

Alexandre Vaz de Campos
Fábio Cruz Ribeiro
Willian Rodrigues Tavares

Controle anti-balanço de tempo mínimo de guindastes

São Paulo
Dezembro de 2009

Alexandre Vaz de Campos
Fábio Cruz Ribeiro
Willian Rodrigues Tavares

Controle anti-balanço de tempo mínimo de guindastes

Relatório final da disciplina Laboratório de Pro-
jeto de Automação e Controle II

Orientador:
Prof. Dr. José Jaime da Cruz

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES E CONTROLE

São Paulo
Dezembro de 2009

Agradecimentos

O grupo gostaria de agradecer a todos que possibilitaram a realização deste trabalho:

Agradecemos primeiramente às nossas famílias, que nos proporcionaram a chance de estudar em uma universidade que é referência no Brasil, fornecendo-nos todo o apoio e incentivando-nos a continuar em todos os momentos de dificuldade.

Agradecemos ao nosso orientador, Prof. Dr. José Jaime da Cruz, por acreditar no grupo e pela ajuda inestimável em todas as etapas do trabalho, sem a qual não teríamos conseguido alcançar nossos objetivos.

Também somos gratos ao Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle da USP, que nos proporcionou os recursos financeiros para a construção do protótipo, possibilitando que saíssemos do campo teórico e demonstrássemos nossos conhecimentos práticos.

Seria impossível a construção do protótipo sem a infraestrutura da Equipe ThundeRatz de Robótica, que gentilmente nos cedeu espaço, ferramentas e material para a fabricação.

Sumário

Lista de Figuras	2
1 Introdução e objetivos do trabalho	1
1.1 Preliminares e justificativa	1
1.2 Objetivo do trabalho	2
2 Metodologia e divisão do projeto	3
2.1 Modelagem e otimização do sistema	3
2.2 Projeto e construção mecânica do protótipo	3
2.2.1 CAD / CAE	4
2.2.2 Projeto e construção eletrônica do protótipo	4
2.3 Modelagem matemática	6
3 Caracterização do problema de programação linear e otimização	12
3.1 Restrições do problema de PL	12
3.1.1 Posição do carro	12
3.1.2 Velocidade do carro	13
3.1.3 Aceleração do carro	13
3.1.4 Ângulo de balanço	13

<i>Sumário</i>	2
3.1.5 Velocidade de balanço	14
3.2 Formulação do problema de PL	14
3.2.1 Discretização do tempo	15
3.3 Análise da equação do balanço	16
3.4 Resultados a içamento nulo	19
3.5 Resultados com içamento variável	21
3.6 Validação dos resultados	23
3.6.1 Confrontamento entre resultados do simulador e da otimização	23
3.7 Conclusão da etapa de otimização	24
4 Eletrônica	25
4.1 Interface	25
4.2 Controle dos Servos	26
4.3 Alterações no projeto eletrônico	29
5 Software	31
5.1 Interface com o usuário	31
5.2 Interface com a placa de controle	33
6 Firmware	34
7 Projeto mecânico	35
7.1 Estrutura	35
7.1.1 Estudo das frequências de ressonância	35
7.1.2 Construção da estrutura	37

<i>Sumário</i>	3
7.2 Guia Linear	38
7.3 Acionador de movimentação	38
7.4 Guindaste	40
8 Construção do Protótipo	43
8.1 Alterações no projeto	46
8.2 Fotos do protótipo terminado	48
9 Resultados finais e conclusões	50
9.1 Resultados finais	50
9.1.1 Situação atual do projeto	50
9.1.2 Efeitos da velocidade e aceleração máximas na otimização	50
9.1.3 Resultado final da otimização	51
10 Conclusões	52
10.1 Modelagem, programação e otimização	52
10.2 Mecânica	52
10.2.1 Movimentação do carro na guia linear	52
10.2.2 Sistema de içamento	53
10.3 Sugestões para continuidade do projeto	54
10.3.1 Otimização	54
10.3.2 Software	55
10.3.3 Firmware	55
10.3.4 Eletrônica	55

<i>Sumário</i>	4
10.3.5 Mecânica	55
Apêndice A – Análise da bibliografia	57
A.1 Regelungstechnisches Praktikum II: Versuchsanleitungen	57
A.2 Control of Drives	58
A.3 Engenharia de Controle Moderno e Digital Control of Dynamic Systems . .	58
A.4 Manual e arquivos de ajuda do MATLAB	58
A.5 Minimum-Time Anti-Swing Control of Cranes Using Linear Programming	58
A.6 Time Optimal Control of Overhead Cranes with Hoisting of the Load . . .	59
Apêndice B – Roteiro para Identificação dos Parâmetros de Motores DC	61
B.1 Medida de R_a	61
B.2 Medida de k_v	62
B.3 Determinação de k_t	63
B.4 Medidas de f_m e c_m	63
B.4.1 Equações	63
B.4.2 Passo 1	63
B.4.3 Passo 2	64
B.5 Medida de J_m	65
B.6 Como medir $\omega(t)$	65
Apêndice C – Descrição das funções do MATLAB utilizada na otimização	67
C.1 Função calcula_lambda	67
C.2 Função otimização	67

<i>Sumário</i>	5
C.3 Função variaveis_otimizacao	67
C.4 Funções dertrans2 e deriv	68
C.5 Função conversaunidadesreais	68
C.6 Função graficos	68
C.7 Função geraTRA	68
C.8 Função geraTRAelCA	68
C.9 Função PlotaAngulo	68
Bibliografia	69

Lista de Figuras

1.1	Guindaste carregando um navio no porto de Vancouver, Canadá	2
2.1	Primeiro esboço do desenho do modelo utilizando ferramentas de CAD/CAE .	4
2.2	Esquema do Guindaste	6
3.1	Aceleração e velocidade do carro a içamento nulo	19
3.2	Posição do carro e ângulo de balanço a içamento nulo	20
3.3	Velocidade angular de balanço e içamento a içamento nulo	20
3.4	Aceleração e velocidade do carro a içamento variável	21
3.5	Posição do carro e ângulo de balanço a içamento variável	22
3.6	Velocidade angular de balanço e içamento a içamento variável	22
3.7	Simulação de balanço. Modelo em Simulink	23
3.8	Ângulo e velocidade angular do simulador	24
4.1	Diagrama de blocos	25
4.2	Diagrama lógico da placa de interface	26
4.3	Layout da placa de interface	27
4.4	Diagrama lógico da placa de controle dos servos	27
4.5	Layout da placa de controle dos servos	28
4.6	Placa de Controle	28
4.7	Servomotor	29

4.8	Novo diagrama de blocos	30
5.1	Janela Principal do Software	32
7.1	Desenho de conjunto	36
7.2	Estrutura construída	37
7.3	Buchas de teflon na montagem da guia	37
7.4	Frequências de ressonância da guia	38
7.5	Montagem do Servo-Motor	39
7.6	Esquema de Medição do Deslocamento em Y	39
7.7	Montagem do Potenciômetro	40
7.8	Fixações do Guindaste	40
7.9	Fixação da Massa de Teste	41
7.10	Frequências Naturais com 2.5kg na extremidade	42
8.1	Projeto do Protótipo	43
8.2	Eixos do protótipo	44
8.3	Projeto da guia linear. Destaque para as buchas de teflon embutidas	45
8.4	Peças da guia linear, destaque para as buchas de teflon	45
8.5	Guia Linear montada, sem o bloco	45
8.6	Posição do sistema de movimentação no protótipo	46
8.7	Posição do sistema de movimentação no projeto (CAD)	47
8.8	Momento no bloco da guia linear	47
8.9	Foto geral 1	48
8.10	Foto geral 2	49

9.1	Comparação entre o balanço esperado e o medido pelo potenciômetro solidário ao eixo	51
10.1	Guia linear - Carro na cor branca e tubos na cor cinza	53
10.2	Polia em V e Polia sincronizadora	54

1 Introdução e objetivos do trabalho

1.1 Preliminares e justificativa

Nos portos do Brasil e do mundo, o procedimento de carga e descarga é bastante custoso, tanto para o porto, quanto para o operador. Segundo o governo brasileiro, cada contêiner custa em média 280 dólares para ser descarregado de um navio, isto devido ao custo do equipamento e da mão-de-obra necessários. O operador também sofre uma grande pressão durante o seu trabalho, pois é uma tarefa dispendiosa o transporte dos contêineres. Alguns dos fatores que acarretam tal esforço podem ser enunciados:

- Preocupação com a segurança dos funcionários do porto, que transitam nas proximidades do contêiner transportado, ajudando, inclusive, no processo.
- Cuidado em evitar quaisquer choques com o contêiner, pois haveria então perigo de danificar a carga ou o ambiente de trabalho, já que a massa dos contêineres pode ultrapassar 20 toneladas.
- Cuidado de compensar oscilações que inevitavelmente ocorrem quando nenhum controlador está presente. Tal tarefa é extremamente complicada pois além da oscilação causada pelo movimento da carga, ainda há a interferência do vento presente no porto.
- O transporte deve ser realizado o mais rápido possível, afim de permitir que um número determinado de contêineres seja transportado.

Diante destes pontos, o operador necessita de uma concentração muito grande e por isso tem seu turno de trabalho reduzido. Como exemplo, na Alemanha, um operador de guindaste

trabalha 1 hora no máximo por turno (1), só retomando o trabalho após um período de descanso.



Figura 1.1: Guindaste carregando um navio no porto de Vancouver, Canadá

1.2 Objetivo do trabalho

Afim de desenvolver um sistema que melhore a situação descrita no item acima, foi desenvolvido este trabalho. Os seus objetivos principais são:

- a determinação de uma trajetória de tempo ótimo para um modelo do guindaste de modo a minimizar ou se possível eliminar o balanço da massa transportada;
- a concepção e construção de um protótipo, os testes envolvidos no processo e a validação do modelo;
- a programação do protótipo com a trajetória otimizada e a realização de tal percurso, em malha aberta;
- a validação do protótipo e da trajetória obtida, através da análise do sinal dos sensores instalados de ângulo, da posição do carro e da massa transportada.

2 Metodologia e divisão do projeto

O projeto foi dividido em 3 áreas, razoavelmente independentes entre si:

2.1 Modelagem e otimização do sistema

Foi feita a modelagem de um pêndulo com três graus de liberdade: o ângulo da barra do pêndulo, a altura da massa (representando o contêiner) e a coordenada na direção do movimento de carga e descarga, i.e, para dentro e para fora do navio. O sistema aceita como entrada a posição do carro em função do tempo, sendo que a política de movimentação vertical da massa é considerada a priori. Desta forma, é possível, após a linearização do modelo do guindaste, formular um problema de programação linear. Caso a altura da massa também fosse considerada, o sistema seria não-linear, com uma solução mais complexa.

Foi desenvolvido um algoritmo através de programação linear utilizando o modelo de tempo discreto do sistema, de forma a obter a solução ótima do problema da trajetória do contêiner, a ser enunciado a seguir. A trajetória gerada foi aplicada a um modelo do guindaste, implementado em SIMULINK, para testar a sua performance. Após o teste de performance a trajetória gerada foi carregada no controlador embarcado no protótipo.

2.2 Projeto e construção mecânica do protótipo

Como dentre os objetivos do trabalho encontra-se a construção de um protótipo em escala reduzida, cujo projeto envolveu a concepção do protótipo, a escolha dos materiais, o projeto e a construção. A seguir foram realizados testes básicos para avaliar o seu funcionamento de

maneira geral, ou seja, se ele consegue reproduzir uma trajetória programada satisfatoriamente.

2.2.1 CAD / CAE

Para auxiliar o desenvolvimento do sistema mecânico, ferramentas de CAD/CAE serão utilizadas. Como exemplo de como estas aplicações podem ser utilizadas, a figura abaixo representa o primeiro esboço do projeto:

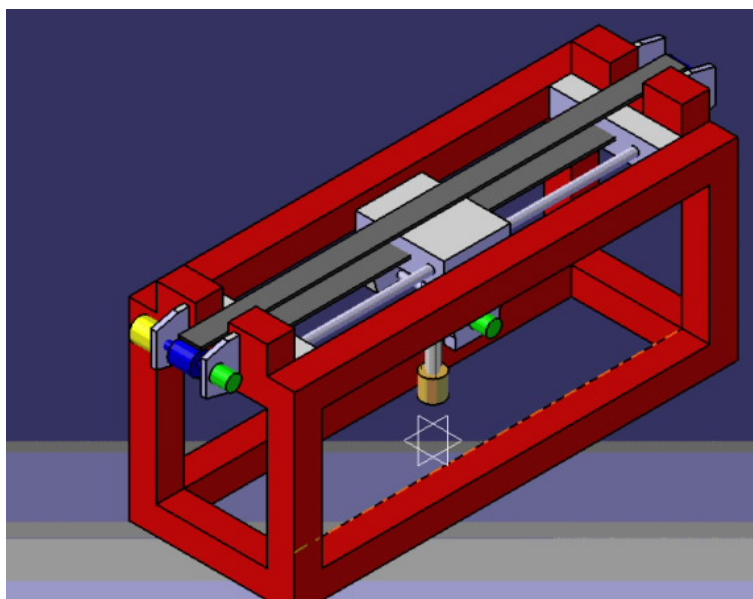


Figura 2.1: Primeiro esboço do desenho do modelo utilizando ferramentas de CAD/CAE

2.2.2 Projeto e construção eletrônica do protótipo

A área eletrônica foi dividida em 3 sistemas:

Servomotores

Decidiu-se utilizar servomotores para controlar o movimento do guindaste na direção de carga e descarga. Tais servomotores foram uma alternativa mais complexa, porém mais interessante a motores de passo, que também realizaria satisfatoriamente o trabalho. O sistema de controle da trajetória de referência foi realizado em malha aberta, ou seja, não havendo realimentação ou correção de eventuais balanços durante a trajetória otimizada. Sensores instalados

no protótipo tem exclusivamente a finalidade de validar o modelo, fornecendo informações sobre o balanço da massa e a sua posição.

Hardware

Foi projetado um sistema de *drives* de motores DC para amplificar a corrente necessária para o movimento do motor, segundo o sinal proveniente do controlador. Para isso, foram utilizados componentes semicondutores de potência, aliados a *drivers* integrados e a micro-controladores. Houve uma preocupação com a corrente máxima que o motor pode impor ao circuito, de maneira a deixar a eletrônica robusta a qualquer problema de travamento de eixo do motor, por exemplo.

Software

O *software* projetado recebe os valores da posição, velocidade e aceleração da otimização realizada e calcula o sinal a ser enviado aos servomotores, sinal que é amplificado pelos *drivers*. Foi ainda projetada uma interface gráfica, para facilmente o usuário inserir qualquer trajetória no protótipo.

