2 = 2,09e-31 - 4,43i$, pode-se observar a disposição dos polos e zeros de $FT_{u2(y)}$ na Figura 28.

Figura 27 – Mapa de polos e zeros para $FT_{u1}(\gamma)$.



Autor: Igor Castro.

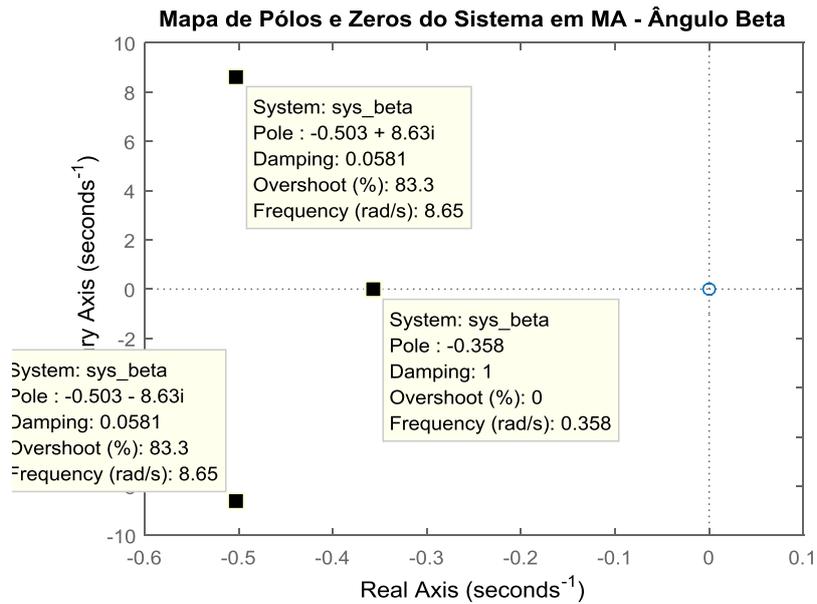
Figura 28 – Mapa de polos e zeros para $FT_{u2}(y)$.



Autor: Igor Castro.

A $FT_{u2(\beta)}$ apresenta três polos sendo um alocado sobre o eixo real no semiplano esquerdo do espaço 'S' posicionado em $p1 = -0,358$ e os outros dois são um par de polos complexos conjugados em $p2 = -0,503 + 8,63i$ e $p3 = -0,503 - 8,63i$. A $FT_{u2(\beta)}$ possui ainda um zero em $z1 = 7,08e-16$, como é visto na Figura 29.

Figura 29 - Mapa de polos e zeros para $FT_{u2(\beta)}$.

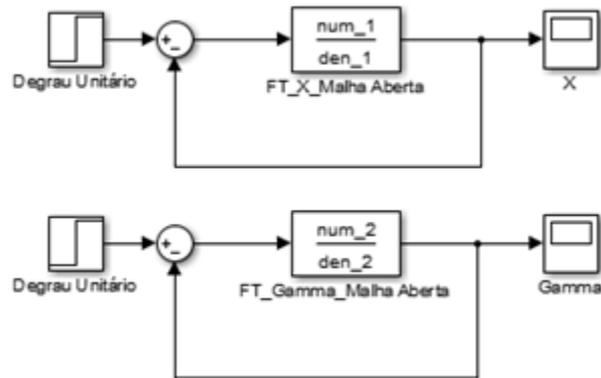


Autor: Igor Castro.

3.1.2. Análise em Malha Fechada dos Subsistemas $(x-\gamma)$ e $(y-\beta)$

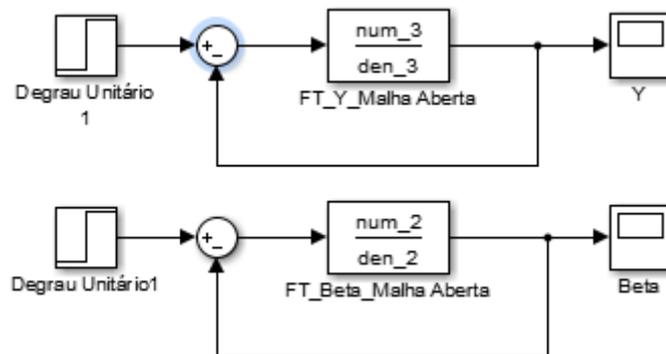
Agora é feita a análise do comportamento dos subproblemas $(x-\gamma)$ e $(y-\beta)$ quando a malha com uma realimentação unitária e aplica-se uma entrada de referência $u(t)$ a cada uma das funções de transferência do sistema. Para isso é feito um esquema tal qual o descrito nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 – Diagrama de blocos para resposta ao degrau em MF do subsistema (x,y).



Autor: Igor Castro.

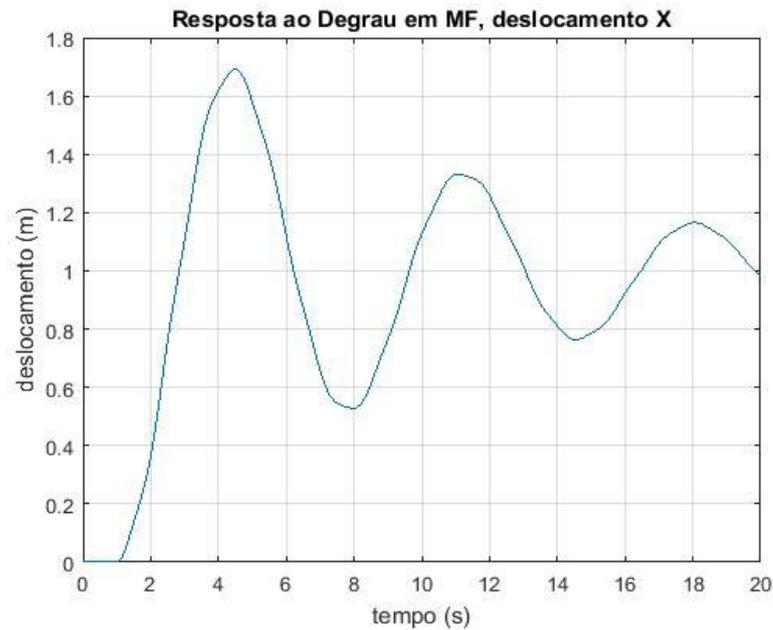
Figura 31 - Diagrama de blocos para resposta ao degrau em MA do subsistema (y,β).



Autor: Igor Castro.

As formas de onda obtidas para os sistemas demonstrados nas Figura 30 e Figura 31 são apresentados a seguir nas Figuras 32 a 35.

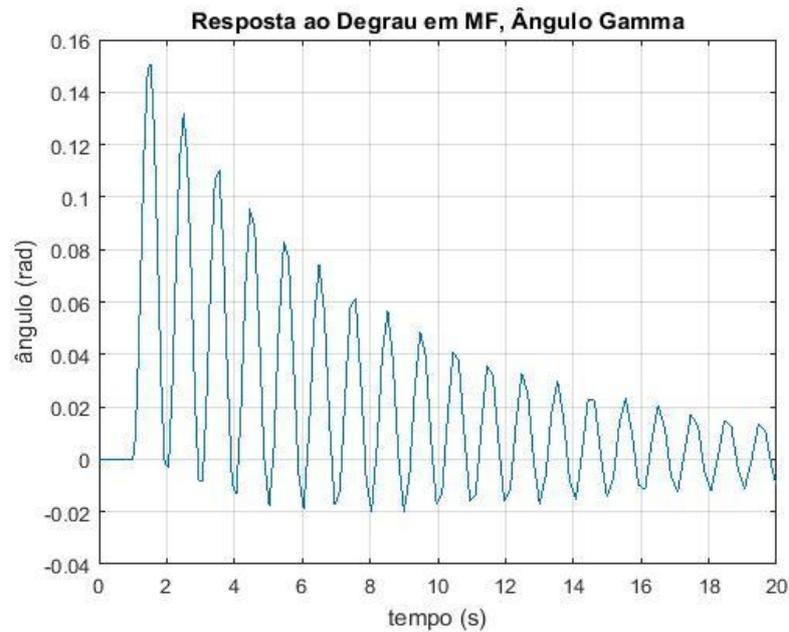
Figura 32 - Resposta ao degrau da posição X em malha fechada.



Autor: Igor Castro.

Pode-se observar na Figura 32 que, para o deslocamento X do carro no tempo, fechando-se a malha com uma realimentação unitária, o sistema tentou atingir o *setpoint*. Apesar de não ter conseguido grampear o ponto de operação, esta resposta já se mostrou mais satisfatória e mais próxima de uma resposta estável do que o que vimos na resposta em MA da Figura 22.

Como se viu, os subsistemas ($x-\gamma$) e ($y-\beta$) apresentam respostas similares quanto ao comportamento do deslocamento em XY e quanto à variação dos ângulos (γ e β), por isto, com a finalidade de não ser redundante será observado apenas o comportamento do subproblema ($x-\gamma$).

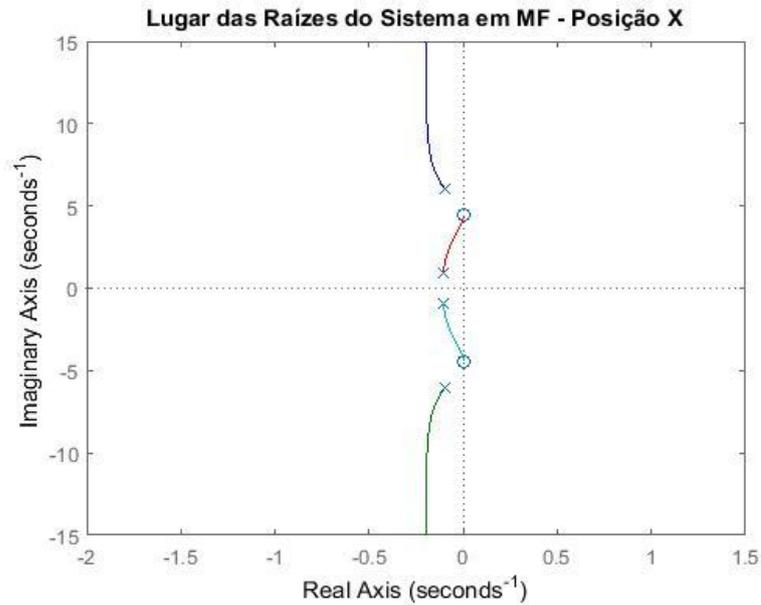
Figura 33 - Resposta ao degrau do ângulo γ em malha fechada.

Autor: Igor Castro.

A resposta do ângulo γ na Figura 33 apresentou uma melhoria quanto a amplitude de variação do ângulo ($\Delta\gamma$) em relação ao visto na análise em MA na Figura 23, contudo ainda não conseguiu chegar à estabilidade e ainda apresenta uma oscilação em torno de zero.

A Figura 34 mostra o lugar geométrico das raízes da $FT_{u1(x)}$, onde pode-se observar que existem dois pares de polos complexos conjugados alocados em $p1 = -0,105 + 0,923i$, $p2 = -0,105 - 0,923i$, $p3 = -0,0964 + 6,06i$ e $p4 = -0,0964 - 6,06i$. É possível observar a presença de um par de zeros complexos conjugados em $z1 = 2,06e-33 + 4,43i$ e $z2 = 2,06e-33 - 4,43i$. Se o ganho Kp for aumentado significativamente em $FT_{u1(x)}$, os polos $p1$ e $p2$ tendem a ir para o semi plano direito do plano 'S' levando assim o sistema à instabilidade.

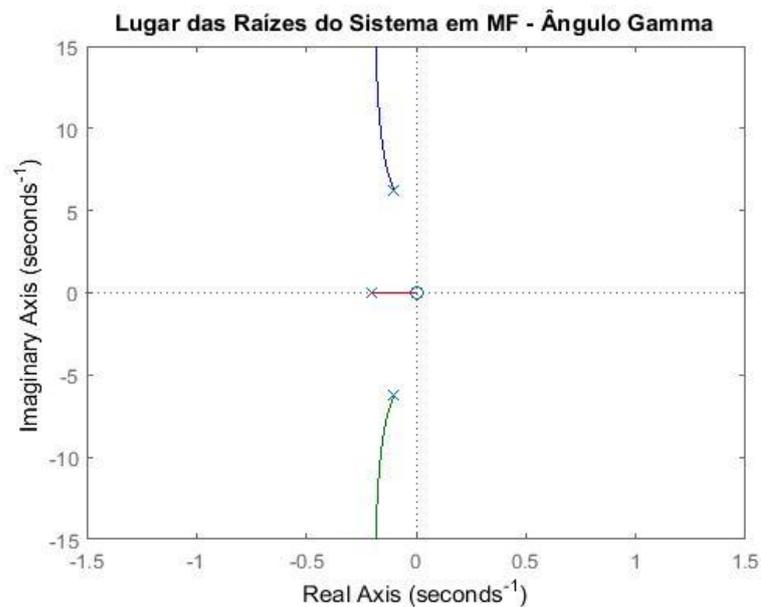
Figura 34 – Lugar geométrico das raízes deslocamento X em MF.



Autor: Igor Castro.

A Figura 35 mostra o lugar geométrico das raízes de $FT_{ul(\gamma)}$ e observa-se que existem três polos, sendo um real em $p1 = -0,202$ e um par de polos complexos conjugados em $p2 = -0,101 + 6,26i$ e $p3 = -0,101 - 6,26i$, existe também um zero em $z1 = -5,64e-17$. Com o aumento do ganho proporcional o polo $p1$ se aproxima de zero e deixa o sistema marginalmente estável enquanto que os polos $p2$ e $p3$ tendem ao infinito com o aumento do ganho proporcional.

Figura 35 - Lugar geométrico das raízes ângulo γ em MF.



Autor: Igor Castro.

3.2. Projeto e Análise dos Controladores PID

Com a modelagem matemática desenvolvida no Capítulo 2, Tópico 2.1, Subtópico 2.1.3 - Equações do Movimento no Plano – XY, onde são definidas as funções de transferência $FT_{u1(x)}$, $FT_{u1(\gamma)}$, $FT_{u2(y)}$ e $FT_{u2(\beta)}$ dadas pelas Eq. (46) a (49), torna-se possível fazer o projeto de controladores PID baseados em SVC, comentados anteriormente no Capítulo 2, Tópico 2.4 - Sistemas a Variáveis Contínuas (SVC) & Sistemas a Eventos Discretos (SED), para fazer o controle do deslocamento efetivo do carro e trilho no plano XY e da variação do ângulo do pêndulo durante o deslocamento da ponte rolante ($\Delta\gamma$, $\Delta\beta$).

Para isto é necessário se fazer algumas considerações a fim de definir os parâmetros de projeto, que são listados na seguinte ordem:

- O comprimento do cabo de sustentação da carga de comprimento l permanece fixo durante toda a trajetória de deslocamento da carga, assim não será necessário projetar um controlador para o movimento estabelecido no eixo Z;
- A velocidade escalar de deslocamento do carro e do trilho deve ser diretamente medidas, assim como, a variação angular $\Delta\gamma$ e $\Delta\beta$;
- O sistema é basicamente modelado por duas dinâmicas, como foi mostrado no Capítulo 2, uma é a dinâmica do subsistema (x- γ) e a outra do subsistema (y- β);
- Como se trata de um sistema desacoplado, como se constata nas Equações (24) e (25), onde os dois subsistemas tem comportamento análogo, se irá analisar apenas o comportamento do controlador projetado para o subsistema (x- γ);
- O módulo da variação angular $|\Delta\gamma|$ e $|\Delta\beta|$ devem ser no máximo de 10 graus ou 0,174533 radianos;
- O *Overshoot* não deve ser superior a 20%, o tempo de acomodação não deve ser superior a 10 segundos e o esforço de controle do sistema controlado deve obedecer a uma saturação de $\pm 12 V_{cc}$, devido ao limite de tensão de operação dos motores CC.

O sistema mostrado nas Equações (24) a (27) nos mostram que o modelo matemático da ponte rolante para o movimento no plano XY é do tipo Múltiplas Entradas & Múltiplas Saídas do inglês *Multiple Inputs & Multiple Outputs (MIMO)*, contudo o sistema é desacoplado, como demonstram as Equações (40) a (43) do Capítulo 2, portanto o sistema MIMO se transforma em dois subsistemas, (x- γ) e (y- β), do tipo Única Entrada & Múltiplas Saídas do inglês *Single Input & Multiple Outputs (SIMO)*.

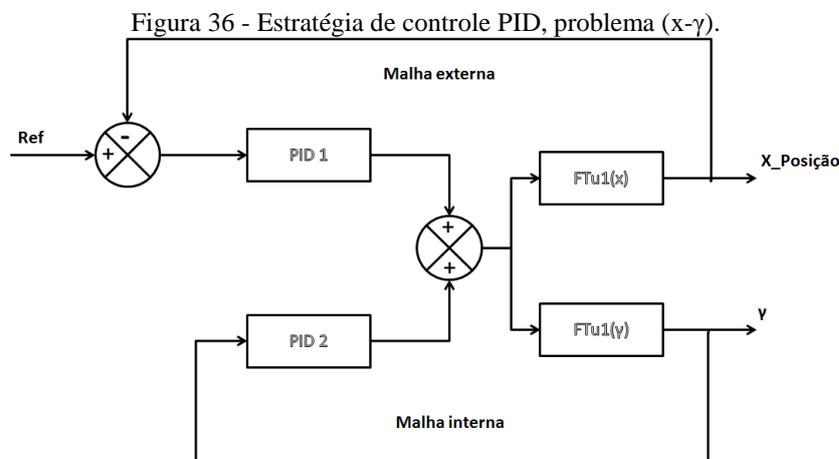
Segundo (EUZÉBIO, 2011), o projeto de controladores PID para sistemas multivariáveis é bem mais complexo devido à interação existente entre as diversas malhas de

controle, dificultando a sintonia destes por métodos tradicionais como *Ziegler-Nichols*, portanto técnicas de Controle Multivariável são mais apropriadas para o projeto de controladores PID para sistemas do tipo MIMO e SIMO.

