

DANILO MARTINS VIEIRA

SISTEMA ATIVO DE AUTOESTABILIZAÇÃO PARA
VEÍCULOS SUSPENSOS

São Paulo
2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

DANILO MARTINS VIEIRA

SISTEMA ATIVO DE AUTOESTABILIZAÇÃO PARA
VEÍCULOS SUSPENSOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de mestre em
Engenharia Mecânica

São Paulo

2009

DANILO MARTINS VIEIRA

SISTEMA ATIVO DE AUTOESTABILIZAÇÃO PARA
VEÍCULOS SUSPENSOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de mestre em
Engenharia Mecânica

Área da concentração:
Engenharia de Controle e Automação
Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Delson Torikai

São Paulo

2009

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha família e à minha namorada Leticia pelo incentivo e apoio incondicional nos meus momentos de fraqueza.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Delson Torikai pela orientação e paciência.

Ao Prof. Dr. Osvaldo Horikawa pela atenção e pelas discussões que contribuíram muito para este trabalho.

Ao Prof. Dr. Isaias da Silva pela atenção e discussões que contribuíram para este trabalho.

Ao Prof. Dr. Ricardo Cury Ibrahim por discussões que contribuíram para este trabalho.

A Professores, amigos, colegas e familiares que de alguma forma contribuíram para minha formação e/ou para o desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

Durante as últimas décadas, têm sido realizados vários estudos sobre a aplicação de veículos suspensos como em teleféricos, bondinhos, linhas de transporte e/ou montagem em indústrias, e robôs para finalidades diversas. Como veículos suspensos possuem comportamento de pêndulo, estão suscetíveis as ações de forças externas que geram oscilações e balanços indesejados no veículo que podem comprometer sua função e segurança. Um levantamento bibliográfico mostrou a deficiência de estudos de sistemas que mantenham a estabilidade física de veículos suspensos. Usando conceitos de conservação de energia e quantidade de movimento foi concebida a ideia de desmembrar o corpo do veículo suspenso em duas partes, uma massa fixa e uma massa móvel de atuação e estabilização da estrutura do veículo; dessa forma fazendo uso apenas de componentes internos ao veículo, uma vez que em sistemas suspensos é grande a dificuldade de aplicação de forças externas para correção de posicionamento. Neste trabalho foi desenvolvido um sistema ativo de autoestabilização para veículos suspensos capaz de amenizar os efeitos de forças externas que possam comprometer a atividade desempenhada pelo veículo. Para a autoestabilização foi montado um sistema de controle em malha fechada com sensor de detecção de inclinação (posição) e atuador com motor de corrente contínua para deslocar uma massa móvel dentro do robô suspenso, acionados por um microcontrolador embarcado. A eficiência do sistema foi comprovada com a montagem de um protótipo, onde uma programação baseada em controle proporcional e derivativo foi suficiente para garantir uma eficiente e rápida estabilização no robô quando sujeito a forças externas como atuação de ventos, por exemplo.

Palavras-chaves: controle de estabilidade, suspensão ativa, veículos móveis suspensos

ABSTRACT

During the last decades, many researches and studies have been done about suspended vehicles such as chair lifts, cable cars, carrying and assemblies of parts in the industry, etc. Suspended vehicles behave like a pendulum and they are susceptible to the action of external forces which cause oscillations and unwanted swing at the vehicle that may affect function and security of the vehicle. For several applications it is important to keep the physical stability of suspended vehicles (or part of them), such as in autonomous robots for inspection. In suspended systems it is very difficult to apply external forces to correct its position due the swing; so, it is proposed a new stabilizing system for suspended vehicles based on the conservation of energy and quantity of motion. Using only internal components of the suspended vehicle, the mass of the system was separated in two parts: an active mobile part that stabilizes a fixed part such as the structure of the vehicle. In this work, it is described an active system for swing control on suspended vehicles, able to soften the effects of external forces that can dangerously damage the performance of the vehicle. An autonomous off-board microcontroller with feed-back program was assembled to stabilize the structure of the vehicle by using an inclination sensor attached to it. A DC motor is used to move the mobile part of the suspended vehicle to correct the equilibrium of the vehicle's structure. The microcontroller program based on proportional-derivative control system was implemented and tests were performed on a prototype vehicle. A good performance of the system was obtained with an efficient and fast stabilization of the prototype structure under the action of external forces, such as wind forces.

Keywords: stability control, active suspension, suspended moving vehicles

LISTA DE SÍMBOLOS

L - comprimento do fio sem massa e inextensível que suporta a partícula de massa do pêndulo simples.

g - aceleração da gravidade local.

m - massa do corpo em questão.

T - tensão aplicada sobre a partícula de massa do pêndulo simples pelo fio que a sustenta; período de oscilação do pêndulo simples; período de vibração em uma corda.

θ - deslocamento angular do pêndulo simples.

F - força atuante sobre a partícula de massa do pêndulo durante sua oscilação; tensão aplicada nas extremidades de uma corda.

x - deslocamento linear da partícula de massa do pêndulo simples.

C - centro de massa do pêndulo composto.

ω - frequência angular.

f - frequência de oscilação do pêndulo simples, frequência de vibração em uma corda.

P - ponto sobre o qual oscila o pêndulo composto, potencia associada a uma massa em MHS.

I - momento de inércia do pêndulo composto em relação ao ponto P .

τ - torque da força peso sobre o centro de massa do pêndulo.

a - distância do centro de massa do pêndulo composto ao ponto P , amplitude de uma oscilação.

Ω - frequência angular.

α - aceleração angular do pêndulo, fase inicial de um movimento harmônico simples resultante da superposição de dois movimentos harmônicos simples.

δ - fase inicial, densidade da corda por unidade de comprimento.

l_0 - comprimento do pêndulo simples equivalente ao pêndulo composto.

l_c - comprimento da corda em questão.

v - velocidade que vibrações se propagam em uma corda, deslocamento correspondente a um modo fundamental de vibração, equação de um movimento harmônico simples.

λ - comprimento de onda de uma onda estacionária.

h - deslocamento de um ponto da corda para início de uma oscilação.

A - amplitude de uma oscilação, área da representação gráfica do impulso.

d - distância da extremidade esquerda da corda até o ponto onde a corda será excitada.

E_c - energia cinética de uma oscilação.

E_p - energia potencial de uma oscilação.

y - distância relacionada com energia potencial de uma oscilação.

ΔL - trabalho elementar numa oscilação harmônica.

Δx - deslocamento elementar numa oscilação harmônica.

k - constante de rigidez da mola.

MHS - movimento harmônico simples.

u - equação de um movimento harmônico simples.

β - variação da fase inicial de um MHS decorrente da composição de dois MHS.

w - equação da composição de dois MHS.

ϖ - oscilação de alta frequência que ocorre no fenômeno de batimento.

ν - oscilação de baixa frequência que ocorre no fenômeno de batimento.

\vec{I} - impulso.

Δt - variação de tempo.

\vec{F} - força aplicada sobre o corpo.

\vec{V} - velocidade do corpo.

\vec{Q} - quantidade de movimento do corpo.

$\Delta \vec{V}$ - variação da velocidade do corpo.

$\Delta \vec{Q}$ - variação da quantidade de movimento do corpo.

PWM - modulação por largura de pulso.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático do robô de Sawada et al ⁽²⁾	17
Figura 2 - Estratégia proposta por Xinglong Zhu et al ⁽¹⁰⁾	19
Figura 3 - Estratégia proposta por Xinglong Zhu et al ⁽¹¹⁾	20
Figura 4 – Retirada da camada de gelo acumulado na linha de transmissão ⁽²⁹⁾	22
Figura 5 - Robô para instalação e remoção de esferas sinalizadoras ⁽³¹⁾	22
Figura 6 - Sistemas passivos de amortecimento de vibrações ⁽³³⁾	24
Figura 7 - Sistemas passivos de amortecimento de vibrações ⁽³³⁾	24
Figura 8 – Configuração esquemática do mecanismo de amortecimento passivo ⁽³⁴⁾	25
Figura 9 – Configuração esquemática do mecanismo de amortecimento ativo ⁽³⁴⁾	26
Figura 10 - Equilíbrio em um pêndulo simples	27
Figura 11 - Esquema de um pêndulo composto	30
Figura 12 - Ondas estacionárias em corda fixa nas extremidades	33
Figura 13 - Os três primeiros modos de vibração de uma corda	34
Figura 14 - Trabalho de uma força elástica (mhs)	36
Figura 15 - Variação das energias cinética e potencial no mhs	38
Figura 16 - Batimento provocado pela soma de dois mhs	39
Figura 17 – Representação gráfica do Impulso	40
Figura 18 – Quantidade de movimento de um corpo	41
Figura 19 – Sistema de várias massas	41
Figura 20 – Teorema do impulso	42
Figura 21 – Estrutura básica de um sistema realimentado	44
Figura 22 – Diagrama de blocos da forma ideal do PID	45
Figura 23 – Princípio de funcionamento do sistema de autoestabilização	49
Figura 24 – Massa móvel fixada à plataforma móvel	50
Figura 25 – Esquema de movimentação da plataforma acionado por fuso	51
Figura 26 – Esquema de movimentação da plataforma acionado pelo motor de corrente contínua	52
Figura 27 – Esquema de instalação do sensor de inclinação do robô	53
Figura 28 – Fluxograma de funcionamento do sistema de controle da estabilização	54
Figura 29 – Diagrama de blocos do sistema de controle da estabilização	54

Figura 30 – Sensor de inclinação que verifica o equilíbrio da estrutura	57
Figura 31 – Configuração do motor de passo com fuso embutido que desloca a massa móvel do sistema	58
Figura 32 – Configuração do sistema de movimentação por transmissão direta	59
Figura 33 – Micro-controlador Arduino Decimila responsável pelo controle da autoestabilização.....	60
Figura 34 – Protótipo fabricado sistema de movimentação da bateria: motor de passo e fuso	61
Figura 35 – Protótipo fabricado com o sistema de movimentação da bateria modificado: transmissão direta.....	61
Figura 36 – Gráficos de estabilização da estrutura do robô protótipo acionado com motor de passo, para uma entrada exógena tipo degrau: (a) sem controle; (b) controle proporcional; (c) controle proporcional modificado e (d) controle proporcional derivativo.	66
Figura 37 – Montagem experimental para coleta dos dados de estabilização do robô protótipo	70
Figura 38 – Gráficos do comportamento do sistema em resposta a um impulso	71
Figura 39 – Gráfico do comportamento do sistema em resposta a um impulso.....	72
Figura 40 – Gráficos do comportamento do sistema em resposta a um degrau	73
Figura 41 – Gráfico do comportamento do sistema em resposta a um degrau	74
Figura 42 – Gráficos do comportamento do sistema em resposta uma corrente de vento	76
Figura 43 – Gráficos do comportamento do sistema em resposta uma corrente de vento	77
Figura 44 – Esquema do driver utilizado	88

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVO.....	16
3 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	16
4 FUNDAMENTOS.....	27
4.1 ANÁLISE DO PÊNULO SIMPLES.....	27
4.2 A FÍSICA DO PÊNULO COMPOSTO.....	29
4.3 VIBRAÇÕES TRANSVERSAIS EM UMA CORDA.....	32
4.4 ENERGIA E POTÊNCIA EM UMA OSCILAÇÃO HARMÔNICA.....	36
4.5 COMPOSIÇÃO DE DOIS MOVIMENTOS HARMÔNICOS SIMPLES.....	38
4.6 IMPULSO E QUANTIDADE DE MOVIMENTO.....	39
4.6.1 IMPULSO.....	40
4.6.2 QUANTIDADE DE MOVIMENTO OU MOVIMENTO LINEAR.....	41
4.6.3 TEOREMA DO IMPULSO.....	42
4.7 CONTROLADORES PID.....	42
4.7.1 CONTROLE DE PROCESSOS UTILIZANDO PID.....	43
4.7.2 PID DIGITAL.....	45
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES.....	62
6.1 PROTÓTIPO COM MOTOR DE PASSOS.....	62
6.2 PROTÓTIPO COM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA.....	68
7 CONCLUSÃO.....	78
8 TRABALHOS FUTUROS.....	79
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
APÊNDICES.....	88
APÊNDICE A – DRIVER DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	88
APÊNDICE B - ROTINA DE CONTROLE PROPORCIONAL (MOTOR DE PASSO).....	89
APÊNDICE C - ROTINA DE CONTROLE PROPORCIONAL MODIFICADO (MOTOR DE PASSO).....	93
APÊNDICE D - ROTINA DE CONTROLE PROPORCIONAL-DERIVATIVO (MOTOR DE PASSO).....	97

APÊNDICE E - ROTINA DE CONTROLE PROPORCIONAL-DERIVATIVO (MOTOR CC).....	101
APÊNDICE F – AQUISIÇÃO DE DADOS (EXPERIMENTOS).....	103
APÊNDICE G – ARMAZENAGEM DOS DADOS COLETADOS.....	104
APÊNDICE H – FILTRAGEM DO SINAL (MATLAB).....	106

1 Introdução

O uso de veículos suspensos é uma realidade desde muitos séculos atrás. Um dos primeiros registros da utilização de veículos suspensos fala sobre a utilização destes para o transporte de pedras para a construção de uma fortaleza na China no ano 400 d.C.; num outro registro consta a utilização de veículos suspensos para o transporte de pessoas e cargas através de desfiladeiros no Japão no ano 1200 d.C. Durante muitos anos a aplicabilidade de veículos suspensos limitou-se ao transporte de cargas e pessoas a locais de acesso difícil ou até mesmo impraticável com veículos terrestres. No decorrer das últimas décadas os veículos suspensos e os recursos tecnológicos disponíveis vêm apresentando uma evolução constante, fato que tem criado um ambiente propício para o desenvolvimento de veículos suspenso capazes de desempenhar uma vasta gama de atividades, dentre as quais, destaca-se o uso de veículos suspensos para realizar tarefas relacionadas com as atividades de inspeção e manutenção em linhas de transmissão de energia elétrica⁽¹⁾.

O Brasil apresenta uma característica geográfica de grandes extensões e formação de rios com altos volumes de água que propiciaram uma matriz energética baseada em grandes usinas geradoras de eletricidade. A distribuição dessa energia para todo território nacional é feita por uma rede de transmissão elétrica de alta tensão e redes locais de distribuição que somam milhares de quilômetros de linhas de alta tensão. As operações de inspeção e manutenção dessas linhas de transmissão de energia são de extrema importância para manter o fornecimento regular de energia para todas as regiões do país.

Atualmente a tarefa de inspeção das linhas de transmissão de energia é feita de modo totalmente manual por técnicos que percorrem todo o comprimento da linha a ser inspecionado. Utilizando-se de um binóculo e às vezes de uma câmera térmica, eletricitistas fazem a inspeção visual dos componentes da linha a fim de identificar pontos que apresentem sinais que indiquem a possibilidade de futuras falhas, tarefa com baixos graus de precisão e confiabilidade porque dependem da habilidade do técnico que a desempenha.

Existem ainda certas características das linhas de alta tensão que contribuem para o mal desempenho do técnico durante a inspeção; a principal delas é que os

componentes da linha se repetem durante todo o trajeto, fato que torna a operação monótona e faz com que a atenção do técnico diminua durante a tarefa de inspeção.

Muitas vezes é necessário que o técnico suba nas torres de transmissão que suportam os fios e até mesmo ande em gôndolas suspensas no cabo para-raio, tarefa de altíssimo risco e que deve ser feita com a linha desligada. Atualmente, desligar a linha de transmissão tem se tornado uma operação praticamente inviável devido o aumento crescente da demanda por energia e a grande perda de divisas por parte dos consumidores e das empresas responsáveis pela distribuição de energia⁽²⁾.

Uma forma alternativa encontrada para evitar o desligamento da linha de transmissão e garantir a segurança do técnico durante sua jornada de trabalho foi fazer a inspeção do trecho da linha a ser verificado de maneira aérea, isto é, a companhia de energia contrata um helicóptero para transportar um técnico, que provido de uma câmera termográfica ou de uma câmera filmadora comum com boa resolução, sobrevoa a linha a ser inspecionada. O técnico filma todos os componentes do trecho da linha que está sendo verificada e analisa as imagens capturadas a procura de partes danificadas que comprometam o bom funcionamento da linha de transmissão. Porém, a inspeção aérea apresenta características que desfavorecem sua utilização, uma delas é o alto custo envolvido nessa atividade, pois as linhas de transmissão possuem milhares de quilômetros e o aluguel de helicópteros fica extremamente caro, outro ponto negativo é que em condições de tempo ruins a qualidade e até mesmo a operação de inspeção ficam comprometidas^(3, 4).

A análise dos modos com que as atividades de inspeção em linhas de transmissão de energia eram realizadas gerou um cenário propício para a pesquisa e desenvolvimento de equipamentos que fossem capazes de reduzir os custos envolvidos na atividade de inspeção e a jornada de trabalho dos técnicos responsáveis pela inspeção, e de aumentar a segurança e a precisão da operação de inspeção.

Dentre as pesquisas voltadas para melhoria da operação de inspeção em linhas de transmissão, destaca-se a o estudo da viabilidade de uso de robôs móveis que executem parte ou até mesmo todas as tarefas que um técnico desempenha durante a inspeção nas linhas. A pesquisa a respeito de robôs móveis para serem aplicados em linhas de transmissão teve início no final dos anos 80^(2,5), e até o

presente, pouco desenvolvimento tem sido feito relativo à estabilidade dos robôs móveis.

Todo veículo que se desloca suspenso está sujeito ao balanço ao redor do cabo que o sustenta. Na maioria dos veículos suspensos é desejável uma boa estabilidade física para garantir a qualidade da tarefa desempenhada pelo mesmo, assim como a segurança de todos os elementos envolvidos na operação, fato que evidencia a necessidade de estudos que viabilizem a construção de mecanismos que sejam capazes de manter a estabilidade física do sistema. Para garantir a estabilidade do sistema, a morfologia do robô como sistema de sustentação, sistema de tração, distância do seu centro de massa ao cabo de sustentação, etc. devem ser muito bem estudados.

No caso da aplicação para inspeção de linhas de transmissão, o bom desempenho da operação depende da qualidade das imagens capturadas pelo sistema de câmeras do robô, onde a qualidade das imagens está diretamente relacionada com a velocidade de deslocamento e com a estabilidade do robô. Caso esses fatores não sejam levados em conta, a aplicação de robô suspensos para inspeção de linhas de transmissão fica inviável, e no caso mais geral de robôs suspensos para atividades diversas, a aplicação fica comprometida. Mesmo em sistemas em que o balanço do robô não atrapalhe a atividade para o qual foi projetado, o balanço crescente que ocorre quando a frequência natural do cabo de sustentação se aproxima da frequência natural do robô, pode levar ao colapso do sistema com a queda do robô ou rompimento do cabo.

Após fazer um levantamento bibliográfico sobre veículos suspensos relacionados às formas com que são mantidos estáveis fisicamente, alinhados sob o cabo que os sustenta, foi possível verificar que poucas propostas de veículos suspensos apresentam um sistema de amortecimento de vibrações. Na maioria dos estudos é apenas citado que a estrutura do veículo foi dimensionada de forma a minimizar o efeito de forças externas, e em algumas literaturas mencionam estudos sobre mecanismos capazes de amortecer as vibrações em veículos suspensos que atuam de maneira passiva sobre o veículo.

Analisando as soluções já apresentadas por outros pesquisadores, desenvolvemos um sistema ainda não proposto em literatura para a estabilização de veículos suspensos.

2 Objetivo

Veículos suspensos possuem comportamento de pêndulo, e estão suscetíveis as ações de forças externas que geram oscilações e balanços indesejados no veículo. Para se controlar esses movimentos, é necessário que o sistema possua um mecanismo com características singulares capaz de amortecer tais oscilações. No caso de veículos suspensos que têm trilhos como meio de locomoção, é possível utilizar um sistema de amortecimento que exerça uma força externa ao conjunto para sua estabilização, porém, nas atividades onde o veículo se movimenta sobre cabos não é possível utilizar um mecanismo de tal tipo, em virtude do cabo ter pouca rigidez à torção, sendo necessário fazer uso de uma compensação interna ao veículo, capaz de estabilizá-lo quando este estiver exposto a condições adversas.

Esse trabalho tem como objetivo estudar e propor uma nova metodologia de estabilização ativa ou amortecimento ativo de oscilações em veículos suspensos, fazendo uso somente de forças “internas” de tal forma a estabilizar parte do veículo ou o veículo como um todo.

Como ponto de partida, foi tomado como exemplo um robô autônomo projetado para inspeção de linhas de transmissão elétrica de alta tensão, se locomovendo pelo cabo guarda (cabo para-raios instalados normalmente acima dos cabos vivos que transportam energia). Para essa atividade, o robô carrega, além de um computador de bordo, sensores e transmissores, uma câmera térmica que filma os cabos vivos a procura de pontos quentes (locais de possíveis falhas), tarefa essa que exige estabilidade do robô em relação aos cabos.

3 Levantamento Bibliográfico

Vários robôs móveis que se deslocam suspensos em cabos foram desenvolvidos com diferentes mecanismos de locomoção e princípios de funcionamento, a maioria com a proposta de se movimentarem e desempenharem

todas as tarefas relacionadas à sua aplicação de maneira autônoma. Um robô móvel para aplicação em linhas de transmissão é descrito no trabalho de Sawada et al⁽²⁾, o qual se desloca suspenso no cabo guarda acima do cabo condutor, se movimenta através de rodas de maneira autônoma, sendo dotado de um mecanismo que possibilita a transposição dos obstáculos presentes no cabo guarda. Tal mecanismo consiste de um trilho instalado na estrutura do robô que é utilizado como um caminho alternativo quando o robô se depara com um obstáculo, o trilho possui forma de arco e durante a operação de transposição o robô posiciona o trilho de maneira que seja possível fixar as pontas do trilho uma de cada lado do obstáculo, e com o trilho posicionado e fixo o robô desprende seu sistema de movimentação do cabo guarda (rodas) e se desloca sobre o trilho; após ultrapassar o obstáculo o robô posiciona seu sistema de movimentação sobre o cabo guarda, recolhe o trilho e continua a atividade para qual foi projetado (inspeção do cabo sobre o qual se movimenta utilizando o princípio de corrente eddy). Nesse trabalho também é apresentado uma pequena discussão sobre a fonte de energia necessária ao sistema, evidenciando um fato presente em vários robôs móveis autônomos: o fato de a fonte de energia apresentar uma massa elevada. A Fig. 1 ilustra um desenho esquemático no robô móvel autônomo proposto por Sawada.

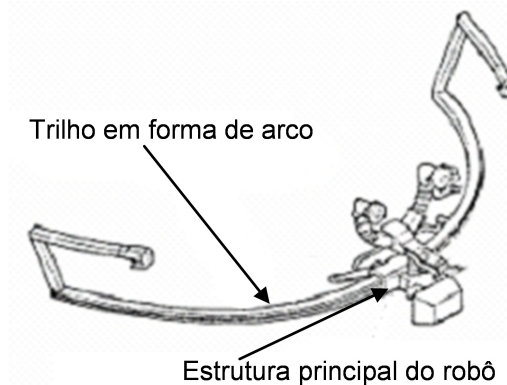


Figura 1 – Desenho esquemático do robô de Sawada et al⁽²⁾

Aoshima et al⁽⁵⁾, propõe uma estrutura multi unidade para ser utilizada em robôs móveis suspensos, tal estrutura possibilita a construção de robôs capazes de serem aplicados tanto em tarefas de inspeção em linhas de transmissão quanto em linhas de telecomunicação, devido sua versatilidade. A estrutura proposta para robôs móveis suspensos é composta por seis unidades motoras sendo que cada unidade motora possui 3 graus de liberdade que possibilitam a transposição de obstáculos de

tamanhos variados, passagem por bifurcações de fios “Y” e transferência do robô para um fio paralelo ao fio por onde se movimenta. Cada unidade motora possui uma roda apoiada sobre o fio de sustentação que realiza a movimentação do robô sobre o fio; esta roda é ligada à base da unidade motora por meio de um sistema que possibilita o movimento vertical dessa roda e as unidades motoras são unidas entre si por um mecanismo que permite a rotação em torno da vertical de uma unidade motora em relação a outra.

Tsijimura et al⁽⁶⁾ propõe um robô móvel suspenso que se desloque caminhando sobre o fio de sustentação através de pernas. Para isso, faz uma análise cinemática de um mecanismo biela-manivela para executar de maneira adequada a movimentação das “pernas” do robô, entenda-se por adequada uma movimentação que permita a que o robô se desloque sobre o fio de sustentação e ultrapasse os obstáculos presentes em seu percurso e mantenha um movimento estável, com o mínimo de balanço.

Xinglong Zhu et al^(7, 8) propõe um robô móvel autônomo para inspeção em linhas de transmissão que se locomove por meio de duas unidades motoras que realizam a movimentação do robô por meio de roldanas, a ligação entre cada unidade motora e a estrutura principal do robô é feita através de um mecanismo que possibilita levantar e abaixar a unidade motora em relação ao fio de sustentação (movimento vertical) e possibilita girar a estrutura principal em torno da unidade motora apoiada no fio de sustentação. O robô é provido de um mecanismo para transposição que tem o seguinte princípio de funcionamento: ao encontrar um obstáculo, o robô para, trava a unidade motora dianteira no fio de sustentação, levanta sua unidade motora traseira desencostando-a do fio de sustentação, gira sua estrutura sobre o eixo vertical que passa sobre a unidade motora dianteira até que a unidade motora traseira atinja o fio de sustentação do outro lado do obstáculo, então, o robô fixa no fio de sustentação a unidade motora que transpôs o obstáculo, levanta a unidade motora que ainda não ultrapassou o obstáculo e gira a estrutura até que toda a estrutura do robô transponha o obstáculo. Além desse mecanismo de transposição, apresenta uma característica inovadora: o robô possui um mecanismo capaz de deslocar o centro de massa da estrutura, habilidade que facilita a transposição de obstáculos e evita grandes esforços no cabo de sustentação, pois durante a transposição de obstáculos o robô fica fixo ao cabo de sustentação por apenas uma unidade motora o que faz com que o robô tenda a girar em torno de seu

ponto de apoio aumentando o esforço sobre o cabo de sustentação, porém, por meio do mecanismo de ajuste do centro de massa é possível posicionar o centro de massa exatamente em baixo do ponto onde o robô está fixo.