2.3 Modelagem matemática

Para sistema tem-se o esquema da figura 2.2. Nele desprezam-se:

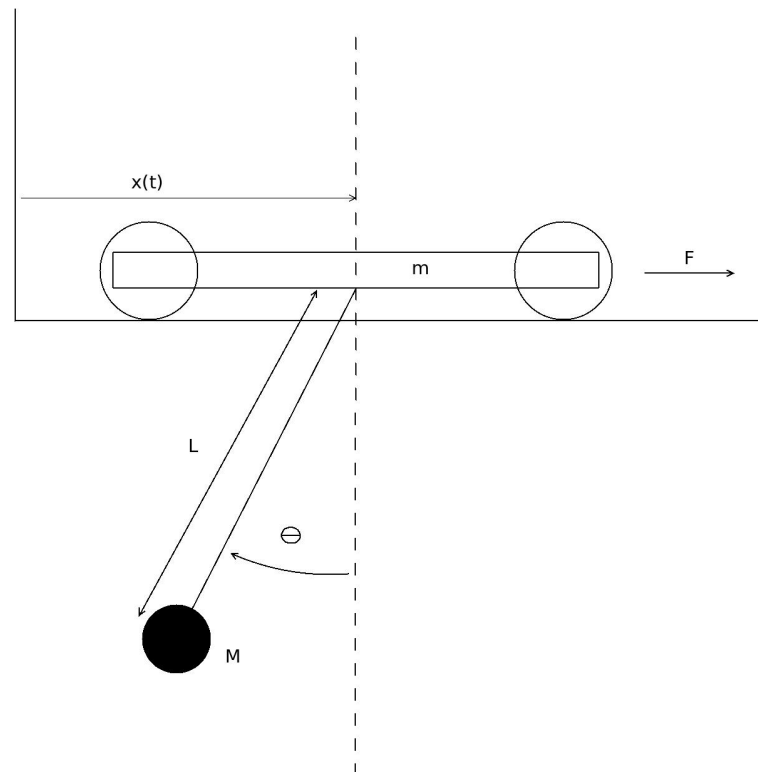


Figura 2.2: Esquema do Guindaste

- Atrito do ar e rolamentos
- Deformações
- Massa da haste

Existem duas estratégias para a modelagem desse tipo de sistema. Sistemas controlados pela posição (x) ou pela força (F). Após a aplicação de *Lagrange* consideramos um sistema controlado pela posição. Ainda pela mesma referência, a influência da aceleração da carga é negligenciável sobre o balanço, portanto $F = m \cdot \ddot{x}$. De posse das hipóteses acima, vamos considerar:

Entrada do sistema:

- μ_1 = aceleração do carrinho

Saídas do sistema:

- θ = ângulo da haste

Começa-se a modelagem pela aplicação das equações de *Lagrange*:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = \sum F_{n.conserv.} \quad (2.1)$$

Como:

$$T_{sist} = \frac{m \cdot \dot{x}^2}{2} + \frac{M \cdot \dot{x}^2}{2} + M \cdot L \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + \frac{M \cdot L^2 \cdot \dot{\theta}^2}{2} \quad (2.2)$$

$$V_{sist} = M \cdot L \cdot g \cdot \cos \theta \quad (2.3)$$

e $\mathcal{L} = T - V$, então:

$$\mathcal{L} = \frac{m+M}{2} \cdot \dot{x}^2 + M \cdot L \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + \frac{M \cdot L^2 \cdot \dot{\theta}^2}{2} - M \cdot L \cdot g \cdot \cos \theta \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = -M \cdot L \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \sin \theta + M \cdot L \cdot g \cdot \sin \theta \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial L} = M \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - M \cdot g \cdot \cos \theta \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} = (m+M) \cdot \dot{x} + M \cdot L \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} = M \cdot L \cdot \dot{x} \cdot \cos \theta + M \cdot L^2 \cdot \dot{\theta} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{L}} = 0 \quad (2.10)$$

A formulação de *Lagrange* é:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{Q}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial Q} = \sum F_{n.conserv.} \quad (2.11)$$

Fazendo as derivadas temporais:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} \right) = (m + M) \cdot \ddot{x} + M \cdot L \cdot \ddot{\theta} \cos \theta + M \cdot \dot{L} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - M \cdot L \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin \theta \quad (2.12)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} \right) = M \cdot \dot{L} \cdot \dot{x} \cos \theta + M \cdot L \cdot \ddot{x} \cos \theta - M \cdot L \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot \sin \theta + 2 \cdot M \cdot L \cdot \dot{L} \dot{\theta} + M \cdot L^2 \cdot \ddot{\theta} \quad (2.13)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{L}} \right) = 0 \quad (2.14)$$

Aplicando as derivadas na formulação de *Lagrange*:

- para x:

$$(m + M) \cdot \ddot{x} + M \cdot L \cdot \ddot{\theta} \cdot \cos \theta + M \cdot \dot{L} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - M \cdot L \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin \theta = m \cdot \mu_1 \quad (2.15)$$

- para θ :

$$M \cdot \dot{L} \cdot \dot{x} \cos \theta + M \cdot L \cdot \ddot{x} \cos \theta + 2 \cdot M \cdot L \cdot \dot{L} \cdot \dot{\theta} + M \cdot L^2 \cdot \ddot{\theta} - M \cdot g \cdot L \cdot \sin \theta = 0 \quad (2.16)$$

- para L:

$$0 = M \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - M \cdot g \cdot \cos \theta = -M \cdot \mu_2 \Rightarrow -M \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + M \cdot g \cdot \cos \theta = M \cdot \mu_2 \quad (2.17)$$

com μ_2 = aceleração da massa (carga).

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = -M \cdot L \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \sin \theta + M \cdot L \cdot g \cdot \sin \theta \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial L} = M \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - M \cdot g \cdot \cos \theta \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} = (m + M) \cdot \dot{x} + M \cdot L \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} = M \cdot L \cdot \dot{x} \cdot \cos \theta + M \cdot L^2 \cdot \dot{\theta} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{L}} = 0 \quad (2.22)$$

A formulação de *Lagrange* é:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{Q}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial Q} = \sum F_{n.conserv.} \quad (2.23)$$

Fazendo as derivadas temporais:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} \right) = (m + M) \cdot \ddot{x} + M \cdot L \cdot \ddot{\theta} \cos \theta + M \cdot \dot{L} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - M \cdot L \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin \theta \quad (2.24)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} \right) = M \cdot \dot{L} \cdot \dot{x} \cos \theta + M \cdot L \cdot \ddot{x} \cos \theta - M \cdot L \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot \sin \theta + 2 \cdot M \cdot L \cdot \dot{L} \dot{\theta} + M \cdot L^2 \cdot \ddot{\theta} \quad (2.25)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{L}} \right) = 0 \quad (2.26)$$

Aplicando as derivadas na formulação de lagrange:

- para x:

$$(m + M) \cdot \ddot{x} + M \cdot L \cdot \ddot{\theta} \cdot \cos \theta + M \cdot \dot{L} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - M \cdot L \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin \theta = m \cdot \mu_1 \quad (2.27)$$

- para θ :

$$M \cdot \dot{L} \cdot \dot{x} \cdot \cos \theta + M \cdot L \cdot \ddot{x} \cdot \cos \theta + 2 \cdot M \cdot L \cdot \dot{L} \cdot \dot{\theta} + M \cdot L \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin \theta - M \cdot g \cdot L \cdot \sin \theta = 0 \quad (2.28)$$

- para L:

$$0 = M \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta - M \cdot g \cdot \cos \theta = -M \cdot \mu_2 \Rightarrow -M \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta + M \cdot g \cdot \cos \theta = M \cdot \mu_2 \quad (2.29)$$

com μ_2 = aceleração da massa (carga).

O sistema acima, após algumas manipulações algébricas, torna-se idêntico ao encontrado na literatura, em (2). Considerando como graus de liberdade: a posição do carro (x_T), o ângulo de desvio da haste que suspende a massa da normal (ϕ) e o tamanho da haste (l), o seguinte

sistema de equações pode ser obtido:

$$x_T = \frac{m_L}{m_T}(x_T - l\phi + 2l\dot{\phi} - l\ddot{\phi}) = \frac{F_T}{m_T} \quad (2.30)$$

$$l\phi + 2l\dot{\phi} + g\phi = x_T \quad (2.31)$$

onde

- m_L massa da carga
- m_T massa total do carro
- x_T posição do carro
- l içamento da carga
- ϕ ângulo de balanço da carga
- F_T força aplicada horizontalmente no carro

No caso de controle da posição do carro, a seguinte variável de controle é definida:

$$u_T = \frac{a_T(t)}{a_{T_{max}}} \quad (2.32)$$

onde $a_T(t)$ é a aceleração atual do carro e

$$a_{T_{max}} = \max_{t \leq t \leq t_f} (|a_T(t)|) \quad (2.33)$$

ou seja, $a_{T_{max}}$ é igual à maior aceleração possível de ser imprimida no carro.

A seguir, são introduzidas os seguintes termos, sendo os dois últimos adimensionais.

$$\sigma = \frac{x_T g}{a_{T_{max}}} \quad (2.34)$$

$$\Phi = \frac{g}{a_{T_{max}}} \phi \quad (2.35)$$

$$\lambda = \frac{l}{l_{min}} \quad (2.36)$$

Das relações acima, as equações (2.30) e (2.31) podem ser reescritas como:

$$\ddot{\sigma} + \alpha(1 - \ddot{\lambda})\Phi = u_T \quad (2.37)$$

$$\lambda\ddot{\Phi} + 2\dot{\lambda}\dot{\Phi} + (1 + \alpha(1 - \ddot{\lambda}))\Phi = u_T \quad (2.38)$$

Em termos práticos, $\ddot{\lambda}$ é muito pequeno, segundo (2), portanto 2.37 e 2.38 são reformuladas como:

$$\ddot{\sigma} + \alpha\Phi = u_T \quad (2.39)$$

$$\lambda\ddot{\Phi} + 2\dot{\lambda}\dot{\Phi} + (1 + \alpha)\Phi = u_T \quad (2.40)$$

Como a força que o carro exerce na carga tem intensidade muito maior do que a exercida pela carga no carro, pode-se assumir que a massa do carro é muito pequena em relação à da carga,

$$\alpha = m_L/m_T = 0 \quad (2.41)$$

e o sistema final é obtido:

$$\ddot{\sigma} = u_T \quad (2.42)$$

$$\lambda\ddot{\Phi} + 2\dot{\lambda}\dot{\Phi} + \Phi = u_T. \quad (2.43)$$

Pode-se identificar que a primeira equação relaciona a posição do carro (na verdade um termo que muda com a posição, então por simplicidade será referida doravante como posição) com a aceleração imprimida (semelhante ao caso da posição, u_T na verdade é a fração da aceleração total que é atingida). A segunda equação trata da resposta do ângulo de balanço (Φ) em função da aceleração do carro e do içamento (λ).

3 Caracterização do problema de programação linear e otimização

Considerando o sistema obtido em ((2.42) e (2.43)),

$$\ddot{\sigma} = u_T \quad (3.1)$$

$$\lambda \ddot{\Phi} + 2\dot{\lambda} \dot{\Phi} + \Phi = u_T, \quad (3.2)$$

serão apresentadas as restrições ao movimento do sistema dinâmico que caracterizam o problema de PL:

3.1 Restrições do problema de PL

3.1.1 Posição do carro

A posição do carro (σ) é restrita pelos limites da trajetória do sistema. Assim, o carro deve partir da origem, em $t = 0$ e chegar no destino (σ_f) no tempo final, $t = t_f$. Desta forma, as duas restrições relativas à posição do carro são obtidas:

$$\sigma(0) = 0 \quad (3.3)$$

$$\sigma(t_f) = \sigma_f \quad (3.4)$$

3.1.2 Velocidade do carro

Assim como no caso da posição, a velocidade do carro ($\dot{\sigma}$) deve ser restrita: nos tempos iniciais e finais, ela deve ser zero e não pode ser superior à máxima atingível fisicamente pelo sistema ($\dot{\sigma}_{max}$). Assim as três restrições abaixo são aplicáveis.

$$\dot{\sigma}(0) = 0 \quad (3.5)$$

$$\dot{\sigma}(t_f) = 0 \quad (3.6)$$

$$\dot{\sigma}(t_f) \leq \dot{\sigma}_{max} \quad (3.7)$$

3.1.3 Aceleração do carro

A aceleração do carro é limitada fisicamente pelo conjunto motor-redução e uma nova restrição

$$|u_T(t)| \leq 1 \quad (3.8)$$

deve ser adotada. Note-se que u_T é um adimensional, que já relaciona a aceleração atual com a máxima, então limitando o valor em 1 não permite acelerações superiores à máxima.

3.1.4 Ângulo de balanço

O ângulo de balanço (Φ) deve ser nulo no início e no fim do percurso, pois a carga é içada verticalmente e deve ser descarregada, com segurança, da mesma maneira. Dessa forma:

$$\Phi(0) = 0 \quad (3.9)$$

$$\Phi(t_f) = 0 \quad (3.10)$$

$$(3.11)$$

3.1.5 Velocidade de balanço

Analogamente ao ângulo, a velocidade de balanço ($\dot{\Phi}$) deve ser nula no início e no fim do processo de transporte, pois a carga sai do repouso quando içada e deve ser descarregada igualmente com velocidade de balanço nula. Assim:

$$\dot{\Phi}(0) = 0 \quad (3.12)$$

$$\dot{\Phi}(t_f) = 0 \quad (3.13)$$

$$(3.14)$$

Nesta etapa, o balanço da carga não está restrito durante o transporte, tampouco a sua velocidade. Isso significa que haverá provavelmente balanço no percurso, mas o transporte será mais rápido do que se o balanço estivesse restrito. Com o protótipo construído, experiências com novas restrições poderão ser realizadas e a influência de restrições de balanço mínimo poderão ser adotadas.

3.2 Formulação do problema de PL

Procura-se minimizar o tempo final (t_f), necessário para o transporte. Para isso, uma série de problemas de maximização do espaço final (σ_{t_f}) pode ser definida, segundo descrito em (5) como

$$\max_u \sigma(t_f) \quad (3.15)$$

e sujeita às restrições (3.3)-(3.13). Como descrito em (5), o seguinte algoritmo pode ser utilizado para resolver encontrar o tempo mínimo para a execução da tarefa:

```
initialize t_f
solve PR (t_f)
```

```

while | sigma*(t_f) - sigma_f | > Epsilon
if sigma*(t_f) < sigma_f then increase t_f .
if sigma*(t_f) > sigma_f then decrease t_f .
solve PR(t_f).
end
t_f* <- t_f

```

As variáveis usadas no algoritmo acima estão na tabela 3.1.

VARIÁVEL	EQUIVALENTE NO ALGORITMO	SIGNIFICADO
t_f	<code>t_f</code>	Tempo necessário para a execução da trajetória
t_f^*	<code>t_f*</code>	Tempo mínimo encontrado
σ_f	<code>sigma_f</code>	Distância máxima que o carro pode percorrer
σ_f^*	<code>sigma_f*</code>	Distância que o carro percorre, dado o tempo escolhido
P_R	<code>PR</code>	Problema de programação linear que maximiza o espaço para um determinado tempo
ε	<code>epsilon</code>	Variação admissível entre a distância máxima calculada pela otimização e σ_f

Tabela 3.1: Variáveis do algoritmo de otimização

Resumidamente, o algoritmo maximiza o espaço necessário para transportar a carga e ajusta o tempo iterativamente, de maneira a buscar o espaço final (σ_f) igual à trajetória disponível. Isso leva, segundo (5), ao tempo mínimo necessário.

3.2.1 Discretização do tempo

Para tornar o problema computacionalmente solúvel, o tempo necessário para executar o transporte foi discretizado, em $n+1$ pontos, sendo o primeiro ($n=0$) na origem e o último (n) no em t_f . O tempo discretizado será denotado como τ e o tempo final será como τ_f . O tempo entre amostragens é igual a $\Delta\tau$. Dessa forma, considerando já o espaço e a velocidade na origem iguais a zero, as equações para a velocidade

$$\dot{\sigma}(k) = \Delta\tau \sum_{i=1}^k u(i) \quad (3.16)$$

e para a posição do carro

$$\sigma(k) = \frac{\Delta\tau^2}{2} \sum_{i=1}^k [2(k-i) + 1] u(i) \quad (3.17)$$

podem ser obtidas, onde $\tau = k \cdot \Delta\tau$.

A aceleração foi considerada constante por trechos, o que é uma aproximação razoável, segundo (5).

Sob a perspectiva do algoritmo apresentado e da discretização, a nova função objetivo vem diretamente de (3.17):

$$\max_u \sigma_n = \frac{\Delta\tau^2}{2} \sum_{i=1}^n [2 \cdot (n-i) + 1] \cdot u(i) \quad (3.18)$$

A equação (3.16) pode ser utilizada para discretizar as restrições (3.5) (3.6), reformulando-a como

$$\sum_{i=1}^n u(i) = 0. \quad (3.19)$$

A restrição (3.7) pode ser simplesmente reescrita em termos de $\Delta\tau$ como

$$-\frac{\dot{\sigma}_{max}}{\Delta\tau} \leq \sum_{i=1}^n u(i) \leq \frac{\dot{\sigma}_{max}}{\Delta\tau} \quad (3.20)$$

e a (3.24) permanece

$$|u_T(\tau)| \leq 1. \quad (3.21)$$

3.3 Análise da equação do balanço

As restrições sobre o ângulo de balanço e a sua velocidade, (3.9) a (3.13), implicam numa análise mais elaborada, pois um dos coeficientes da equação (2.43), λ , correspondente à altura da carga, é variante no tempo, configurando o sistema como um linear variante no tempo.

Procura-se uma situação em que a carga parte do repouso ($\sigma = 0$, $\dot{\sigma} = 0$, $\theta = 0$ e $\dot{\theta} = 0$) e chega ao final do trilho (σ_f) também em repouso, com o mínimo de balanço possível ($\sigma = \sigma_f$,

$\dot{\sigma} = 0$, $\theta = 0$ e $\dot{\theta} = 0$).

É realizada uma discretização do tempo, em princípio são utilizados 100 pontos, entre os estados inicial e o final, contando o último ponto otimizado como o final.

O problema pode ser escrito, portanto, como:

$$\max_{u_T} \sigma_n = \frac{\Delta\tau^2}{2} \sum_{i=1}^n [2 \cdot (n - i) + 1] \cdot u_T(i) \quad (3.22)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n u(i) = 0 \quad (3.23)$$

$$|u_T(t)| \leq 1 \quad (3.24)$$

$$-\frac{\dot{\sigma}_{max}}{\Delta\tau} \leq \sum_{i=1}^n u(i) \leq \frac{\dot{\sigma}_{max}}{\Delta\tau} \quad (3.25)$$

$$\sum_{i=1}^n \Gamma_n(i) u(i) = 0 \quad (3.26)$$

As duas primeiras equações restritivas referem-se à aceleração u_T do carro, que em qualquer ponto deve ser inferior à máxima estipulada e a somatória de todas deve ser igual a zero, o que garante uma velocidade nula do carro quando este atingir o seu destino, uma vez que os pontos são amostrados a intervalos constantes. A terceira restrição garante que a velocidade do carro sempre permaneça dentro dos seus limites físicos.

