



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

Instrumentação de cadeira de rodas motorizada para usuários com tetraplegia

Autor: Mônica Damasceno Cavalcante Castelo Branco
Orientador: Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda

Brasília, DF
2018



Mônica Damasceno Cavalcante Castelo Branco

Instrumentação de cadeira de rodas motorizada para usuários com tetraplegia

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda

Coorientador: Dr. Rudi Henry van Els

Brasília, DF

2018

Mônica Damasceno Cavalcante Castelo Branco
Instrumentação de cadeira de rodas motorizada para usuários com tetraplegia/
Mônica Damasceno Cavalcante Castelo Branco. – Brasília, DF, 2018-
76 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2018.

1. Instrumentação Eletrônica. 2. Sensores. I. Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Instrumentação de cadeira de rodas motorizada para usuários com tetraplegia

CDU 02:141:005.6

Mônica Damasceno Cavalcante Castelo Branco

Instrumentação de cadeira de rodas motorizada para usuários com tetraplegia

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 03 de julho de 2018:

Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda
Orientador

Prof. Marcelino Andrade
Convidado 1

Prof. Guillermo Alvarez Bestard
Convidado 2

Brasília, DF
2018

Dedico este trabalho aos meus pais Raimundo Nogueira e Silvana por toda dedicação, esforço, empenho e amor empregado na minha educação e na dos meus irmãos.

Agradecimentos

A Deus pela vida e por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades encontradas ao longo do caminho.

Ao meu orientador Daniel Muñoz, pela orientação, compreensão e ensinamentos transmitidos ao longo dos últimos ano.

Aos meus pais Raimundo Nogueira e Silvana por toda a dedicação e carinho que recebi ao longo de toda a minha vida.

Aos meus irmãos Bruno e Camila Damasceno, por todas as vezes que me ajudaram a estudar para provas, que me escutaram e me incentivaram a ser melhor.

Ao Alceu Castanheira, meu namorado, que tem sido meu porto seguro. Agradeço pela paciência, pelo carinho, pelo amor e por me inspirar, todos os dias, a ser uma pessoa melhor.

Ao Lucas Martins, por todos os conhecimentos transmitidos nos últimos meses e pela ajuda fundamental na finalização do trabalho.

A todos os meus familiares, pelo apoio, por compreenderem as minhas ausências e por serem acolhedores na minha presença.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

*“Importa, porém, caminhar hoje,
amanhã, e no dia seguinte (...)”
Jesus (Lucas 13:33)*

Resumo

A tecnologia está sendo cada vez mais aplicada na melhoria da qualidade de vida das pessoas. Um dos ramos que tem sido bastante desenvolvido é o da robótica móvel. Pensando nas possibilidades que ela pode oferecer à qualidade de vida das pessoas que dependem de cadeira de rodas, o presente trabalho apresenta uma proposta de instrumentação de uma cadeira de rodas manual já motorizada, utilizando elementos da robótica móvel para projetar uma cadeira na qual os usuários com tetraplegia possam futuramente usufruir de uma maior liberdade de locomoção. O projeto de instrumentação têm por objetivos determinar a distância que a cadeira está de obstáculos e detectar desníveis na frente e atrás da cadeira. Para isso, foram instalados sensores de ultrassom e infravermelhos em um Arduino Mega ADK que irá ler os dados dos sensores e processar as informações aplicando o Filtro de Kalman e realizando a fusão sensorial, quando necessário. Com o auxílio de uma impressora 3D e outros materiais recicláveis, projetou-se suportes para comportar os sensores nos locais mais adequados da cadeira. Os resultados obtidos apresentam as vantagens e desvantagens de utilizar os sensores selecionados, além de permitir uma análise sobre a estrutura utilizada para fixar os sensores na cadeira de rodas manual.

Palavras-chaves: Cadeira de rodas, Instrumentação, Filtro de Kalman.

Abstract

Technology has been increasingly applied in order to improve quality of life of people. One of the main areas that has been developed is mobile robotics. Thinking on the possibilities that it could do improve quality of life of people who depend on the use of wheelchairs, this work presents a proposal of instrumentation of a motorized wheelchair, using elements of mobile robotics to design a wheelchair that enables quadriplegic users to enjoy more freedom of locomotion. The instrumentation project goals include determining the distance between the wheelchair and its obstacles as well as detecting gaps located at its frontal and rear parts. In order to do that, ultrasound and infrared sensors were installed on an Arduino Mega ADK, which reads the sensor data and processes its information applying a Kalman Filter, as well as sensor fusion when necessary. Using a 3D printer and other recyclable materials, supports for the sensors were designed to place sensors at the most adequate locations of the wheelchair. The results obtained present the advantages and disadvantages of using the selected sensors. Also, they allow an analysis about the structure used to set the sensors on a manual wheelchair.

