

MAURÍCIO MOREIRA DE AVELAR ALCHORNE
NATTALIA PICILLO FIUZA

R.O.S.A. ROBÔ SOCIÁVEL DE APOIO

Trabalho apresentado À Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Engenheiro(a)
Mecatrônico(a).

São Paulo
2020

MAURÍCIO MOREIRA DE AVELAR ALCHORNE
NATTALIA PICILLO FIUZA

R.O.S.A. ROBÔ SOCIÁVEL DE APOIO

Trabalho apresentado À Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Engenheiro(a)
Mecatrônico(a).

Curso de Graduação:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Nicola Getschko

São Paulo
2020

Sumário

1	Declaração de Originalidade	4
2	Agradecimentos	5
3	Resumo	6
4	Introdução	7
5	Estado da Arte	8
6	Requisitos Definidos	22
7	Dimensionamento do Motor	26
8	Autonomia da Bateria	34
9	Projeto em Software CAD	42
10	Altura Máxima do Rodízio Traseiro	49
11	Parafusos de Sustentação do Monitor na Coluna	51
12	Tensões nas Cantoneiras da Base	57
13	Reações de Apoio nas Rodas	64
14	Análise de Vibração da Coluna	66
15	Resumo Mecânico	73
15.1	Dimensionamento do Motor	73
15.2	Autonomia da Bateria	73

15.3	Projeto em Software CAD	74
15.4	Altura Máxima do Rodízio Traseiro	74
15.5	Parafusos de Sustentação do Monitor na Coluna	74
15.6	Tensões nas Cantoneiras da Base	75
15.7	Reações de Apoio nas Rodas	75
15.8	Análise de Vibração da Coluna	75
16	Detecção do Ambiente	77
17	Modelo para Validação Mecânica	83
18	Conclusão	88
	Referências Bibliográficas	90
19	Apêndice: Código em APDL da Análise Modal	94
20	Apêndice: Código em APDL da Análise Harmônica	97
21	Apêndice: Código em Arduino da Movimentação	101
22	Anexo: Código em Arduino da montagem do sensor LIDAR sobre o servomotor	107
23	Anexo: Código em Processing da montagem do sensor LIDAR sobre o servomotor	110

1 Declaração de Originalidade

Este relatório é apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É o produto de nosso próprio trabalho, exceto onde indicado no texto. O relatório pode ser livremente copiado e distribuído desde que a fonte seja citada.



Maurício Moreira de Avelar Alchorne



Nattalia Picillo Fiuza

2 Agradecimentos

Aos amigos e familiares de ambos os membros do grupo que realizaram este trabalho por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos professores, pelas correções e ensinamentos que permitiram apresentar um melhor desempenho no processo de formação profissional ao longo do curso.

À Escola Politécnica da USP, essencial no processo de formação profissional dos membros deste grupo e pelo aprendizado ao longo dos anos de curso.

Ao orientador do trabalho, Nicola Getschko, pela paciência e aprendizado no decorrer deste trabalho. Agradece-se por fazer este projeto ser viável e acreditar nos membros deste grupo para realizar ele.

3 Resumo

O projeto tem por objetivo conceber um protótipo de um robô sociável de apoio ao Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, nomeado como ROSA. Tem-se como foco principal a concepção mecânica do robô. Desenvolveu-se o estudo mecânico do protótipo e construiu-se um modelo do ROSA, para a validação deste projeto.

No estudo mecânico, avaliou-se o dimensionamento do motor, definindo o motor brushless AC como o mais adequado para a aplicação desejada no cenário mais crítico. Discorreu-se também sobre as demandas de energia no estudo da autonomia da bateria, definindo que seriam necessárias três baterias de 12V para o robô operar durante o período de um dia letivo, sem a necessidade de interromper suas atividades. Além disso, elaborou-se o projeto em software CAD, definindo-se as dimensões do protótipo. Em seguida, analisaram-se as definições estruturais e de fixação escolhidas para o projeto.

Validou-se o projeto mecânico construindo-se um modelo em uma escala de 3:5 em relação ao protótipo. Com o uso de dois motorreduzidores DC e um módulo bluetooth de arduino fez-se a movimentação do modelo e com o uso de um sensor LIDAR sobre um servomotor detecta-se o ambiente à volta do robô para que, assim, o ROSA não colida com obstáculos à sua frente.

Palavras-chave: *robô sociável de apoio, projeto mecânico, validação.*

4 Introdução

O projeto refere-se à concepção do protótipo de um robô sociável de apoio ao Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, nomeado como ROSA. A ideia é inserir o robô no ambiente dos alunos da Poli, através de expressões e atitudes que mimetizem as humanas. O projeto será de um protótipo que consiga interagir com o espaço físico ao seu redor e com as pessoas. O foco principal é a concepção mecânica do protótipo, que deverá ser robusta o suficiente para respeitar as definições de dimensões, de formas, de movimentos, de autonomia e de segurança.

O robô deve trazer uma identidade moderna à Escola Politécnica, reforçando seus impactos acadêmicos e sociais, através de um equipamento símbolo de inovação tecnológica e de sua interação com os humanos. Busca-se a ideia de fazer uso do robô sociável de apoio para promover a imagem do Departamento de Engenharia Mecatrônica.

A motivação desse projeto deve-se ao fato de que cada vez mais os robôs desenvolvidos estão apresentando características sociáveis. Eles são voltados para interagir e conversar com os humanos, portanto, a comunicação entre máquina e homem está ganhando novos contornos [1]. Também estão sendo pesquisados robôs que detectem e que rastreiem pessoas, podendo segui-las [2]. A crescente dessa área leva ao possível desenvolvimento de robôs para aplicações em saúde, em cuidado, em segurança, em entretenimento e em assistência, sendo este último caso aplicável a esse projeto.

5 Estado da Arte

Os robôs podem ser divididos em dois grupos, os industriais e os inteligentes. O primeiro é caracterizado por realizar tarefas repetitivas em um ambiente estruturado, o qual é um espaço projetado para facilitar as funções dos robôs. O segundo configura os autônomos, robôs que são capazes agirem de forma apropriada para realizarem a função que os foi determinada [3]. O ROSA pode ser classificado como autônomo.

Pode-se também separar os robôs em móveis, os quais têm mecanismos de locomoção que os permitem deslocar-se independentemente pelo ambiente e não móveis [4].

Dentre os robôs não móveis tem-se como exemplo o Probo [1, 5] e a Valerie [6]. O Probo é um robô de aparência animal “abraçável”, para uso infantil, objetivando criar uma identidade (Figura 1). Tem uma cabeça totalmente atuada, com 20 graus de liberdade, capaz de esboçar expressões faciais e de estabelecer contato visual. Além disso, todos os motores possuem uma mola em série, para o Probo ser elástico e seguro no caso de uma colisão, provendo um toque suave.

Ele foi construído modularmente, em três camadas, facilitando uma possível mudança em alguma parte do robô. Ele é equipado com dispositivos de sensoramento: câmeras digitais, microfones e sensores de toque debaixo da pele e possui uma tela touch na barriga para implementação de aplicações computacionais.

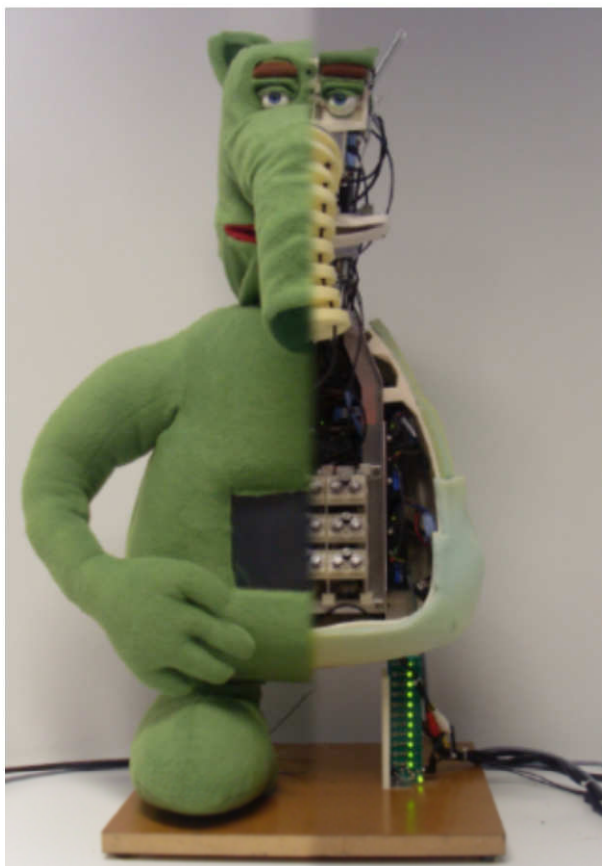


Figura 1: Robô Probo [Saldien et al., 2010].

A Valerie é um robô que foi desenvolvido para trabalhar como recepcionista na universidade Carnegie Mellon e assim analisar uma interação duradoura com os usuários, usando capacidades de fala para prover informações úteis bem como usando expressões faciais e emocionais para aprimorar a qualidade da interação. Ele tem como propósito informar sobre as localizações ou sobre o clima e também entreter o usuário com uma personagem que conta sua história para as pessoas.

Composta por uma face expressiva animada por computador, exibida em uma tela LCD plana montada em uma unidade de inclinação panorâmica (Figura 2). A interação é estabelecida tanto por fala (o que é mais natural para as pessoas) quanto por escrita (o que é mais facilmente controlável e confiável que os sistemas de reconhecimento por voz), feita através de um teclado.

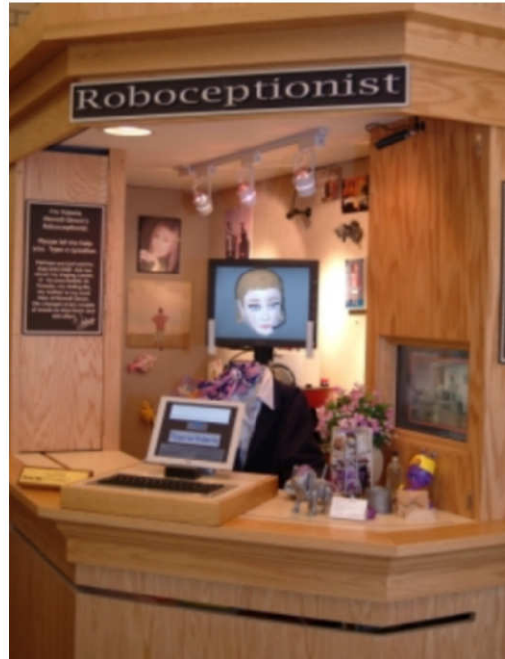


Figura 2: Robô Valerie [Gockley et al., 2005].

Já os robôs móveis podem ser separados em com rodas, por exemplo o Xavier [7], o Sparky [8] e o Pioneer 3AT [2], e com pernas, por exemplo o P2 [9]. O Xavier foi desenvolvido para ser estudado como possível garçom em uma cafeteria, sendo assim um robô de serviço, que é designado a entender comportamentos humanos e a obedecer às regras sociais. Sua função é, cronologicamente: receber um pedido de um usuário, o qual tem como entrada um teclado; navegar até o balcão de café; reconhecer as pessoas esperando na fila; se houver pessoas na fila, encontrar o lugar para se posicionar e se juntar à fila; seguir na fila, mantendo distância da pessoa na frente. Ao chegar sua vez, recolher o que o usuário pediu, navegar de volta ao lugar de onde recebeu o pedido e anunciar sua chegada.

O Xavier (Figura 3) foi construído com uma base de diâmetro de 24" ($=0,6096\text{m}$), consistindo de um mecanismo sincronizado de quatro rodas para controle independente das velocidades de translação e de rotação. Além disso, possui sensores que incluem painéis de colisão, encoders nas rodas, um anel sonar de 24 elementos e câmeras. Há também um speaker e um cartão texto-para-fala. O processamento é responsabilidade de dois computadores Pentium de 200 MHz, rodando Linux.



Figura 3: Robô Xavier [Nakauchi and Simmons, 2002].

Já o Sparky é um robô que se assemelha a uma criatura viva, um personagem com características animais. Criado para estudar a interação homem-máquina, pesquisando como as pessoas se sentem ao interagir com o Sparky. Ele tem 60cm de comprimento, 50cm de altura e 35cm de largura, rosto expressivo, cabeça móvel em um pescoço longo, placas móveis em suas costas e rodas para transladar pelo ambiente (Figura 4).

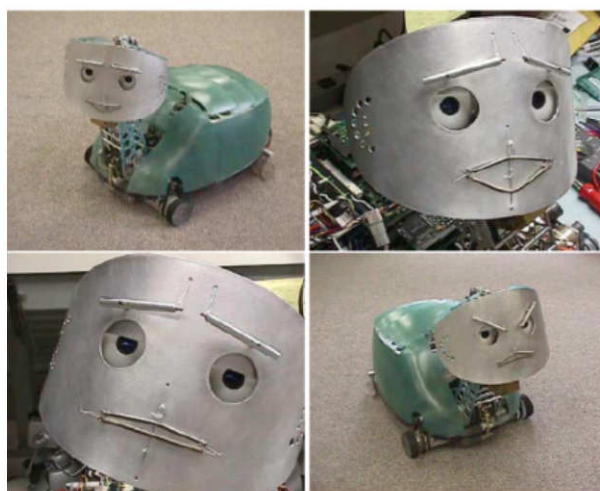


Figura 4: Robô Sparky [Scheeff, 2000].

Ele é controlado remotamente, permitindo ao operador manifestar a personalidade, atribuir os movimentos e expressar até 9 diferentes estados emocionais (neutro, felicidade, tristeza, raiva, surpresa, inquisição, sono, nervosismo e medo).

O Pioneer 3AT foi desenvolvido para ser um robô assistente, com a habilidade de detectar e rastrear as pessoas. Ele é equipado com câmeras estéreo a uma altura de 1,4m, sonares para evitar colisões com objetos no entorno e sua locomoção é sobre 4 rodas. Ele também tem suporte para um computador (implementação do controle) e uma haste para erguer as câmeras na altura do peito de uma pessoa (Figura 5).



Figura 5: Robô Pioneer 3AT [Ali et al., 2015].

O P2 é um robô humanoide com dois braços e duas pernas, operado via comunicação wireless (Figura 6). Ele tem uma altura de 1,82m, uma largura de 0,6m e um peso de 210kg e foi desenvolvido baseado em características humanas, principalmente em como as pessoas andam.



Figura 6: Robô P2 [Hirai et al., 1998].

Ele tem 12 graus de liberdade nas duas pernas, para subir e descer escadas, 14 graus de liberdade nos dois braços e, como observado na Figura 6, as mãos assemelham-se a um pegador de dois dedos com 2 graus de liberdade. Cada junta é atuada por um motor DC com engrenagens para redução. Em seu corpo há um computador para controle com quatro microprocessadores, rodando o sistema operacional em tempo real. O corpo conta ainda com servo amplificadores DC, uma bateria de níquel-zinco para os componentes eletrônicos e para os atuadores, e um modem ethernet wireless. A bateria pesa 20kg e possibilita uma autonomia de 15 minutos.

Para que o movimento do P2 seja o mais semelhante possível ao de uma pessoa, seu corpo é equipado com sensor de inclinação (consistindo de três acelerômetros e de três sensores de taxa angular) e com sensor de força de 6 eixos em cada pé ou punho (um sensor de força de 3 dimensões e um de momento de 3 dimensões), para que o robô ao andar não tombe. Além disso, é um robô bípede que possui um sistema de absorção de impacto em seus pés e mantém uma postura estável adotando movimentos humanos.

Para a concepção do ROSA um dos desafios enfrentados é o sensoriamento dele. O prédio de Engenharia Mecânica e Mecatrônica é um ambiente semi-estruturado, já que foi construído pelo ser humano, porém não foi projetado especificamente para o uso de robôs. Além disso é um espaço dinâmico, pois alunos, professores e funcionários andam pelos corredores do prédio diariamente.

Estuda-se em [10] um sistema de transporte desenvolvido para trabalhar em um ambiente estruturado de armazenagem. Mesmo sendo projetado para esse local uma das funções mais importantes é desviar de obstáculos que podem aparecer em seu caminho, como por exemplo pessoas. Para isso utilizam-se dois sensores laser, os quais escaneiam cada um ângulo de 270° ao redor do ambiente (Figura 7). Cada sensor fornece um vetor com 541 elementos, que são as distâncias entre o laser e obstáculo, com um alcance máximo de 30 metros. Outro aspecto interessante desse projeto é o sistema de detecção de bateria do robô, o qual vai até uma célula de recarga quando o nível de bateria estiver baixo.

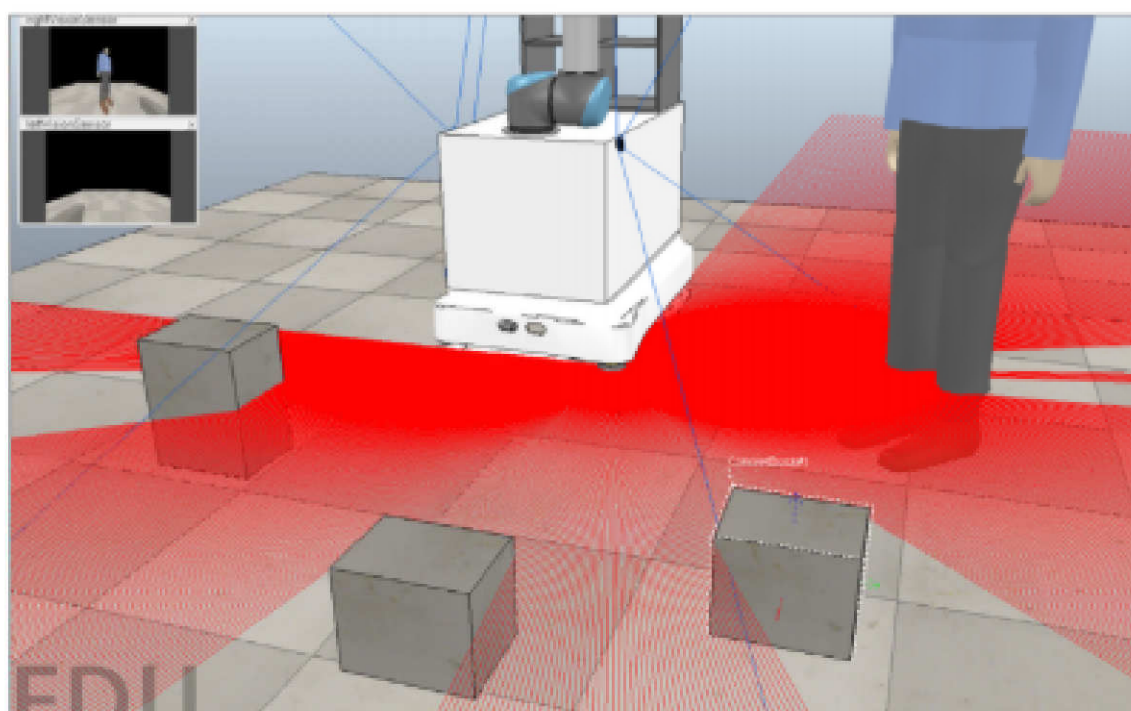


Figura 7: Esquema dos sensores para desvio de obstáculos [Gudwin et al., 2020].

Em [11] desenvolveu-se um robô autônomo com rodas para seguir uma linha preta no chão. O controle dele é feito com um arduíno, o rastreamento da posição é feito com sensores infravermelhos fotoelétricos, os quais são responsáveis por detectar a presença da linha preta no chão e a detecção de obstáculos é realizada por sensores ultrassônicos utilizando a seguinte lógica de desvio de obstáculos (Tabela 1).

Tabela 1: Esquema dos sensores ultrassônicos para desvio de obstáculos.

Left direction obstacles	Straight ahead to the obstacle	Right direction obstacles	Control Policy	Left wheel	Right Wheel
No	No	No	Forward	Reverse Turn	Positive Turn
No	>25cm	>25cm	Turn left	Stop	Positive turn
>25cm	>25cm	No	Turn right.	Reverse Turn	Stop
>25cm	>25cm	>25cm	Back off	Positive turn	Reverse Turn
			Reverse Turn	Reverse Turn	Stop
			Forward	Reverse Turn	Positive turn

[Li et al., 2020]

Em [12] desenvolveu-se um robô (Figura 8) responsável por seguir pequenos animais de estimação para evitar que pessoas pisem neles emitido um alerta sonoro quando alguém chega perto do animal. É um veículo de 4 rodas, que possui uma bateria de 10 células Li-On, controlado por um arduino mega, com motores DC e seus drivers, uma tela LCD, uma placa Jetson TX2 com câmera, responsável por reconhecer os animais de estimação e detectar seus movimentos para seguí-los e por quatro sensores ultrassônicos, os quais têm como função detectar pessoas e obstáculos do ambiente e possuem um ângulo de 30° de alcance de rastreamento do ambiente (Figura 9).



Figura 8: Robô autônomo desenvolvido para rastrear animais de estimação e evitar serem pisados [Chrzahowski et al., 2019].

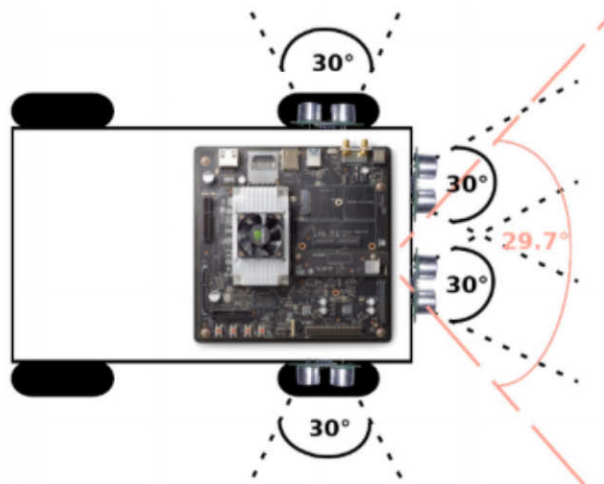


Figura 9: Esquema do alcance e posição dos sensores ultrassônicos [Chrzahowski et al., 2019].

Outro desafio enfrentado na concepção do ROSA é o desenvolvimento mecânico dele. Para a concepção da estruturação mecânica de movimentação, o modelo dinâmico de robôs móveis sobre duas rodas em pêndulo invertido permite tecer uma série de considerações importantes.

De início, em [13] investigam-se os procedimentos de modelagem para o 2WBMR (“two-wheeled balancing mobile robot”) em termos da abordagem Lagrangiana e do método de Kane, obtendo-se um modelo

dinâmico exato. Ademais, discutem-se os erros cometidos nas modelagens dinâmicas de 2WBMRs, os quais devem-se principalmente a entendimentos equivocados quanto aos sistemas de coordenadas utilizados para descrever os movimentos de rotação e à falta de comparação rigorosa com as derivações formais.

Comentam-se as três maneiras possíveis de se obter um modelo dinâmico de um 2WBMR. Na abordagem Newtoniana, enfrenta-se um processo complicado de consideração das forças interativas entre os corpos constituintes, embora se elabore um entendimento intuitivo sobre o movimento do robô, por meio das relações vetoriais entre forças e acelerações. Na abordagem Lagrangiana, modela-se um sistema de múltiplos corpos, em que a equação de movimento pode ser obtida tão logo se definam as energias cinética e potencial em função das coordenadas generalizadas (Figura 10). Por fim, o método de Kane também é baseado em operações vetoriais, mas dispensa a determinação das forças interativas entre os corpos rígidos, determinando as forças inerciais e ativas generalizadas a partir das velocidades parciais descritas nas coordenadas generalizadas.

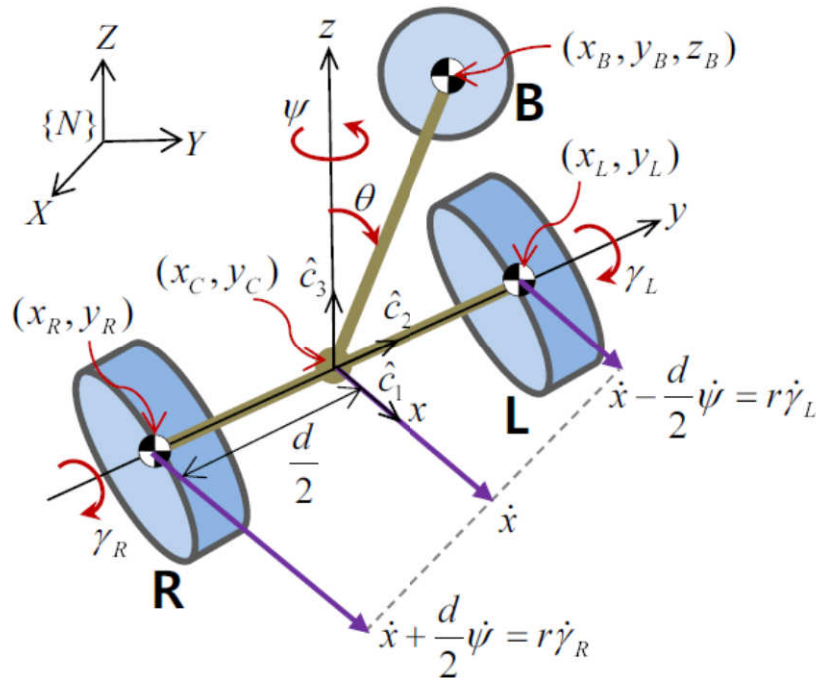


Figura 10: Treze coordenadas generalizadas de um 2WBMR [Kim and Kwon, 2015].

Em um reconhecimento inicial do projeto mecânico, da modelagem dinâmica, do projeto de controlador e do controle propriamente dito, o robô móvel em pêndulo invertido descrito em [14] fornece informações relevantes. Foram usados um sensor de inclinação e um giroscópio para que fossem medidas a inclinação e a velocidade angular do robô, respectivamente. Na seleção destes sensores, foram levados em consideração a resolução, a largura de banda, o intervalo linear, a sensibilidade e o tamanho. Geralmente, uma medida física de um sistema de controle é detectada usando-se um sensor de feedback, sendo então calculado o seu derivativo ou a sua integração a partir dessa detecção. Contudo, é possível que a integração numérica da saída do giroscópio implique erro de desvio.

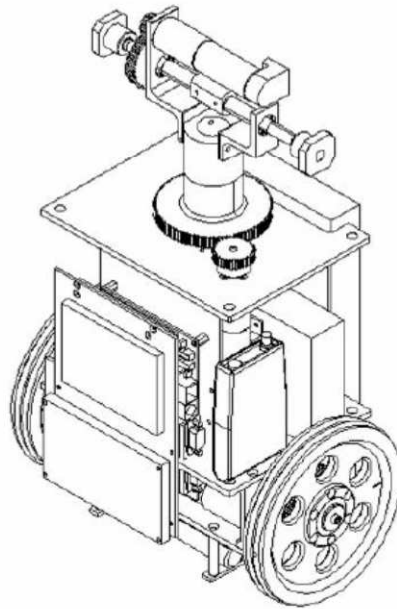


Figura 11: Robô móvel em pêndulo invertido [Lee et al., 2003].

Para o sistema proposto (Figura 11), foram obtidas as equações de movimento, as quais foram linearizadas, resultando nas equações de espaço de estados. Foi adotado um controlador regulador quadrático linear, o controlador ótimo que estabiliza assintoticamente o sistema de feedback do sistema aumentado e que minimiza o performance do índice da função de custo. Na implementação do controlador projetado no hardware de controle, o torque foi modelado como função da velocidade angular e da aceleração da roda motora.

Apresentando o controle de balanço e de navegação do robô de balanço MIPS (“mobile inverted pendulum system”), o artigo [15] estuda o sistema de pêndulo invertido como um protótipo para representação de sistemas não-lineares para teste de algoritmos de controle. O controle simultâneo de ângulo e de posição por controladores PID apresenta dificuldades justamente pelo sistema de pêndulo invertido ser não-linear.

A filtragem de sensores é tida como uma tarefa primordial, antecedendo a aplicação de algoritmos de controle. Dados acurados obtidos por meio dos sensores são essenciais para que a aplicação dos algoritmos de controle atenda satisfatoriamente às especificações de controle. O custo de sensores detectando ângulos inclinados varia de acordo com o quão bem eles tratam problemas de desvios e de ruídos, com o quão acuradas são suas medidas e com o quão rápidas são suas respostas. Sensores de inclinação não apresentam problemas relacionados a erros de desvio, mas têm tempos de resposta mais demorados. Sensores giroscópicos apresentam problemas relacionados a erros de desvio, enquanto seus tempos de resposta são mais rápidos.