Xinglong Zhu et al⁽⁹⁾ apresenta o estudo de um sistema de controle que possibilite o posicionamento correto da unidade motora do robô móvel suspenso sobre o fio de sustentação após a transposição de um obstáculo, pois durante a operação de transposição de obstáculos as unidades motoras perdem contato com o fio de sustentação e precisam ser reposicionadas sobre o fio do outro lado do obstáculo. É apresentado um sistema que utiliza dois sensores laser de posição para verificar a posição do cabo, e de acordo com o modelo cinemático do robô suspenso o ângulo de rotação necessário é calculado. Xinglong Zhu et al⁽¹⁰⁾, apresenta uma estratégia de controle da posição do robô móvel suspenso de maneira que o robô se desloque utilizando duas unidades motoras (rodas) e se mantenha sempre na posição horizontal (não acompanhando a curvatura do fio de sustentação). Para alcançar tal objetivo, conforme o robô vai se deslocando sobre o fio de sustentação a estrutura do robô vai formando um ângulo de inclinação com a horizontal, porém, a estrutura é dotada de um sensor de inclinação que observa o ângulo do robô e em resposta ao ângulo observado, ajusta o comprimento dos braços que unem as unidades motoras à estrutura do robô de maneira que o robô se mantenha alinhado com a horizontal conforme ilustrado na Fig. 2.

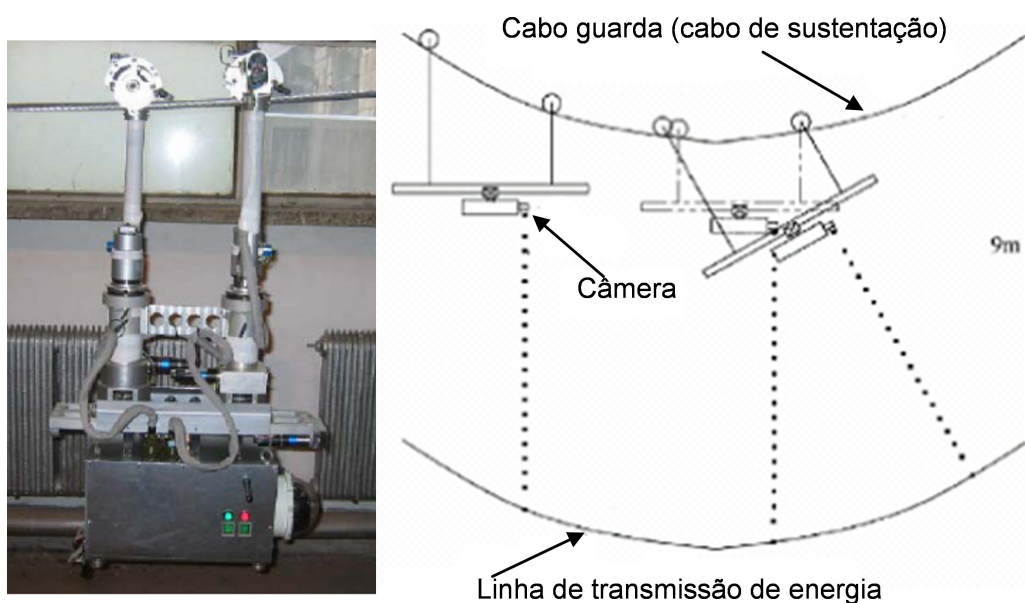


Figura 2 - Estratégia proposta por Xinglong Zhu et al⁽¹⁰⁾

Xinglong Zhu et al⁽¹¹⁾ apresenta uma estratégia de controle do mecanismo de ajuste de centro que possibilite que o robô móvel suspenso se desloque sobre a linha de transmissão utilizando apenas uma unidade motora e fique sempre alinhado com o horizonte, como ilustrado na Fig. 3.

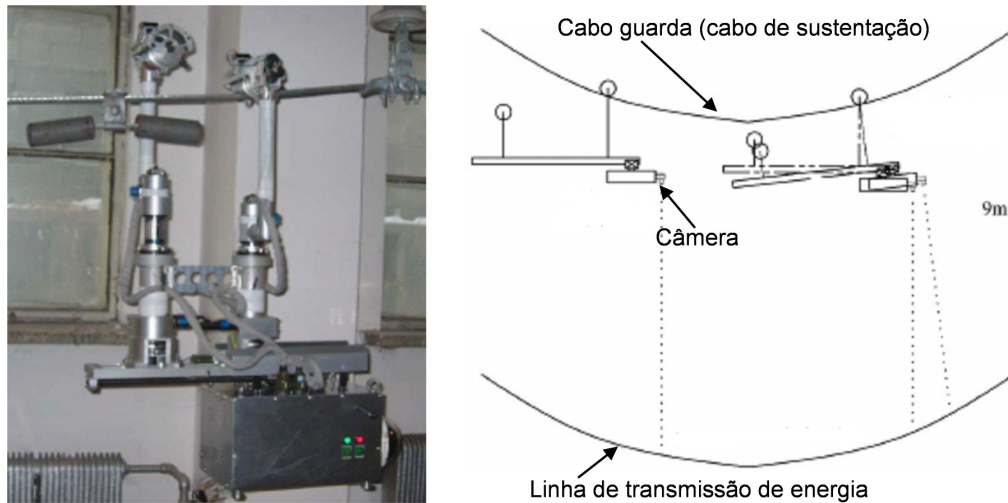


Figura 3 - Estratégia proposta por Xinglong Zhu et al⁽¹¹⁾

Cuilian Sun et al⁽¹²⁾ também apresenta a proposta de um mecanismo de posicionamento da unidade motora do robô móvel suspenso sobre o fio de sustentação após a transposição de obstáculos, onde é apresentado um método analítico de localização da posição do fio de sustentação e um mecanismo com um grau de liberdade (rotação em torno do eixo vertical) para posicionar corretamente a unidade motora sobre o fio. Toda a cinemática do sistema é estudada de maneira a possibilitar a compensação de erros causados pela precisão dos sensores que verificam a posição do fio de sustentação. O estudo feito considera uma situação em que o robô suspenso se encontra em um ambiente sem vento ou qualquer outro distúrbio que possa interferir na estabilidade física do robô suspenso.

Um dos problemas encontrados em robôs móveis autônomos é seu peso, quanto maior a quantidade de tarefas realizadas pelo robô e quanto maior o número de mecanismos incorporados à estrutura do robô, maior será o peso do robô e maior será a capacidade necessária da fonte de energia do sistema. Procurando minimizar o problema do peso, Cuilian Sun et al⁽¹³⁾ apresenta um estudo através de uma simulação 3D utilizando os softwares Pro/Engineer e ANSYS, que possibilite a

otimização da forma e tamanho das partes mecânicas que compõem o robô, de maneira possibilitar uma otimização (redução) da massa da estrutura do robô.

Visando minimizar o problema de peso e capacidade das fontes de alimentação disponíveis para serem embarcadas em robôs móveis suspensos, S.Peungsungwa, et al⁽¹⁴⁾ apresenta a proposta de um sistema de alimentação para aplicação em robôs móveis autônomos aplicados em linhas de transmissão de energia no qual a energia disponibilizada para a execução das operações do robô, movimentação sobre a linha de transmissão, verificação da situação da linha de transmissão (sistema de visão) e transmissão de dados obtidos pelo sistema de visão para uma estação no solo, é obtida utilizando a própria tensão elétrica da linha de transmissão, e funciona da seguinte forma: na estrutura no robô está instalado um transformador de corrente, que induz uma tensão de alimentação a partir da tensão elétrica da linha de transmissão sendo que a tensão elétrica induzida pelo transformador é retificada para que seja adequada para a alimentação dos componentes elétricos do robô móvel autônomo.

Existem vários trabalhos que propõem robôs móveis para serem aplicados em tarefas de inspeção e manutenção em linhas de transmissão de energia⁽¹⁵⁾, muitos dotados com mecanismo de transposição de obstáculos^(16, 17, 18, 19, 20). Outro tipo de estudo focado no mecanismo de transposição é sobre a maneira de reconhecer os obstáculos encontrados por robôs suspensos em seus ambientes de trabalho^(20, 21, 22). Também são encontrados estudos sobre a maneira de controlar robôs móveis suspensos^(23, 24, 25, 26, 27, 28).

Os primeiros robôs desenvolvidos para serem aplicados em linhas de transmissão tinham como objetivo apenas inspecionar os componentes da linha de transmissão de energia, porém, com o amadurecimento da ideia de aplicação de robôs para melhorar as condições com que as atividades de conservação das linhas de transmissão eram desempenhadas, começou a surgir propostas de robôs projetados para realizar tarefas de manutenção dos componentes da linha de transmissão. Um dos primeiros robôs para essa aplicação foi desenvolvido a partir de um trolley compacto teleoperado, projetado para retirar camadas de gelo acumuladas nos cabos guarda e nos fios condutores de linhas de transmissão que estão localizadas em áreas sujeitas a tempestades de neve. Esse mesmo robô auxilia também nas trocas dos cabos guarda⁽²⁹⁾. A Fig. 4 ilustra a aplicação de tal robô para a atividade de retirada de gelo acumulado sobre a linha de transmissão.

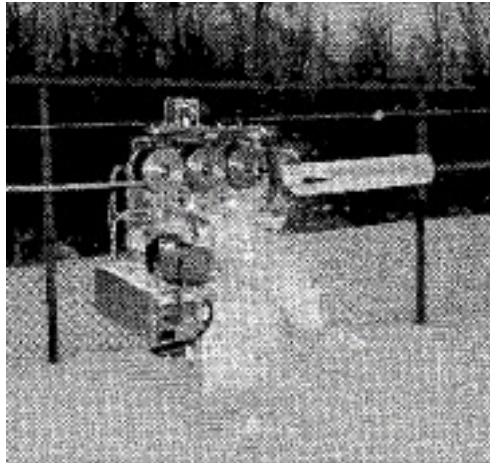


Figura 4 – Retirada da camada de gelo acumulado na linha de transmissão⁽²⁹⁾

Esferas sinalizadoras nos cabos guarda têm a função de alertar pilotos de aeronaves da presença de linhas de transmissão, e são normalmente instaladas no momento em que a linha de transmissão é construída. Porém, com o crescimento das cidades e surgimento de novas rotas de avião faz-se necessária à instalação de esferas em trechos da linha de transmissão onde antes não se fazia necessário. P. Ruaux⁽³⁰⁾ apresenta os estudo de um mecanismo capaz de realizar a instalação de esferas sinalizadoras em linhas de transmissão. No trabalho de Campos et al^(31, 32) é descrito o desenvolvimento de um robô projetado para realizar a instalação e remoção de esferas de sinalização, conforme ilustrado na Fig. 5.

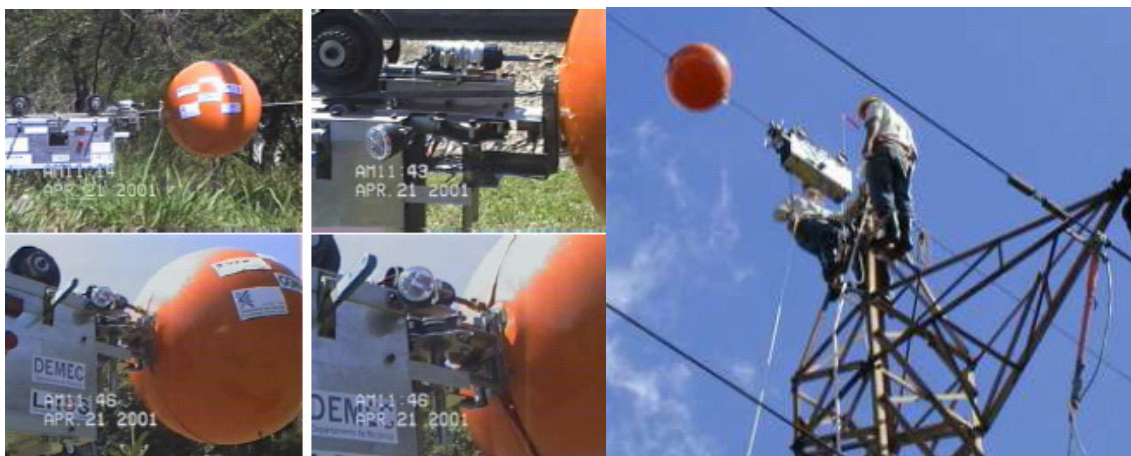


Figura 5 - Robô para instalação e remoção de esferas sinalizadoras⁽³¹⁾

Tendo em vista o levantamento bibliográfico realizado sobre robôs aplicáveis em tarefas relativas as atividades de inspeção em linhas de transmissão é foi possível verificar o pouco desenvolvimento sobre a estabilidade físicas desse tipo de robô suspenso.

No decorrer da revisão bibliográfica foram encontrados trabalhos que apresentam diferentes tipos de mecanismos com a função de manter a estabilidade física de veículos suspensos, e analisando os trabalhos encontrados, esses mecanismos podem ser divididos em duas classes distintas: mecanismos com princípio de funcionamento passivo e mecanismos com princípio de funcionamento ativo. Hiroshi Matsuhisa et al⁽³³⁾ apresenta uma série de estudos teóricos sobre sistemas passivos de amortecimento para serem aplicados em corpos suspensos em geral, em cujas propostas das várias configurações de sistemas massa-mola-amortecedor, que consistem basicamente em acoplar uma segunda massa ao sistema principal, nesse caso a estrutura do veículo suspenso, de maneira que, quando o veículo suspenso sofre a ação de uma força externa, força do vento por exemplo, essa massa acoplada vibra de tal forma a reduzir as vibrações na estrutura do veículo suspenso. No decorrer do trabalho são apresentadas uma série de sistemas nos quais a massa de amortecimento é disposta em diferentes posições e é feita a análise dinâmica do sistema para essas diferentes configurações e do sistema a fim de observar qual a influência da posição e do modo com que a massa de amortecimento é acoplada ao sistema no amortecimento da estrutura e qual a disposição mais eficiente em termos de amortecimento do veículo suspenso. A Fig. 6 e a Fig. 7 ilustram as configurações de sistemas estudadas.

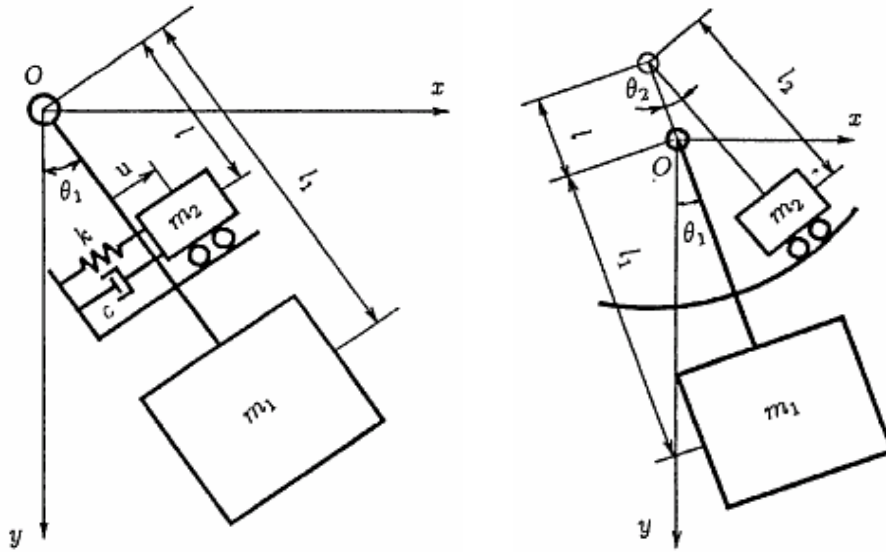


Figura 6 - Sistemas passivos de amortecimento de vibrações⁽³³⁾

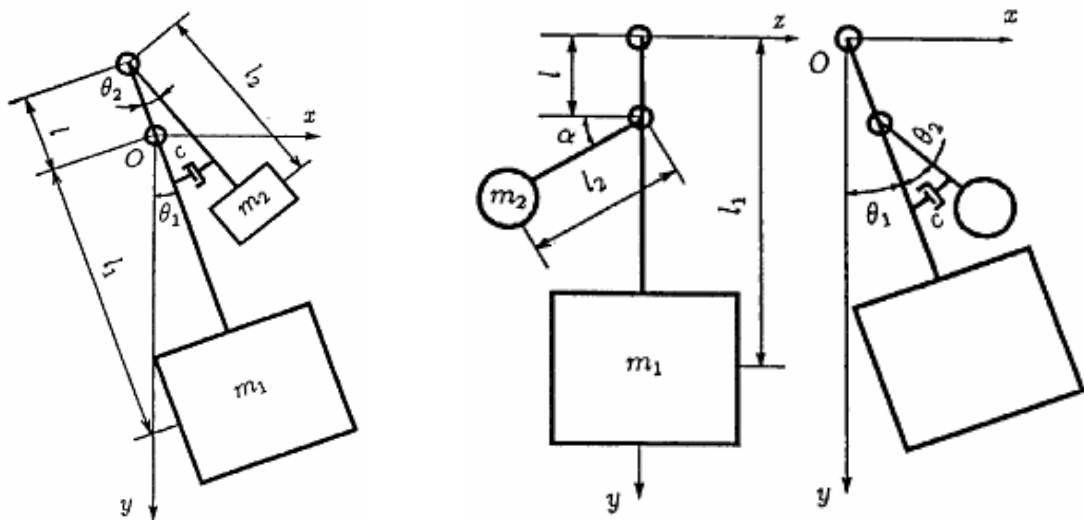


Figura 7 - Sistemas passivos de amortecimento de vibrações⁽³³⁾

Osamu Nishihara et al⁽³⁴⁾ apresenta estudos teóricos sobre a possibilidade de utilização de um sistema ativo e outro passivo de amortecimento de vibrações em veículos suspensos baseado no princípio do efeito giroscópico. A Fig. 8 apresenta a configuração esquemática do mecanismo passivo de amortecimento estudado, onde um rotor está fixado em um suporte que permite seu giro ao redor do eixo z (gimbal) e sua rotação é mantida constante por meio de um motor elétrico. O suporte do rotor está fixado em uma outra estrutura que permite que o suporte do rotor gire em torno do eixo x (perpendicular ao eixo de rotação do rotor), e todo esse mecanismo está fixo à estrutura do veículo suspenso. Com essa disposição o sistema atua de

maneira a amortecer as vibrações que ocorrem em torno do eixo y, ou seja, pelo efeito giroscópico: quando a estrutura tenta girar em torno do eixo y, a consequência é que a direção do eixo z seja alterada, porém, como há um rotor girando nesse eixo z, o sistema tende a manter a direção do eixo z e amortece o giro em torno do eixo y em consequência do efeito giroscópico.

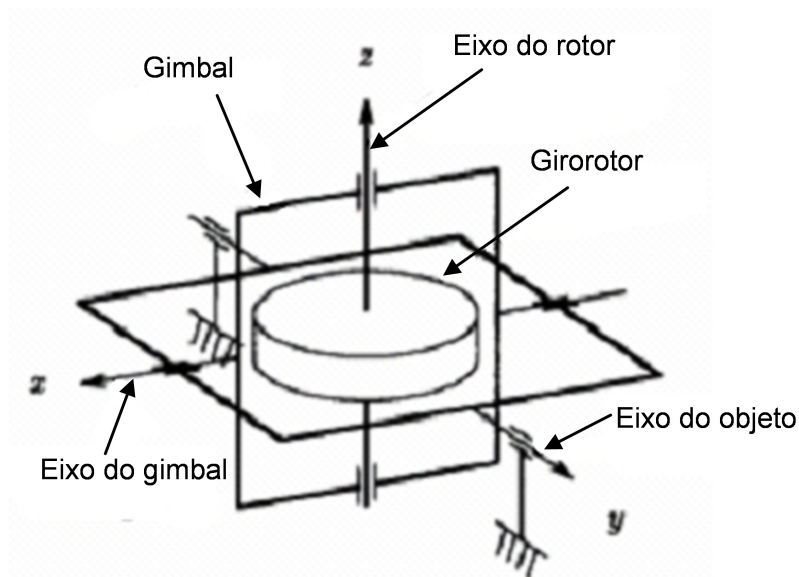


Figura 8 – Configuração esquemática do mecanismo de amortecimento passivo⁽³⁴⁾

A Fig. 9 apresenta a configuração esquemática do mecanismo ativo de amortecimento estudado, onde a disposição dos componentes no sistema é praticamente idêntica ao sistema da Fig. 8, porém, com uma diferença que, a presença de um motor elétrico para controlar a posição angular do suporte do rotor em relação ao eixo x, torna o mecanismo um sistema ativo. Pelo efeito giroscópico, quando alguma excitação (uma força por exemplo) atua sobre o sistema de maneira que tenha força suficiente para alterar a orientação do eixo do rotor em torno do eixo y, o eixo do rotor se movimenta com uma defasagem de 90° , ou seja, se a força tenta movimentar a orientação o eixo do rotor em torno do eixo y o eixo do rotor rotaciona em torno do eixo x, então, como o sistema possui um motor elétrico que controla a posição angular do sistema em relação ao eixo x, a orientação inicial do eixo do rotor é restabelecida pelo motor elétrico, em consequência, amortecendo de maneira ativa as vibrações na estrutura do veículo onde o sistema está instalado. Hiroshi Kanki et al⁽³⁶⁾ também apresenta um sistema ativo de amortecimento de vibrações para veículos suspensos baseado no efeito giroscópico.

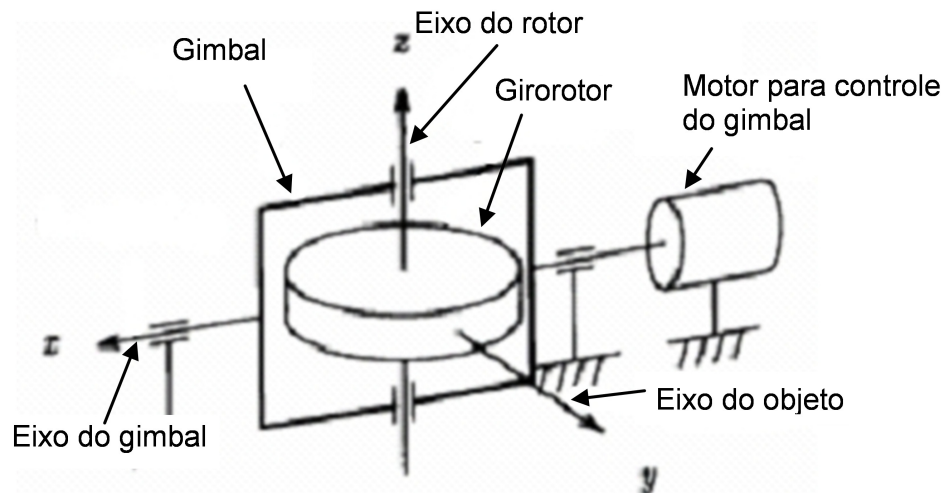


Figura 9 – Configuração esquemática do mecanismo de amortecimento ativo⁽³⁴⁾

Em 1995 foi registrada uma patente⁽³⁶⁾ propondo mecanismos que utilizam sistemas massa mola amortecedor, capazes de amortecer de maneira passiva boa parte das vibrações sofridas por veículos suspensos.

Na busca por sistemas passivos e ativos de estabilização física como sistemas de suspensão veiculares, etc., encontramos o trabalho de Horikawa⁽³⁷⁾, onde ele descreve o desenvolvimento de um sistema ativo de compensação de desbalanceamento em mancal rotativo a ar, dotado de micrômetros capacitivos que medem o deslocamento radial do eixo; elementos magnetoresistivos que, à medida que o eixo gira, geram pulsos através dos quais é possível medir a rotação do eixo; atuadores que são a combinação de um mecanismo de mancal a ar passivo convencional com um atuador piezoelétrico; e um sistema de controle que faz a verificação dos sinais de entrada e como resposta manda sinais para os atuadores corrigirem a posição do eixo, conseguindo uma ultraprecisão na rotação e rigidez praticamente infinita do sistema. O fundamento de atuação ativa desenvolvida por Horikawa⁽³⁷⁾ inspirou a proposta de um sistema de estabilização para robôs suspensos que será desenvolvido nesse trabalho.

4 Fundamentos

4.1 Análise do pêndulo simples

Em uma primeira análise, veículos suspensos apresentam comportamento análogo a um pêndulo simples.

O pêndulo simples consiste de uma partícula de massa m suspensa por um fio sem massa e inextensível de comprimento L . Afastada da posição de equilíbrio, linha vertical que passa pelo ponto de suspensão, e abandonada, a partícula oscila. Ignorando a resistência do ar, as forças que atuam sobre a partícula são a força peso ($m \cdot g$), exercida pela Terra, e a tensão T , exercida pelo fio, como esquematizado na Figura 10. A resultante ao longo do fio faz o papel da força centrípeta, que não é cancelada pela componente do peso ao longo do fio, resultando numa componente de módulo ($m \cdot g \cdot \sin(\theta)$) que faz o sistema oscilar.

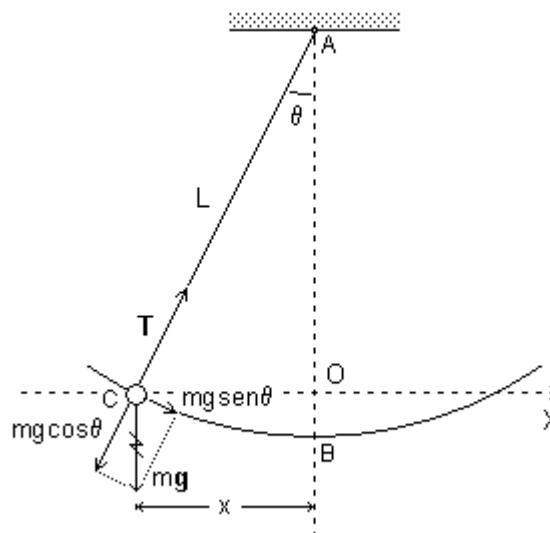


Figura 10 - Equilíbrio em um pêndulo simples

Considerando apenas os movimentos para os quais a amplitude é muito menor do que o comprimento do fio, ou seja, para os quais o ângulo θ é pequeno, o arco de circunferência BC pode ser aproximado pelo segmento de reta horizontal OC e, sobre esse segmento, é fixado o eixo X . A projeção do ponto de suspensão do pêndulo sobre o eixo X define a origem O .