Key-words: Wheelchair, Instrumentation, Kalman Filter.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Cadeira de rodas Wheelesley. Fonte:(YANCO et al., 1995)	30
Figura 2 – Cadeira de rodas autônoma Bremen. Fonte:(ROFER; LANKENAU, 2000)	30
Figura 3 – Princípio de funcionamento de um sensor de ultrassom	33
Figura 4 – Princípio de funcionamento de um sensor infravermelho	34
Figura 5 – Algoritmo do Filtro de Kalman. Traduzido de: (WELCH; BISHOP, 1995)	35
Figura 6 – Filtro de Kalman aplicado a um dado obtido pelo sensor de ultrassom .	38
Figura 7 – Filtro de Kalman aplicado a um dado obtido pelo sensor infravermelho	38
Figura 8 – Fusão sensorial	39
Figura 9 – Diagrama de Blocos dos sensores utilizados.	41
Figura 10 – Sensor ultrasônico HC-SR04. Fonte: (Felipe Flop, 2016)	42
Figura 11 – Sensor Sharp GP2Y0A60SZLF. Fonte: (POLOLU, 2017)	43
Figura 12 – Arduino MEGA ADK. Fonte: (ARDUINO, 2018)	43
Figura 13 – Visão geral da ligação do sistema de sensores. As linhas contínuas cinzas representam os cabos de rede que conectam a placa central às placas periféricas, enquanto a linha tracejada ilustra o cabo de alimentação dos sensores da placa frontal. Já a linha contínua mais escura liga a placa central à alimentação e ao computador no qual será possível ter acesso aos dados via serial. As linhas pontilhadas se referem ao barramento dos sensores, que possuem 4 pinos cada um.	45
Figura 14 – Placas montadas	46
Figura 15 – Descrição dos pinos de cada conector dos sensores nas placas frontal e laterais	47
Figura 16 – Descrição dos pinos de cada conector dos sensores na placa central . . .	47
Figura 17 – Estrutura externa do suporte frontal	49
Figura 18 – Estrutura externa dos suportes laterais (vista frontal e inferior)	49
Figura 19 – Estrutura interna do suporte frontal	49
Figura 20 – Estrutura interna dos suportes laterais	49
Figura 21 – Vista superior da estrutura para calibração dos sensores frontais	50
Figura 22 – Vista frontal da estrutura para calibração dos sensores frontais	50
Figura 23 – Vista frontal da estrutura para calibração dos sensores laterais	50
Figura 24 – Curva de calibração dos sensores UL 1, 2 e 3	51
Figura 25 – Curva de calibração dos sensores UL 4 e 5	51
Figura 26 – Curva de calibração dos sensores UL 6 e 7	52
Figura 27 – Curva de calibração dos sensores UL 8 e 9	52
Figura 28 – Curva de calibração polinomial dos sensores IR 1, 2 e 3	53

Figura 29 – Curva de calibração exponencial dos sensores IR 1, 2 e 3	53
Figura 30 – Curva de calibração do sensor IR 1	54
Figura 31 – Curva de calibração do sensor IR 2	54
Figura 32 – Curva de calibração do sensor IR 3	55
Figura 33 – Vista superior dos suportes frontal e laterais	56
Figura 34 – Sensores IRs da parte de trás	56
Figura 35 – Visão frontal, lateral e traseira da cadeira antes e depois da instalação dos sensores.	57
Figura 36 – Menu	58
Figura 37 – Exemplo de apresentação dos dados na serial do Arduino	58
Figura 38 – Cenário de teste 1	61
Figura 39 – Cenário de teste 2	63
Figura 40 – Cenário de teste 3	65
Figura 41 – Teste dinâmicos - Par frontal 1	68
Figura 42 – Teste dinâmicos - Par frontal 2	68
Figura 43 – Teste dinâmicos - Par frontal 3	69
Figura 44 – Teste dinâmicos - Sensores UL4 e UL5	69
Figura 45 – Teste dinâmicos - Sensores UL6 e UL7	70
Figura 46 – Teste dinâmicos - Sensores UL8 e UL9	70
Figura 47 – Posição na qual os sensores infravermelhos detectam o degrau à frente da cadeira	71
Figura 48 – Posição na qual os sensores infravermelhos detectam o degrau atrás da cadeira	71

Lista de tabelas

Tabela 1 – Descrição do problema	27
Tabela 2 – Comparação entre os projetos da cadeira de rodas	31
Tabela 3 – Especificações do HC-SR04. Fonte: (FREAKS, 2016)	42
Tabela 4 – Especificação do Sensor GP2Y0A60SZLF. Fonte:(SHARP, 2006)	43
Tabela 5 – Arduino Mega ADK. Adaptada de: (ARDUINO, 2018)	44
Tabela 6 – Pinagem do Arduino	48
Tabela 7 – Nomenclatura dos sensores	48
Tabela 8 – Custo da instrumentação	60
Tabela 9 – Dados do sensor UL1 e IR1 no primeiro cenário de teste	62
Tabela 10 – Dados do sensor UL2 e IR2 no primeiro cenário de teste	62
Tabela 11 – Dados do sensor UL3 e IR3 no primeiro cenário de teste	62
Tabela 12 – Dados do sensor UL4 e UL5 no primeiro cenário de teste	62
Tabela 13 – Dados do sensor UL6 e UL7 no primeiro cenário de teste	62
Tabela 14 – Dados do sensor UL8 e UL9 no primeiro cenário de teste	63
Tabela 15 – Dados do sensor UL1 e IR1 no segundo cenário de teste	64
Tabela 16 – Dados do sensor UL2 e IR2 no primeiro segundo de teste	64
Tabela 17 – Dados do sensor UL3 e IR3 no primeiro segundo de teste	64
Tabela 18 – Dados do sensor UL4 e UL5 no segundo cenário de teste	64
Tabela 19 – Dados do sensor UL6 e UL7 no segundo cenário de teste	65
Tabela 20 – Dados do sensor UL8 e UL9 no segundo cenário de teste	65
Tabela 21 – Dados do sensor UL1 e IR1 no terceiro cenário de teste	66
Tabela 22 – Dados do sensor UL2 e IR2 no terceiro cenário de teste	66
Tabela 23 – Dados do sensor UL3 e IR3 no terceiro cenário de teste	66
Tabela 24 – Dados do sensor UL4 e UL5 no terceiro cenário de teste	66
Tabela 25 – Dados do sensor UL6 e UL7 no terceiro cenário de teste	66
Tabela 26 – Dados do sensor UL8 e UL9 no terceiro cenário de teste	67