Para o robô de balanço MIPS (Figura 12), controlaram-se seus movimentos remotamente por meio de um joystick, com conexão wireless, e testaram-se condições de balanço sob impacto e navegação enquanto em balanço. Para se medir o ângulo de balanço acuradamente, com sensores de baixo custo, filtros foram projetados. Para solucionar problemas relacionados aos erros de desvio dos sensores giroscópicos e à resposta lenta do sensor de inclinação, um filtro complementar foi projetado experimentalmente. Os dados filtrados são utilizados para que o filtro de Kalman estime o ângulo mais precisamente. O MIPS é controlado por controladores PD e PID para o ângulo de balanço e para o rastreamento da posição e do ângulo de direção.

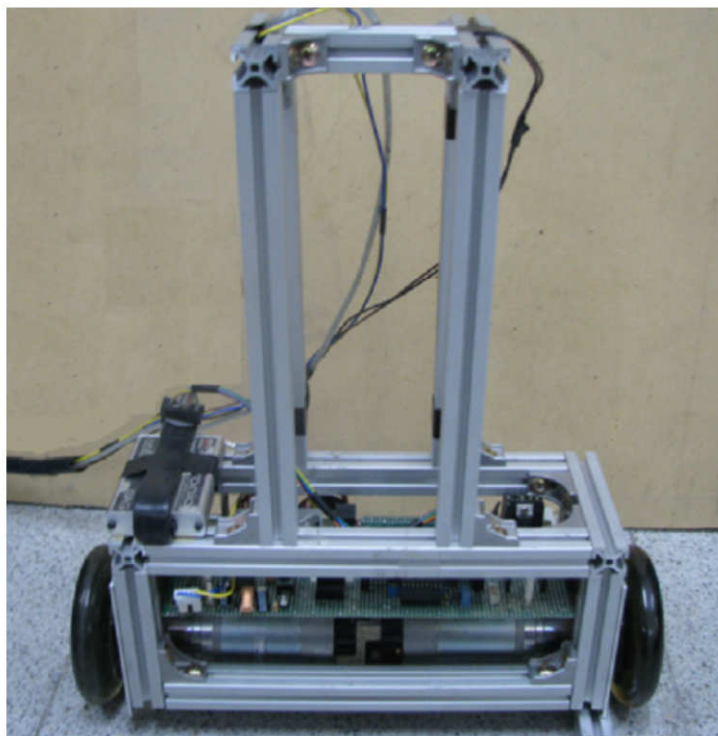


Figura 12: Robô de balanço MIPS [Lee and Jung, 2012].

Outra variação bastante pertinente ao projeto está retratada no artigo [16], em que se configurou um sistema automático de transporte de bagagem, com um robô em pêndulo invertido, e se realizou uma navegação em um ambiente real. Erros de posição do robô em pêndulo invertido são geralmente causados por um erro de desvio nos sensores giroscópicos e por uma mudança no centro de gravidade pela carga de uma bagagem, quando aplicado o método de controle de feedback de estado linear para balanço e para deslocamento.

No controle do robô em pêndulo invertido, o torque controlado para balanço e para deslocamento é gerado pela lei de controle de feedback, sendo a soma de diversos termos de feedback englobando postura, ângulo das rodas e suas velocidades angulares. O ajuste do robô à sua posição estimada de navegação utiliza odometria, dados de sensores posicionados no ambiente e o mapa do ambiente fornecido como informação ao robô, previamente ao experimento. No controle do feedback, ganhos grandes provocam oscilações excessivas durante a navegação e ganhos pequenos produzem respostas lentas (dificultando a manutenção robusta do balanço, principalmente em superfícies rugosas).

O sensor giroscópico do robô móvel em pêndulo invertido sobre rodas “Yamabico Kuro” (YK) (Figura 13) tem como saída uma tensão, a qual é proporcional à velocidade angular. A tensão base, definida como $0^\circ/\text{s}$ não é constante devido às mudanças de temperatura ou às vibrações externas, fenômeno conhecido como o erro de desvio do sensor giroscópico. O erro em estado estacionário na distância de referência entre dois alvos e a distância efetiva de movimentação é decorrente de erros no ângulo de postura.

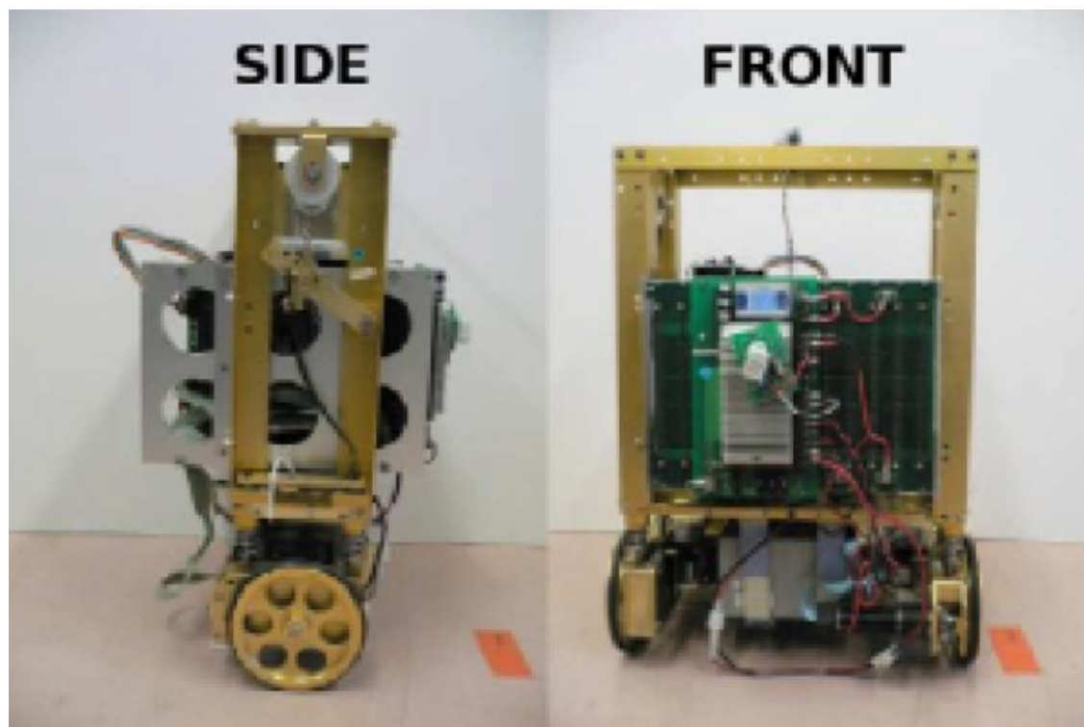


Figura 13: Robô móvel em pêndulo invertido “Yamabico Kuro” [Takei et al., 2009].

6 Requisitos Definidos

A partir dos robôs estudados, foram definidos os requisitos do projeto mecânico do ROSA.

Em primeiro lugar, foi definida a altura média do robô. Analisando a média das alturas dos brasileiros, apresentada na Tabela 2, que é de 1,73m e das brasileiras que é de 1,60m [17], foi decidido que a altura máxima que o ROSA vai ter é de 1,60m, pois como é um projeto de um robô sociável, optou-se por escolher uma altura que não ultrapassasse a média das mulheres, buscando maior aceitação na interação homem-máquina, pois a comunicação com um robô maior que o usuário pode causar aversão.

Tabela 2: Estimativas de altura média brasileira, por gênero e faixa de idade.

Tabela 2645 - Estimativas populacionais das medianas de altura e peso de crianças, adolescentes e adultos, por sexo, situação do domicílio e idade - Brasil e Grandes Regiões		
Variável - Mediana de altura (Centímetros)		
Brasil		
Ano - 2008		
Situação do domicílio - Total		
Idade	Sexo	
	Masculino	Feminino
18 anos	172,6	161,1
19 anos	172,0	161,2
20 a 24 anos	173,0	161,1
25 a 29 anos	173,0	160,7
30 a 34 anos	171,6	160,0
35 a 44 anos	171,0	159,4
45 a 54 anos	169,9	158,3
55 a 64 anos	168,2	156,6
Fonte: IBGE - Pesquisa de Orçamentos Familiares		

[IBGE, 2008]

O segundo requisito que foi definido é o de peso máximo que o ROSA pode ter. Segundo o Artigo 198 de [18], “é de 60kg (sessenta quilogramas) o peso máximo que um empregado pode remover individualmente, ressalvadas as disposições especiais relativas ao trabalho do menor e da mulher” e segundo o Artigo 390 de [18], “ao empregador é vedado empregar a mulher em serviço que demande o emprego de força muscular

superior a 20 (vinte) quilos para o trabalho contínuo, ou 25 (vinte e cinco) quilos para o trabalho ocasional”. Visando a fabricação de um robô que seja carregável e que atenda a estas duas regulamentações mencionadas acima, foi definido como peso máximo 25kg.

Depois, estabeleceu-se o requisito de movimentação. Foi definido que a movimentação vai ser feita através de rodas e não com pernas, como foi desenvolvido o P2 [9], pois uma movimentação bípede exige muitos atuadores e graus de liberdade, o que dificultaria e encareceria o projeto, sendo que para os objetivos propostos não é necessário esse tipo de movimentação. Foi decidido que o deslocamento do ROSA vai ser feito com um mecanismo que permite uma rotação do robô em torno de seu eixo, buscando otimizar o espaço necessário para fazer curvas ou manobras, já que o ROSA vai se locomover no meio dos alunos no prédio do Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Será algo análogo ao sistema de movimentação de um aspirador de pó caseiro automático ou do próprio Xavier [7].

Escolheu-se uma movimentação com três rodas, sendo duas delas posicionadas ligeiramente atrás do centro da base e uma terceira posicionada na extremidade dianteira (apenas como um apoio simples). As duas rodas de trás serão tracionadas e a massa do protótipo será distribuída de modo a otimizar a tração nas rodas motoras, impedindo que a roda dianteira perca contato com o solo em acelerações acentuadas.

Para a haste de sustentação do corpo do robô, a qual servirá como tronco, existe o problema de gerar um braço de momento, o qual desencadearia desestabilidade sob qualquer ruído de movimentação (vibrações indesejadas). Como alternativas possíveis, pensou-se em posicionar um atuador no pé da haste modelada como um pêndulo invertido ou adicionar massa à base como lastro para deslocar o centro de gravidade. A primeira alternativa teria como inconveniente a complexidade de programação de um controle estável (além de acrescentar custos com sensores e com atuadores), sendo dispensável uma configuração em pêndulo invertido para a aplicação pretendida. A segunda alternativa teria como inconveniente ser um peso morto, acrescentando massa. Procurando a simplificação mais pertinente à finalidade do robô, optou-se pela se-

gunda alternativa, acrescentar lastro para abaixar o centro de gravidade.

Outro requisito que foi decidido é a comunicação do robô, a qual será feita através de duas telas, uma com a face do robô desenvolvida computacionalmente e a outra para a comunicação do usuário com o ROSA, através de um teclado sensível ao toque (“touchscreen”). O monitor da face expressará emoções mimetizadas, objetivando gerar empatia e aproximação com o interlocutor, e estará vinculado ao tronco, de modo que o robô consiga visualizar uma pessoa ao girar em torno de seu próprio eixo.

Para a autonomia de energia do robô, estimou-se algo em torno de 14 horas como mínimo, supondo um uso de 12 horas diárias, somadas a uma margem de segurança para que jamais interrompa a sua operação durante o uso por falta de energia. Considerando-se justamente sua operação durante o horário letivo, definiu-se um carregamento noturno, evitando carregamentos nos intervalos de uso.

Para a escolha do motor, foi estabelecido um coeficiente de segurança de 2 para a potência necessária no sistema. A seleção do motor se dará pelo cálculo da potência, tomando por base o critério de subida de rampa a uma velocidade de 1m/s (velocidade média de deslocamento de uma pessoa caminhando [19]). Cogitou-se um motor brushless com alta rotação, pequeno, com controladores prontos. Outra possibilidade seria optar por motorreduzidores, para os quais seria priorizado o torque e não a velocidade de rotação na seleção.

A próxima etapa será quantificar melhor os parâmetros delimitados, de modo a restringir ainda mais as escolhas e avançar nas definições.

A partir desses requisitos foi idealizado o primeiro formato do robô (Figura 14), o qual consiste em uma base próxima ao chão, na qual vai ficar a maior parte dos componentes do robô, como motor e bateria. Além disso ela vai ser a parte mais pesada do robô, buscando justamente maior estabilidade, e em cima dela vai ser colocada uma cesta para carregar pequenos objetos de até aproximadamente 1kg. E, por último, as telas para interação com o ROSA vão ser presas em uma haste que vai sair da base.

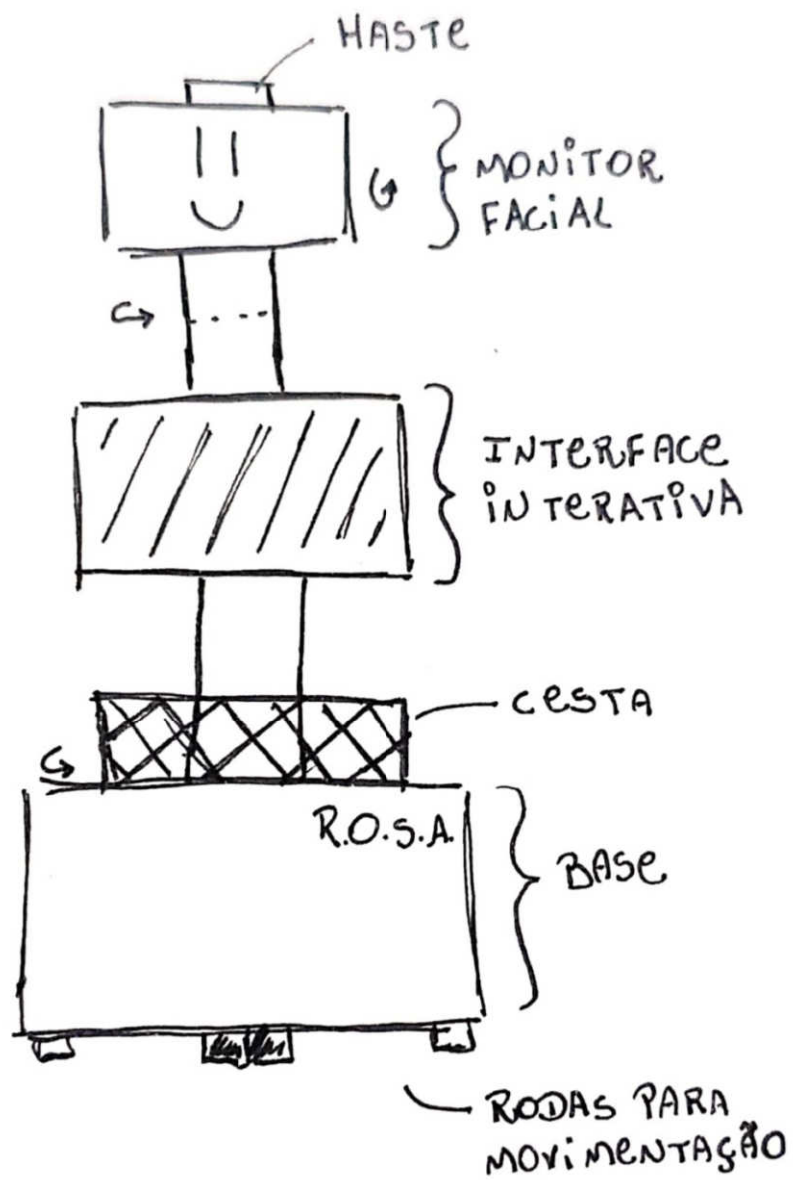


Figura 14: Primeiro esboço do ROSA.

7 Dimensionamento do Motor

Como mencionado anteriormente, para se selecionar o motor mais adequado para essa aplicação, elaborou-se um modelo de rampa, mostrado na Figura 15, de tal modo que representasse o cenário mais crítico possível de movimentação para o robô. Em uma subida de rampa, exige-se que o motor tracione toda a massa do corpo, sustentando um deslocamento a velocidade constante. Ademais, considera-se que o robô parta do repouso no início de seu movimento de subida de rampa, devendo, portanto, exercer força também para vencer a inércia.

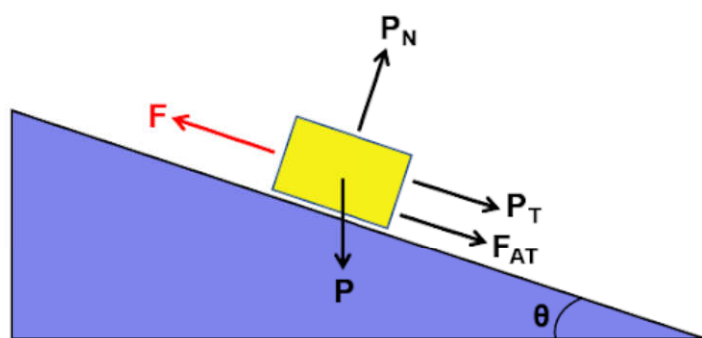


Figura 15: Modelo simplificado de esforços envolvidos na subida de rampa do robô.

Como parâmetros estimados para cálculo (Tabela 3), tem-se:

Tabela 3: Parâmetros para cálculos de estimativas iniciais.

Massa do Robô	$m = 25 \text{ kg}$
Aceleração da Gravidade	$g = 10 \text{ m/s}^2$
Velocidade de Regime	$v = 1 \text{ m/s}$

Para se ponderar qual ângulo de rampa seria considerado para os cálculos, percorreu-se o edifício do Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, buscando as rampas mais íngremes. Para as rampas situadas em possíveis caminhos percorridos pelo robô no edifício, tomaram-se as medidas de suas dimensões, de modo a se obter os ângulos correspondentes de cada uma delas, conforme ilustrado na Figura 16.



Figura 16: Obtenção prática das dimensões das rampas do edifício.

Obtiveram-se as seguintes medidas (Figura 17):

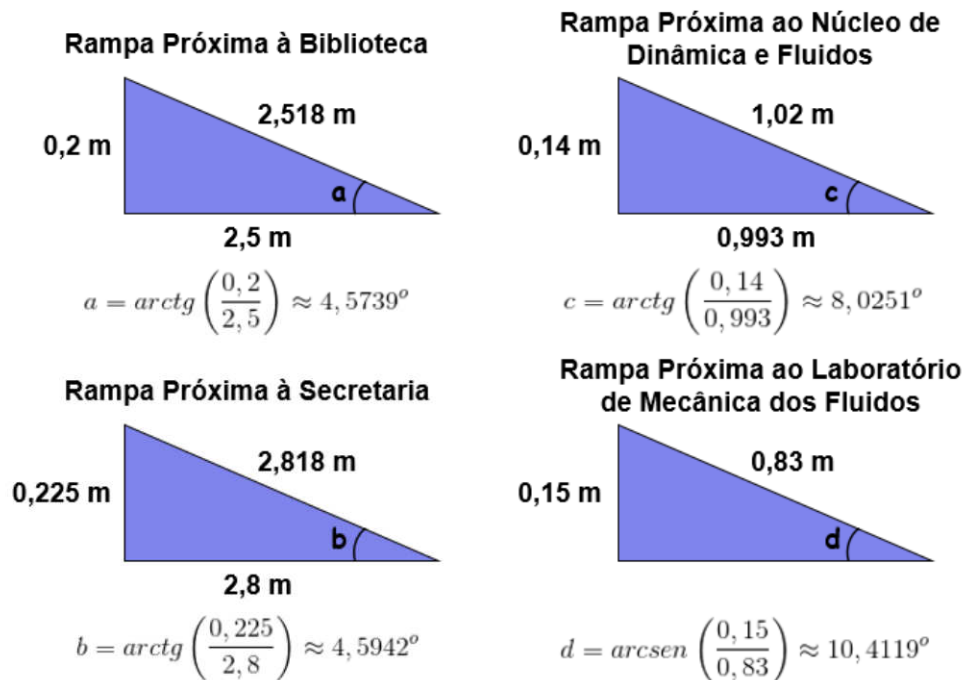


Figura 17: Medidas das rampas mais críticas.

Dos quatros ângulos encontrados, o mais crítico deles foi o referente à rampa próxima ao Laboratório de Mecânica dos Fluidos, de $10,4119^\circ$. Para aproximar os cálculos e resguardar uma margem de tolerância como segurança, adotou-se o valor de 15° para o ângulo crítico de rampa.

Prossegue-se com os cálculos:

$$P = mg = 250N \quad (1)$$

$$P_T = P \sin \theta \cong 64,7048N \quad (2)$$

$$P_N = P \cos \theta \cong 241,4815N \quad (3)$$

Nas simplificações, considerou-se uma movimentação em um instante de tempo a partir do qual a força de atrito de deslizamento deixa de existir, resultando em um movimento uniforme de rolamento puro, conforme procedimento descrito em [20]. Deste modo, desprezou-se o atrito de deslizamento nas aproximações dos cálculos, considerando somente o atrito de rolamento existente. O atrito de rolamento decorre do fato de o corpo que rola não ser perfeitamente rígido, sofrendo deformações, deslocando o ponto de aplicação da força normal para frente (diferentemente do ponto de aplicação no caso indeformado), ilustrado na prática pelo achatamento da roda, como na Figura 18.

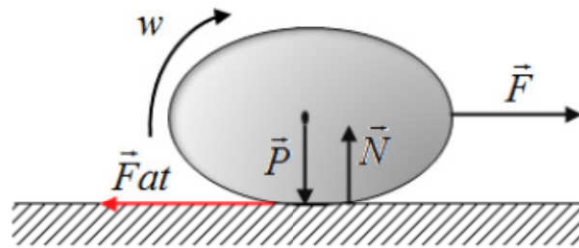


Figura 18: Forças atuando sobre um corpo deformável
[Andrade-Neto et al., 2013].

Para o cálculo da força de atrito de rolamento envolvida, é necessário estipular o valor do coeficiente de atrito de rolamento. Considera-se que o pavimento do edifício do Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo seja de concreto e que a roda de tração seja de borracha. Assume-se um piso seco e limpo.

Estabeleceu-se uma analogia entre a deformação da roda do robô e a deformação da roda de uma cadeira de rodas. Em [21], analisa-se o atrito de rolamento não linear de uma cadeira de rodas, utilizada na prática de rugby para cadeirantes, como função da velocidade. Destaca-se o gráfico obtido para o coeficiente de atrito de rolamento para três diferentes pavimentos: madeira, linóleo e carpete fino. Os resultados estão apresentados na Figura 19.

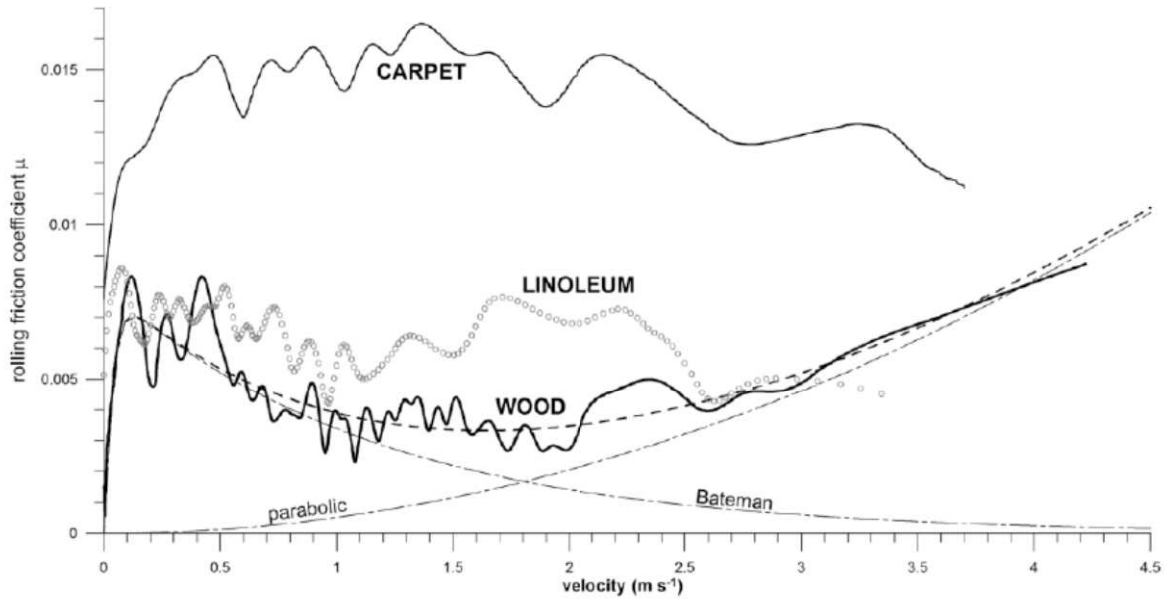


Figura 19: Coeficiente de atrito de rolamento, em função da velocidade de translação do centro de massa [Chua et al., 2010].

Para o caso do linóleo, o artigo recomenda assumir o valor constante de $\mu_R=0,0061$. As flutuações do valor não linear do coeficiente μ na Figura 19 indicam um intervalo em que o valor real está inserido, não devendo ser interpretado ponto a ponto. Isso porque só foi possível ajustar os dados obtidos na função combinada Bateman e parabólica para o pavimento de madeira.

Em seguida, consultando-se [22], verifica-se que o linóleo e o concreto apresentam características e propriedades de fricção bastante semelhantes, sob condições secas e limpas, conforme Tabela 4. Tal constatação permite aproximar o valor do coeficiente de atrito de rolamento do concreto para $\mu_R=0,0061$.

Tabela 4: Coeficientes de atrito de rolamento para concreto e para linóleo.

TABLE 1.—Relative slipperiness of floor and deck surfaces under various conditions—Continued												
Sample number	Floor or deck material		Antislip coefficient									
			Leather heel					Rubber heel				
	Type and description	Surface *	Dry and clean	Dry and dirty	Wet and clean	Wet and dirty	Wet and soapy	Dry and clean	Dry and dirty	Wet and clean	Wet and dirty	Wet and soapy
CONCRETE												
35	Iron borings, 1 lb/ft ² a b	Ground	0.44	0.55	0.18	0.22	0.15	0.73	0.55	0.58	0.47	0.47
LINOLEUM												
87	Battleship, brown, ½ in.	Original	0.43	0.40	0.19	0.22	0.16	0.80	0.44	0.18	0.18	0.16
87	do.	Ground	.43	.44	.34	.29	.25	.78	.47	.40	.33	.26
88	Battleship, green, ½ in.	do.	.44	.47	.18	.15	.11	.73	.47	.40	.29	.37
89	Marbleized, white, ½ in.	do.	.44	.44	.15	.11	.07	.62	.47	.29	.22	.26
90	Camposition tile, gray, ½ in.	do.	.44	.44	.18	.11	.11	.69	.47	.40	.33	.33

[Sigler, 1943]

Como descrito nos requisitos, será buscada uma distribuição de peso aproximadamente igual em cada uma das rodas de apoio. Com isso, estabelece-se que 2/3 da força peso estará na reação normal das rodas motoras, para efeitos de simplificação de cálculo. A força de atrito de rolamento na rampa resulta em:

$$F_{at_{rolrampa}} = \mu_R * N = \mu_R * \frac{2}{3} * P_N = 0,0061 * \frac{2}{3} * 241,4815 \cong 0,982N \quad (4)$$

A potência decorrente da força de atrito de rolamento na rampa, pode ser calculada da seguinte maneira:

$$Pot_{at_{rolrampa}} = F_{at_{rolrampa}} * v = 0,982 * 1 \cong 1W \quad (5)$$

A potência decorrente da componente tangencial da força peso na rampa, por sua vez, pode ser calculada da seguinte maneira:

$$Pot_{P_{tangencial}} = P_T * v = 64,7048 * 1 \cong 65W \quad (6)$$

Estima-se uma aceleração inicial, referente à transição entre o repouso e a velocidade de regime, superando a inércia. Para se alcançar a velocidade de regime de 1 m/s em 2s, seria necessária uma aceleração inicial de 0,5 m/s². A fim de se determinar a potência despendida nessa transição, calcula-se a energia cinética adquirida ao final desse processo:

$$E_{cin_{inercia}} = \frac{m * v^2}{2} = \frac{25 * 1^2}{2} = 12,5J \quad (7)$$

$$Pot_{inercial} = \frac{E_{cin_{inercial}}}{\Delta t} = \frac{12,5}{2} = 6,25W \quad (8)$$

Assim, exigiria-se que o motor impusesse uma potência mínima de

$$Pot_{total} = Pot_{at_{rolrampa}} + Pot_{P_{tangencial}} + Pot_{inercial} \quad (9)$$

$$Pot_{total} = 1 + 65 + 6,25 = 72,25W \quad (10)$$

Ao final, encontrou-se a potência necessária para subir a rampa com a maior inclinação. Reiterando que na escolha do motor foi estabelecido um coeficiente de segurança de 2, no total seria necessária uma potência de 144,5W no sistema. Como serão utilizadas duas rodas tracionadas, buscam-se dois motores com parâmetro mínimo, para os requisitos determinados, de 72,25W cada.