Nessa aproximação, $\sin(\theta) = x/L$ e o módulo da força que atua ao longo da trajetória da partícula fica:

$$F(x) = -\left(\frac{m \cdot g}{L}\right) \cdot x \quad (1)$$

O sinal negativo aparece porque a força tem o mesmo sentido que aquele escolhido como positivo para o eixo X quando a elongação é negativa e o sentido oposto quando a elongação é positiva. Assim, se o movimento da partícula se restringir a pequenas amplitudes, pode-se considerar que ele acontece sobre uma reta (o eixo X) e sob o efeito de uma força cujo módulo é proporcional ao afastamento da partícula de um ponto fixo sobre esta reta (o ponto O) e dirigida para esse ponto. Em outras palavras, para pequenas amplitudes, o movimento da partícula que faz parte do pêndulo é um movimento harmônico simples, *MHS*.

Por outro lado, o módulo da força que atua sobre uma partícula em *MHS*, é dado genericamente por:

$$F = -C \cdot x \quad (2)$$

$$\text{com } C = m \cdot \omega^2 \quad (3)$$

de modo que o período e a frequência ficam dados pelas expressões:

$$T = 2 \cdot \pi / \omega \quad (4)$$

$$f = \omega / 2 \cdot \pi \quad (5)$$

Comparando esta expressão para a força com aquela obtida para o pêndulo simples temos $C = m \cdot g/L$ e $\omega^2 = g/L$. Com isso:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot (L/g)^{1/2} \quad (6)$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot (g/L)^{1/2} \quad (7)$$

Assim, dado o comprimento do pêndulo e o módulo da aceleração gravitacional local, e caso não seja forçado por qualquer outro agente externo além da força gravitacional, o pêndulo só pode oscilar com a frequência dada pela expressão acima. Essa frequência característica do pêndulo é chamada frequência própria ou frequência natural de oscilação.

Quando a amplitude é muito menor que o comprimento do fio, o período do pêndulo simples independe da amplitude do movimento porque a força de restituição que atua sobre a partícula pode ser considerada proporcional a θ (ângulo entre o fio e a vertical). Neste contexto, esta característica constitui o que se chama de lei do isocronismo⁽³⁸⁾.

No caso de amplitudes não muito pequenas, o pêndulo se torna um oscilador não harmônico, a força restauradora não é mais proporcional ao deslocamento medido θ , mas a $\text{sen}(\theta)$. Como $\text{sen}(\theta) < \theta$ (se θ é diferente de zero), a força de restituição, nesse caso, é menor do que no caso anterior, qualquer que seja a posição da partícula e, portanto, também a sua aceleração é menor. Assim, a partícula demora mais tempo para completar uma oscilação, isto é, o período é maior e passa a depender da amplitude.

4.2 A Física do pêndulo composto

Em uma análise um pouco mais detalhada, veículos suspensos apresentam um comportamento análogo a um pêndulo composto, uma vez que o próprio cabo de sustentação oscila.

A Figura 11 ilustra um pêndulo composto, capaz de oscilar livremente em torno de um eixo que passa pelo ponto P . Na posição de equilíbrio ($\theta = 0$) o centro de massa C está alinhado com o ponto P , localizando-se logo abaixo deste. A distância

entre P e C é a . Suponha também que o corpo tenha um momento de inércia, I , em relação ao ponto de oscilação P .

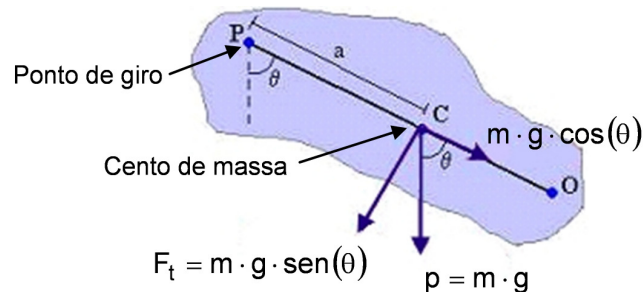


Figura 11 - Esquema de um pêndulo composto

Para fazer uma análise do movimento do corpo quando ele é liberado, deve-se considerar que sua massa localiza-se toda no seu centro de massa C , onde atua a força peso, produzindo um torque τ em relação ao ponto P . Este torque é o único causador do movimento do corpo.

Quando o corpo é deslocado de sua posição de equilíbrio de um ângulo θ fica submetido a um torque da força peso atuante em seu centro de massa, dado pela expressão:

$$\tau = -m \cdot g \cdot a \cdot \text{sen}(\theta) \quad (8)$$

Como o torque age sempre de modo a restaurar a condição de equilíbrio levando o ponto C verticalmente abaixo de P , o lado direito da Equação do torque leva um sinal negativo (quando θ é positivo o torque é negativo e vice-versa). m é a massa do corpo e g é a aceleração da gravidade local. Para oscilações pequenas, quando θ é menor que 20° , podemos usar a aproximação:

$$\text{sen}(\theta) \cong \theta$$

e a equação do torque ficará:

$$\tau = -m \cdot g \cdot a \cdot \theta \quad (9.)$$

Mas este torque também pode ser calculado pela equação:

$$\tau = I \cdot \alpha = I \cdot d^2\theta/dt^2 \quad (10)$$

Onde I é o momento de inércia do corpo em relação ao ponto P e α é a aceleração angular do pêndulo.

Igualando-se as equações anteriores obtém-se:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{m \cdot g \cdot a \cdot \theta}{I} = 0$$

que é a equação diferencial característica do movimento harmônico simples, e tem uma solução possível do tipo:

$$\theta = \theta_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta)$$

Onde ω é:

$$\omega = \left(\frac{m \cdot g \cdot a}{I} \right)^{1/2}$$

E o período da oscilação vale:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{I}{m \cdot g \cdot a} \right)^{1/2} \quad (11)$$

Ao igualar-se a equação do período do pêndulo composto à equação do período do pêndulo simples, encontra-se o comprimento l_0 do pêndulo simples equivalente ao pêndulo composto. Assim:

$$2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{l_0}{g} \right)^{1/2} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{I}{m \cdot g \cdot a} \right)^{1/2}$$

$$l_0 = \frac{I}{m \cdot a} \quad (12)$$

Este resultado significa que, quanto ao período, a massa do pêndulo físico pode ser considerada como concentrada em um ponto cuja distância em relação ao

eixo de oscilação seja I_0 . Este ponto é chamado centro de oscilação O do pêndulo físico e depende da posição do eixo de oscilação (ponto P), para qualquer corpo.

4.3 Vibrações transversais em uma corda

Veículos suspensos têm como principal meio de sustentação cabos tracionados, os quais se comportam como cordas tensionadas.

Os fatores principais que afetam a estabilidade é a frequência natural do robô suspenso (análogo a um pêndulo) e a frequência natural de oscilação do próprio cabo, que é afetado pelo seu comprimento, dimensões (diâmetro, peso.) e tensão axial aplicado ao cabo na instalação. Portanto, antes de iniciar o projeto mecânico do robô é preciso conhecer qual é a faixa de frequência dos cabos em que o robô será aplicado, pois o robô deverá ser construído de tal forma a apresentar uma frequência natural de ressonância diferente da frequência natural de oscilação do cabo de sustentação (e seus primeiros harmônicos), pois caso essa condição não seja satisfeita, quando o robô passar por um comprimento do cabo que apresente uma frequência natural bem próxima à frequência dele, acontecerá a sobreposição das duas frequências fazendo com que o movimento de oscilação aumente de amplitude e a tendência é que o robô balance ao redor do cabo de sustentação de forma cada vez mais acentuada, comprometendo a atividade desempenhada pelo robô, assim como possibilidades de acidentes (se desprender do cabo, por exemplo).

Vamos considerar uma corda de comprimento l_c , tensionada por uma força F e presa em suas extremidades. Seja δ a densidade da corda por unidade de comprimento. Ao deslocarmos (de uma pequena quantidade) a corda de sua posição de equilíbrio, ela irá vibrar (ou balançar) com uma certa frequência. Na realidade, uma corda vibrante oscila com muitas frequências, mas apenas umas poucas correspondem a amplitudes apreciáveis. São essas diferentes frequências, todas múltiplas da fundamental, que correspondem aos harmônicos emitidos pela corda vibrante. A velocidade com que essa vibração se propaga a todos os pontos da corda é dada pela fórmula de Taylor

$$v = \sqrt{F/\delta} \quad (13)$$

A velocidade de propagação é tanto maior quanto maior a tensão aplicada à corda e tanto menor quanto maior for a densidade do material que constitui a corda.

Numa corda fixa nas duas extremidades se estabelecem ondas estacionárias. Figura 12, isto é, ondas cujos pontos de máximo (cristas) deslocamento e cujos pontos de deslocamento nulo, estes chamados nós, não mudam de posição na corda. As ondas estacionárias se estabelecem quando um pulso atinge uma extremidade fixa e volta sobre a corda vez após vez, estabelecendo nós fixos.

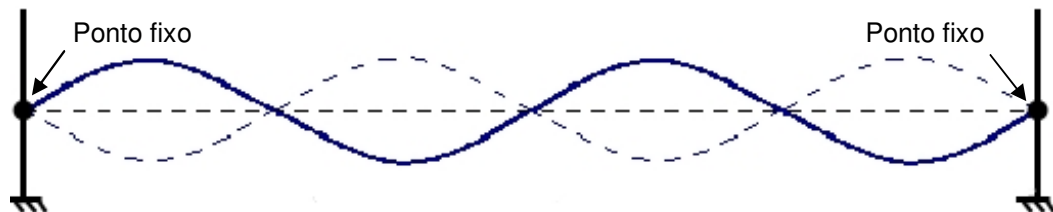


Figura 12 - Ondas estacionárias em corda fixa nas extremidades

Em uma onda estacionária, o comprimento de onda λ_n , associado a uma dada frequência de vibração f_n , é o dobro da distância entre dois nós, pontos cuja vibração é nula. Dessa forma, é óbvio que uma corda presa nas extremidades contém um número inteiro de meios comprimentos de onda. Concluímos que, sendo l_c o comprimento da corda entre as extremidades fixas e λ_n o comprimento de uma onda na situação estacionária, a relação entre essas duas grandezas é dada simplesmente por:

$$l_c = n \cdot (\lambda_n/2) \quad (14)$$

onde n pode assumir valores inteiros 1, 2, 3, 4,...

Por outro lado, a distância percorrida pela onda, durante um intervalo de tempo igual ao período de oscilação T_n , é o próprio comprimento de onda λ_n . Como a velocidade de propagação na corda, pela fórmula de Taylor, é dada por $V = \sqrt{F/\delta}$, resulta que:

$$\lambda_n = V \cdot T_n = \left(\sqrt{F/\delta}\right) \cdot T_n = 2 \cdot l_c / n \quad (15)$$

Lembrando que a frequência é o inverso do período ($f = 1/T$), obtemos todas as frequências que uma corda vibrante pode oscilar:

$$f_n = \frac{n}{2 \cdot l_c} \cdot \sqrt{\frac{F}{\delta}} \quad (16)$$

O que acontece na realidade é que ao excitarmos uma corda esticada, ela vibra com todas as frequências f_n , para $n=1,2,3,\dots$

A cada valor de n corresponde um modo de vibração. Ao valor $n=1$, corresponde o modo fundamental de vibração da corda, cuja frequência é dada por

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot l_c} \cdot \sqrt{\frac{F}{\delta}} \quad (17)$$

A amplitude de vibração associada a cada frequência diminui rapidamente ao aumentar o valor de n , tornando-se desprezível. Com efeito, é possível mostrar que, deslocando o ponto central da corda de uma pequena distância h normalmente à corda, a amplitude correspondente a uma frequência f_n é dada por $a_n = 8 \cdot h / \pi^2 \cdot n^2$. Esta relação, devida a Fourier, mostra que a amplitude do modo correspondente a f_n é inversamente proporcional ao valor de n . Por exemplo, a amplitude do modo fundamental é 4 vezes a amplitude do segundo modo ($n=2$), 9 vezes a amplitude do terceiro modo ($n=3$), 16 vezes a amplitude do quarto modo ($n=4$) e assim por diante.

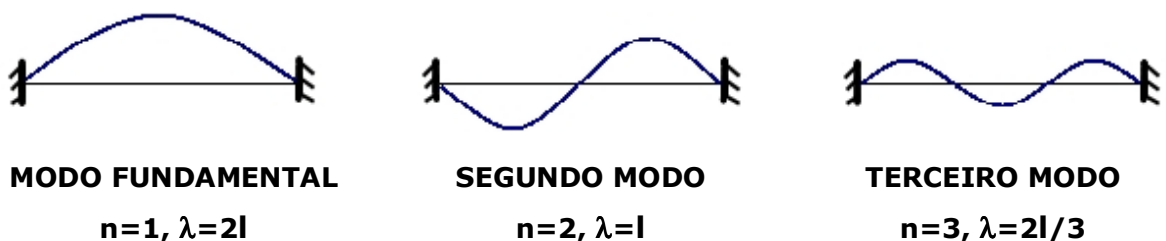


Figura 13 - Os três primeiros modos de vibração de uma corda

No caso de uma onda estacionária em uma corda fixa nas duas extremidades, o deslocamento $y_n(x,t)$ correspondente a um modo fundamental de vibração f_n , é dado por:

$$y_n(x,t) = A_n \cdot \text{sen}\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{l_c}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot v \cdot t}{l_c}\right) \quad (18)$$

onde A_n é uma constante que mede a amplitude da oscilação. No caso do modo fundamental, a equação da onda é dada por:

$$y_1(x,t) = A_1 \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi \cdot x}{l_c}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot v \cdot t}{l_c}\right) \quad (19)$$

Para $x=0$ resulta $y_1(0,t)=0$ e para $x=l$ resulta $y_1(l,t)=0$. Verificamos que nas duas extremidades o deslocamento é nulo. A primeira parte da equação de onda nesse caso vem da simples consideração (Fig. 5) que para $n=1$ a forma é metade de uma senoide, entre $x=0$ e $x=l_c$. Para $n=2$, é uma senoide inteira. Para $n=3$ é uma senoide e meia, e assim por diante. A segunda parte da equação de onda surge da consideração que em qualquer ponto (qualquer valor de x) a oscilação é harmônica de frequência dada por $f_n = n \cdot v / 2 \cdot l_c$. A esta corresponde uma frequência angular $\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_n = \pi \cdot n \cdot v / l_c$. A essa frequência angular está associada a oscilação harmônica dada por $\cos(\pi \cdot n \cdot v / l_c \cdot t)$.

NOTA: para uma corda vibrante excitada por um pequeno deslocamento h (em relação ao comprimento da corda) a uma distância d da extremidade esquerda da corda (origem das abscissas x), a amplitude da oscilação harmônica é dada pela fórmula de Fourier

$$A_n = \frac{2 \cdot h \cdot l_c^2}{d \cdot (l_c - d) \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \text{sen}\left(\frac{n \cdot \pi \cdot d}{l_c}\right) \quad (20)$$

Para o harmônico fundamental basta colocar $n=1$.

4.4 Energia e potência em uma oscilação harmônica

Em uma oscilação harmônica realizada por uma massa m , a energia cinética é dada pela fórmula clássica:

$$E_c = m \cdot v^2 / 2 = m \cdot a^2 \cdot \omega^2 \cdot \text{sen}^2(\omega \cdot t) \quad (21)$$

onde foi usada a fórmula da velocidade no MHS, $v = -a \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$.

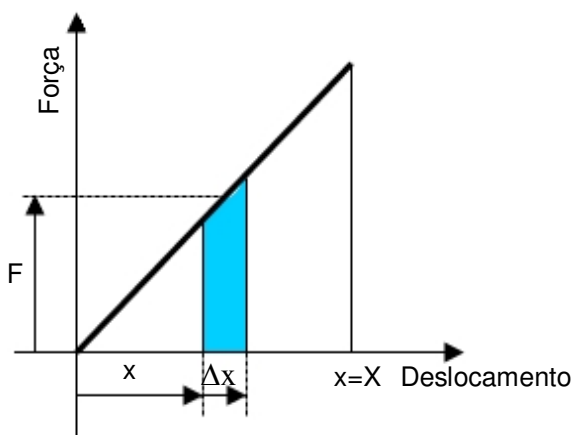
A energia potencial mede o trabalho necessário para deslocar o corpo de massa m de uma distância x sujeito a uma força dada por:

$$E_p = -m \cdot a \cdot \omega^2 \cos(\omega \cdot t) = -m \cdot \omega^2 \cdot x \quad (22)$$

Considerando um deslocamento elementar Δx , o trabalho elementar é dado pela força vezes esse deslocamento, isto é,

$$\Delta L = F \cdot \Delta x = -m \cdot \omega^2 \cdot x \cdot \Delta x \quad (23)$$

A Figura 14 representa a força F em função do deslocamento x e a pequena área colorida é o produto da força pelo deslocamento Δx a partir do valor x do deslocamento.



O trabalho elementar é dado pela pequena área colorida de base Δx e altura F , ou seja, $F \cdot \Delta x$. Se forem somados todos esses trabalhos elementares desde $x=0$ até $x=L$, o valor final de x , o trabalho total é a área do triângulo ilustrado, ou seja:

$$L = (m \cdot \omega^2 \cdot X) \cdot X / 2 = (m \cdot \omega^2 \cdot X^2) / 2$$

Figura 14 - Trabalho de uma força elástica (mhs)

Desta forma, uma massa em *MHS* de frequência angular ω tem, em cada instante, a energia total:

$$E = E_c + E_p = \left(\frac{m \cdot v^2}{2} \right) + \left(\frac{m \cdot \omega^2 \cdot x^2}{2} \right) = \left(\frac{m}{2} \right) \cdot a^2 \cdot \omega^2 \cdot \text{sen}^2(\omega \cdot t) + \left(\frac{m}{2} \right) \cdot a^2 \cdot \omega^2 \cdot \text{cos}^2(\omega \cdot t)$$

ou seja:

$$E = \frac{m \cdot a^2 \cdot \omega^2}{2} \quad (24)$$

Essa energia total é constante. No caso em que se trata de uma mola de rigidez k à qual se conecta uma massa m que oscila, a frequência angular ω é dada por $\omega^2 = k/m$. Neste caso a energia potencial é:

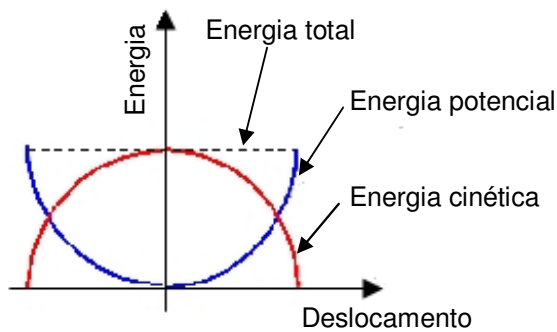
$$E_p = \frac{k \cdot x^2}{2} \quad (25)$$

e a energia total pode ser escrita na forma $E = k \cdot a^2 / 2$.

A potência associada a uma massa em *MHS* é dada pelo produto da força pela velocidade, ou seja:

$$P = F \cdot v = k \cdot x \cdot v = \left(\frac{k \cdot a^2 \cdot \omega}{2} \right) \cdot \text{sen}(2 \cdot \omega \cdot t) = E \cdot \omega \cdot \text{sen}(2 \cdot \omega \cdot t) \quad (26)$$

É a energia do movimento na unidade de tempo. Vemos que essa potência é uma função harmônica cuja frequência angular é o dobro da frequência do movimento. O mesmo é verdade para as energias cinética e potencial.



Na figura ao lado estão indicadas a energia cinética (curva vermelha) e a energia potencial (curva azul) em função do deslocamento x da origem. A energia potencial é máxima nos pontos de máximo afastamento da origem. A energia cinética é máxima na origem. Sua soma é constante e igual ao valor indicado pela linha tracejada

Figura 15 - Variação das energias cinética e potencial no mhs

4.5 Composição de dois movimentos harmônicos simples

Um veículo suspenso apresenta uma certa frequência de oscilação natural que depende apenas da distância do seu centro de massa até o cabo de sustentação, e da aceleração da gravidade. Já o cabo de sustentação apresenta uma faixa de frequência de oscilação natural idêntico a de uma corda vibrante. Para dimensionar a estrutura do veículo de maneira adequada se faz necessário entender o efeito da composição de movimentos harmônicos.

Consideramos, por exemplo, dois *MHS* paralelos e de mesma frequência angular ω . O resultado é um *MHS* cuja amplitude é a raiz quadrada da soma dos quadrados das duas amplitudes envolvidas quando as duas fases iniciais são nulas ou iguais. Nesse caso particular se obtém a nova fase inicial somando à nova fase obtida a fase inicial dos movimentos componentes.

Caso de dois *MHS* paralelos de frequências diferentes. Por simplicidade vamos supor que ambas as fases sejam nulas e que as amplitudes sejam iguais. Isto não altera as características do movimento resultante, apenas simplifica a matemática envolvida. Os dois movimentos são $u(t) = a \cdot \cos(\omega \cdot t)$ e $v(t) = a \cdot \cos(\Omega \cdot t)$. Somando esses dois movimentos, obtemos a equação $w(t) = a \cdot \cos(\omega \cdot t) + a \cdot \cos(\Omega \cdot t)$. Essa soma, utilizando as identidades:

$$\Omega \cdot t = [(\Omega + \omega) \cdot t + (\Omega - \omega) \cdot t]/2, \quad \omega \cdot t = [(\Omega + \omega) \cdot t - (\Omega - \omega) \cdot t] \quad (27)$$

pode ser escrita na forma:

$$w(t) = 2 \cdot a \cdot \cos\left[\frac{(\Omega - \omega)}{2}\right] \cdot t \times \cos\left[\frac{(\Omega + \omega)}{2}\right] \cdot t \quad (28)$$

Este movimento pode ser considerado como um movimento harmônico cuja amplitude é $A = 2 \cdot a \cdot \cos[(\Omega - \omega)/2] \cdot t$ e frequência $\varpi = (\Omega + \omega)/2$. Sob este ponto de vista o movimento resultante tem uma alta frequência ϖ e sua amplitude A varia lentamente com a baixa frequência $\nu = (\Omega - \omega)/2$. Esse fenômeno é comumente chamado de batimento. Em acústica, corresponde a se ouvir um som de alta frequência em que a amplitude varia lentamente ao longo do tempo. Essa variação some quando as duas frequências coincidem. A Figura 16 ilustra o fenômeno do batimento, que seria o movimento resultante do robô pendurado ao cabo, ambos com oscilações próprias.

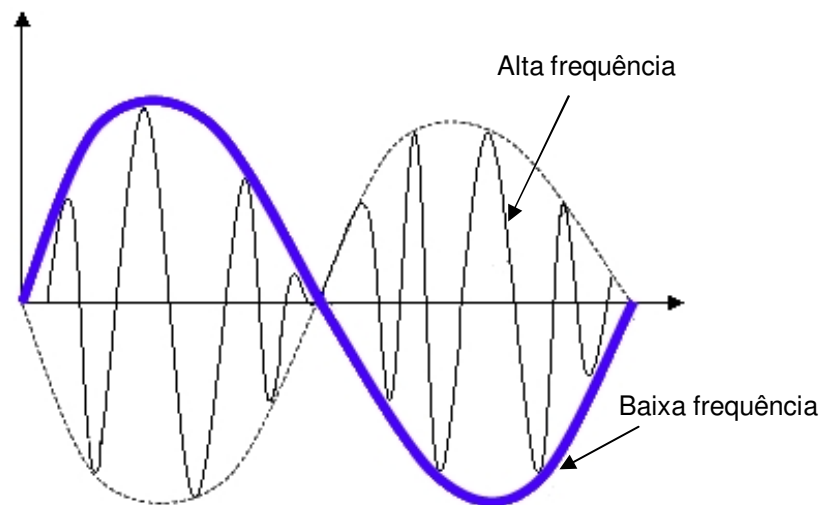


Figura 16 - Batimento provocado pela soma de dois mhs

4.6 Impulso e Quantidade de Movimento

O princípio de funcionamento do sistema de amortecimento de oscilações proposto é baseado no princípio de quantidade de movimento de um sistema.

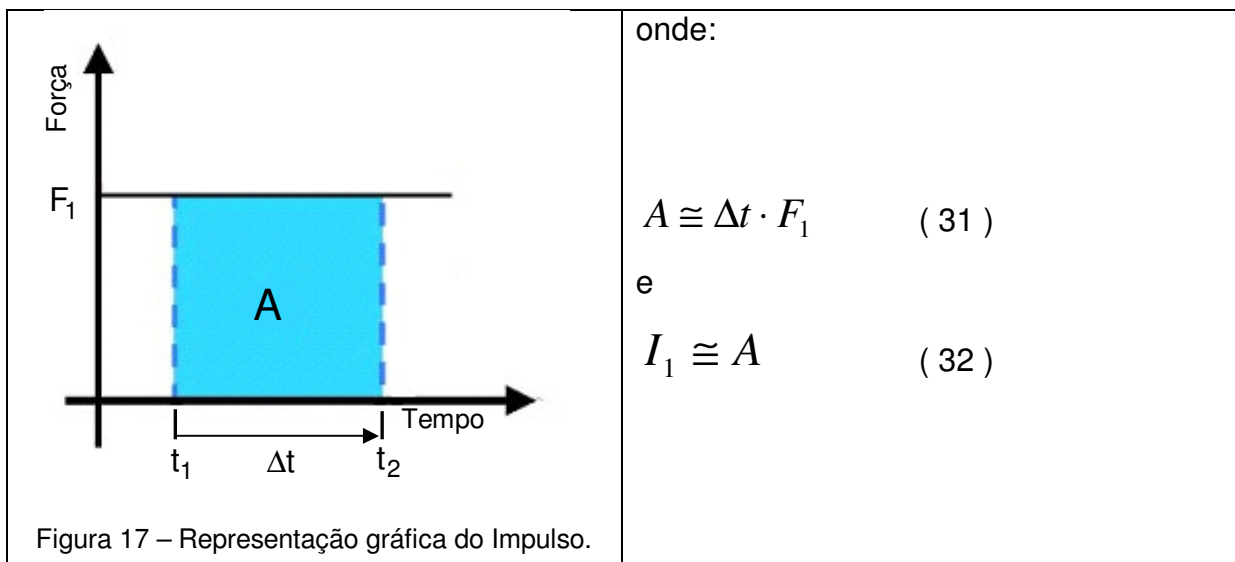
4.6.1 Impulso

Impulsionar um corpo é empurrar este corpo durante um certo intervalo de tempo. Assim fica fácil definir esta grandeza como sendo o produto da força pelo tempo de aplicação desta força.

$$\vec{I}_F = \vec{F} \cdot \Delta t \quad (29)$$

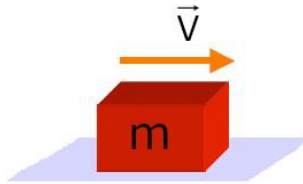
Como o impulso é calculado para um intervalo de tempo, ele não é uma grandeza instantânea. Repare ainda que o impulso é dado pelo produto de uma grandeza escalar (Δt) por uma grandeza vetorial (\vec{F}), portanto, o impulso é uma grandeza vetorial com a mesma direção e o mesmo sentido da força (\vec{F}). Quando a força \vec{F} for variável, o impulso será calculado pela função integral, e também pode ser calculado usando o conceito de força média ou ainda pelo método gráfico ilustrado a seguir, Fig. 17.

$$\vec{I}_F = \vec{I}_{F_m} = \vec{F}_m \cdot \Delta t \quad (30)$$



4.6.2 Quantidade de Movimento ou Movimento Linear (\vec{Q})

Defini-se quantidade de movimento ou momento linear de um corpo, como sendo o produto de sua massa m pela sua velocidade \vec{V} .