A última restrição refere-se ao ângulo de balanço e à velocidade angular de balanço. Uma vez que x é definido como

$$\mathbf{x}(\tau) = [\theta(\tau) \ \dot{\Phi}(\tau)]^T = [x_1 \ x_2]^T, \quad (3.27)$$

o sistema referente à equação de balanço pode ser escrito como

$$\dot{X} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{\lambda(\tau)} & \frac{2\dot{\lambda}(\tau)}{\lambda(\tau)} \end{bmatrix}}_{A(\tau)} X + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\lambda(\tau)} \end{bmatrix}}_{b(\tau)} u_T \quad (3.28)$$

e a sua solução é, genericamente,

$$X(\tau) = \Phi(\tau, 0) X(0) + \int_0^\tau \Phi(\tau, 0) b(\xi) u_T(\xi) d\xi. \quad (3.29)$$

Como a aceleração é considerada constante pelos k trechos, o valor de X no instante $\tau_k = k\Delta\tau$ é

$$X(\tau_k) = \underbrace{\int_0^{\Delta t} \Phi(\tau_k, \xi) b(\xi) d\xi}_{\Gamma_k(1)} u_T(1) + \cdots + \underbrace{\int_{(k-1)\Delta\tau}^{k\Delta t} \Phi(\tau_k, \xi) b(\xi) d\xi}_{\Gamma_k(k)} u_T(k) \quad (3.30)$$

e assim, resumidamente,

$$X(\tau_k) = \Gamma_k(1)u_T(1) + \Gamma_k(2)u_T(2) + \cdots + \Gamma_k(k)u_T(k). \quad (3.31)$$

Como a condição a ser satisfeita é $X(n\Delta\tau) = 0$, fazendo $k = n$, obtém-se

$$X(n\Delta\tau) = \Gamma_n(1)u_T(1) + \Gamma_n(2)u_T(2) + \cdots + \Gamma_n(n)u_T(n) = 0, \quad (3.32)$$

que é equivalente à última restrição acima.

O problema agora é o cálculo das integrais Γ_k :

Dentro das integrais de Γ , a matriz de transição φ é função do tempo τ_k e da variável de integração ξ . Sabe-se que, de maneira geral, para uma função φ de duas variáveis τ_1 e τ_2 ,

$$\varphi(\tau_1, \tau_2) = \varphi(\tau_2, \bar{\tau}) \cdot \varphi(\bar{\tau}, \tau_1) \quad (3.33)$$

fazendo $\tau_1 = \tau_2$, tem-se $\bar{\tau} = 0$ e o seguinte sistema pode ser obtido:

$$\dot{\varphi}(\tau, 0) = A(\tau)\varphi(\tau, 0) \quad (3.34)$$

A função de transferência $\dot{\varphi}$ pode ser analisada como

$$\dot{\varphi}(\tau, 0) = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{11} & \dot{\varphi}_{12} \\ \dot{\varphi}_{21} & \dot{\varphi}_{22} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

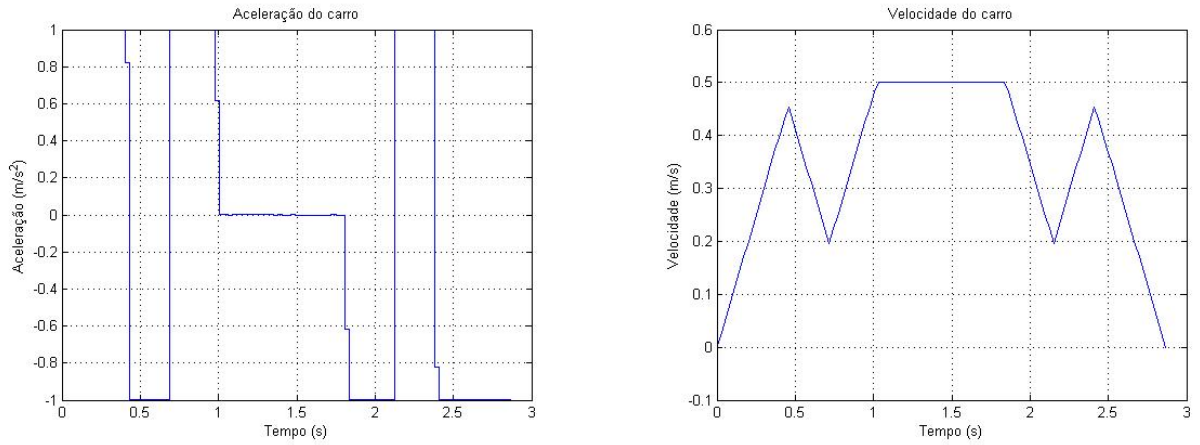


Figura 3.1: Aceleração e velocidade do carro a içamento nulo

e o seguinte sistema é assim obtido

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_{11} \\ \dot{\phi}_{12} \\ \dot{\phi}_{21} \\ \dot{\phi}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(\tau) & 0 \\ 0 & A(\tau) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{12} \\ \phi_{21} \\ \phi_{22} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

A função ϕ assim é calculada através de ferramentas de resolução de equações diferenciais (foi usada o método de Runge-Kutta no MATLAB) e as integrais Γ_k podem ser calculadas como:

$$\Gamma_k(i) = \varphi(\tau_k, 0) \int_{(i-1)\Delta\tau}^{i\Delta\tau} \varphi^{-1}(\xi, 0) b(\xi) d\xi \quad (3.37)$$

3.4 Resultados a içamento nulo

Uma análise inicial foi realizada com uma condição de altura de içamento nulo: não há variação da cota do içamento durante o percurso. As figuras abaixo mostram a aceleração do carro, a sua velocidade, a sua posição, o ângulo de balanço e a velocidade angular de balanço nessas condições.

Observa-se na figura 9.1 que o carro parte do repouso, com uma aceleração positiva. Logo há uma diminuição da velocidade, para compensar o efeito pendular da carga. No momento

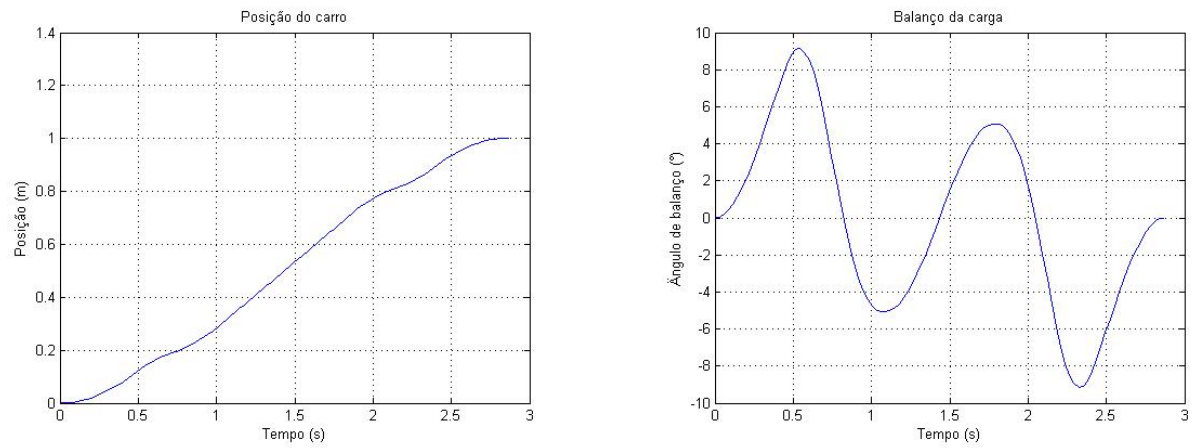


Figura 3.2: Posição do carro e ângulo de balanço a içamento nulo

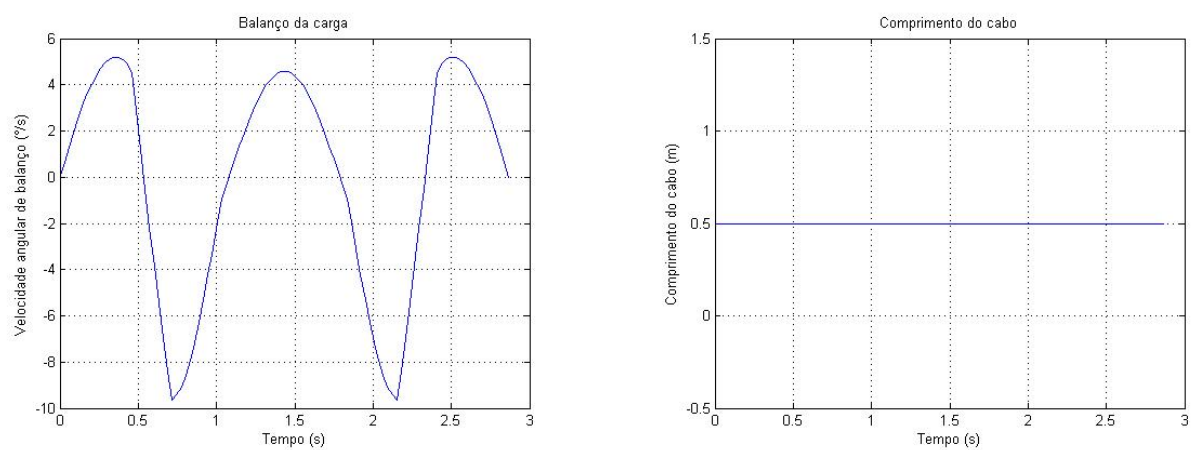


Figura 3.3: Velocidade angular de balanço e içamento a içamento nulo

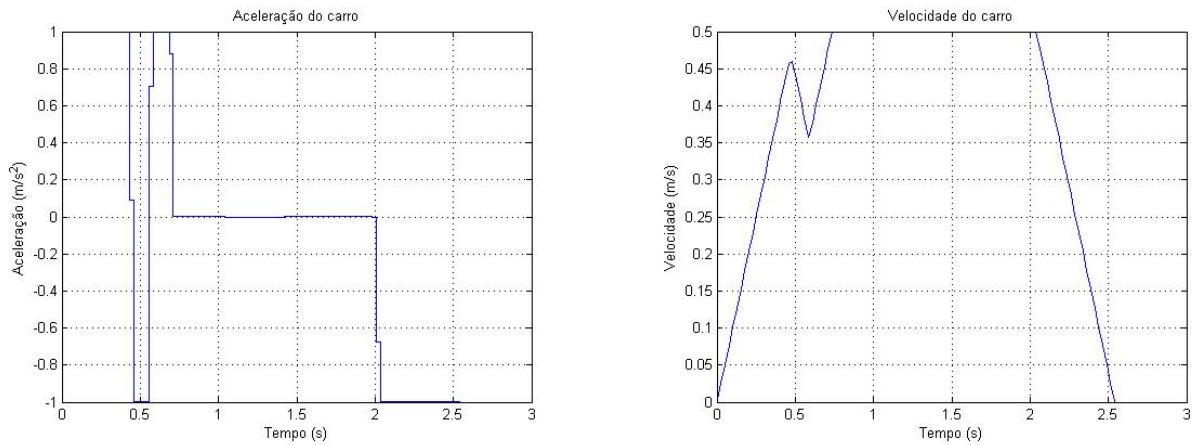


Figura 3.4: Aceleração e velocidade do carro a içamento variável

da parada, o comportamento é similar, com uma desaceleração não constante, de maneira a compensar o balanço da carga, conforme previsto e planejado.

Nas figuras 3.2 e 3.3 pode-se ver que a posição final da carga é a procurada, no fim do trilho, de comprimento 1 m, e a sua velocidade angular de balanço é nula, ou seja, a carga chega parada à posição final. Comprova-se pelo último gráfico que o içamento é constante.

3.5 Resultados com içamento variável

Foi realizada uma segunda simulação, com içamento variável, conforme mostra a figura 3.6. Neste caso, o transporte é conduzido a uma altura constante até a metade do trecho, onde a carga começa a ser baixada a uma taxa constante até o fim do trilho. O perfil de aceleração e velocidade, mostrados na figura 3.4 mostra como o algoritmo de otimização responde a isso: há uma desaceleração e posterior aceleração quando da mudança, de maneira a adequar a velocidade e consequentemente a posição do carro à nova situação. Como no caso anterior, todas as condições são obedecidas, ou seja, as velocidades angulares e lineares de partida e parada são nulas e o ângulo de balanço final é também nulo. A aceleração permanece dentro dos limites físicos e também a trajetória alcança o fim do trilho previsto.

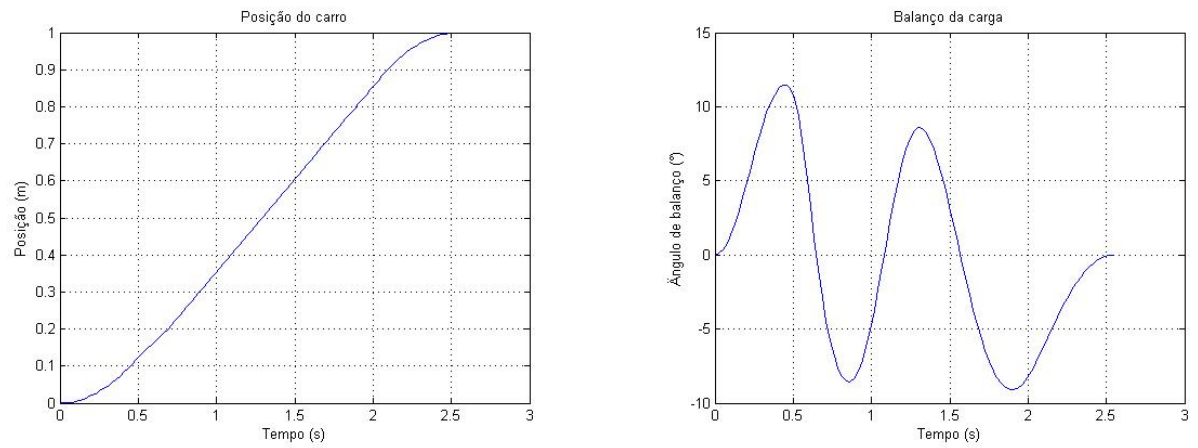


Figura 3.5: Posição do carro e ângulo de balanço a içamento variável

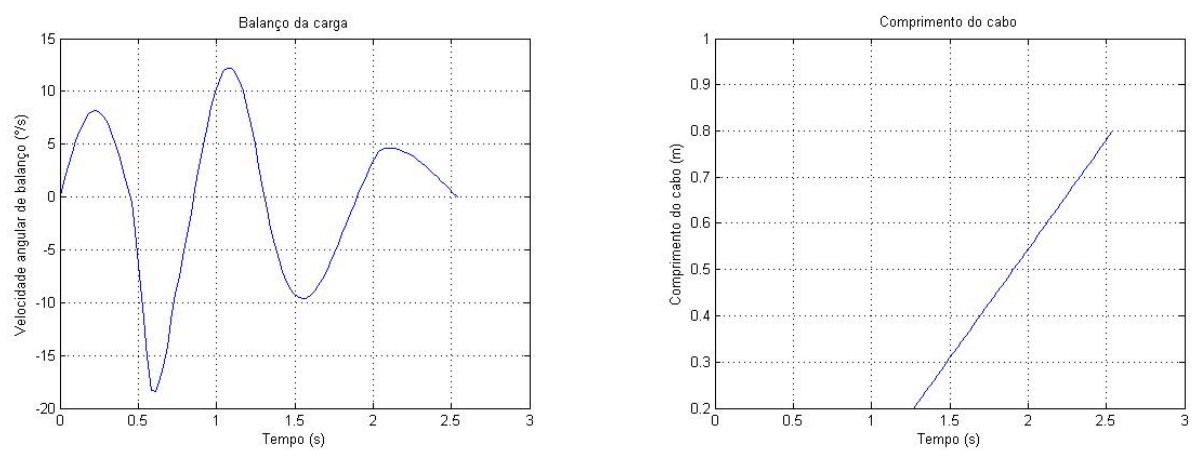


Figura 3.6: Velocidade angular de balanço e içamento a içamento variável

3.6 Validação dos resultados

Os resultados obtidos desta otimização foram validados na próxima etapa do projeto, o projeto e implementação de um simulador do sistema em MATLAB/Simulink, figura 3.7. Os dados da trajetória, velocidade e aceleração foram introduzidos neste modelo, que é independente de qualquer rotina utilizada na otimização, e a sua saída (ângulos de balanço e velocidades angulares) comparadas com a obtida pela etapa de otimização.

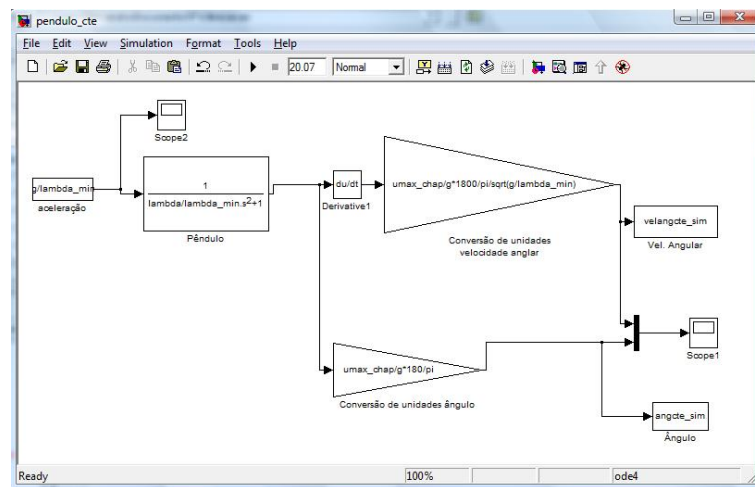


Figura 3.7: Simulação de balanço. Modelo em Simulink

Os ganhos presentes no modelo fazem a adequação do ângulo proveniente do bloco da função de transferência às unidades de engenharia, para um confronto futuro com os ângulos calculados pelo algoritmo de otimização.