Houve a necessidade de se elencar as características de operação do motor, de modo a estabelecer critérios para a sua seleção. Quanto ao controle de posição, a finalidade do robô não exige precisão minuciosa de movimentação. Quanto à alimentação, se dará em Corrente Contínua (CC ou DC), por meio de bateria, já que se trata de um robô móvel, o qual não estaria ligado na alimentação da rede elétrica. Quanto à potência fornecida, priorizam-se torques elevados a velocidades de rotação baixas, para as situações de arranque (sair da condição inercial de repouso), de parada e de inversão rápida de direção. Por fim, seria conveniente que fosse possível obter esses torques elevados a velocidades de rotação baixas prescindindo do desenvolvimento de uma redução, o que tornaria o projeto mais complexo e mais custoso.

Inicia-se a comparação para os motores possíveis entre aqueles sem escovas (brushless) e aqueles com escovas. De acordo com a Tabela 5, retirada de [23], verifica-se que motores brushless apresentam como vantagens possuírem comutadores eletrônicos, demandarem manutenções mínimas (dispensando verificações periódicas), apresentarem altas confiabilidade e densidade de potência (relação potência-volume) e melhor dissipação de calor. Comutadores eletrônicos presentes nos motores brushless são mais vantajosos do que os comutadores mecânicos presentes nos motores com escovas, porque os comutadores mecânicos geram desgaste (decorrente do atrito de fricção), exigem mais manutenções, diminuem a vida útil e reduzem a eficiência energética.

Como desvantagem, os motores brushless apresentam um controle de velocidade mais complexo, requerendo conversores estáticos, o que pode ser facilmente contornado com a implementação de um inversor de frequência (conversor AC/DC). Por essas razões evidenciadas, optou-se por um motor brushless.

Tabela 5: Comparação entre um motor CC com escovas e com ímãs e um motor BLDC (Brushless DC).

	motor CC com escova/ímã	Brushless DC
Comutador	Mecânico	Eletrônico
Manutenção	Periódica	Mínima
Confiabilidade	Pequena	Alta
Momento de Inércia	Alto	Pode ser minimizado
Densidade de Potência	Média	Alta
Dissipação de Calor	“Pobre” (armadura no rotor)	Boa (enrol armadura no estator)
Controle de Velocidade	Simples	Requer conversores estáticos

[Pinheiro, 2013]

Por outro lado, ainda de acordo com [23], pode-se comparar a principal diferença entre motores AC (alimentados por Corrente Alternada) que consiste basicamente em ser síncrono ou assíncrono. A distinção reside no fato de a velocidade de rotação mecânica, em estado estacionário, estar estritamente alinhada (síncrona) ou não com a frequência de rotação do campo magnético do estator. Em motores assíncronos, a presença de correntes induzidas no rotor é necessária para gerar torque, enquanto em motores síncronos não é necessária (sendo, inclusive, indesejável). Em motores síncronos, o campo magnético do rotor está geometricamente ligado à posição mecânica do rotor em si e pode ser gerado por ímãs permanentes.

Sendo assim, também em [23], constata-se justamente que motores síncronos de ímã permanente brushless apresentam maiores densidade de potência e eficiência quando comparados a motores de indução assíncronos do tipo gaiola de esquilo. Além disso, existe uma nuance na classificação de motores síncronos de ímãs permanentes brushless (MSIPB), de acordo com a forma de onda de sua força contra-eletromotriz. Os MSIPB que geram excitação senoidal são conhecidos como brushless AC e os MSIPB que geram excitação trapezoidal são conhecidos como brushless DC.

Em resumo, optou-se nesse trabalho pela escolha de um motor síncrono de ímãs permanentes sem escovas de excitação senoidal, logo, denominado brushless AC, o qual demandará a presença de um inversor de frequência (conversor AC/DC). Novamente como muito bem esclarecido por [23], esses motores apresentam maior densidade de potência (relação potência-volume), maior eficiência, menor complexidade de implementação do controle, menor periodicidade de manutenção e menos ruídos, quando comparados ao motores de corrente contínua comumente empregados.

Dentre os motores disponíveis no mercado, selecionou-se o motor brushless AC trifásico síncrono de ímãs permanentes existente em hoverboards. Trata-se de um motor com tensão de 36V e com potência de 350W, já acoplado a uma roda de 6,5" (ou 165,1 mm) de diâmetro. Com a roda já acoplada ao motor, não se precisa desenvolver um acoplamento mecânico de conexão entre os dois componentes, bem como minimiza-se o número de fixações necessárias na base. O tamanho da roda é compatível com a altura desejável da base do robô ao solo. Essa estrutura conjunta pronta otimiza o desenvolvimento do robô, prevenindo o desenvolvimento de acoplamentos com possíveis desalinhamentos na fixação do motor com a roda e até entre a própria dupla de dois conjuntos de motor e roda usada para tracionar o robô. Há potência suficiente para atender aos requisitos delimitados, caracterizando-se justamente por fornecer torques elevados a velocidades de rotação baixas. Por fim, igualmente relevante é o custo baixo desse componente.

8 Autonomia da Bateria

Dentre os requisitos propostos, deve-se analisar se determinada escolha de bateria para alimentar o sistema de movimentação atenderia à autonomia sugerida. Deseja-se que o robô opere durante o período de um dia, em horário útil de atividades no prédio do Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ininterruptamente, isto é, sem a necessidade de cessar seus atendimentos para ser recarregado.

Supondo-se que um dia útil de atividades no prédio tenha por volta de 12h, das 07h às 19h, baliza-se esse parâmetro como o mínimo desejável. A recarga se daria no período noturno, entre um dia e outro.

De início, elabora-se uma jornada de circulação esperada para o período de 1h de operação do ROSA. A jornada sugerida inicialmente poderia prever duas idas à Secretaria do Departamento de Engenharia Mecatrônica, uma ida à lanchonete e três idas às salas de aula. Serão considerados os deslocamentos tanto de ida, quanto de volta. Para estimar as distâncias entre a entrada do edifício e cada um dos destinos mencionados, recorre-se à uma imagem de satélite da planta das instalações e aproximam-se as distâncias a partir da escala do mapa, conforme ilustrado na Figura 20. Os valores encontrados para as distâncias constam na Tabela 6.

Tabela 6: Estimativas para as distâncias entre a entrada e os destinos.

Destino	Distância Aproximada
Secretaria da Mecatrônica	111,82m
Lanchonete	167,27m
Salas de Aula	107,27m

Computando-se os trajetos em ida e volta, o número de vezes especificado anteriormente, chega-se a uma distância de 1425,44 m no período de 1h. Lembrando que a velocidade média do robô em operação seria de 1 m/s, a distância levaria 1425,44 s (= 23,76 min) para ser percorrida.

Com isso, chega-se à estimativa de duty cycle:

$$DutyCycle = \frac{t_{operando}}{t_{total}} = \frac{1425,44}{3600} \cong 39,6\% \quad (11)$$



Figura 20: Trajetórias e destinos aproximados para a jornada de operação do robô [CNES/Airbus, Maxar Technologies, 2020].

Novamente reiterando que será buscada uma distribuição de peso aproximadamente igual em cada uma das rodas de apoio, como descrito nos requisitos, considera-se que 2/3 da força peso estará na reação normal das rodas motoras, para efeitos de simplificação de cálculo. A força de atrito de rolamento na reta resulta em:

$$F_{at_{rol_{reta}}} = \mu_R * N = \mu_R * \frac{2}{3} * P = 0,0061 * \frac{2}{3} * 250 \cong 1,017N \quad (12)$$

A potência decorrente da força de atrito de rolamento na reta pode ser calculada da seguinte maneira:

$$Pot_{at_{rol_{reta}}} = F_{at_{rol_{reta}}} * v = 1,017 * 1 \cong 1W \quad (13)$$

Detalhando cada um dos trechos de consumo energético, para cada um dos trajetos percorridos, chega-se à energia total consumida no período de 1h, conforme descrito na Tabela 7. Para todas as potências elencadas, calcula-se já considerando o coeficiente de segurança $S=2$.

Para o trecho de rampa, considera-se a potência para manter a resultante de forças nula, cancelando a força peso tangencial e a força de atrito de rolamento, em sentido contrário ao do movimento, como a seguir:

$$Pot_{rampa} = S * (Pot_{P_{tangencial}} + Pot_{at_{rol,reta}}) = 2 * (65 + 1) = 132W \quad (14)$$

Para o cálculo do tempo despendido na rampa, verificou-se a distância total percorrida nas rampas próximas à secretaria e à biblioteca (Figura 17), para duas viagens de ida e volta, depois dividiu-se pela velocidade de 1 m/s, obtendo-se o tempo correspondente.

$$d_{rampa} = 4 * (d_{rampa_{secretaria}} + d_{rampa_{biblioteca}}) = 4 * (2,818 + 2,518) = 21,34m \quad (15)$$

O tempo inercial total despendido nas acelerações e nas desacelerações de todos os deslocamentos, corresponde ao tempo estipulado inicialmente de 2s multiplicado pelo número total de paradas e retomadas de cada trajeto, tanto na ida, quanto na volta.

O cálculo do tempo despendido na reta, por sua vez, é o total calculado anteriormente subtraído pelos tempos inercial e despendido na rampa.

$$t_{reta} = t_{total} - t_{rampa} - t_{inercial} = 1425,44 - 21,34 - 48 = 1356,1s \quad (16)$$

Tabela 7: Energias consumidas de acordo com os trechos de consumo correspondentes.

Trecho de Consumo	Potência [W]	Tempo [s]	Energia Consumida [J]
Rampa	132	21,34	2816,88
Inercial	12,5	48	600
Reta	2	1356,1	2712,2
Total	146,5	1425,44	6129,08

A partir do valor de energia total consumida para cada 1h de operação do robô (6129,08 J), sabe-se que a bateria será descarregada a essa taxa de energia por hora. Obtém-se, portanto, a característica de descarga em potência da bateria.

$$Descarga_{bateria} = \frac{Energia_{consumida}}{1h} = \frac{6129,08J}{3600s} \cong 1,703W \quad (17)$$

O valor acima valeria para o caso de um rendimento de 100%.

Contudo, conforme descrito em [24], motores brushless AC trifásicos síncronos de ímãs permanentes precisam ser supridos por um inversor de frequência variável (conversor AC/DC) capaz de configurar a velocidade de rotação do rotor sincronamente ao campo magnético gerado pelo estator. Ao dar partida no motor, o rotor tem velocidade nula e não pode passar instantaneamente à velocidade síncrona correspondente ao campo magnético do estator, devido à sua alta inércia. Por essa razão, o inversor de frequência é necessário para elevar gradualmente a velocidade de zero à velocidade síncrona. Mais adiante, experimentalmente, determina-se que para condições de operação próximas às do ROSA, esses motores AC síncronos performam com eficiência de cerca de 86,5%.

Para tal rendimento mencionado acima, a característica de descarga em potência da bateria seria de 1,97 W.

Dentre as principais opções de tipos de baterias possíveis a serem aplicadas, constavam a de íon-lítio e a de chumbo-ácido. Segundo [25], baterias de íon-lítio apresentam ciclo de vida maior, energia específica maior em Wh/kg e boa aceitação de carga dinâmica, embora apresentem alto custo por energia em kWh e reciclagem complexa. Ainda segundo [25], baterias de chumbo-ácido são de baixo custo, simples de serem fabricadas, apresentam baixo custo por energia em kWh, baixa autodescarga (a menor dentre as baterias recarregáveis), alta potência específica (capaz de suportar altas correntes de descarga), embora apresentem baixa energia específica em Wh/kg, tempo maior para carregamento completamente saturado e menor ciclo de vida.

Ilustraram-se as aplicações no gráfico comparativo da Figura 21.

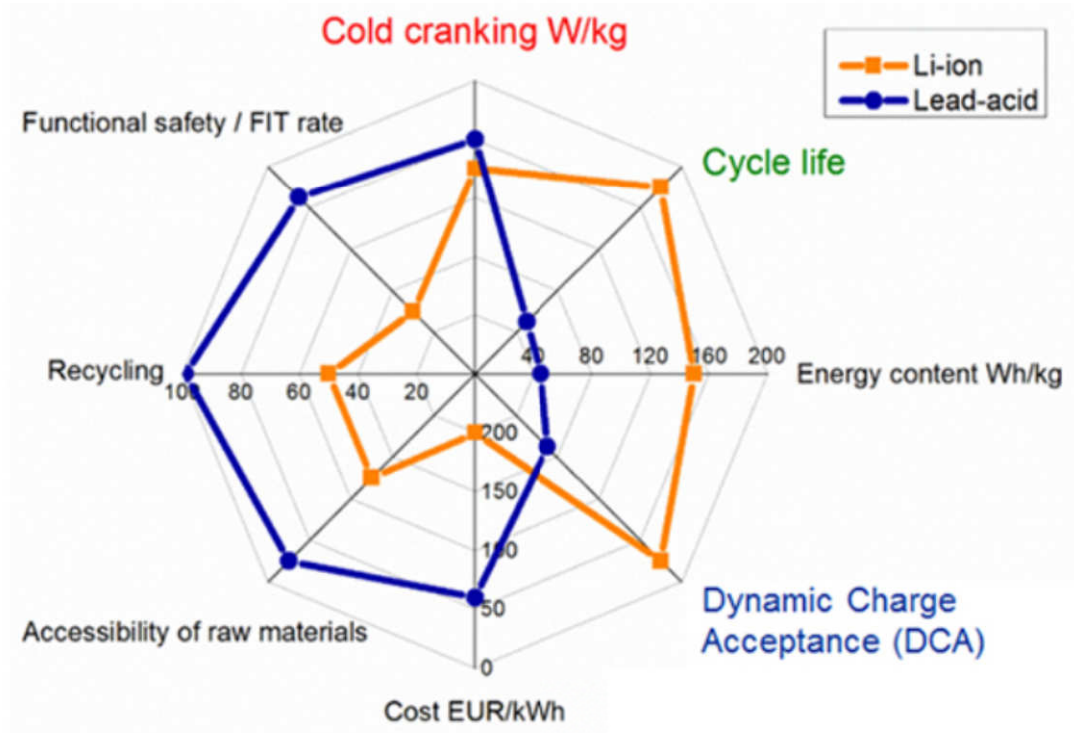


Figura 21: Gráfico comparativo entre baterias de íon-lítio e de chumbo-ácido [Buchmann, 2016].

Sendo assim, optou-se por utilizar baterias de chumbo-ácido, principalmente devido ao baixo custo por energia e à baixa energia específica em Wh/kg (o que significa mais massa a ser concentrada na parte inferior do robô, deslocando o centro de massa para baixo).

Dado que o motor escolhido tem tensão de operação de 36V, optou-se por uma configuração com três baterias de 12V em série, cada uma com capacidade de 7Ah de carga. Como consta em [26], “as baterias ditas 12V, por exemplo, devem operar de 13,8V (tensão a carga plena), até 10,5V (tensão de corte), quando 100% de sua capacidade terá sido utilizada, e é este o tempo que deve ser medido como autonomia da bateria”.

Para cada uma das três baterias de 12V em série corresponderia 1/3 da potência total a ser descarregada pelo sistema.

$$Pot_{descarregada_{p/bateria}} = \frac{1}{3} * 1,97 \cong 0,66W \quad (18)$$

Sendo assim, consultando o datasheet [27], verifica-se que para a tensão de corte de 10,5V, com uma taxa de descarga de 0,66W para cada bateria de 12V em série, a autonomia esperada supera 20h (Tabela 8).

Tabela 8: Características de descarga em potência de uma bateria 12V 7Ah, a 25°C.

Características de descarga (W) (25 °C)

F.V / Tempo	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	1 h	2 h	3 h	5 h	8 h	10 h	20 h
9,60 V	284,5	188,6	141,3	78,04	51,67	31,14	20,82	16,98	13,97	9,195	7,964	4,270
10,0 V	277,1	184,6	139,3	77,23	50,91	30,73	20,48	16,74	13,84	9,159	7,889	4,235
10,2 V	263,5	177,3	137,5	76,56	50,53	30,46	20,31	16,58	13,76	9,090	7,787	4,126
10,5 V	240,5	170,0	130,3	75,00	49,85	30,14	20,16	16,36	13,65	9,013	7,733	4,057
10,8 V	217,0	159,1	123,1	73,22	49,20	29,92	19,92	15,81	13,58	8,974	7,615	3,894
11,1 V	191,4	148,1	115,9	71,21	48,12	28,87	19,53	15,58	13,53	8,910	7,502	3,832

Valores médios (tolerância de $\pm 2\%$)

[Intelbras, 2020]

Para precisar mais especificamente a autonomia, para além dos valores presentes na tabela 8, os dados de descarga em potência para a tensão de 10,5V foram ajustados em uma curva, utilizando como ferramenta o software Matlab, em sua aplicação de Curve Fitting Tool, como ilustrado na Figura 22. A curva aproxima-se de uma exponencial decrescente.

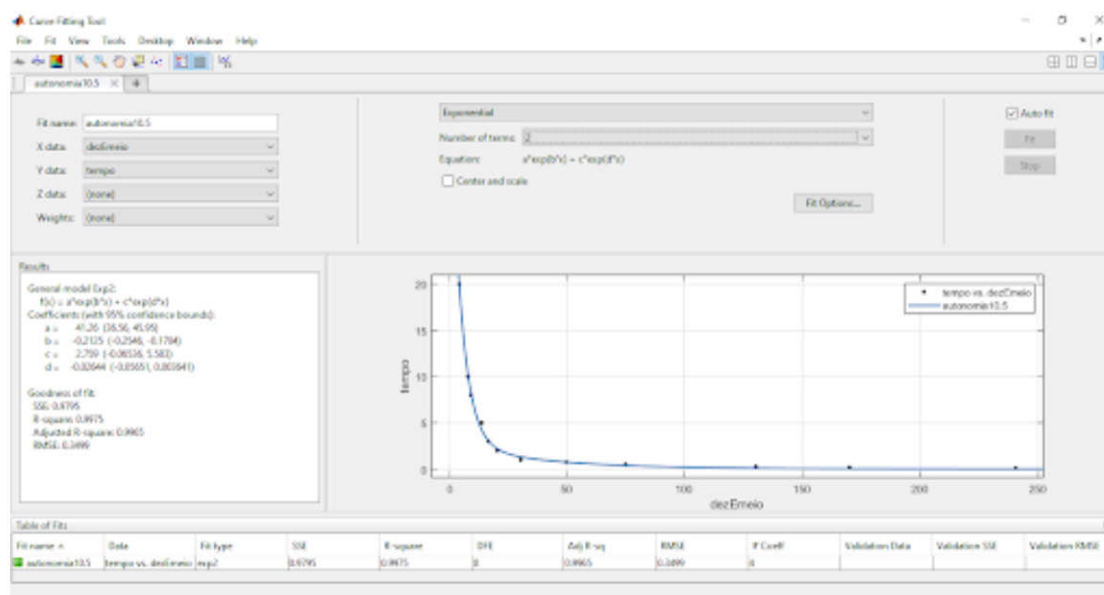


Figura 22: Ajuste da curva de descarga em potência para a tensão de 10,5V.

Para uma descarga em potência de $0,66W$, obtém-se uma autonomia de aproximadamente 40h, como apresentado na Figura 23.

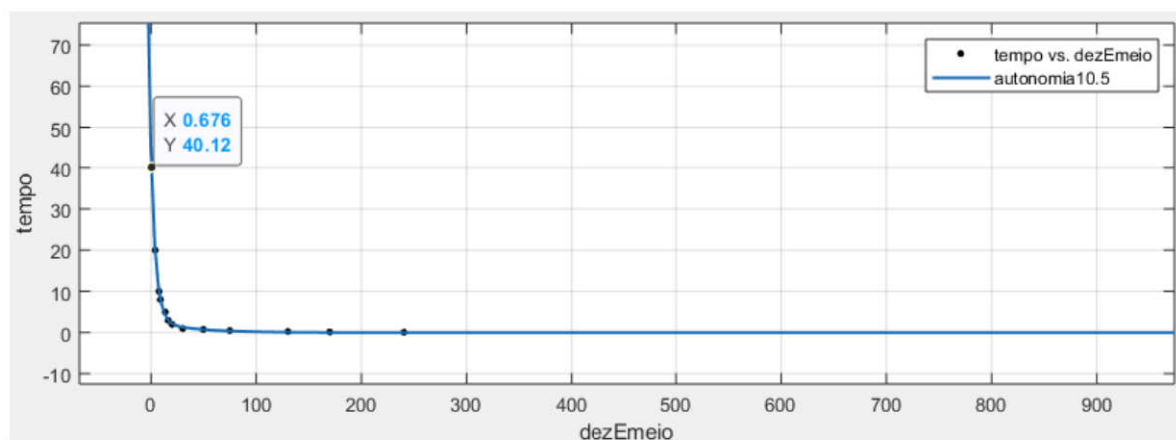


Figura 23: Tempo de autonomia da bateria, para a descarga em potência de $0,66W$.

Comprova-se, portanto, que as escolhas de operação atendem aos requisitos de autonomia. Como a autonomia supera com folga a estipulada inicialmente nos requisitos, existe margem para ampliar a massa total do robô, para aumentar a velocidade ou até para aumentar o tempo de operação por hora. Porém, é preciso lembrar que o robô já se encontra no limite máximo de massa estipulado nos requisitos, não podendo ser aumentado. Por outro lado, é interessante manter o consumo aquém do máximo possível, porque diminui a profundidade de descarga, aumentando a vida útil para aplicações cíclicas.

Retomando a autonomia mínima desejável estipulada nos requisitos, equivalente a 12h, encontra-se na curva de descarga em potência para a tensão de 10,5V qual seria a descarga em potência correspondente ao período de 12h. O valor obtido por meio do gráfico da Figura 24, de aproximadamente $6,79W$, representa justamente qual seria o máximo de descarga em potência possível para os parâmetros estipulados. A relação entre o valor efetivamente descarregado e o valor limite máximo possível de ser descarregado equivale à profundidade de descarga.

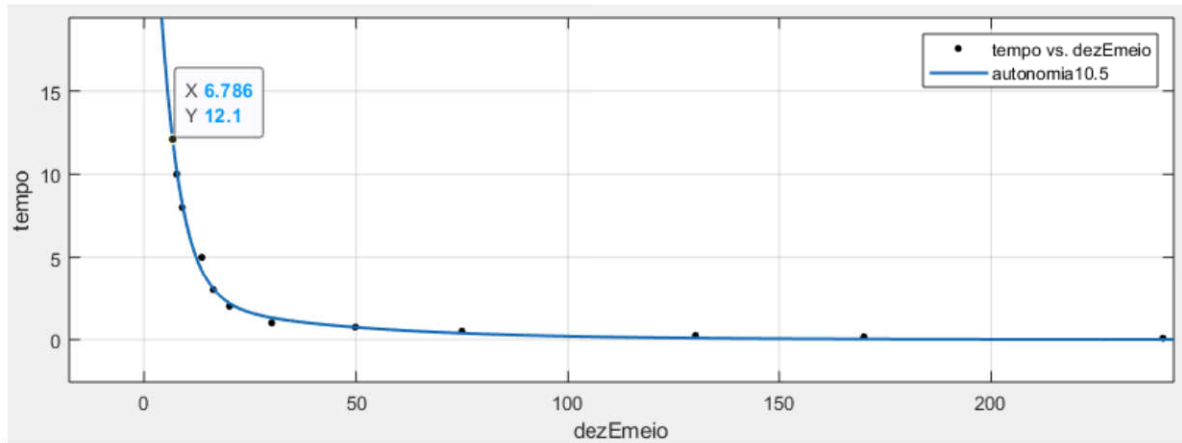


Figura 24: Descarga em potência da bateria, para o tempo de autonomia de 12h.

$$Profundidade_{descarga} = \frac{0,66}{6,79} \cong 9,72\% \quad (19)$$

Com a profundidade de descarga, consegue-se determinar mais precisamente a vida útil em serviço cíclico da bateria. Diferentes fatores podem influenciar nessa vida útil, como temperatura ambiente de operação e taxa de descarga, sendo o mais importante deles a profundidade de descarga. Na Figura 25, retirada de [26], observa-se justamente que quanto menor for a profundidade de descarga da bateria, maior será a sua vida útil. Nesse sentido, baterias de maior capacidade são mais vantajosas. Para a profundidade de descarga encontrada anteriormente de aproximadamente 10%, a vida útil chega a cerca de 2600 ciclos.

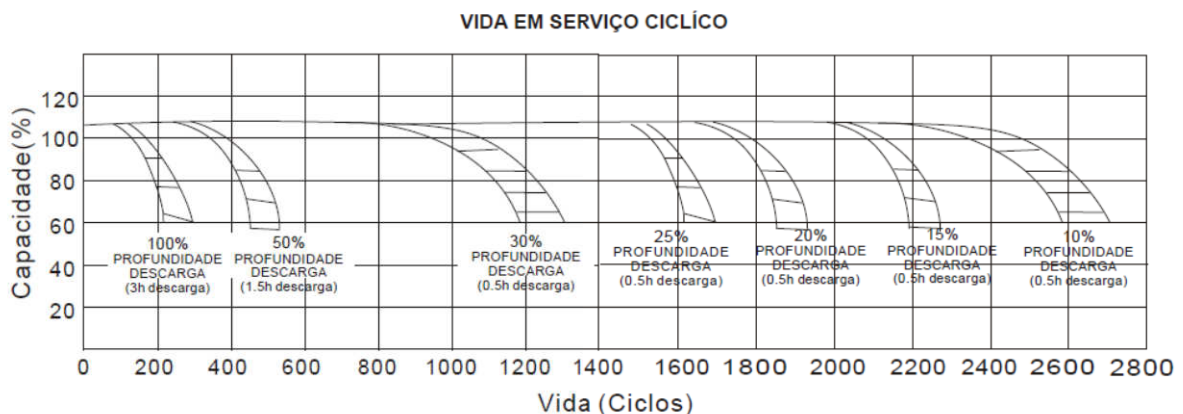


Figura 25: Vida útil para aplicações cíclicas, de acordo com a profundidade de descarga [Unipower, 2005].

9 Projeto em Software CAD

Com as análises preliminares de dimensionamento do motor e de autonomia da bateria, avaliando diversas caracterizações relacionadas à operação do robô, elabora-se o projeto em software CAD. Por meio do software Solidworks, da empresa Dassault Systèmes, em sua versão 2018, conceberam-se os principais componentes individualmente, os quais foram unidos posteriormente em uma montagem global representativa da estrutura completa, conforme ilustrado na Figura 26 com suas vistas isométrica 26a e dimétrica 26b.

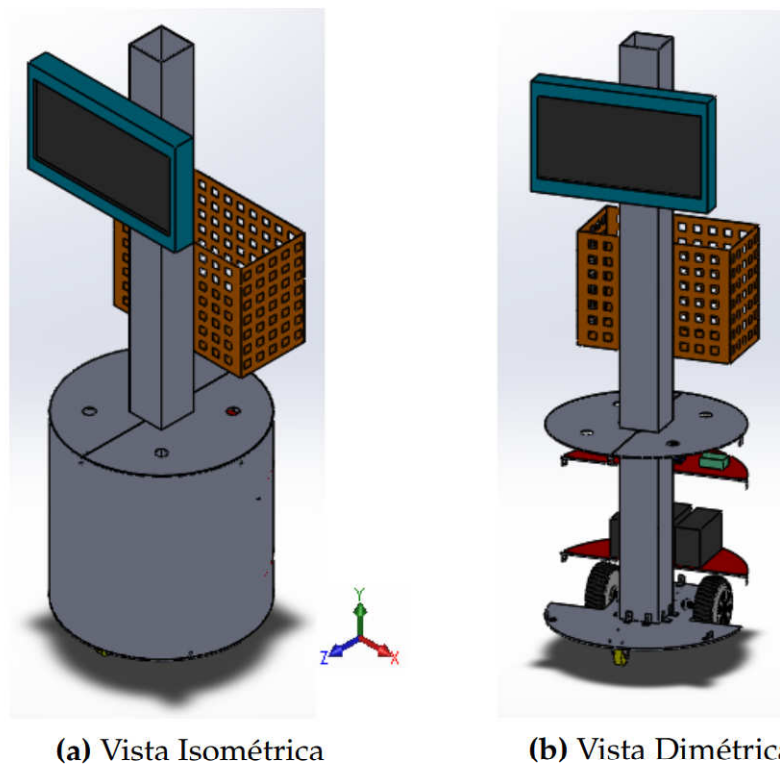


Figura 26: Representações do projeto em software CAD do robô em vistas isométrica 26a e dimétrica 26b sem a lateral da base.