Lista de abreviaturas e siglas

3D	3 dimensões
CAT	Comitê de Ajudas Técnicas
EOG	Eletrooculograma
I2C	Inter-Integrated Circuit
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE	Arduino Software
IP	Internet Protocol
IR	Infravermelho
ONU	Organização das Nações Unidas
RMA	Robô Móvel Autônomo
SEDH/PR	Secretaria dos Direitos Humanos da Presidência da República
TA	Tecnologia Assistiva
UL	Ultrassom
USB	Universal Serial Bus

Lista de símbolos

μ	Letra grega micro
ω	Letra grega omega
ϕ	Letra grega phi
π	Letra grega pi
θ	Letra grega theta
\pm	Símbolo matemático mais ou menos

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Descrição do problema	26
1.2	Justificativa	27
1.3	Objetivo Geral	27
1.4	Objetivos Específicos	28
1.5	Organização do Trabalho	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	Estado da arte	29
2.1.1	Contribuição do trabalho	32
2.2	Sensores	32
2.2.1	Sensor de Ultrassom	32
2.2.2	Sensor Infravermelho	33
2.3	Filtros digitais	34
3	IMPLEMENTAÇÃO	41
3.1	Sensoriamento	41
3.1.1	Sensores	41
3.1.2	Microcontrolador	43
3.1.3	Suporte dos sensores	44
3.1.4	Calibração	45
3.1.5	Posicionamento e instalação dos sensores	55
3.2	Aquisição e processamento dos sinais	56
3.3	Metodologia dos testes	59
3.4	Custo do projeto	60
4	RESULTADOS	61
4.1	Testes estáticos	61
4.2	Testes dinâmicos	67
4.2.1	Sensores de distância	67
4.2.2	Sensores de desnível	70
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
	REFERÊNCIAS	75

1 Introdução

A influência da tecnologia no dia-a-dia das pessoas é cada vez maior e o intuito das aplicações tecnológicas é o de melhorar a qualidade de vida delas, seja aproximando uma das outras, como as redes sociais, ou facilitando a realização de ações que antes não eram possíveis, como as próteses funcionais de membros para amputados. A difusão do conhecimento científico e o surgimento de vertentes que tornam este processo mais rápido e colaborativo, como a indústria 4.0, que integra ainda mais as pessoas e as máquinas (mesmo que estejam em diferentes localidades) e permite uma maior personalização do produto final (SILVA; FILHO; MIYAGI, 2015), faz com que surja a necessidade de aliar o desenvolvimento tecnológico com as necessidades das pessoas (MOREIRA; TREVIZANO, 2016).

Nesse contexto, um conceito muito importante é o de tecnologia assistiva (TA), que consiste na aplicação de recursos e serviços que promovam a vida independente de pessoas com deficiência. Essa tecnologia é multidisciplinar por envolver profissionais de várias áreas, tendo como foco central colocar em prática recursos e serviços que auxiliem efetivamente as pessoas com deficiência (BERSCHE; TONOLLI, 2014).

Nos últimos anos, tem-se percebido uma crescente preocupação nacional com essa tecnologia. Em 2006, a Secretaria Especial dos Direitos Humanos da Presidência da República – SEDH/PR - reuniu um grupo de especialistas para, dentre outras coisas, fazer um levantamento de dados sobre a TA e propor temas de estudos e pesquisas relacionados ao tema. A esse grupo foi dado o nome de Comitê de Ajudas Técnicas (CAT) (BERSCHE; TONOLLI, 2014). Em 2008, o Brasil incorporou à sua legislação a Convenção da Organização das Nações Unidas (ONU) sobre os Direitos das Pessoas com Deficiência e, em 2009, foi promulgado o decreto de nº 6.949 no qual o país reafirma o compromisso com a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias assistivas para a locomoção de pessoas com deficiência física a um custo acessível (BRASIL, 2009).

No último Censo Demográfico (IBGE, 2010), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) coletou informações sobre a população brasileira e foi possível observar que quase 7% da população brasileira sofre de alguma deficiência motora, sendo que, dessa porcentagem, 33,42% apresenta deficiência motora grave. Além disso, 79,8% das pessoas com deficiência motora não tem rendimento ou tem rendimento de até 2 salários mínimos.

1

Paralelo a esses avanços políticos, a robótica móvel também tem evoluído bastante. Essa área da robótica se dedica a desenvolver robôs que conseguem se locomover no

¹ Em 2010, o valor do salário mínimo era 510 reais. Em 2016, um salário mínimo equivale a 880 reais.

ambiente em que são colocados (WOLF et al., 2009).

Dispositivos robóticos móveis que se locomovem com uma boa autonomia, sendo capazes de tomar uma série de decisões com base na leitura que fazem do ambiente em estão inseridos, estão cada vez mais presente no cotidiano das pessoas. Este é o caso, por exemplo, dos robôs domésticos que aspiram pó (*Roomba* da iRobot e do *Ropo Glass*) e que limpam janelas (como o *Winbot* da Ecovats).