Este trabalho não aborda a teoria de sintonia ótima de controladores PID, portanto é esperado que os resultados obtidos no projeto dos controladores para os subsistemas $(x-\gamma)$ e $(y-\beta)$ não sejam ótimos, contudo espera-se encontrar uma solução aceitável e que contemple as prerrogativas de projeto.

Como já foi demonstrado anteriormente nas análises de Malha Aberta (MA) e Malha Fechada (MF) no Tópico 3.1 do Capítulo 3 e, os subsistemas $(x-\gamma)$ e $(y-\beta)$ apresentam, devido ao desacoplamento, comportamento similares, por isto, será feita apenas o projeto e análise do controlador PID para o problema $(x-\gamma)$.

A estratégia de controle adotada é mostrada na Figura 36 e consiste na aplicação de dois controladores PID, o primeiro para a malha externa que é realimentada com o deslocamento no eixo X e o segundo para a malha interna realimentada pelo valor instantâneo do ângulo γ , (COSTA, 2010).

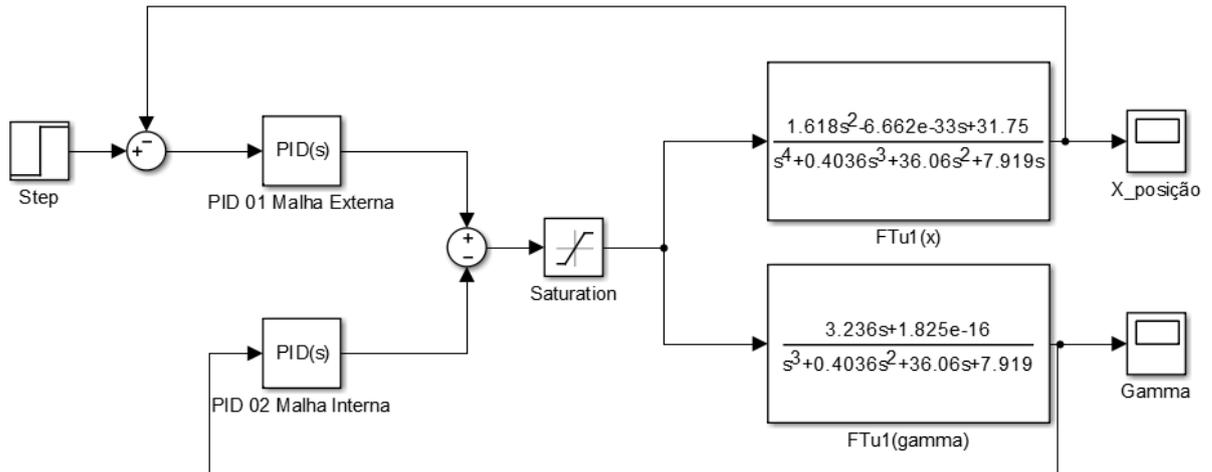


Autor: Igor Castro.

Os valores dos ganhos K_p , K_i e K_d , foram obtidos empiricamente por meio da função “*pidTuner*” no *MATLAB & Simulink – MathWorks® 2015*. Esta função aplica os métodos de sintonia trabalhados no Capítulo 2, Tópico 2.3 – Controlador de Três Termos Contínuo (PID/SVC). A função “*pidTuner*” sintoniza o PID com base no métodos de Ziegler-Nichols, desta forma obtêm-se os seguintes ganhos para o PID 1, sendo $K_p = 0.1688$, $K_i = 0.0023$ e $K_d = 2.8791$. Para o PID 2 temos os ganhos iguais a, $K_p = 20.1688$, $K_i = 0$ e $K_d = 0$.

O diagrama de blocos do subsistema ($x-\gamma$) com seus respectivos controladores são mostrados na Figura 37, uma saturação de $\pm 12 V_{cc}$ foi adicionada ao sistema para simular o limite de operação dos motores CC.

Figura 37 - Diagrama de blocos dos controladores do subsistema ($x-\gamma$), com saturação de $\pm 12 V_{cc}$.

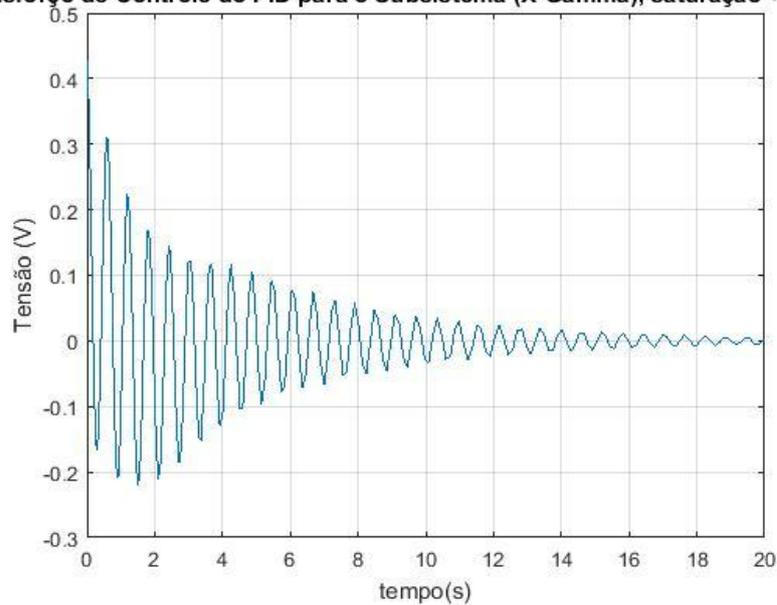


Autor: Igor Castro.

É mostrado nas Figuras 38 a 40 as respostas do sistema controlado mediante a uma entrada degrau de 10 cm de referência.

Figura 38 - Esforço de controle do controlador PID para o subsistema ($X-\gamma$), saturação de $\pm 12 V_{cc}$.

Esforço de Controle do PID para o Subsistema (X-Gamma), saturação $\pm 12 V_{cc}$



Autor: Igor Castro.

Pode-se notar na Figura 38 que, o esforço de controle para levar o sistema ao *setpoint* é pequeno, onde o maior esforço sobre o atuador do subsistema abordado é de

aproximadamente 0,4V para levar o sistema a um deslocamento de 0,1m em X e uma amplitude do ângulo $\Delta\gamma$ que tende para zero em aproximadamente 9 segundos.

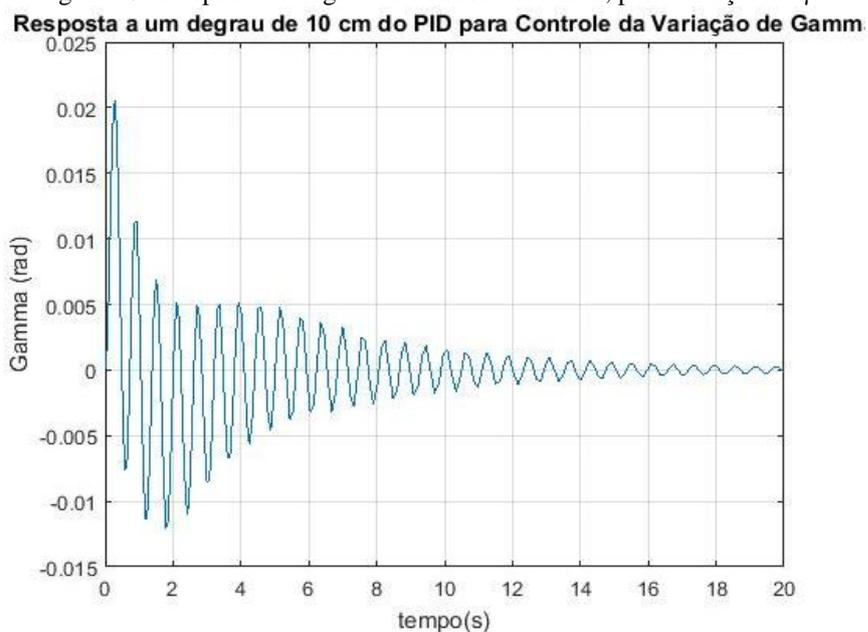
Figura 39 - Resposta ao degrau de 10 cm do PID 1, deslocamento em X.



Autor: Igor Castro.

Pode-se observar na Figura 39, que o deslocamento do carro em X se estabiliza com aproximadamente 9 segundos e apresenta um *Overshoot* inferior a 20%. O carro no eixo X tende a ficar num movimento de acelerar e desacelerar com pequenas variações que geram pequenos deslocamentos de aproximadamente 0,02m.

Figura 40 - Resposta ao degrau do controlador PID 2, para variação de γ .



Autor: Igor Castro.

Observa-se na Figura 40 que o ângulo não consegue estabilizar em zero, mas fica bem próximo disto, devido a presença de um polo muito próximo à origem do plano 'S' como foi visto na Figura 35, o que leva a instabilidade marginal do sistema e dificulta a ação integral do controlador, na correção do erro em regime permanente. O ângulo gama varia entre 0,02 a -0,012rad, ou seja, 1,15° a -0,68° aproximadamente, o que nos garante uma boa margem dentro da variação de ± 10 graus estimado em projeto.

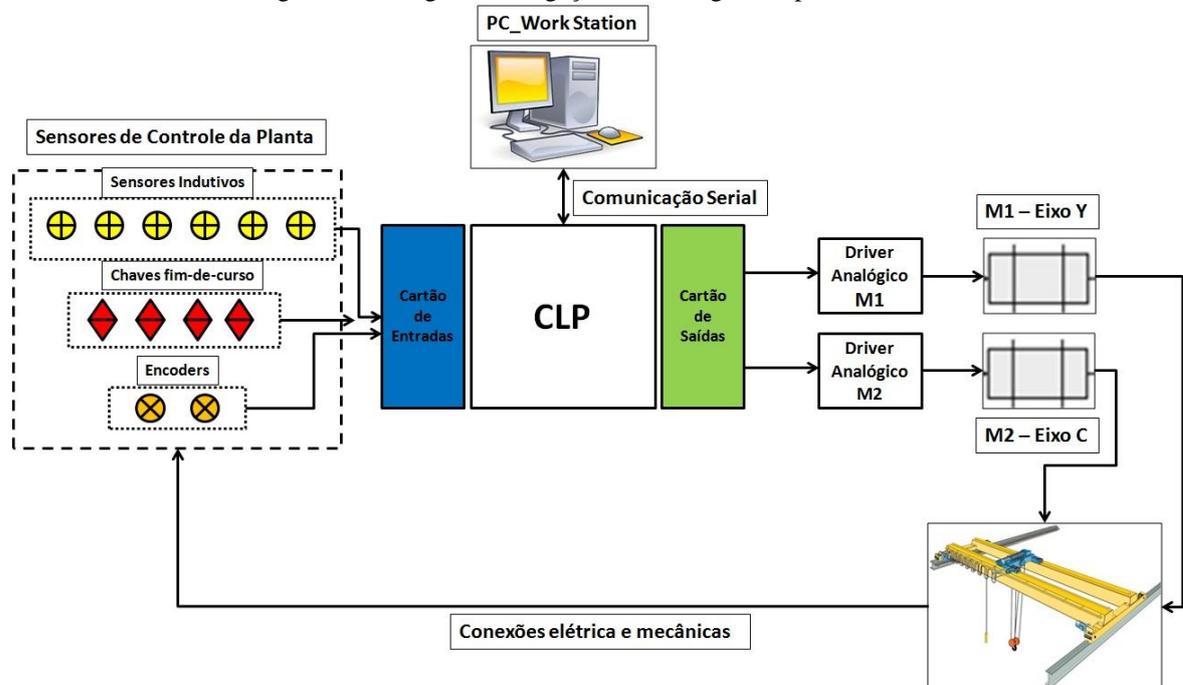
3.3. Comentários

De posse das equações que regem o modelo linear do sistema de ponte rolante desenvolvido, projetou-se um controlador clássico por PID, cujo projeto e resultados foram discutidos ao longo deste capítulo. Como parâmetros de projeto, foi estimado um valor de *Overshoot* inferior a 20%, uma variação dos ângulos $\Delta\gamma$ e $\Delta\beta$ de no máximo ± 10 graus ou aproximadamente $\pm 0,175$ radianos e uma saturação de $\pm 12 V_{cc}$ com um tempo de acomodação menor ou igual a 10 segundos. Apesar das dificuldades de projetar e principalmente sintonizar controladores PID clássicos para sistemas multivariáveis (MIMO ou SIMO), tal como relatado por (EUZÉBIO, 2011) em seu trabalho, o controlador desenvolvido apresentou respostas satisfatórias com um *Overshoot* inferior aos 20% determinado e um tempo de acomodação inferior a 10 segundos, para atingir o ponto de operação, como observar-se na Figura 39. O ângulo γ variou dentro do limite determinado em projeto, apresentando uma variação entre 0,02 a -0,012rad, ou seja, 1,15° a -0,68°, observado na Figura 40.

4. PROJETO DO MODELO EM ESCALA REDUZIDA DA PONTE ROLANTE AUTOMATIZADA

A ponte rolante deste trabalho foi desenvolvida pelo Laboratório de Sistemas Embarcados e Controle Inteligente (LABSECI) da Universidade Federal do Maranhão, contando com o apoio e ajuda do Laboratório de Mecânica Automotiva e Projetos Mecânicos do Instituto Federal do Maranhão (IFMA) que colaborou na construção da estrutura física e mecânica da ponte. A Figura 41 mostra um esquema simplificado de como estão interligados os elementos que compõe o sistema.

Figura 41 – Diagrama de ligações e montagem da ponte rolante.

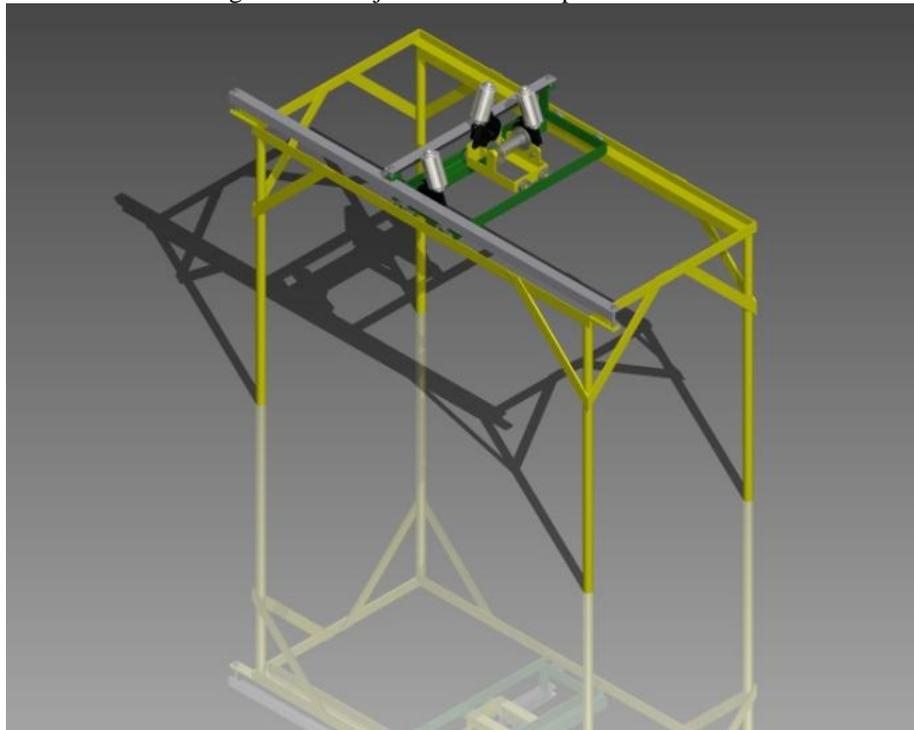


Autor: Igor Castro.

4.1. Estrutura Física da Ponte

A ponte rolante foi concebida segundo projeto feito no software *SOLIDWORKS*® 2014, tal qual mostrado na Figura 42 abaixo.

Figura 42 – Projeto estrutural da ponte rolante.



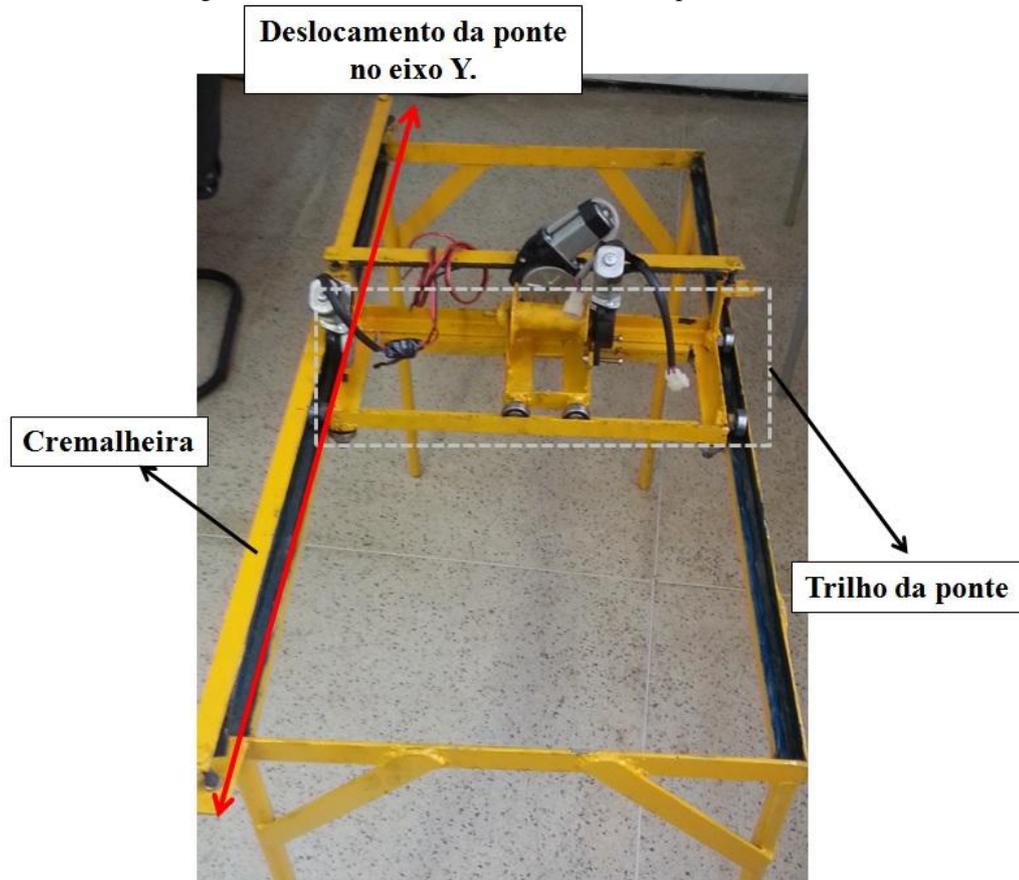
Autor: Igor Castro.