De acordo com o requisito de altura, o qual estipulava 1,60m como limite máximo, por se tratar de um robô sociável, não ultrapassando a média de altura das brasileiras, projetou-se o protótipo com altura do chão ao extremo mais alto de 1571,07mm. Buscou-se ampliar a aceitação na interação homem-máquina, minimizando a eventual aversão causada pela comunicação com um robô maior que o usuário. Sendo assim, o requisito de altura foi contemplado.

Em seguida, respeitando-se o requisito de massa, o qual estipulava 25kg como valor desejável, visando a fabricação de um robô carregável e que atenda às regulamentações dos Artigos 198 e 390 de [18], obteve-se um protótipo com massa de aproximadamente 25,47kg. Desse modo, o requisito de massa também foi contemplado. Para essa estimativa, foram consideradas as massas dos principais componentes, apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Principais componentes considerados nos cálculos de massa total e de posição do centro de massa nos eixos y e z.

Componente	Material	Massa [kg]	Quantidade
Motor	-	2,27	2
Monitor LG de 19,5"	-	2,2	1
Suporte do Monitor	-	1	1
Bateria	-	2	3
Base	Alumínio 6063 T5	1,64	1
Tampa	Acrílico	0,32	2
Lateral	Alumínio 6063 T5	3,17	1
Coluna	Alumínio 6063 T5	4,01	1
Cesto	Polipropileno	0,64	1
Prateleira	Alumínio 6063 T5	0,78	2
Rodízio Maior	Polipropileno	0,05	1
Rodízio Menor	Polipropileno	0,02	1

No cálculo das massas de cada componente, consideraram-se as densidades contidas na Tabela 10:

Tabela 10: Densidades dos materiais dos principais componentes considerados.

Material	Densidade [kg/m ³]
Alumínio 6063 T5	2700
Acrílico	1180
Polipropileno	895

Para as posições alocadas de cada componente dentro da montagem global e suas respectivas massas, encontrou-se o centro de massa da estrutura como um todo posicionado nas coordenadas $(x_G; y_G; z_G) \cong (0; 468,79; -40,98)$ [mm]. Como evidenciado na Figura 26, o eixo x corresponde ao direcionamento para a lateral esquerda do robô em sentido transversal, o eixo y corresponde ao vertical direcionado para cima com origem no chão e no centro do círculo da base e o eixo z corresponde ao direcionamento para frente do robô em sentido longitudinal. Dadas essas coordenadas $(x_G; y_G; z_G)$ encontradas, localiza-se o centro de massa logo acima da prateleira superior e mais ao centro da face posterior interior da coluna, o que indica que o centro de massa foi deslocado para o terço inferior da altura do robô, favorecendo o equilíbrio dinâmico de movimentações. Entende-se mais claramente esse posicionamento a partir da Figura 27a. Ressalta-se que a coordenada x do centro de massa é nula, dada a simetria no plano frontal, como representado na Figura 27b.

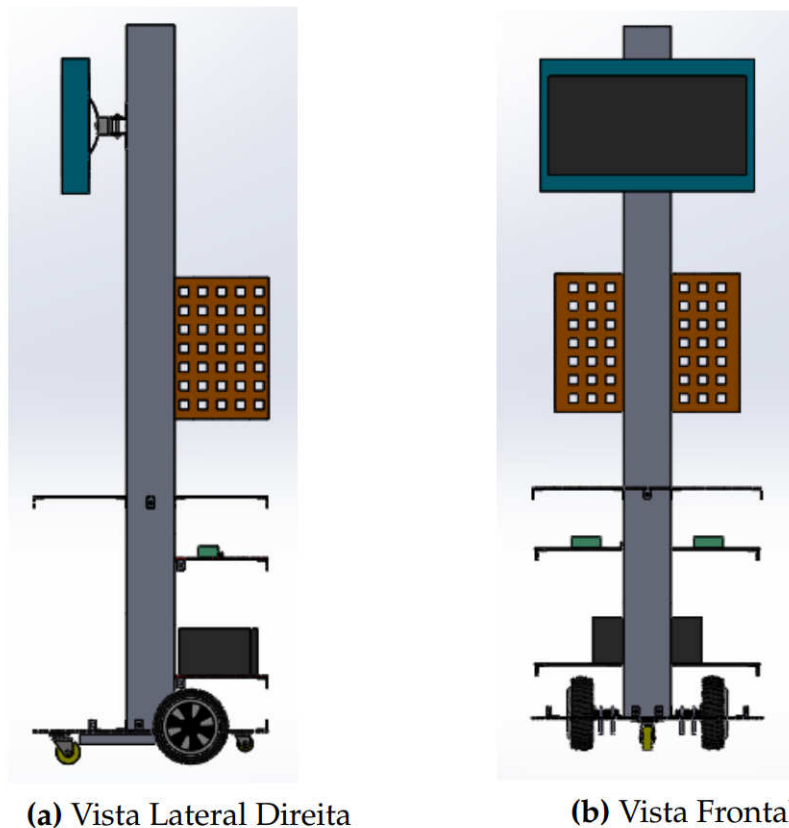


Figura 27: Representações do projeto em software CAD do robô em vistas lateral direita 27a e frontal 27b sem a lateral da base.

Em uma base de 500mm de diâmetro, com 4mm de espessura, fixam-se sobre ela os eixos dos dois motores com duas abraçadeiras tipo U vergalhão para cada eixo (com bitola de 3/4" e diâmetro da rosca de 1/4"). Sob a base, fixam-se dois rodízios (duas rodas de apoio), sendo um deles maior e posicionado na parte frontal, enquanto o outro deles menor e posicionado na parte traseira. Somente o rodízio maior da dianteira é apoiado no chão. O rodízio menor da traseira está presente para evitar tombamentos para trás, no caso de acelerações acentuadas. O rodízio maior tem altura de 65mm, diâmetro da roda de 50mm e capacidade de carga de 40kg, sendo o modelo GLAP 210 BP da marca Schioppa, enquanto o menor tem altura de 40mm, diâmetro da roda de 32mm e capacidade de carga de 25kg, sendo o modelo 5629 ME12 ZI da marca Aliança.

Procurou-se delinear a base de maneira a manter as duas rodas motoras inteiramente dentro do diâmetro, o que as protegeria de contatos laterais externos que pudessem soltá-las ou desalinhá-las, considerando-se que não há nada que as prenda na direção longitudinal dos eixos dos motores, uma vez que esforços nessa direção não estão previstos para as condições de operação do robô.

Dado que toda a massa sobre a base estaria apoiada sobre ela, calculam-se os esforços de flexão e acrescentam-se cantoneiras em sua face inferior, como reforços estruturais. O par de cantoneiras de alumínio adicionado tem abas iguais de largura de 1", espessura de 3/16" e comprimento de 30cm. Os detalhamentos podem ser melhor ilustrados pela Figura 28.

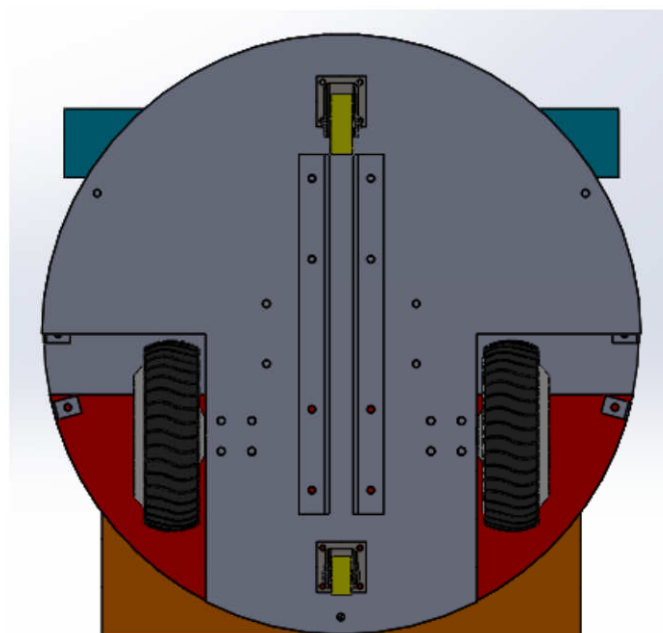


Figura 28: Representação do projeto em software CAD do robô em vista inferior.

A haste de sustentação do corpo do robô, referida como coluna, servirá como tronco, sustentando em seu topo um monitor de LED LCD de 19,5" de modelo 20M37AA da marca LG, permitindo um conforto visual de interação com o usuário, tanto pelo tamanho do monitor quanto pela altura em que se encontra. A tela de comunicação do robô expõe a face do robô desenvolvida computacionalmente, expressando emoções mimetizadas, objetivando gerar empatia e aproximação com o interlocutor.

A coluna é um tubo quadrado de 4" de aresta externa, espessura de 2,5mm e comprimento de 1,5m. É presa à base em posição vertical perpendicular, por meio de oito cantoneiras, duas em cada face da coluna. Em geral, buscou-se priorizar fixações aparafusadas, evitando soldas que pudessem desalinhar a estrutura.

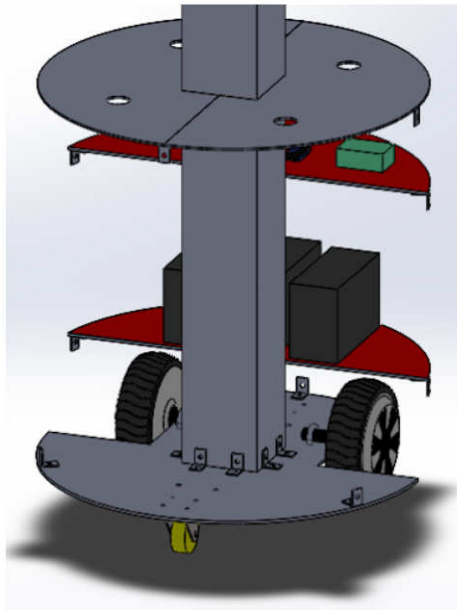
Como em sua outra extremidade livre acima está preso o monitor, existe um braço de momento que desencadearia desestabilidades sob quaisquer ruídos de movimentação, vibrações indesejadas ou acelerações e desacelerações bruscas.

A face lateral do robô, a qual recobre os componentes internos acima da base e abaixo das tampas, tem 500mm de altura e 1,5mm de espessura. Para adquirir o formato circular, acompanhando a circunferência do diâmetro de 500mm da base, poderia ser trabalhada uma chapa de 1,5mm de espessura por meio do processo de conformação de calandragem.

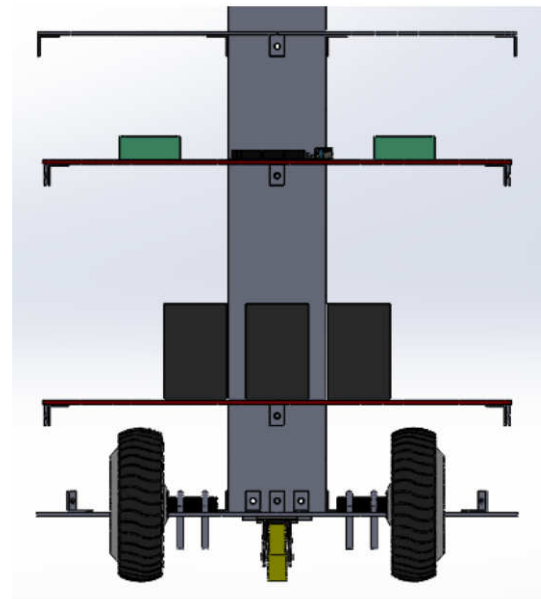
Encerrando o volume inferior de armazenamento dos componentes mecânicos e eletrônicos, há um par de tampas, em formato de semicírculo, as quais quando reunidas sobrepondo o conjunto formam o círculo que encerra a face superior do cilindro da lateral. O círculo do conjunto dos semicírculos está furado em seu centro por um quadrado de aresta de 4", justamente representando por onde passará a coluna. A proposta de separar a tampa em duas metades decorreu do fato de facilitar a desmontagem do robô, acessando o interior do cilindro, onde estão os componentes mecânicos e eletrônicos, nos quais seria necessária manutenção. Cada tampa possui dois furos, por meio dos quais seria possível encaixar os dedos para removê-la. A fabricação das tampas em acrílico transparente de 3mm de espessura tem por finalidade reduzir massa e exibir os componentes internos de maneira mais atrativa. Nada será apoiado sobre elas, logo não haverá esforços de flexão. Por fim, as tampas estão simplesmente apoiadas sobre oito cantoneiras presas internamente tanto na coluna (uma em cada face), quanto na lateral (espaçadas em 90°).

Internamente ao cilindro da lateral, dispõem-se os componentes eletrônicos em prateleiras. Em uma prateleira inferior, posicionam-se as três baterias, justamente de modo a baixar o centro de massa, estabilizando dinamicamente o robô. Em uma prateleira superior, posicionam-se o microcontrolador e os inversores de frequência correspondentes a cada motor.

Maiores detalhes podem ser conferidos na Figura 29.



(a) Base em Vista Dimétrica



(b) Base em Vista Posterior

Figura 29: Representação de detalhe da base do projeto em software CAD do robô em vista dimétrica 29a e traseira 29b, sem a lateral da base.

Por fim, um cesto é posicionado na face posterior da coluna, remetendo simpaticamente a uma mochila de costas, no qual poderiam ser transportados pequenos objetos de pouca massa, como equipamentos eletrônicos ou documentos, entre salas de aula e secretaria, para auxiliar professores e alunos em períodos de aula. Seria composto de material pouco denso, como o polipropileno.

10 Altura Máxima do Rodízio Traseiro

No projeto dos posicionamentos dos rodízios na base, é possível que ao ingressar em rampas mais íngremes o rodízio menor da traseira toque o solo, configurando um apoio que, em conjunto com o segundo apoio do rodízio maior da dianteira, ergueria as rodas motoras, as quais perderiam o contato com o solo. Nessa circunstância, seria removida justamente a fonte de tração da movimentação, de modo que o robô deixaria de se movimentar, permanecendo preso.

Procurando evitar essa configuração, garante-se que o rodízio traseiro tenha uma altura máxima h , como ilustrado na Figura 30.

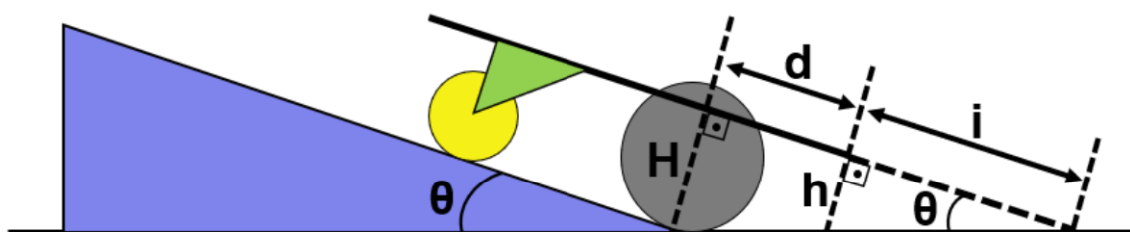


Figura 30: Configuração em que o rodízio menor da traseira toca o solo.

Com H e d obtidos pelo software CAD e θ sendo considerado o ângulo mais crítico encontrado na Figura 17, tem-se os dados da Tabela 11.

Tabela 11: Variáveis para o cálculo da altura máxima possível do rodízio traseiro.

Variável	Valor
θ	10,4119°
H	67,07mm
d	128,5mm

Inicia-se pelo cálculo da tangente de θ :

$$\tan \theta = \frac{H}{d + i} \quad (20)$$

$$i = \frac{H}{\tan \theta} - d = \frac{67,07}{\tan(10,4119^\circ)} - 128,5 \cong 236,5087\text{mm} \quad (21)$$

Em seguida, calcula-se a tangente de θ novamente, para o triângulo menor:

$$\tan \theta = \frac{h}{i} \quad (22)$$

$$h = i * \tan \theta = 236,5087 * \tan(10,4119^\circ) \cong 43,4582mm \quad (23)$$

Desse modo, confirma-se que para o rodízio menor selecionado, de 40mm de altura, resguarda-se a condição de altura máxima para que não toque o solo ao ingressar na rampa mais crítica possível encontrada, evitando que as rodas motoras percam contato com o solo e que, por conseguinte, o robô fique preso.

11 Parafusos de Sustentação do Monitor na Coluna

O monitor posicionado no topo da coluna é encaixado em um suporte, o qual é aparafusado na coluna. Serão utilizados parafusos auto atarraxantes de fenda phillips de aço inoxidável AISI 304, os quais serão rosqueados em furos abertos na coluna. Sendo assim, deve-se verificar se os parafusos resistem a esforços de cisalhamento e se a coluna resiste a esforços de arrancamento. As dimensões iniciais consideradas para cálculo constam na Figura 31.

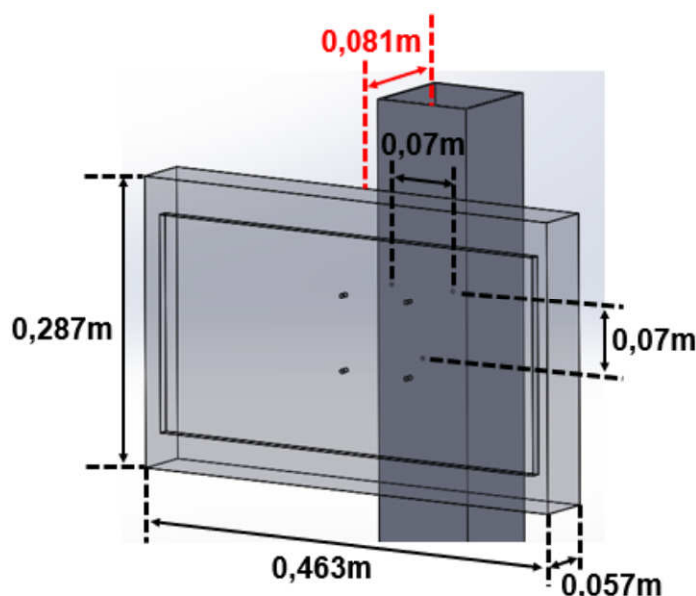


Figura 31: Dimensões do monitor, das distâncias entre furos na coluna e da distância entre a face frontal da coluna e a face posterior do monitor (em vermelho).

O parafuso escolhido [28] está ilustrado na Figura 32.

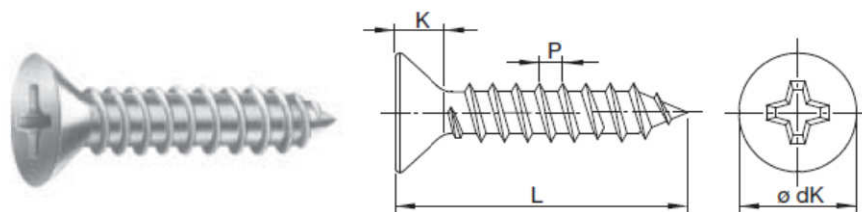


Figura 32: Parafuso auto atarraxante de fenda phillips de aço para fixação do monitor [Ciser, 2020].

As dimensões selecionadas estão resumidas na Tabela 12.

Tabela 12: Variáveis dimensionais do parafuso selecionado.

Variável	Dimensão [mm]
d	4,2 (número 8)
P	1,4
$\Phi d K_{MIN}$	7,74
$\Phi d K_{MAX}$	8,1
K	2,5
L	9,5

Dados os esforços aplicados pelo monitor (de massa igual a 2,2 kg) e pelo suporte do monitor (de massa igual a 1,0 kg), buscam-se as reações na extremidade A, correspondente à parede da coluna (Figura 33).

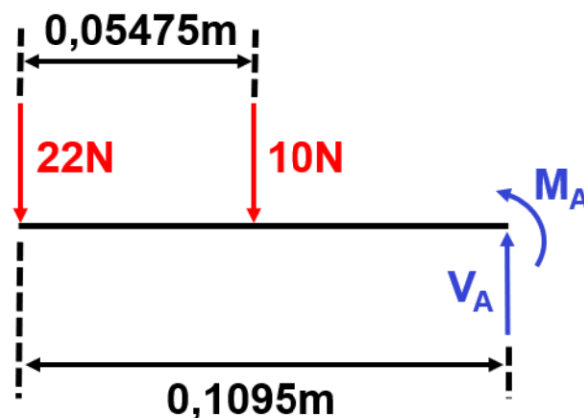


Figura 33: Reações na extremidade A, decorrentes dos esforços aplicados pelo monitor e pelo suporte do monitor.

Com isso, chega-se aos seguintes resultados:

$$V_A = 32N \quad (24)$$

$$M_A = -10 * 0,05475 - 22 * 0,1095 = -2,9565Nm \quad (25)$$

Arrancamento:

O esforço de arrancamento está melhor ilustrado na Figura 34.

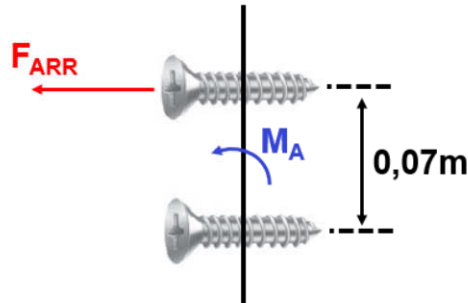


Figura 34: Esforço de arrancamento nos parafusos de fixação superiores.

Obtendo-se, portanto, a seguinte força de arrancamento:

$$F_{ARR} = \frac{-M_A}{0,07} = \frac{-(-2,9565)}{0,07} = 42,2357N \quad (26)$$

De [29], extrai-se a equação 27, para cálculo da rigidez do membro k_m , o qual, nesse caso, corresponde à coluna.

$$\frac{k_m}{E * d} = A * \exp\left(\frac{B * d}{l}\right) \quad (27)$$

Os parâmetros A_{Al} , B_{Al} e E_{Al} provêm da Tabela 13, também extraída de [29]. Lembrando que a coluna tem como material um alumínio.

Tabela 13: Parâmetros para cálculo da rigidez do membro k_m .

Material usado	Razão do Poisson	Módulo elástico GPa	A	B
Aço	0,291	207	0,787 15	0,628 73
Alumínio	0,334	71	0,796 70	0,638 16
Cobre	0,326	119	0,795 68	0,635 53
Ferro fundido cinza	0,211	100	0,778 71	0,616 16
Expressão geral			0,789 52	0,629 14

[Budynas and Nisbett, 2011]

Calcula-se, em seguida, a rigidez da coluna k_m :

$$k_m = 71 * 10^9 * 4,2 * 10^{-3} * 0,79670 * \exp\left(\frac{0,63816 * 4,2 * 10^{-3}}{5 * 10^{-3}}\right) \quad (28)$$

$$k_m = E * d * A * \exp\left(\frac{B * d}{l}\right) \cong 406,076562632 * 10^6 \quad (29)$$

De [29], extrai-se a equação 30, para cálculo da rigidez efetiva estimada do parafuso de rosca até a cabeça na zona de arrocho k_b .

$$k_b = \frac{A_d * A_t * E}{A_d * l_t + A_t * l_d} \quad (30)$$

Os parâmetros para cálculo estão resumidos na Tabela 14, com suas breves descrições correspondentes. Sendo assim, prossegue-se com os cálculos:

$$k_b = \frac{20,51 * (10^{-3})^2 * 13,85 * (10^{-3})^2 * 193 * 10^9}{20,51 * (10^{-3})^2 * 2,5 * 10^{-3} + 13,85 * (10^{-3})^2 * 4,5 * 10^{-3}} \quad (31)$$

$$k_b = \frac{A_d * A_t * E_{aco}}{A_d * l_t + A_t * l_d} \cong 482,607882923 * 10^6 \quad (32)$$

Uma vez calculadas as rigidezes da coluna k_m e do parafuso k_b , calcula-se a constante de rigidez da junção C, correspondente à seguinte equação:

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (33)$$

$$C = \frac{482,607882923 * 10^6}{482,607882923 * 10^6 + 406,076562632 * 10^6} \cong 0,543058771127 \quad (34)$$

A porção da carga externa de tração absorvida pelo parafuso da porca P_b é calculada multiplicando-se a carga externa de tração F_{ARR} por C. Como há dois parafusos sujeitos a esforço de arrancamento, essa carga é dividida igualmente entre ambos, decorrendo em:

$$P_b = C * \frac{F_{ARR}}{2} = 0,5431 * \frac{42,2357}{2} \cong 11,4682N \quad (35)$$

Tabela 14: Parâmetros para cálculo das rigidezes da coluna k_m e do parafuso k_b .

Parâmetro	Dimensão
$L_t = L - K =$ comprimento da rosca	7 mm
$l_t =$ comprimento rosqueado no agarre	2,5 mm
$l_d = L_t - l_t =$ comprimento da porção não rosqueada no alcance de agarre	4,5 mm
$A_t =$ área do diâmetro efetivo	13,85 mm ²
$d_{ex} =$ diâmetro externo	5,11 mm
$A_d =$ área do diâmetro externo	20,51 mm ²
$E_{aco} =$ módulo de elasticidade AISI 304	193 GPa
$E_{Al} =$ módulo de elasticidade do alumínio	71 GPa
$A_{Al} =$ coeficiente para cálculo de k_m	0,79670
$B_{Al} =$ coeficiente para cálculo de k_m	0,63816
$t =$ espessura do membro	2,5 mm
$l = 2*t =$ agarre no membro	5 mm

A porção da carga externa de tração absorvida pela coluna é obtida subtraindo-se a carga externa de tração pela porção da carga externa de tração absorvida pelos parafusos:

$$P_m = F_{ARR} - 2 * P_b = 42,2357 - 2 * 11,4682 \cong 19,2992N \quad (36)$$

Por fim, calculando-se ambas as tensões envolvidas, dividem-se as porções da carga externa de tração absorvidas, tanto pelo parafuso quanto pela coluna, pela área do diâmetro efetivo A_t :

$$\sigma_P = \frac{P_b}{A_t} = \frac{11,4682}{13,85 * (10^{-3})^2} \cong 0,828MPa \quad (37)$$

$$\sigma_C = \frac{P_m}{A_t} = \frac{19,2992}{13,85 * (10^{-3})^2} \cong 1,3934MPa \quad (38)$$

Dado que o aço AISI 304 tem tensão de escoamento de 215 MPa e que o alumínio 6063 T5 tem tensão de escoamento de 145 MPa, comprova-se que nem o parafuso de aço e nem a coluna de alumínio sofrerão deformações plásticas decorrentes dos esforços de arrancamento.

Cisalhamento:

A reação na extremidade A às forças cortantes aplicadas resulta na componente V_A . Avaliando-se a tensão de cisalhamento para cada um dos parafusos de fixação do suporte do monitor na coluna, divide-se a componente V_A igualmente entre os três parafusos envolvidos. Sendo assim, tem-se que:

$$\tau_P = \frac{\frac{V_A}{3}}{A_t} = \frac{\frac{32}{3}}{13,85 * (10^{-3})^2} \cong 0,7702MPa \quad (39)$$

Dado que o aço AISI 304 tem tensão de cisalhamento de 291,5619 MPa (supondo-se um material metálico isotrópico, usando o critério de von Mises, correspondendo à tensão última de escoamento dividida pela raiz de três), comprova-se que os parafusos de aço não sofrem deformação plástica decorrente das forças cortantes aplicadas.

12 Tensões nas Cantoneiras da Base

Sob a base do robô, são posicionadas duas cantoneiras em L paralelas entre si e equidistantes do plano yz, conforme evidenciado na Figura 28. As cantoneiras têm como função principal servirem de reforços estruturais extras na base e como função secundária acrescentarem massa à parcela inferior do robô, contribuindo para baixar o centro de gravidade. Sendo assim, deve-se verificar se resistem a esforços normais e de cisalhamento, conforme procedimento descrito em [30]. O vértice principal em L está voltado para a parte de dentro do robô, já que se trata da região da cantoneira mais resistente a esforços.

Os apoios que sustentam as cantoneiras estão representados na Figura 35, bem como os esforços da força peso P e da força inercial F_R .

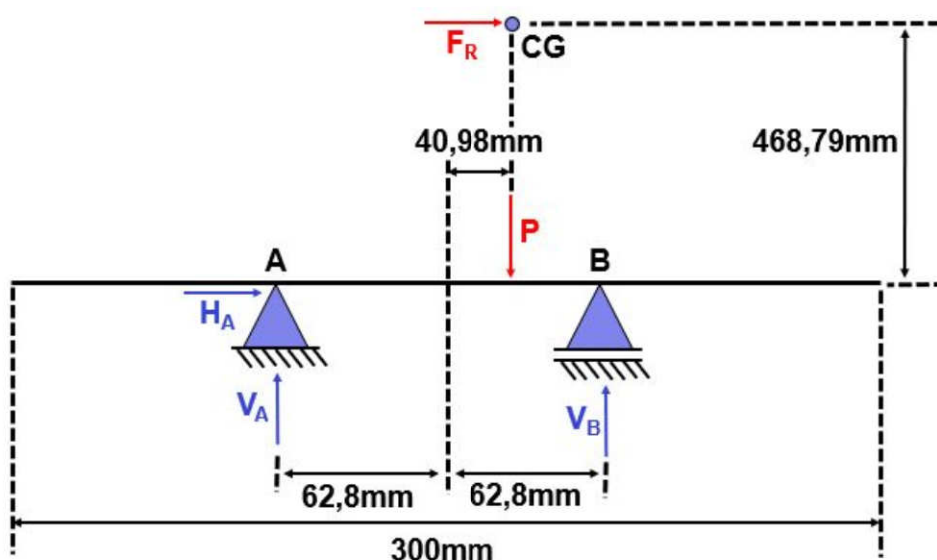


Figura 35: Esforços nas cantoneiras da base.