Pensando nisso e nas possibilidades que a robótica móvel oferece à qualidade de vida das pessoas, esse trabalho pretende instrumentar uma cadeira de rodas motorizada, permitindo que ela consiga ler os dados de sensores instalados, colaborando para o desenvolvimento futuro de uma cadeira de rodas inteligente que amplie a locomoção das pessoas com tetraplegia.

1.1 Descrição do problema

A cadeira de rodas é um recurso utilizado por dois grupos de pessoas: as que dependem momentaneamente dela e as que dependem totalmente da cadeira para a sua locomoção. No primeiro grupo, se encontram as pessoas que sofreram algum tipo de acidente e precisam utilizar a cadeira durante o período de recuperação. Já no segundo grupo, estão as que têm a mobilidade com assistência limitada ou inexistente, como é o caso dos paraplégicos ou tetraplégicos que dependem da cadeira de rodas para se locomover (BECKER, 2000).²

Dentre as pessoas que dependem totalmente da cadeira de rodas para se locomover, ainda é possível fazer uma outra subdivisão entre as que conseguem manobrar a cadeira de rodas manual (paraplégicos) e as que não conseguem por conta da falta de controle dos membros superiores (tetraplégicos). Para o segundo subgrupo, o ideal é uma cadeira que seja motorizada e que tenha algum nível de autonomia na locomoção, já que os movimentos do usuário são bem limitados. Caso contrário, mesmo com a cadeira, eles ficarão dependentes de um terceiro que irá guiar a cadeira de rodas.

No entanto, adquirir uma cadeira de rodas motorizada tem um alto custo financeiro e as parcial ou totalmente autônomas ainda não são encontradas no mercado brasileiro. Como foi visto, a maior parte das pessoas com deficiência motora não tem o rendimento financeiro muito elevado. Nesse contexto, existe a necessidade de desenvolver uma cadeira de rodas motorizada autônoma, ou com algum nível de autonomia, de baixo custo para usuários com tetraplegia aliando os avanços das pesquisas acadêmicas com as necessidades da sociedade.

O processo de desenvolvimento de uma cadeira total ou parcialmente autônoma

² Pessoas com deficiência motora grave, segundo o Censo realizado pelo IBGE. (IBGE, 2010).

pode ser dividido em grupos de trabalho, tamanha a complexidade do projeto. Instrumentar a cadeira para obter dados sobre como a cadeira interage com o meio externo é uma das partes desse projeto. A Tabela 1 traz um resumo do problema descrito.

Tabela 1 – Descrição do problema

O PROBLEMA	da falta de cadeira de rodas autônomas de baixo custo.
AFETA	as pessoas com deficiência motora que necessitam de uma cadeira de rodas mais autônoma para se locomover.
CUJOS IMPACTOS SÃO	redução da liberdade de locomoção das pessoas com tetraplegia devido à dependência de uma outra pessoa que guie a cadeira.
UMA SOLUÇÃO BEM SUCEDIDA	contribuiria para o aumento das possibilidades das pessoas tetraplégicas que poderiam se locomover sozinhas participando mais da sociedade, facilitando a sua inclusão e colaboraria para o aumento da aplicação da tecnologia voltada às pessoas com algum tipo de deficiência.

1.2 Justificativa

Frequentemente, é possível observar cadeiras de rodas motorizadas circulando nas ruas. No entanto, ainda não foi desenvolvida comercialmente uma cadeira que consiga percorrer caminhos autonomamente percebendo o ambiente através dos sensores, evitando rotas não seguras e modificando-as de acordo com os obstáculos encontrados.

Essas aplicações são bastante comuns na robótica móvel, mas pouco implementadas em cadeira de rodas comerciais. Por isso, esse trabalho visa contribuir com o projeto de automatização da cadeira de rodas que irá encurtar essa distância, instalando, em uma cadeira de rodas manual de baixo custo, sensores de distância e de detecção de desnível.

Por se tratar de um sistema pensado para usuários com deficiência graves, durante todo o desenvolvimento desse projeto será possível perceber uma retomada ao público alvo pensando sempre em construir um produto final que sirva com segurança às necessidades dos tetraplégicos.

1.3 Objetivo Geral

Instrumentar uma cadeira de rodas para que seja possível medir a distância que ela se encontra de obstáculo à sua frente e/ou em nos seus lados e detectar desníveis no caminho que ela percorrerá.

1.4 Objetivos Específicos

1. Escolher as soluções para mensurar distância da cadeira em relação aos obstáculos e presença de desnível.
2. Desenvolver protótipos dos suportes para que os sensores possam ser instalados na cadeira.
3. Calibrar os sensores e obter seus modelos matemáticos.
4. Instalar os sensores na cadeira.
5. Disponibilizar os dados obtidos com os sensores para futuras análises.

1.5 Organização do Trabalho

A primeira parte do trabalho se destina a situar o contexto mundial e principalmente nacional para o desenvolvimento da instrumentação de uma cadeira de rodas motorizada, descrevendo o problema motivador do projeto, justificando a importância dele em âmbito nacional e apresentando os objetivos que se pretende alcançar.

O capítulo dois tem por objetivo revisar a teoria por trás da solução proposta, apresentando o princípio de funcionamento dos sensores e outros aspectos importantes que precisam ser considerados na aquisição e processamento dos dados.

O terceiro capítulo apresenta os sensores e o microcontrolador utilizado, Arduino Mega ADK, bem como o posicionamento e a calibração dos sensores, trazendo ainda o custo estimado do projeto.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos testes realizados com os sensores já instalados na cadeira.