A estrutura da ponte é feita em ferro com uma dimensão de aproximadamente 50 cm de largura, 100 cm de comprimento e 70 cm de altura. O movimento da ponte nos eixos X e Y é realizado por motores CC, que serão detalhados mais à frente neste *Capítulo 4, Sessão 4.4 - Motores CC, Atuadores da Planta*.

- *Trilho da ponte rolante*

O trilho da ponte ilustrado na Figura 43 foi feito de ferro e tem formato retangular com aproximadamente 20 cm de largura e 45 cm de comprimento, com um motor CC acoplado em um dos lados da estrutura, que por sua vez, é acoplado a uma haste guia de aproximadamente 110 cm de comprimento com uma cremalheira de borracha que permite o movimento do trilho no eixo Y através da transferência de torque do motor para o pião em contato com a cremalheira.

Figura 43 – Detalhe do trilho e movimento da ponte no eixo Y.

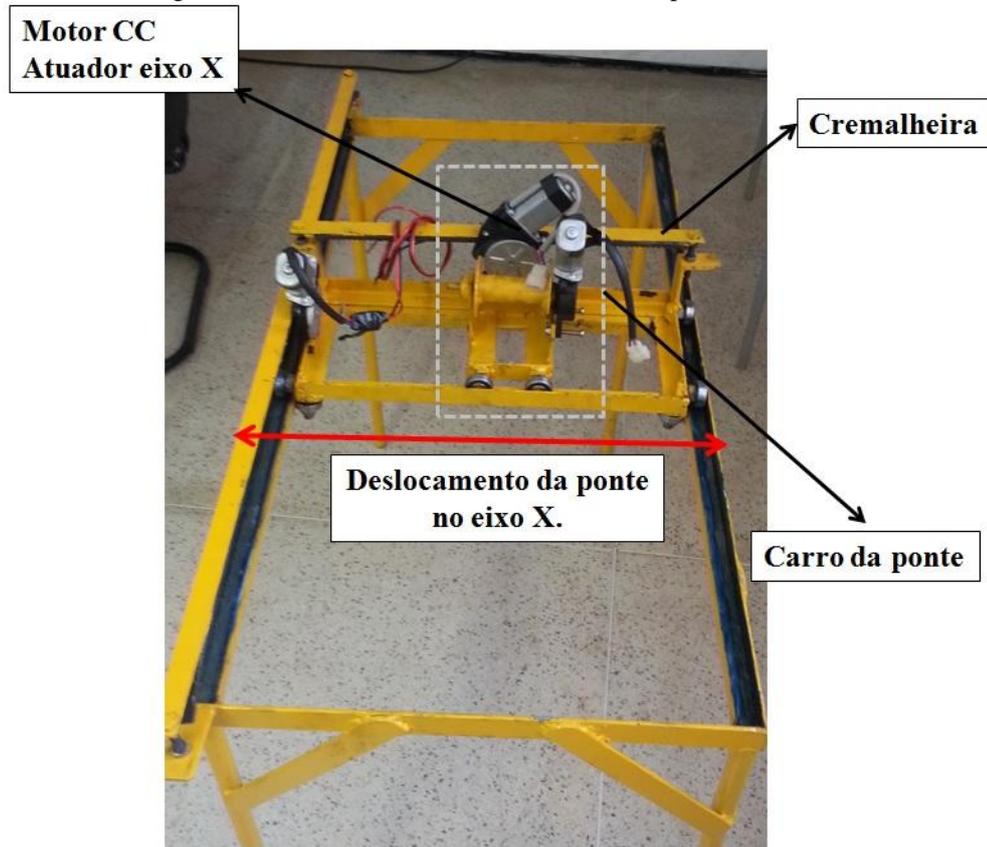


Autor: Igor Castro.

- *Carro da ponte rolante*

O carro também feito de ferro tem formato retangular com aproximadamente 10 cm de largura e 12 cm de comprimento, de maneira similar ao trilho, possuindo um motor acoplado em um dos lados da estrutura conectando-se a uma haste guia de aproximadamente 50 cm de comprimento com uma cremalheira de borracha que permite o movimento do carro no eixo X através da rotação do pião do motor. A Figura 44 ilustra em detalhes os elementos do carro e sua disposição espacial no sistema.

Figura 44 – Detalhe do carro e deslocamento da ponte no eixo X.

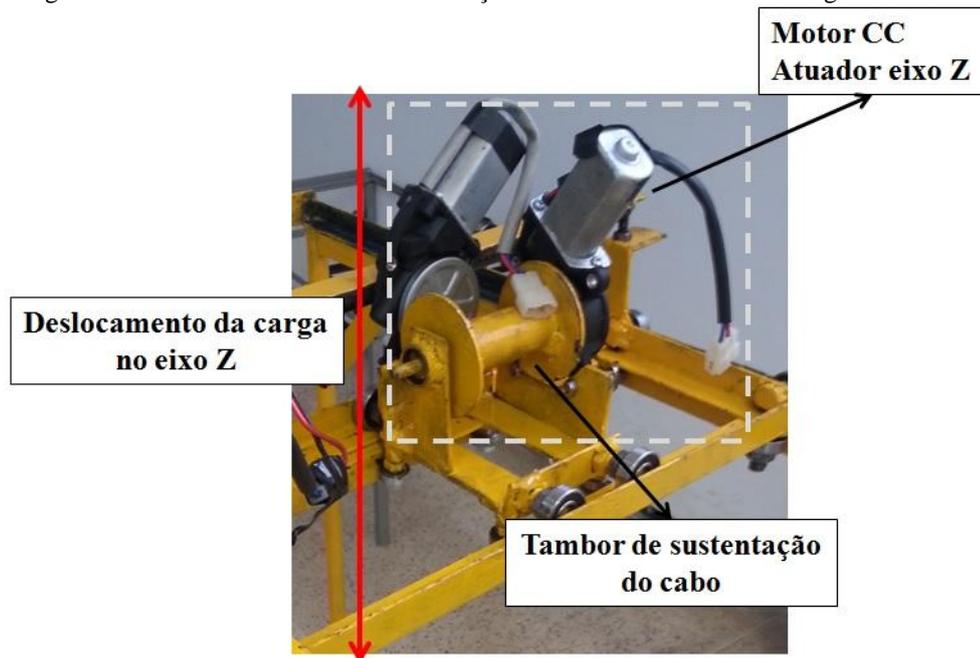


Autor: Igor Castro.

- *Tambor de sustentação do cabo*

O tambor de sustentação do cabo de suspensão da carga tem seu eixo diretamente acoplado ao eixo de um motor CC que faz o trabalho de subir e descer a carga no eixo Z, como se pode observar na Figura 45. Este trabalho não se preocupou em fazer o controle do acionamento deste subsistema, pois nas considerações iniciais do problema, para fins de modelagem matemática do sistema, descrito no *Capítulo 2, Sessão 2.1 e Subsessão 2.1.1. Modelagem Matemática do Movimento no Eixo - XY, Movimento do Pórtico e Movimento do Carro*, considerou-se o comprimento (l) do cabo de suspensão da carga, fixo.

Figura 45 – Detalhe do tambor de sustentação do cabo e movimento da carga no eixo Z.



Autor: Igor Castro.

As rodas, tanto do trilho quanto do carro, são um conjunto de quatro rolamentos de aproximadamente 3 cm de diâmetro. Pode ser visto nas Figura 46 a Figura 49 o processo de fabricação das peças e da montagem da estrutura da ponte rolante desenvolvida neste trabalho.

Figura 46 – Estrutura de ferro do trilho e carro em detalhe.



Figura 47 – Estrutura em ferro da ponte.



Figura 48 – Estrutura da ponte rolante finalizada.



Figura 49 – Detalhe do conjunto trilho, carro e tambor, com o motor de acionamento.



Autor: Igor Castro.

4.2. Computador, Interface de Comunicação com CLP

Para ser feita a interface de programação e comunicação com o CLP foi utilizado um PC com processador AMD Athlon™ II X3 445 Processor 3,10GHz, com 4GB de memória RAM, Sistema Operacional (SO) *Windows 7 Professional 64Bits*. Foi utilizada a porta serial da placa mãe para fazer a comunicação com o CLP, além disso foi utilizado o software *RSLogix 500* da *Rockwell*©, programa de 32Bits para confecção de lógica *Ladder* compatível com processadores SLC 500 e toda família *Micrologix*.

4.3. CLP Micrologix 1200 Rockwell

O controle dos comandos de acionamento automático da ponte rolante, foi utilizado o CLP *MicroLogix™ 1200 1762-L24BWA* da *Rockwell* ©, ilustrado na Figura 50, com 14 (quatorze) entradas digitais (24 Vcc) e 10 (dez) saídas digitais tipo relé (24 Vcc), com possibilidade de expansão de até 6 (seis) cartões de Entradas e Saídas (E/S) digitais e analógicas a depender da demanda de corrente de cada cartão. Este CLP tem sua CPU e suas E/S alimentadas por uma fonte de tensão regulada de 24 Vcc, utiliza-se um cartão de expansão de E/S analógica e digital 1762-IF20F2 de oito posições sendo quatro entradas e quatro saídas, para conexão dos *drivers* amplificadores de controle analógico dos motores atuadores da ponte rolante, como pode ser visto na Figura 51. Maiores informações sobre o

tipo de endereçamento e configuração de hardware e software do *MicroLogix™ 1200* podem ser encontrados no *APÊNDICE A – Configurações de Hardware e Endereçamento do MicroLogix™ 1200* ou no manual de *Controladores Programáveis MicroLogix™ 1200 e MicroLogix 1500, 1762-RM001C-PT-P, de setembro de 2000.*

Figura 50 – MicroLogix™ 1200.

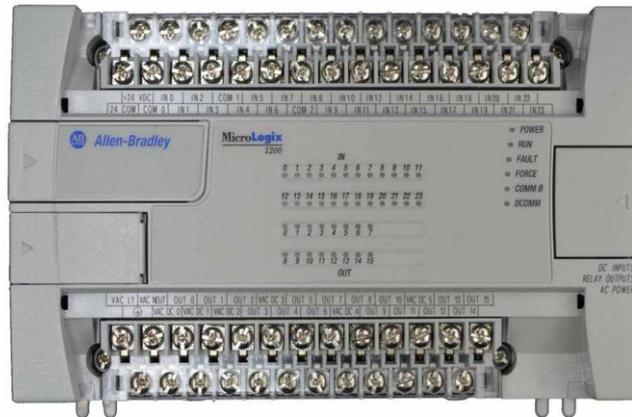


Figura 51 – Módulo de expansão de I/O analógica 1762-IF20F2.



Foram utilizadas as portas (I:0/0) e (I:0/1) do cartão de entrada digital do CLP para conectar os *encoders* que fazem o sensoriamento da posição do trilho no eixo Y e do carro no eixo X. Estas portas são portas de alta velocidade e foram configuradas através da função HSC (*High Speed Channel*) com um período de amostragem de $25 \mu\text{s}$, para que a contagem dos pulsos do *encoder* pudesse ser lida corretamente. Maiores informações sobre as configurações desta função HSC estão no *APÊNDICE B – Configuração do High Speed Channel* no final deste trabalho.

4.4. Motores CC, Atuadores da Planta

Os atuadores utilizados para executar os movimentos da ponte rolante são motores CC da *Mabuchi*, engrenagem com oito dentes 12 V, corrente nominal de 6 A e conjugado de 16,9 N.m, mostrado na Figura 52. Os dados deste motor são mostrados, em detalhes, no *Datasheet motor CC de 12 V*, referenciado no final deste trabalho.

Tanto o movimento do carro no eixo X quanto do trilho no eixo Y são executados por motores iguais de 16,9 N.m de torque e de 10,2 W de potência com corrente nominal de 6 A e velocidade mecânica nominal de 98 rpm. A relação de transformação entre o eixo do motor e a caixa de engrenagens é de $N = 73:1$, ou seja, o eixo do motor gira 73 (setenta e três) voltas para que o pinhão dê uma volta.

No eixo X quanto no eixo Y o pião de oito dentes está diretamente acoplado a uma cremalheira de borracha como vemos na Figura 49, o que significa que o movimento do carro e trilho é diretamente proporcional à rotação do pião dos motores.

Figura 52 – Motor CC, atuador do movimento nos eixos X e Y.



Autor: Igor Castro.

4.5. Sensores de Posição e Acionamento da Ponte Rolante

Foram utilizados basicamente dois tipos de sensores, um para fazer a tarefa de posicionamento escalar do trilho e carro da ponte rolante nos quadrantes, o outro para sinalizar a presença de objeto (carga) em um dos seis quadrantes de operação da ponte. Mais

detalhes sobre os quadrantes de operação da ponte rolante serão dados no *Capítulo 5. Validação do Modelo e Experimentos em Hardware*.

4.5.1. Sensores de Posicionamento do Trilho e Carro da Ponte Rolante

Para fazer o sensoriamento da posição escalar no conjunto carro e trilho no plano XY, foram utilizados *encoders* do tipo *ROTARY LPD3806 – 60BM – G5 – 24C*, de 24 Vcc e 20 KHz de frequência de amostragem, com resolução de 400 pulsos/revolução, este equipamento é mostrado na Figura 53. Maiores informações sobre este equipamento podem ser encontrados no *Datasheet do Encoder*, no final deste trabalho.

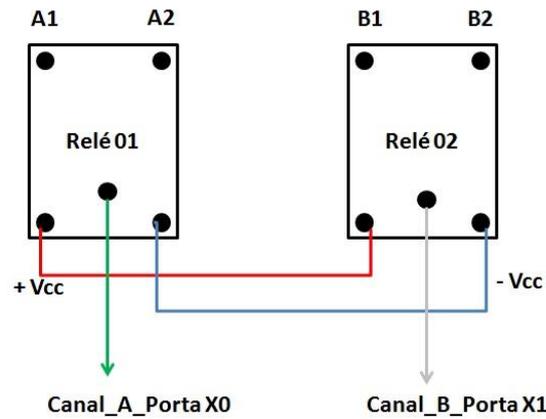
Figura 53 – Encoder, sensor de posição escalar do conjunto carro e trilho da ponte rolante.



Autor: <http://www.minikits.com.au/ENC-360-6>

Os *encoders* são conectados às portas (I:0/0) e (I:0/1) do cartão de entrada do CLP como foi descrito na Sessão 4.3 deste capítulo. Porém o *MicroLogix 1200™* só possui duas portas de alta velocidade (*HSC*), então fez-se necessário a utilização de um circuito de chaveamento por relés, para que fosse possível comutar as portas de alta velocidade X0 e X1, entre os *encoders* dos eixos X e Y, de maneira a possibilitar a leitura correta e o posicionamento adequado tanto do carro quanto do trilho. O esquema elétrico deste circuito é mostrado na Figura 54.

Figura 54 – Circuito de comutação dos *encoders* do eixo X e Y.



Autor: Igor Castro.

4.5.2. Sensores de Rastreamento de Carga nos Quadrantes da Ponte Rolante

Para fazer o sensoriamento e rastreamento da presença de cargas nos quadrantes de operação da ponte rolante, foram utilizados sensores indutivos do tipo *LJ12A3-4-Z/BX NPN*, de 6 – 36 *Vcc*, 300 *mA* e distância de detecção de aproximadamente 4 *mm*, o sensor é ilustrado na Figura 55. Maiores informações sobre este equipamento poderão ser acessadas no *Datasheet do Sensor Indutivo*.

Figura 55 – Sensor indutivo de rastreamento da condição da carga nos quadrantes de operação da ponte rolante.