3.6.1 Confrontamento entre resultados do simulador e da otimização

Os resultados da simulação estão apresentados na figura 3.8 e podem ser confrontados com os da otimização, apresentados integralmente na figura 3.3. Observa-se que o formato das curvas de ângulo e velocidade angular de balanço são condizentes com as encontradas na simulação. Há certas diferenças pequenas perceptíveis, causadas pelo método de integração utilizado na simulação e por arredondamentos do algoritmo de otimização.

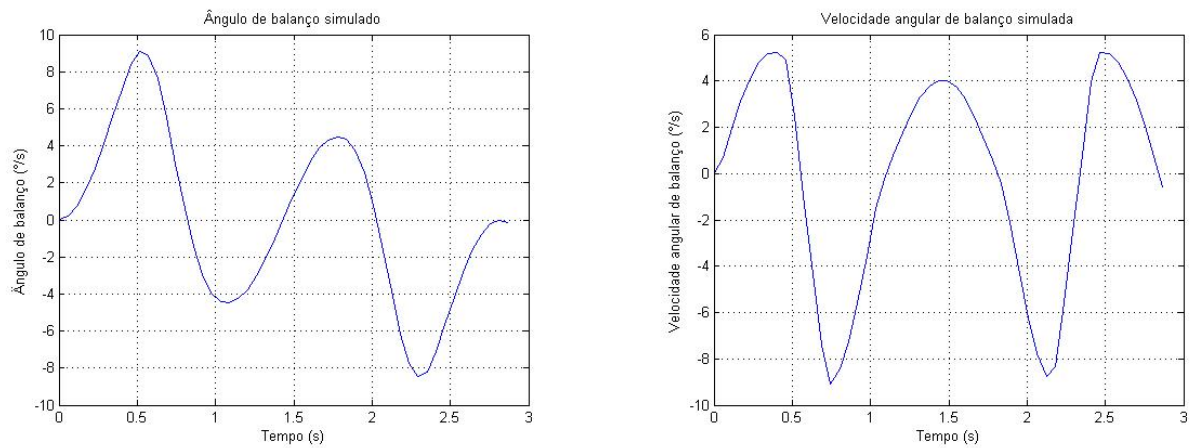


Figura 3.8: Ângulo e velocidade angular do simulador

3.7 Conclusão da etapa de otimização

Com os resultados da otimização já confrontados com os da simulação, considera-se que as curvas são adequadas para a atividade de controle do protótipo e serão estas curvas acima inseridas no modelo mecânico na última etapa do projeto.

Pode haver necessidade da inclusão de algum parâmetro, como atrito dinâmico, mas este pode ser adicionado nas rotinas de resolução dos sistemas de equação diferenciais presentes na otimização cujos códigos serão anexados ao relatório final do trabalho.

4 Eletrônica

A eletrônica é dividida em 2 partes: a interface e o controle dos servos.

4.1 Interface

Quando selecionado o modo de recepção a interface recebe os dados da trajetória gerada pelo programa de otimização e salva em uma memória do tipo EEPROM. Quando selecionado o modo de operação normal a placa envia as informações de trajetória as placas que controlam os servos e recebe através de um conversor analógico de 10bits os valores do potenciômetro que mede o ângulo da haste. Quando selecionado o modo de envio a placa envia os dados de ângulo que foram obtidos durante o percurso. Essa placa é composta por:

- Microcontrolador de 8 bits.
- Regulador de tensão de 5V. Garante a alimentação correta para o microcontrolador e do conversor de nível.
- Conversor de nível. Converte os níveis de tensão da porta serial do microcontrolador

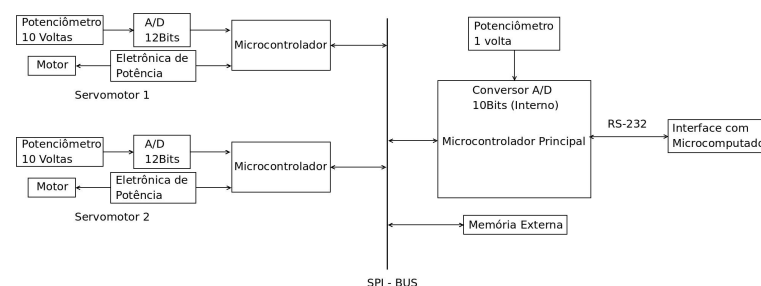


Figura 4.1: Diagrama de blocos

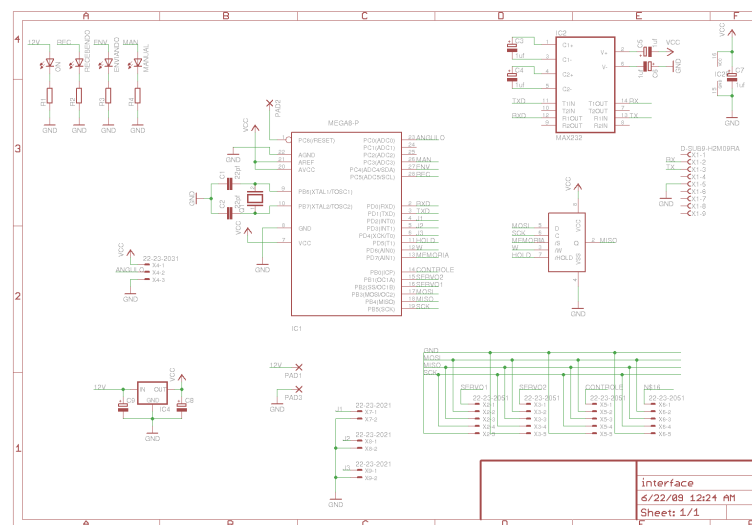


Figura 4.2: Diagrama lógico da placa de interface

que opera com os níveis 0V (para o nível 0 de informação) e 5V (para o nível 1 de informação) para os níveis de tensão da porta serial do computador que opera com os níveis 12V (para o nível 0 de informação) e -12V (para o nível 1 de informação).

- Memória EEPROM.

4.2 Controle dos Servos

Essa placa simplesmente recebe o "set-point" da placa de interface e executa o algoritmo de controle fazendo com o servo siga fielmente a trajetória determinada. Nessa placa também esta presente uma ponte-H para acionamento do motor. Essa placa é composta por:

- Microcontrolador de 8 bits.
- Conversor analógico digital de 12 bits.
- Conversor de tensão de 5V.
- Driver de ponte-H completa de MOSFETS canal N.

Em linhas gerais, a placa driver possui um circuito integrado HIP4082AIP, responsável por gerar as tensões de chaveamento de MOSFETs de potência, que disposto em configuração de

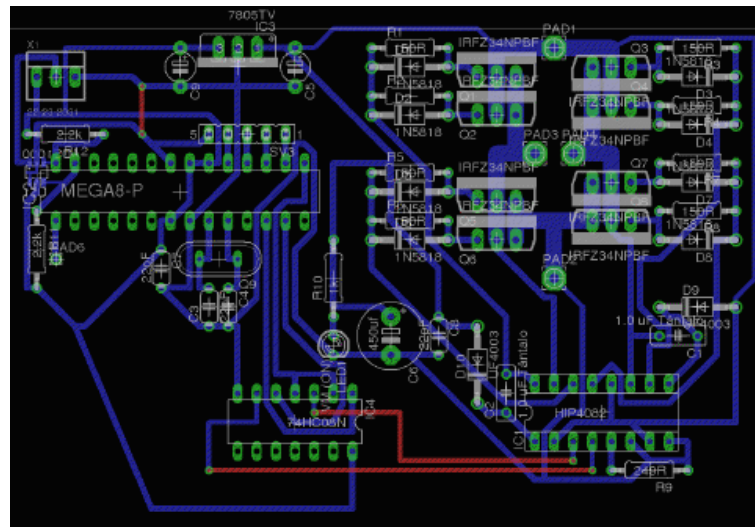


Figura 4.5: Layout da placa de controle dos servos

ponte-H permitem que o motor gire em um ou outro sentido. A velocidade é controlada através de sinais de PWM que são enviados aos MOSFETs pela placa de controle. Outros componentes (diodos, resistores e capacitores) são necessários como suporte ao driver e aos MOSFETs.

A seguir estão algumas fotos das placas montadas:

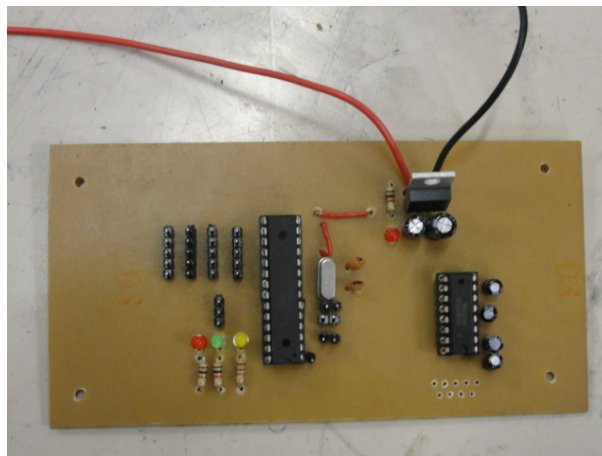


Figura 4.6: Placa de Controle

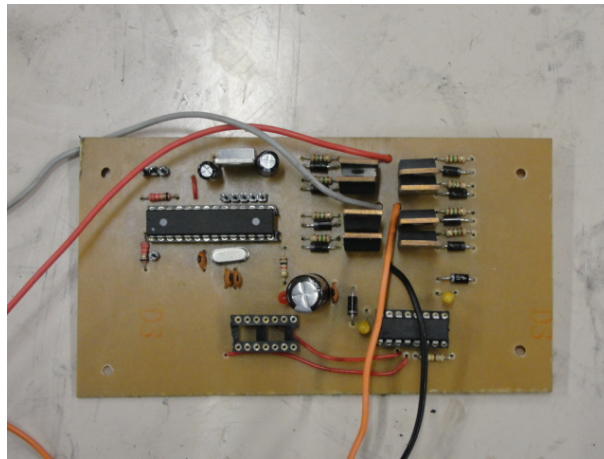


Figura 4.7: Servomotor

4.3 Alterações no projeto eletrônico

As placas fabricadas mostraram um comportamento instável durante a montagem do protótipo integrado. Havia certa insegurança quanto ao seu funcionamento e alguns problemas funcionais surgiram, esses problemas já era esperados pois a fabricação artesanal de placas de circuito impresso não tem a qualidade esperada para um projeto mais complexo. Para solucionar os impasses, as placas construídas foram abandonadas e foi utilizada a placa desenvolvida pela Equipe ThundeRatz de Robótica para controle dos motores dos robôs da categoria Hockey. As placas foram montadas com os componentes comprados pelo grupo deste projeto, já que eram compatíveis. Essas placas não recebem mais o *setpoint* da placa de interface e executa o controle do servomotor, agora elas recebem apenas o quanto de energia precisam fornecer ao motor. A placa de controle principal, que recebe os dados do computador teve que ser refeita, as principais alterações físicas no projeto são a troca da memória *EEPROM SPI* por uma memória *EEPROM I2C*, pois foi a que foi possível encontrar no comércio local, outra alteração foi a adição de um circuito integrado 74HC08 (porta lógica AND) para adaptar um único microcontrolador, com 2 saídas PWM a dois motores a ser controlados. No *software* embarcado ocorreram as mudanças mais complexas, a única placa que tem *firmware* agora é a de interface, além das funções de armazenar os *setpoints* ela recebeu a função de executar o controlador dos

servomotores.

Desa forma o diagrama de blocos da eletrônica ficou da seguinte forma:

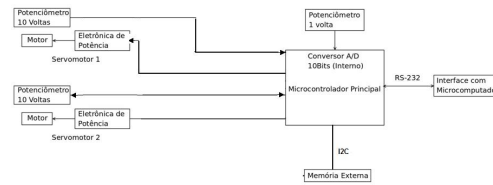


Figura 4.8: Novo diagrama de blocos

5 *Software*

O *software* que implementado realiza todo o controle do guindaste. É obrigação do *software* ler os arquivos gerados pela solução do problema de programação linear, enviar esses dados à placa de controle, ordenar a execução da trajetória, ler os dados da variação do ângulo e salvar em um arquivo.

O *software* pode ser dividido em duas partes: interface com o usuário e interface com a placa de controle.

5.1 Interface com o usuário

A interface com o usuário foi feita com o auxílio da biblioteca de interface gráfica **Qt4.5**, que é um conjunto de ferramentas para desenvolvimento de interface gráfica em C/C++, atualmente propriedade da Nokia. Essa biblioteca facilita a criação de interfaces gráficas. e o código pode ser compilado em diferentes plataformas. Estamos usando nesse trabalho a versão *open source*, que é gratuita. A interface foi feita de maneira intuitiva para o usuário, de modo que, mesmo sem conhecimento profundo sobre o sistema, consiga operá-lo sem dificuldades.

A seguir está uma foto da janela principal do *software*.

Controle anti-balanço de tempo mínimo de guindastes

Arquivos de Entrada

Eixo X

1 Posição **Abrir**

2 Velocidade **Abrir**

Eixo Y

3 Posição **Abrir**

4 **Carregar Arquivos**

5 **Os arquivos ainda não foram carregados!**

Pasta de Saída

6 **Abrir**

7 **ttyUSB0** **Porta de Comunicação** ☐ **Pegar Y** 0 **tempo entre os pontos [ms]**

10 **Enviar** 11 **Executar** 12 **Voltar** 13 **Receber Dados** 14 **Fechar**

Figura 5.1: Janela Principal do Software

- 1 Campo onde o usuário pode inserir o caminho para o arquivo onde estão os pontos da posição no eixo x.
- 2 Campo onde o usuário pode inserir o caminho para o arquivo onde estão os pontos da velocidade no eixo x.
- 3 Campo onde o usuário pode inserir o caminho para o arquivo onde estão os pontos de posição no eixo y.
- 4 Botão para carregar arquivos.
- 5 Caixa onde aparecem avisos.
- 6 Campo para selecionar o caminho onde serão salvo as saídas.

7 Caixa de seleção de porta serial. As portas selecionáveis são

- *ttyS0*, primeira porta serial do computador, relativa a *COM1* em ambiente *Windows*
- *ttyS1*
- *ttyS2*
- *ttyS3*
- *ttyUSB0*, primeira porta serial proveniente de conversor *USB/SERIAL*.
- *ttyUSB1*
- *ttyUSB2*
- *ttyUSB3*

8 Botão para pedir a posição do eixo Y.

9 Caixa para selecionar o tempo entre os pontos.

10 Botão para enviar os dados para a eletrônica.

11 Botão para mandar executar a trajetória executada.

12 Botão para mandar voltar a posição inicial.

13 Botão para receber os dados da eletrônica após a execução da trajetória.

14 Botão para fechar o programa.

5.2 Interface com a placa de controle

A interface com a placa de controle é feita através da porta serial do computador. Nas rotinas onde a comunicação serial leva um tempo considerável foi necessária a criação de uma *thread* secundária responsável apenas com a comunicação. *Thread* é uma linha de execução de *software*, essa segunda executa operações independente da principal e a principal continua sua execução normal enquanto a secundária lida com a comunicação serial. A criação da *thread* secundária foi necessária, pois, sem ela, o software travava.

6 *Firmware*

Como a eletrônica foi alterada a firmware teve que ser repensada. Como somente a placa de comunicação tem um microcontrolador o firmware dessa placa ficou responsável por todas as operações da eletrônica. A primeira função do firmware é a troca de dados com o computador, a segunda função é o calculo dos controladores dos servomotores, a terceira é executar a trajetória trocando os setpoints de acordo com o tempo estipulado e por último ao longo da trajetória armazenar os valores dos angulos.

Os códigos fontes tanto do software quanto do firmware serão disponibilizados em um CD.

7 Projeto mecânico

O projeto mecânico tem como objetivo oferecer totais condições para a implementação do controlador. Construtivamente, o protótipo é dividido em estrutura, guia linear, um acionador de movimentação para cada eixo (servo-motor) e o guindaste. Neste item serão descritas as características fundamentais de cada subsistema mecânico.

7.1 Estrutura

As dimensões da estrutura foram concebidas com a suposição de que existe a necessidade de um tempo de percurso que permitisse uma boa observação do movimento e concomitantemente não fosse desnecessariamente grande. Então determinou-se que o protótipo teria aproximadamente 1000 mm X 600 mm X 500 mm.

O principal cuidado ao se projetar uma estrutura é a rigidez, que determina as frequências de ressonância da estrutura.