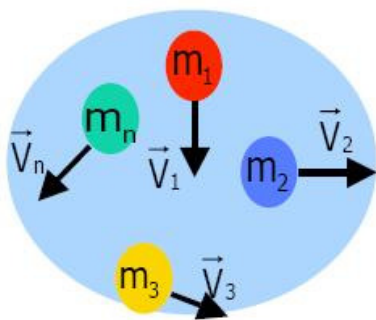


$$\text{onde: } \vec{Q} = m \cdot \vec{V} \quad (33)$$

Figura 18 – Quantidade de movimento de um corpo

Observe que a quantidade de movimento é uma grandeza vetorial, diretamente proporcional à velocidade, portanto, com a mesma direção e o mesmo sentido da velocidade. Ao contrário do impulso, a quantidade de movimento é uma grandeza instantânea.

Para um sistema constituído por vários corpos, a soma vetorial das quantidades de movimento de cada corpo, será a quantidade de movimento do sistema.



Onde:

$$\vec{Q}_{sistema} = m_1 \cdot \vec{V}_1 + m_2 \cdot \vec{V}_2 + \dots + m_n \cdot \vec{V}_n \quad (34)$$

Figura 19 – Sistema de várias massas

A quantidade de movimento é dada pelo produto de sua massa pela velocidade do seu centro de massa.

$$\vec{Q}_{corpo_extenso} = m \cdot \vec{V}_{cm} \quad (35)$$

4.6.3 Teorema do impulso

Pelo teorema do impulso, podemos relacionar impulso e quantidade de movimento e constatar que elas são de mesma dimensão. Observe a demonstração do teorema.



Figura 20 – Teorema do impulso

Seja $\vec{F}_R = m \cdot \vec{a}$, substituindo \vec{a} por $\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}$, temos:

$$\vec{F}_R = m \cdot \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} \Rightarrow \vec{F}_R \cdot \Delta t = m \cdot \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} \cdot \Delta t \Rightarrow \vec{I} = m \cdot \Delta \vec{V} \Rightarrow$$

(36)

$$\vec{I} = m \cdot (\vec{V}_2 - \vec{V}_1) \Rightarrow \vec{I} = m \cdot \vec{V}_2 - m \cdot \vec{V}_1 \Rightarrow \vec{I} = \vec{Q}_2 - \vec{Q}_1 \Rightarrow \vec{I} = \Delta \vec{Q}$$

4.7 Controladores PID

Controladores do tipo Proporcional, Integral e Derivativo, comumente denominados de PID, são controladores largamente utilizados no cenário industrial. Segundo Aströn⁽⁴⁰⁾, entre 90 e 95% dos problemas de controle são solucionados empregando tais controladores. Tal utilização deve-se ao fato deste controlador ser facilmente implementável, de baixo custo e versátil com capacidade de alterar os comportamentos transitório e de regime permanente dos processos sob controle. Atualmente, a maioria dos processos automatizados que utilizam Controladores Lógicos Programáveis – CLP's, possuem em suas malhas de controle algoritmos PID, cabendo aos engenheiros e técnicos responsáveis pelo processo a tarefa de sintonia dos parâmetros dos controladores. De acordo com Aströn⁽⁴⁰⁾, a principal razão para a baixa performance de processos automatizados está relacionada a

problemas em válvulas, sensores e a sintonia incorreta dos controladores PID empregados junto aos processos.

Murray et al⁽⁴¹⁾ definiram, de um modo simplista, um sistema de controle como um dispositivo onde uma quantidade medida é utilizada para modificar o comportamento do sistema por meio de computação e atuação. Uma visão moderna do papel do controle enxerga a realimentação como uma ferramenta para gerenciamento de incertezas, sejam elas paramétricas, de condições de funcionamento, de limites práticos ou advindas de alteração de sinais externos (ruído, perturbação) não controlados. Justamente esta visão, de sistemas de controle como uma maneira de conferir robustez frente a uma incerteza, explica o porquê de o controle realimentado estar disseminado por todas as tecnologias do mundo moderno. As contribuições para a área de controle vêm de diferentes campos de conhecimento, tais como: matemática, física; engenharias aeroespacial, química, mecânica e elétrica; economia, biologia, etc. A grande interação com diferentes áreas justifica a importância e a força que o controle tem adquirido na história. São desafios nos controles de processo a operação confiável, eficiente e robusta (Murray et al⁽⁴¹⁾).

4.7.1 Controle de processos utilizando PID

Apesar do aparecimento de novas técnicas de controle, os controladores PID dominarão por muito tempo ainda os parques industriais^(42, 43). Se algoritmos de controle mais sofisticados são utilizados, muitas vezes pode-se encontrar o controlador PID no nível mais baixo da hierarquia de controle (Gude et al⁽⁴⁴⁾).

Åström e Hägglund⁽⁴⁵⁾ utilizaram a seguinte denominação das estruturas PID: ideal, série e paralelo. Uma boa revisão sobre este tema pode ser encontrada em sua obra.

A Figura 21 representa a estrutura básica de um sistema realimentado, onde y_r é a referência, G_c representa o controlador, u é a ação de controle, G_p representa o processo e y é a saída do sistema.

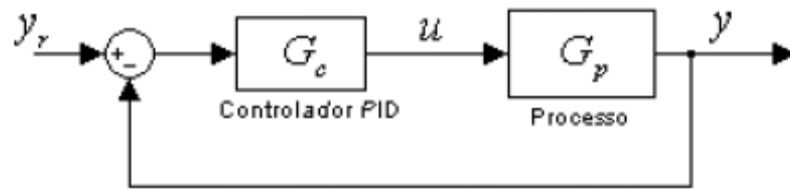


Figura 21 – Estrutura básica de um sistema realimentado

Entre as estruturas do controlador PID as duas mais utilizadas são a ideal e a série. Uma descrição detalhada sobre estas estruturas pode ser encontrada em Åström e Hägglund⁽⁴⁵⁾. Apesar de, funcionalmente, a estrutura ideal ser a mais geral dentre as duas, a estrutura série atingiu grande grau de utilização na era analógica pneumática devido ao menor custo de implementação (exige menos amplificadores, os quais representavam alto custo a algumas décadas atrás). Também, mesmo após a era da digitalização, os fabricantes ainda mantêm as estruturas originais e patenteadas, devido ao grau de familiarização que os usuários já possuem na base instalada. Recentemente, a estrutura ideal tem sido cada vez mais utilizada em sistemas de controle modernos (Tan et al⁽⁴⁶⁾).

Com os parâmetros representados por constantes de tempo, a lei de controle do controlador PID ideal é calculada por:

$$u(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (37)$$

onde T_i corresponde à constante de tempo integral e T_d à constante de tempo derivativa.

Utilizando a transformada de Laplace, a lei de controle do controlador PID ideal, dada pela equação (37), no domínio frequencial é representada através de

$$U(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) \quad (38)$$

A funcionalidade dos termos P (proporcional), I (integral) e D (derivativo) pode ser brevemente descrita como:

Termo Proporcional: o ganho proporcional K_c fornece uma ação de controle de amplitude proporcional à amplitude do sinal de entrada, neste caso, o erro.

Termo Integral: o tempo de integração T_i equivale ao tempo necessário para que o ação integral seja duplicada. Reduz o erro de estado estacionário em relação a um sinal de referência de valor constante, através de um compensador de baixa frequência. O controle integral supera uma importante deficiência do controlador proporcional ao conseguir eliminar o erro de estado estacionário, dependendo do tipo de sinal de referência, sem precisar ganhos excessivamente grandes do controlador.

Termo Derivativo: o tempo derivativo T_d equivale a uma antecipação da ação de controle, considerando-se a tendência de variação do erro. Melhora a resposta transitória através de um compensador de alta frequência. O termo derivativo usa a taxa de variação do sinal do erro para introduzir um elemento de predição na ação de controle.

A forma ideal, cuja representação em blocos pode ser encontrada na Figura 22, é mais geral e também permite zeros complexos no controlador, sendo assim mais indicado para processos oscilatórios (Skogestad⁽⁴⁷⁾).

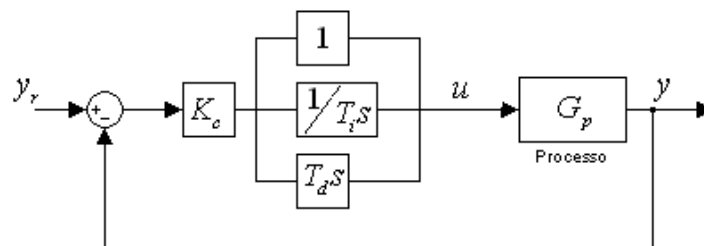


Figura 22 – Diagrama de blocos da forma ideal do PID

4.7.2 PID Digital

Um elemento importante no controle digital é a amostragem dos sinais, tanto de entrada quanto de saída do sistema. Uma boa revisão sobre o tema pode ser encontrada em Coelho e Coelho⁽⁴⁸⁾ e Bobál et al.⁽⁴⁹⁾. A seleção do tempo de amostragem, T_s , deve satisfazer o teorema de Shannon, deve ser adequada à capacidade de processamento do controlador e deve ser adequada ao nível de ruído

da planta (Popescu et al.⁽⁵⁰⁾). O tempo de amostragem deve também ser adequado a dinâmica do sistema controlado e às propriedades do atuador (Bobál et al.⁽⁴⁹⁾).

Se a relação T_d/T_s é muito grande, o controlador reagirá muito mais ao ruído causando pulsos (degraus na saída do controlador). Devido à precisão dos conversores analógicos / digitais e digitais / analógicos (nível de quantização), caso a relação T_s/T_i seja muito pequena, pode ocorrer um erro permanente no controlador resultado da perda de precisão nas operações de arredondamento, conversões e computação (Bobál et al.⁽⁴⁹⁾). Se o tempo de amostragem é muito pequeno comparado com a dinâmica do sistema, medições adjacentes podem apresentar pequena diferença. Neste caso, erros de medição influenciam significativamente nos resultados do experimento (Malik et al.⁽⁵¹⁾). Teoricamente deve-se escolher uma frequência de amostragem ao menos duas vezes superior a frequência natural da malha de controle. Na prática, recomenda-se adotar uma frequência de amostragem da ordem 10 vezes superior a frequência natural da malha de controle (Cardoso⁽⁴³⁾).

No domínio discreto, a lei de controle PID ideal tem a seguinte forma:

$$u(k) = K_c \left(e(k) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{T_d}{T_s} ((e(k) - e(k-1))) \right) \quad (39)$$

Considerando uma amostra anterior na lei de controle da equação (39) tem-se

$$u(k-1) = K_c \left(e(k-1) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=1}^{k-1} e(i) + \frac{T_d}{T_s} (e(k-1) - e(k-2)) \right) \quad (40)$$

Fazendo a diferença das equações (39) e (40), o incremento do sinal de controle $u(k)$ é calculado por

$$\Delta u(k) = K_c \left(1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right) e(k) - K_c \left(1 + 2 \frac{T_d}{T_s} \right) e(k-1) + K_c \left(\frac{T_d}{T_s} \right) e(k-2) \quad (41)$$

Desta forma, a lei de controle incremental ou recursiva é dada pela equação

$$u(k) = u(k - 1) + \Delta u(k) \quad (42)$$

A equação (39) utiliza o método conhecido como *BRM* (Back Rectangular Method) para implementação do controlador PID digital. O método *BRM* não é o único método de discretização, também existem outros métodos, como o *FRM* (Forward Rectangular Method) e o *TRAP* (Trapezoidal Method). Estes métodos diferenciam-se pela forma em que é aproximada a componente integral do controlador PID (Bobál et al.⁽⁴⁹⁾). O método *FRM* aproxima a componente integral pela relação

$$\int_0^t e(t)dt \approx T_s \sum_{i=1}^{k-1} e(i) \quad (43)$$

enquanto que o método *TRAP* usa uma aproximação trapezoidal da componente integral, ou seja,

$$\int_0^t e(t)dt \approx T_s \sum_{i=1}^k \frac{e(i) + e(i-1)}{2} \quad (44)$$

Foi utilizado o método BRM (Back Retangular Method) nas rotinas de controle implementadas no decorrer do trabalho.

5 Materiais e Métodos

Na maioria dos veículos suspensos é desejável uma boa estabilidade física para garantir a qualidade da tarefa desempenhada pelo mesmo, assim como a segurança de todos os elementos envolvidos na operação, fato que evidencia a necessidade de estudos que viabilizem a construção de mecanismos que sejam capazes de manter a estabilidade física do sistema. Veículos suspensos possuem comportamento de pêndulo, e estão suscetíveis as ações de forças externas que geram oscilações e balanços indesejados no veículo. Para se controlar esses movimentos, é necessário que o sistema possua um mecanismo com características singulares capaz de amortecer tais oscilações.

Para conseguir atingir o objetivo do trabalho, foi desenvolvido um sistema de estabilidade de veículos suspensos, ou seja, mantenha a estrutura do veículo suspenso alinhada com o cabo que a suporta, cuja característica é apresentar uma forma de atuação e estabilização da estrutura do veículo que faça uso apenas de componentes internos ao veículo, tornando-o independente do ambiente de trabalho.

Usando conceitos de conservação de energia e quantidade de movimento foi concebida a ideia de desmembrar o sistema em duas partes, uma massa fixa e uma massa móvel, a figura 23 ilustra a ideia básica do sistema.

Robôs para inspeção em linhas de transmissão de energia foram tomados como base para o estudo do sistema de estabilização de oscilações. Na maioria das aplicações de veículos suspensos, não é necessária a estabilização do veículo por inteiro, ou seja, é suficiente estabilizar apenas a parte do sistema que desempenha a função principal para qual o veículo está sendo utilizado. Alguns exemplos podem ser citados de maneira a ilustrar o fato descrito. Veículos suspensos aplicados para realizar uma operação de inspeção em linhas de transmissão de energia são dotados de equipamentos como câmera termográfica, câmera convencional, que para terem a qualidade de operação garantida necessitam serem mantidas estáveis em relação ao objeto que está sendo inspecionado. Em veículos utilizados para transporte de pessoas e cargas a parte onde ficam alocadas pessoas ou cargas deve ser mantida estável.

Quando se trata de robôs para inspeção em linhas de transmissão é desejável que estes apresentem a maior autonomia possível. Fato que evidencia a necessidade de prover o robô com uma fonte de energia que possua grande capacidade de carga, sendo que a quantidade de carga que uma fonte de energia pode fornecer é proporcional a seu tamanho. Para suprir as necessidades de autonomia, robôs para inspeção em linhas de transmissão são dotados de fontes de energia que ocupam grande parte de sua estrutura e que chegam a significar 50% do peso do robô, fato observado por mim durante a execução de um projeto que visava à construção de um robô móvel autônomo para inspeção em linhas de transmissão. Dos fatos expostos, é possível dividir a estrutura do robô em duas partes básicas, a fonte de energia, e a parte onde ficam dispostos os equipamentos necessários para a execução das tarefas que o robô deve executar (parte que necessita ser mantida estável durante o funcionamento do robô). Por isso foi agregada à fonte de energia a função de estabilização do sistema, o que torna possível a implementação de um mecanismo de estabilização de oscilações sem a necessidade de adicionar massa ao sistema.

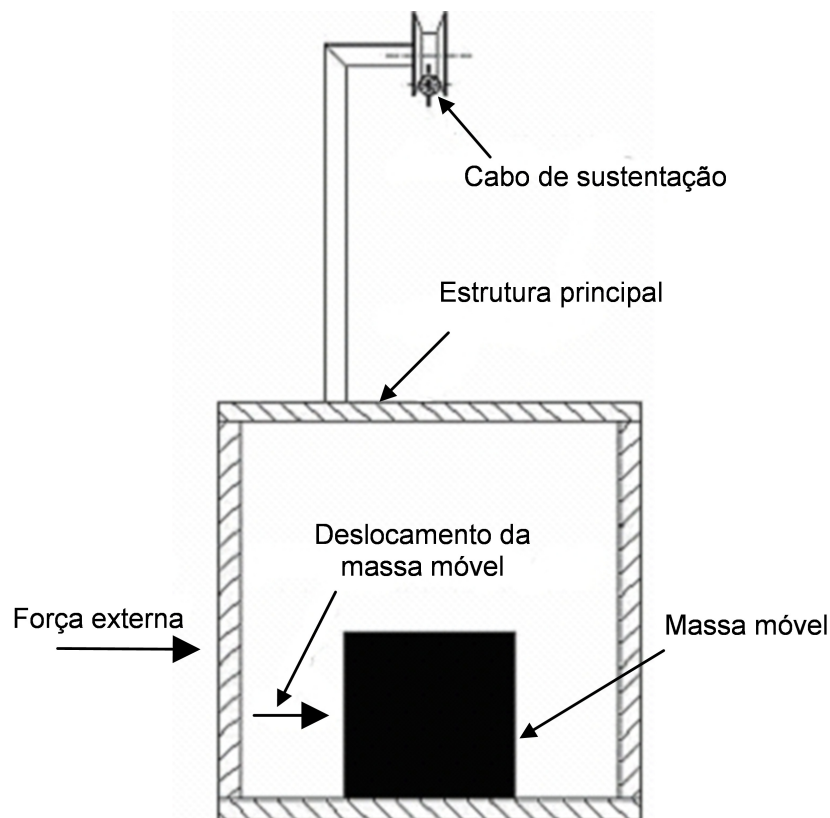


Figura 23 – Princípio de funcionamento do sistema de autoestabilização.

Inicialmente o veículo está parado, porém, quando uma força externa passa a atuar sobre o sistema, fornecendo energia à estrutura do veículo, essa energia aplicada sobre o sistema faz com que o veículo tenha um deslocamento lateral. Como o sistema está desmembrado em duas massas, é possível transferir toda a energia aplicada sobre o sistema, pela força externa, para a massa móvel de maneira que a estrutura principal do veículo se mantenha em sua posição inicial.

Definida a ideia básica do mecanismo, o próximo passo é possibilitar o deslocamento relativo entre as duas massas em que a estrutura do robô foi desmembrada. A solução proposta foi instalar uma plataforma móvel sobre a estrutura principal do robô, massa que será mantida fixa, e montar a massa móvel sobre a plataforma de maneira que ambas se desloquem juntas, figura 24.

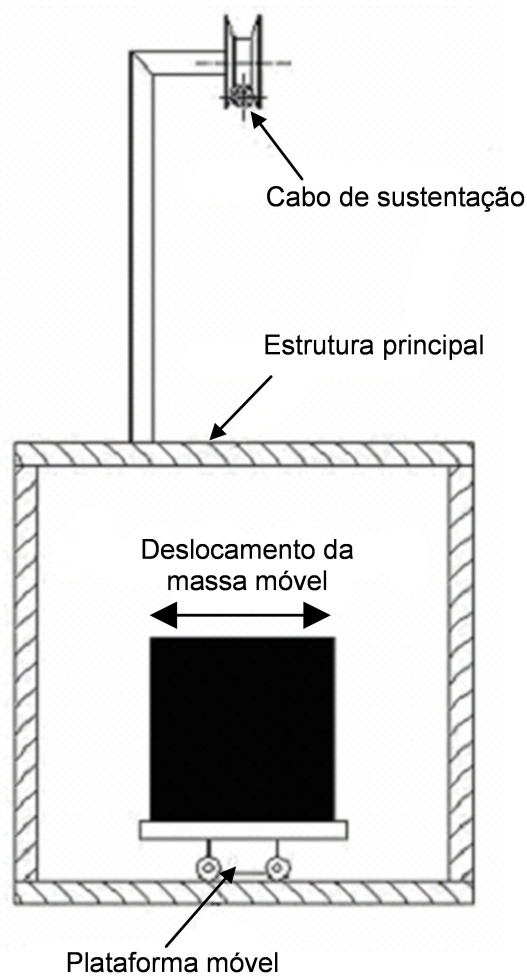


Figura 24 – Massa móvel fixada à plataforma móvel

Para realizar a movimentação da plataforma móvel é necessário um atuador elétrico, que poderia ser um servomotor ou um motor de corrente contínua, ou mesmo um motor de passo. Como primeiro estudo, foi utilizado um sistema de movimentação da massa móvel com um motor de passo como atuador. Apesar da alta relação peso x potência, uma desvantagem em relação aos outros atuadores elétricos citados, optou-se pelo motor de passo pela facilidade de controle de posição e de velocidade deste tipo de atuador.

Para deslocar a plataforma móvel é necessário utilizar algum componente ou mecanismo que transforme o movimento do motor de rotativo em linear. Para isso, foi escolhido um motor de passo que possui rotor com um fuso embutido e foi fixada uma porca, com a mesma rosca do fuso, na plataforma móvel, figura 25.

Num segundo estudo, adotou-se um motor de corrente contínua como atuador para o sistema de movimentação da massa móvel e um sistema de transmissão direta formado por polias e cabos, como ilustrado na Fig. 26.

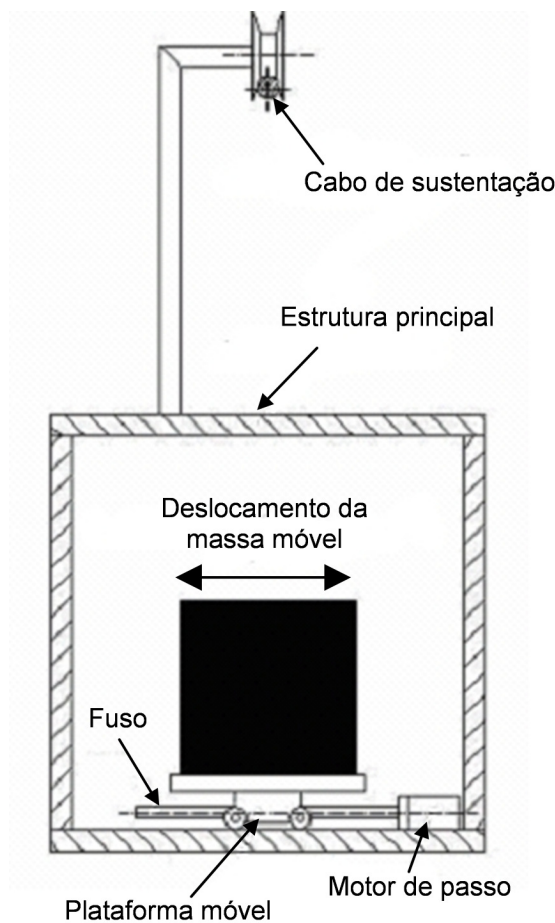


Figura 25 – Esquema de movimentação da plataforma acionado por fuso

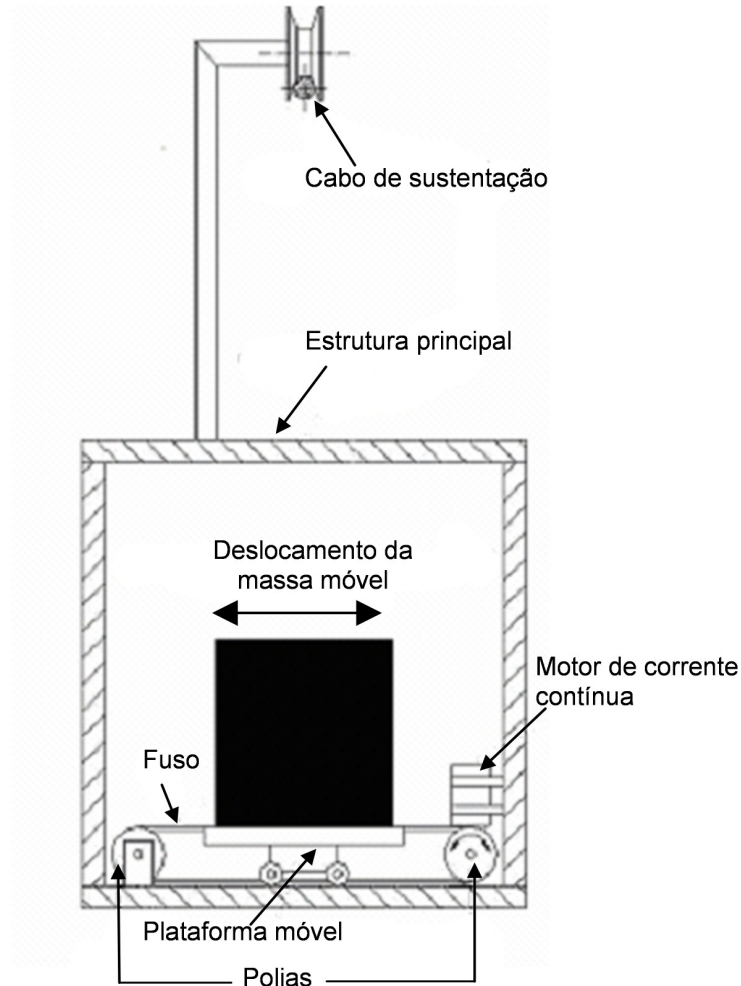


Figura 26 – Esquema de movimentação da plataforma acionado pelo motor de corrente contínua

Após a concepção da ideia base de funcionamento e da forma de atuação do sistema de estabilização, faz-se necessário instalar no robô um sensor que seja capaz de medir os desvios causados pelas forças externas atuando sobre a estrutura do robô. Para essa função, foi escolhido um sensor de inclinação, que mede o deslocamento da estrutura principal do robô relativo à posição vertical abaixo do cabo de sustentação, como mostrado na figura 27.