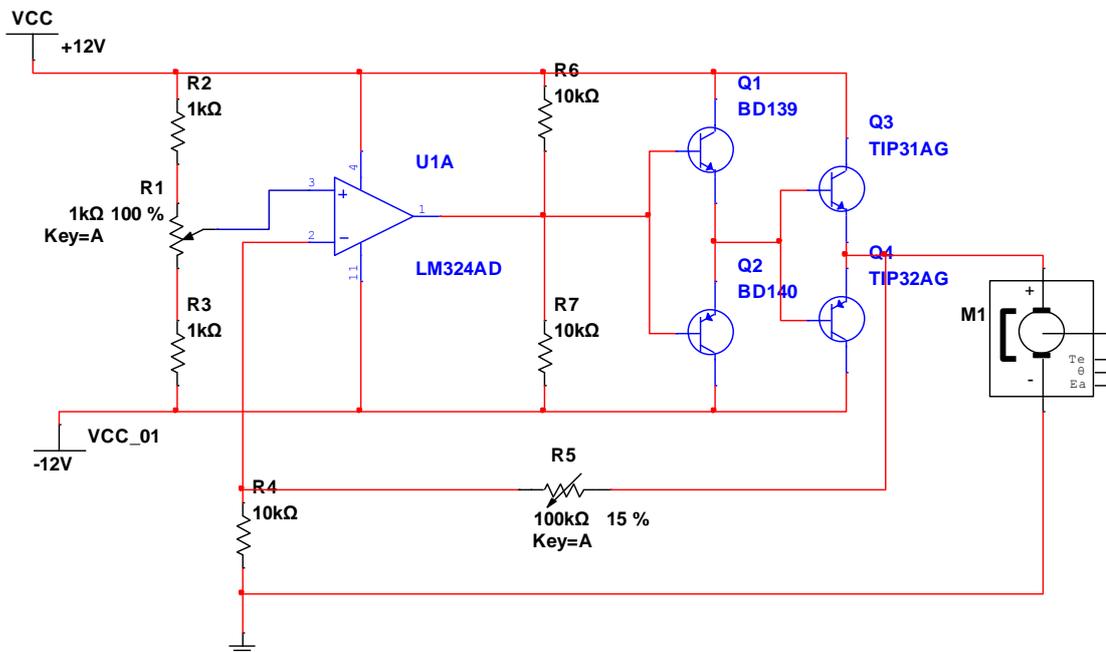
Autor: <https://3dlab.com.br/produto/sensor-indutivo-lj12a3-4-zbx/>

Estes sensores são do tipo NA e quando não possuem nenhum objeto detectável próximo de sua área de ação enviam um sinal digital em nível lógico baixo, quando um objeto é aproximado de sua área de atuação o contato se fecha e o sensor passa a enviar um sinal digital de nível lógico alto para o controlador. Desta forma é possível detectar a presença de um objeto (carga) em um dos seis quadrantes de operação da ponte rolante.

4.6. Circuito Amplificador de Tensão, Controlador Analógico dos Motores

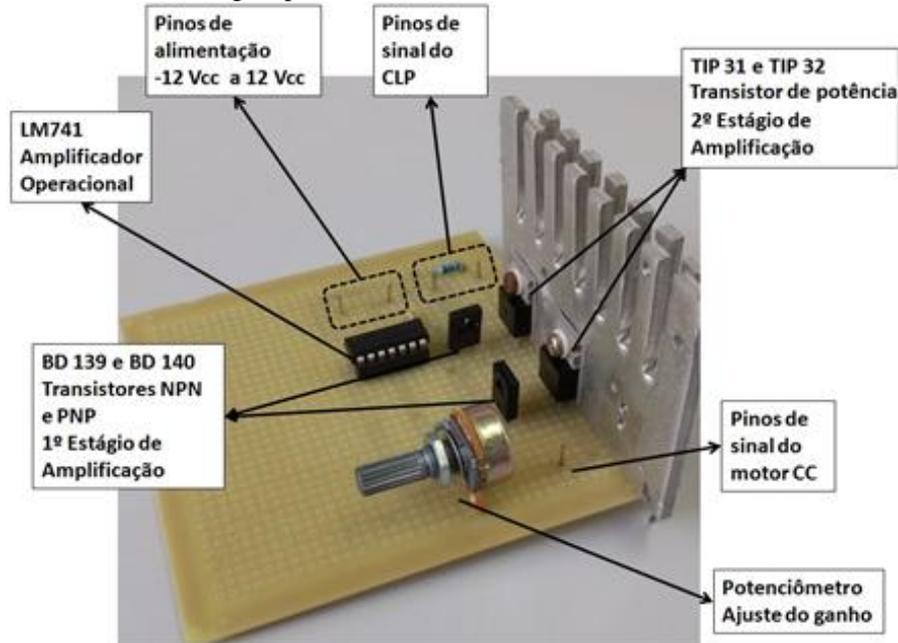
Para efetuar o acionamento e controle de velocidade dos motores CC nos eixos X e Y da ponte rolante, foi projetado um circuito *Driver Amplificador Analógico* que é conectado ao cartão de saída analógico do CLP, especificado no *Tópico 4.3 deste Capítulo 4*, cujo o esquemático elétrico é ilustrado na Figura 56. O circuito construído em uma placa de cobre perfurada de 10x10 cm é mostrado na Figura 57, com cada um dos seus elementos especificados, cada motor possui o seu próprio circuito de controle.

Figura 56 - Esquema elétrico do circuito de amplificador de tensão.



Autor: Igor Castro.

Figura 57 – *Driver* analógico para acionamento e controle de velocidade dos motores CC.



Autor: Igor Castro.

O circuito é constituído por:

- 01 AMPOP LM741;
- 01 potenciômetro de 100 K Ω para ajuste do ganho do sinal de entrada;
- 01 transistor BD 139 NPN;
- 01 transistor BD 140 PNP;
- 01 transistor de potência TIP 31C NPN;
- 01 transistor de potência TIP 32C PNP;
- 03 resistores de 10 K Ω ;
- 01 placa de cobre perfurada de 10 x 10 cm;
- 01 dissipador de calor de alumínio;

O circuito é alimentado por uma tensão de $\pm 12 V_{cc}$ e recebe uma tensão de referência vinda do CLP. O AMPOP LM741 amplifica este sinal para o primeiro estágio de chaveamento formado pelos transistores BD 139 e BD 140 em seguida o sinal passa pelos transistores de potência TIP 31C e TIP 32C, que formam o segundo estágio de chaveamento, que por sua vez entregam uma tensão variável de $\pm 12 V_{cc}$ aos motores, dependendo do sinal de referência dado pelo CLP, isto faz com possamos controlar a velocidade do motor CC pela variação da tensão de armadura, segundo (FITZGERALD, 2014). O sentido de rotação do eixo se dá devido aos valores positivos ou negativos de tensão fornecidos aos motores, desta forma conseguimos controlar a velocidade e o sentido de rotação dos motores dos eixos X e Y.

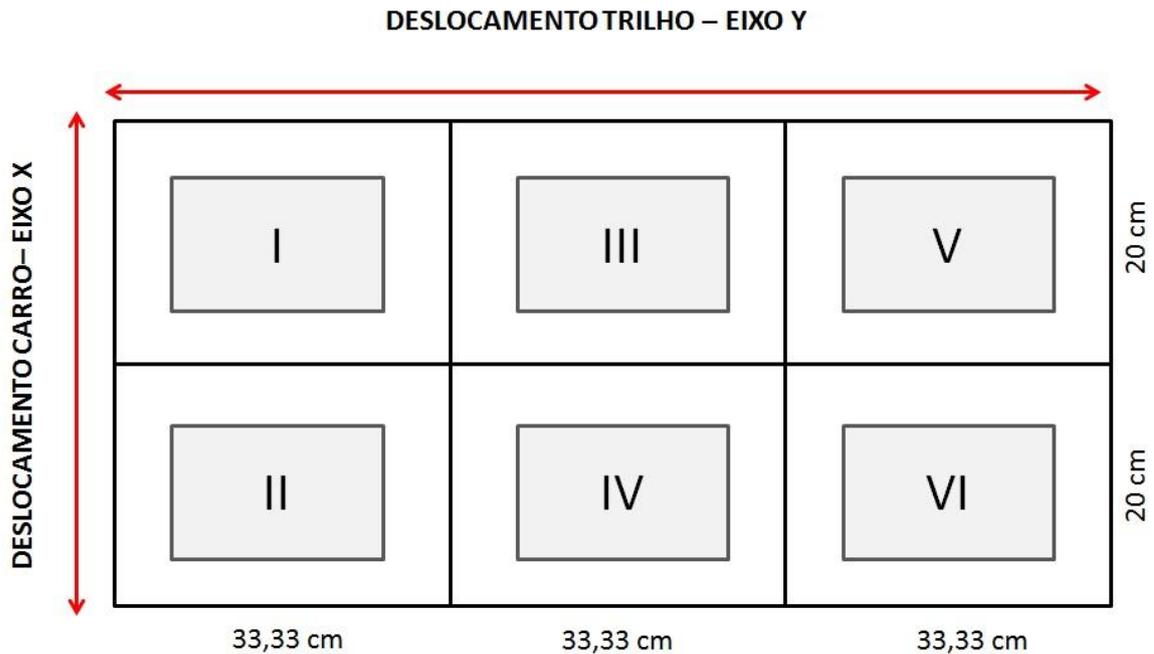
5. METODOLOGIA, DESCRIÇÃO E RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS EM HARDWARE

Neste capítulo são mostrados os ensaios feitos em hardware, descrevendo a metodologia abordada para levantamento dos dados de operação do protótipo da ponte rolante, assim como para a elaboração do código *Ladder* para controle SED da movimentação do carro e trilho do sistema.

5.1. Metodologia

A área útil de atuação da ponte rolante foi dividida em seis zonas, denominadas de quadrantes I a VI, segundo ilustra a Figura 58.

Figura 58 - Configuração dos quadrantes de operação da ponte rolante.



Autor: Igor Castro.

Cada um dos seis quadrantes é diretamente monitorado por um sensor indutivo, que tem a finalidade de sinalizar presença de carga ou não no quadrante. O movimento do carro e do trilho nos eixos X e Y respectivamente são monitorados por *encoders* acoplados diretamente a cada um dos motores de cada eixo, onde é possível fazer o posicionamento do carro e trilho sobre qualquer um dos seis quadrantes de operação pela relação de pulsos do *encoder* de cada motor e o deslocamento em metros no eixo X e Y.

Feita estas considerações é necessário agora definir as regras para o deslocamento automático da ponte, onde estes são os n eventos dos m elementos que compõe o sistema,

segundo as Equações (62) e (63) , desta forma determina-se o vetor $v(k + 1)$ de estados que o sistema pode assumir.

Desta maneira temos as seguintes condições:

- CONDIÇÃO 01 → O movimento do carro deve acontecer primeiro do que o do trilho;
- CONDIÇÃO 02 → Ao iniciar o sistema carro e trilho deslocam-se todos para a direita, posição de repouso;
- CONDIÇÃO 03 → Se houver presença de carga em mais de um quadrante, o mais próximo do ponto de partida deve ser atendido primeiro;
- CONDIÇÃO 04 → Após se deslocar a um quadrante para buscar uma carga, o carro e trilho devem voltar para a CONDIÇÃO 02;
- CONDIÇÃO 05 → O início do movimento deve ser instantâneo a partir da presença de carga em um dos seis quadrantes de operação.

Estabelecida as condições iniciais para a elaboração da estratégia de controle, agora é necessário definir os eventos de acordo com estas condições. A Tabela 5 mostra os eventos que ativam uma ação da ponte e as respectivas ações tomadas para satisfazer o evento mediante as condições iniciais.

As relações entre pulsos e deslocamento, assim como deslocamento de tempo serão dadas no *Tópico 5.2 Resultados dos Experimentos*. As relações entre os pulsos do *encoder*, em ambos os eixos, e o deslocamento do carro e do trilho, nos eixos X e Y respectivamente, irão servir como coordenadas para o posicionamento do sistema sobre o quadrante de forma correta, assim a coordenada do quadrante é dada por

$$QUADRANTE(k) = (N^{\circ} DE PULSOS EM X(k), N^{\circ} DE PULSOS EM Y(k)) \quad (64)$$

para $k = 1, 2, 3, \dots, 6$, sendo k o número dos quadrantes.

Tabela 5 - Eventos e ações do controle em SED da ponte rolante.

EVENTOS						
	CARGA QUADRANTE I	CARGA QUADRANTE II	CARGA QUADRANTE III	CARGA QUADRANTE IV	CARGA QUADRANTE V	CARGA QUADRANTE VI
AÇÕES	M2_ESQ (ON)	M1_ESQ (ON)	M2_ESQ (ON)	M1_ESQ (ON)	M2_ESQ (ON)	M1_DIR(ON) & M2_DIR(ON)
	ENCODER 02 = 1195 pulso	ENCODER 01 = 4824 pulso	ENCODER 02 = 1195 pulso	ENCODER 01 = 2559 pulso	ENCODER 02 = 1195 pulso	FC_01_X(ON) & FC_01_Y(ON)
	M2_ESQ (OFF)	M1_ESQ (OFF)	M2_ESQ (OFF)	M1_ESQ(OFF)	M2_ESQ (OFF)	M1_DIR(OFF) & M2_DIR(OFF)
	M1_ESQ (ON)	M1_DIR(ON) & M2_DIR(ON)	M1_ESQ (ON)	M1_DIR(ON) & M2_DIR(ON)	M1_DIR(ON) & M2_DIR(ON)	
	ENCODER 01 = 4824 pulso	FC_01_X(ON) & FC_01_Y(ON)	ENCODER 01 = 2559 pulso	FC_01_X(ON) & FC_01_Y(ON)	FC_01_X(ON) & FC_01_Y(ON)	
	M1_ESQ (OFF)	M1_DIR(OFF) & M2_DIR(OFF)	M1_ESQ(OFF)	M1_DIR(OFF) & M2_DIR(OFF)	M1_DIR(OFF) & M2_DIR(OFF)	
	M1_DIR(ON) & M2_DIR(ON)		M1_DIR(ON) & M2_DIR(ON)			
	FC_01_X(ON) & FC_01_Y(ON)		FC_01_X(ON) & FC_01_Y(ON)			
	M1_DIR(OFF) & M2_DIR(OFF)		M1_DIR(OFF) & M2_DIR(OFF)			

Autor: Igor Castro.

5.2. Descrição e Resultados dos Experimentos

- **EXPERIMENTO 01 → Levantamento das Relações de Pulso versus Deslocamento & Deslocamento versus Tempo**

Os resultados apresentados são obtidos de quatro ensaios com a ponte rolante. Esses ensaios serviram para fazer o levantamento da relação entre o número de pulsos do *encoder* de cada um dos eixos, com o deslocamento em centímetros do carro e trilho respectivamente e com o tempo de deslocamento.

Para executar estes ensaios o carro e trilho foram posicionados na condição inicial, segundo estipulado pela CONDIÇÃO 02 citada anteriormente neste capítulo. Primeiro são feitos os ensaios para o carro, segundo a CONDIÇÃO 01, realizando-se dez medições,

partindo sempre, do ponto da condição inicial de repouso da ponte, para distâncias de 10 e 20 cm, depois o processo foi repetido para o trilho, mas para distâncias de 20, 40, 60 e 80 cm. Por último, calcula-se a média aritmética entre as dez medições para cada um dos quadrantes. Nas Tabelas 6 a 9, apresentam-se os dados levantados com estes ensaios e seus respectivos valores médios.

Tabela 6 - Relação de pulsos vs. deslocamento do carro no Eixo X.

Pulsos vs. Deslocamento no eixo X		
n	10 cm	20 cm
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
Média	855	1549

Tabela 7 - Relação deslocamento do carro em X vs. tempo.

Deslocamento vs. Tempo no eixo X		
n	10 cm	20 cm
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
Média	1,56	2,87

Tabela 8 - Relação de pulsos vs. deslocamento do trilho no eixo Y.

Pulsos vs. Deslocamento no eixo Y				
n	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm
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
Média	1065	2395	3769	5103

Tabela 9 - Relação deslocamento do trilho em Y vs. tempo.

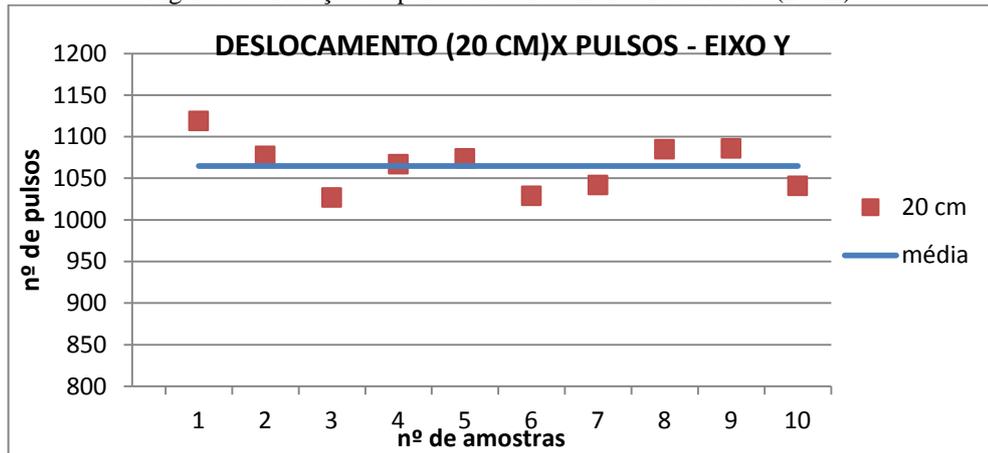
Deslocamento vs. Tempo no eixo Y				
n	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm
1	2,34	4,06	6,29	8,55
2	1,75	4,21	6,48	8,49
3	1,56	4,22	6,36	8,47
4	1,81	4,17	6,39	8,58
5	1,86	4,22	6,39	8,55
6	1,88	4,23	6,27	8,53
7	1,81	4,18	6,41	8,55
8	1,9	4,14	6,46	8,66
9	1,76	4,19	6,29	8,52
10	2	4,18	6,46	8,52
Média	1,87	4,18	6,38	8,54

Existe um pequeno desvio padrão nas medições feitas, isto é decorrente do erro de medição proveniente da falta de precisão dos equipamentos e ou de interferência humana no processo.

Pode-se verificar nas Tabelas 7 e 9 que o carro leva cerca de 2,87 segundos para se deslocar 20 cm no eixo X, enquanto que o trilho leva 1,87 segundos para cobrir os mesmos 20 cm no eixo Y.