7.1.1 Estudo das frequências de ressonância

O guindaste tem comprimento variável. Então calculou-se a frequência de excitação, realizada pelo guindaste modelado como um pêndulo, para um comprimento de cabo de 10 mm, o pior caso.

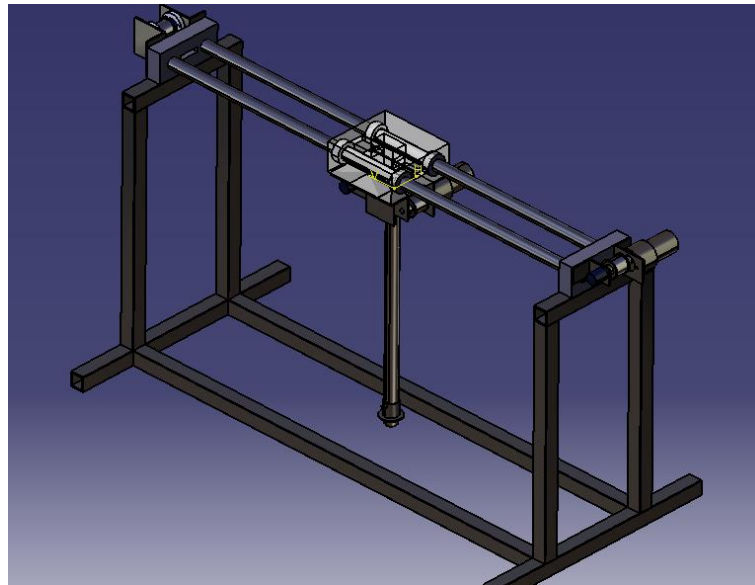
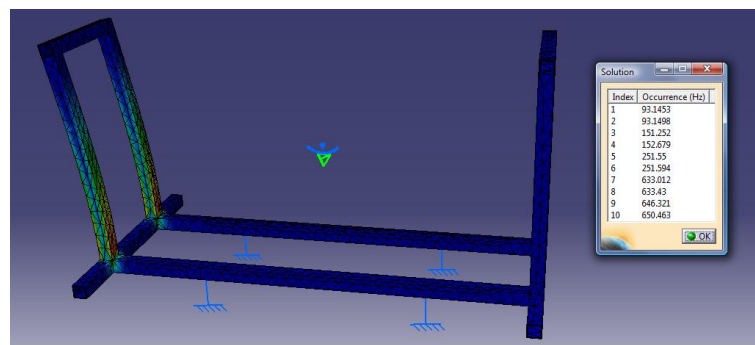


Figura 7.1: Desenho de conjunto



$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{g}{l} \right)^{0,5} \quad (7.1)$$

$$f = 4.98 \text{ Hz} \quad (7.2)$$

Calculando a frequência natural da estrutura por Métodos de Elementos Finitos (MEF) obtém-se 93 Hz. Logo, a estrutura está livre de problemas devido às excitações impostas pelo guindaste.



Figura 7.2: Estrutura construída

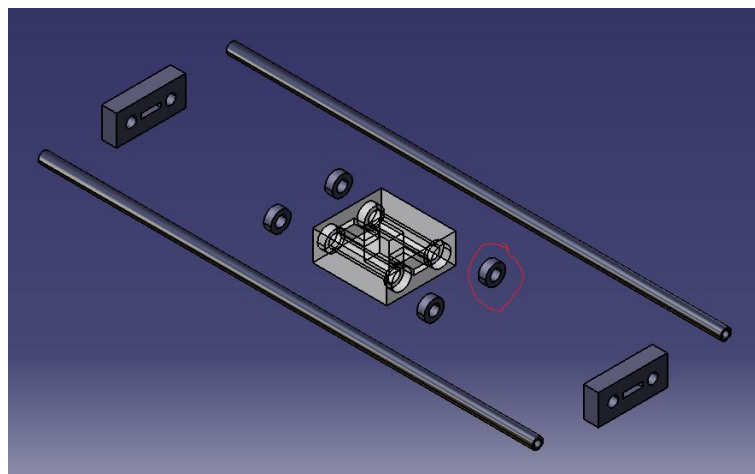


Figura 7.3: Buchas de teflon na montagem da guia

7.1.2 Construção da estrutura

A estrutura, conforme projeto, foi construída com perfis quadrados de aço com espessura de 2 mm. Após o corte dos perfis no tamanho adequado, foi realizada a solda, o esmerilhamento das áreas soldadas e uma posterior pintura da estrutura, afim de evitar problemas com corrosão. A figura 7.2 mostra o resultado final da estrutura montada do protótipo.

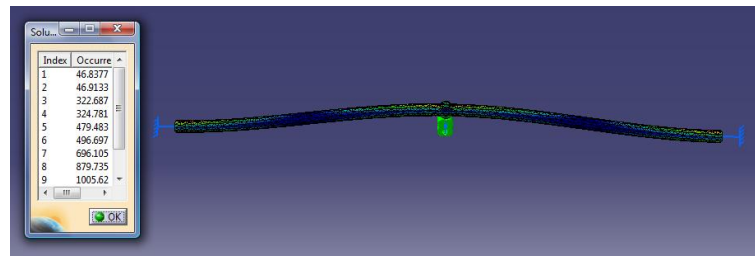


Figura 7.4: Frequências de ressonância da guia

7.2 Guia Linear

A guia linear tem a função de conduzir o pêndulo na direção de movimento que será o alvo da otimização e deve ter menor coeficiente de atrito possível. Por tal motivo, usam-se buchas de teflon no contato da barra da guia com o bloco. Além disso, assim como a estrutura, deve ter frequências de ressonância maiores que 5 Hz. Também por MEF, calculou-se a frequência de ressonância da barra, considerando-se uma massa de 2.5 Kg concentrada no centro daquela.

7.3 Acionador de movimentação

O servomotor será fabricado com um potenciômetro e um motor de corrente contínua. O objetivo da montagem é garantir que a posição angular do potenciômetro será a mesma que a do eixo do motor a todo instante e que o curso do potenciômetro cubra toda a distância a ser percorrida pela massa do pêndulo.

Para a direção X (paralela à guia), o potenciômetro será acoplado no eixo do motor e uma polia dentada será utilizada para transmissão do movimento para o bloco da guia linear.

Como os esforços envolvidos no movimento são pequenos, a única restrição no dimensionamento é geométrica. Pretende-se que o protótipo se movimente 950mm e para medir esse movimento, o potenciômetro realiza até dez voltas. Portanto, a polia deve ter um diâmetro mínimo de 30,3 mm. Pelo catálogo do fabricante, (3) o diâmetro mais próximo é 15,33 mm.

Para a direção Y (perpendicular ao movimento da guia), não se pode prender o potenciômetro no eixo do motor por causa do sistema de elevação da massa. Se adotássemos a mesma

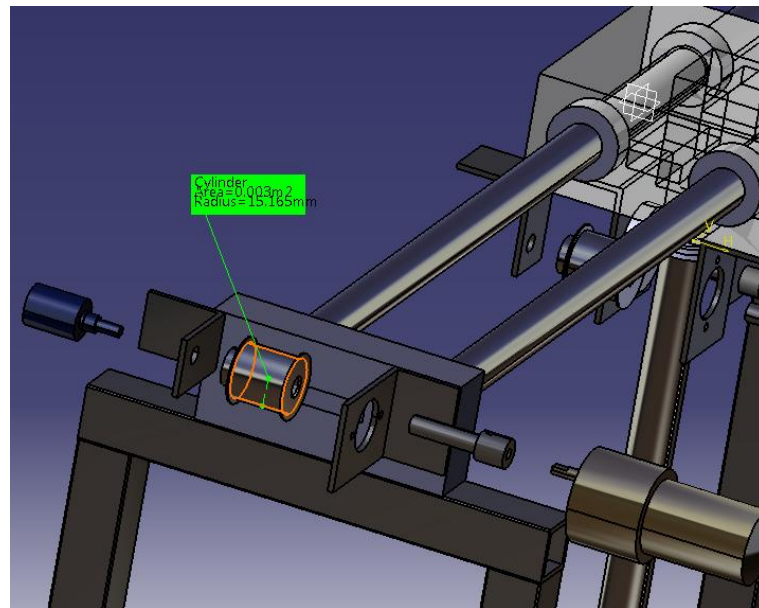


Figura 7.5: Montagem do Servo-Motor

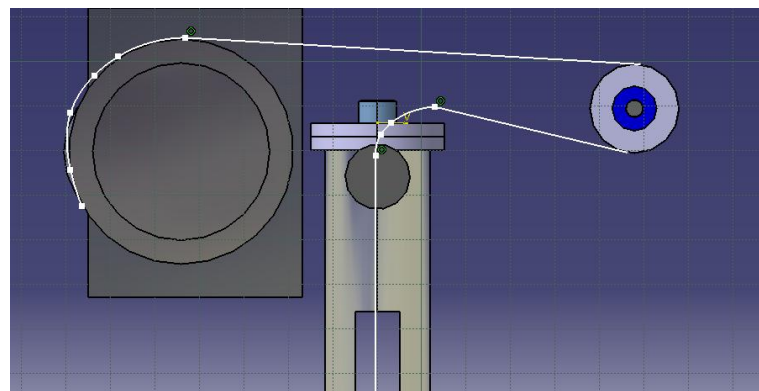


Figura 7.6: Esquema de Medição do Deslocamento em Y

estratégia do outro servo-motor, o cabo utilizado começaria a se sobrepor ao cabo enrolado sobre a polia na volta anterior e dessa forma, perde-se a acuidade da medida do potenciômetro.

Esse problema é resolvido pela adoção de uma correia dentada pequena como cabo e fazendo esta passar por uma polia que gira presa ao potenciômetro solidário a rolamentos. Para garantir um bom agarramento da correia na polia, projetou-se de forma que a correia envolva a polia ao máximo.

Para proporcionar um escorregamento adequado da correia na saída do tubo do pêndulo, serão colocadas tiras de teflon na região por onde o cabo passará.

O dimensionamento desta polia é análogo à anterior. A massa dever percorrer 500 mm nas

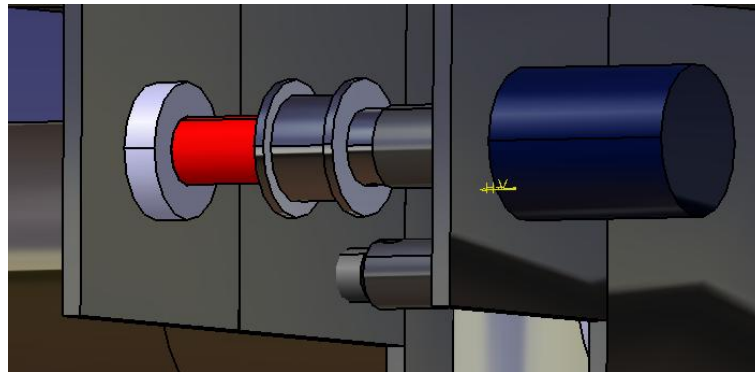


Figura 7.7: Montagem do Potenciômetro

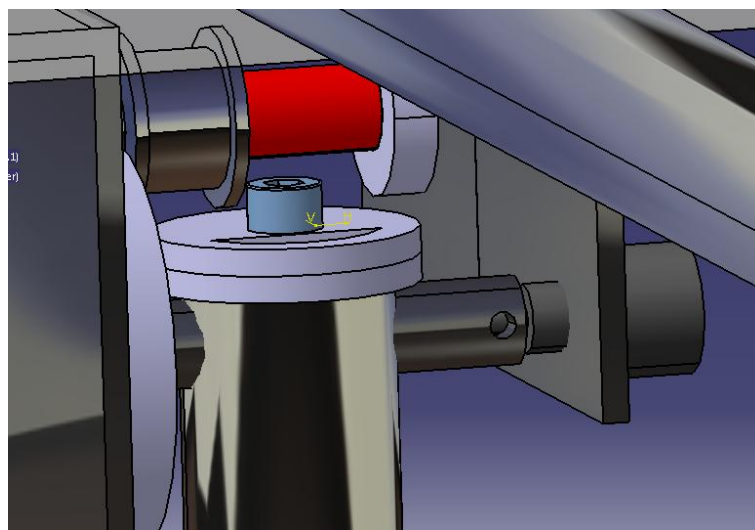


Figura 7.8: Fixações do Guindaste

mesmas dez voltas do potenciômetro. Ao motor é fixada uma polia que funciona como carretel, enrolando o cabo.

7.4 Guindaste

O guindaste é constituído do cabo de elevação de uma barra de alumínio solidária a um eixo que a conecta ao potenciômetro, que medirá o ângulo do pêndulo. Ao cabo será presa a massa de teste.

O tubo é preso ao eixo por um parafuso e uma peça de encaixe que possui uma abertura para a passagem do cabo e o potenciômetro, é fixado ao eixo pressionado por um segundo parafuso.

A massa de teste é fixada em um suporte que corre em toda extensão da barra através de dois

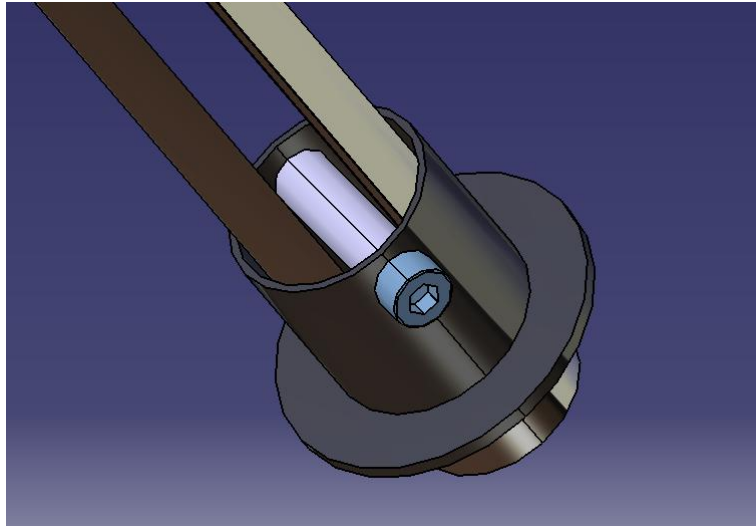


Figura 7.9: Fixação da Massa de Teste

rasgos feitos no tubo. O suporte é guiado por um pino que consiste em um parafuso envolvido em teflon para diminuir eventuais atritos.

O maior problema do guindaste consiste na frequência natural da barra. Quando colocamos uma massa de 2,5 Kg na sua extremidade, o pêndulo assume uma frequência de ressonância de aproximadamente 6 Hz.

Contudo, nessa posição a frequência de excitação realizada pelo pêndulo é de 0,76 Hz. Considerando o outro caso extremo, a barra assume 41,5 Hz. Portanto o sistema não apresentará problemas de ressonâncias na haste do pêndulo.