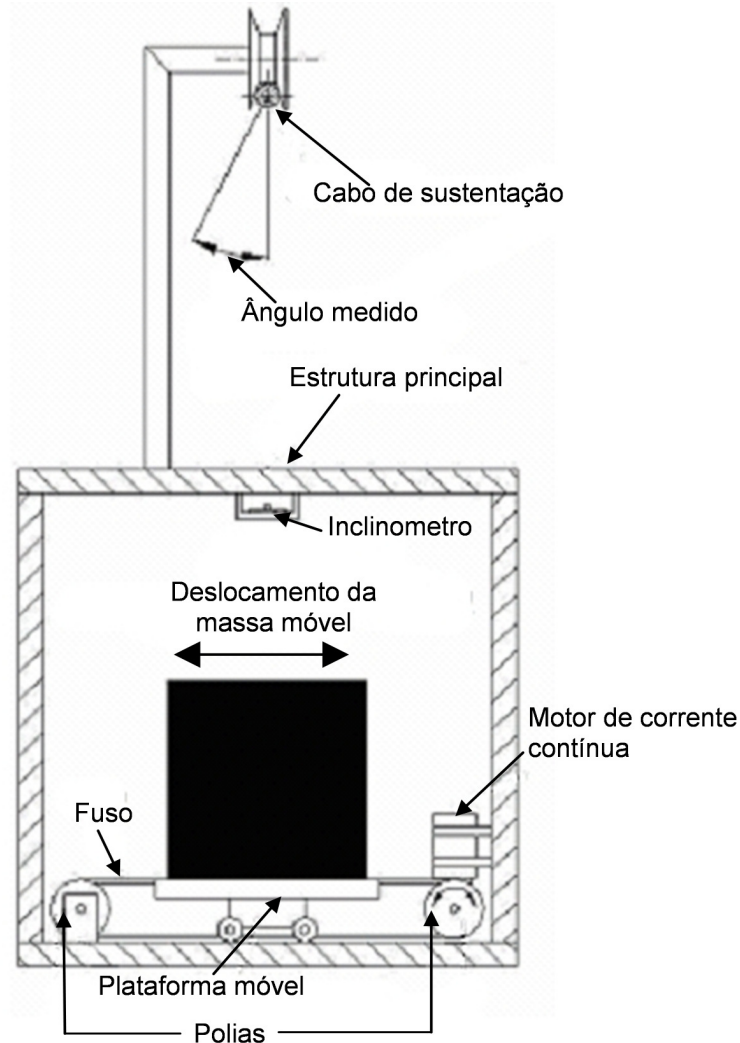


Figura 27 – Esquema de instalação do sensor de inclinação do robô

Depois de viabilizado o modo de medição do deslocamento da estrutura, torna-se necessário um equipamento capaz de armazenar as informações capturadas pelo sensor, processá-las e acionar o sistema de modo que a o robô se comporte da maneira desejada. Como se trata de robôs móveis autônomos é necessário que a unidade de processamento seja embarcada e apresente baixo consumo de energia elétrica, em consequência, optou-se por trabalhar com um microcontrolador.

O mecanismo é basicamente um sistema de controle em malha fechada que, por meio do sensor de inclinação, realiza medições entre intervalos de tempo, definido de acordo com a dinâmica do sistema, do ângulo de inclinação da estrutura do robô em relação à vertical que passa abaixo do cabo de sustentação (que representa uma medida do quanto a estrutura foi deslocada de sua posição inicial).

Como as tomadas de medidas são realizadas em intervalo de tempo conhecido, também é possível mensurar a velocidade em que ocorreu o deslocamento. Em resposta aos dados coletados, o motor de corrente contínua é acionado impondo um certo deslocamento, com uma velocidade adequada, à plataforma móvel para forçar a estrutura a retornar à posição ideal de trabalho, 0° com a vertical. A figura 28 apresenta um fluxograma que ilustra o princípio de funcionamento do sistema de controle em malha fechada proposto e a Fig. 29 apresenta um diagrama de blocos com os componentes básicos do sistema.

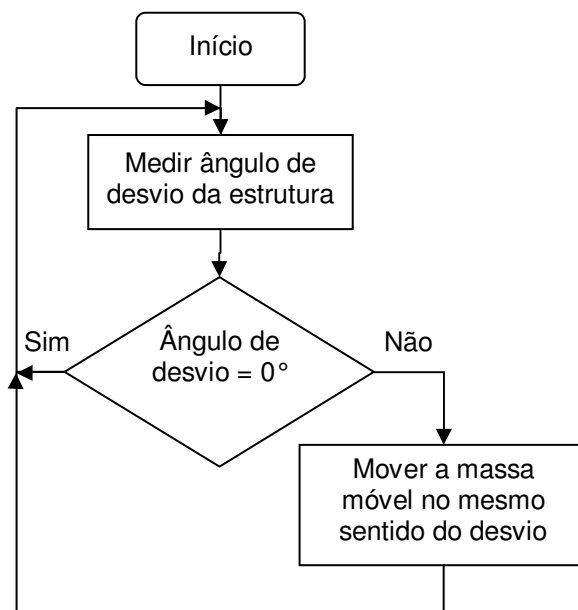


Figura 28 – Fluxograma de funcionamento do sistema de controle da estabilização

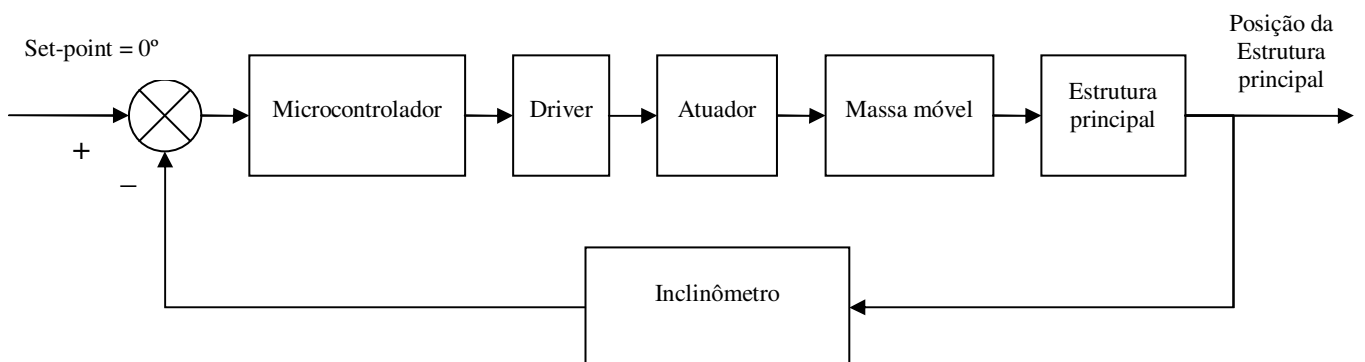


Figura 29 – Diagrama de blocos do sistema de controle da estabilização

Uma situação comumente encontrada em condições de uso de veículos suspensos é a perturbação externa causada por ventos laterais que forçam o veículo suspenso a sair de sua posição ideal de trabalho (alinhado com a vertical) sendo deslocado no sentido horário ou anti-horário (depende em que lado do veículo a perturbação externa atua) em relação ao cabo (a figura 23 ilustra uma situação em que a perturbação externa atua deslocando o veículo no sentido anti-horário) em resposta a essa perturbação a massa móvel é deslocada na mesma direção e sentido do deslocamento sofrido pelo veículo de modo a deslocar a estrutura do veículo em sentido contrário, relativo ao centro de gravidade do sistema suspenso, de tal maneira que a estrutura retorne à sua posição inicial. Nessa condição, o centro de gravidade deslocado de sua posição inicial (abaixo do cabo) exercerá uma força de restituição contra-balançando a perturbação externa e forçando o conjunto a restituir sua condição original de equilíbrio.

No sistema, a entrada exógena é exemplificado pela força do vento, porém, uma outra entrada poderia ser a vibração do cabo de sustentação, cujo sinal observado (alterado pela entrada exógena) é o ângulo α . A velocidade $\dot{\alpha}$ em que ocorre o deslocamento pode ser obtida pelo fato de a medição ser realizada em intervalos conhecidos. A entrada manipulável é o sinal enviado ao motor elétrico que controla o movimento da massa móvel, e a saída controlada é o deslocamento da massa móvel e a velocidade de deslocamento dessa massa, que resulta na alteração do centro de gravidade do corpo de modo a alinhar a estrutura.

No caso de o sistema sofrer a ação da vibração do cabo de sustentação (ex. cabo sob a ação da força do vento), o sistema de atuação se comportará da mesma forma, e nesse caso, a estrutura do robô suspenso acompanhará o movimento do cabo mantendo se estacionária em relação a este.

Para que o sistema de controle de estabilidade funcione de maneira satisfatória é necessário fazer um levantamento para verificar qual a amplitude do deslocamento que veículos suspensos sofrem sob a ação das forças externas a que este pode ser submetido (vento lateral, vibração do cabo de sustentação, etc.). Com estes dados de deslocamento é possível determinar qual será o curso necessário à massa móvel para que o sistema não tenha limitação de atuação e, em consequência, limitação de controle.

O desenvolvimento e aplicação do sistema de estabilidade proposto independe dos modos de vibração (oscilação) do robô, no entanto, para minimizar

altas amplitudes de oscilação, será preciso determinar (estimar) a frequência natural de oscilação do cabo, assim como calcular qual a frequência natural desenvolvida pelo corpo suspenso (que se comporta como um pêndulo simples). As dimensões físicas do robô deverão ser adaptadas de forma que a frequência natural de oscilação do robô não seja igual (ou muito próxima) da frequência natural de oscilação do cabo ou dos seus primeiros harmônicos.

Para verificar a viabilidade do sistema de estabilização foi construído um protótipo em escala reduzida

O protótipo foi construído visando a autonomia do sistema de estabilização de oscilações. Como o sistema é dotado de equipamentos elétricos e eletrônicos que necessitam de uma fonte de energia, foi embarcada na estrutura do protótipo uma bateria de chumbo ácido selada de 12 V e capacidade de 7 Ah fabricada pela Energy power. A bateria utilizada pesa cerca de 2 kg, mede 70 mm x 94 mm x 150 mm e, além de fornecer energia elétrica aos equipamentos presentes no protótipo, tem a função de massa móvel para estabilização do sistema.

Visando a praticidade de fabricação e a necessidade de manter a mesma relação massa da fonte de energia x massa da estrutura do robô o material utilizado para a construção do protótipo foi madeira, que é um material leve e de fácil manuseio. A estrutura principal do protótipo (parte fixa) consiste de uma gaiola de madeira com dimensões baseadas em robôs de inspeção em linhas de transmissão (300 mm x 300 mm x 400 mm), e com distância do centro de massa ao cabo de sustentação de 500 mm, conseqüentemente, a estrutura apresenta uma frequência natural de oscilação de aproximadamente 0,7 Hz, estimado pela equação do pêndulo simples.

O sistema de estabilização faz uso de um sensor de inclinação (figura 30) modelo 900 fabricado pela Applied Geomechanics que tem como principais características frequência natural de 10 Hz, faixa de trabalho de $50^\circ (\pm 25^\circ)$, $0,01^\circ$ de sensibilidade, com tensão de saída 0-5 V, e trabalha com uma tensão de alimentação que pode variar 8 a 24 V, o sensor utilizado realiza a medição de ângulo baseado na gravidade, para isso faz uso de um sistema constituído basicamente de uma bolha que é parcialmente preenchida com um líquido condutor e possui eletrodos parcialmente submersos nesse líquido condutor de modo que, a medida que o ângulo medido varia, a altura da parte submersa dos eletrodos varia, de modo que a resistência entre pares de eletrodos também varia, esse sistema é montado

sobre uma placa que possui um circuito capaz de medir essa variação e converter tal variação num sinal elétrico DC proporcional ao ângulo medido. O sensor de inclinação foi instalado na estrutura principal do protótipo.

No primeiro mecanismo de movimentação da massa móvel proposto, na parte central do fundo da gaiola foi fixada uma plataforma cuja função é acomodar a parte do sistema de estabilização que executa a movimentação da massa móvel. Sobre a plataforma foi fixado um motor de passo (foi escolhido esse tipo de motor devido à sua facilidade de acionamento) que possui um fuso (que apresenta rosca de quatro entradas para possibilitar uma movimentação mais rápida da massa móvel) embutido no rotor. A figura 31 ilustra a configuração do motor de passos com o fuso embutido que realiza o deslocamento da massa móvel.

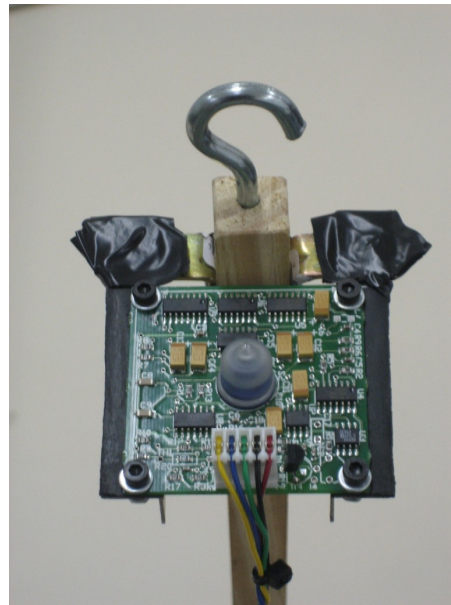


Figura 30 – Sensor de inclinação que verifica o equilíbrio da estrutura

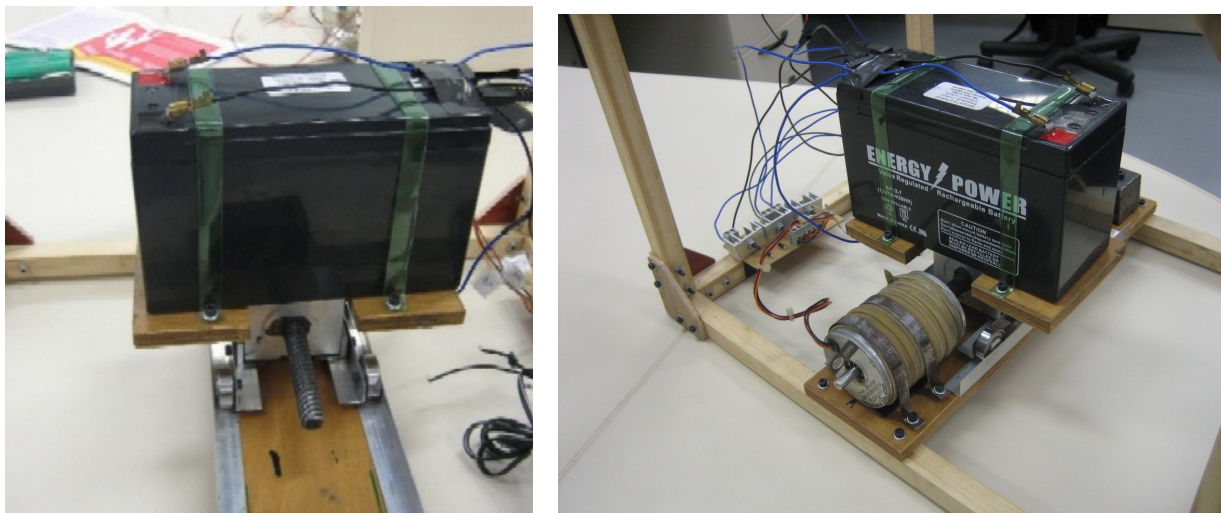


Figura 31 – Configuração do motor de passo com fuso embutido que desloca a massa móvel do sistema

Para possibilitar a movimentação da massa móvel foi fabricada uma plataforma móvel com uma bucha roscada embutida. O funcionamento do sistema ocorre da seguinte maneira: o motor de passo é acionado gerando uma rotação no fuso que está acoplado na bucha da plataforma móvel, fazendo com que a plataforma móvel apresente um movimento de translação. A plataforma se movimenta guiada por dois perfis “L”, fixos sobre a plataforma fixa da estrutura principal de maneira a permitir o movimento da bateria em apenas uma direção. Inicialmente, a parte da plataforma móvel onde fica embutida a bucha roscada era feita de madeira e deslizava sobre os perfis “L” por atrito, depois foi substituída por uma peça em alumínio na qual foram instaladas quatro rodas (rolamentos modelo ABEC 1, utilizados em rodas de patins) para que o deslizamento sobre a guia ocorresse por rolamento, sem atrito. Sobre a plataforma móvel foi fixada a bateria de chumbo ácido que alimenta os componentes elétricos e eletrônicos do sistema.

No segundo mecanismo estudado, o motor de passo foi substituído por um motor de corrente contínua que trabalha com uma tensão de alimentação de 12 V e é fabricado pela Mabuchi Motors com o código JC/LC-578VA, o sistema de transmissão que utilizava um fuso embutido no rotor do motor de passo para converter o movimento rotativo do motor para movimento de translação da massa móvel foi substituído por um sistema de transmissão direta em que o movimento de rotação do eixo do motor é convertido para movimento de translação da massa

móvel por meio de uma montagem com polias e cabos, tal sistema é ilustrado na figura 32.



Figura 32 – Configuração do sistema de movimentação por transmissão direta

Foi embarcado na estrutura um micro-controlador, responsável pela aquisição do sinal analógico do sensor, digitalização e processamento, do tipo Arduino Decimila⁽³⁹⁾ (baseado no ATMEL ATMEGA168) (ver figura 33) e fornecer os comandos programados para acionar o motor de passos. A programação do micro-controlador é feita em um software próprio livre, desenvolvido para o Arduino. A placa micro-controladora utilizada possui velocidade de clock de 16 MHz, memória EEPROM de 512 bytes, memória flash de 16 KB, 14 portas que funcionam como entrada e saída digital sendo que 6 dessas portas podem ser usadas como saída analógica (PWM), possui 6 portas de entrada analógica (conversor ADC de 10 bits) que trabalham com tensão 0-5 V, a comunicação com o computador é feita via

conexão USB, utiliza tensão de alimentação que pode variar de 7 a 12 V (tensão de operação é de 5 V), pode ser alimentada tanto pela conexão USB com o computador quanto por uma fonte externa (que pode ser um adaptador AC/DC, uma bateria).

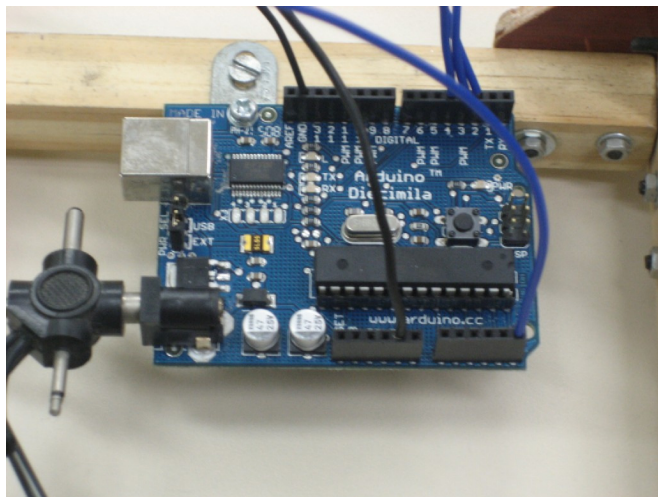


Figura 33 – Micro-controlador Arduino Decimila responsável pelo controle da autoestabilização.

No primeiro mecanismo de movimentação da massa móvel proposto, a interface entre o microcontrolador e o motor de passos era feita através de um driver formado por um banco de transistor (foram utilizados 3 transistores TIP 110, que suportam uma corrente contínua de 2 A e um pico de corrente de até 4 A) funcionando como chaveadores (quando acionados pelo microcontrolador, baixa corrente, fecham o circuito que energiza a bobina do motor de passos, corrente mais alta).

No segundo mecanismo utilizado para movimentação da massa móvel, a interface entre o microcontrolador e o motor de corrente contínua é feita através de um driver formado basicamente por uma ponte H que utiliza MOSFET's como "chaves", a velocidade do motor é controlada utilizando a técnica de PWM (modulação por largura de pulso), o esquema elétrico do driver se encontra no Apêndice A - Driver para o motor de corrente contínua.

Após a fabricação do protótipo (figura 34 e 35) foi possível iniciar o estudo e implementação da forma de controle que possibilite obter a melhor resposta do sistema de equilíbrio.

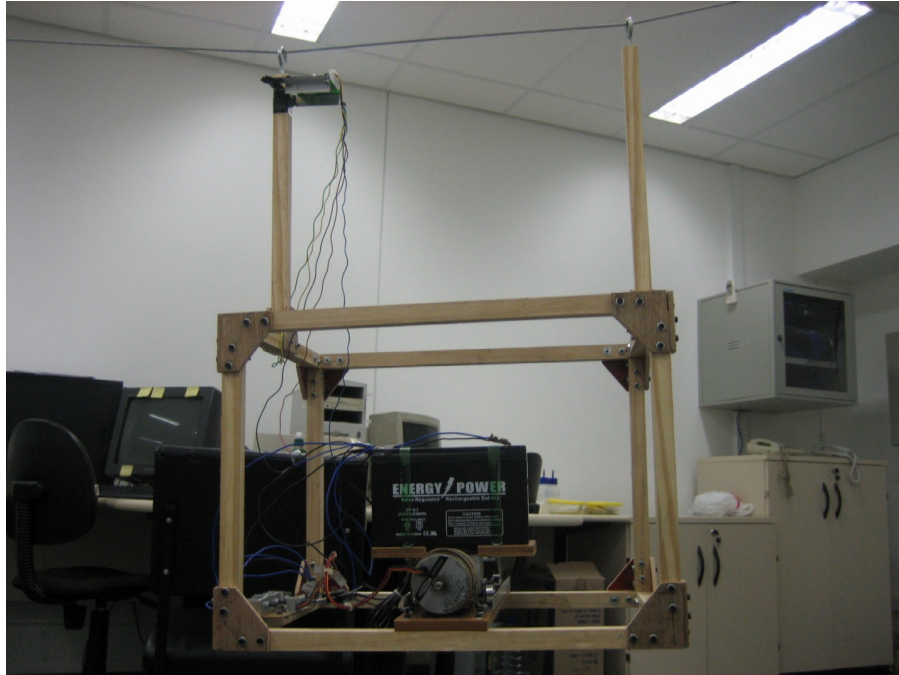


Figura 34 – Protótipo fabricado sistema de movimentação da bateria: motor de passo e fuso

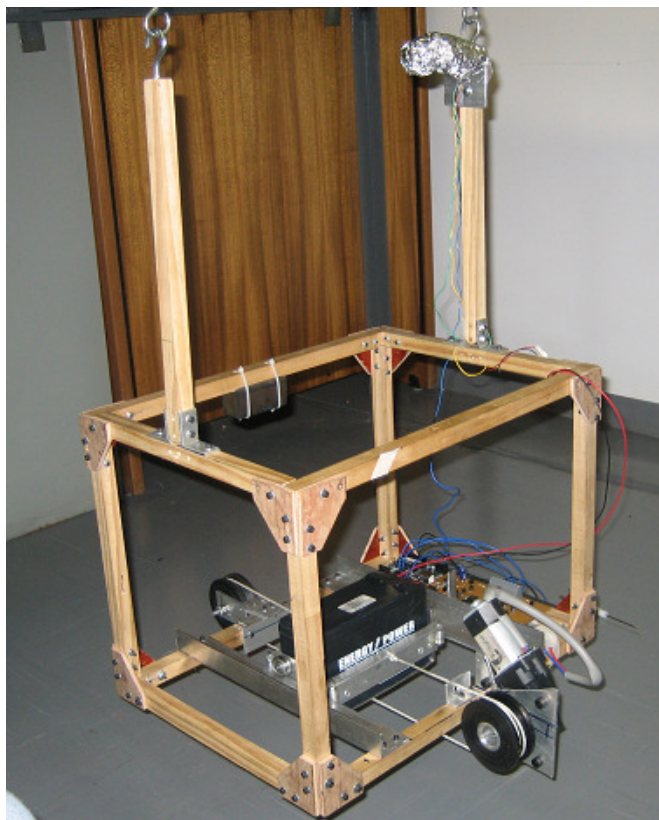


Figura 35 – Protótipo fabricado com o sistema de movimentação da bateria modificado: transmissão direta

6 Resultados Experimentais e Discussões

Apesar de veículos que se deslocam suspensos em cabos se apresentarem como um sistema de pêndulo duplo, sistema em que o veículo e o cabo de sustentação possuem comportamento oscilatório de maneira que o ponto onde o veículo suspenso está apoiado oscila fazendo com que o movimento geral do sistema seja a composição da oscilação do cabo mais a oscilação do veículo suspenso, nesse trabalho todos os estudos e levantamentos foram feitos considerando que o ponto onde o veículo suspenso está apoiado permaneça fixo, de maneira a auxiliar e simplificar o estudo do mecanismo de estabilização.

6.1 Protótipo com motor de passos

Com o protótipo fabricado, o primeiro passo executado foi implementar uma programação com a função de acionar o motor de passo. A rotina implementada manda sequências de pulsos para as saídas digitais do microcontrolador (que acionam as bobinas do motor de passo através do driver do motor de passos), o sentido de giro do motor de passo é definido pela sequência de energização das bobinas do motor. Com a rotina de acionamento do motor de passo funcionando o próximo passo foi implementar uma rotina para leitura dos sinais capturados pelo sensor, e analisar os dados coletados para verificar sua estabilidade e se o sensor disponível seria adequado para ser utilizado no sistema de estabilização, pois, para que o sistema de controle seja viável a frequência de amostragem (frequência em que o ângulo da estrutura principal é medido) precisa ser no mínimo duas vezes maior que a frequência do sinal a ser amostrado (ângulo da estrutura principal).

O sensor utilizado fornece um sinal analógico que varia de 0 a 5 V, e foi utilizado um osciloscópio para verificar e calibrar o comportamento do sinal do sensor utilizado. Tal procedimento foi realizado da seguinte forma: o sensor foi fixado em uma plataforma fixa que possibilitava posicionar o sensor em diferentes ângulos, então, a saída do sensor foi ligada ao osciloscópio, e com o sensor parado

em um ângulo pré-definido o sinal era observado no osciloscópio. Realizando tal procedimento foi possível calibrar e verificar que o sinal do sensor apresenta ruídos de alta frequência que não comprometeriam sua função, isto é, como o protótipo montado apresenta frequência natural de aproximadamente 0,7 Hz e a principal fonte de excitação externa prevista é o vento (que é uma excitação de baixa frequência), conseqüentemente, concluiu-se que o sensor era adequado para ser aplicado ao sistema de estabilização.