Por fim, o último capítulo traz as considerações finais do projeto, apontando os próximos passos que devem ser adotados na continuação do projeto.

2 Fundamentação teórica

A evolução dos robôs tem recebido muito destaque, em especial os Robôs Móveis Autônomos - RMAs. Essa categoria de robôs se caracteriza por ter modo de operação e locomoção parcial ou totalmente autônomo (WOLF et al., 2009). Para que isso seja possível, é importante que o robô consiga perceber o ambiente em que irá atuar, assim como se localizar e realizar o mapeamento e a tomada de decisões. A percepção é exercida através de sensores que se comunicam com o controlador e envia um comando para os atuadores, para agir no meio seguindo uma lógica de navegação pré-programada.

Cada RMA possui um *hardware* adequado à sua finalidade (WOLF et al., 2009). No processo de “robotização” uma cadeira de rodas, algumas configurações sobre a “percepção” do robô e a forma com que ele “pensa” já são bastante consolidadas por alguns projetos. Sendo assim, o presente capítulo irá apresentar os avanços realizados nessa área, por meio da análise do estado da arte de cadeira de rodas focando na instrumentação, além de apresentar quais grandezas serão medidas.

2.1 Estado da arte

Uma pesquisa em sites de busca da internet, mostra que, apesar de não terem um preço acessível, no Brasil é fácil encontrar cadeira de rodas motorizada para vender. No entanto, ao procurar cadeiras de rodas autônomas comerciais nenhum produto foi encontrado, mesmo sendo possível acessar diversos *links* de *sites* de notícias informando que é possível que as cadeiras autônomas sejam comercialmente lançadas nos países da Ásia em breve.^{3,4}

Apesar de ainda não ser possível encontrar soluções comerciais, o alto número de artigos acadêmicos que abordam o desenvolvimento dessa tecnologia indica que é um produto que deverá ser lançado nos próximos anos.

Para situar melhor qual o estado da arte da cadeira de rodas autônoma, serão apresentados três casos com foco nos sensores utilizados em cada uma delas.

Na década de 90, para fins acadêmicos, foi construído o *Wheelesley*, um sistema robótico de cadeira de rodas desenvolvido para ser semi-autônomo com interface no *Macintosh PowerBook* e apresentada na Figura 1. A cadeira era composta por duas rodas motorizadas, contendo 12 sensores fotoelétricos, 6 sensores ultrassom, 2 encoders e chaves

³ Olhar digital: <http://olhardigital.uol.com.br/noticia/cadeira-de-rodas-autonoma-pode-ser-realidade-em-2017/62703>

⁴ Notícias ao minuto: <https://www.noticiasao minuto.com.br/tech/288307/cadeira-de-rodas-autonoma-pode-ser-lancada-em-2017>

de impacto na frente da cadeira. Além disso, ela era guiada por um *joystick* (YANCO et al., 1995).



Figura 1 – Cadeira de rodas Wheelesley. Fonte:(YANCO et al., 1995)

A *Bremen Autonomous Wheelchair* foi automatizada a partir de uma cadeira motorizada comercializada na Alemanha. Para tal fim, foram instalados 27 sonares *Polaroid*, além de *encoders* e o *software* ficou armazenado em um computador industrial por conta da preocupação com as falhas e com a segurança do sistema. Assim como na cadeira *Whelesley*, o usuário guiava a cadeira por meio de um *joystick* (ROFER; LANKENAU, 2000).



Figura 2 – Cadeira de rodas autônoma Bremen. Fonte:(ROFER; LANKENAU, 2000)

No que se refere ao *hardware*, a Figura 2 mostra que a maioria dos 27 sonares foram instalados ao longo da elipse que circunda a cadeira numa altura mediana.

O projeto SIAMO também tem feito grandes avanços nessa área de pesquisa. O protótipo do projeto contém uma interface de comunicação entre o usuário da cadeira e a máquina que a controla. São utilizados sensores de ultrassom, infravermelho e câmeras para detectar obstáculos e um sistema de mapeamento do ambiente no qual a cadeira se encontra.

Nesse protótipo, os movimentos da cadeira são coordenados com os movimentos da face do usuário que são capturados por meio do Eletrooculograma (EOG) (BAREA et al., 2009). Isso demonstra que na área de automatização de cadeira de rodas ainda há muito espaço para contribuições.

Os três exemplos apresentados demonstram o avanço existente na área em estudo. O primeiro mostra uma cadeira que tinha além dos sensores de detecção de obstáculos, um parachoque, já prevenindo que a cadeira ia colidir com algum obstáculo. O segundo continha um anel de sensores para detectar obstáculos, sem o sensor de contato. Já o terceiro traz uma nova forma de interface entre o usuário e a cadeira, tornando-a mais segura e aproximando a tomada de decisão sobre a direção da cadeira do usuário, que tem mais limitações motoras. A Tabela 2 faz uma comparação entre os três exemplos.