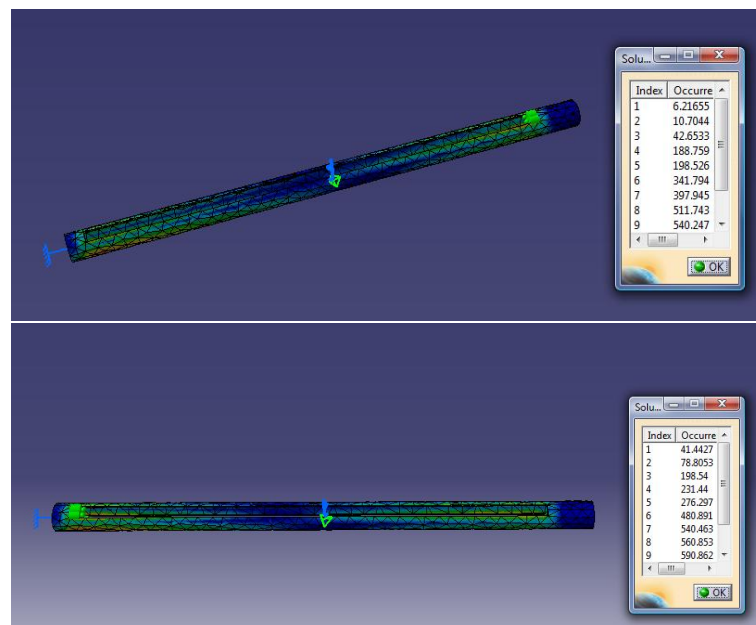


Figura 7.10: Frequências Naturais com 2.5kg na extremidade

8 Construção do Protótipo

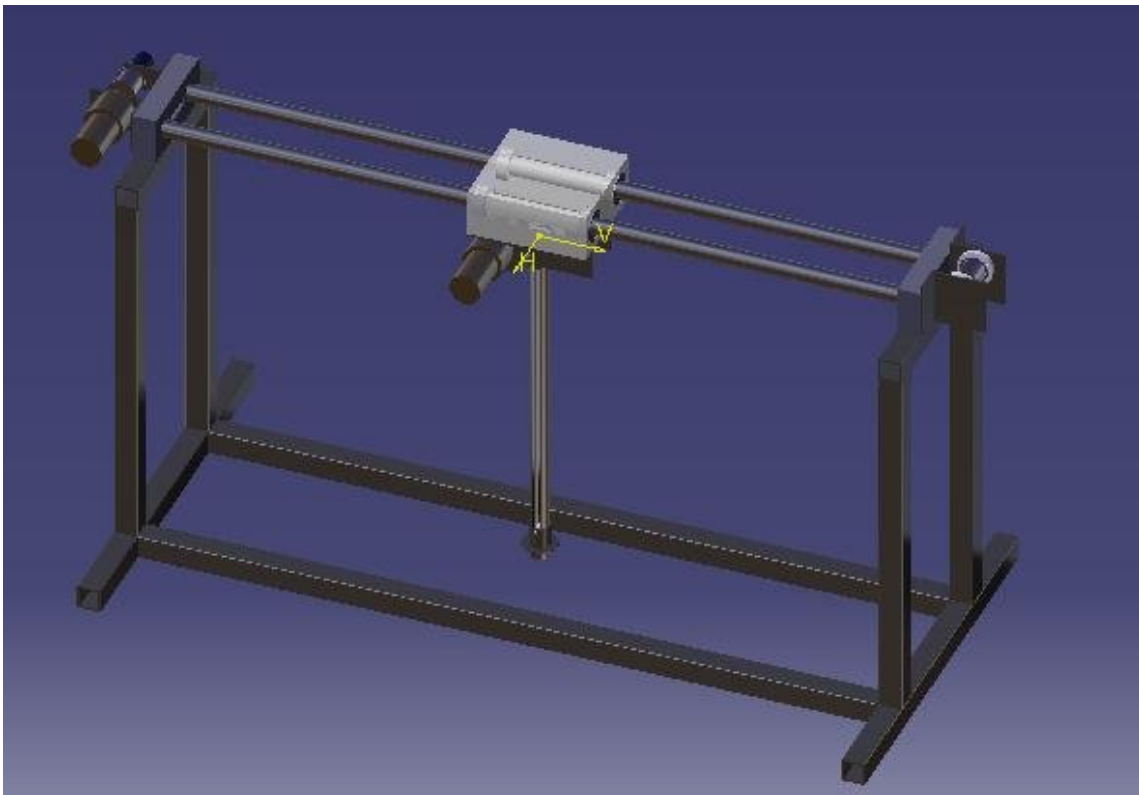


Figura 8.1: Projeto do Protótipo

Nesse capítulo, o objetivo é mostrar como foi feita a construção mecânica do protótipo. Pode-se subdividir a manufatura mecânica em soldagem da estrutura, usinagem da guia linear e eixos, montagem da guia linear, montagens dos motores e manufatura do pêndulo.

No tempo total planejado para a construção, despendeu-se mais tempo na usinagem por ser a etapa lenta da construção: há a necessidade do uso prolongado de torno e fresadora, máquinas com disponibilidade limitada, além das peças necessitarem de maior precisão para ser fabricadas. Ainda, algumas modificações foram realizadas no projeto para adequar-se a

construção às ferramentas disponíveis (diâmetros de brocas e serras-copo, ferramentas para torneamento e fresas).

Quanto aos eixos, todos foram fabricados sem alterações em relação ao projeto inicial. Abaixo, segue uma foto dos eixos terminados.



Figura 8.2: Eixos do protótipo

Quanto à guia linear, foram feitas duas alterações. O tubo de alumínio de 22mm de diâmetro externo e 3mm de parede foi substituído por um cilindro maciço de 3/4 de polegada devido a dificuldades para se conseguir uma broca com tal medida. A outra modificação, ocorrida pela falta de uma fresa de 40mm, foi não embutir as buchas de teflon dentro do bloco da guia linear.

Tais alterações não influenciam negativamente o comportamento mecânico do protótipo. A primeira alteração aumenta a rigidez do sistema, isso é bom por aumentar o coeficiente de segurança para evitar efeitos de ressonância, mas o protótipo se torna um pouco mais pesado. A segunda alteração tem efeito meramente estético. Abaixo, tem-se o projeto da peça e peça real.

Vale dizer que adaptações na construção devido à disponibilidade de ferramentas são interessantes. Desde que não se comprometa a funcionalidade do protótipo, o custo diminui bastante. Para que se tenha uma noção de custo, uma broca com 20mm de diâmetro custa por volta de R\$ 100,00. Caso não quiséssemos trocar o tubo da guia linear, seria necessário um

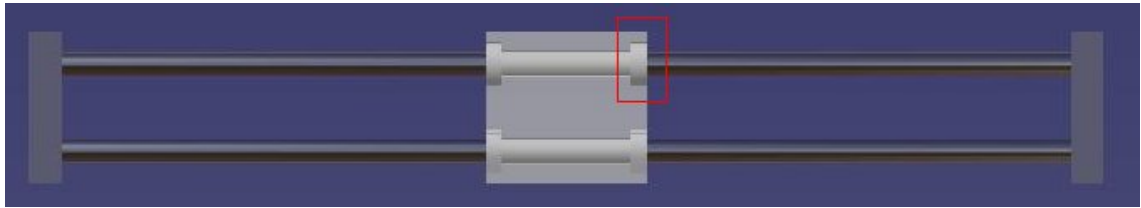


Figura 8.3: Projeto da guia linear. Destaque para as buchas de teflon embutidas

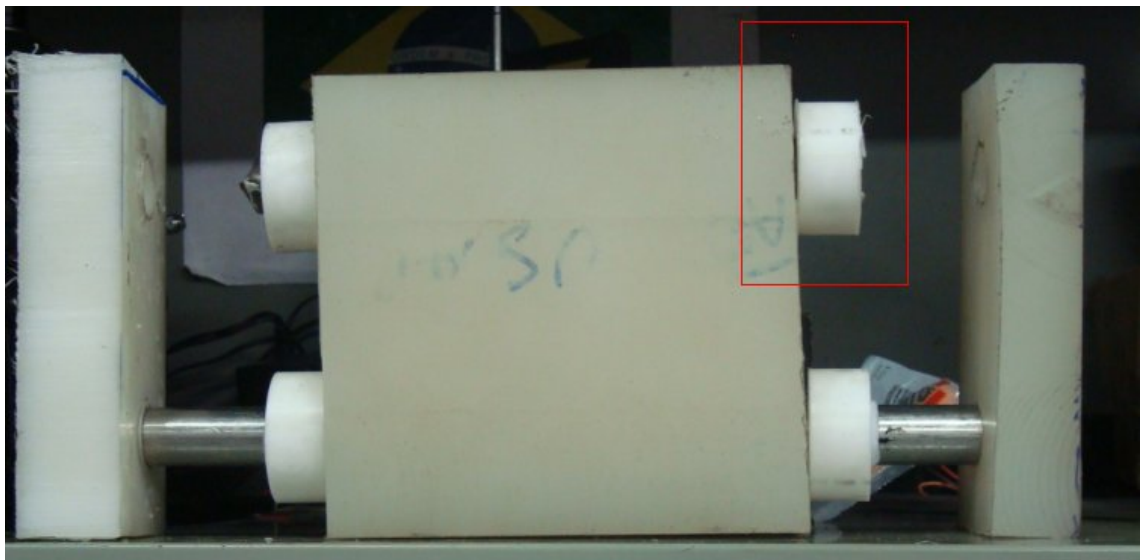


Figura 8.4: Peças da guia linear, destaque para as buchas de teflon



Figura 8.5: Guia Linear montada, sem o bloco



Figura 8.6: Posição do sistema de movimentação no protótipo

gasto de R\$ 200,00 em brocas. Portanto, no fim do projeto, o gasto com ferramentas no projeto todo seria de cerca de R\$ 1000,00.

8.1 Alterações no projeto

A construção mecânica seguiu-se com problemas de obtenção de ferramentas. Para contornar esse problema, a estratégia de fazer pequenas alterações no projeto para facilitar a manufatura de peças foi mantida. A principal modificação foi a mudança da posição do sistema de movimentação do bloco da guia linear. Demais alterações foram feitas em cotas nas quais a tolerância era bem alta.

Com isso a correia puxa o bloco de forma a impor um pequeno conjugado. Entretanto, pelos testes feitos, esse conjugado mostrou-se desprezível e o movimento é bem realizado pelo motor.

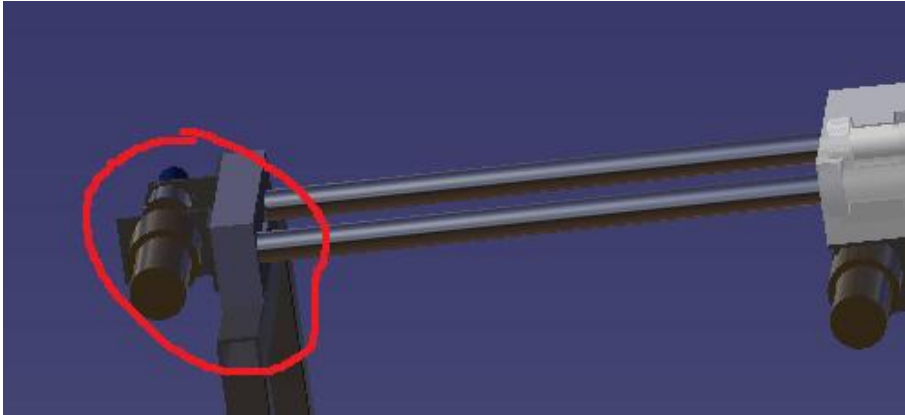


Figura 8.7: Posição do sistema de movimentação no projeto (CAD)

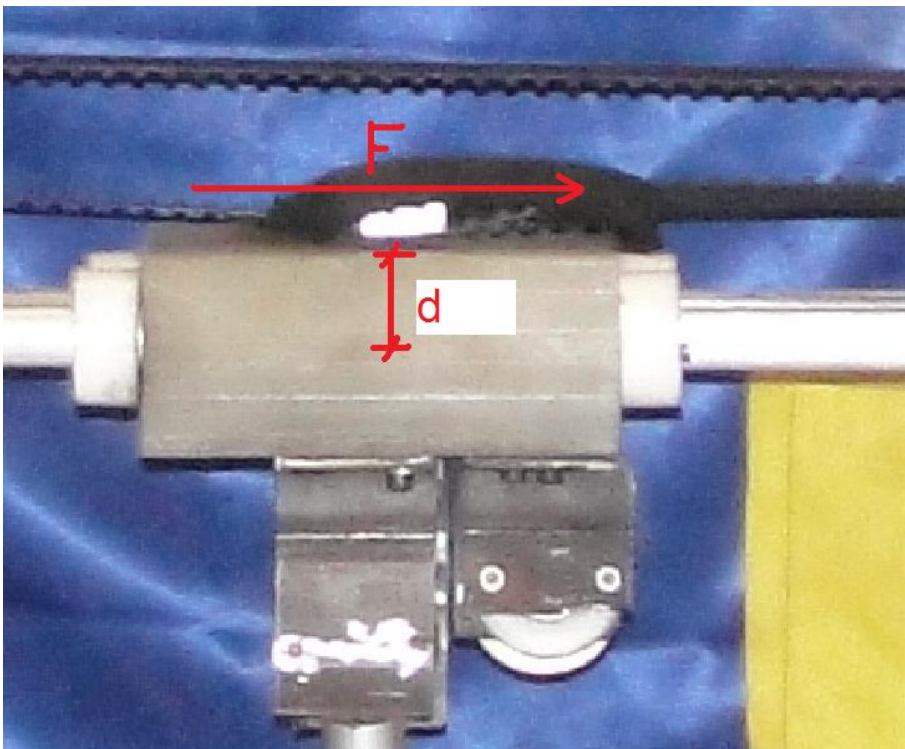


Figura 8.8: Momento no bloco da guia linear

8.2 Fotos do protótipo terminado

As imagens a seguir mostram o guindaste finalizado. Algumas pequenas alterações fizeram-se necessárias, como a introdução de rolamentos nos suportes dos potenciômetros, para que estes não se danificassem com algum desalinhamento do motor.

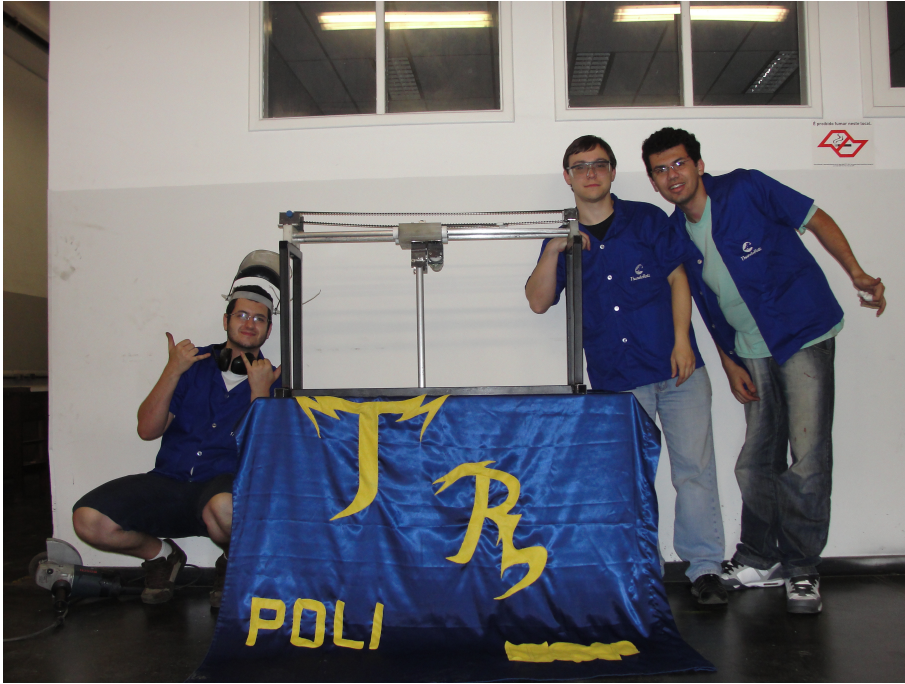


Figura 8.9: Foto geral 1

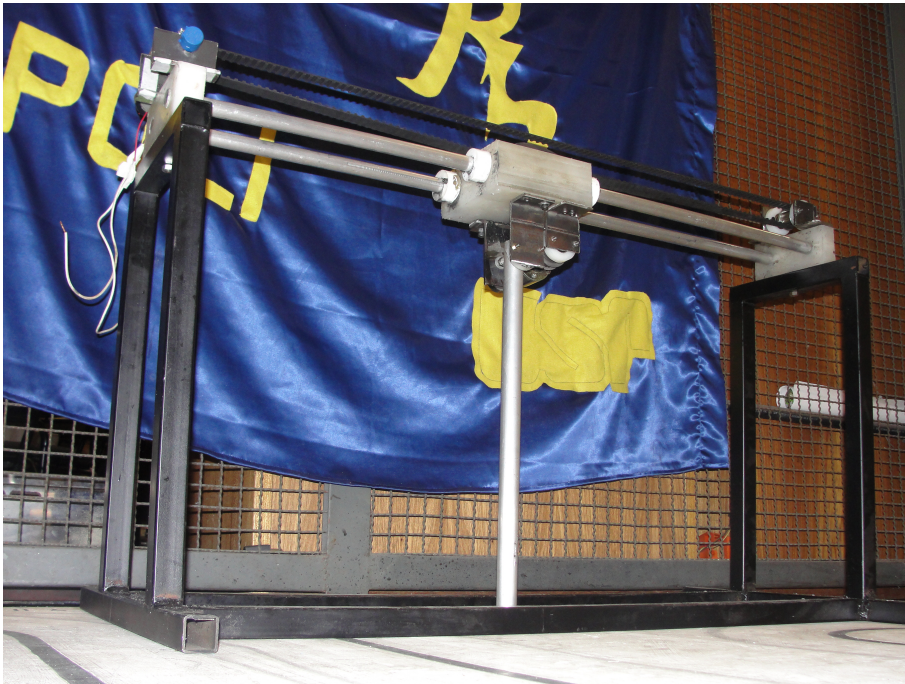


Figura 8.10: Foto geral 2

9 Resultados finais e conclusões

9.1 Resultados finais

9.1.1 Situação atual do projeto

Houve alguns problemas na construção mecânica do protótipo, advindos de falhas de projeto, que impossibilitaram a conclusão total dos objetivos propostos. Explicados em maior detalhe a seguir, não foi possível implementar o içamento da carga, por problemas de atrito e pela disposição das peças no carro. Foi testada a trajetória de otimização a içamento constante e observaram-se resultados muito positivos, no sentido de validar a otimização realizada, como será mostrado a seguir.

9.1.2 Efeitos da velocidade e aceleração máximas na otimização

Não era possível determinar a velocidade e a aceleração máximas do carro após a montagem do protótipo, por motivos práticos. Assim, diversas trajetórias, com várias acelerações e velocidades foram utilizadas e observou-se qual era compatível com o sistema, ou seja, qual produzia o resultado esperado.