Para a aquisição e processamento do sinal do sensor, optou-se por utilizar uma placa micro-controladora do tipo Arduino Diecimila. Numa primeira programação, um certo número de leituras do sinal do sensor (através da entrada analógica do microcontrolador) eram coletados para se fazer a média dos sinais, de modo a minimizar os efeitos de ruídos e obter um sinal mais estável. Contudo, fazer a média do sinal coletado deu indícios de estar gerando um sinal com comportamento diferente do observado visualmente. Como foi constatado que o sensor fornece um sinal relativamente estável, implementou-se uma nova rotina de aquisição do sinal do sensor. Nessa nova rotina a leitura do sinal do sensor é realizada apenas uma vez entre cada intervalo de amostragem e, para minimizar os efeitos de possíveis ruídos no sinal, foi colocado um capacitor em paralelo com a saída do sensor funcionando como um filtro passa-baixa. Essa nova rotina mostrou-se adequada para leitura do sinal do sensor.

Em vista da facilidade de implementação, a concepção da forma de controle do sistema de estabilização foi baseada nos controladores PID. A primeira rotina implementada desempenhava uma ação de controle proporcional, cujo mecanismo foi estruturada da seguinte forma: o sensor realiza a medição do sinal do sensor e o valor gerado pela medição é comparado com um valor de referência (valor do sinal do sensor quando a estrutura está em sua posição de trabalho, alinhado com a vertical), então, o motor de passo é deslocado de um número de passos proporcional ao valor da diferença (desvio) entre o valor de referência e o valor fornecido pelo sensor. Caso a diferença seja um valor positivo o motor gira em sentido horário, caso a diferença seja um valor negativo o motor gira em sentido anti-horário, mantendo-se a velocidade que a massa móvel é deslocada sempre constante (independe da amplitude da diferença entre o valor de referência e a média das medidas realizadas). Terminado o deslocamento da massa móvel, a rotina volta para a etapa de verificação do ângulo da estrutura. Essa programação

do micro-controlador está listada no Apêndice B - Rotina de Controle Proporcional (motor de passo). Vários valores de proporcionalidade (número de passos do motor) foram testados para um mesmo deslocamento do robô protótipo, de forma a minimizar o tempo de estabilização.

Com a implementação dessa rotina foi possível constatar que a ideia base do mecanismo de estabilização é viável, pois ao aplicar uma força externa na estrutura do protótipo, o mecanismo foi capaz de trazer a estrutura de volta à posição original de 0° e estabilizá-la. Contudo, observou-se a necessidade de reduzir o tempo necessário para efetivar essa estabilização.

Foi observado que o fato da duração do acionamento do motor de passo depender apenas do valor do desvio da estrutura, implica que cada acionamento do motor ocorre com uma duração diferente, afetando o tempo de estabilização da estrutura. Às vezes acontecia de a duração do acionamento do motor de passo ser maior que a metade do período de oscilação natural da estrutura do protótipo e, como consequência, parte do deslocamento da massa móvel tendia a amplificar a oscilação da estrutura.

O artifício utilizado para solução desse problema foi definir, dentro da programação, o tempo destinado ao acionamento do motor de passo (que teria um valor no máximo igual à metade do período de oscilação natural da estrutura do protótipo). A implementação foi feita da seguinte forma: foi utilizada a rotina de programação anterior como base, com isso, são realizadas as mesmas tarefas na mesma sequência definida anteriormente, porém, foi adicionada uma forma de interrupção sobre o acionamento do motor de passo. Quando o tempo destinado ao acionamento do motor de passo fosse alcançado a rotina de controle seria interrompida e o programa voltaria para a etapa de medições do ângulo da estrutura, independentemente de o motor de passo ter finalizado sua tarefa de deslocamento da massa móvel. Esta nova rotina, listada no Apêndice-C - Rotina de Controle Proporcional modificado (motor de passo), apresentou redução do tempo necessário para efetivar a estabilização da estrutura do protótipo, comparada à primeira rotina.

Foi observado que o fato da velocidade de deslocamento da massa móvel ser constante, também afetava o tempo necessário para efetivar a estabilização do sistema. Durante a estabilização, quando a estrutura do protótipo estava bem próxima da posição ideal, a velocidade com que a massa móvel se deslocava fazia com que a estrutura apresentasse movimentos bruscos, vibrando a estrutura do robô,

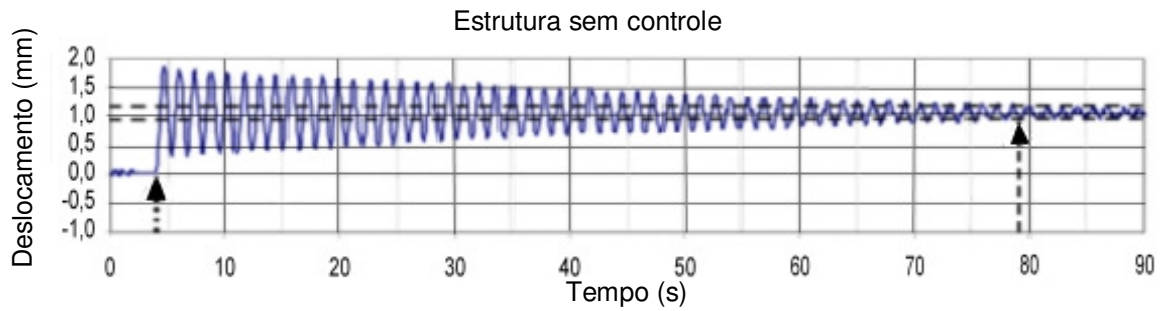
prejudicando sua estabilização. Fato que mostrou a necessidade da velocidade do deslocamento da massa móvel ser proporcional à taxa de variação do desvio entre duas medidas consecutivas. Assim, o deslocamento da estrutura passaria a ser mais suave à medida que esta fosse se aproximando de sua posição de estabilidade. Para isso, foi implementada uma nova rotina tendo como base a rotina anterior, porém, adicionado um recurso para que a velocidade do acionamento do motor de passo fosse proporcional à taxa de variação do desvio entre duas medidas consecutivas (controle proporcional e derivativo).

Num motor de passo, o que define sua velocidade de rotação é a frequência com que as bobinas do motor são energizadas. A frequência depende da duração do pulso enviado para energização de cada bobina. Nas rotinas implementadas, a velocidade do motor de passo é controlada definindo a duração dos pulsos enviados para energizar as bobinas do motor. Nas duas primeiras rotinas, a duração dos pulsos enviados estava associada a um valor constante. Para alterar a velocidade de acionamento da massa móvel, a duração dos pulsos enviados passou a ser uma função da taxa de variação do desvio entre duas medidas consecutivas da estrutura e do tempo destinado ao acionamento do motor de passo (o que tornou desnecessário o uso da interrupção introduzida na rotina anterior). Com esse artifício adicionado à programação, a rotina implementada apresentou uma redução sensível no tempo de estabilização da estrutura do protótipo, cuja programação está listada no Apêndice-D - Rotina de Controle Proporcional-Derivativo (motor de passo). Uma comparação do tempo de estabilização do robô protótipo acionado por motor de passo, à uma entrada exógena tipo degrau, é mostrado na figura 36 para os diferentes tipos de controle testados. Os desvios da posição de equilíbrio foram tomados diretamente do sensor de inclinação, medidos em graus. Para cada programação de controle foram testadas dezenas de valores das constantes proporcionais e derivativas, sendo mostradas somente as melhores respostas.

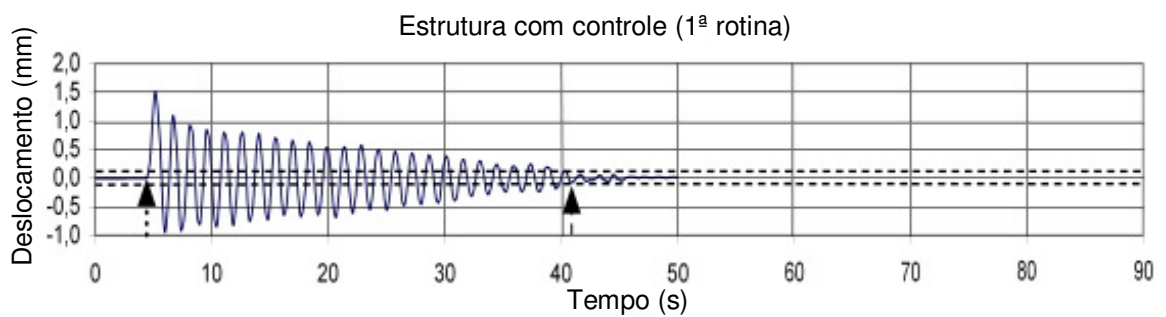
Durante todos os testes realizados, foi observado que o local de instalação do sensor de inclinação afetava o tempo para efetivar a estabilização da estrutura do protótipo, uma vez que a vibração gerada pelo motor de passo (durante seu acionamento), afetava a medição realizada pelo sensor. Muitas vezes, mesmo com a estrutura tendo chegado à posição de estabilidade, a vibração da estrutura causada pelo motor de passo alterava a leitura do sensor (como se a estrutura

saísse da estabilidade), acionando novamente o motor. Para resolver esse problema,

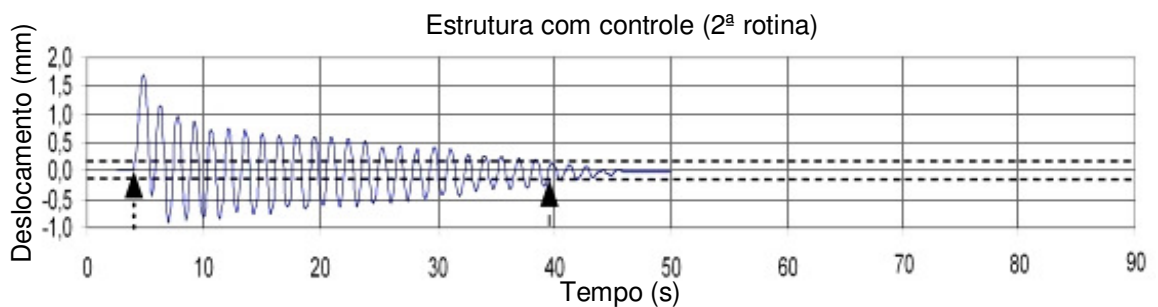
(a)



(b)



(c)



(d)

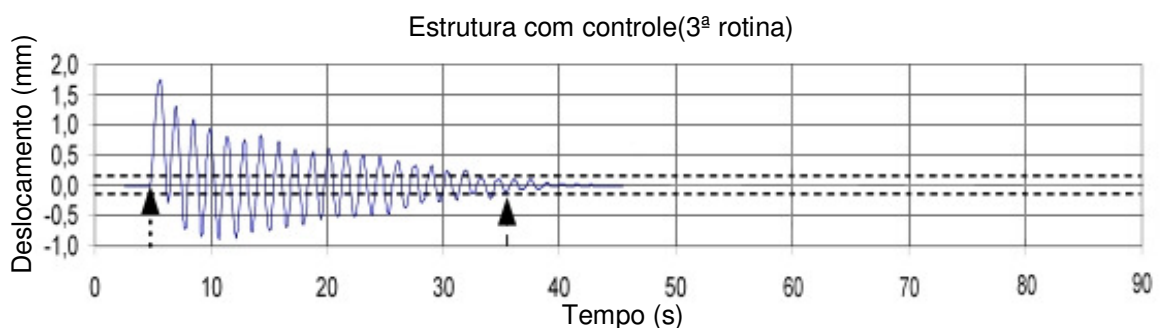


Figura 36 – Gráficos de estabilização da estrutura do robô protótipo acionado com motor de passo, para uma entrada exógena tipo degrau: (a) sem controle; (b) controle proporcional; (c) controle proporcional modificado e (d) controle proporcional derivativo.

o sensor de inclinação foi fixado o mais próximo possível do ponto de sustentação do protótipo.

Apesar das alterações realizadas tanto na rotina de controle quanto na posição do sensor de inclinação sobre a estrutura do protótipo, não foram alcançados resultados expressivos utilizando o sistema de movimentação da massa móvel com motor de passo e fuso acoplado. Esse primeiro sistema de movimentação da massa móvel apresentou algumas características como limite máximo de velocidade de acionamento da massa móvel em função da máxima rotação atingida pelo motor de passo e da vibração causada na estrutura a cada passo dada pelo motor, limitando sua utilização no sistema de controle de estabilidade. Um motor de passo realiza a rotação de seu eixo através de incrementos angulares (passo do motor) em resposta a pulsos digitais (que podem ser gerados por um microcontrolador) aplicados em seu driver, em consequência, esse tipo de motor não apresenta um movimento de rotação contínuo em seu eixo de saída, onde o movimento intermitente executado pelo motor de passo acaba introduzindo vibrações na estrutura do veículo suspenso o que compromete a leitura da posição angular do veículo e, conseqüentemente, o funcionamento do sistema de estabilização. Para se conseguir um desempenho satisfatório do sistema de estabilização faz-se necessária uma movimentação rápida da massa móvel, ação que está relacionada com a rotação do motor de passo, e, uma das maneiras de se obter rotações mais altas é utilizando motores com passos maiores, porém, quanto maior o passo do motor maior é o nível de vibrações introduzidas na estrutura do veículo suspenso. Outro fato limitante observado foi a utilização de um fuso para a conversão de movimento rotativo do eixo do motor para o movimento de translação da massa móvel. Foi observado que a configuração utilizada para movimentação da massa móvel (motor de passo com fuso acoplado) não apresentava velocidade suficiente para que o sistema de estabilização apresentasse um funcionamento satisfatório. Para sanar os problemas observados, seria necessário um sistema de movimentação mais rápido e que fosse capaz de movimentar a massa móvel de maneira contínua (introduzindo o mínimo de vibrações possível na estrutura do veículo suspenso). Com isso, optou-se por utilizar um motor de corrente contínua, atuador que apresenta rotação contínua em seu eixo de saída, e, para garantir a velocidade de movimentação da massa móvel, optou-se por um sistema de transmissão direta entre o movimento de rotação do eixo do

motor e o movimento de translação da massa móvel, tal sistema faz uso de polias e cabos para a transmissão de movimento.

6.2 Protótipo com motor de corrente contínua

Montado um segundo protótipo com acionamento por motor de corrente contínua, polias e cabos de tração, outras adaptações também tiveram que ser alteradas:

A rotina implementada consiste basicamente em configurar duas saídas digitais do microcontrolador que definem o sentido de giro do motor de corrente contínua (0/1 giro num sentido, 1/0 giro em sentido contrário) e definir a porcentagem do PWM a ser aplicado no driver do motor configurando uma saída analógica do microcontrolador.

A rotina implementada desempenha uma ação de controle proporcional-derivativo, tendo sido estruturada da seguinte forma: o microcontrolador realiza a medição do sinal do sensor e o valor gerado pela medição é comparado com um valor de referência (controle proporcional), então, o motor de corrente contínua é acionado com velocidade proporcional ao valor da diferença (desvio) entre o valor de referência e o valor fornecido pelo sensor. Ao mesmo tempo, é medida a taxa de variação entre duas medidas consecutivas: caso a diferença seja um valor positivo o motor gira em sentido horário, caso a diferença seja um valor negativo o motor gira em sentido anti-horário. Terminado o deslocamento da massa móvel, a rotina volta para a etapa de verificação do ângulo da estrutura, essa rotina se encontra no Apêndice E – Rotina de Controle Proporcional-Derivativo (motor cc).

Com o sistema montado e a rotina de controle definida, foi elaborada uma forma de impor uma perturbação externa à estrutura do veículo suspenso simulando uma entrada exógena tipo pulso e outra tipo degrau, e observar o comportamento de estabilização. Para padronizar a maneira como as perturbações externas eram aplicadas sobre o veículo suspenso, a solução adotada foi vedar as laterais do protótipo em estudo e utilizar um ventilador industrial direcionado para a lateral vedada, gerando uma corrente de vento capaz de tirar a estrutura do protótipo de sua posição de repouso (0º com a vertical).

Assim, para simular uma entrada exógena tipo impulso foi realizada as seguintes etapas: com o protótipo em posição de repouso (0° com a vertical), o ventilador industrial foi colocado direcionado para a lateral vedada do protótipo e a uma distância que fosse adequada ao experimento (entenda-se distância adequada como sendo uma distância em que a perturbação externa possa ser aplicada sem que o sistema de movimentação da massa móvel sature – atinja o máximo de sua amplitude de movimentação) e, antes de o ventilador industrial ser ligado, é colocada uma barreira entre o ventilador e a lateral do protótipo que vai sofrer a ação da perturbação de maneira que impeça que a corrente de vento gerada pelo ventilador atinja a lateral vedada do protótipo (essa etapa é realizada para garantir que a corrente de vento gerada pelo ventilador atinja a lateral vedada do protótipo apenas quando o ventilador atingir sua velocidade máxima), então o ventilador é ligado e quando o ventilador atingir velocidade máxima, a barreira é retirada durante um período muito pequeno de tempo, e recolocada de maneira a que a lateral vedada do protótipo receba apenas um impulso da corrente de vento.

Para coletar os desvios da estrutura do robô protótipo e da massa móvel (bateria) de forma simultânea, foram utilizados dois sensores óticos tipo PSD – “position sensitive displacement” modelo GP2Y0A02 da Sharp, cuja faixa de medida de distância varia de 20 a 150 cm. Para verificar se os sensores eram adequados para essa aplicação foi realizada a seguinte sequência de atividades: o sensor foi posicionado de frente para uma parede fixa, a saída do sensor foi ligada a um osciloscópio e, com o sensor energizado, o comportamento do sinal do sensor foi observado, durante esse procedimento foi observado que o sinal do sensor ótico apresenta ruídos numa faixa de frequência mais alta do que a frequência de oscilação natural do protótipo e das perturbações utilizadas nos experimentos, com isso, concluiu-se que os sensores óticos eram adequados. A coleta do sinal enviado pelos sensores é feita utilizando uma segunda placa micro-controladora (Arduíno) dedicada apenas para esse fim, os dados coletados são enviados para o computador via comunicação serial e armazenados num arquivo de texto para posteriormente ser manipulados, as rotinas utilizadas para coletar os dados do sensor pelo Arduíno e receber no computador os sinais coletados estão descritas nos Apêndices F e G respectivamente. Como os sinais fornecidos pelos sensores óticos não seriam utilizados por uma malha de controle (tais sinais foram utilizados apenas para confecção de gráficos) a filtragem dos ruídos foi realizada via software

(MatLab), o sinal do sensor foi coletado com uma frequência de amostragem e os dados gerados armazenados em um arquivo txt, que posteriormente foram armazenados em uma variável no MatLab para possibilitando utilizar a função `fft` (transformada de fourie) do MatLab para análise das frequências envolvidadas no sinal coletado e posterior exclusão das frequências que não fossem pertinentes ao sinal coletado, obtendo assim um filtro ideal, a rotina de tal procedimento está ilustrada no Apêndice H – Rotina – Filtragem do sinal (Matlab).

Foi utilizado um sensor para observar a posição da massa móvel e outro sensor para observar a posição da estrutura principal do protótipo ambos sensores foram posicionados em um referencial fixo fora da estrutura do protótipo. A montagem para coleta desses dados pode ser visualizada na figura 37, e os resultados obtidos através desse experimento está ilustrado nos gráficos da figura 38.

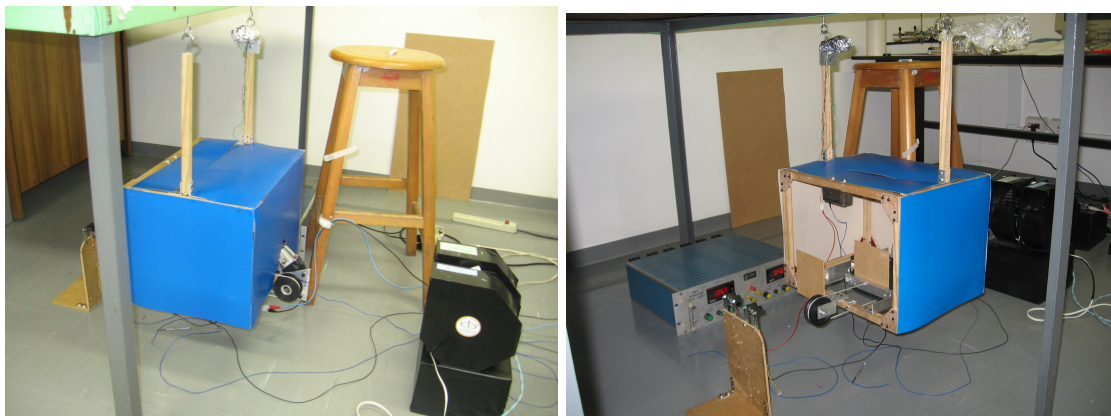


Figura 37 – Montagem experimental para coleta dos dados de estabilização do robô protótipo

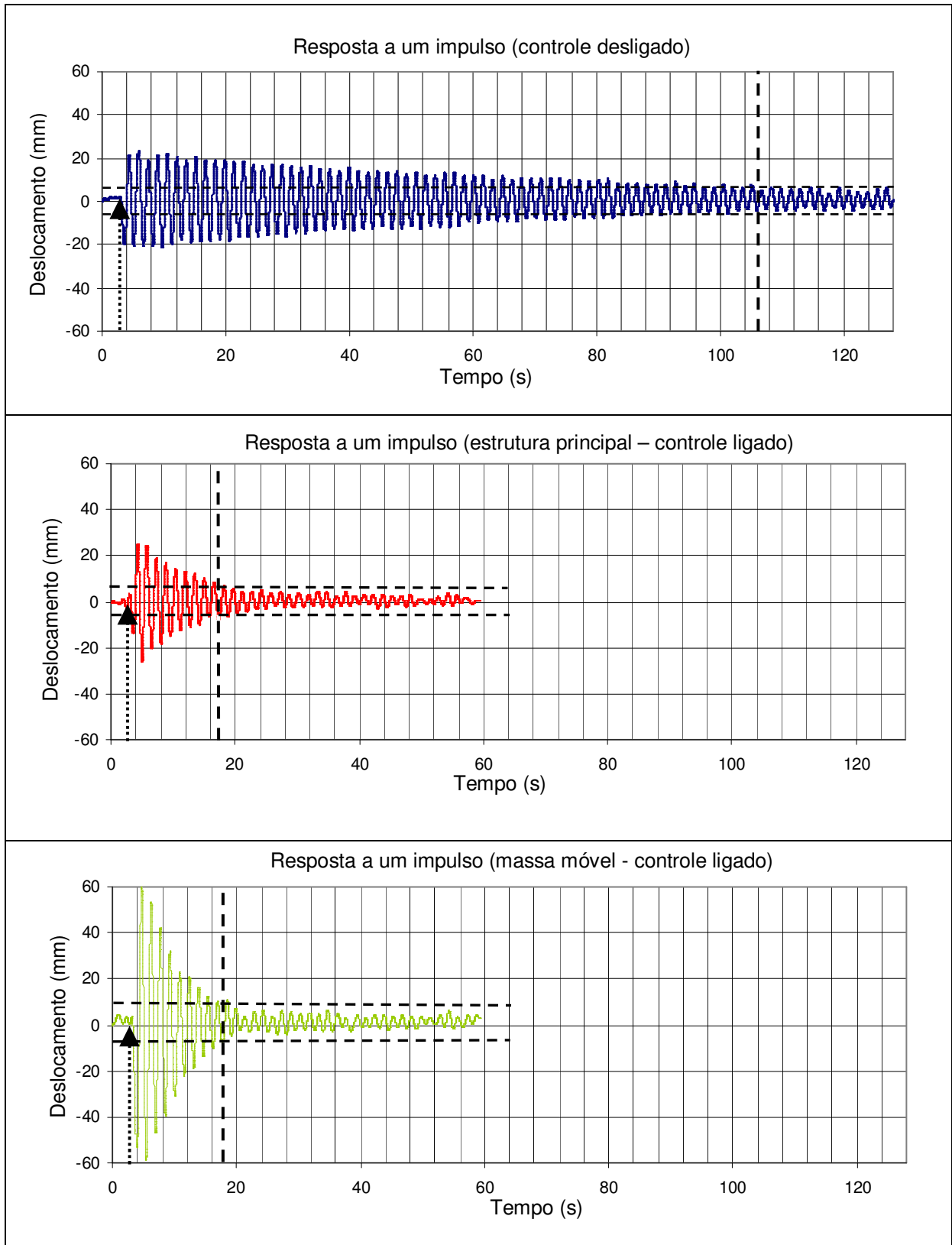


Figura 38 – Gráficos do comportamento do sistema em resposta a um impulso

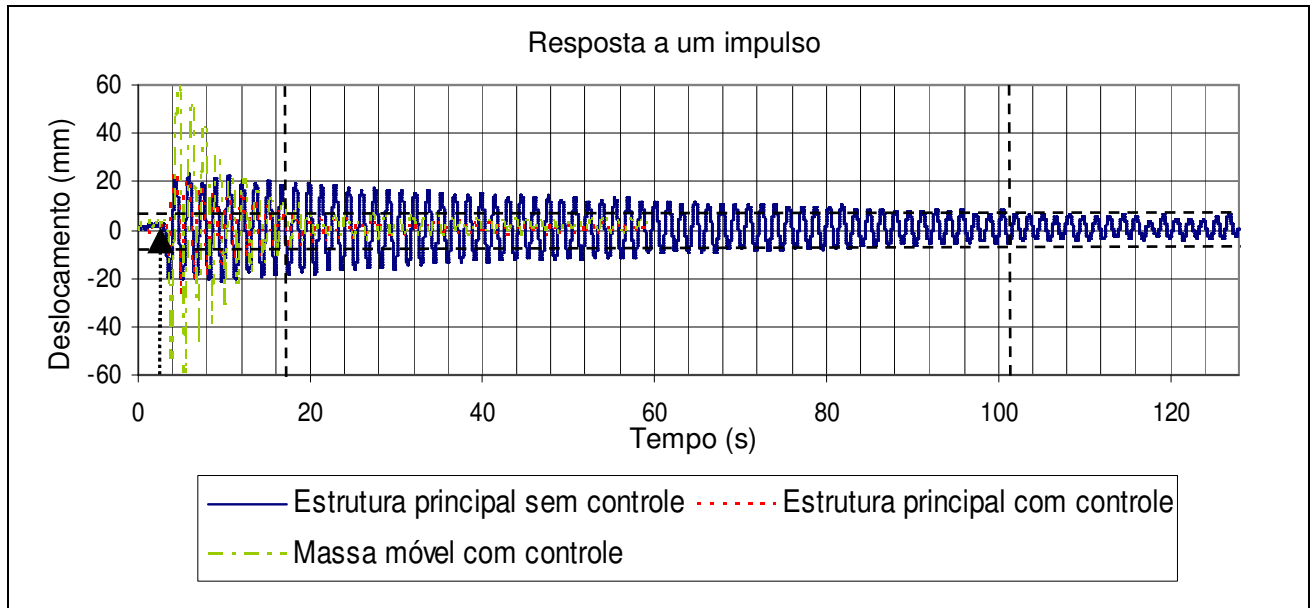


Figura 39 – Gráfico do comportamento do sistema em resposta a um impulso

Em todos os gráficos levantados durante os experimentos, a seta vertical pontilhada indica o instante em que a perturbação é aplicada sobre a lateral do protótipo, as duas linhas horizontais tracejadas definem a área dentro da qual o sistema é considerado estável, a linha vertical tracejada indica o instante em que a estrutura principal do protótipo atinge a área de estabilidade com o sistema de estabilização desligado e a seta vertical tracejada indica o instante em que a estrutura principal do protótipo atinge a área de estabilidade com o sistema de estabilização ligado.