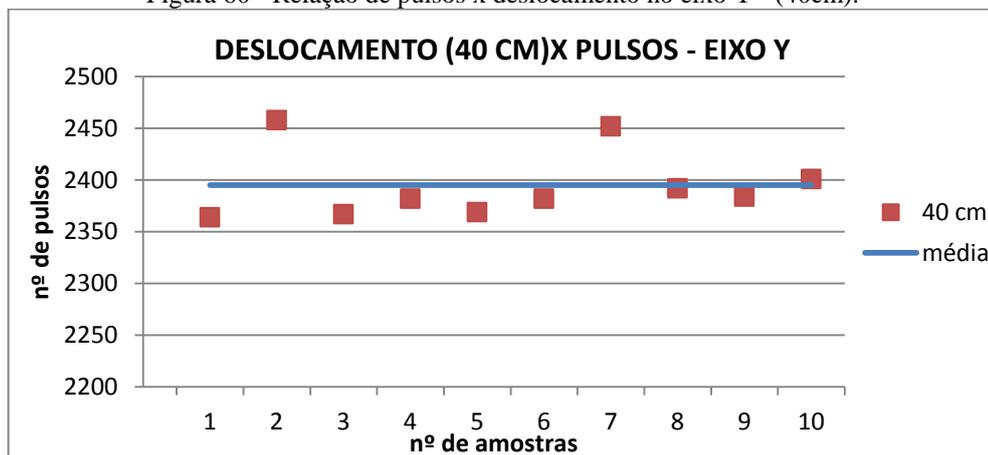
As Figuras 59 a 62 ilustram o comportamento do carro e trilho segundo os dados levantados na Tabela 6 e 8, respectivamente.

Figura 59 - Relação de pulsos x deslocamento no eixo Y - (20cm).



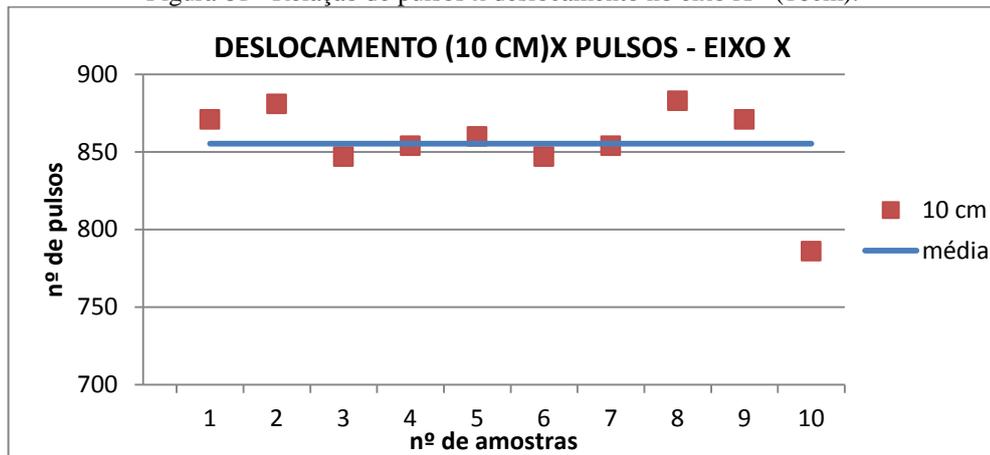
Autor: Igor Castro.

Figura 60 - Relação de pulsos x deslocamento no eixo Y - (40cm).



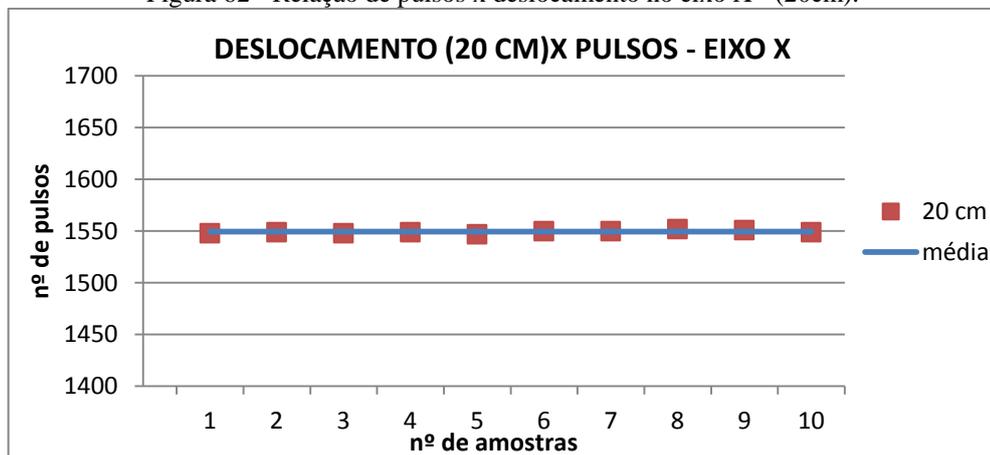
Autor: Igor Castro.

Figura 61 - Relação de pulsos x deslocamento no eixo X - (10cm).



Autor: Igor Castro.

Figura 62 - Relação de pulsos x deslocamento no eixo X - (20cm).



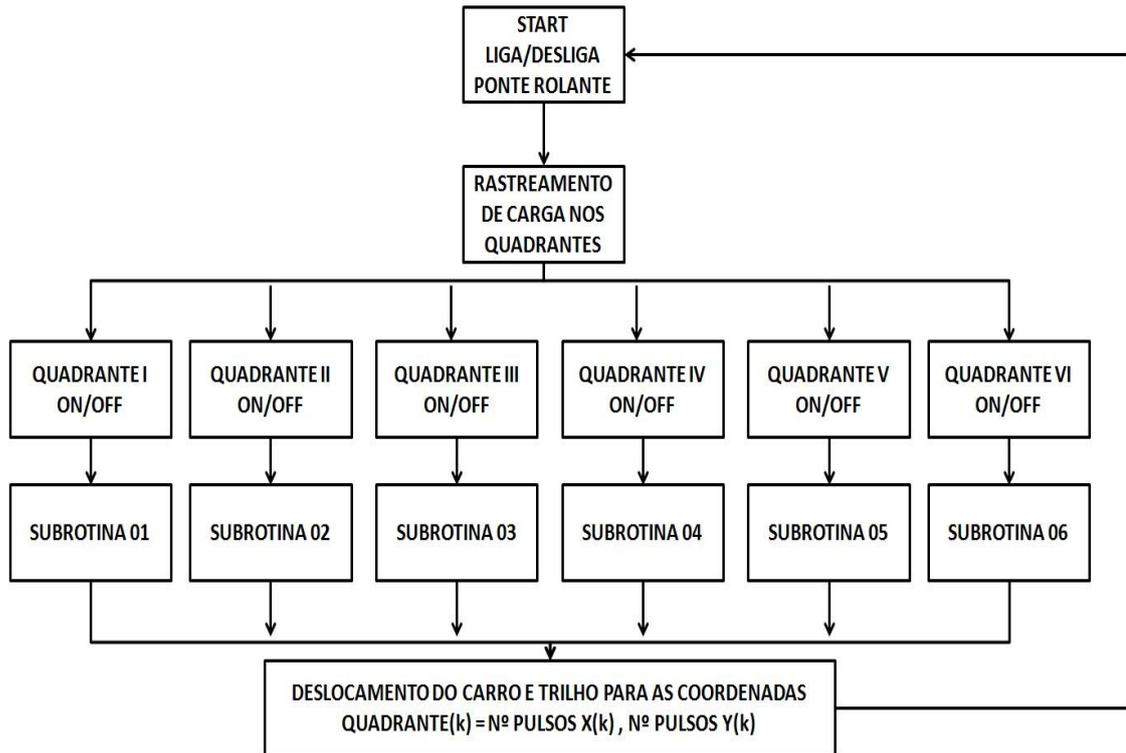
Autor: Igor Castro.

- **EXPERIMENTO 02 → Acionamento Automático da Ponte Rolante, Rastreamento de Presença de Carga por Quadrante**

Desenvolveu-se um código em *Ladder* para controle automático do acionamento e movimentação da ponte rolante. Este *Ladder* foi desenvolvido no *RSLogix 500™* para ser embarcado no CLP *MicroLogix™ 1200*, onde foram tomadas como prerrogativas de projeto as condições de operação citadas anteriormente no Tópico 5.1 – Metodologia, deste capítulo e a estratégia de controle SED descrita na Tabela 5.

O *Ladder* segue a estratégia de controle descrita no fluxograma ilustrado na Figura 63 abaixo.

Figura 63 - Fluxograma da estratégia de controle para implementação do *Ladder*.

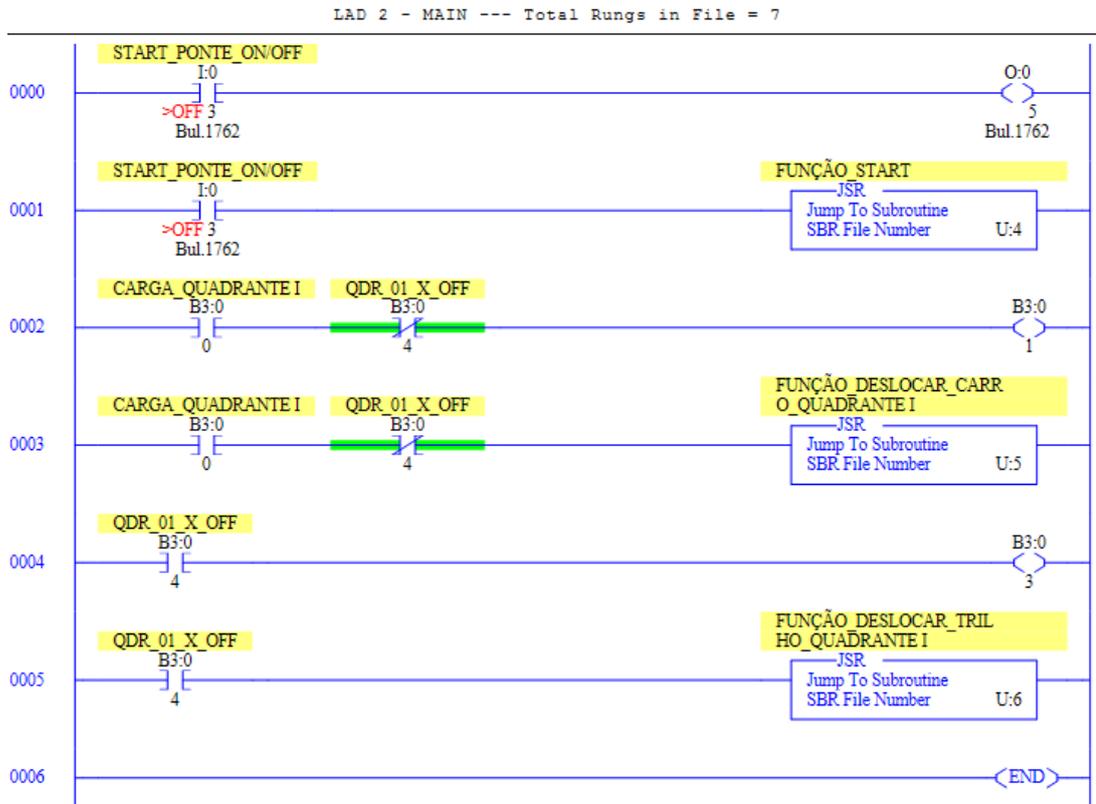


Autor: Igor Castro.

O código *Ladder* desenvolvido é mostrado a seguir nas Figuras 64 a 67, o código segue a estratégia esboçada no fluxograma da Figura 63.

O código é dividido em quatro sub-rotinas, sendo a *LAD 2 – MAIN*, a rotina principal onde são chamadas as demais sub-rotinas e funções para o movimento do carro e trilho para os quadrantes, a sub-rotina *LAD 2* é mostrada na Figura 64.

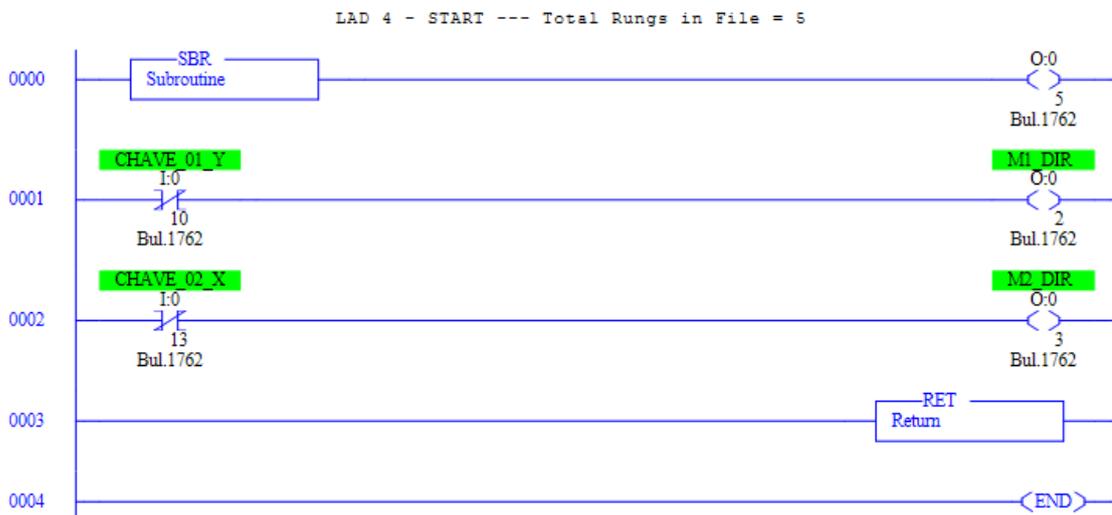
Figura 64 - Ladder automação da ponte, sub-rotina LAD 2 - MAIN.
AUTOMACAO_PONTE_IGOR_TESTE_05



Autor: Igor Castro.

A sub-rotina LAD 4 é a rotina responsável por executar a função de start da ponte, levando carro e trilho para a posição de repouso, ativando os motores 01 e 02 todos para a direita até chegarem a chave fim de curso de seus respectivos eixos, como podemos observar no código ilustrado na Figura 65.

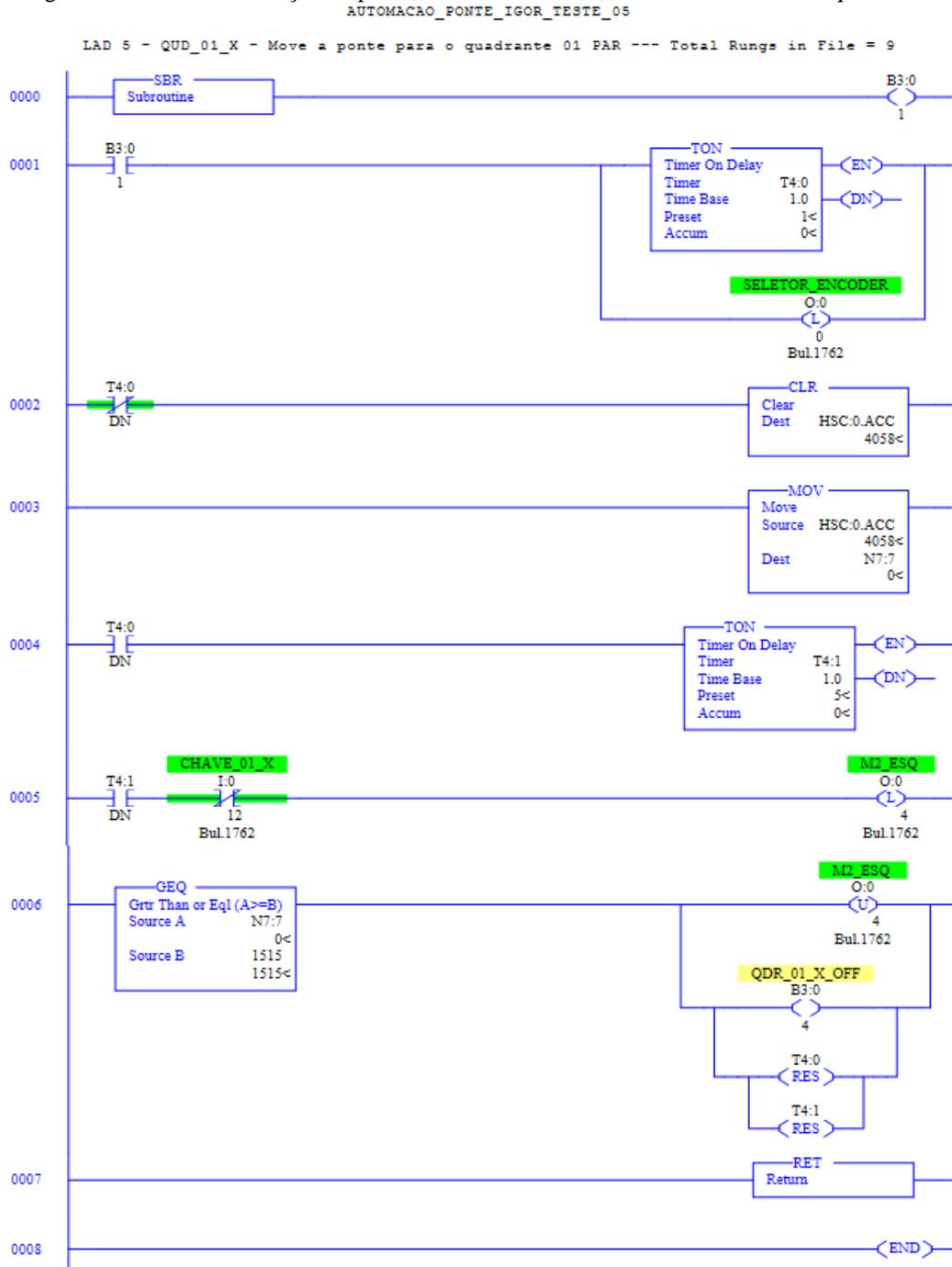
Figura 65 - Ladder de automação da ponte, função START, sub-rotina LAD 4, função STAR.
AUTOMACAO_PONTE_IGOR_TESTE_05



Autor: Igor Castro.