Esperava-se que a velocidades baixas, a otimização funcionasse sem maiores dificuldades, afinal não representaria nenhum esforço muito grande ao motor. Porém, não foi como esperado, já que o atrito no trilho era muito alto, especialmente a sua componente estática, evidenciada a velocidades baixas. A velocidades altas, o atrito era bem menor e permitiu a observação perfeita do comportamento anti-balanço desejado. As melhores condições de velocidade e aceleração máximas encontradas foram:

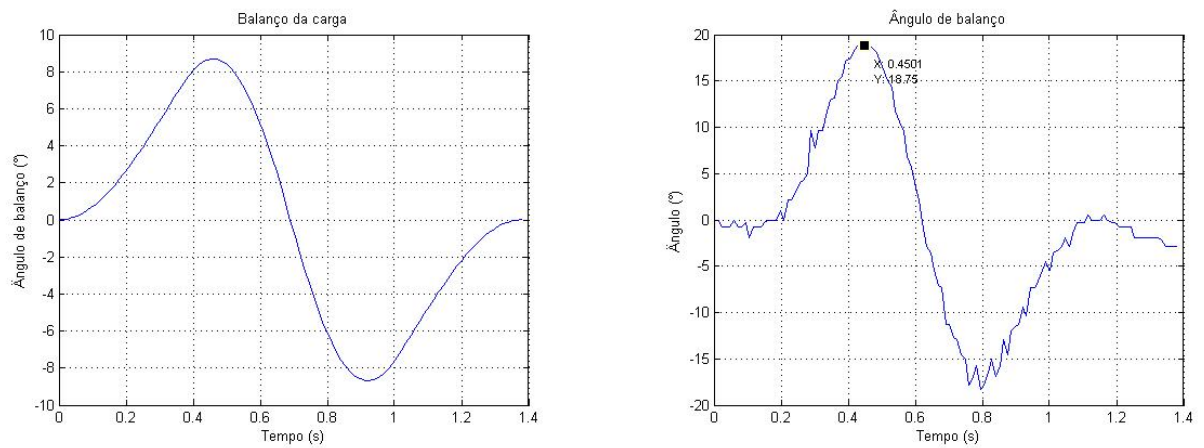


Figura 9.1: Comparação entre o balanço esperado e o medido pelo potenciômetro solidário ao eixo

- Velocidade máxima: 2 m/s
- Aceleração máxima: 2 m/s

9.1.3 Resultado final da otimização

Essa combinação de premissas produziu uma trajetória que estabilizou a carga em 1,83 s. A figura ?? mostra o balanço da carga medido pelo potenciômetro solidário ao eixo.

Observam-se oscilações máximas de 18,75 graus durante o percurso, o que é mais do que o esperado (menos que 10 graus), porém justificável pela alta velocidade adotada. O gráfico mostra que a carga, ao final da otimização é estabilizada. Qualquer valor constante do balanço após a estabilização é resultante de descalibração do potenciômetro, problema constatado durante testes no protótipo. Pode se observar uma estabilização total quando da realização dos experimentos.

10 Conclusões

10.1 Modelagem, programação e otimização

Observou-se, a içamento constante, que a carga foi corretamente estabilizada, mesmo sem feedback do ângulo de balanço. Ainda mais, com ângulo de balanço próximo dos 20 graus, a linearização utilizada já tem a sua validade perdida e mesmo assim o comportamento do experimento foi satisfatório, o que evidencia a robustez do procedimento adotado.

10.2 Mecânica

A análise do protótipo será dividida em duas partes. A primeira parte comenta a movimentação do carro na guia linear e a segunda versa sobre o sistema de içamento. Serão expostas considerações de manufatura, desempenho e sugestões para futuros projetos no mesmo contexto.

10.2.1 Movimentação do carro na guia linear

A guia linear apresentou, durante a fabricação, alguns problemas de precisão. Tais problemas tiveram origem na falta de prática do operador das máquinas e na obtenção de ferramentas. Como o projeto não requer precisão de posicionamento e o atrito entre o carro e o tubo da guia deve ser mínimo optou-se por utilizarem-se folgas maiores.

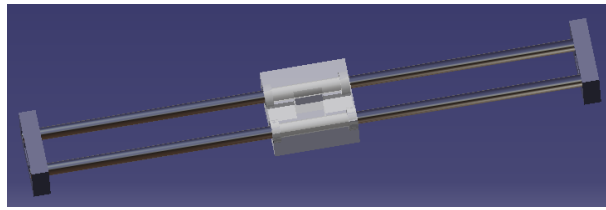


Figura 10.1: Guia linear - Carro na cor branca e tubos na cor cinza

Durante os testes o sistema de movimentação do carro teve um excelente desempenho em velocidades mais altas, próximas a 2m/s. Em velocidades baixas, 0.5 m/s, o atrito gerado atrapalha o controlador, mas ainda assim o protótipo funcionou dentro da tolerância.

Como sugestão para próximos trabalhos, seria ideal diminuir as imprecisões de manufatura, embora fatalmente o custo se eleve. No mercado estão disponíveis rolamentos especiais para guias lineares que proporcionam um movimento com atrito bastante baixo.

10.2.2 Sistema de içamento

A fabricação do sistema de içamento seguiu com problemas de precisão. Durante os primeiros testes, houveram problemas com a correia utilizada. Foi constatado muito atrito entre esta e o tubo do pêndulo. Então substituiu-se por cordão e o sistema de elevação passou a funcionar. Como consequência, a polia sincronizada foi substituída por uma polia tipo "V".

O sistema de içamento projetado não ficou compatível com o sistema eletrônico. A utilização de um servomotor no içamento exige que haja rigidez na transmissão de movimento para a carga tanto no aumento quanto na diminuição do comprimento do cabo. Isso porque no controle da posição o erro pode ser negativo ou positivo. Como se adotou apenas um cabo para elevação, esperava-se que a força da gravidade mantivesse o fio esticado quando o controlador abaixasse a massa do pêndulo. Mas isso não ocorreu devido ao atrito. Então, para validar o protótipo, em vez de controlar o comprimento do cabo, é imposta à carga uma velocidade constante até a cota desejada e após a velocidade de içamento é mantida nula.

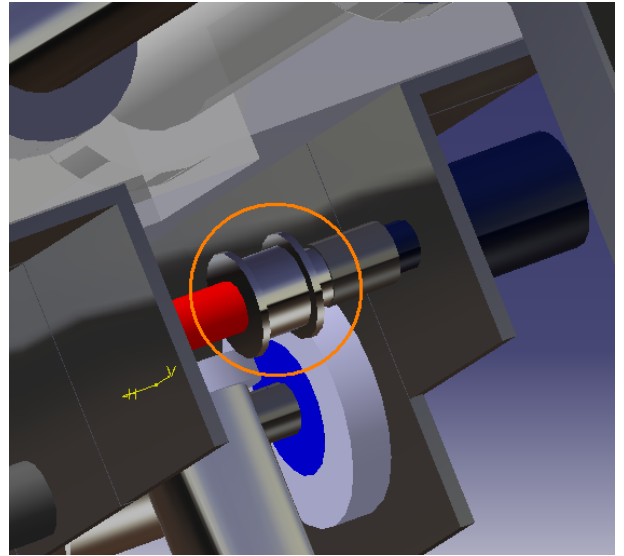
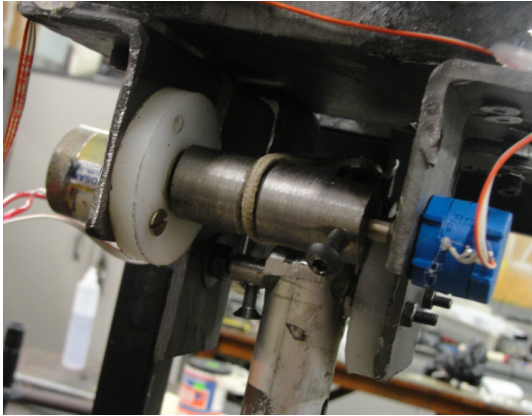


Figura 10.2: Polia em V e Polia sincronizadora

10.3 Sugestões para continuidade do projeto

O grupo sugere as seguintes abordagens e passos para a continuação do projeto e a sua extensão:

10.3.1 Otimização

Na frente de otimização, podem ser determinados os instantes de troca entre os valores máximos e mínimos de aceleração, de maneira a garantir que o trajeto seja o de tempo mínimo.

Alguma outra restrição poderia ser adicionada ao problema de programação linear, como uma restrição ao ângulo de balanço durante o trajeto ou até mesmo que em algum trecho o ângulo seja nulo. Lançando mão dos programas e da descrição da teoria apresentados neste trabalho, tais complementos não são de difícil implementação.

Quanto ao modelo, inserir coeficientes de atrito pode ser útil para garantir um bom funcionamento a baixas velocidades, o que não aconteceu como esperado.

10.3.2 Software

O software se mostrou muito estável e fácil de usar, sem muitas alterações é possível usa-lo em trabalhos que sejam uma continuação desse. Como a biblioteca usada para criar a interface é mantida por uma grande organização e é bem documentada, qualquer pessoa com conhecimentos de programação em C/C++ pode fazer as alterações necessárias.

10.3.3 Firmware

Os controladores dos servos não utilizam as referências de velocidade, usar essas referências seria uma ótima alteração a se fazer em versões futuras. Referências para programação do microcontrolador usado no projeto podem ser encontradas no site do fabricante (www.atmel.com), em um fórum muito movimentado, onde é possível encontrar diversas informações sobre o microcontrolador em questão e outros dispositivos da mesma série (www.avrfreaks.net) e no pdf que está no CD (C programming for microcontrollers).

10.3.4 Eletrônica

A eletrônica funcionou muito bem depois das alterações feitas. O próximo passo para melhorar essa parte seria a confecção de uma nova placa de interface, usando metodos melhores que solda em placa perfurada. A eletrônica de potência, como de esperado, pois era um projeto feito para trabalhar em condições muito piores do que a do projeto de formatura , funcionou perfeitamente, mesmo sem refrigeração forçada.

10.3.5 Mecânica

Fica como sugestão para trabalhos futuros a pesquisa de cabos de aramida. Um tipo de aramida comum é o tecido balístico desenvolvido pela Dupont chamado Kevlar. Como este material possui uma resistência muito alta, cerca de dez vezes maior que um cabo de aço, consegue-se utilizar um cabo de içamento com um diâmetro pequeno e assim realizar a medição do comprimento do cabo com um sensor preso no eixo do motor, pois não há sobreposição de

fios após várias voltas. Isso dificultaria a medição da elevação já a cada volta do motor o diâmetro da camada de cabo aumentaria.

APÊNDICE A – Análise da bibliografia

A.1 Regelungstechnisches Praktikum II: Versuchsanleitungen

A apostila do laboratório de controle II da Technische Universität Darmstadt, da Alemanha, apresenta um problema de controle anti-balanço de um guindaste semelhante ao deste projeto.

Junto com o relatório da experiência do guindaste, realizada em 2008, foi possível conferir alguns cálculos da modelagem do sistema e comparar o modelo deste projeto, que tem a trajetória do motor do carro como entrada, com o modelo da experiência, que tem a tensão no motor do carro como entrada. Na experiência, a trajetória além de não considerar mudanças na altura da massa é simplesmente uma linha do começo ao final do trilho do guindaste, não há problema algum de otimização de tempo.

A experiência mostrou que alguns fatores influenciam muito a qualidade final do controle, especialmente alguns movimentos da massa em eixos que não eram levados em consideração, já que esta era presa ao carro por meio de um cabo de aço. Tal problema não ocorrerá neste projeto, pois o movimento da massa está limitado a um grau de liberdade, já que ela é presa por uma barra ao carro.

Erros nesta experiência advinham de vibrações na estrutura e de erros de quantização do ângulo de balanço da massa. Ambos foram bem corrigidos utilizando um filtro simples de segunda ordem.

Outros aspectos do controlador de malha fechada utilizado são discutidos, mas irrelevantes a esse projeto, que utilizará um controlador de malha aberta.

Ainda nesta apostila há algumas regras (Chuen, Hrones e Reswick) para sintonia de controladores P, PI e PID que podem ser utilizados nos servos.

A.2 Control of Drives

A apostila do curso de controle de motores da Technische Universität Darmstadt descreve maneira de se realizar controladores de torque, velocidade e posição de motores de corrente contínua e alternada. Há uma descrição de controlador de posição utilizando uma técnica de feed forward que pode ser útil, caso através de outros métodos não for possível obter um controlador adequado. A desvantagem é a obtenção exata de alguns parâmetros tanto do motor quanto da planta, que são cruciais para que essa técnica de controle tenha resultados favoráveis.

A.3 Engenharia de Controle Moderno e Digital Control of Dynamic Systems

Os dois livros servirão como referência para eventuais dúvidas sobre controle analógico ou digital, sendo que não há nenhum tópico de interesse prévio a ser discutido.

A.4 Manual e arquivos de ajuda do MATLAB

O manual do MATLAB e os seus arquivos de ajuda serão úteis na resolução do problema de programação linear, através das funções da família LINSOLVE.

A.5 Minimum-Time Anti-Swing Control of Cranes Using Linear Programming

O artigo submetido mostra o caminho para solucionar o problema de otimização do tempo no controle anti-balanço de guindastes portuários, muito semelhante ao problema deste trabalho.

Primeiramente, o sistema do guindaste é modelado, segundo a orientação do artigo (2).

Como variável controlada, foi usada a relação entre a aceleração do carro e a sua aceleração máxima. As variáveis de estado escolhidas foram a posição do carro, o tamanho da haste entre o carro e a massa e o ângulo de balanço da massa.

Foi utilizada programação matemática linear para resolução do problema. Para tal, foi definido primeiramente um conjunto de condições iniciais e finais e as limitações do modelo, como aceleração e velocidade máximas permitidas pelos sistemas eletrônico e mecânico. Busca-se minimizar o tempo em que a trajetória é realizada, para isso, é suposto que o tempo mínimo é sabido e a otimização é orientada para a obtenção da trajetória máxima que leva a esse tempo mínimo, pois a entrada do protótipo do guindaste é uma trajetória e o tempo otimizado é uma consequência da trajetória otimizada. A seguir, para a resolução dos problemas de otimização, o sistema é discretizado.

O artigo conclui que a programação linear é adequada para a resolução do problema, pois o protótipo construído pelos autores conseguiu reproduzir a trajetória otimizada satisfatoriamente. Ainda sobre o método, é ressaltado que não são necessárias iterações, presente em diversos outros algoritmos de otimização e que é fácil de determinar a solubilidade do problema.

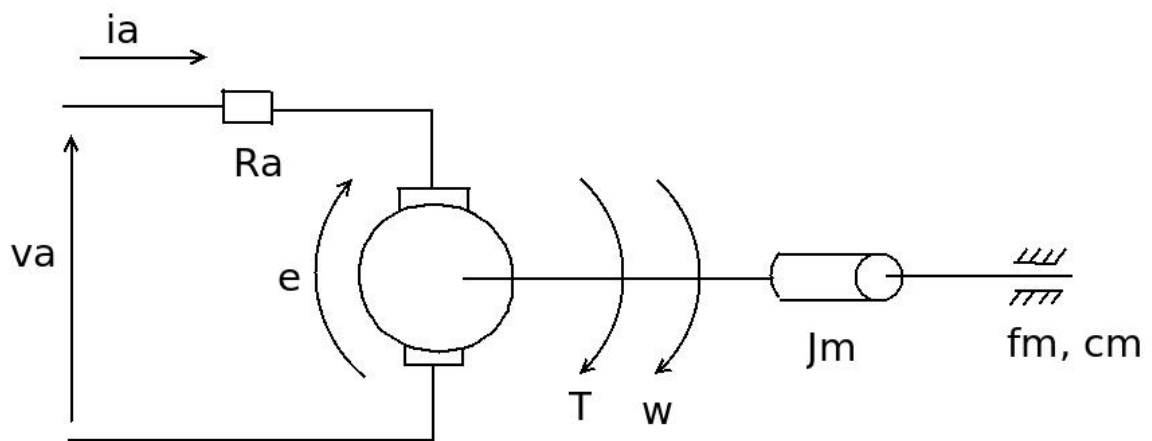
A.6 Time Optimal Control of Overhead Cranes with Hoisting of the Load

O artigo trata de soluções de tempo ótimo para o problema de controle anti-balanço de guindastes. Após uma introdução, com os objetivos e justificativa, a modelagem do sistema do guindaste é descrita. Através das equações lagrangeanas, um modelo em função do tamanho da haste que sustenta a massa transportada, da massa transporta, da massa do carro, da posição do carro, da aceleração da gravidade, do ângulo de balanço e da força aplicada no carro. Como essa força não deve constar no modelo final, já que a variável controlada é a posição do carro, admitiu-se que a relação entre a massa transportada e a massa do carro é muito pequena e assim um modelo linear pode ser obtido. Raciocínio similar ao empregado neste artigo foi utilizado em (5) e neste trabalho ?? para a obtenção do modelo matemático.

A seguir, o modelo do guindaste é complementado ao modelo do motor elétrico utilizado para complementá-lo, o que já é discrepante dos objetivos do trabalho, pois os servos serão projetados a parte e não correspondem ao modelo do artigo.