Tabela 2 – Comparação entre os projetos da cadeira de rodas

	<i>Wheelesley</i>	<i>Bremen</i>	SIAMO
Detectar obstáculo	Sensor de ultrassom Sensor fotoelétrico Chave de impacto	Sonar	Sensor ultrassom Infravermelho Câmeras
Estimar velocidade	<i>Encoder</i>	<i>Encoder</i>	<i>Encoder</i>
Interface com o usuário	<i>Joystick</i>	<i>Joystick</i>	Movimentos da face

Em uma dissertação publicada em 2010, realizou-se um compilado de vários projetos envolvendo cadeira de rodas inteligente ou autônoma. De posse das características de vários projetos, realizou-se um levantamento de algumas características gerais, como a importância dos sensores de ultrassom e infravermelho, muito utilizados para desviar de obstáculos e medir a distância da cadeira aos objetos mais próximos (BRAGA, 2010). Além disso, uma busca por projetos recentes sobre cadeira de rodas inteligentes mostrou que os sensores de ultrassom são usados para estimar a distância e a cadeira, com o objetivo de evitar colisões, e apresentam um bom desempenho (RUÍZ-SERRANO et al., 2014; DIAO et al., 2017).

Com base nos projetos apresentados e no compilado de informações obtidas, observa-se que sensores de ultrassom e infravermelho são importantes no processo de instrumentação de uma cadeira de rodas. Antes de tratar com mais detalhes dos sensores, é importante verificar qual o estado atual do projeto maior no qual esse trabalho está inserido.

2.1.1 Contribuição do trabalho

No que se refere ao macroprojeto de desenvolvimento de uma cadeira de rodas autônoma, alguns passos importantes já foram dados. O primeiro deles foi o desenvolvimento de um kit patenteado (QUINTERO et al.,) para motorizar uma cadeira de rodas comercial e dobrável (FILHO et al., 2010). Em seguida, foi implementado o sistema de controle da cadeira e o sensoriamento de características referentes aos motores (IVO, 2017).

Esse trabalho se une aos supracitados, visando instrumentar a cadeira, permitindo que ela possa ser integrada ao sistema de controle e futuramente seja desenvolvido um sistema de navegação. Para chegar ao fim colimado, o primeiro passo é propor um sistema de instrumentação adequado à cadeira.

2.2 Sensores

Os sensores para medir distância são uns dos mais importantes para a robótica (BRAUNL, 2006). Esse tipo de sensor permite ao robô detectar a distância que os obstáculos se encontram dele. Essa informação é muito importante para a navegação.

Em uma cadeira de rodas automatizada não seria diferente. Neste trabalho, serão utilizados dois tipos de sensor: o de ultrassom e o infravermelho. No capítulo seguinte, será apresentado o motivo da utilização de cada um deles. A seguir, apresenta-se o princípio físico de funcionamento deles.

2.2.1 Sensor de Ultrassom

Tendo como princípio de funcionamento a emissão e o recebimento de ondas de som fora da faixa de audição humana, os sensores de ultrassom (UL) conseguem medir a distância do robô até os objetos mais próximos.

Esses sensores emitem, em um determinado intervalo de tempo, ondas sonoras a frequências ultrasônicas de 50KHz a 250KHz. Quando essas ondas encontram um objeto, são refletidas e retornam ao ponto de emissão. Se esse retorno for percebido dentro de um tempo limite, então um objeto foi detectado (BRAUNL, 2006).

Como o sensor emite uma onda sonora e recebe essa onda depois de um intervalo de tempo, esse intervalo de tempo é uma variável conhecida. Como a velocidade do som é cerca de 340 m/s, é possível saber a que distância o obstáculo está do sensor, ou seja, do robô. É importante ressaltar que, nesse trabalho, não foram consideradas as variações que a velocidade do som sofre com a diferença de temperatura, tendo sido estabelecido como velocidade média do som o valor previamente citado.

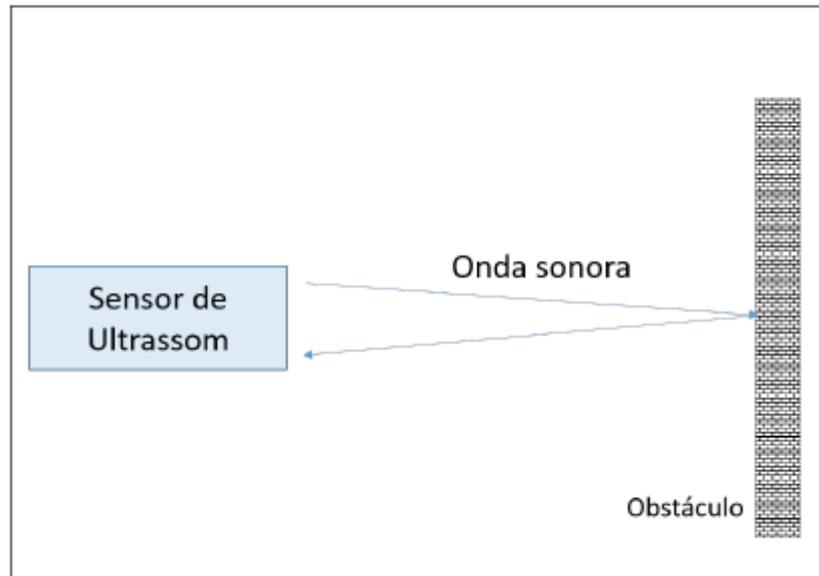


Figura 3 – Princípio de funcionamento de um sensor de ultrassom

$$\text{distância} = \text{velocidade do som} * \frac{\text{tempo de ida e volta}}{2} \quad (2.1)$$

Como se pode observar na Figura 3, o sensor recebe sinais que permitem identificar obstáculos que estão à frente da cadeira. Sabendo que ela pode se mover majoritariamente para frente e para os lados, é importante cobrir todas as direções com sensores de ultrassom para que ele consiga detectar objetos em todas as direções em que a cadeira irá se mover.