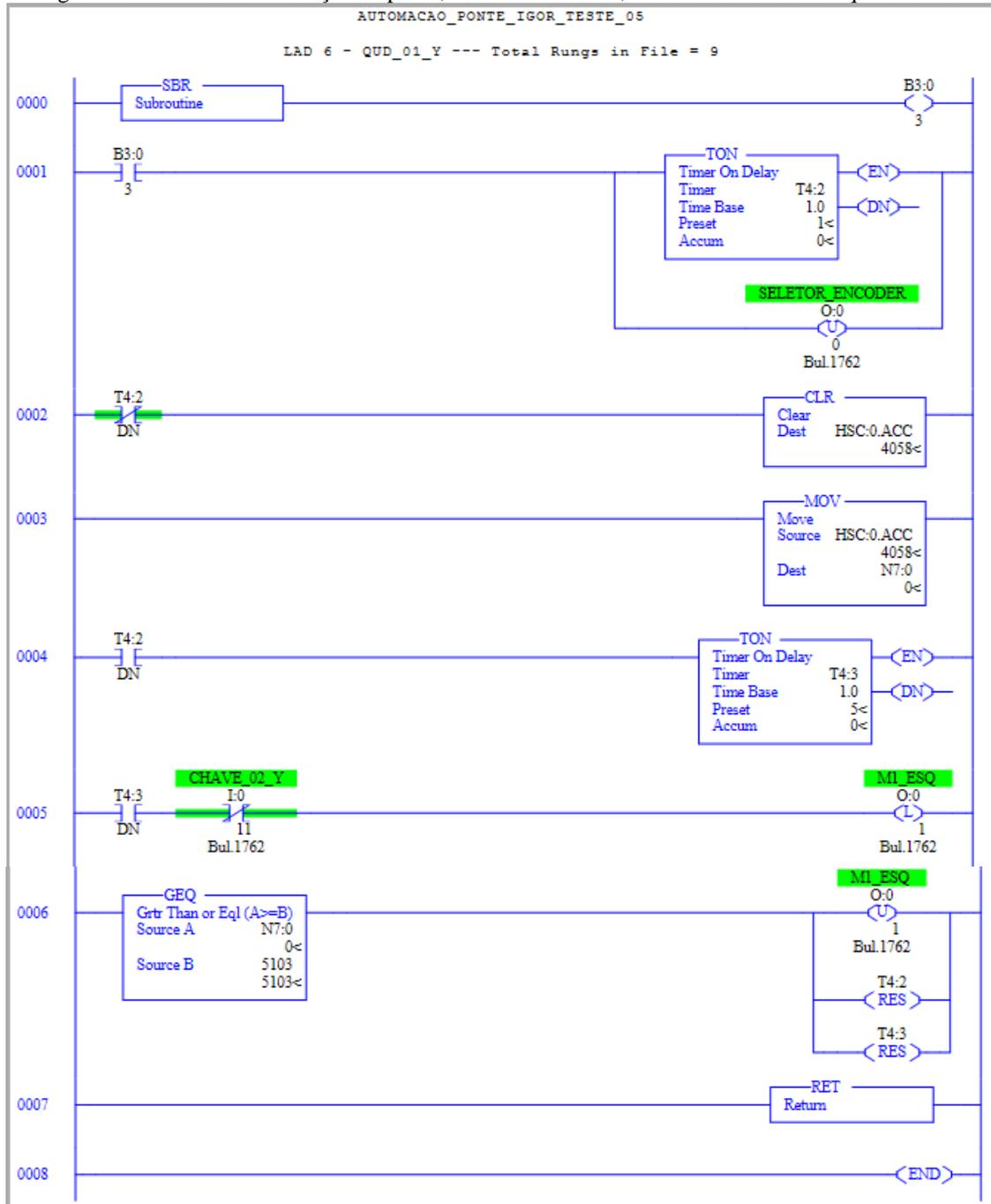
As sub-rotinas LAD 5 e LAD 6 são as responsáveis por fazer o comando e controle do deslocamento do sistema carro e ponte respectivamente, para o quadrante de operação, onde foi sinalizado presença de carga, no nosso caso o quadrante I. Essas sub-rotinas são acionadas sequencialmente mediante a presença de carga, ou seja, contato fechado do sensor indutivo daquele quadrante como podemos ver nas Figuras 66 e 67.

Figura 66 - Ladder automação da ponte, sub-rotina LAD 5, acionamento do carro quadrante I.



Autor: Igor Castro.

Figura 67 - Ladder de automação da ponte, sub-rotina LAD 6, acionamento do trilho quadrante I.

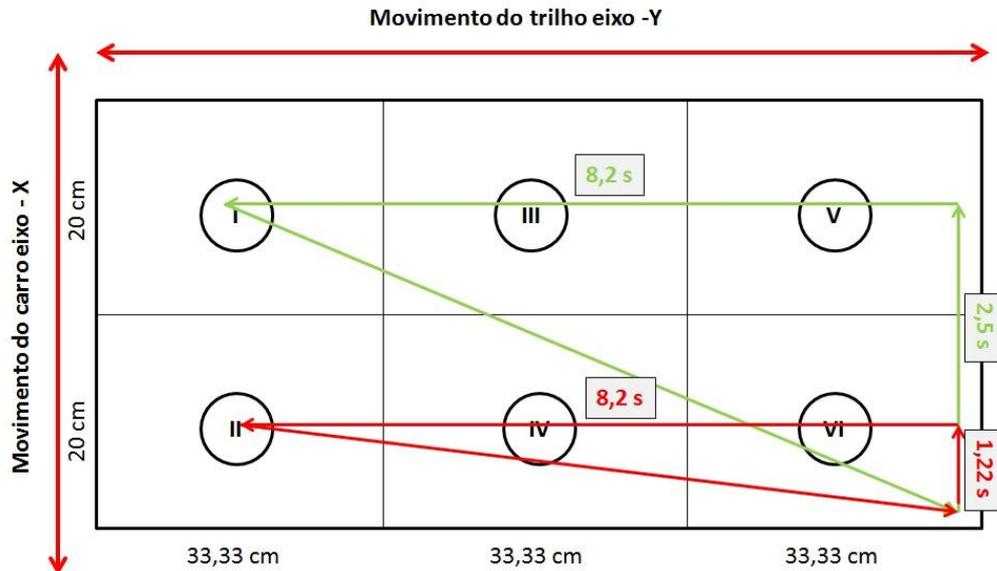


Autor: Igor Castro.

Para cada um dos eventos disparados mediante a presença de carga em dos seis quadrantes de operação da ponte rolante, é necessário um conjunto de sub-rotinas similares às apresentadas acima. A lógica desenvolvida pode ser replicada e com algumas modificações de endereçamentos é possível desenvolver o código para o controle do acionamento do sistema para os demais eventos da Tabela 5.

A Figura 68 ilustra o comportamento cinemático da ponte rolante para o deslocamento do sistema carro e trilho mediante a presença de carga nos quadrantes I e II, controlados pelo *Ladder* desenvolvido.

Figura 68 - Comportamento cinemático do protótipo da ponte rolante.



Autor: Igor Castro.

5.3. Comentários

Neste capítulo foram levantadas as informações do sistema através de quatro ensaios, para obter as relações de pulsos versus deslocamento do carro no eixo X e do trilho no eixo Y, cujos resultados são demonstrados nas Tabelas 7 e 9, assim como, nas Figuras 59 a 62 e as relações de deslocamento versus tempo do carro e trilho, cujos resultados são demonstrados nas Tabelas 6 e 8. Estas correlações serviram para a elaboração do *Ladder*, de automação do sistema de deslocamento do carro e trilho da ponte rolante e rastreamento de carga nos quadrantes de operação.

Por fim foi desenvolvida uma estratégia de controle automático do sistema, baseado em SED, tal qual ilustrado pelo diagrama da Figura 41 no *Capítulo 4*. As condições para o desenvolvimento dessa estratégia foram traçadas de acordo com a dinâmica da planta e estão elencadas nos *Capítulo 5, Tópico 5.1*. Para a implantação desta estratégia de controle, foi desenvolvido um código em *Ladder* a ser embarcado num CLP demonstrados nas Figuras 64 a 67, onde os eventos e ações descritos na Tabela 5 em conjunto com o fluxograma da Figura 63, serviram de parâmetros para a construção do *Ladder*. Após uma série de ensaios e testes o *Ladder* desenvolvido mostrou-se eficaz, executando automaticamente o rastreamento e movimentação da ponte para o quadrante de operação com sinalização de carga.

6. CONCLUSÃO

A proposta geral deste trabalho de monografia foi desenvolver um sistema, baseado em SVC e SED, capaz de controlar o efeito pendular da carga e de fazer o acionamento automático do protótipo de ponte rolante, por meio de um Controlador Lógico Programável. Para tal, primeiramente foi feito um levantamento do modelo matemático linearizado que representasse a dinâmica da planta construída no Laboratório de Sistemas Embarcados e Controle Inteligente (LABSECI) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), em seguida, foi obtida a representação da dinâmica do sistema baseado em modelos, através das funções de transferência do sistema.

No Capítulo 3 foram feitos o projeto e a análise do controlador PID baseado nas técnicas de sintonia de controladores PID de Ziegler-Nichols e tentativa e erro, para os subsistemas $(x-\gamma)$ e $(y-\beta)$, onde este se mostrou eficaz e conseguiu atingir o objetivo de limitar a amplitude da variação do ângulo do pendulo.

No Capítulo 5 foi elaborada a estratégia de controle automático baseado em SED para o acionamento automático do sistema ponte rolante projetado, onde como resultado obteve-se um *Ladder* que mostrou-se eficiente na execução da tarefa traçada.

Conclui-se, portanto, que os projetos do controlador PID em SVC e do *Ladder* em SED, forneceram uma resposta satisfatória, atendendo as premissas de projeto, e foram capazes de executar sua função de maneira eficiente dentro do sistema. Com isso atingiu-se os objetivos traçados para esta monografia tendo como resultados os sistemas de controle em SED e SVC e a construção do protótipo da ponte rolante.

Como propostas de trabalhos futuros, visando melhoria das respostas do sistema desenvolvido, propõe-se o desenvolvimento de um algoritmo em *Ladder* com o controlador PID embarcado, misturando técnicas de SVC e SED, utilizando o *Driver* analógico para controle de acionamento dos motores. O controlador SVC pode ser melhorado utilizando técnicas de controle ótimo como, por exemplo, controle PID multivariável, controle PID adaptativo e Regulador Linear Quadrático Discreto (DLQR). O estudo e implementação de controladores para o sistema de posicionamento vertical da carga. A elaboração de uma estratégia de otimização de trajetória do deslocamento da ponte rolante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT 04:010.01-002/1983: **NBR 8400 - Cranes and lifting appliances - Basic calculation for structures and components - Procedure**, 1983, 108 p.

ARDUINO TUESDAYS. **BenRotaryEncoder incremental rotary encoder code for Arduino**. 2017. Disponível em: <http://encurtador.com.br/DGKX8>. Acessado em 07 de fevereiro de 2017.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5ª. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2013. xix, 684 p.

CHEN H.. **Dynamical Modelling and Nonlinear Control of a 3D Crane**. 2005 International Conference on Control and Automation (ICCA2005). June 27-29, 2005, Budapest, Hungary. 6 p..

COSTA, HUMBERTO. **Aplicação de Técnicas de Modelagem e Controle em Sistemas Tipo Ponte Rolante**. 05 de fevereiro de 2010. 148 p.. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia (IME). Rio de Janeiro, RJ. 2010.

COUTO, CÍCERO. **Engenharia de Automação Industrial**. 1ª ed.. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2001. 295 p.

ETT. **Sensor indutivo de proximidade LJ12A3-4-Z/BX**. 2016. Disponível em: http://www.etteam.com/productSensor/LJ12A3-4-Z_BX/LJ12A3-4-Z_BX.html. Acessado em 07 de fevereiro de 2017.

EUZÉBIO & BARROS. **Sintonia Ótima de Controlador PID em Sistema TITO: Aplicação em Modelo de Compressor**. 10th Brazilian Congress on Computational

Intelligence (CBIC'2011), November 8 to 11, 2011, Fortaleza, Ceará Brazil © Brazilian Society on Computational Intelligence (SBIC).

FAIRCHILD. **LM741-Single Operational Amplifier**. 2001. Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/53589/FAIRCHILD/LM741.html>. Acessado em 07 de fevereiro de 2017.

Ferreira, E. e. F. N. J. V.. Projeto de sistemas lineares em pontes rolantes, Universidade Federal do Maranhão. São Luís –MA, 2011, 6 p.

FITZGERALD. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FONSECA S. M.. **Encoder – Instrumentação Eletrônica**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN, 09 de maio de 2008, 12 p. Disponível em: <http://encurtador.com.br/nINQS>. Acessado em 12 de junho de 2017.

FRANKLIN, GENE F..**Sistemas de controle para engenharia**. 6ª ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2013. 702 p.

LIMA, A. J. D.. **Controle Proporcional Integral Derivativo para Transporte de Carga sem Ponte Rolante**. 16 de junho de 2011.72 p.. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Militar de Engenharia (IME). Rio de Janeiro, RJ. 2011.

MARCOS, E. C. P. (2014). **Modelagem e controle de uma ponte rolante de três graus de liberdade utilizando controle por planejamento e rastreamento de trajetória**. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM - 069 A/14, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 138p.

MELO FELIPE. **Encouder – Instrumentação Eletrônica**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN, 09 de maio de 2008. 12 p..

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Nr 11 - Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais**. Publicado em: Portaria GM n.º 3.214, de 08 de junho de 1978. Revisão em: Portaria SIT n.º 82, de 01 de junho de 2004.

MIYAGI, PAULO EIGI. **Controle Programável: fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos**. 1ª ed.. São Paulo, SP: Blucher, 1996. 194 p.

MOSPEC . **Complementary Silicon Plastic Power Transistor TIP 31 NPN and TIP32 PNP**. Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/2779/MOSPEC/TIP31C.html>. Acessado em 07 de fevereiro de 2017.

MOTOROLA. **Plastic Medium Power Silicon NPN Transistor BD-139**. 1995. Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/2920/MOTOROLA/BD139.html>. Acessado em 07 de fevereiro de 2017.

MOTOROLA. **Plastic Medium Power Silicon PNP Transistor BD-140**. 1995. Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/2921/MOTOROLA/BD140.html>. Acessado em 07 de fevereiro de 2017.

OGATA K. **Engenharia de Controle Moderno – 4ª Edição**, 2005, Prentice-Hall.

ROCKWELL AUTOMATION. **Controladores Programáveis MicroLogix™ 1200 e MicroLogix 1500**. Revisão 762-RM001C-PT-P, setembro de 2000, 476 p.

SUZUKI M.. **Semi-Automatic Control of Overhead Crane using Potential Method**. 2000. Toyohashi University of Teehiology (TUT). Toyohashi, Aichi, Japan. 6p..

TOXQUI & LI. **Anti-swing control for overhead crane with neural compensation**. 2006 International Joint Conference on Neural Networks, Sheraton Vancouver Wall Centre Hotel, Vancouver, BC, Canada July 16-21, 2006. 7 p..

WENDLING MARCELO. **Sensores – Apostila sobre sensores**. Universidade Estadual Paulista. Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá “Professor Carlos Augusto Patrício Amorim”. Guaratinguetá – SP, 2010. 19 p..