No primeiro experimento (fig. 38) é possível observar que, na presença da mesma perturbação externa, com o sistema de estabilização desligado, a estrutura principal do protótipo leva em torno de 103 segundos para atingir a área de estabilidade, já com o sistema de estabilização ligado, a estrutura principal do protótipo leva em torno de 13 segundos para atingir a área de estabilidade, e conseqüentemente, é possível concluir que, na presença de uma perturbação com comportamento de um impulso, a estrutura do protótipo com o sistema de estabilização ligado estabiliza 8 vezes mais rápido do que quando o sistema de estabilização está desligado.

Num segundo experimento a ideia foi excitar a estrutura do protótipo com uma perturbação externa com comportamento próximo de um degrau.

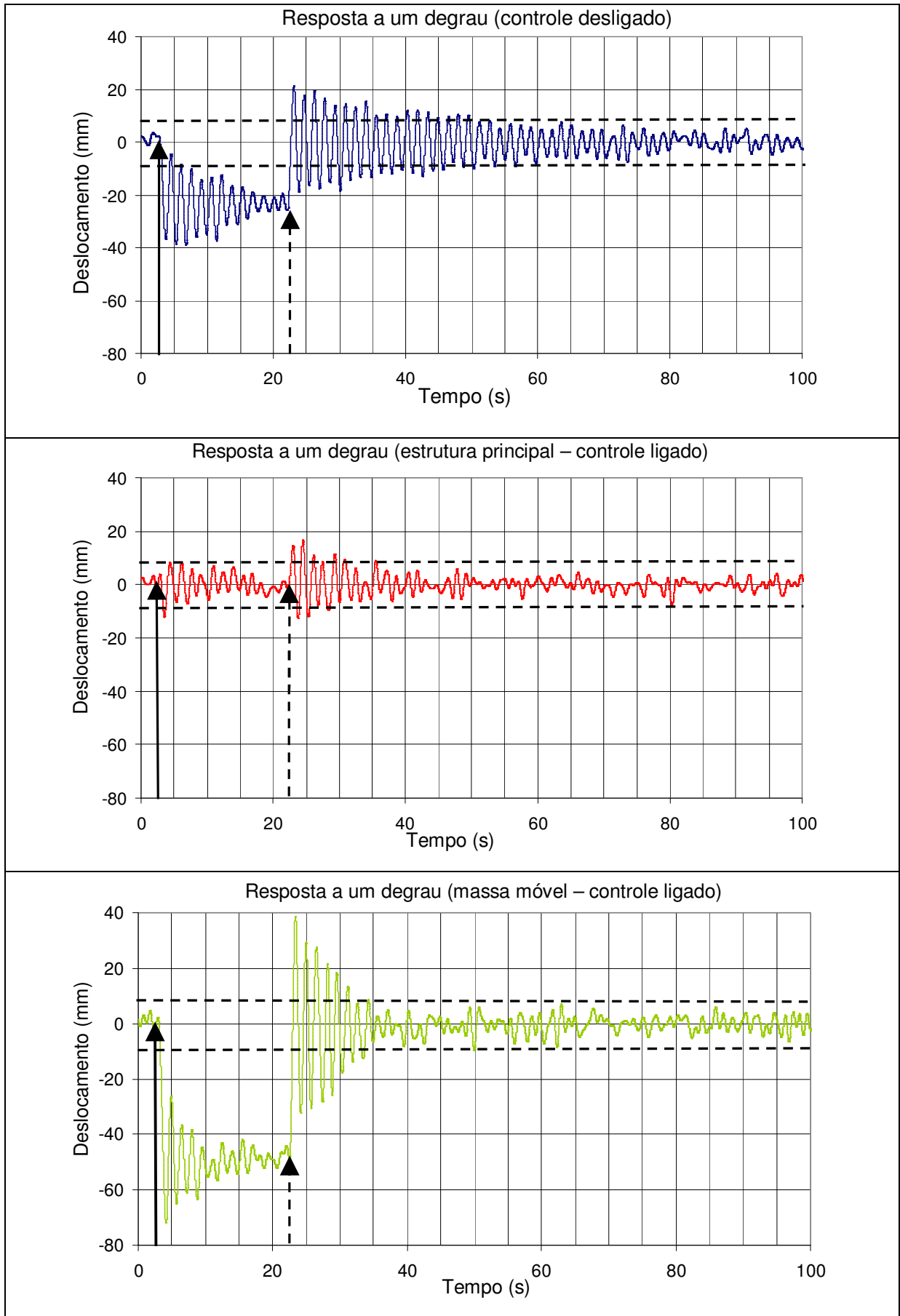


Figura 40 – Gráficos do comportamento do sistema em resposta a um degrau

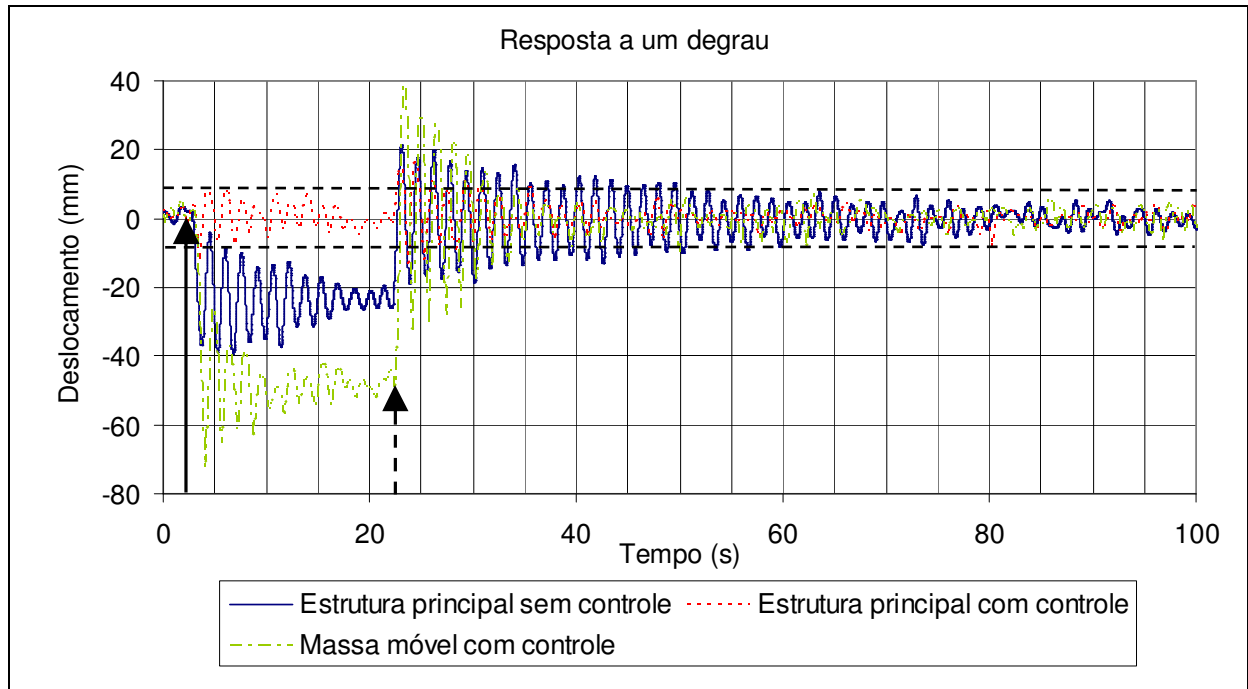


Figura 41 – Gráfico do comportamento do sistema em resposta a um degrau

Para que uma perturbação tipo degrau fosse alcançada foi definida uma sequência de atividades praticamente igual à sequência definida no primeiro experimento (impulso), porém, nesse segundo experimento o tempo em que a lateral vedada do protótipo fica exposta à ação da corrente de vento gerada pelo ventilador industrial é maior. O resultado obtido através desse experimento está ilustrado no gráfico da Fig. 40, onde a seta vertical contínua indica o início da ação da perturbação e a seta vertical tracejada indica o fim da ação da perturbação.

Nesse segundo experimento (fig. 40) é possível observar que, na presença da mesma perturbação externa, com o sistema de estabilização desligado, a estrutura principal do protótipo sai de sua posição de repouso (0° com a vertical) e oscila com uma certa amplitude em torno de uma nova posição de equilíbrio durante todo o tempo em que a perturbação externa atua sobre ela, só retornando para sua posição inicial (0° com a vertical) quando a perturbação externa cessa, já com o sistema de estabilização ligado, a estrutura principal do protótipo não sai de sua posição inicial (0° com a vertical), mas oscila em torno de sua posição inicial, porém, com uma amplitude menor do que a oscilação que apresenta com o sistema de controle desligado. Nesse experimento é possível visualizar de forma muito clara o princípio utilizado como base para a concepção do sistema de estabilização (o princípio de

quantidade de movimento) pelo seguinte fato: para que a estrutura principal do protótipo mantenha a posição inicial (0° com a vertical) na presença do distúrbio com comportamento semelhante ao de um degrau, a massa móvel precisou se deslocar mais do que o deslocamento que a estrutura do protótipo teria com sistema de controle desligado, para compensar o pequeno deslocamento da parte estrutural do robô. Em outras palavras, caso a massa da estrutura principal do protótipo fosse igual à da massa móvel, o deslocamento da massa móvel teria que ser duas vezes maior do que o deslocamento da estrutura do protótipo com o sistema de estabilização desligado para que a estrutura principal do protótipo mantivesse a posição inicial (0° com a vertical) na presença do distúrbio e com o sistema de estabilização ligado.

Repetindo o experimento da função degrau, com variação menos brusca de vento (ventilador foi ligado a partir do zero, e após alguns segundos, desligado), simulando uma variação de rajada de vento mais próximo da real, notamos que a estrutura do robô protótipo se mantém estável na sua posição de equilíbrio, apesar de estar sofrendo a ação do vento. Isto equivale a um sistema de altíssima rigidez, onde a força externa não consegue tirar o robô da sua posição de equilíbrio, como mostrado na Fig. 42, onde a seta vertical contínua indica o início da ação da perturbação e a seta vertical tracejada indica o fim da ação da perturbação.

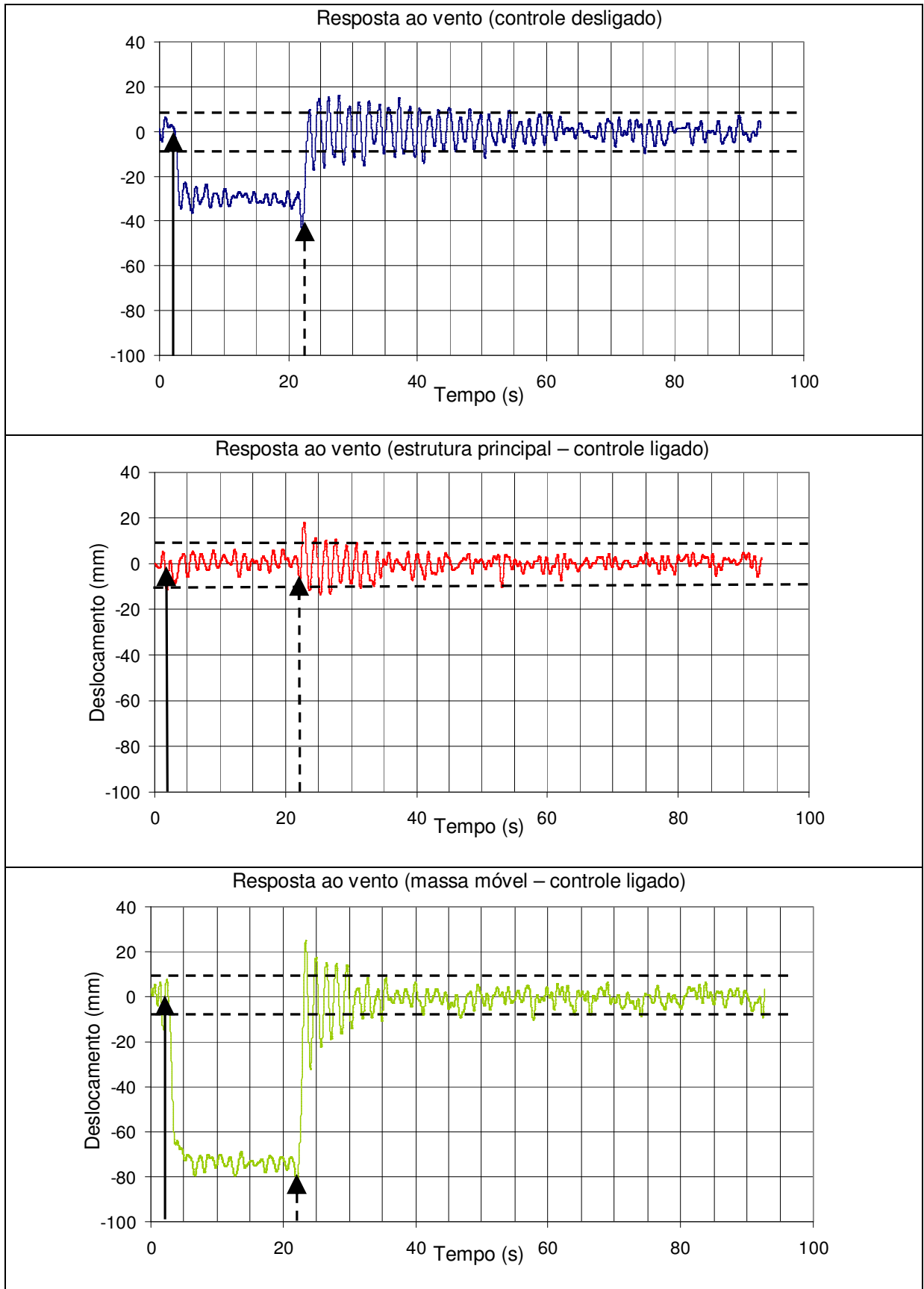


Figura 42 – Gráficos do comportamento do sistema em resposta uma corrente de vento

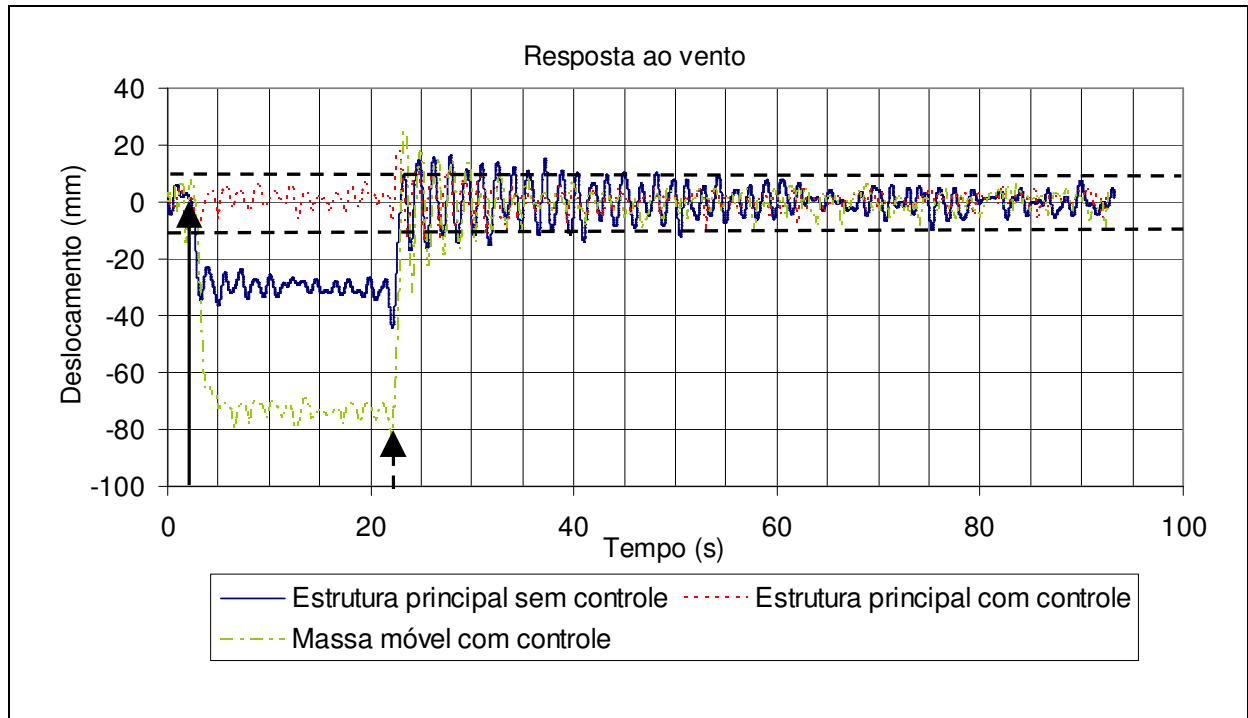


Figura 43 – Gráfico do comportamento do sistema em resposta uma corrente de vento

Utilizando o novo mecanismo de movimentação da massa móvel, foram obtidos resultados mais expressivos do que os resultados obtidos com o sistema que utilizava motor de passo com fuso embutido.

Observando os gráficos do comportamento da estrutura durante os experimentos, foi observado um fato não previsto anteriormente. A ideia base do sistema de estabilização é manter a estabilidade física da estrutura principal do veículo suspenso usando como artifício uma massa móvel para a qual toda a quantidade de movimento imposta ao sistema fosse transmitida, de maneira que a estrutura principal se mantivesse parada e todo o movimento do sistema fosse realizado por essa massa móvel. Baseado nessa ideia, o tempo total de oscilação da massa móvel quando o veículo é exposto a um distúrbio (o vento por exemplo), teria que ser idêntico ao tempo de movimentação do veículo suspenso sem o controle, desde que exposto ao mesmo distúrbio. Porém, analisando os experimentos realizados, foi observado que tal fato não acontece. Com o sistema de estabilização ligado, a estrutura principal do veículo suspenso, assim como a massa móvel, se estabilizam mais rápidos do que quando o sistema de estabilização está desligado. Ou seja, o sistema de estabilização está gerando um amortecimento sobre o sistema. Esse amortecimento que pode ser explicado pelo fato de o centro de massa da massa móvel não estar alinhado com o centro de massa da estrutura principal do

veículo (não estarem à mesma distância do centro de rotação – cabo de sustentação), conseqüentemente, quando a massa móvel é acelerada ou desacelerada, é gerado um torque que age sobre o centro de massa do veículo suspenso. Esse torque gerado tende a girar a estrutura do robô, que está preso pelo braço de sustentação ao cabo. Como o cabo está fixo, isto faz com que a estrutura do robô seja “empurrado” lateralmente pelo torque. Essa força lateral que aparece durante a aceleração e desaceleração da massa móvel pode amortecer ou impulsionar o balanço do robô, dependendo do instante em que o torque ocorre e da posição e velocidade relativa do robô em relação ao centro de equilíbrio.

Esse fenômeno poderia ser melhor entendido se imaginarmos os centros de massa, do sistema como um todo, da massa fixa e da massa móvel, estando todos numa mesma distância do centro de rotação, portanto sem gerar torque durante a aceleração e desaceleração da massa móvel, e temos simultaneamente um volante inercial (com eixo de rotação paralelo ao cabo de sustentação) preso ao robô acelerando e desacelerando para simular o torque descrito na movimentação da massa móvel com CG desalinhados.

Ou seja, é possível criar situação de amortecimento do balanço de um pêndulo pela aceleração e desaceleração de um volante inercial preso no pêndulo, sem a necessidade de um atuador externo.

7 Conclusão

Através da confecção e estudo in situ de um protótipo de veículo suspenso para estudar e desenvolver um sistema ativo de autoestabilização, foi possível comprovar a viabilidade do uso dos conceitos da quantidade de movimento e teoria do impulso como base para a concepção de um sistema de autoestabilização e amortecimento ativo que compense a ação de forças externas em veículos suspensos.

Para variações usuais de vento, soprando lateralmente o robô suspenso, criou-se um robô suspenso altamente rígido (sem movimentos laterais), somente com a ação da massa móvel interna.

No decorrer do trabalho foram utilizados dois mecanismos diferentes para realizar a movimentação da massa móvel, e, pelo fato do desempenho do sistema de estabilização estar diretamente relacionado com a velocidade da massa móvel e o nível de vibração imposto sobre o sistema durante o acionamento do atuador utilizado, concluiu-se que a forma de movimentação da massa móvel utilizando um motor de corrente contínua e uma transmissão de movimento direta entre a rotação do eixo do motor e a translação da massa móvel é uma forma de atuação adequada ao sistema de autoestabilização.

O sensor de posição, inclinômetro utilizado, apresentou sensibilidade e precisão adequados ao sistema de autoestabilização de robôs suspensos, mostrando grande potencial para esse uso.

O microcontrolador baseado no microprocessador da Atmel ATmega168 (Arduino Diecimila) se mostrou eficiente na execução da autoestabilização, que em virtude de seu reduzido tamanho, baixo consumo de energia, baixo custo e alta robustez, pode ser indicado em sistemas embarcados em robôs autônomos.

O sistema de controle em malha fechada com programação do tipo proporcional-derivativo se mostrou eficiente para a estabilização de robôs suspensos.

É possível criar situação de amortecimento do balanço de um pêndulo pela aceleração e desaceleração de um volante inercial preso no pêndulo (aplicação de torque interno), sem a necessidade de aplicação de forças externas, fato observado e extremamente útil em vista da dificuldade e, na maioria dos casos, da inviabilidade da aplicação de forças externas sobre robôs móveis suspensos.

8 Trabalhos Futuros

Como continuidade do trabalho é interessante realizar a modelagem matemática do mecanismo proposto e fazer simulações em software de modo que seja possível comparar os resultados obtidos de maneira experimental com os resultados obtidos em simulação.

Em vista da possibilidade de se criar um sistema de amortecimento ativo aplicável a veículos suspensos utilizando torques internos como princípio de

funcionamento, outro trabalho interessante é estudar a viabilidade de um sistema de amortecimento ativo que utilize um volante inercial para gerar torques internos a estrutura amortecendo os efeitos de perturbações externas.

No presente trabalho, o mecanismo proposto foi estudo considerando o veículo suspenso como um pêndulo simples, um trabalho interessante, pensando em robôs para inspeção em linhas de transmissão de energia, é acoplar o mecanismo de estabilização proposto com o sistema de locomoção do robô juntamente com o sistema de transposição de obstáculos.

9 Referências Bibliográficas

- (1) Tang Li, Fang Lijin, Wang Hongguang, “Development of An Inspection Robot Control System for 500KV Extra-High Voltage Power Transmission Lines”, SICE Annual Conference in Sapporo, August , 2004, Hokkaido Institute of Tecnology, Japan.
- (2) J. Sawada, K. Kusumoto, Y. Maikawa, T. Munakata, and Y. Ishikawa, “A mobile robot for inspection of power transmission lines,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 6, pp. 309–315, Jan. 1991.
- (3) Xinglong Zhu, Hongguang Wang, Lijin Fang, Mingyang Zhao, Jiping Zhou, “Algorithm Research of Inspection Robot for Searching for Pose of Overhead Ground Wires”, Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21 - 23, 2006, Dalian, China
- (4) Mostafa Nayerloo, Seyyed Mohammad Mehdi Yeganehparast, Alireza Barati, Mahmud Saadat Foumani, “Mechanical Implementation and Simulation of MoboLab, A Mobile Robot for Inspection of Power Transmission Lines” International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 4, No. 3 (2007), ISSN 1729-8806, pp. 381-386
- (5) Shin-ichi Aoshima, Takeshi Tsujimura, Tetsuro Yabuta, “ A Wire Mobile Robot with Multi-unit Structure”, IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '89, Sep. 4-6, 1989, Tsukuba, Japan.
- (6) T. Tsujimura, T. Yabuta, T. Morimitsu, “Design of a wire-suspended mobile robot capable of avoiding path obstacles”, IEE Proc.-Control Theroy Appl, VOL.143, N° 4, July 1996.
- (7) Xinglong Zhu, Jiping Zhou, Hongguang Wang, Lijin Fang, Mingyang Zhao, “An Autonomous Obstacles Negotiating Inspection Robot for Extra-High Voltage Power Transmission Lines” Control, Automation, Robotics and Vision, December 2006.

(8) Xinglong Zhu, Hongguang Wang, Lijin Fang, Mingyang Zhao, Jiping Zhou, "A Novel Running and Gripping Mechanism Design Based on Centroid Adjustment" Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, June 2006.

(9) Xinglong Zhu, Hongguang Wang, Lijin Fang, Mingyang Zhao, Jiping Zhou, "Algorithm Research of Inspection Robot for Searching for Pose of Overhead Ground Wires", Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21 - 23, 2006, Dalian, China.

(10) Xinglong Zhu, Hongguang Wang, Lijin Fang, Mingyang Zhao, Jiping Zhou, "Dual Arms Running Control Method of Inspection Robot Based on Obliquitous Sensor" Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems October 9- 15, 2006, Beijing, China.

(11) Xinglong Zhu, Jiping Zhou, Hongguang Wang, Lijin Fang, Mingyang Zhao, "Single Arm Running Control Method of Inspection Robot Based on Obliquitous Sensor" Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, December 2006.

(12) SUN Cuilian, WANG Hongguang, ZHAO Mingyang, LING Lie, "Precision Compensation of Localization Error in Obstacle-navigation for Inspection Robot" Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics December 15 -18, 2007, Sanya, China.

(13) Cuilian Sun, Hongguang Wang, Mingyang Zhao, Hongjun Liu, Shenyang Ligong, "3D Simulation and Optimization Design of a Mobile Inspection Robot for Power Transmission Lines", Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21 - 23, 2006, Dalian, China

(14) S.Peungsungwa, B. Pungsiri, K. Chamnongthai, "Autonomous Robot for a Power Transmission Line Inspection", The 2001 IEEE International Symposium on Volume 3, Issue , 6-9 May 2001.