A seção transversal da cantoneira está representada na Figura 36, bem como os eixos yz arbitrados para os cálculos seguintes.

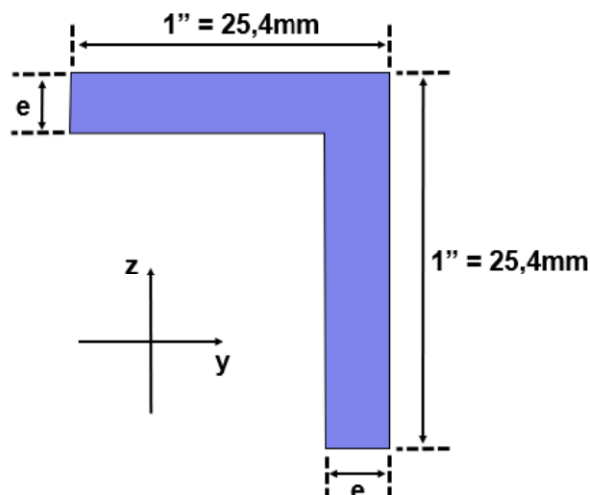


Figura 36: Seção transversal das cantoneiras da base.

Para a análise estrutural, serão considerados os dados contidos na Tabela 15, com suas correspondentes explicações.

Tabela 15: Variáveis para análise estrutural das cantoneiras.

Variável	Valor
M = massa	25,47 kg
g = aceleração da gravidade	10 m/s ²
a = aceleração inercial	0,5 m/s ²
e = espessura	3/16" = 4,7625 mm
P = força peso	254,7 N
$F_R = M \cdot a =$ força inercial	12,735 N

Analizando dimensionalmente a seção transversal das cantoneiras da base, de modo a encontrar a posição de seus respectivos centros de gravidade e momentos de inércia, parte-se da Figura 37.

$$\begin{cases} A_1 = 25,4^2 = 645,16 \text{ mm}^2 \\ t_1 = \frac{25,4}{2} = 12,7 \text{ mm} \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{cases} A_2 = (25,4 - e)^2 \cong 425,90640625 \text{ mm}^2 \\ t_2 = \frac{25,4 - e}{2} = 10,31875 \text{ mm} \end{cases} \quad (41)$$

Com isso, a área total resulta em:

$$A_T = A_1 - A_2 \cong 219,25359375 \text{ mm}^2 \quad (42)$$

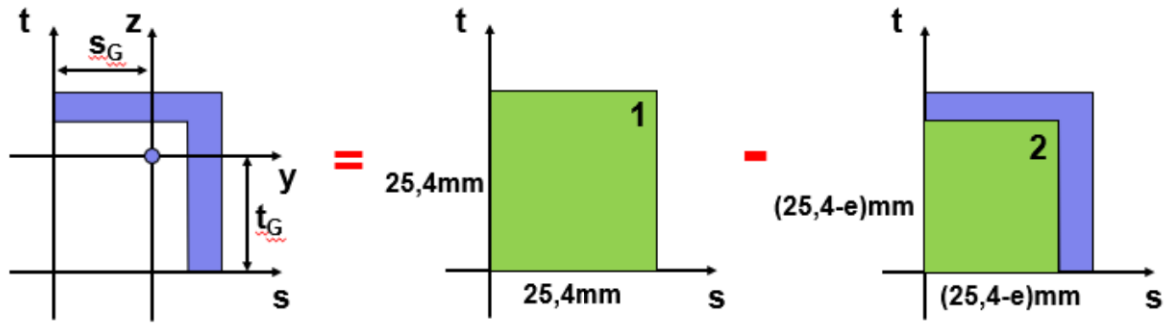


Figura 37: Referências para cálculo de centro de gravidade e momento de inércia.

Prossegue-se com o cálculo da posição do centro de gravidade.

$$s_G = t_G = \frac{\sum A_i * t_i}{\sum A_i} = \frac{A_1 * t_1 - A_2 * t_2}{A_T} \cong 17,3256465517mm \quad (43)$$

Em seguida, realizam-se os cálculos do momento de inércia.

$$I_S = \frac{b_1 * h_1^3}{12} + A_1 * z_{G_1}^2 - \frac{b_2 * h_2^3}{12} + A_2 * z_{G_2}^2 \cong 168976,51968mm^4 \quad (44)$$

$$I_y = I_S - A_T * t_G \cong 165177,80941mm^4 \quad (45)$$

Com as propriedades definidas, calculam-se as reações de apoio, considerando a metade dos esforços aplicados sobre cada cantoneira:

- Horizontal:

$$H_A + \frac{F_R}{2} = 0 \quad (46)$$

$$H_A = -\frac{F_R}{2} = -\frac{12,735}{2} = -6,3675N \quad (47)$$

- Vertical:

$$V_A + V_B - \frac{P}{2} = 0 \quad (48)$$

$$V_A + V_B = \frac{P}{2} = 127,35N \quad (49)$$

- Momento em torno de A:

$$V_B * 2 * 62,8 - \frac{P}{2} * (62,8 + 40,98) - \frac{F_R}{2} * 468,79 = 0 \quad (50)$$

$$125,6 * V_B = \frac{254,7}{2} * 103,78 + \frac{12,735}{2} * 468,79 = 16201,403325 \quad (51)$$

$$V_B \cong 128,9921N \quad (52)$$

$$V_A \cong -1,6421N \quad (53)$$

Depois de se obter as reações de apoio, calculam-se os esforços normal, cortante e o momento para cada trecho de cantoneira: AP (Figura 38) e PB (Figura 39).

Trecho AP:



Figura 38: Esforços na cantoneira para o trecho AP.

$$N = 6,3675N \quad (54)$$

$$V = -1,6421N \quad (55)$$

$$M = -x * 1,6421 \quad [N * mm] \quad (56)$$

Trecho PB:

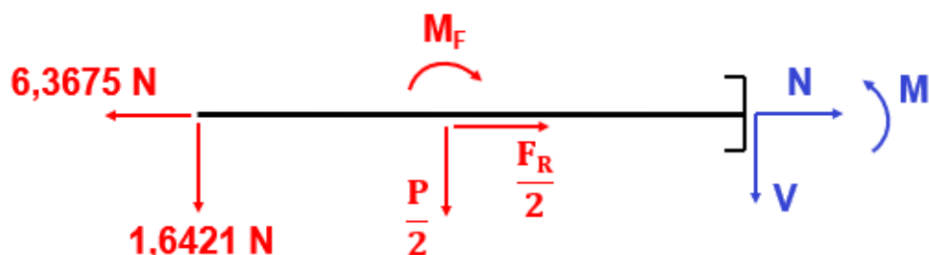


Figura 39: Esforços na cantoneira para o trecho PB.

$$N = 0N \quad (57)$$

$$V \cong -128.9921N \quad (58)$$

$$M - M_F + \frac{P}{2} * x + 1,6421 * (62,8 + 40,98 + x) = 0 \quad (59)$$

$$M = \frac{F_R}{2} * 468,79 - \frac{254,7}{2} * x - 1,6421 * (103,78 + x) = 0 \quad (60)$$

$$M = \frac{12,735}{2} * 468,79 - 127,35 * x - 1,6421 * (103,78 + x) = 0 \quad (61)$$

$$M = -x * 128.9921 + 2814,6032 \quad [N * mm] \quad (62)$$

Com isso, traçam-se os diagramas de esforços solicitantes, como ilustrado na Figura 40.

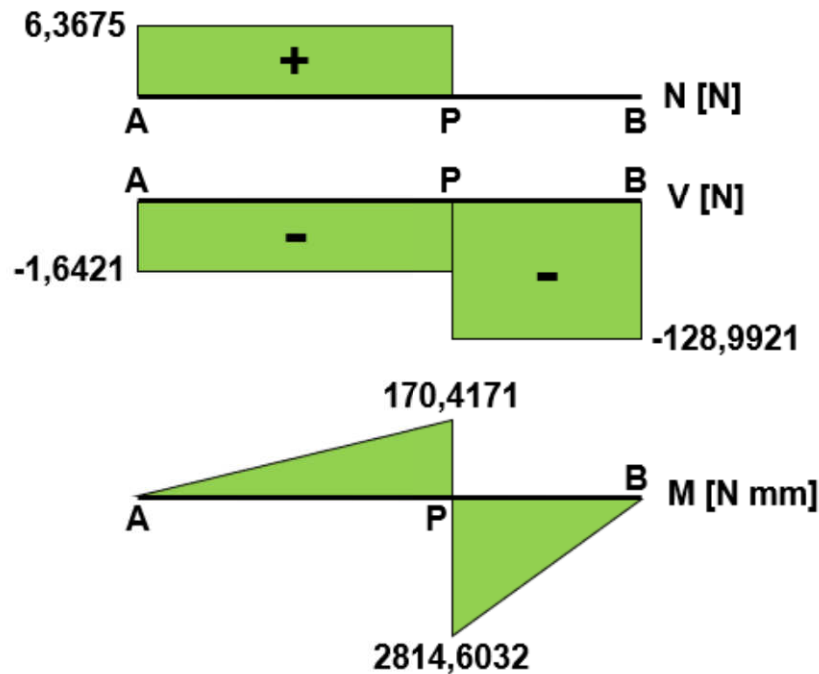


Figura 40: Diagramas de Esforços Solicitantes na cantoneira.

Por meio dos diagramas de esforços solicitantes expostos na figura acima, identificou-se que a seção transversal mais crítica é aquela situada imediatamente à direita do ponto P. Serão analisadas nela as tensões normal e de cisalhamento.

Tensão Normal: Para a seção transversal em questão, tem-se normal nula e momento tracionando na parte de baixo e comprimindo na parte de cima, em relação ao centro de gravidade da cantoneira, como ilustrado na Figura 41. O valor de tensão máximo se dá na parte de baixo, por haver a maior distância entre o centro de gravidade e o limite inferior.

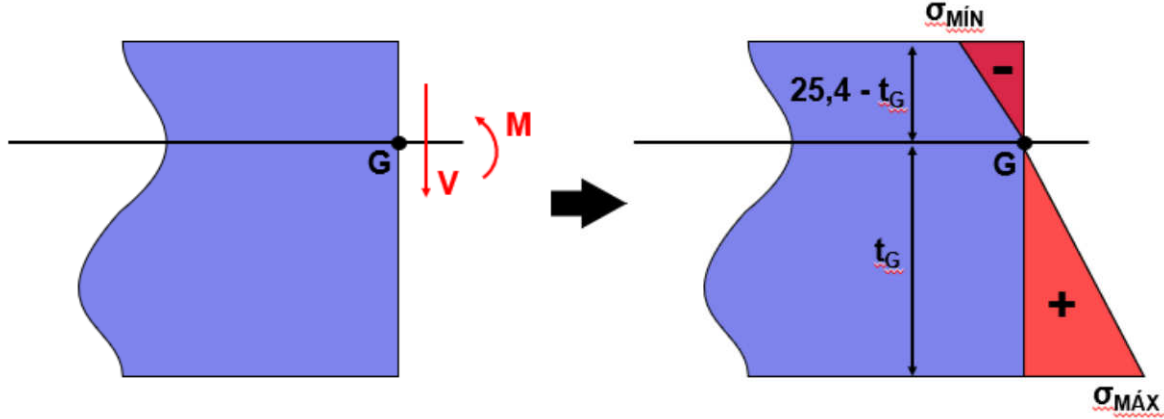


Figura 41: Análise de esforços na direção normal da seção transversal.

$$\sigma = \frac{N}{A_T} \pm \frac{M}{I_y} * |z| \quad (63)$$

$$\sigma_{MAX} = \frac{2814,6032}{165177,8094} * 17,3256 \cong 0,2952MPa \quad (64)$$

Tensão de Cisalhamento: Para a seção transversal em questão, devem-se analisar duas parcelas: a da força cortante apresentada do diagrama de esforços solicitantes da Figura 40 e a do momento torsor aplicado pelo esforço da força peso, como ilustrado na Figura 42.

Deve-se encontrar o ponto de maior tensão de cisalhamento. Para tal, calcula-se a distância x como o ponto de máximo da equação quadrática.

$$b = e = 4,7625mm \quad (65)$$

$$S_y = e * (t_G - x) * \left(x + \frac{t_G - x}{2}\right) = e * (t_G - x) * \left(\frac{t_G - x}{2}\right) \quad (66)$$

$$S_y = \frac{e}{2} * (t_G - x) * (t_G + x) = \frac{e}{2} * (t_G^2 - x^2) = \frac{e}{2} * t_G^2 - \frac{e}{2} * x^2 \quad (67)$$

Da primeira derivada, calcula-se que o ponto de máximo da expressão quadrática se dá em $x=0$. Sendo assim,

$$S_y = \frac{e}{2} * t_G^2 = \frac{4,7625}{2} * 17,3256^2 \cong 714,7951 \text{ mm}^3 \quad (68)$$

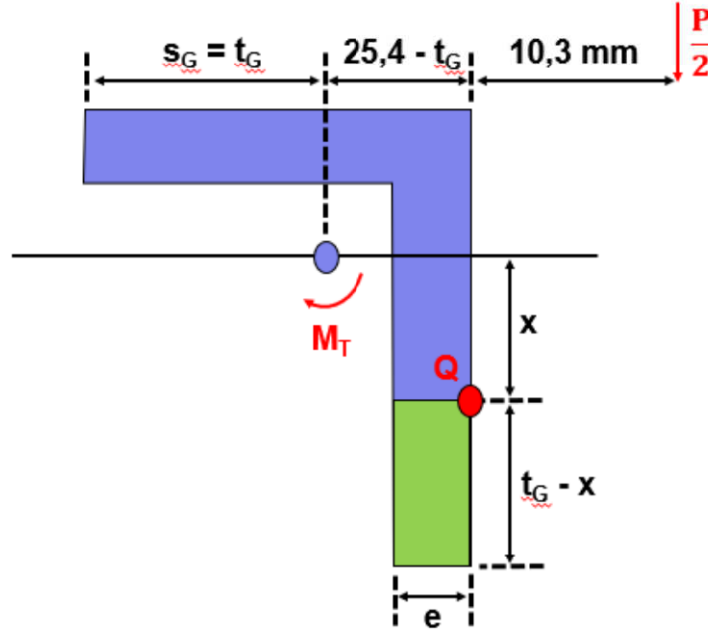


Figura 42: Análise de esforços de cisalhamento da seção transversal.

Para o momento torçor, têm-se as seguintes variáveis:

$$M_T = \frac{P}{2} * (10,3 + 25,4 - t_G) \cong 2339,9798 \text{ Nmm} \quad (69)$$

$$I_P = 2 * I_y = 2 * 165177,8094 = 330355,6188 \text{ mm}^4 \quad (70)$$

$$R = 25,4 - t_G = 25,4 - 17,3256 = 8,0744 \text{ mm} \quad (71)$$

Por fim, chega-se ao valor da tensão de cisalhamento máxima:

$$\tau_Q = \tau^V + \tau^{M_T} = \frac{V_z * S_y}{b * I_y} + \frac{M_T}{I_P} * R \quad (72)$$

$$\tau_Q = \frac{-128,9921 * 714,7951}{4,7625 * 165177,80941} + \frac{-2339,9798}{330355,6188} * 8,0744 \cong -0,1744 \text{ MPa} \quad (73)$$

Dado que o alumínio 6063 T5 tem tensão de escoamento de 145 MPa e tem tensão de cisalhamento de 117 MPa, comprova-se que as cantoneiras não sofrerão deformações plásticas decorrentes nem de esforços normais e nem de esforços de cisalhamento.

13 Reações de Apoio nas Rodas

Na seção de Dimensionamento do Motor, determinou-se que o robô alcançaria a velocidade de regime de 1 m/s em 2s, representando, portanto, uma aceleração inercial de $0,5 \text{ m/s}^2$. Cabe comprovar que, para a aceleração escolhida, as reações normais nas rodas de apoio do robô correspondem à condição de manutenção do contato com o solo ininterruptamente, ou seja, deve-se comprovar que o robô não perde contato com o solo.

Nesse caso, representa-se a base: o ponto A corresponde ao apoio do rodízio dianteiro na base, enquanto o ponto B corresponde ao ponto médio na direção x das rodas motoras. A Figura 43 representa a simplificação de esforços (da força peso P e da força inercial F_R) e de reações de apoio em um corte longitudinal no plano zy, precisamente sobre o plano de simetria em $x=0$.

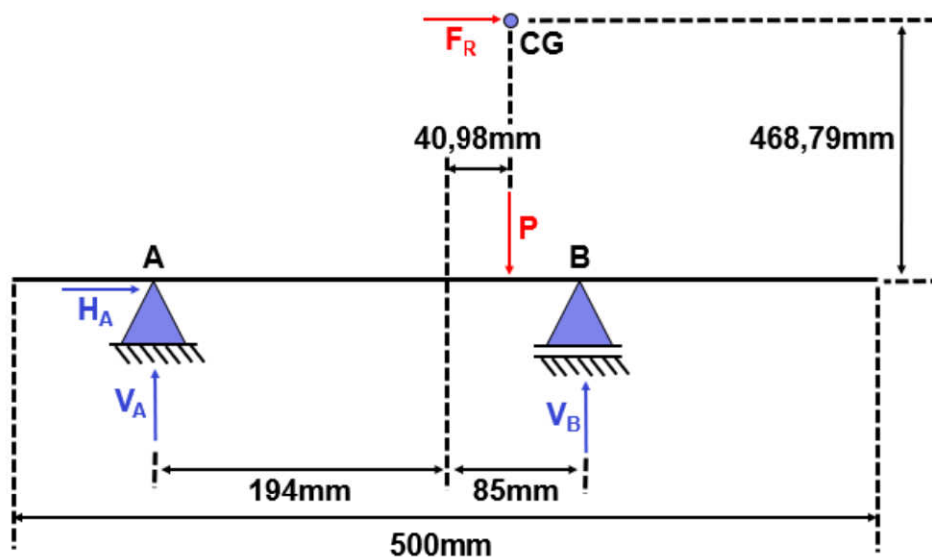


Figura 43: Esforços e reações de apoio das rodas na base.

Para a análise estrutural, serão considerados os mesmos dados da realizada para as cantoneiras, contidos na Tabela 15.

Com as variáveis definidas, calculam-se as reações de apoio:

- Horizontal:

$$H_A + F_R = 0 \quad (74)$$

$$H_A = -F_R = -12,735N \quad (75)$$

- Vertical:

$$V_A + V_B - P = 0 \quad (76)$$

$$V_A + V_B = P = 254,7N \quad (77)$$

- Momento em torno de A:

$$V_B * (85 + 194) - P * (40,98 + 194) - F_R * 468,79 = 0 \quad (78)$$

$$279 * V_B = 254,7 * 234,98 + 12,735 * 468,79 = 65819,44665 \quad (79)$$

$$V_B \cong 235,912N \quad (80)$$

$$V_A \cong 18,788N \quad (81)$$

Deve-se lembrar que a reação de apoio normal no ponto B, V_B , corresponde à soma das reações normais de ambas as rodas motoras, o que significa que cada uma delas tem reação normal equivalente à metade do valor obtido na equação 80.

Dados os valores positivos obtidos para ambas as reações de apoio normais V_A e V_B , comprova-se que o robô não perde contato com o solo na condição extrema de esforços (em acelerações e desacelerações).

14 Análise de Vibração da Coluna

Como visto na seção de Requisitos Definidos, é possível que haja destabilidades sob quaisquer ruídos de movimentação (vibrações indesejadas), uma vez que a haste de sustentação do corpo do robô configura-se como um braço de momento significativo.

Para a análise, considerou-se a mesma Figura 43, a qual apresenta a simplificação de esforços (da força peso P e da força inercial F_R) e de reações de apoio. Reiterando, o ponto A corresponde ao apoio do rodízio dianteiro na base, enquanto o ponto B corresponde ao ponto médio na direção x das rotas motoras.

Por meio do software Ansys Academic Mechanical APDL, da empresa Ansys, em sua versão estudantil 2020 R1, modelaram-se a base e a coluna do robô como pórticos. Restringiu-se a base com seus dois apoios, sendo um fixo e outro móvel, e vinculou-se a coluna na base por meio de um engaste, como apresentado na Figura 44. Além disso, tratou-se o problema bidimensionalmente, engastando-se todos os nós da estrutura na direção x , impedindo deslocamentos na direção perpendicular ao plano zy .

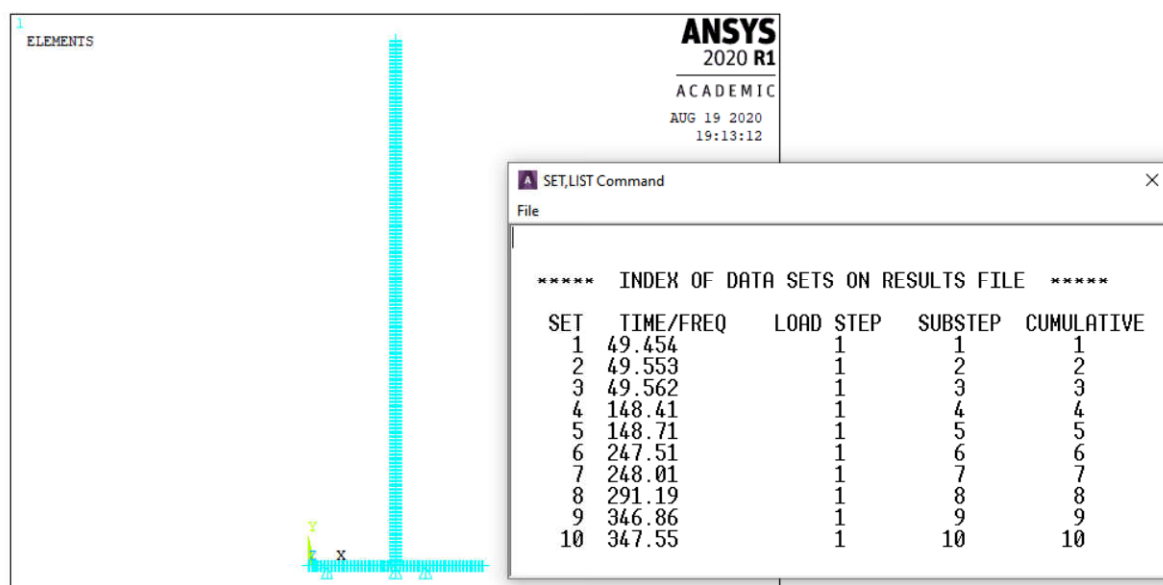


Figura 44: Modelamento da base e da coluna e análise das frequências naturais de vibração da estrutura, por meio de Análise Modal.

Após o modelamento simplificado da estrutura, realizou-se uma Análise Modal, de modo a identificar as primeiras dez frequências naturais de vibração. Os resultados obtidos por meio da simulação constam na Figura 44, na coluna "TIME/FREQ", com unidade de medida em Hz.

A partir das frequências naturais de vibração da estrutura, prosseguiu-se com uma Análise Harmônica, a fim de se verificar para quais frequências de vibração a estrutura apresentaria os maiores deslocamentos em relação à posição de equilíbrio estático. Cabe destacar que na Análise Modal a estrutura não está sob a ação de esforços externos, enquanto na Análise Harmônica eles são considerados. Importante pontuar também que tanto a Análise Modal quanto a Análise Harmônica foram realizadas sem amortecimento, permitindo evidenciar o pior cenário possível.

Procurando abranger o intervalo das primeiras dez frequências naturais de vibração da estrutura, simulou-se a Análise Harmônica para um intervalo de frequências entre 45 Hz e 350 Hz. O ponto de maior deslocamento em torno da posição de equilíbrio é o do ápice da coluna, no extremo oposto ao do engastamento na base, de maior braço de momento. Nesse ponto, as amplitudes máximas dos deslocamentos deram-se próximas das frequências de 49,5 Hz e de 291,1 Hz, como ilustrado na Figura 45. O eixo das abscissas corresponde ao das frequências (em hertz) e o eixo das ordenadas (dado em escala logarítmica) corresponde ao das amplitudes máximas dos deslocamentos em torno da posição de equilíbrio (em metros).

Os códigos elaborados para as simulações tanto da Análise Modal quanto da Análise Harmônica encontram-se nos Apêndices.

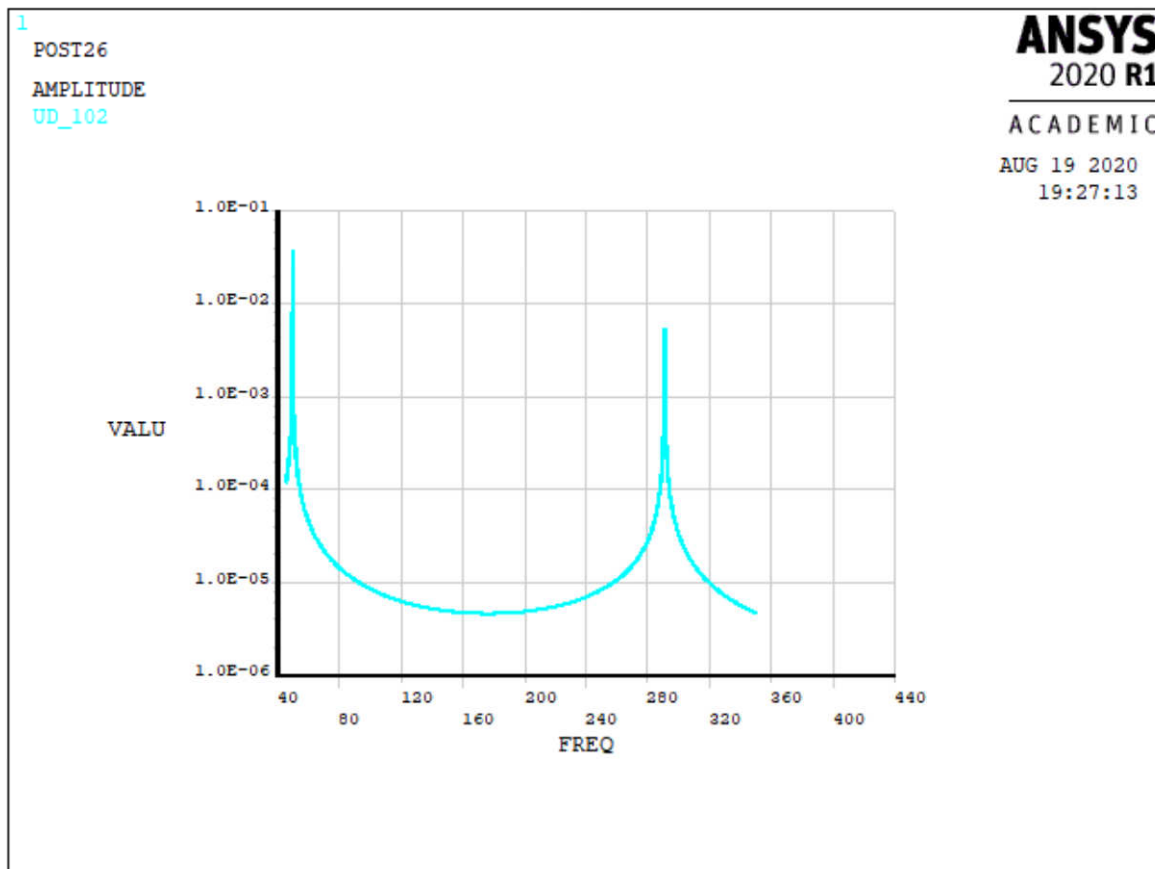


Figura 45: Gráfico da amplitude dos deslocamentos do ponto do ápice da coluna em relação à posição de equilíbrio, dado pela Análise Harmônica da estrutura.

Para as frequências de 49,5 Hz e de 291,1 Hz, em que foram constatadas as amplitudes máximas dos deslocamentos em torno da posição de equilíbrio, plotaram-se os modos de vibrar, ressaltando o ponto de interesse por "MX" (de 'máximo'). Para a frequência de 49,5 Hz (Figura 46) foi obtido um deslocamento de 38,975 mm e para a frequência de 291,1 Hz (Figura 47) foi obtido um deslocamento de 5,259 mm.