ANEXOS

ANEXO 1 – Código MATLAB®, Modelo Matemático da Ponte Rolante, Análise em MA e MF, Diagrama de Bode, Lugar Geométrico das Raízes e Controlador PID.

```

%% Código MATLAB®, Modelo Matemático da Ponte Rolante,
%% Análise em MA e MF, Diagrama de Bode,
%% Lugar Geométrico das Raízes e Controlador PID.
%-----
%-----

clear all;
clc;

%% Modelo Linear da Ponte Rolante
%% Variáveis para modelagem da PONTE ROLANTE

m1= 4.2; %3; %(Kg)
m2= 1.5; %1;
m3= 5; %0.1;
R= 0.93; %5.5;
r= 2; %16.7*10^-3;
Nx= 73;%51.6;
Ny= 73;%35.83;
K= 41*10^-3;
J= 20*10^-5;%49*10^-7;
l= 0.5; %0.3;
A= 6;
g= 9.81;

%% Calculo das matrizes de estado e das equações, Modelo
X_Gama:

a22 = -
([J*(K^2)*(Nx^2)*(Ny^2)]+[m2*(K^2)*(Nx^2)*(r^2)])/([R*(m2^2)*(r^4)]+[R*m1*m2*(r^4)]+[J^2)*(Nx^2)*(Ny^2)*R]+[J*(Nx^2)*R*m2*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*m1*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*m2*(r^2)]);
a23 = -
([J*R*g*m3*(Ny^2)*(r^2)]+[R*g*m2*m3*(r^4)])/([R*(m2^2)*(r^4)]+[R*m1*m2*(r^4)]+[J^2)*(Nx^2)*(Ny^2)*R]+[J*(Nx^2)*R*m2*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*m1*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*m2*(r^2)]);
a42 = -
([J*(K^2)*(Nx^2)*(Ny^2)]+[K^2)*(Nx^2)*m2*(r^2)]/([R*l*(m2^2)*(r^4)]+[J^2)*(Nx^2)*(Ny^2)*R*l]+[R*l*m1*m2*(r^4)]+[J*(Nx^2)*R*l*m2*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*l*m1*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*l*m2*(r^2)]);
;
a43 = -
([R*g*(m2^2)*(r^4)]+[R*g*m1*m2*(r^4)]+[R*g*m2*m3*(r^4)]+[J^2)*(Nx^2)*(Ny^2)*R*g]+[J*(Nx^2)*R*g*m2*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*g*m1*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*g*m2*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*g*m3*(r^2)])/([R*l*(m2^2)*(r^4)]+[J^2)*(Nx^2)*(Ny^2)*R*l]+[R*l*m1*m2*(r^4)]+[J*(N

```

```

x^2)*R*1*m2*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*1*m1*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*1*m2*(r
^2)]);
b21 =
([J*K*Nx*A*(Ny^2)*r]+[K*Nx*A*m2*(r^3)])/([R*(m2^2)*(r^4)]+[R*m
1*m2*(r^4)]+[J^2)*(Nx^2)*(Ny^2)*R]+[J*(Nx^2)*R*m2*(r^2)]+[J*(
Ny^2)*R*m1*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*m2*(r^2)]);
b41 =
([K*Nx*A*m2*(r^3)]+[J*K*Nx*(Ny^2)*A*r])/([R*1*(m2^2)*(r^4)]+[
J^2)*(Nx^2)*(Ny^2)*R*1]+[R*1*m1*m2*(r^4)]+[J*(Nx^2)*R*1*m2*(r^
2)]+[J*(Ny^2)*R*1*m1*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*1*m2*(r^2)]);

% As matrizes A1, B1, C1 e D1, são as matrizes controláveis do
subsistema
% chamado Sistema (X,Gama), através delas é possível obtermos
as funções de
% transferência para este subsistema.

A1=[0 1 0 0;
    0 a22 a23 0;
    0 0 0 1;
    0 a42 a43 0]
B1=[0;
    b21;
    0;
    b41]
C1=[1 0 0 0;
    0 0 1 0]
D1=[0;
    0]

sys1 = ss(A1,B1,C1,D1)
sys_x_gama = tf(sys1)
pole (sys1)

%% Calculo das matrizes de estado e das equações, Modelo
Y_Beta:

a66 = -
([J*(K^2)*(Nx^2)*(Ny^2)]+[K^2)*(Ny^2)*m1*(r^2)]+[K^2)*(Ny^2)
*m2*(r^2)]/([R*(m2^2)*(r^4)]+[R*m1*m2*(r^4)]+[J^2)*(Nx^2)*(N
y^2)*R]+[J*(Nx^2)*R*m2*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*m1*(r^2)]+[J*(Ny^2)*
R*m2*(r^2)]);
a67 = -
([R*g*m1*m3*(r^4)]+[R*g*m2*m3*(r^4)]+[J*(Nx^2)*R*g*m3*(r^2)])/
([R*(m2^2)*(r^4)]+[R*m1*m2*(r^4)]+[J^2)*(Nx^2)*(Ny^2)*R]+[J*(
Nx^2)*R*m2*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*m1*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*m2*(r^2)
];
a86 = -
([J*(K^2)*(Nx^2)*(Ny^2)]+[K^2)*(Ny^2)*m1*(r^2)]+[K^2)*(Ny^2)
*m2*(r^2)]+[K^2)*(Ny^2)*m3*(r^2)]-
[K^2)*(Ny^2)*m3*(r^2)]/([R*1*(m2^2)*(r^4)]+[J^2)*(Nx^2)*(Ny

```

```

^2)*R*1]+[R*1*m1*m2*(r^4)]+[J*(Nx^2)*R*1*m2*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R
*1*m1*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*1*m2*(r^2)];

```

```

a87 = -

```

```

([R*g*(m2^2)*(r^4)]+[R*g*m1*m2*(r^4)]+[R*g*m2*m3*(r^4)]+[ (J^2)
*(Nx^2)*(Ny^2)*R*g]+[J*(Nx^2)*R*g*m2*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*g*m1*(
r^2)]+[J*(Ny^2)*R*g*m2*(r^2)]+[R*g*m1*m3*(r^4)]+[J*(Nx^2)*R*g*
m3*(r^2)]) / ([R*1*(m2^2)*(r^4)]+[ (J^2)*(Nx^2)*(Ny^2)*R*1]+[R*1*
m1*m2*(r^4)]+[J*(Nx^2)*R*1*m2*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*1*m1*(r^2)]+[
J*(Ny^2)*R*1*m2*(r^2)]);

```

```

b62 =

```

```

([K*Ny*A*m1*(r^3)]+[K*Ny*A*m2*(r^3)]+[J*K*(Nx^2)*Ny*A*r]) / ([R*
(m2^2)*(r^4)]+[R*m1*m2*(r^4)]+[ (J^2)*(Nx^2)*(Ny^2)*R]+[J*(Nx^2)
)*R*m2*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*m1*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*m2*(r^2)]);

```

```

b82 =

```

```

([K*Ny*A*m1*(r^3)]+[K*Ny*A*m2*(r^3)]+[J*K*(Nx^2)*Ny*A*r]) / ([R*
1*(m2^2)*(r^4)]+[ (J^2)*(Nx^2)*(Ny^2)*R*1]+[R*1*m1*m2*(r^4)]+[J
*(Nx^2)*R*1*m2*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*1*m1*(r^2)]+[J*(Ny^2)*R*1*m2
*(r^2)]);

```

```

% As matrizes A2, B2, C2 e D2, são as matrizes controláveis do
subsistema

```

```

% chamado Sistema (Y,Beta), através delas é possível obtermos
as funções de

```

```

% transferência para este subsistema.

```

```

A2=[0 1 0 0;
    0 a66 a67 0;
    0 0 0 1;
    0 a86 a87 0]

```

```

B2=[0;
    b62;
    0;
    b82]

```

```

C2=[1 0 0 0;
    0 0 1 0]

```

```

D2=[0;
    0]

```

```

sys2 = ss(A2,B2,C2,D2)
sys_y_beta = tf(sys2)
pole (sys2)

```

```

%% Calculo da matriz total de estado e das equações, Modelo
X_Gamma & Y_Betta:

```

```

% As matrizes A, B, C e D, são as matrizes controláveis do
Sistema

```

```

% e dela é possível extrair os subsistemas desacoplados
(X,Gama)e

```

```

% (Y,Beta). Podemos observar que a Matriz A possui duas
regiões simétricas

```

```

% com valores absolutos igual e outras duas regiões onde a
matriz é nula,
% desta forma a Matriz A é desacoplável em dois subsistemas,
onde o
% quadrante superior esquerdo desta matriz representa o
Subsistema (X,Gama)
%e o quadrante inferior direito representa o Subsistema
(Y,Beta).

```

```

A = [0 1 0 0 0 0 0 0 ;
      0 a22 a23 0 0 0 0 0;
      0 0 0 1 0 0 0 0;
      0 a42 a43 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 1 0 0;
      0 0 0 0 0 a66 a67 0;
      0 0 0 0 0 0 0 1;
      0 0 0 0 0 a86 a87 0]

```

```

B = [0 0;
      b21 0;
      0 0;
      b41 0;
      0 0;
      0 b62;
      0 0;
      0 b82]

```

```

C = [1 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 1 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 1 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 1 0]

```

```

D = [0 0;
      0 0;
      0 0;
      0 0]

```

```

sys = ss(A,B,C,D)
sys_tot = tf(sys)
pole (sys_tot)

```

```

%% Reposta ao degral malha aberta e malha fechada para o
Modelo X-gama

```

```

num_1 = [1.618 -6.662e-33 31.75];
den_1 = [1 0.4036 36.06 7.919 0];
num_2 = [3.236 1.825e-16];
den_2 = [1 0.4036 36.06 7.919];

```

```

% Função de Transferência em MA do Subsistema (X, Gama).

```

```

sys_x = tf(num_1,den_1)
sys_gama = tf(num_2,den_2)

% Função de Transferência em MF do Subsistema (X, Gama).

sys_x_cl=feedback(sys_x,1)
sys_gama_cl=feedback(sys_gama,1)
figure (1)
step (sys_x*12,20)
title ('Resposta ao Degral de 12 V Sistema Malha Aberta -
Posição X');
figure (2)
step (sys_gama*12,20)
title ('Resposta ao Degral de 12 V Sistema Malha Aberta -
Ângulo Gama');
figure (3)
step (sys_x_cl*12,20)
title ('Resposta ao Degral de 12 V Sistema Malha Fechada -
Posição X');
figure (21)
margin (sys_x_cl*12)
figure (22)
impulse (sys_x_cl*12,20)
title ('Resposta ao Impulso de 12 V Sistema Malha Fechada -
Posição X');
figure (4)
step (sys_gama_cl*12,20)
title ('Resposta ao Degral de 12 V Sistema Malha Fechada -
Ângulo Gama');
figure (5)
margin (sys_gama_cl*12)
figure (6)
impulse (sys_gama_cl*12,20)
title ('Resposta ao Impulso de 12 V Sistema Malha Fechada -
Ângulo Gama');
%% Reposta ao degral malha aberta e malha fechada para o
Modelo Y-Beta

num_3 = [5.466 -2.286e-30 107.2];
den_3 = [1 1.363 75.16 26.75 0];
num_4 = [10.93 -7.737e-15];
den_4 = [1 1.363 75.16 26.75];

% Função de Transferência MA do Subsistema (Y,Beta).

sys_y = tf(num_3,den_3)
sys_beta = tf(num_4,den_4)

% Função de Transferência MF do Subsistema (Y,Beta).

sys_y_cl=feedback(sys_y,1)

```

```

sys_beta_cl=feedback(sys_beta,1)

figure (7)
step (sys_y*12,20)
title ('Resposta ao Degral de 12 V Sistema Malha Aberta -
Posição Y');
figure (8)
step (sys_beta*12,20)
title ('Resposta ao Degral de 12 V Sistema Malha Aberta -
Ângulo Beta');
figure (9)
step (sys_y_cl*12,20)
title ('Resposta ao Degral de 12 V Sistema Malha Fechada -
Posição Y');
figure (10)
step (sys_beta_cl*12,20)
title ('Resposta ao Degral de 12 V Sistema Malha Fechada -
Ângulo Beta');

% Modelo em diagrama de blocos foi montado usando SIMULINK
para analisar o
% comportamento dos modelos lineares.

%% Analise de Polos e Zeros em malha aberta e fechada para o
Modelo X_Gama

figure(11)
pzmap(sys_x)
title ('Mapa de Pólos e Zeros do Sistema em MA - Posição X');
grid on;
figure(12)
pzmap(sys_gama)
title ('Mapa de Pólos e Zeros do Sistema em MA - Ângulo
Gama'); grid on;
figure(13)
pzmap(sys_x_cl)
title ('Lugar das Raízes do Sistema em MF - Posição X');
figure(14)
rlocus(sys_gama_cl)
title ('Lugar das Raízes do Sistema em MF - Ângulo Gamma');

%% Analise de Raizes e Polos em malha aberta e fechada para o
Modelo Y_Beta

figure(15)
pzmap(sys_y)
title ('Mapa de Pólos e Zeros do Sistema em MA - Posição Y');
grid on;figure(14)
pzmap(sys_beta)
title ('Mapa de Pólos e Zeros do Sistema em MA - Ângulo
Beta'); grid on;

```

```

figure(16)
rlocus(sys_y_cl)
title ('Lugar das Raízes do Sistema em MF - Posição Y');
figure(17)
rlocus(sys_beta_cl)
title ('Lugar das Raízes do Sistema em MF - Ângulo Beta');

% Observa-se mais uma vez que os sistemas são desacoplados e
% possuem
% comportamento similar, logo para análise faz-se necessário
% desenvolver o
% controlador para apenas um dos Modelos (X-Gama) ou (Y-Beta).

%% Controlador PID para controle de posição X no Modelo (X-
Gama)

Kp=0.168801676602175;
Ki=0.00238718829375196;
Kd=2.87915692856611;

C=pid(Kp,Ki,Kd)
sys_u1=feedback(C*sys_x,1);
figure(18)
step(sys_u1,20)
title ('PID MALHA EXTERNA _ CONTROLE DA POSIÇÃO X');
figure(19)
pzmap(sys_u1)
title ('DIAGRAMA DE PÓLOS E ZEROS DO SISTEMA COM PID_MALHA
EXTERNA_POSIÇÃO X');
figure (20)
margin (sys_u1)

% Controlador PID para controle de ângulo GAMA no Modelo (X-
Gama)

Kp=0.168801676602175;
Ki=0.00238718829375196;
Kd=2.87915692856611;

C=pid(Kp,Kd,Ki)
sys_u2=feedback(C*sys_gama,1);
figure(21)
step(sys_u2,20)
title ('PID MALHA INTERNA _ CONTROLE DO ÂNGULO GAMMA');
figure(22)
pzmap(sys_u2)
title ('DIAGRAMA DE PÓLOS E ZEROS DO SISTEMA COM PID_MALHA
INTERNA_ÂNGULO GAMMA');
figure (23)
margin (sys_u1)

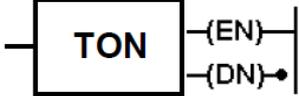
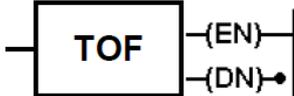
```

APÊNDICES

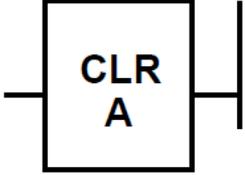
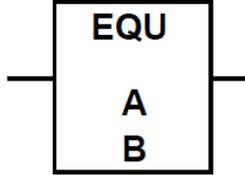
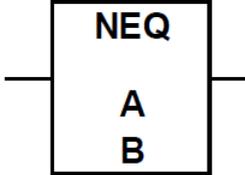
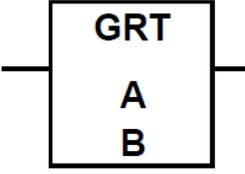
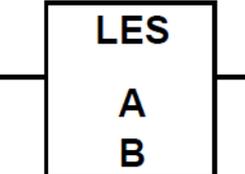
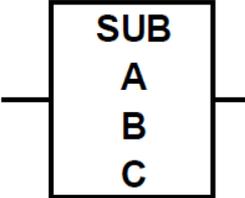
**APÊNDICE A – Configurações de Hardware e Endereçamento do MicroLogix™
1200 RockWell Automation©**

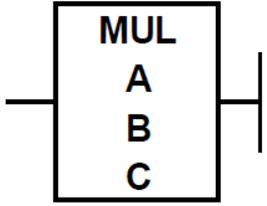
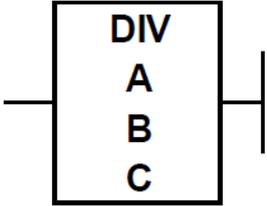
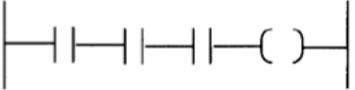
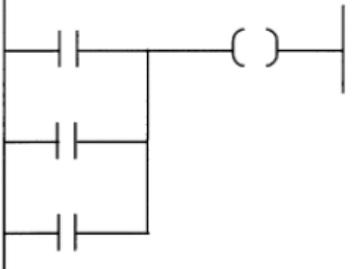
As principais instruções em Ladder, que podem ser utilizadas no *RSLogix 500®*, são listadas a seguir na Tabela 10.

Tabela 10 - Classes e principais instruções em Ladder.

CLASSE	INSTRUÇÕES	REPRESENTAÇÃO
Instruções Básicas	Contato Normalmente Aberto NA] [
	Contato Normalmente Fechado NF] / [
	Energiza Bobina sem Retenção	()
	Energiza Bobina com Retenção	(S)
	Desenergiza Bobina com Retenção	(R)
Instruções de Temporizador	<p style="text-align: center;">Temporizador na Energização</p> <p>Quando a linha é verdadeira o contador inicia contagem acumulativa com base no valor de contagem e resta a contagem quando a linha se torna falsa.</p>	
	<p style="text-align: center;">Temporizador na Desenergização</p> <p>Quando a linha é falsa o contador inicia contagem acumulativa com base no valor de contagem e resta a</p>	

	contagem quando a linha se torna verdadeira.	
	<p>Temporizador Retentivo</p> <p>Quando a linha é verdadeira o contador inicia contagem acumulativa com base no valor de contagem, quando a linha se torna falsa o valor de contagem é retido.</p>	
	<p>Rearme do Temporizador Retentivo</p> <p>Quando a linha é verdadeira o valor acumulado é resetado.</p>	
Instruções de Contador	<p>Contador Crescente</p> <p>Toda vez que a linha passar para verdadeiro (nível lógico alto) o contador será incrementado de uma unidade.</p>	
	<p>Contador Decrescente</p> <p>Toda vez que a linha passar para verdadeiro (nível lógico alto) o contador será decrementado de uma unidade.</p>	
	<p>Rearme do Contador</p> <p>Quando a linha for verdadeira o valor acumulado será resetado.</p>	
Instruções de Movimentação	<p>Mover</p> <p>Move o conteúdo de A para B.</p>	

	<p style="text-align: center;">Apagar</p> <p>Apaga o conteúdo em A.</p>	
Instruções de Comparação	<p style="text-align: center;">Igualdade</p> <p>Linha será habilitada, se e somente se, o conteúdo em A for igual do conteúdo em B.</p>	
	<p style="text-align: center;">Desigualdade</p> <p>Linha será habilitada, se e somente se, o conteúdo em A for diferente do conteúdo em B.</p>	
	<p style="text-align: center;">Maior que</p> <p>Linha será habilitada, se e somente se, o conteúdo em A for maior do que conteúdo em B.</p>	
	<p style="text-align: center;">Menor que</p> <p>Linha será habilitada, se e somente se, o conteúdo em A for menor do que conteúdo em B.</p>	
		<p style="text-align: center;">Soma</p> <p>Quando a linha for verdadeira o conteúdo de A é somado ao de B e o resultado é escrito em C.</p>
Instruções Algébricas	<p style="text-align: center;">Subtração</p> <p>Quando a linha for verdadeira o conteúdo de A é subtraído do de B e o resultado é escrito em C.</p>	

	<p style="text-align: center;">Multiplicação</p> <p>Quando a linha for verdadeira o conteúdo de A é multiplicado pelo de B e o resultado é escrito em C.</p>	
	<p style="text-align: center;">Divisão</p> <p>Quando a linha for verdadeira o conteúdo de A é dividido pelo de B e o resultado é escrito em C.</p>	
Instruções Lógicas	<p style="text-align: center;">E</p> <p>A linha se torna verdadeira (habilitada) quando todos os contatos estiverem ativos (nível lógico alto).</p>	
	<p style="text-align: center;">OU</p> <p>A linha se torna verdadeira (habilitada) quando pelo menos um dos contatos estiver ativo (nível lógico alto).</p>	

Autor: Igor Castro.