(15) Ludan Wang, Lijin Fang, Hongguang Wang, Mingyang Zhao, "Development and Control of an Autonomously Obstacle-Navigation Inspection Robot for Extra-High Voltage Power Transmission Lines", SICE-ICASE International Joint Conference 2006 Oct. 18-21, 2006 in Bexco, Busan, Korea.

(16) Zhang Tingyu, Zhang Guoxian, Jin Jian, "Development of a Dual-Arm Mobile Robot for High Voltage Power Lines", Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics December 15 -18, 2007, Sanya, China.

(17) Tang Li, Fang Lijin, Wang Hongguang, "Development of An Inspection Robot Control System for 500KV Extra-High Voltage Power Transmission Lines", SICE Annual Conference in Sapporo, August 44, 2004, Hokkaido Institute of Technology, Japan.

(18) Tang Li, Fu Shuangfei, Fang Lijin, Wang Hongguang, "Obstacle-navigation strategy of a wire-suspend robot for power transmission lines", Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics August 22 - 26, 2004, Shenyang, China.

(19) Ludan wang, Hongguang Wang, Lijin Fang, "Obstacle-Navigation Control of Power Transmission Lines Inspection Robot", Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics December 15 -18, 2007, Sanya, China.

(20) Siyao Fu, Weiming Li, Yunchu Zhang, Zize Liang, Zengguang Hou, Min Tan, Wenbo Ye, Bo Lian, Qi Zuo "Structure-Constrained Obstacles Recognition for Power Transmission Line Inspection Robot", Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems October 9 - 15, 2006, Beijing, China.

(21) Siyao Fu, Zize Liang, Zengguang Hou, Min Tan, "Vision based Navigation for Power Transmission Line Inspection Robot", Cognitive Informatics, 2008. ICCI 2008. 7th IEEE International Conference on August 14-16 2008.

(22) Kiyoshi Tsukahara, Yorihiro Tanaka, Norihiko Takasu, Ryosuke Hori, Yingxin He, Hiroki Tatematsu, Kyouichi Tatsuno, "Vision for a Power Distribution Line Maintenance Robot", Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2006 International Symposium on November 5-8 2006.

(23) F Y Zhou, J D Wang, Y B Li, J Wang, H R Xiao, "Control of an Inspection Robot for 110KV Power Transmission Lines Based on Expert System Design Methods", Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications Toronto, Canada, August 28-31, 2005.

(24) Ren Zhibin, Ruan Yi, Yang Yong, Zhang Chaoyi, Liu Xu, "Control of Inspection Robot for the Power Transmission Lines Based on Database" Proceedings of the 27th Chinese Control Conference July 16-18, 2008, Kunming, Yunnan, China.

(25) Zi-ze Liang, En Li, Min Tan "Control of Inspection Robots for Power Transmission Lines Based on Remote Video over Internet" Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce Vol-1 (CIMCA-IAWTIC'06).

(26) Fengyu Zhou, Hairong Xiao, Yibin Li, Aiguo Wu, "Control Strategy and Implementation of an Inspection Robot for 110kV Power Transmission Lines", Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21 - 23, 2006, Dalian, China.

(27) Li Cai, Zize Liang, Zeng-guang Hou, Min Tan, "Fuzzy Control of the Inspection Robot for Obstacle-Negotiation" Networking, Sensing and Control, 2008. ICNSC 2008. IEEE International Conference on April 6-8, 2008

(28) Zhibin Ren, Yi Ruan, "Planning and Control in Inspection Robot for Power Transmission Lines", Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on April 21-24, 2008.

(29) Serge Montambault, Jacques Côte, Michel St-Louis, "Preliminary Results on the Development of a Teleoperated Compact Trolley for Live-Line Working", 12C-ESMO-7.

(30) P. Ruaux, "Mechanisation of the Installation of Aircraft Warning Spheres on Overhead Lines", ESMO-95.

(31) Mario F. M. Campos, Guilherme A. S. Pereira, Samuel T. C. Vale, Alexandre Q. Bracarense, Gustavo A. Pinheiro, Maurício P. Oliveira, "A mobile manipulator for installation and removal of aircraft warning spheres on aerial power transmission lines", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002, Washington, DC. Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA'02), 2002. p. 3559-3564.

(32) Mario F. M. Campos, Guilherme A. S. Pereira, Samuel R. C. Vale, Alexandre Q. Bracarense, Gustavo A. Pinheiro, Maurício P. Oliveira, "A Robot for Installation and Removal of Aircraft Warning Spheres on Aerial Power Transmission Lines", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 18, NO. 4, OCTOBER 2003.

(33) Hiroshi Matsuhisa, Rongrong Gu, Yongjing Wang, Osamu Nishihara, Susumu Sato, "Vibration Control of a Ropeway Carrier by Passive Dynamic Vibration Absorbers", JSME International Journal Series C, vol. 38, nº 4, 1995.

(34) Osamu Nishihara, Hiroshi Matsuhira, Susumu Sato, "Vibration Damping Mechanisms with Gyroscopic Moment", JSME International Journal Series III, vol. 35, nº 1, 1992.

(35) Hiroshi Kanki, Yoshitsugu Nekomoto, Hiroyuki Monobe, Hironobu Ogura, Kiichi Kobayashi, "Development of CMG Active Vibration Control Device for Gondola", Jsme International Journal Series C, vol. 37, nº 3, 1994.

(36) Hiroshi Matsuhisa, Hieidaira, Otsu –Shi, Shiga-ken, Massashi Yasuda, Hyogo-ken, "Dynamic Vibration Absorber for Pendulum Type Structures", United States Patent, number: 5,460,099, October 24, 1995.

- (37) Oswaldo Horikawa, Kaiji Sato, Akira Shimokohbe, “ An active air journal bearing”, Nanotechnology 3 (1992) 84-90, printed in UK.
- (38) Álvaro de Almeida Caparica, “O isocronismo dos triângulos retângulos”, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 3, p. 389-392, 2007.
- (39) <http://arduino.cc> último acesso em 30/Out./2008
- (40) Aström, K. J., Hägglund, T., “PID Control”, The Control Handbook, IEEE Press, 1996.
- (41) Murray, R. M.; Åström, K. J.; Boyd, S.P.; Brockett, R.W. e Stein, G. (2003). Future Directions in Control in an Information-Rich World. IEEE Control Systems Magazine, vol. 23, pp. 20-33, April.
- (42) Levine, W. S. (1996). The Control Handbook. CRC Press, Boca Raton, FL.
- (43) Cardoso, P. M. (2002). Estudo, Proposta e Avaliação de Novas Metodologias de Sintonia Automática de Controladores PID Baseadas no Ensaio do Relê Realimentado, Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- (44) Gude, J. J.; Kahoraho, E. e Etxaniz, J. (2006). Practical Aspects of PID Controllers: An Industrial Experience. IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA'06, pp. 870 - 878.
- (45) Åström, K.J. e Hägglund, T. (1995). PID Controllers: Theory, Design and Tuning, 2nd ed. Research Triangle Park, NC, USA:Instrument Society of America.
- (46) Tan K. K.; Lee T. H. e Jiang X. (2001). On-line Relay Identification, Assessment and Tuning of PID Controller, Jornal of Process Control, vol. 11, pp. 483-496, Elsevier Science Ltd..

- (47) Skogestad S. (2003). Simple Analytic Rules for Model Reduction and PID Controller Tuning. *Journal of Process Control*, Volume 13, Number 4, June 2003 , vol. 19, pp. 291-309, Elsevier.
- (48) Coelho, A. A. R. e Coelho, L. S. (2004). *Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares*, Editora da UFSC.
- (49) Bobál, V.; Böhm, J.; Fessl, J. e Macháček, J. (2005). *Digital Self-tuning Controllers*, Springer.
- (50) Popescu, D.; Tambozi, G. e Petrescu, C. (2000). Some Considerations about the Refinements and the Accuracy of PID Controllers. *IFAC Digital Control: Past, Present, and Future of Pid Control*, Volume from the Ifac Workshop, pp. 247-252, Terrassa, Spain.
- (51) Malik, O. P.; Hope, G S e Cheng S J. (1991). Some Issues on the Practical Use of the Recursive Least Squares Identification in Self-Tuning Control. *International Journal of Control*, vol. 53, pp. 1021-1033.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Driver do motor de corrente contínua

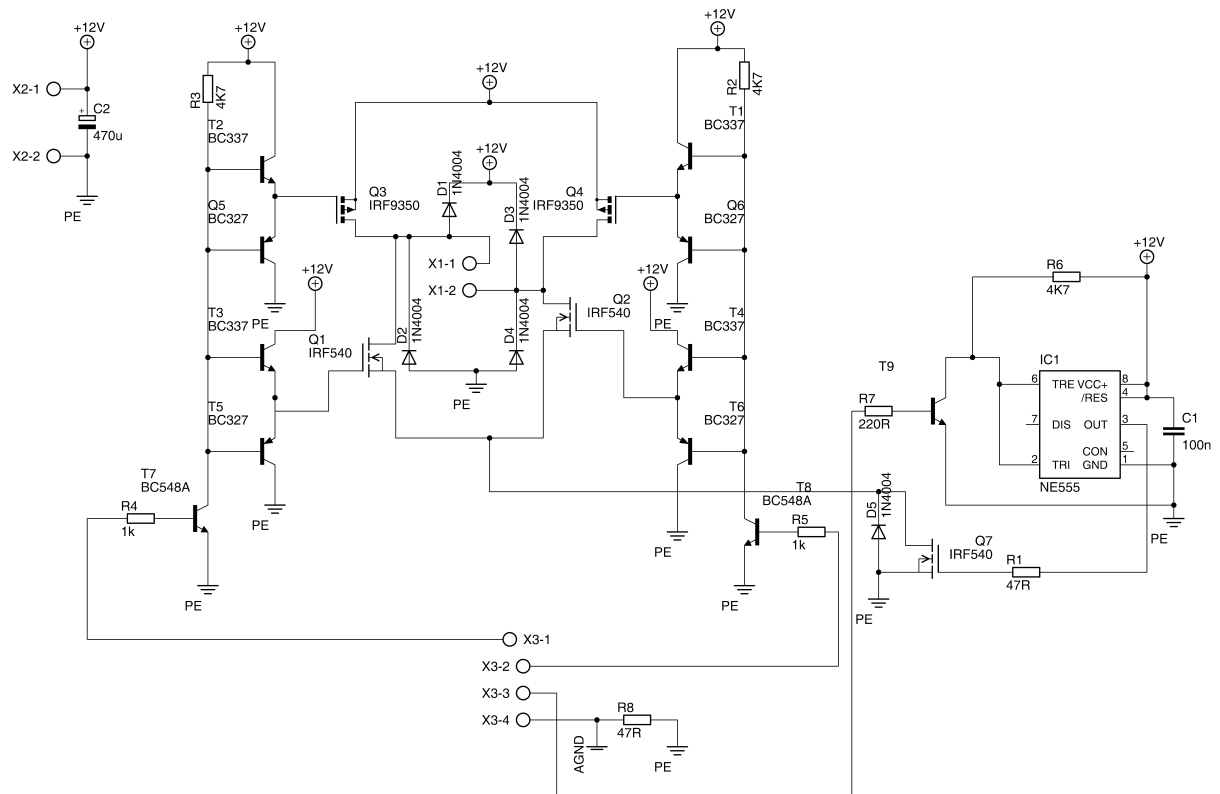


Figura 44 – Esquema do driver utilizado

Na figura 42, os pinos que definem o sentido de giro do motor estão designados por X3-1 e X3-2, o pino que recebe o sinal do PWM enviado pela placa micro-controladora é designado por X3-3, e através do pino X3-4 o terra da placa micro-controladora é ligado ao terra da fonte de alimentação, foi colocado um resistor de proteção, os pinos X1-1 e X1-2 são as saídas para o motor de corrente contínua a ser controlado e os pinos X2-1 e X2-2 são as entradas do Vcc e terra da fonte respectivamente.

APÊNDICE B - Rotina de Controle Proporcional (motor de passo).

```
#define centro 482 // posição de referência
#define iteracoes 500 // quantidade de leituras embutidas na média
#define kd 16 // ganho proporcional
#define di 100 // tempo de aquisição da entrada analógica do arduíno
#define dp 10 // tempo de energização da bobina do motor

int ciclos;
int soma;
unsigned long media;
int c;
int p = 0; // possibilita verificar qual foi a última bobina energizada

void setup()
{
  pinMode(2,OUTPUT);
  pinMode(3,OUTPUT);
  pinMode(4,OUTPUT);
}

void loop()
{
  soma = 0; // soma dos valores medidos pelo sensor a cada iteração
  media = 0; // média dos valores medidos pelo sensor

  for(c=0;c<iteracoes;c++) // faz uma média dos valores medidos pelo sensor
  {
    soma+=analogRead(5);
    delayMicroseconds(di);
  }
  media = soma/c;
```

```
if(media>centro) ciclos = (media-centro)*kd/10; // ação de controle  
if(media < centro) ciclos = (centro-media)*kd/10; // ação de controle
```

```
while(ciclos > 1) // acionamento do motor sentido horário
```

```
{  
  if(p == 0 || p == 3 || p == 4)  
  {  
    digitalWrite(2,HIGH);  
    digitalWrite(3,LOW);  
    digitalWrite(4,LOW);  
    delay(dp);  
    if(p == 3 || p == 4) ciclos--;  
    p = 1;  
  }  
  if(p == 1 || p == 6 && ciclos > 1)  
  {  
    digitalWrite(2,LOW);  
    digitalWrite(3,HIGH);  
    digitalWrite(4,LOW);  
    delay(dp);  
    p = 2;  
    ciclos--;  
  }  
  if(p == 2 || p == 5 && ciclos > 1)  
  {  
    digitalWrite(2,LOW);  
    digitalWrite(3,LOW);  
    digitalWrite(4,HIGH);  
    delay(dp);  
    p = 3;  
    ciclos--;  
  }  
}
```

```
while(ciclos > 1) // acionamento do motor sentido anti-horário
{
  if(p == 1 || p == 6)
  {
    digitalWrite(2,LOW);
    digitalWrite(3,LOW);
    digitalWrite(4,HIGH);
    delay(dp);
    p = 4;
    ciclos--;
  }
  if(p == 4 || p == 3 && ciclos > 1)
  {
    digitalWrite(2,LOW);
    digitalWrite(3,HIGH);
    digitalWrite(4,LOW);
    delay(dp);
    p = 5;
    ciclos--;
  }
  if(p == 0 || p == 5 || p == 2 && ciclos > 1)
  {
    digitalWrite(2,HIGH);
    digitalWrite(3,LOW);
    digitalWrite(4,LOW);
    delay(dp);
    if(p == 5 || p == 2) ciclos--;
    p = 6;
  }
}

if(media = centro) // mantém as bobinas do motor desenergizadas
{
```

```
digitalWrite(2,LOW);  
digitalWrite(3,LOW);  
digitalWrite(4,LOW);  
}  
}
```

APÊNDICE C - Rotina de Controle Proporcional Modificado (motor de passo)

```
#include <Metro.h>
#define centro 482 // posição de referência
#define iteracoes 500 // quantidade de leituras embutidas na média
#define kd 16 // ganho proporcional
#define di 100 // tempo de aquisição da entrada analógica do arduíno
#define dp 10 // tempo de energização da bobina do motor
#define a 100 // tempo reservado para acionamento do motor de passo

int ciclos;
int soma;
unsigned long media;
int c;
int p=0; // possibilita verificar qual foi a última bobina energizada

void setup()
{
  pinMode(2,OUTPUT);
  pinMode(3,OUTPUT);
  pinMode(4,OUTPUT);
}

void loop()
{
  soma = 0; // soma dos valores medidos pelo sensor a cada iteração
  media = 0; // média dos valores medidos pelo sensor

  for(c=0;c<iteracoes;c++) // faz uma média dos valores medidos pelo sensor
  {
    soma+=analogRead(5);
    delayMicroseconds(di);
```

```

}
media = soma/c;
Metro tempo_acionamento = Metro (a); // inicia a contagem de tempo

if(media > centro) ciclos = (media-centro)*kd/10; // ação de controle
if(media < centro) ciclos = (centro-media)*kd/10; // ação de controle

while(ciclos > 1 && tempo_acionamento.check() != 1) // motor sentido horário
{
  if(p == 0 || p == 3 || p == 4)
  {
    digitalWrite(2,HIGH);
    digitalWrite(3,LOW);
    digitalWrite(4,LOW);
    delay(dp);
    if(p == 3 || p == 4) ciclos--;
    p = 1;
  }
  if(p == 1 || p == 6 && ciclos > 1 && tempo_acionamento.check() != 1)
  {
    digitalWrite(2,LOW);
    digitalWrite(3,HIGH);
    digitalWrite(4,LOW);
    delay(dp);
    p = 2;
    ciclos--;
  }
  if(p == 2 || p == 5 && ciclos > 1 && tempo_acionamento.check() != 1)
  {
    digitalWrite(2,LOW);
    digitalWrite(3,LOW);
    digitalWrite(4,HIGH);
    delay(dp);
    p = 3;
  }
}

```



```

        ciclos--;
    }
}
while(ciclos > 1 && tempo_acionamento.check() != 1) // motor sentido anti-
horário
{
    if(p == 1 || p == 6)
    {
        digitalWrite(2,LOW);
        digitalWrite(3,LOW);
        digitalWrite(4,HIGH);
        delay(dp);
        p = 4;
        ciclos--;
    }
    if(p == 4 || p == 3 && ciclos > 1 && tempo_acionamento.check() != 1)
    {
        digitalWrite(2,LOW);
        digitalWrite(3,HIGH);
        digitalWrite(4,LOW);
        delay(dp);
        p = 5;
        ciclos--;
    }
    if(p == 0 || p == 5 || p == 2 && ciclos > 1 && tempo_acionamento.check() !=
1)
    {
        digitalWrite(2,HIGH);
        digitalWrite(3,LOW);
        digitalWrite(4,LOW);
        delay(dp);
        if(p == 5 || p == 2) ciclos--;
        p = 6;
    }
}

```

```
}  
if(media = centro) // mantém as bobinas do motor desenergizadas  
{  
    digitalWrite(2,LOW);  
    digitalWrite(3,LOW);  
    digitalWrite(4,LOW);  
}  
}
```

APÊNDICE D - Rotina de Controle Proporcional-Derivativo (motor de passo)

```

#include <Metro.h>
#define centro 482 // posição de referência
#define iteracoes 500 // quantidade de leituras embutidas na média
#define kd 16 // ganho proporcional
#define velocidade 450 // parâmetro que ajusta a velocidade de rotação do
motor
#define di 100 // tempo de aquisição da entrada analógica do arduíno
#define a 100 // tempo reservado para acionamento do motor de passo

int ciclos;
int soma;
unsigned long media;
int c, dp;
int p=0; // possibilita verificar qual foi a última bobina energizada

void setup()
{
  pinMode(2,OUTPUT);
  pinMode(3,OUTPUT);
  pinMode(4,OUTPUT);
}

void loop()
{
  soma = 0; // soma dos valores medidos pelo sensor a cada iteração
  media = 0; // média dos valores medidos pelo sensor

  for(c=0;c<iteracoes;c++) // faz uma média dos valores medidos pelo sensor
  {

```

```

soma+=analogRead(5);
delayMicroseconds(di);
}
media = soma/c;
Metro tempo_acionamento = Metro (a); // inicia a contagem de tempo

if(media > centro) // ação de controle
{
  ciclos = (media-centro)*kd/10;
  dp = velocidade/(media-centro);
}
if(media < centro) // ação de controle
{
  ciclos = (centro-media)*kd/10;
  dp = velocidade/(media-centro);
}

while(ciclos > 1 && tempo_acionamento.check() != 1) // motor sentido horário
{
  if(p == 0 || p == 3 || p == 4)
  {
    digitalWrite(2,HIGH);
    digitalWrite(3,LOW);
    digitalWrite(4,LOW);
    delay(dp);
    if(p == 3 || p == 4) ciclos--;
    p = 1;
  }
  if(p == 1 || p == 6 && ciclos > 1 && tempo_acionamento.check() != 1)
  {
    digitalWrite(2,LOW);
    digitalWrite(3,HIGH);
    digitalWrite(4,LOW);
    delay(dp);
  }
}

```

```

    p = 2;
    ciclos--;
}
if(p == 2 || p == 5 && ciclos > 1 && tempo_acionamento.check() != 1)
{
    digitalWrite(2,LOW);
    digitalWrite(3,LOW);
    digitalWrite(4,HIGH);
    delay(dp);
    p = 3;
    ciclos--;
}
}
while(ciclos > 1 && tempo_acionamento.check() != 1) // motor sentido anti-
horário
{
    if(p == 1 || p == 6)
    {
        digitalWrite(2,LOW);
        digitalWrite(3,LOW);
        digitalWrite(4,HIGH);
        delay(dp);
        p = 4;
        ciclos--;
    }
    if(p == 4 || p == 3 && ciclos > 1 && tempo_acionamento.check() != 1)
    {
        digitalWrite(2,LOW);
        digitalWrite(3,HIGH);
        digitalWrite(4,LOW);
        delay(dp);
        p = 5;
        ciclos--;
    }
}

```

1)

```
if(p == 0 || p == 5 || p == 2 && ciclos > 1 && tempo_acionamento.check() !=  
{  
  digitalWrite(2,HIGH);  
  digitalWrite(3,LOW);  
  digitalWrite(4,LOW);  
  delay(dp);  
  if(p == 5 || p == 2) ciclos--;  
  p = 6;  
}  
}  
if(media = centro) // mantém as bobinas do motor desenergizadas  
{  
  digitalWrite(2,LOW);  
  digitalWrite(3,LOW);  
  digitalWrite(4,LOW);  
}  
}
```

APÊNDICE E - Rotina de Controle Proporcional-Derivativo (motor cc)

```
#define kp 12 // ganho proporcional
#define kd 35 // ganho derivativo
#define centro 522 // posição de referência
#define inclinometro 2 // pino de entrada (sensor)

int correcao;
int media;
int erro_atual=0;
int erro_anterior=0;
int pwm;

void setup()
{
  TCCR0B = TCCR0B & 0b11111010; // ajusta a frequência do PWM
  Serial.begin(9600);
  pinMode(2,OUTPUT);
  pinMode(3,OUTPUT);
}

void loop()
{
  media = 0;
  media = analogRead(inclinometro); // medida coletada pelo sensor

  erro_atual = (media-centro);
  correcao = (255*erro_atual/620)*kp + (255*(erro_atual-
erro_anterior)/620)*kd; // controle
  if(correcao>255)correcao=255;
  if(correcao<-255)correcao=-255;
```

```
if(correcao > 0) // acionamento do motor sentido horário
{
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(3, HIGH);
    analogWrite(5, correcao);
}
else // acionamento do motor sentido anti-horário
{
    digitalWrite(2, HIGH);
    digitalWrite(3, LOW);
    analogWrite(5, abs(correcao));
}

erro_anterior=erro_atual;
}
```


APÊNDICE F – Aquisição de dados (experimentos)

```
#define sensor1 2 // pino onde chega o sinal do sensor 1 (sensor ótico)
#define sensor2 3 // pino onde chega o sinal do sensor 2 (sensor ótico)

int c;
int medida1, medida2;

void setup()
{
  Serial.begin(57600);
}

void loop()
{
  c = 0;
  medida1 = 0;
  medida2 = 0;

  while(1)
  {
    medida1 += analogRead(sensor1); // coleta o valor do sensor 1
    c++;
    medida2 += analogRead(sensor2); // coleta o valor do sensor 2
    delayMicroseconds(8200); // garante que toda a rotina dure 10ms
    if(c >= contador)break;
  }

  Serial.println(medida1); // envia para o computador o valor coletado
  Serial.println(medida2);
}
```

APÊNDICE G – Armazenagem dos dados coletados

```
import processing.serial.*;

Serial myPort; // porta serial
String buff = "";
PrintWriter output;
int lf = 10;
int NEWLINE = 10;

void setup() {

    size(400,200);

    println(Serial.list()); // lista todas as portas seriais disponíveis

    myPort = new Serial(this, Serial.list()(1), 9600); // escolhe a porta a ser
    utilizada e qual a taxa de transmissão de dados
    output = createWriter("dados coletados.txt"); // armazena os dados num
    arquivo de texto
}

void draw() {

    background(0);
    while(myPort.available()>0)
    {
        serialEvent(myPort.read());
    }

}
```

```
void keyPressed() { // Salva os arquivos coletados quando uma tecla é
pressionada
    output.flush(); // escreve os dados restantes
    output.close(); // finalize o arquivo
    exit(); // Stop the program
}

void serialEvent(int serial)
{
    if(serial != NEWLINE)
    {
        buff += char(serial); // armazena o dado coletado
    }
    else
    {
        buff = buff.substring(0, buff.length()-1); // retira o valor que não faz parte do
dado coletado
        output.println(millis() + ":" + buff); //
        buff = ""; // esvazia a variável para a próxima coleta de dados
    }
}
```

APÊNDICE H – Filtragem do sinal (Matlab)

Sequência de operação no Matlab

```

load dados.txt % armazena os dados coletados em uma variável dados
(N,n)=size(dados); % N é a quantidade de amostras coletadas
fa=100; % frequência de amostragem
f=fft(dados); % faz a transformada de Fourier dos dados coletados
s=f.*conj(f);
s=sqrt(s)/(N-1); % calcula a amplitude do espectro de frequência do sinal
w=(0:N-1)*fa/(N-1); % gera uma escala de frequência para gerar o gráfico
amplitude em função da frequência.
t=(0:N-1)/fa; % define a escala de tempo para gerar o gráfico do sinal coletado
em função do tempo
m=round(N/2);
plot(w(1:m), s(1:m));grid % gera um gráfico com apenas metade dos pontos
do espectro de frequência calculado pois o gráfico é simétrico e para a análise do
espectro de frequência metade dos pontos é suficiente.

fn=f; % armazena o vetor gerado pela transformada de Fourier em uma nova
variável.
for i=126:N-126, fn(i)=0; end % retira os valores de frequência não pertinentes
ao sinal coletado
dadosf=ifft(fn); % faz a transformada inversa de Fourier
for i=1:N, dadosf=real(dadosf); end % retira a parte imaginária dos dados
gerados pela transformada inversa de Fourier
plot(t, dados, 'c', t, dadosf, 'k');grid % gera um gráfico que sobrepõe o sinal
filtrado pela através da transformada de Fourier e o sinal coletado pelo sensor
ambos em função do tempo.

```

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)