Em maior detalhe, destacando a amplitude de deslocamento de cada ponto da estrutura em relação à posição de equilíbrio, de acordo com a escala de cores representando a magnitude, plotaram-se os gráficos para as frequências de 49,5 Hz (Figura 48) e de 291,1 Hz (Figura 49).

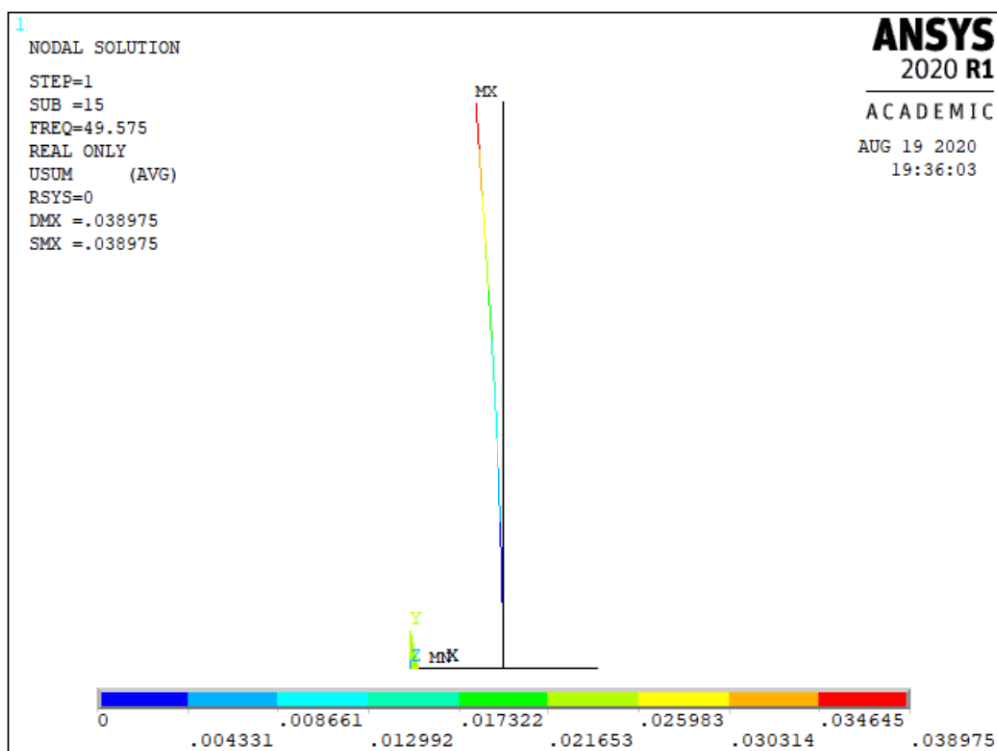


Figura 46: Modo de vibrar da estrutura para a frequência de 49,5 Hz.

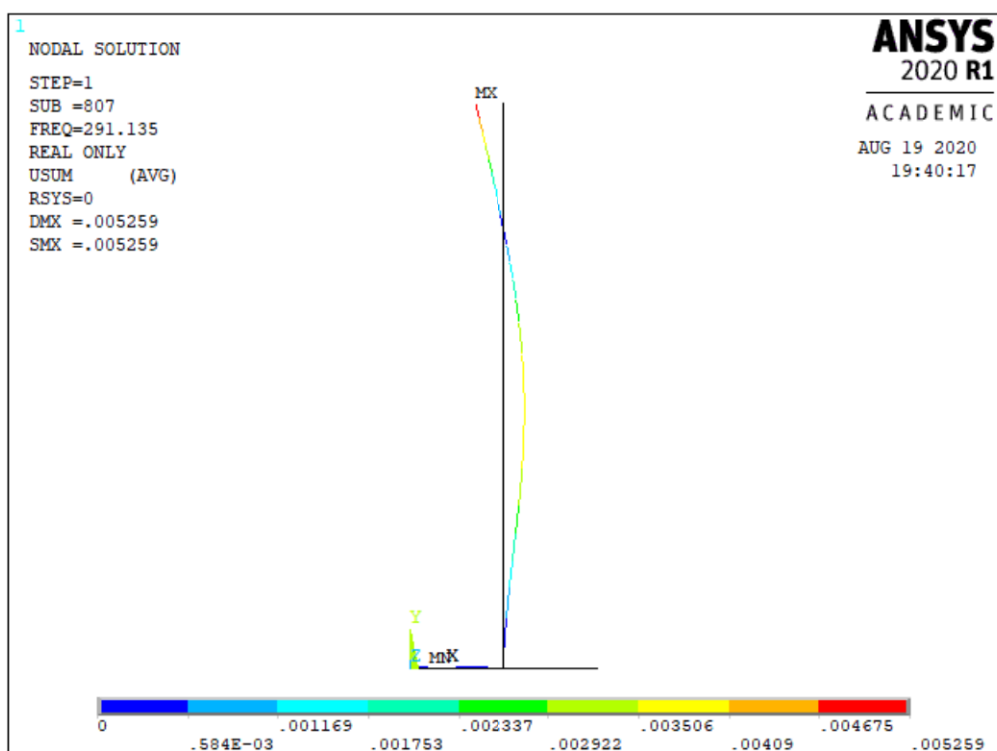


Figura 47: Modo de vibrar da estrutura para a frequência de 291,1 Hz.

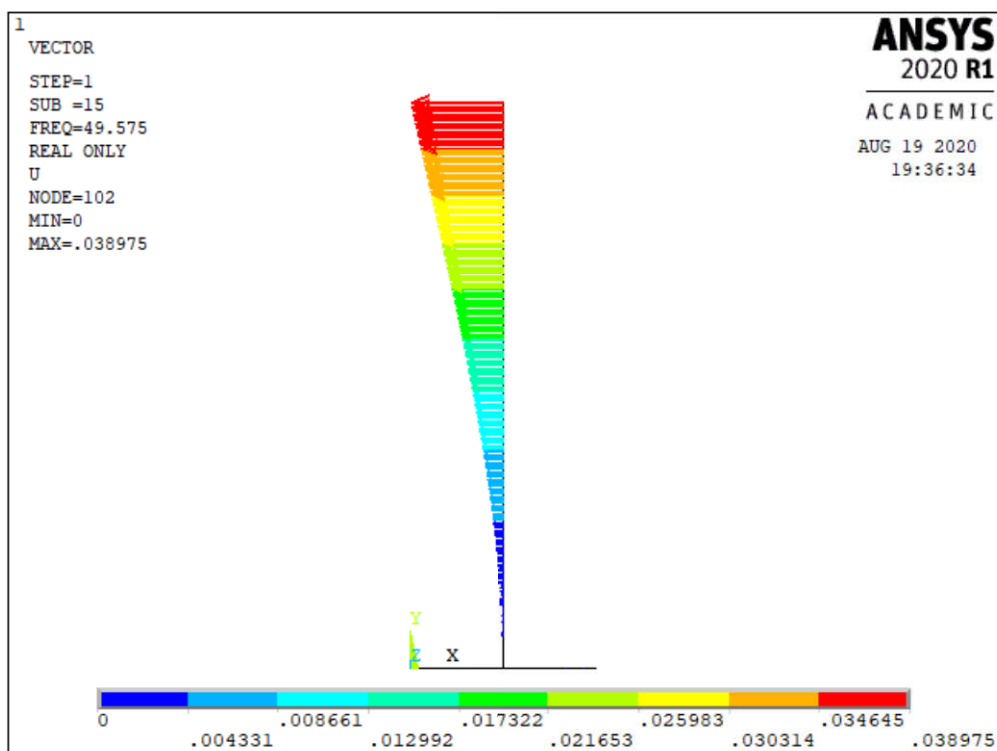


Figura 48: Modo de vibrar da estrutura para a frequência de 49,5 Hz.

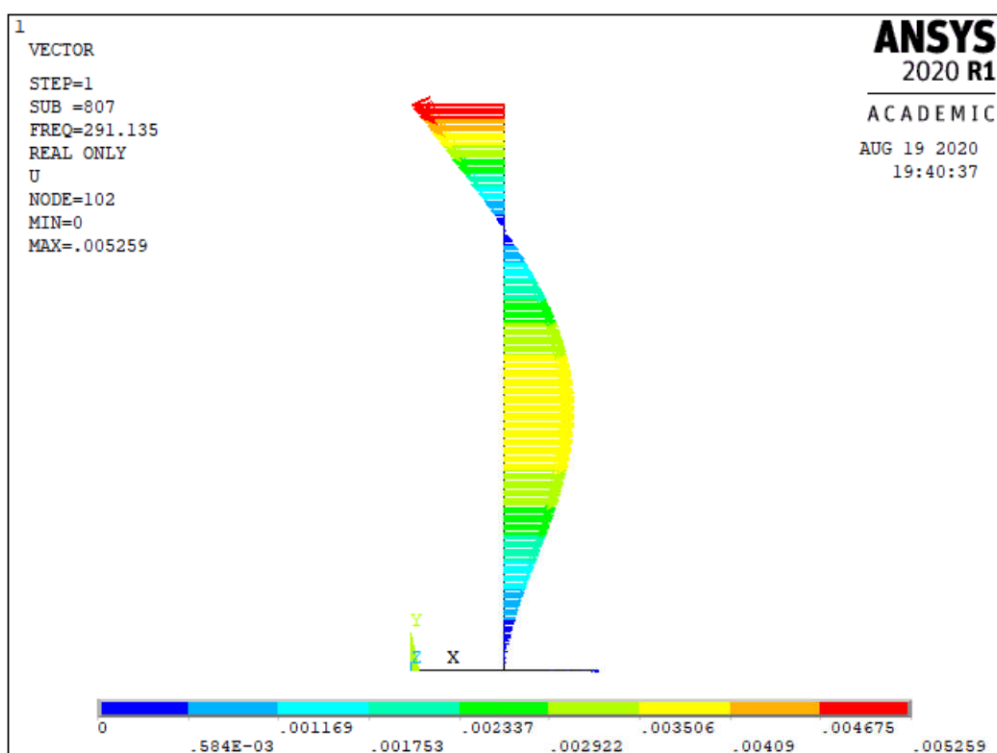


Figura 49: Modo de vibrar da estrutura para a frequência de 291,1 Hz.

Para a frequência de trabalho do motor empregado no robô, considera-se a velocidade de regime de 1 m/s, presente na Tabela 3, e o diâmetro da roda de 6,5" (ou 165,1 mm). Como não há redução entre o motor e a roda, pode-se estabelecer uma relação entre a velocidade tangencial linear do robô e sua frequência de rotação.

$$f_{motor} = \frac{v}{2 * \pi * \frac{d}{2}} \quad (82)$$

$$f_{motor} = \frac{1}{2 * \pi * \frac{6,5 * 25,4 * 10^{-3}}{2}} \cong 1,9280Hz \quad (83)$$

Sendo assim, nota-se que a frequência de operação do motor empregado no robô é bastante distante da primeira frequência natural de ressonância da estrutura, o que indica que a faixa de operação é segura para as condições impostas. Vale ressaltar que esse resultado foi obtido mesmo desconsiderando-se o amortecimento e considerando-se uma estrutura simplificada sem os elementos estruturais intermediários (como lateral, prateleiras e tampas), sendo que adicionando-se essas considerações a frequência natural de maior amplitude de deslocamento em torno da posição de equilíbrio seria maior que os 49,5 Hz, distanciando-se ainda mais das condições de operação. E mesmo para essa frequência, o deslocamento seria consideravelmente menor.

Como exemplo ilustrativo, simula-se a estrutura adicionando-se uma restrição na direção z, correspondente à tampa posicionada 500mm acima da base. Nessa circunstância, as frequências naturais de vibração da estrutura, obtidas por meio de Análise Modal, sofrem alterações pouco significativas.

A Análise Harmônica, por sua vez, revelou que o ponto de maior deslocamento em torno da posição de equilíbrio continuou sendo o do ápice da coluna. Nesse ponto, a amplitude máxima de deslocamento deu-se próxima da frequência de 86,8 Hz, como ilustrado na Figura 50. Para a frequência de 86,8 Hz, plotou-se o modo de vibrar, ressaltando o ponto de interesse por "MX" (de 'máximo'), obtendo-se um deslocamento de 1,267 mm, conforme Figura 51. Com isso, confirma-se a frequência maior e o deslocamento menor.

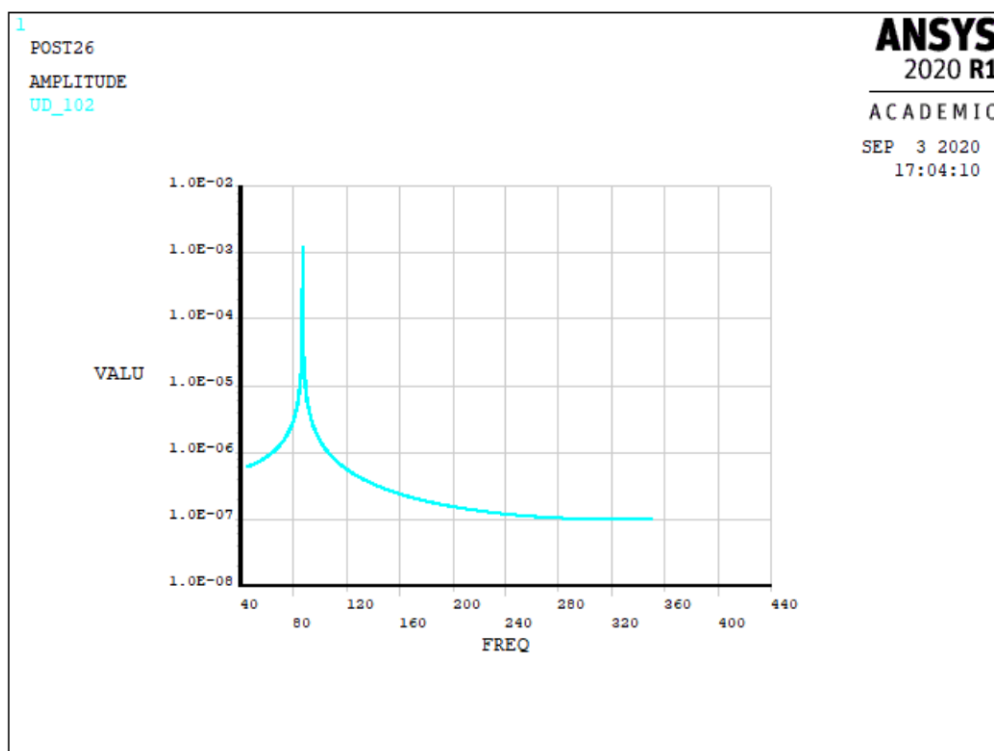


Figura 50: Amplitude dos deslocamentos da Análise Harmônica.

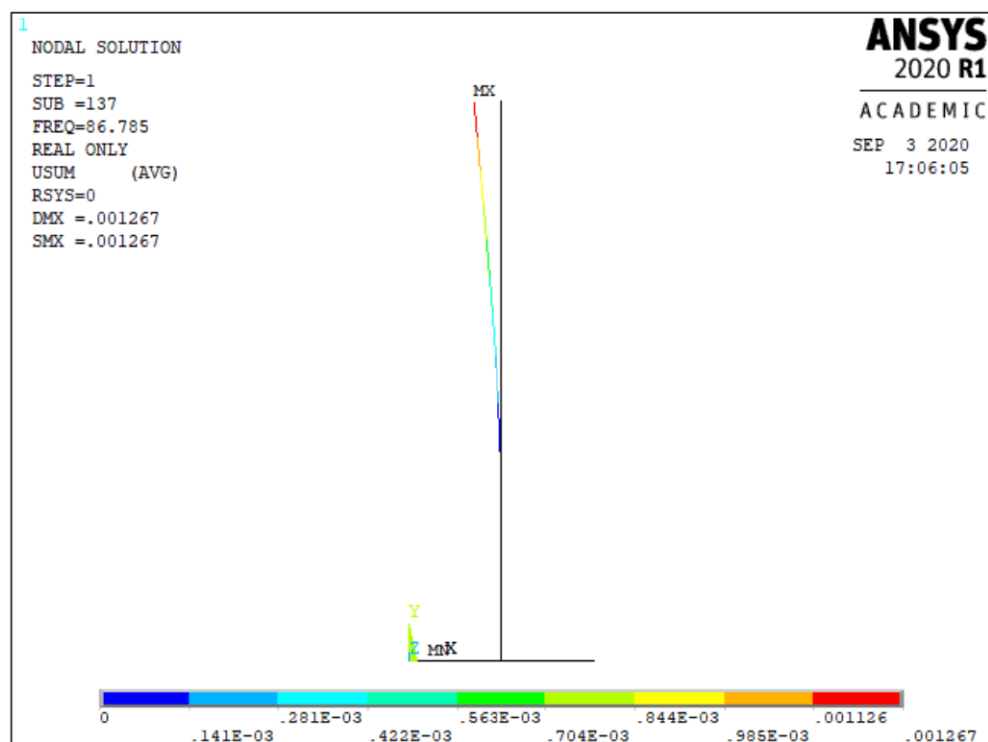


Figura 51: Modo de vibrar da estrutura para a frequência de 86,8 Hz.

15 Resumo Mecânico

15.1 Dimensionamento do Motor

Para selecionar o motor mais adequado para essa aplicação, elaborou-se um modelo de rampa para representar o cenário mais crítico possível de movimentação. No prédio, buscaram-se as rampas mais íngremes nos caminhos possíveis do robô e calcularam-se as potências envolvidas. A partir desses cálculos escolheu-se um motor brushless AC, o qual demanda um inversor de frequência. Dentre as opções existentes no mercado, selecionou-se o motor existente em hoverboards, o qual opera sob tensão de 36V, com potência de 350W, já acoplado a uma roda de 6,5" de diâmetro.

15.2 Autonomia da Bateria

Espera-se que o robô opere durante o período de um dia letivo, sem a necessidade de interromper os atendimentos para ser recarregado. Elabora-se uma jornada de circulação esperada para o período de 1h de operação do robô. Dentre as opções existentes no mercado optou-se por associar três baterias de chumbo-ácido em série, cada uma com 7 Ah de carga. Calculam-se as características da bateria apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16: Parâmetros da bateria selecionada.

Duty Cycle	39,6%
Eficiência do Motor	86,5%
Autonomia	40h
Profundidade de Descarga	9,72%
Vida Útil	2600 ciclos

15.3 Projeto em Software CAD

A partir das escolhas dimensionais e de materiais empregados, elaborase o projeto em CAD. Massa e altura estão de acordo com os requisitos, o centro de massa está próximo das rodas de tração e a uma altura segura para as condições dinâmicas de operação, o monitor de 19" permite um conforto visual de interação com o usuário e as tampas de acrílico removíveis e a lateral permitem um fácil acesso às prateleiras internas com a eletrônica, auxiliando nas manutenções. Existe uma quarta roda na parte traseira do robô, para evitar tombamentos no caso de acelerações mais bruscas.

Tabela 17: Parâmetros do ROSA desenvolvido em CAD.

Massa	25,47 kg
Centro de Gravidade ($x_G; y_G; z_G$)	(0; 468,79; -40,98) mm
Altura	1571,07 mm
Diâmetro da Base	500 mm

15.4 Altura Máxima do Rodízio Traseiro

Buscando-se resguardar a condição de altura máxima para que ao ingressar em rampas mais íngremes o rodízio menor da traseira não toque o solo (para que em conjunto com o segundo apoio do rodízio maior da dianteira não ergua as rodas motoras e consequentemente remova justamente a fonte de tração da movimentação), calcula-se que o rodízio menor terá 40mm de altura.

15.5 Parafusos de Sustentação do Monitor na Coluna

A sustentação do monitor na coluna será feita com parafusos auto atarraxantes de fenda phillips de aço inoxidável AISI 304, os quais serão rosqueados em furos abertos na coluna. Verificou-se que os parafusos resistem a esforços de cisalhamento e a coluna resiste a esforços de arrancamento.

15.6 Tensões nas Cantoneiras da Base

Sob a base do robô, serão posicionadas duas cantoneiras em L de alumínio 6063 T5 paralelas entre si e equidistantes. Elas têm como função principal servirem de reforços estruturais extras na base, além disso acrescentam massa à parcela inferior do robô, contribuindo para baixar o centro de gravidade. Verificou-se que as cantoneiras não sofrerão deformações plásticas decorrentes nem de esforços normais e nem de esforços de cisalhamento.

15.7 Reações de Apoio nas Rodas

Determinou-se que o robô alcançaria uma aceleração inercial de $0,5 \text{ m/s}^2$. Verificou-se que para essa aceleração, as reações normais nas rodas de apoio do robô correspondem à condição de manutenção do contato com o solo ininterruptamente, ou seja, o robô não perde contato com o solo.

15.8 Análise de Vibração da Coluna

É possível que haja desestabilidades sob quaisquer ruídos de movimentação (vibrações indesejadas), uma vez que a haste de sustentação do corpo do robô é um braço de momento significativo. Realizou-se uma Análise Modal da estrutura, identificando as dez primeiras frequências naturais de vibração Tabela 18.

Tabela 18: Dez primeiras frequências naturais de vibração da estrutura.

1	49,454 Hz
2	49,553 Hz
3	49,562 Hz
4	148,41 Hz
5	148,71 Hz
6	247,51 Hz
7	248,01 Hz
8	291,19 Hz
9	346,86 Hz
10	347,55 Hz

A partir dessas frequências naturais de vibração da estrutura, prosseguiu-se com uma Análise Harmônica. Verificou-se que as amplitudes máximas dos deslocamentos em relação à posição de equilíbrio estático deram-se próximas das frequências de 49,5 Hz e de 291,1 Hz.

Na sequência calculou-se a frequência de operação do motor empregado no robô, a qual resultou ser um valor de 1,9280 Hz, sendo bastante distante da primeira frequência natural de ressonância da estrutura, o que indica que a faixa de operação é segura para as condições impostas. Esse resultado foi obtido desconsiderando-se o amortecimento e considerando-se uma estrutura simplificada sem os elementos estruturais intermediários, conseqüentemente adicionando-se essas considerações a frequência natural de maior amplitude de deslocamento em torno da posição de equilíbrio seria maior que os 49,5 Hz, distanciando-se ainda mais das condições de operação.

16 Detecção do Ambiente

De acordo com [31], para se medir a distância de um ponto de referência localizado no robô a objetos do ambiente, podem ser empregados sensores de alcance. Sensores de alcance de não-contato medem distâncias desse ponto de referência a alvos de interesse, sem contato físico. Esses mesmos sensores de alcance de não-contato podem ainda ser classificados como ativos ou passivos. Os ativos radiam formas de energia no campo de interesse, enquanto os passivos detectam energia emitida pelos objetos do ambiente. Dado o ambiente irregular de atuação do robô, aplicações ativas mostram-se mais vantajosas, permitindo que as observações sejam obtidas diretamente, sem a dependência do ambiente.

Sensores LIDAR ("light direction and ranging") são dispositivos de medição de distância, com metodologias ativas baseadas em técnicas de alcance usando tempo de voo ou medição de deslocamento de fase.

A técnica de alcance pelo tempo de voo (ou "Time-of-Flight", TOF) consiste na emissão de uma onda completa (uma irrupção de poucos ciclos), na reflexão pelo alvo e na detecção pelo receptor posicionado próximo ao emissor, conforme consta na Figura 52. Emissor e receptor podem inclusive constituir fisicamente um mesmo sensor. O TOF pode ser definido como o tempo transcorrido entre o começo da irrupção e o começo do sinal de retorno, como representado na Figura 53.

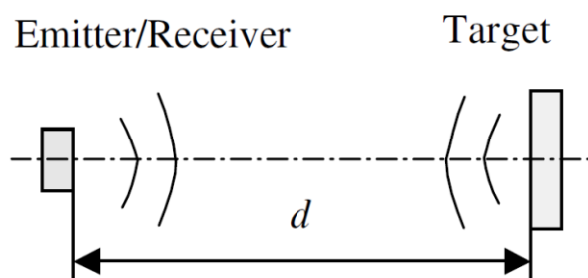


Figura 52: Emissão de onda, reflexão pelo alvo e detecção pelo receptor [Bishop, 2002].

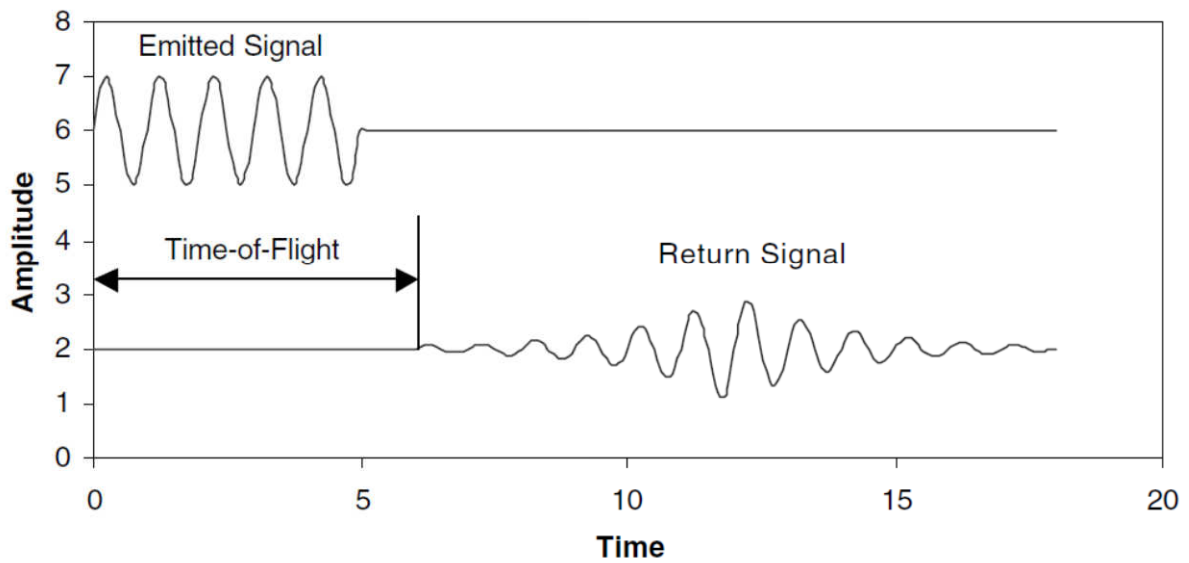


Figura 53: Definição de TOF [Bishop, 2002].

A distância d é obtida a partir da velocidade de propagação da onda c e do TOF, como relacionado pela seguinte equação:

$$d = \frac{c * TOF}{2} \quad (84)$$

A acurácia do sensor aproxima-se usualmente de 1/4 do comprimento de onda, ao detectar o sinal de retorno. Erros em sistemas TOF podem decorrer de variações nas velocidades de propagação, de incertezas na determinação do tempo exato de chegada do pulso refletido, de inaccuracidades no circuito de temporização usado para medir o tempo de ida e volta do vôo e da interação da onda incidente com a superfície alvo.

Tratando-se de um sensor remoto ativo, o LIDAR permite a captura direta de dados, habilitando o modelamento de ambientes tridimensionalmente. Emprega-se a tecnologia atualmente em levantamentos topográficos, caracterizando estruturas de vegetação e volumetrias de edificações, bem como em varreduras de carros autônomos.

Escolhe-se o sensor LIDAR de modelo VL53L0X da marca STMicroelectronics [32], considerado o menor sensor laser de alcance por TOF existente, o qual pode mensurar distâncias de até 2m, com resoluções de 1mm, a partir de distâncias mínimas de 3cm. Está constituído de um emissor infravermelho de comprimento de onda próximo a 940nm, o qual é invisível e seguro ao olho humano. Como especificação técnica, o sensor pode ser alimentado com tensões dentro do intervalo de 2,6 a 5,5 V, o que permite a conexão a microcontroladores com alimentação de 3,3 ou de 5 V. A comunicação se dá por I2C.

Para que seja possível que o sensor cubra uma área de varredura consideravelmente segura para que o robô não colida com obstáculos à sua frente, monta-se o sensor sobre um servomotor de modelo MG996R da marca Tower Pro [33], como ilustrado na Figura 54. O servomotor pode ser alimentado com tensões dentro do intervalo de 4,8 a 7,2 V, o que também permite a conexão a microcontroladores com alimentação de 5 V. Em operação, sua corrente varia entre 500 e 900 mA, sua velocidade é de 0,17 s/60° a 4,8 V, seu torque é de 9,4 kgf*cm a 4,8 V e seu período de PWM é de 20ms (o que corresponde a uma frequência de 50Hz).



Figura 54: Montagem do sensor LIDAR sobre o servomotor.