A Tabela 11 mostra o mapeamento dos cartões de entrada e saída do *MicroLogix™ 1200*, utilizado nesta monografia.

Tabela 11- Mapeamento de E/S do MicroLogix 1200.

CARTÃO DE ENTRADA_I:0		CARTÃO DE SAÍDA_O:0		CARTÃO DE ENTRADA E SAÍDA_1762-IF20F2	
I:0/0	Encoder Canal A	O:0/0	Circuito seletor do encoder	IN 0 (+)	X
I:0/1	Encoder Canal B	O:0/1	Motor 01_Esquerda	IN 0 (-)	X
I:0/2	Chave de seleção do encoder	O:0/2	Motor 01_Direita	IN 1(+)	X
I:0/3	Sensor indutivo quadrante I	O:0/3	Motor 02_Direita	IN 1 (-)	X
I:0/4	Sensor indutivo quadrante II	O:0/4	Motor 02_Esquerda	V OUT 0	Driver Analógico Motor 01
I:0/5	Senso indutivo quadrante III	O:0/5	X	I OUT 0	X
I:0/6	Senso indutivo quadrante IV	O:0/6	X	V OUT 1	Driver Analógico Motor 02
I:0/7	Senso indutivo quadrante V	O:0/7	X	I OUT 1	X
I:0/8	Senso indutivo quadrante VI	O:0/8	X		
I:0/9	x	O:0/9	X		
I:0/10	Fim de curso 01_Y				
I:0/11	Fim de curso 02_Y				
I:0/12	Fim de curso 02_X				
I:0/13	Fim de curso 01_X				

Autor: Igor Castro.

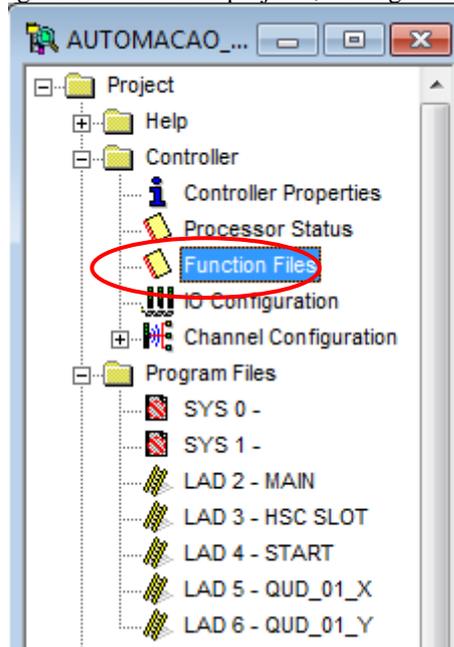
APÊNDICE B – Configuração do High Speed Channel

Os CLPs da *Rockwell Automation*®, *Micrologix*™ 1200 e *Micrologix*™ 1500 tem a possibilidade de configurar as portas de 0 a 3 de seu cartão de entrada para fazer leituras de até 20 KHz de frequência de amostragem. O *Micrologix*™ 1200 possui apenas as portas X0 e X1 configuráveis para esta finalidade. Para configurar este tipo de leitura é necessário habilitar e configurar a função *High Speed Channel (HSC)* seguindo os passos a seguir.

- **PASSO 01**

Na janela de projetos à esquerda da área de trabalho, dentro da pasta “*Controller*” procure a pasta chamada “*Function Files*” como mostrado na Figura 69.

Figura 69 - Janela de projetos, RSLogix 500.



Autor: Igor Castro.

Em seguida se abrirá uma segunda janela como a ilustrada na Figura 70, clique na função HSC e em seguida, clique na cruz em *HSC:0* para abrir a janela de configurações.

Figura 70 - Janela de configuração padrão do HSC:0.

HSC									
		PTO	PWM	STI	EII	RTC	DAT	TPI	MMI
Address		Value							
[-] HSC:0		{...}							
-	PFN - Program File Number	0							
-	ER - Error Code	0							
-	UIX - User Interrupt Executing	0							
-	UIE - User Interrupt Enable	0							
-	UIL - User Interrupt Lost	0							
-	UIP - User Interrupt Pending	0							
-	FE - Function Enabled	0							
-	AS - Auto Start	0							
-	ED - Error Detected	0							
-	CE - Counting Enabled	0							
-	SP - Set Parameters	0							
-	LPM - Low Preset Mask	1							
-	HPM - High Preset Mask	1							
-	UFM - Underflow Mask	1							
-	OFM - Overflow Mask	1							
-	LPI - Low Preset Interrupt	0							
-	HPI - High Preset Interrupt	0							
-	UFI - Underflow Interrupt	0							
-	OFI - Overflow Interrupt	0							
-	LPR - Low Preset Reached	0							
-	HPR - High Preset Reached	0							
-	DIR - Count Direction	0							
-	UF - Underflow	0							
-	OF - Overflow	0							
-	MD - Mode Done	0							
-	CD - Count Down	0							
-	CU - Count Up	0							
-	MOD - HSC Mode	0							
-	ACC - Accumulator	0							
-	HIP - High Preset	2147483647							
-	LOP - Low Preset	-2147483648							
-	OVF - Overflow	2147483647							
-	UNF - Underflow	-2147483648							
-	OMB - Output Mask Bits	0							
-	HPO - High Preset Output	0							
-	LPO - Low Preset Output	0							

Esta janela ilustrada na Figura 70, mostra a configuração padrão para o *HSC:0*, nela está contida uma série de parâmetros que devem ser setados de acordo com o *Manual Controladores Programáveis MicroLogix™ 1200 e MicroLogix 1500*, que pode ser encontrado no referencial teórico deste trabalho.

Para a nossa aplicação deve-se seguir a configuração de acordo a Figura 71.

Figura 71 - Janela de configuração do HSC:0 para a ponte rolante.

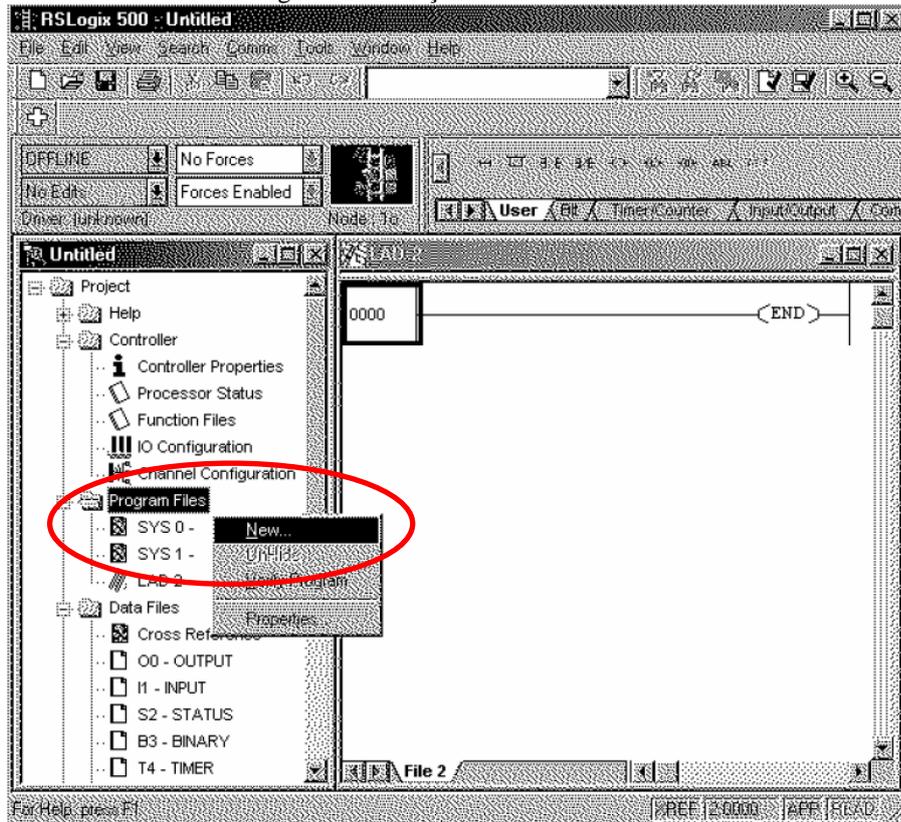
Address	Value	Description
<input checked="" type="checkbox"/> HSC:0	{...}	
<input type="checkbox"/> PFN - Program File Number	3	
<input type="checkbox"/> ER - Error Code	0	
<input type="checkbox"/> UIX - User Interrupt Executing	0	
<input type="checkbox"/> UIE - User Interrupt Enable	1	
<input type="checkbox"/> UIL - User Interrupt Lost	0	
<input type="checkbox"/> UIP - User Interrupt Pending	0	
<input type="checkbox"/> FE - Function Enabled	1	
<input type="checkbox"/> AS - Auto Start	1	
<input type="checkbox"/> ED - Error Detected	0	
<input type="checkbox"/> CE - Counting Enabled	1	
<input type="checkbox"/> SP - Set Parameters	0	
<input type="checkbox"/> LPM - Low Preset Mask	1	
<input type="checkbox"/> HPM - High Preset Mask	1	
<input type="checkbox"/> UFM - Underflow Mask	1	
<input type="checkbox"/> OFM - Overflow Mask	1	
<input type="checkbox"/> LPI - Low Preset Interrupt	0	
<input type="checkbox"/> HPI - High Preset Interrupt	0	
<input type="checkbox"/> UFI - Underflow Interrupt	0	
<input type="checkbox"/> OFI - Overflow Interrupt	0	
<input type="checkbox"/> LPR - Low Preset Reached	0	
<input type="checkbox"/> HPR - High Preset Reached	0	
<input type="checkbox"/> DIR - Count Direction	1	
<input type="checkbox"/> UF - Underflow	1	
<input type="checkbox"/> OF - Overflow	1	
<input type="checkbox"/> MD - Mode Done	1	
<input type="checkbox"/> CD - Count Down	1	
<input type="checkbox"/> CU - Count Up	1	
<input type="checkbox"/> MOD - PLS file (bits 15-8) HSC Mode (bits 7-0)	0 (h)	
<input type="checkbox"/> ACC - Accumulator	4058	
<input type="checkbox"/> HIP - High Preset	6000	
<input type="checkbox"/> LOP - Low Preset	-6000	
<input type="checkbox"/> OVF - Overflow	10000	
<input type="checkbox"/> UNF - Underflow	-10000	
<input type="checkbox"/> OMB - Output Mask Bits	0	
<input type="checkbox"/> HPO - High Preset Output	0	
<input type="checkbox"/> LPO - Low Preset Output	0	

Autor: Igor Castro.

- **PASSO 02**

Devemos criar uma sub-rotina LAD-3, para uso exclusivo da função de alta velocidade *HSC:0*, isto pode ser feito clicando com o botão direito na pasta **“Program Files”** no **“Menu – Project”**, em seguida deve-se clicar em **“New”** e criar um novo LAD, como ilustrado na Figura 72.

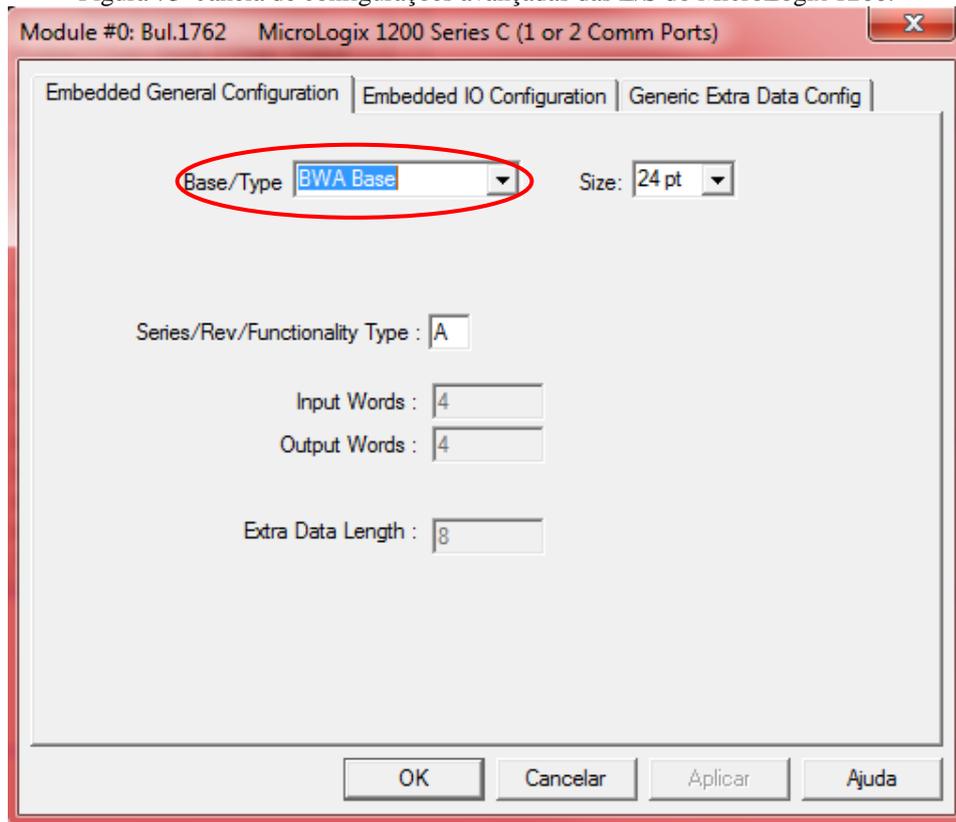
Figura 72 - Criação de um novo LAD.



- **PASSO 03**

Agora é preciso mudar a configuração padrão de velocidade das portas 0 e 1 do CLP para uma taxa de amostragem de $25\mu\text{s}$, para isto deve-se acessar o **“Menu – Project”** >> **“IO Configuration”** >> **“Adv Config”**. Modificar **“Base/Type”** para **BWA Base**, como ilustrado na Figura 73.

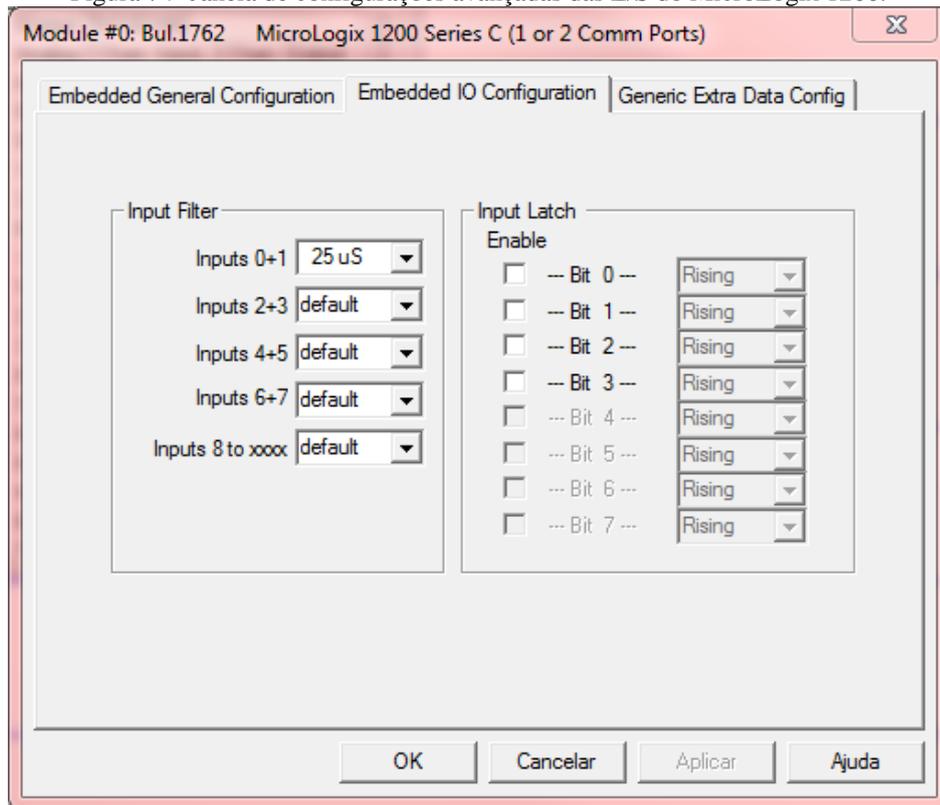
Figura 73- Janela de configurações avançadas das E/S do MicroLogix 1200.



Autor: Igor Castro.

Em seguida acesse **“Menu – Project” >> “IO Configuration” >> “Adv Config.”>>“Embedded IO Configuration”**, modifique a **“Inputs 0+1”** para **25µs**, como ilustrado na Figura 74.

Figura 74- Janela de configurações avançadas das E/S do MicroLogix 1200.



Autor: Igor Castro.

Agora a Função *HSC:0* está habilitada e pronta para ser utilizada na rotina *Ladder* como um recurso de programação.