2.2.2 Sensor Infravermelho

O sensor infravermelho (IR) também detecta a distância que ele se encontra de objetos localizados a sua frente. No entanto, o princípio de funcionamento dele é diferente do sensor de ultrassom, pois a velocidade de propagação da luz é muito maior do que a do som e o tempo que os fótons levariam para ir e voltar seria muito pequeno para ser medido (BRAUNL, 2006).

Por isso, ao invés de medir o tempo que a luz demora para ir do sensor ao obstáculo, ele mede o ângulo da detecção da luz emitida e recebida, que muda de acordo com a distância do objeto, conforme mostrado na Figura 30.

Assim como as ondas do ultrassom não são percebidas pelo olho humano, os raios de luz infravermelha também tem um comprimento de onda fora da faixa do visível para o olho humano (880nm). Uma das desvantagens do sensor de distância infravermelho é que ele é sensível à luz ambiente, especialmente à radiação infravermelha presente na luz solar. Por este motivo, este tipo de sensor é usado preferencialmente em ambientes internos ou em ambientes com iluminação controlada.

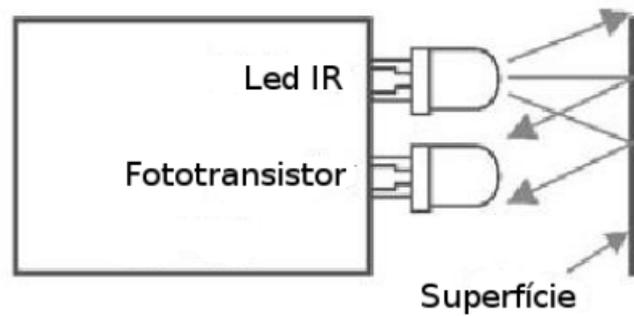


Figura 4 – Princípio de funcionamento de um sensor infravermelho

2.3 Filtros digitais

O objetivo de utilizar um instrumento de medição é obter um valor próximo ao verdadeiro. No entanto, os instrumentos de medição possuem uma incerteza atrelada que os impossibilita de apresentar um valor absoluto (BRAUNL, 2006).

No caso dos sensores, além da incerteza do instrumento, há também ruídos no sistema que alteram os dados obtidos.

Uma maneira de extrair dados mais próximos ao valor absoluto de medições com erros e ruído é a utilização de filtros. Para dados digitais, o filtro é digital e existe uma gama muito ampla de filtros. A escolha por um em detrimento de outro vai depender do comportamento dos dados reais. Para esse projeto, foi escolhido o Filtro de Kalman, por ser um filtro otimizado e por permitir a fusão sensorial, que será detalhada a seguir.

- **Filtro de Kalman**

O Filtro de Kalman é um filtro ótimo usado para estimar dados de um sistema dinâmico linear a partir de um conjunto de equações recursivas. Ele considera tanto o ruído da medição quanto a incerteza em determinar a posição em um determinado instante (ruído dinâmico). Possui característica preditiva-corretiva, pois consegue prever um resultado de acordo com o modelo linear, mas vai ajustando esse valor após a entrada da nova medida (AGUIRRE, 2015).

A performance do Filtro de Kalman está relacionada ao modelo do sistema que é expresso pelas variáveis A , H , Q e R . Essas variáveis dependem do sistema no qual o filtro está sendo aplicado: A é a matriz de transição dos estados, H é a matriz de medição dos estados, Q é a matriz de covariância do ruído do modelo do sistema e R é matriz de covariância do ruído de medição (KIM, 2011).

Fusão Sensorial

Uma maneira de determinar uma medida com maior acurácia é realizar a medição

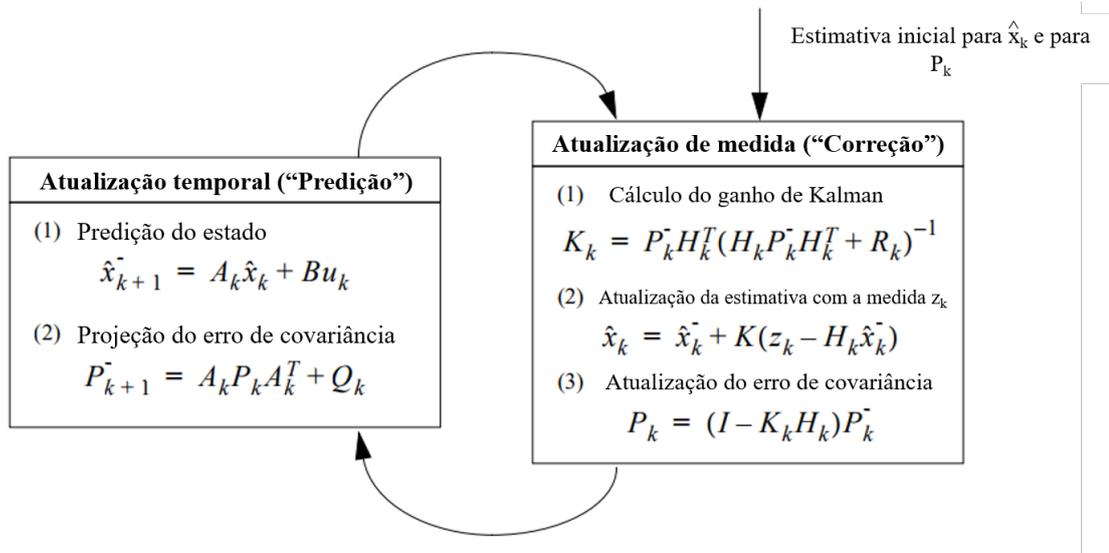


Figura 5 – Algoritmo do Filtro de Kalman. Traduzido de: (WELCH; BISHOP, 1995)

dessa variável com mais de um sensor e, por meio da fusão sensorial, obter dados mais corretos. O Filtro de Kalman oferece a possibilidade da fusão sensorial. Na Equação 2.2 é possível observar como estimar a medida da fusão de "N" sensores.