Por meio do software Fritzing, de versão 0.8.7, elabora-se o diagrama do circuito a ser montado para teste de varredura do ambiente, visando aplicação em evitar colisões com obstáculos. O microcontrolador Arduino UNO permite interfacear os componentes eletrônicos e o software de programação open source próprio. A conexão PWM do servomotor é ligada ao pino 9 PWM do Arduino; as conexões SDA e SCL do sensor LIDAR são ligadas aos pinos A4 e A5 do Arduino, respectivamente. Obtém-se o diagrama da Figura 55.

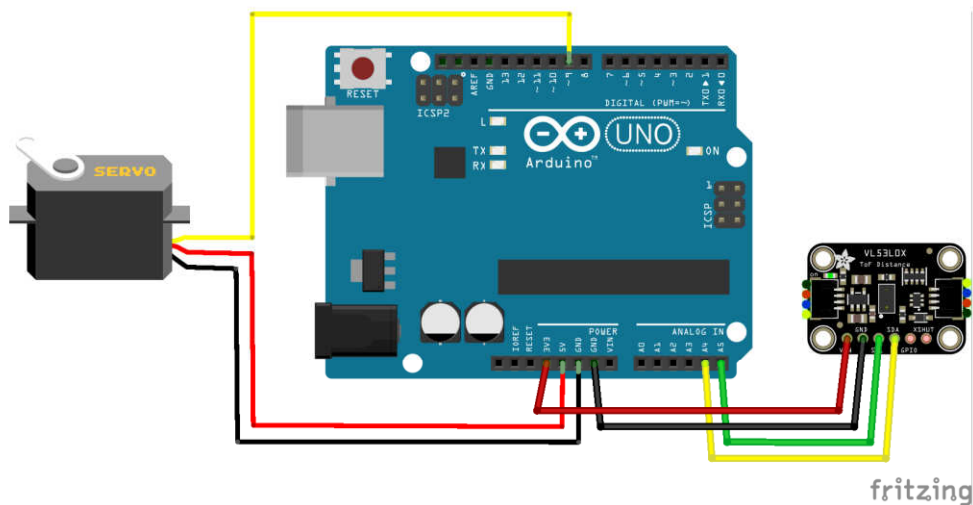
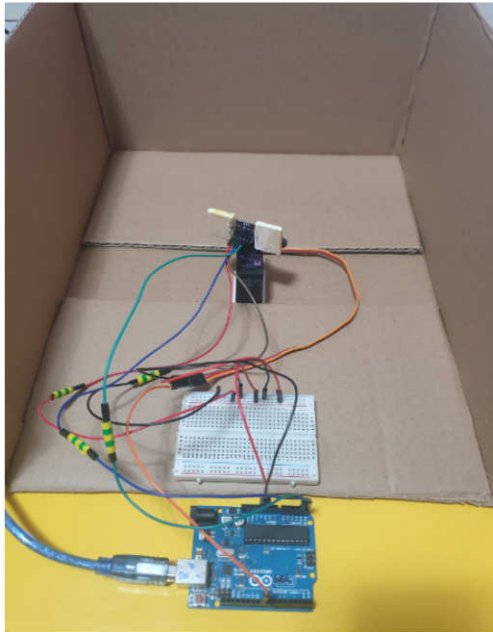


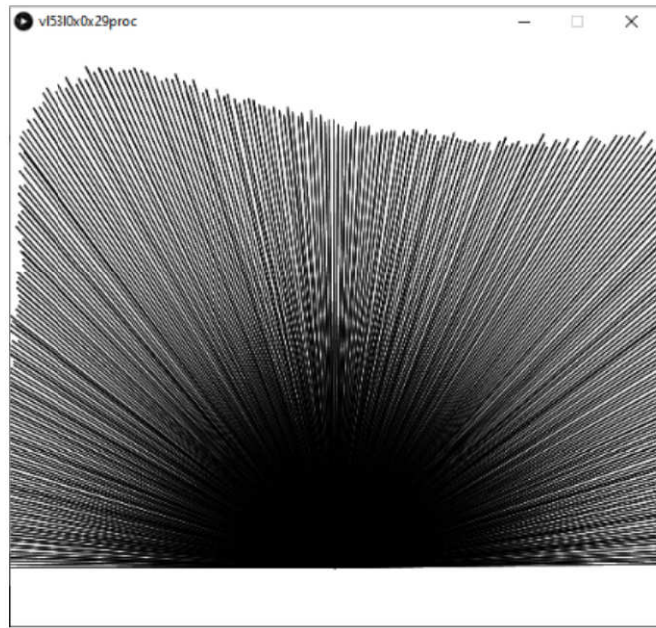
Figura 55: Diagrama do circuito para sensor LIDAR e servomotor.

Procurando representar como as observações do sensor são interpretáveis computacionalmente, explora-se a representação gráfica proporcionada pelo software Processing, versão 3.5.4. A montagem do sensor LIDAR sobre o servomotor permite leituras em um intervalo de -90° a $+90^\circ$, as quais podem ser ilustradas por linhas proporcionais à distância do sensor ao obstáculo mais próximo.

Testando-se essa ideia na prática, propõe-se uma simulação de ambiente com obstáculos, com a montagem de sensor LIDAR sobre servomotor em meio a uma caixa de papelão em que se posicionam caixas menores em posições aleatórias. A situação em que o software representa a caixa de papelão vazia sem obstáculos está apresentada na Figura 56. Em seguida, elaboram-se duas situações hipotéticas em que obstáculos estariam dispostos aleatoriamente no ambiente, como mostrado nas Figuras 57 e 58. O código encontra-se no Anexo ao final do documento.

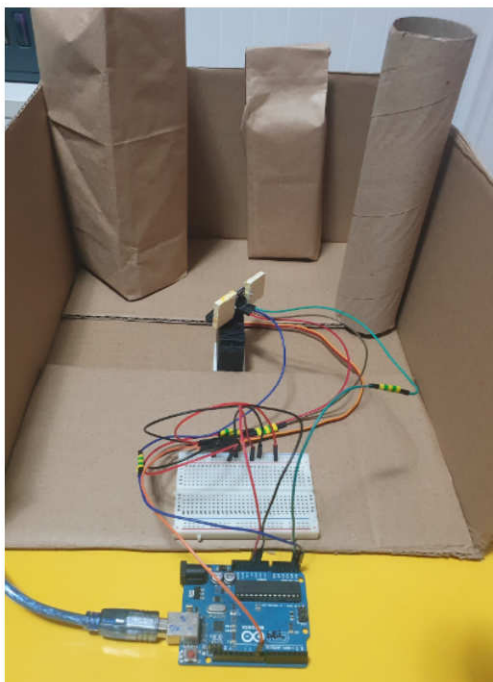


(a) Caixa vazia

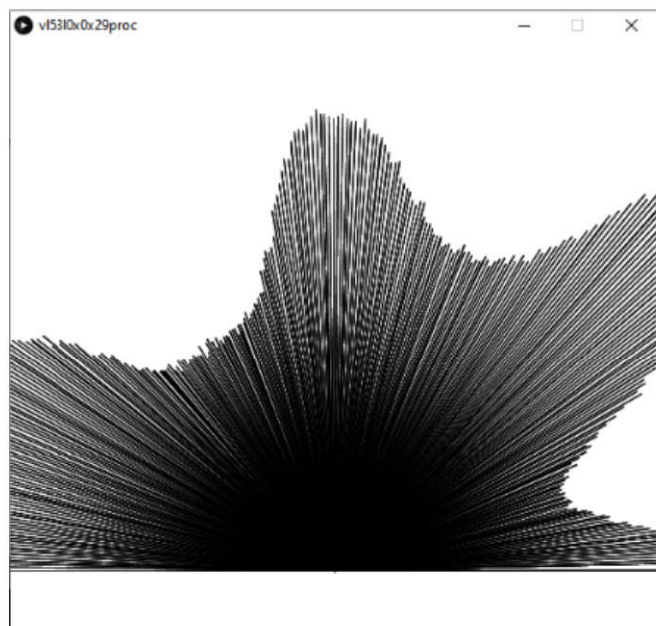


(b) Representação no Processing

Figura 56: Representação gráfica da situação com a caixa de papelão vazia sem obstáculos 56a no software Processing 56b.

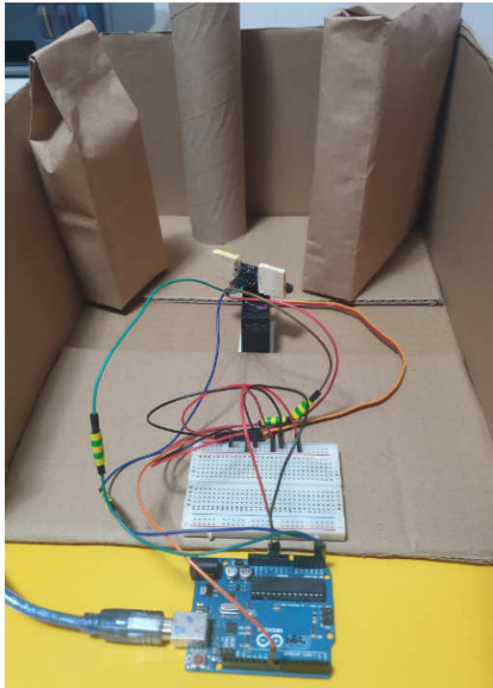


(a) Primeira configuração

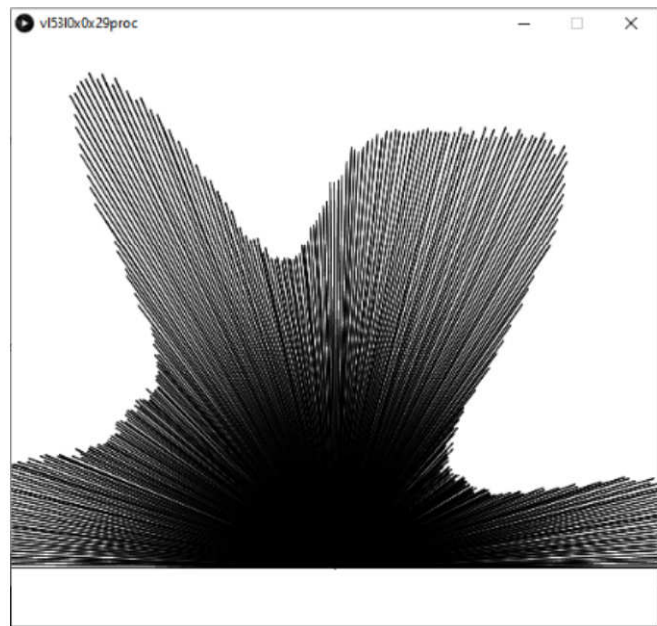


(b) Representação no Processing

Figura 57: Representação gráfica da primeira configuração da caixa de papelão com obstáculos hipotéticos 57a no software Processing 57b.



(a) Segunda configuração



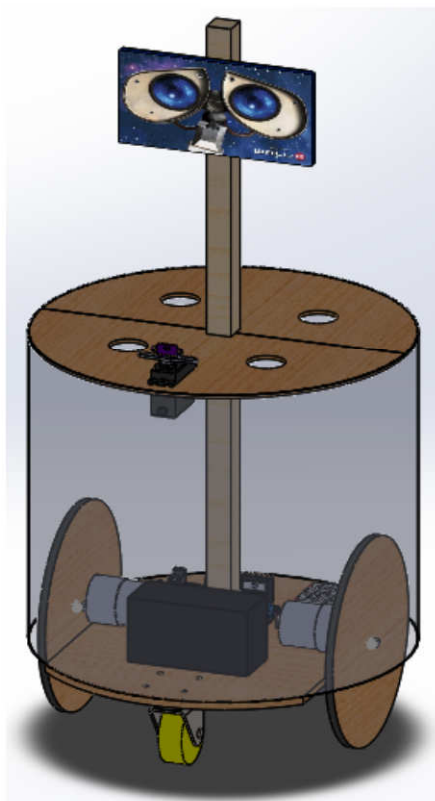
(b) Representação no Processing

Figura 58: Representação gráfica da segunda configuração da caixa de papelão com obstáculos hipotéticos 58a no software Processing 58b.

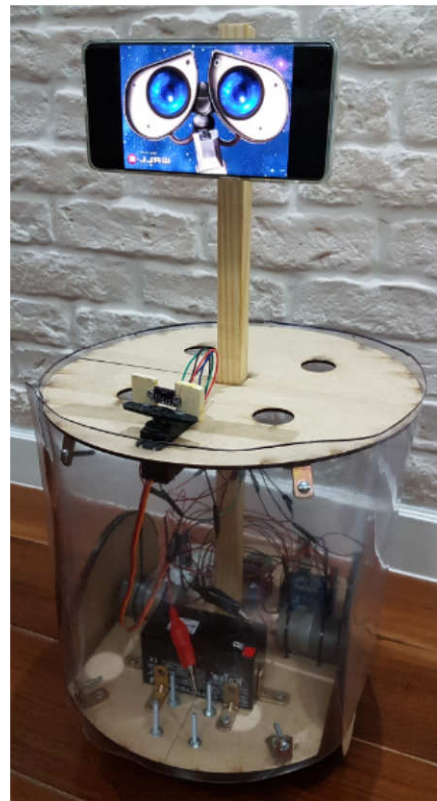
Com a simulação proposta, verifica-se que a aplicação da montagem do sensor LIDAR sobre o servomotor é aplicável no robô para varredura do ambiente, identificando obstáculos à frente, dentro de um campo angular vasto, a uma taxa de atualização das observações rápida o suficiente para impedir colisões.

17 Modelo para Validação Mecânica

Com o objetivo de avaliar se as decisões de projeto mecânico são realizáveis na prática, atendendo aos requisitos de robustez, respeitando as definições de dimensões, de formas, de movimentos, de autonomia e de segurança, concebe-se um modelo em escala reduzida. O modelo da Figura 59 permite analisar previamente a adequação do projeto estrutural às situações reais de funcionamento, de maneira menos custosa.



(a) Vista Dimétrica



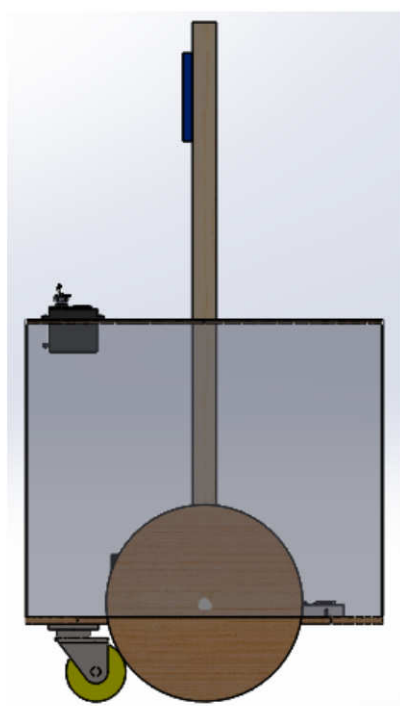
(b) Vista Dimétrica Real

Figura 59: Representação do modelo do robô em vista dimétrica, em software CAD 59a e fabricada 59b.

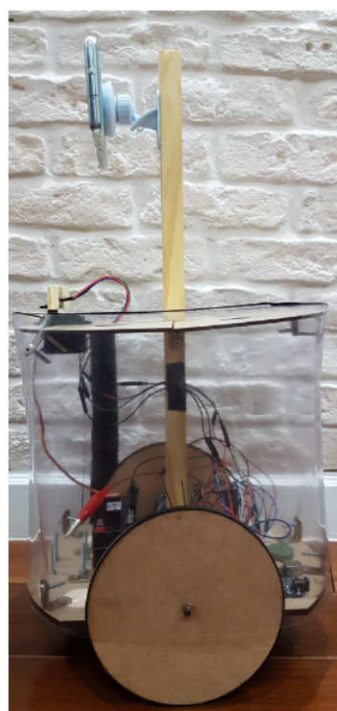
Procurou-se adaptar as dimensões do modelo para uma escala próxima de 3:5, em relação ao protótipo. Sendo assim, parte-se de uma base de 300mm de diâmetro. Para o propósito de validação, faz-se uso de um motorreductor DC de modelo 37JB6K/3530-1250 da marca MS Motor [34], o qual opera sob 12 V de tensão, a 4000 rotações por minuto, fornecendo um torque de 40 gf*cm a uma potência de 1,8 W, à redução de 1:50.

Posicionando-se o motor sobre a base, assim como fora feito no projeto do protótipo, para que uma roda centrada no eixo do motor tenha diâmetro suficiente para tocar o solo, engendra-se uma roda de 165mm de diâmetro, como evidenciado na Figura 60. Fabricam-se a base e as rodas em MDF de 6mm de espessura. Emborracham-se as rodas, para que o contato com o solo tenha aderência análoga à das rodas de hoverboards. Sob a base, fixa-se um rodízio na parte dianteira, o mesmo modelo GLAP 210 BP da marca Schioppa do protótipo.

Para facear lateralmente o robô, recobrimdo os componentes internos acima da base e abaixo das tampas, acrescenta-se uma chapa de PETG com espessura de 1mm, conformada em formato cilíndrico com 300mm de diâmetro de base e 250mm de altura. A conformação é presa por meio de fita velcro, a qual facilita montagens e desmontagens, favorecendo o acesso à parte interna. A redução de altura visa aproximar o cabeamento da montagem do sensor LIDAR sobre o servomotor, posicionada sobre a tampa dianteira, ao microcontrolador posicionado sobre a base. A lateral contorna a base, de modo que proteja internamente as rodas.

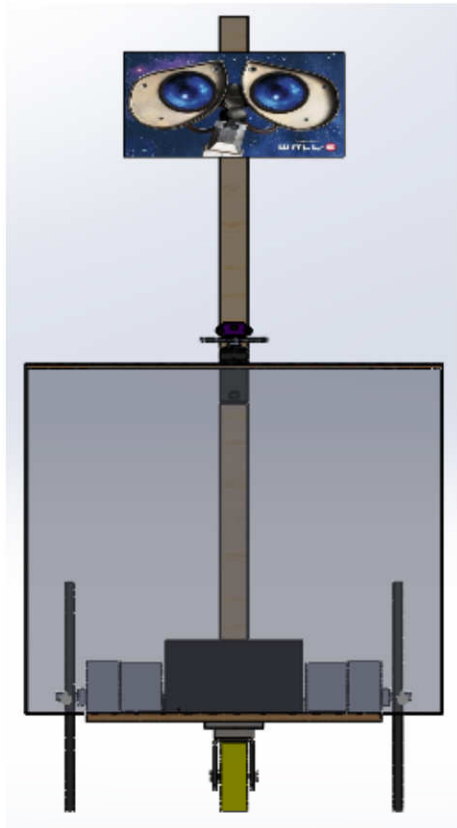


(a) Vista Lateral Direita

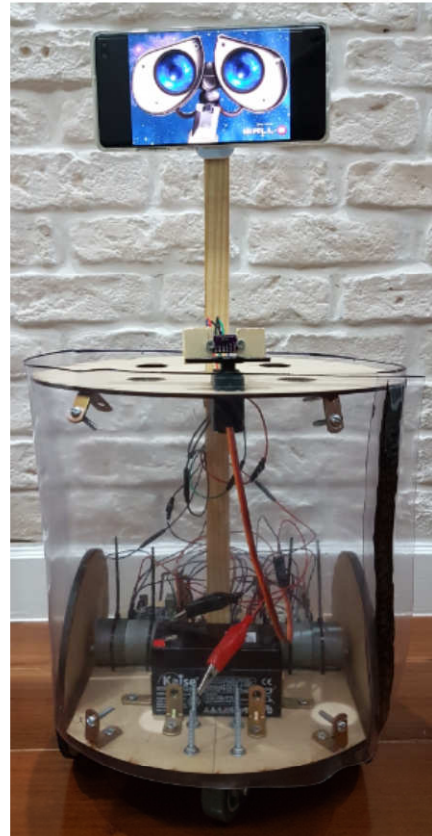


(b) Vista Lateral Direita Real

Figura 60: Representação do modelo do robô em vista lateral direita, em software CAD 60a e fabricada 60b.



(a) Vista Frontal



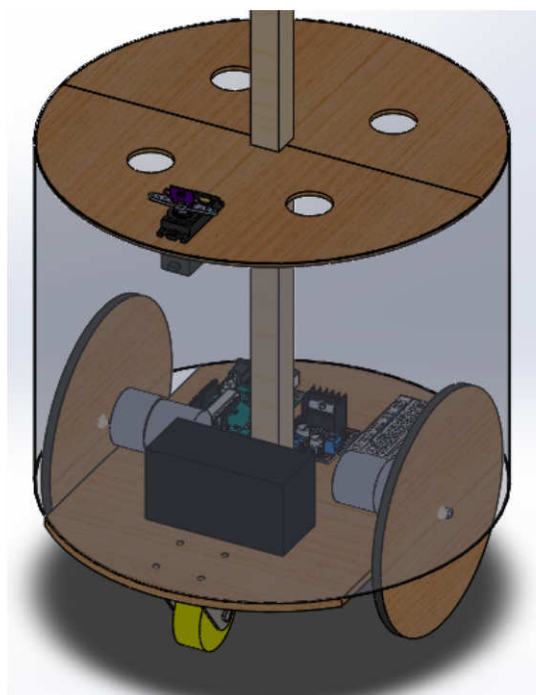
(b) Vista Frontal Real

Figura 61: Representação do modelo do robô em vista frontal, em software CAD 61a e fabricada 61b.

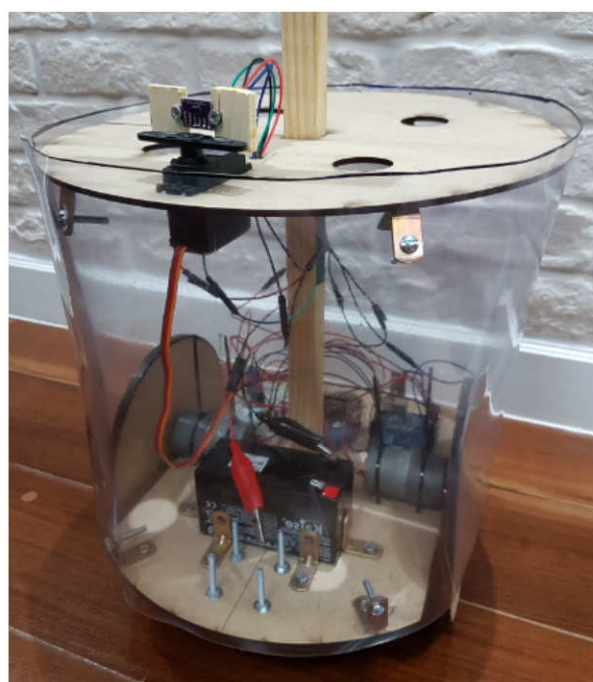
Encerra-se a parte interna do robô adicionando-se tampas superiormente, à altura de 250mm acima da base. Por se tratarem de tampas removíveis, estão simplesmente apoiadas sobre cantoneiras de sustentação. Ainda sobre a tampa dianteira instala-se a montagem do sensor LIDAR sobre o servomotor em uma abertura, conforme retratado na Figura 61, permitindo que o cabeamento circule internamente pela estrutura. Fabricam-se ambas as tampas em MDF de 3mm de espessura.

Para sustentar o monitor com a interface de comunicação com o robô, adaptado nesse caso para um telefone celular, insere-se uma coluna de madeira, de perfil quadrado de 20mm de lado, no centro da base. A coluna, de 500mm de altura, sustenta a tela em sua extremidade superior, fixa por meio de um suporte. O suporte é adesivado na coluna e liga-se ao celular magneticamente por meio de ímã.

Como o motorreductor DC exige somente 12 V de tensão, uma única bateria de 12 V com 1,2 Ah já atende à essa exigência. Coluna e bateria são fixos à base por cantoneiras, enquanto placas eletrônicas são aparafusadas na base com parafusos auto atarraxantes. Parafusos e porcas prendem o rodízio e a lateral à base. Todos esses detalhes são melhor compreendidos por meio da Figura 62.



(a) Base em Vista Trimétrica



(b) Base Real em Vista Trimétrica

Figura 62: Representação de detalhe da base do modelo do robô em vista trimétrica em software CAD 62a e fabricada 62b.

Para alimentar os motorredutores DC com tensão de 12 V, intermedia-se a bateria e os motores com uma ponte H de modelo L298N, de modo que seja possível inverter o sentido de condução da corrente elétrica, controlando-se, por conseguinte, o sentido de rotação dos motores. Além disso, a ponte H permite estabelecer comunicação PWM com o microcontrolador, configurando a velocidade de rotação dos motores.

A alimentação do microcontrolador por meio da bateria de 12 V pode se dar através da porta VIN. Complementa-se o controle de direção por meio de um módulo Bluetooth de modelo HC-05. A conexão ao microcontrolador via bluetooth habilita o envio de comandos de direção obtidos a partir de um aplicativo para telefone celular, de nome Arduino Bluetooth RC Car. Obtém-se o diagrama da Figura 63. O código encontra-se no Apêndice ao final do documento.

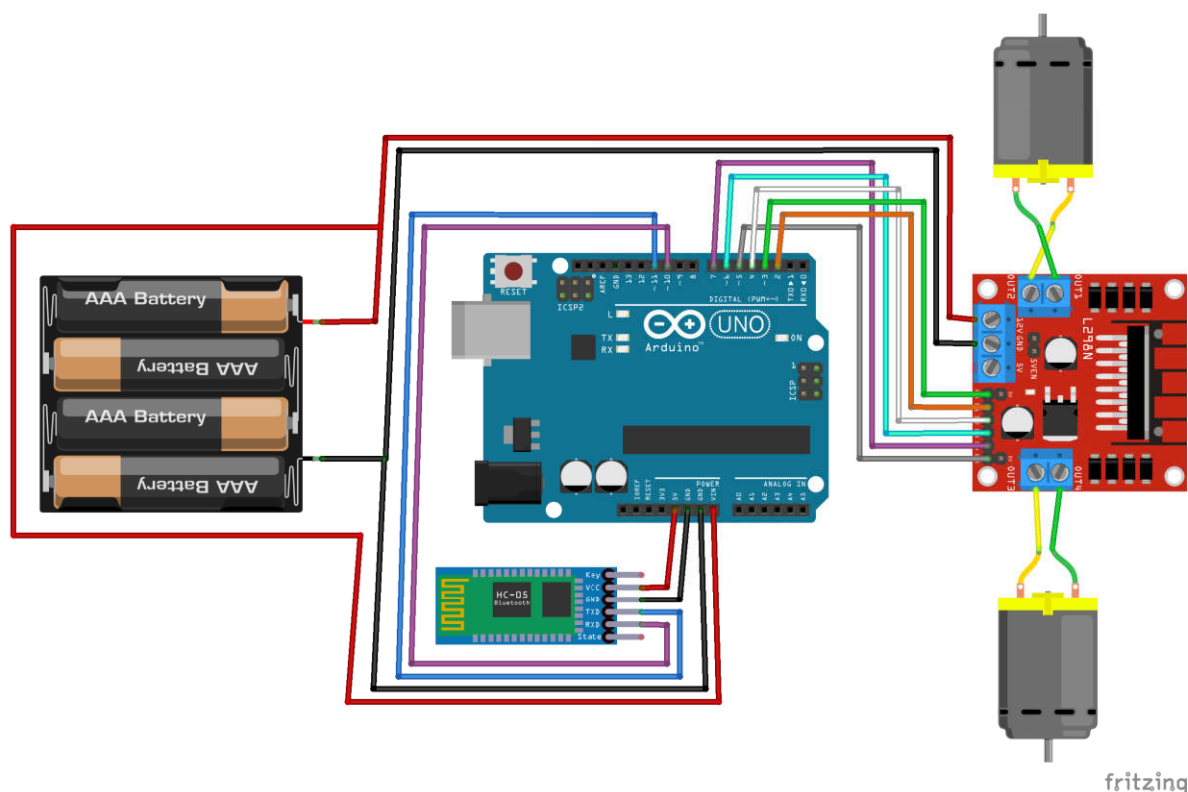


Figura 63: Diagrama do circuito para alimentação dos motores com controle de velocidade por PWM.

Implementadas as lógicas de sensoriamento de distâncias a obstáculos e de movimentação, já se pode circular pelos ambientes, evitando colisões com objetos ou pessoas.

18 Conclusão

O projeto realizado contou com o estudo mecânico do protótipo de um robô sociável de apoio ao Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, nomeado como ROSA. Ao final, para validação, construiu-se um modelo em escala reduzida.

No estudo mecânico, avaliou-se o dimensionamento do motor, definindo o motor brushless AC como o mais adequado para a aplicação desejada no cenário mais crítico. Selecionou-se o motor existente em hoverboards, o qual opera sob tensão de 36V, com potência de 350W, já acoplado a uma roda de 6,5" de diâmetro.