Após a definição do modelo (não-linear), o problema de otimização é formulado com a introdução de novas variáveis auxiliares e a definição das condições de contorno. Para resolver o problema de minimização do tempo, o princípio de maximização de Pontryagin é aplicado e diversas soluções são apresentadas, para problemas com restrição, sem restrição, dentre outros. A solução obtida é sempre a variação da variável controlada entre valores máximos e mínimos em determinados intervalos de tempo. Não é feita nenhuma observação sobre programação linear neste artigo e, portanto, esta parte dele não será utilizada no trabalho.

APÊNDICE B – Roteiro para Identificação dos Parâmetros de Motores DC



Parâmetros a identificar:

- J_m = momento de inércia do motor
- f_m = coeficiente de atrito viscoso do motor
- c_m = torque de atrito de Coulomb do motor
- k_v = constante de proporcionalidade da f.c.e.m.
- k_t = constante de torque
- R_a = resistência de armadura

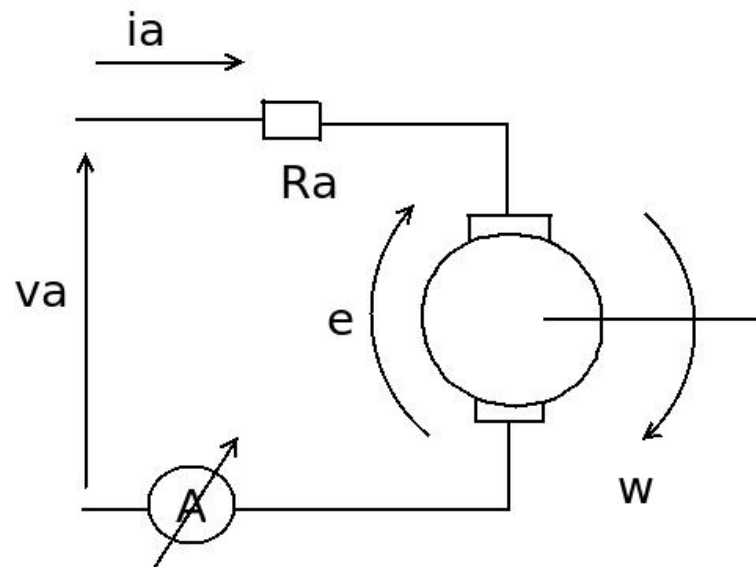
B.1 Medida de R_a

- Utilizar ohmímetro

- Motor desligado
- Medida direta

B.2 Medida de k_v

- Utilizar voltímetro, amperímetro e tacômetro
- Aplicar v_a constante
- Realizar medidas em regime estacionário



$$v_a = R_a i_a + e \quad (\text{B.1})$$

$$e = k_v \cdot \omega \quad (\text{B.2})$$

De (B.1) e (B.2):

$$v_a = R_a i_a + k_v \cdot \omega \quad (\text{B.3})$$

Isolando-se k_v :

$$k_v = \frac{v_a - R_a \cdot i_a}{\omega} \quad (\text{B.4})$$

B.3 Determinação de k_t

Se todos os dados estiverem em unidades do S.I. então:

$$k_t = k_v \quad (\text{B.5})$$

B.4 Medidas de f_m e c_m

- Utilizar voltímetro, amperímetro e tacômetro
- Realizar as medidas de regime estacionário

B.4.1 Equações

$$T = k_t \cdot i_a \quad (\text{B.6})$$

$$T = J_m \cdot \dot{\omega} + f_m \cdot \omega + c_m \quad (\text{B.7})$$

De (B.6) e (B.7):

$$J_m \cdot \dot{\omega} + f_m \cdot \omega + c_m = k_t \cdot i_a \quad (\text{B.8})$$

Isolando i_a :

$$i_a = \frac{1}{k_t} \cdot (J_m \cdot \dot{\omega} + f_m \cdot \omega + c_m) \quad (\text{B.9})$$

$$(\text{B.9})em(\text{B.2}) \Rightarrow v_a = \frac{R_a}{k_t} \cdot (J_m \cdot \dot{\omega} + f_m \cdot \omega + c_m) + k_v \cdot \omega \quad (\text{B.10})$$

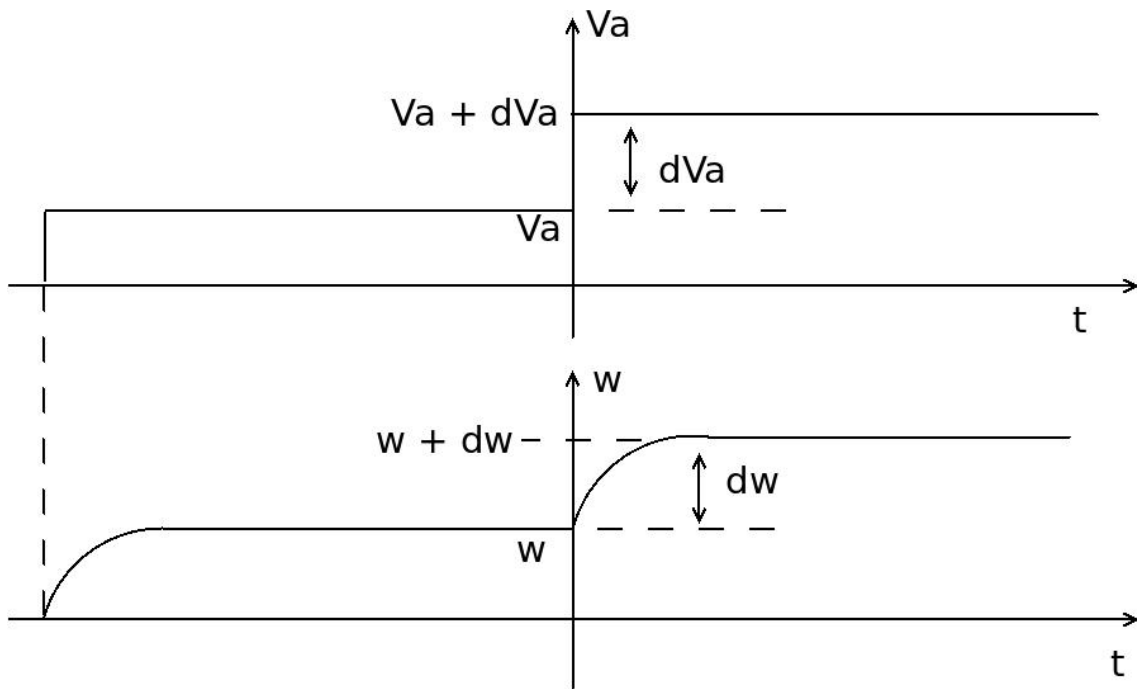
B.4.2 Passo 1

- Aplicar degrau em $\overline{v_a}$
- Esperar o regime estacionário ($\overline{\omega} = \text{cte}$)

$$\begin{aligned}
 (B.10) \Rightarrow \bar{v}_a &= \frac{R_a}{k_t} \cdot (f_m \cdot \bar{\omega} + c_m) + k_v \cdot \bar{\omega} \Rightarrow f_m \cdot \bar{\omega} + c_m = \frac{R_a}{k_t} \cdot \underbrace{(\bar{v}_a - k_v \cdot \bar{\omega})}_{i_a} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow f_m \cdot \bar{\omega} + c_m = k_t \cdot i_a \quad (B.11)
 \end{aligned}$$

B.4.3 Passo 2

- Sobre \bar{v}_a , aplicar um degrau incrementa Δv_a



- Esperar novamente o regime estacionário ($\bar{\omega} + \bar{\Delta\omega}$) = cte, ou seja, $\Delta\omega = \text{cte}$.

$$\begin{aligned}
 (B.10) \Rightarrow \bar{v}_a + \Delta v_a &= \frac{R_a}{k_t} \cdot (f_m \cdot (\bar{\omega} + \bar{\Delta\omega}) + c_m) + k_v \cdot (\bar{\omega} + \bar{\Delta\omega}) \\
 (B.11) \Rightarrow \Delta v_a &= \frac{R_a}{k_t} \cdot f_m \cdot \bar{\Delta\omega} + k_v \cdot \bar{\Delta\omega} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow f_m = \frac{k_a}{R_a} \cdot \left(\frac{\Delta v_a}{\bar{\Delta\omega}} - k_v \right) \quad (B.12)
 \end{aligned}$$

- Substituindo (B.12) em (B.11):

$$c_m = k_t \cdot \bar{i}_a - f_m \cdot \bar{\omega} \quad (B.13)$$

B.5 Medida de J_m

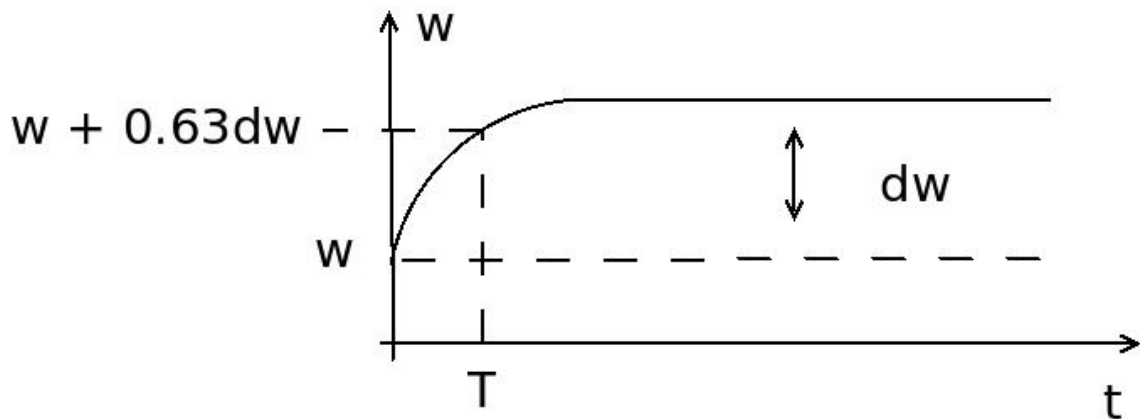
- Utilizar a placa AD/DA (ou osciloscópio com memória)
- Registrar o transitório $\Delta\omega(t)$

$$(B.10) \Rightarrow \bar{v}_a + \Delta v_a = \frac{R_a}{k_t} \cdot \left(J_m \cdot (\overset{0}{\cancel{\omega}} + \Delta\dot{\omega}) + f_m \cdot (\bar{\omega} + \Delta\omega) + c_m \right) + k_v \cdot (\bar{\omega} + \Delta\omega)$$

$$(B.11) \Rightarrow \Delta v_a = \frac{R_a}{k_t} \cdot (J_m \cdot \Delta\dot{\omega} + f_m \cdot \Delta\omega) + k_v \cdot \Delta\omega \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \underbrace{\left(\frac{R_a}{k_t} \cdot J_m \right)}_a \cdot \Delta\dot{\omega} + \underbrace{\left(\frac{R_a}{k_t} \cdot f_m + k_v \right)}_b \cdot \Delta\omega = \Delta v_a \Rightarrow a \cdot \Delta\dot{\omega} + b \cdot \Delta\omega = \Delta v_a \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta\dot{\omega} + \underbrace{\frac{b}{a}}_{1/\tau} \cdot \Delta\omega = \frac{1}{a} \cdot \Delta v_a \Rightarrow \Delta\dot{\omega} + \frac{1}{\tau} \cdot \Delta\omega = \frac{1}{a} \cdot \Delta v_a \quad (B.14)$$

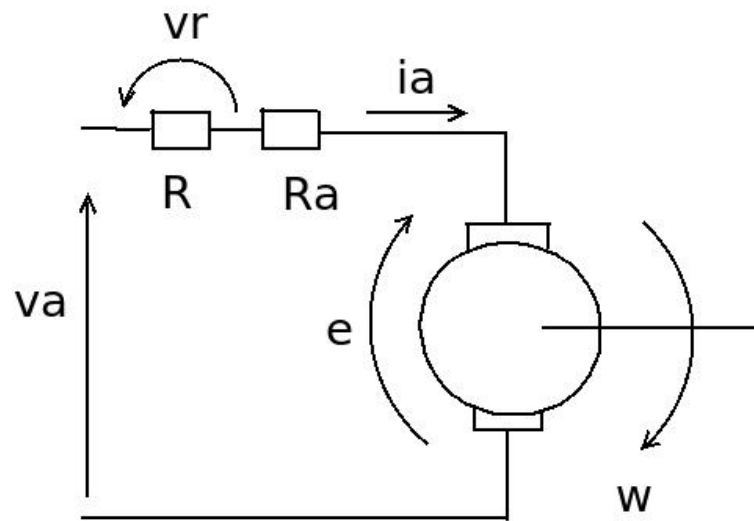


- Mede-se τ

$$\tau = \frac{a}{b} \Rightarrow \tau = \frac{\frac{R_a}{k_t} \cdot J_m}{\frac{R_a}{k_t} \cdot f_m + k_v} \Rightarrow J_m = \frac{k_t}{R_a} \cdot \left(\left(\frac{R_a}{k_t} \cdot f_m + k_v \right) \cdot \tau \right) \quad (B.15)$$

B.6 Como medir $\omega(t)$

Aplicando a 2ª Lei de Ohm ao circuito da armadura:



$$v = v_R + v_a = R \cdot i_a + R_a \cdot i_a + k_v \cdot \omega \Rightarrow \omega = \frac{1}{k_v} \cdot \left(v - (R_a + R) \cdot \underbrace{i_a}_{\frac{v_R}{R}} \right)$$

$$\therefore \omega = \frac{1}{k_v} \left(v - \left(1 + \frac{R_a}{R} \right) \cdot v_R \right) \quad (\text{B.16})$$

Portanto:

- Medir $v(t)$ (constante!)
- Medir $v_r(t)$ (Placa A/D ou osciloscópio)
- Substituir R_a por $R_a + R$ na equação (B.15):

$$J_m = \frac{k_t}{R_a + R} \cdot \left(\left(\frac{R_a + R}{k_t} \cdot f_m + k_v \right) \cdot \tau \right) \quad (\text{B.17})$$

APÊNDICE C – Descrição das funções do MATLAB utilizada na otimização

C.1 Função `calcula_lambda`

Responsável por gerar os vetores `lambda_vet` e `lambdalin_vet`, correspondentes respectivamente ao valor de λ e de sua derivada ao longo do tempo. As entradas são tipo, correspondente à política de movimentação no eixo vertical a ser adotada, sendo 0 içamento constante e 1 um exemplo de variável. As variáveis de saída são os vetores `lambda_vet` e `lambdalin_vet`.

C.2 Função `otimização`

É o script principal. Lá são definidos os parâmetros físicos e a otimização é realizada, de acordo com o tempo inserido. Não há ajuste automático de tempo, portanto o usuário deve aumentar ou diminuir o tempo ótimo até que a trajetória máxima otimizada seja alcançada e não ultrapassada. É possível também mudar o número de pontos a ser otimizados.

C.3 Função `variaveis_otimizacao`

Realiza a conversão dos parâmetros físicos para as variáveis de otimização, conforme descrito no capítulo de otimização.

C.4 Funções `dertrans2` e `deriv`

A função `dertrans2` é chamada pelo solver `ode45` e calcula as matrizes necessárias para determinar os coeficientes `gamma`, que atuam na determinação do balanço da massa para a otimização. Similarmente, a função `DERIV` reconstrói o balanço em função da aceleração otimizada pelo algoritmo.

C.5 Função `conversaunidadesreais`

Converte das unidades utilizadas na otimização para unidades de engenharia.

C.6 Função `graficos`

Gera as plotagens de aceleração, velocidade, trajetória, balanço, velocidade angular otimizados e içamento da carga.

C.7 Função `geraTRA`

Gera os arquivos de trajetória para ser inseridos na interface de controle do protótipo, a içamento constante (somente eixo x).

C.8 Função `geraTRAelCA`

Gera os arquivos de trajetória para ser inseridos na interface de controle do protótipo, a içamento variável (eixos x e y).

C.9 Função `PlotaAngulo`

Lê o arquivo `.TRA` gerado pelo programa de interface, que contém a medição de balanço, realizada pelo potenciômetro e plota um gráfico com estes valores.

Bibliografia

- 1 Adamy J., et al., **Regelungstechnisches Praktikum II: Versuchsanleitungen** , Apostila do curso. TU Darmstadt, Alemanha 2008.
- 2 Auernig J.W., Troger H., **Time Optimal Control of Overhead Cranes with Hoisting of the Load**, International Federation of Automatic Control, 1987.
- 3 Correias Schneider, site, disponível em <http://www.correias.com.br/>, visitado em junho de 2009.
- 4 Franklin G.F, Powell J.D., Workman M.L. **Digital Control of Dynamic Systems** , 3a Edição, Addison-Wesley, 1998.
- 5 Cruz J.J., Leonard F. **Minimum-Time Anti-Swing Control of Cranes Using Linear Programming** (Artigo Submetido), 2008.
- 6 Cruz J.J., **Modelagem e Controle de Manipuladores**, apostila do curso, EPUSP, 2008.
- 7 Manual e arquivos de ajuda do MATLAB.
- 8 Mutschler P., **Control of Drives** , apostila do curso. TU Darmstadt, Alemanha, 2007.
- 9 Ogata K., **Engenharia de Controle Moderno**, Prentice Hall, 4a Edição 2005.