Discorreu-se também sobre as demandas de energia no estudo da autonomia da bateria, definindo que seriam necessárias três baterias de 12V, cada uma com 7 Ah de carga, para o robô operar durante o período de um dia letivo, sem a necessidade de interromper suas atividades.

Além disso, elaborou-se o projeto em software CAD, definindo-se as dimensões do protótipo, com o centro de massa próximo das rodas de tração e a uma altura segura para as condições dinâmicas de operação. Utiliza-se um monitor de 19", o qual permite um conforto visual de interação com o usuário. Tampas de acrílico removíveis facilitam o acesso às prateleiras internas com a eletrônica, auxiliando nas manutenções. Uma quarta roda é posicionada na parte traseira do robô, a fim de evitar tombamentos no caso de acelerações mais bruscas. Tendo no máximo 40mm de altura, impede-se que esse rodízio menor toque o solo quando o ROSA ingressar em rampas mais íngremes.

A sustentação do monitor na coluna se dá por parafusos auto atarraxantes de fenda phillips de aço inoxidável AISI 304, os quais resistem a esforços de cisalhamento. A coluna, por sua vez, resiste a esforços de arrancamento.

Sob a base do robô, posicionam-se duas cantoneiras em L como reforços estruturais extras, de alumínio 6063 T5, paralelas entre si e equidistantes do plano frontal de simetria. Elas contribuem também para baixar o centro de gravidade.

Validou-se o projeto mecânico construindo-se um modelo para uma escala de 3:5, em relação ao protótipo do ROSA. Usam-se, para a movimentação do modelo, dois motorredutores DC, os quais operam sob 12 V de tensão, a 4000 rotações por minuto, fornecendo um torque de 40 gf*cm a uma potência de 1,8 W, à redução de 1:50. Para a detecção do ambiente, buscando evitar colisões do ROSA com obstáculos, utiliza-se o sensor LIDAR de modelo VL53L0X. Para que o sensor cubra uma área de varredura segura, com amplitude angular, monta-se o sensor sobre um servomotor de modelo MG996R.

A validação do projeto mecânico demonstrou que o protótipo proposto atende às definições de projeto. A construção mecânica é realizável como foi proposta no projeto em software CAD, mantendo um centro de massa próximo das rodas de tração e a uma altura segura para as condições dinâmicas de operação. Confirmou-se que o modelo mantém a condição de manutenção do contato com o solo ininterruptamente, ou seja, o robô não perde contato com o solo, ao se movimentar.

Além disso, mesmo que a haste de sustentação do corpo do robô seja um braço de momento significativo, não há desestabilidades sob quaisquer ruídos de movimentação (vibrações indesejadas).

A detecção do ambiente e a movimentação foram testadas e funcionaram conforme o esperado, permitindo que o robô, por meio de um buzzer, indicasse uma aproximação com qualquer obstáculo no ambiente e que, por meio de um aplicativo de celular, a movimentação fosse controlada por bluetooth.

Os próximos passos do projeto são relativos à aprimoração da movimentação, mapeando o ambiente e implementando uma navegação autônoma do robô.

Referências Bibliográficas

- [1] K. Goris *et al.*, “The huggable robot Probo: design of the robotic head.” *The Society for the Study of Artificial Intelligence and Simulation of Behavior*, vol. 1, pp. 23–29, April 2008, The Second AISB Symposium on the role of virtual.
- [2] B. Ali *et al.*, “Improved method for stereo vision-based human detection for a mobile robot following a target person.” *The South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 102–119, May 2015.
- [3] R. Murphy, *An Introduction to AI Robotics*. The MIT Press, 2000, pp. 1–4, part I.
- [4] R. Siegwart and I. Nourbakhsh, *An Introduction to Autonomous Robots*. The MIT Press, 2004, pp. 13–16.
- [5] J. Saldien *et al.*, “Expressing emotions with the social robot Probo.” *International Journal of Social Robotics*, vol. 2, no. 4, pp. 377–389, December 2010.
- [6] R. Gockley *et al.*, “Designing robots for long-term social interaction.” *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, December 2005.
- [7] Y. Nakauchi and R. Simmons, “A social robot that stands in line.” *Autonomous Robots*, vol. 12, no. 3, pp. 313–324, May 2002.
- [8] M. Scheeff, “Experiences with Sparky: A social robot.” *Proceedings of the 2000 Workshop on Interactive Robotics and Entertainment*, pp. 143–150, April 2000.
- [9] K. Hirai *et al.*, “The development of Honda humanoid robot.” *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 1998.
- [10] R. Gudwin *et al.*, “The TROCA project: An autonomous transportation robot controlled by a cognitive architecture.” *Cognitive Systems Research*, vol. 59, pp. 179–197, 2020.

- [11] Z. Li *et al.*, "Intelligent tracking obstacle avoidance wheel robot based on arduino." *Procedia Computer Science*, vol. 166, pp. 274–278, 2020.
- [12] A. Chrzahowski *et al.*, "Intelligent autonomous robot supporting small pets in domestic environment." *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 8, pp. 194–199, 2019.
- [13] S. Kim and S. Kwon, "Dynamic modeling of a two-wheeled inverted pendulum balancing mobile robot." *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 926–933, August 2015.
- [14] D. Lee *et al.*, "Dynamics and control of non-holonomic two wheeled inverted pendulum robot." *International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 8th)*, January 2003.
- [15] H. Lee and S. Jung, "Balancing and navigation control of a mobile inverted pendulum robot using sensor fusion of low cost sensors." *Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 95–105, February 2012.
- [16] T. Takei *et al.*, "Baggage transportation and navigation by a wheeled inverted pendulum mobile robot." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 3985–3994, October 2009.
- [17] IBGE, "Tabela 2645 - Estimativas populacionais das medianas de altura e peso de crianças, adolescentes e adultos, por sexo, situação do domicílio e idade - Brasil e Grandes Regiões." IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. SIDRA Sistema IBGE de Recuperação Automática. Pesquisa de Orçamentos Familiares, 2008, acesso em 27 de novembro de 2019. [Online]. Available: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/2645>
- [18] E. de Queiroz Noleto (organizador), [Consolidação das leis do trabalho (CLT) (1943)]. *CLT: Consolidação das leis do trabalho [recurso eletrônico]*, BRASIL. Brasília: Câmara dos Deputados. Edições Câmara, 2018.
- [19] L. L. LongIII and M. Srinivasan, "Walking, running, and resting under time, distance, and average speed constraints: optimality of walk - run - rest mixtures." *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 10, no. 81, April 2013.

- [20] A. V. Andrade-Neto *et al.*, “Rolamento e atrito de rolamento ou por que um corpo que rola pára.” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 35, no. 3, pp. 1–4, September 2013.
- [21] J. J. C. Chua *et al.*, “Rolling friction of a rugby wheelchair.” *Procedia Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 3071–3076, June 2010, 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA).
- [22] P. A. Sigler, *Building Materials and Structures. Report BMS100. Relative Slipperiness of Floor and Deck Surfaces*, United States Department of Commerce - National Bureau of Standards, July 1943.
- [23] M. L. Pinheiro, “Acionamento de motor síncrono de ímãs permanentes (MSIP) em embarcações com sistema de propulsão elétrica.” Master’s thesis, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, March 2013.
- [24] S. Sekalala, “Performance of a three-phase permanent magnet motor operating as a synchronous motor and a brushless DC motor.” Master’s thesis, submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2006.
- [25] I. Buchmann, *Batteries in a portable world: a handbook on rechargeable batteries for non-engineers*, 4th ed. British Columbia: Cades Electronics Inc., 2016, 360 pages.
- [26] Unipower, *Manual Técnico. Série UP. Bateria Chumbo-Ácida Selada Regulada por Válvula*, Unicoba, September 2005, acesso em 06 de maio de 2020. [Online]. Available: <https://www.robocore.net/upload/ManualTecnicoBateriaUnipower.pdf>
- [27] Intelbras, *Datasheet: Bateria Chumbo-Ácida Regulada por Válvula (VRLA) 12V 7Ah XB 1270*, acesso em 06 de maio de 2020. [Online]. Available: <https://www.intelbras.com/pt-br/bateria-de-chumbo-acido-12v-xb-1270>
- [28] Ciser, *Catálogo de Produtos. Inox 304 - Parafuso auto atarraxante - Fenda Phillips*, Ciser Parafusos e Porcas, pp. 43a. Acesso em 17 de junho de 2020. [Online]. Available: www.ciser.com.br

- [29] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica*, 8th ed. MacGrawHill, 2011, ch. 8, pp. 421–482.
- [30] J. M. Gere and B. J. Goodno, *Mecânica dos Materiais*, 2nd ed. Cengage Learning, 2010, ch. 5, pp. 301–359, tradução da 7ª edição norte-americana.
- [31] R. H. Bishop, *The Mechatronics Handbook*. CRC Press, in cooperation with ISA Press (The Instrumentation, Systems and Automation Society), 2002, ch. 19.7, pp. 460–466.
- [32] STMicroelectronics, *VL53L0X World's smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor - Datasheet - production data*, April 2018, acesso em 22 de novembro de 2020. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>
- [33] TowerPro, *MG996R High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo*, acesso em 22 de novembro de 2020. [Online]. Available: <https://storage.googleapis.com/baudaeletronicadatasheet/MG996R.pdf>
- [34] M. Motor, *PM DC Spur Gearmotor 37JB6K/3530 - Datasheet*, acesso em 26 de novembro de 2020. [Online]. Available: <https://www.datasheetarchive.com/pdf/download.php?id=f605401cdc5abce01776377e4f2f1db7f4e378&type=P&term=37JB6K>
- [35] A. Abhi, *Arduino LIDAR*, acesso em 26 de novembro de 2020. [Online]. Available: https://create.arduino.cc/projecthub/Abhinav_Abhi/arduino-lidar-917404

19 Apêndice: Código em APDL da Análise Modal

/CLEAR

```
! Variaveis (Todas as Unidades no SI)
modulo_elast = 68.9e9 ! [Pa] = Modulo de Elasticidade
! adimensional = Coeficiente de Poisson
coef_poisson = 0.33
densidade = 2700 ! [kg/m^3] = Densidade
acol = 0.1016 ! [m] = Aresta Externa da Coluna
! [m] = Espessura da Parede da Coluna
ecol = 0.0025
! Modela-se a Base como uma Secao Transversal com
! Largura igual ao Diametro
abase = 0.5 ! [m] = Largura da Base
ebase = 0.004 ! [m] = Espessura da Base
lcol = 1.5 ! [m] = Comprimento da Coluna
lbase = 0.5 ! [m] = Comprimento da Base
! adimensional = Comprimento das Discretizacoes do Portico
disc = 0.005
! adimensional = Numero de Modos de Vibrar
num_modos = 10
```

```
! Inicio do Preprocessamento
/PREP7
```

```
! Definindo o Material
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,modulo_elast
MPDATA,PRXY,1,,coef_poisson
MPDATA,DENS,1,,densidade
```

```
! Cadastrando BEAM188 (Portico) como Elemento 1
ET,1,BEAM188
```

```
! Cadastrando Secao 1 (Base)
```

```

SECTYPE,1,BEAM,RECT,,0
SECOFFSET,CENT
SECDATA,abase,ebase,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0

! Cadastrando BEAM188 (Portico) como Elemento 2
ET,2,BEAM188

! Cadastrando Secao 2 (Coluna)
SECTYPE,2,BEAM,HREC,,0
SECOFFSET,CENT
SECDATA,acol,acol,ecol,ecol,ecol,ecol,0,0,0,0,0,0

! Criando os Keypoints
K,1,0,0,0
K,2,lbase,0,0
K,3,lbase/2,0,0
K,4,lbase/2,lcol,0

! Criando as Linhas
L,1,3
L,3,2
L,3,4

! Malhagem
! Elemento 1 (Base)
TYPE,1
MAT,1
SECNUM,1
! Divisao das Barras em Elementos de Comprimento disc
ESIZE,disc,0,
! Divisao das Barras em disc Elementos
! ESIZE,0,disc,
LMESH,1,2,1
! Elemento 2 (Coluna)
TYPE,2
MAT,1

```



```

SECNUM,2
! Divisao das Barras em Elementos de Comprimento disc
ESIZE, disc, 0,
! Divisao das Barras em disc Elementos
! ESIZE, 0, disc,
LMESH, 3, , 1

! Fim do Preprocessamento
FINISH

! Inicio da Solucao
/SOL

! Analise Modal
ANTYPE, 2

! Numero de modos de vibrar escolhido
MODOPT, LANB, num_modos

! Carregamento em No
! Restringe o Apoio A nas Direcoes x e y
D, 13, , 0, , , , UX, UY, , , ,
! Restringe o Apoio B na Direcao y
D, 69, , 0, , , , UY, , , , ,
! Restringe o Engaste da Coluna na Base nas Direcoes x e y
D, 2, , 0, , , , UX, UY, , , ,

! Problema 2D Plano
! Restringe TODOS os Nos na Direcao z
D, ALL, , 0, , , , UZ, , , , ,

SOLVE

```

20 Apêndice: Código em APDL da Análise Harmônica

/CLEAR

! Variaveis (Todas as Unidades no SI)

modulo_elast = 68.9e9 ! [Pa] = Modulo de Elasticidade

! adimensional = Coeficiente de Poisson

coef_poisson = 0.33

densidade = 2700 ! [kg/m^3] = Densidade

acol = 0.1016 ! [m] = Aresta Externa da Coluna

! [m] = Espessura da Parede da Coluna

ecol = 0.0025

! Modela-se a Base como uma Secao Transversal com

! Largura igual ao Diametro

abase = 0.5 ! [m] = Largura da Base

ebase = 0.004 ! [m] = Espessura da Base

lcol = 1.5 ! [m] = Comprimento da Coluna

lbase = 0.5 ! [m] = Comprimento da Base

! adimensional = Comprimento das Discretizacoes do Portico

disc = 0.005

! adimensional = Numero de Discretizacoes no Tempo

num_substeps = 1000

! adimensional = Numero de Modos de Vibrar

num_modos = 10

! [N] = Forca Inercial aplicada no Centro de Gravidade

FR = 12.735

P = 254.7 ! [N] = Forca Peso

! [Hz] = Frequencia de Inicio da Analise Harmonica

f_0 = 45

! [Hz] = Frequencia de Fim da Analise Harmonica

f_f = 350

! Inicio do Preprocessamento

/PREP7

! Definindo o Material

```

MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,modulo_elast
MPDATA,PRXY,1,,coef_poisson
MPDATA,DENS,1,,densidade

! Cadastrando BEAM188 (Portico) como Elemento 1
ET,1,BEAM188

! Cadastrando Secao 1 (Base)
SECTYPE,1,BEAM,RECT,,0
SECOFFSET,CENT
SECDATA,abase,ebase,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0

! Cadastrando BEAM188 (Portico) como Elemento 2
ET,2,BEAM188

! Cadastrando Secao 2 (Coluna)
SECTYPE,2,BEAM,HREC,,0
SECOFFSET,CENT
SECDATA,acol,acol,ecol,ecol,ecol,ecol,0,0,0,0,0,0

! Criando os Keypoints
K,1,0,0,0
K,2,lbase,0,0
K,3,lbase/2,0,0
K,4,lbase/2,lcol,0

! Criando as Linhas
L,1,3
L,3,2
L,3,4

! Malhagem
! Elemento 1 (Base)
TYPE,1
MAT,1

```

```

SECNUM,1
! Divisao das Barras em Elementos de Comprimento disc
ESIZE, disc, 0,
! Divisao das Barras em disc Elementos
! ESIZE, 0, disc,
LMESH, 1, 2, 1
! Elemento 2 (Coluna)
TYPE, 2
MAT, 1
SECNUM, 2
! Divisao das Barras em Elementos de Comprimento disc
ESIZE, disc, 0,
! Divisao das Barras em disc Elementos
! ESIZE, 0, disc,
LMESH, 3, , 1

! Fim do Preprocessamento
FINISH

! Inicio da Solucao
/SOL

! Analise Harmonica
ANTYPE, 3

! Intervalo de Frequencias da Analise Harmonica
HARFRQ, f_0, f_f,
NSUBST, num_substeps,      ! Discretizacao do Tempo

! Carregamento STEPPED
KBC, 1

OUTRES, ALL, ALL           ! Gera Relatorios dos Resultados

! Carregamento em No
! Restringe o Apoio A nas Direcoes x e y

```



```

D,13, ,0, , , ,UX,UY, , , ,
! Restringe o Apoio B na Direcao y
D,69, ,0, , , ,UY, , , , ,
! Restringe o Engaste da Coluna na Base nas Direcoes x e y
D,2, ,0, , , ,UX,UY, , , ,

! Problema 2D Plano
! Restringe TODOS os Nos na Direcao z
D,ALL, ,0, , , ,UZ, , , , ,

/GO
F,196,FX,FR
F,60,FY,-P

SOLVE

```

21 Apêndice: Código em Arduino da Movimentação

```
1 // Library to communicate with I2C/TWI devices
2 // Pin A4 (SDA, data line) and pin A5 (SCL, clock
  line)
3 #include <Wire.h>
4 // Library for the Time-of-Flight distance sensor
5 #include "Adafruit_VL53L0X.h"
6 // Library to control RC servo motors
7 #include <Servo.h>
8 // Library to allow serial communication on other
  digital pins than 0 and 1
9 #include <SoftwareSerial.h>
10
11 // Object for the Time-of-Flight distance sensor
12 Adafruit_VL53L0X vl = Adafruit_VL53L0X();
13 Servo myservo;          // Object for the servo motor
14
15 // Pins for the Motor on the Right
16 int IN1 = 2;             // Pin to determine the
  direction of rotation
17 int IN2 = 4;             // Pin to determine the
  direction of rotation
18 int velocidadeA = 3; // Pin for the PWM signal,
  changing velocity
19
20 // Pins for the Motor on the Left
21 int IN3 = 6;             // Pin to determine the
  direction of rotation
22 int IN4 = 7;             // Pin to determine the
  direction of rotation
23 int velocidadeB = 5; // Pin for the PWM signal,
  changing velocity
24
25 float pos = 0;          // Variable for the angular
  position of the servo motor
```

```

26 const float pi = 3.14159;
27
28 const int buzzer = 8; // Pin for the Buzzer
29
30 SoftwareSerial BlueTooth(11, 10); // New software
    serial -> (TXD, RXD) of HC-05
31 char BT_input; // Storage of
    input character received via BT
32
33 void setup(){
34     Serial.begin(9600); // Inicialization of
        the hardware serial
35     BlueTooth.begin(9600); // Inicialization of
        the software serial
36
37     pinMode(IN1, OUTPUT); // Configuring pin as
        an output
38     pinMode(IN2, OUTPUT); // Configuring pin as
        an output
39     pinMode(IN3, OUTPUT); // Configuring pin as
        an output
40     pinMode(IN4, OUTPUT); // Configuring pin as
        an output
41     pinMode(velocidadeA, OUTPUT); // Configuring pin as
        an output
42     pinMode(velocidadeB, OUTPUT); // Configuring pin as
        an output
43
44     myservo.attach(9); // Attaches the servo on pin 9
        to the servo object
45     pinMode(buzzer, OUTPUT); // Configuring pin as
        an output
46
47     // Waiting until the serial port opens for native
        USB devices
48     while (! Serial){

```

```

49     delay(1);
50 }
51 Serial.println("Adafruit_VL53L0X_will_be_initiated
    ");
52 // Checking if the Time-of-Flight distance sensor
    has been inicialized
53 if (! vl.begin(0x29, true)){
54     Serial.println("Adafruit_VL53L0X_was_
        successfully_recognized");
55     Serial.println(F("Failed_to_boot_VL53L0X"));
56     while (1);
57 }
58 }
59
60 void loop() {
61
62     // While there is data coming in, read it and send
        to the hardware serial port
63     if (BlueTooth.available()) {
64         BT_input = BlueTooth.read();
65         if (BT_input=='F') {
66             // Moving forward
67             digitalWrite(IN1, HIGH);           // Moving the
                Motor on the Right forward
68             digitalWrite(IN2, LOW);           // Moving the
                Motor on the Right forward
69             analogWrite(velocidadeA, 100); // PWM signal
                -> velocity of the Motor on the Right
70             digitalWrite(IN3, LOW);           // Moving the
                Motor on the Left forward
71             digitalWrite(IN4, HIGH);           // Moving the
                Motor on the Left forward
72             analogWrite(velocidadeB, 140); // PWM signal
                -> velocity of the Motor on the Left
73         }
74         else if (BT_input=='B') {

```



```

75     // Moving backward
76     digitalWrite(IN1, LOW);           // Moving the
        Motor on the Right backward
77     digitalWrite(IN2, HIGH);          // Moving the
        Motor on the Right backward
78     analogWrite(velocidadeA, 100); // PWM signal
        -> velocity of the Motor on the Right
79     digitalWrite(IN3, HIGH);          // Moving the
        Motor on the Left backward
80     digitalWrite(IN4, LOW);           // Moving the
        Motor on the Left backward
81     analogWrite(velocidadeB, 140); // PWM signal
        -> velocity of the Motor on the Left
82 }
83 else if (BT_input=='R'){
84     // Moving to the right
85     digitalWrite(IN1, LOW);           // Moving the
        Motor on the Right to the right
86     digitalWrite(IN2, HIGH);          // Moving the
        Motor on the Right to the right
87     analogWrite(velocidadeA, 100); // PWM signal
        -> velocity of the Motor on the Right
88     digitalWrite(IN3, LOW);           // Moving the
        Motor on the Left to the right
89     digitalWrite(IN4, HIGH);          // Moving the
        Motor on the Left to the right
90     analogWrite(velocidadeB, 100); // PWM signal
        -> velocity of the Motor on the Left
91 }
92 else if (BT_input=='L'){
93     // Moving to the left
94     digitalWrite(IN1, HIGH);          // Moving the
        Motor on the Right to the left
95     digitalWrite(IN2, LOW);           // Moving the
        Motor on the Right to the left
96     analogWrite(velocidadeA, 100); // PWM signal

```

```

    -> velocity of the Motor on the Right
97     digitalWrite(IN3, HIGH);          // Moving the
        Motor on the Left to the left
98     digitalWrite(IN4, LOW);           // Moving the
        Motor on the Left to the left
99     analogWrite(velocidadeB, 100); // PWM signal
        -> velocity of the Motor on the Left
100 }
101 else {
102     // Standing still
103     digitalWrite(IN1, LOW);           // Standing still
        the Motor on the Right
104     digitalWrite(IN2, LOW);           // Standing still
        the Motor on the Right
105     analogWrite(velocidadeA, 0); // PWM signal ->
        velocity of the Motor on the Right
106     digitalWrite(IN3, LOW);           // Standing still
        the Motor on the Left
107     digitalWrite(IN4, LOW);           // Standing still
        the Motor on the Left
108     analogWrite(velocidadeB, 0); // PWM signal ->
        velocity of the Motor on the Left
109 }
110 }
111
112 myservo.write(pos); // Setting the angle of the
        shaft in degrees
113 pos += 10;
114 VL53L0X_RangingMeasurementData_t measure;
115 uint8_t range = vl.readRange(); // Reading the
        distance from the sensor
116
117 // Avoiding phase failures, which have incorrect
        data
118 if (measure.RangeStatus != 4) {
119     Serial.println("Distance:_" + String(range));

```

```

120     // Serial.println("Angle in Radians: "+String(
        pos*pi/180));
121     Serial.println("Angle_in_Degrees:_"+String(pos))
        ;
122     /*
123     // Emission of noise alert for collision
        avoidance
124     if (range <= 80){
125         // Generation of a square wave of the
            specified frequency
126         tone(buzzer,1000); // 1000 Hz on pin buzzer
127         delay(50);         // Duration of the emitted
            signal
128         noTone(buzzer);    // Stop generation of the
            square wave
129     }
130     */
131 }
132
133 // Returning to the beginning of the angular
    orientation
134 if (pos == 180){
135     pos = 0;
136     myservo.write(pos);
137     delay(800); // At 4,8 V, the operating speed is
        of 0,17s/60
138 }
139 }

```

22 Anexo: Código em Arduino da montagem do sensor LIDAR sobre o servomotor

Extraído de [35].

```
1 // Library to communicate with I2C/TWI devices
2 // Pin A4 (SDA, data line) and pin A5 (SCL, clock
  line)
3 #include <Wire.h>
4 // Library for the Time-of-Flight distance sensor
5 #include "Adafruit_VL53L0X.h"
6 // Library to control RC servo motors
7 #include <Servo.h>
8
9 // Object for the Time-of-Flight distance sensor
10 Adafruit_VL53L0X vl = Adafruit_VL53L0X();
11 Servo myservo;           // Object for the servo
  motor
12
13 float pos = 0; // Variable for the angular position
  of the servo motor
14 const float pi = 3.14159;
15
16 const int buzzer = 8;      // Pin for the Buzzer
17
18 void setup() {
19   Serial.begin(9600);      // Inicialization of the
  hardware serial
20
21   myservo.attach(9);       // Attaches the servo on
  pin 9 to the servo object
22   pinMode(buzzer, OUTPUT); // Configuring pin as an
  output
23
24   // Waiting until the serial port opens for native
  USB devices
25   while (! Serial) {
```



```

26     delay(1);
27 }
28 Serial.println("Adafruit_VL53L0X_will_be_initiated
    ");
29 // Checking if the Time-of-Flight distance sensor
    has been inicialized
30 if (! vl.begin(0x29, true)){
31     Serial.println("Adafruit_VL53L0X_was_
        successfully_recognized");
32     Serial.println(F("Failed_to_boot_Adafruit_
        VL53L0X"));
33     while (1);
34 }
35 }
36
37 void loop() {
38     for (pos = 0; pos <= 180; pos += 1){
39         myservo.write(pos); // Setting the angle of the
            shaft in degrees
40         uint8_t range = vl.readRange(); // Reading the
            distance from the sensor
41         // Distance + Angle in Radians + Angle in
            Degrees
42         Serial.println(String(range)+"p"+String(pos*pi
            /180)+"p"+String(pos));
43
44         // Emission of noise alert for collision
            avoidance
45         if (range <= 80){
46             // Generation of a square wave of the
                specified frequency
47             tone(buzzer,1000); // 1000 Hz on pin buzzer
48             delay(50);          // Duration of the emitted
                signal
49             noTone(buzzer);     // Stop generation of the
                square wave

```

```

50     }
51     delay(10);
52 }
53 /*
54 for (pos = 180; pos >= 0; pos -= .5){
55     myservo.write(pos); // Setting the angle of the
        shaft in degrees
56     uint8_t range = vl.readRange(); // Reading the
        distance from the sensor
57     // Distance + Angle in Radians + Angle in
        Degrees
58     Serial.println(String(range)+"p"+String(pos*Pi
        /180)+"p"+String(pos));
59     delay(10);
60 }
61 */
62 // Returning to the beginning of the angular
    orientation
63 pos = 0;
64 myservo.write(pos);
65 delay(1000); // At 4,8 V, the operating speed is
    of 0,17s/60
66 }

```

23 Anexo: Código em Processing da montagem do sensor LIDAR sobre o servomotor

Extraído de [35].

```
1 import processing.serial.*; // Library to establish
  serial communication
2 Serial myPort; // New software serial
3
4 String val;
5 int range,i=0;
6 float pos; // Variable for the angular position of
  the servo motor
7
8 void setup(){
9   // Defines the dimension of the display window
  width and height in units of pixels
10  size(550,500);
11  String portName = "COMx"; // x = the Arduino port
  number
12  myPort = new Serial(this, portName, 115200);
13  // Sets the color used for the background of the
  Processing window
14  background(255);
15 }
16
17 void draw(){
18   // Check if there is an Arduino connected to the
  referred port number
19   if (myPort.available() > 0) {
20     // Reads from the port into a buffer of
  characters up to and including a particular
  character
21     val = myPort.readStringUntil('\n');
22     // If the character isn't in the buffer, null is
  returned
23     if (val!=null){
```

```

24     String[] nums = split(val,"p"); // Splitting
        the received data separated by 'p'
25     if (nums.length==3){
26         range = int(nums[0]); // Distance in
            millimeters (string to integer conversion)
27         pos = float(nums[1]); // Angular position in
            radians
28         i = int(nums[2]);      // Angular position in
            degrees
29         // Resets the servo motor to its initial
            angular position
30         if (i == 180){
31             // Sets the color used for the background
                of the Processing window
32             background(255);
33         }
34     }
35 }
36 }
37 // Specifies an amount to displace objects within
    the display window
38 // The x parameter specifies left/right
    translation
39 // The y parameter specifies up/down translation
40 translate(25,-50);
41 // Draws a line (a direct path between two points)
    to the screen
42 line(250,500,250-2*(range*cos(pos)),500-2*(range*
    sin(pos)));
43 }

```