$$\hat{q} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i * q_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (2.2)$$

Sendo \hat{q} a medida estimada resultante da fusão sensorial, w_i o inverso da covariância das medidas dos sensores, q_i a medida dos sensores e a covariância estimada pode ser obtida por meio da 2.3.

$$w = \frac{1}{\sigma^2} \quad (2.3)$$

Neste trabalho, será realizada a fusão sensorial com dois sensores, conforme descrito no capítulo seguinte. Assim, a Equação 2.2 pode ser reescrita para:

$$\hat{q} = \frac{w_1 * q_1 + w_2 * q_2}{w_1 + w_2} \quad (2.4)$$

Substituindo w_1 por $\frac{1}{\sigma_1^2}$ e w_2 por $\frac{1}{\sigma_2^2}$, tem-se:

$$\hat{q} = \frac{\frac{1}{\sigma_1^2} * q_1 + \frac{1}{\sigma_2^2} * q_2}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}} \quad (2.5)$$

É importante definir qual será o sensor com a medida mais confiável e atribuir a ele o a medida q_1 e a covariância w_1 , o outro sensor receberá o índice 2. Sabe-se ainda que:

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{\sigma_1^2 * \sigma_2^2} \quad (2.6)$$

Da equação 2.6, obtêm-se os valores de $\frac{1}{\sigma_1^2}$ e de $\frac{1}{\sigma_2^2}$:

$$\frac{1}{\sigma_1^2} = \frac{1}{\sigma^2} - \frac{1}{\sigma_2^2} \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{\sigma_2^2} = \frac{1}{\sigma^2} - \frac{1}{\sigma_1^2} \quad (2.8)$$

Substituindo a equação 2.7 na equação 2.5, tem-se:

$$\hat{q} = \frac{\left(\frac{1}{\sigma^2} - \frac{1}{\sigma_2^2}\right) * q_1 + \frac{1}{\sigma_2^2} * q_2}{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{\sigma_1^2 * \sigma_2^2}} \quad (2.9)$$

Colocando $\frac{1}{\sigma_2^2}$ em evidência:

$$\hat{q} = \frac{\frac{1}{\sigma_2^2} * (q_2 - q_1) + \frac{1}{\sigma^2} * q_1}{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{\sigma_1^2 * \sigma_2^2}} \quad (2.10)$$

Considerando que $\frac{1}{\sigma^2}$ é igual a $\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{\sigma_1^2 * \sigma_2^2}$, a equação 2.10 pode ser reescrita como:

$$\hat{q} = q_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} * q_2 \quad (2.11)$$

A expressão $\frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ representa o ganho (G), ou seja:

$$\hat{q} = q_1 + G * q_2 \quad (2.12)$$

A equação 2.8 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\sigma_2^2 = \frac{\sigma^2 * \sigma_1^2}{\sigma_1^2 - \sigma^2} \quad (2.13)$$

Da equação do ganho, tem-se que:

$$\sigma_2^2 = \frac{\sigma_1^2}{G} - \sigma_1^2 \quad (2.14)$$

Igualando as equações 2.13 e 2.14 obtém-se que a covariância estimada equivale a:

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 - G * \sigma_1^2 \quad (2.15)$$

Colocando na forma recursiva, as equações 2.12 e 2.15 e substituindo o valor de G, obtém-se:

$$q_{k+1} = q_k + \frac{\sigma_k^2}{\sigma_k^2 + \sigma_2^2} * q_2 \quad (2.16)$$

$$\sigma_{k+1}^2 = \sigma_k^2 - \frac{\sigma_k^2}{\sigma_k^2 + \sigma_2^2} * \sigma_1^2 \quad (2.17)$$

Sendo q_{k+1} a medida estimada, q_k a medida do sensor mais confiável, q_2 a medida do sensor menos confiável, σ_{k+1} a covariância estimada, σ_k a covariância do sensor mais confiável e σ_2 a do menos confiável.

As equações 2.16 e 2.17 representam matemática e recursivamente a fusão sensorial e serão aplicadas para medir uma distância por meio da leitura de dois sensores.

Foram realizados testes utilizando o *software* MATLAB aplicando o filtro de Kalman em um medida estimada pelo sensor de ultrassom e pelo infravermelho e, em seguida, foi realizada a fusão sensorial.

Para a aplicação na cadeira de rodas, o filtro de Kalman tem as seguintes variáveis: A=1, H=1, Q=0, R=4, P_{ir}=5, P_{us}=2. Sendo que os valores de covariância foram obtidos por meio do método de tentativa e erro.

As figuras 7, 6 ilustram o efeito do Filtro de Kalman que estima um valor bem próximo ao desejado que é de 50 cm, no caso ilustrado.

Ao aplicar a fusão sensorial nos dados (figura 8), percebe-se que a os dados da fusão tendem a acompanhar o sensor mais confiável e o valor se aproxima do desejado.

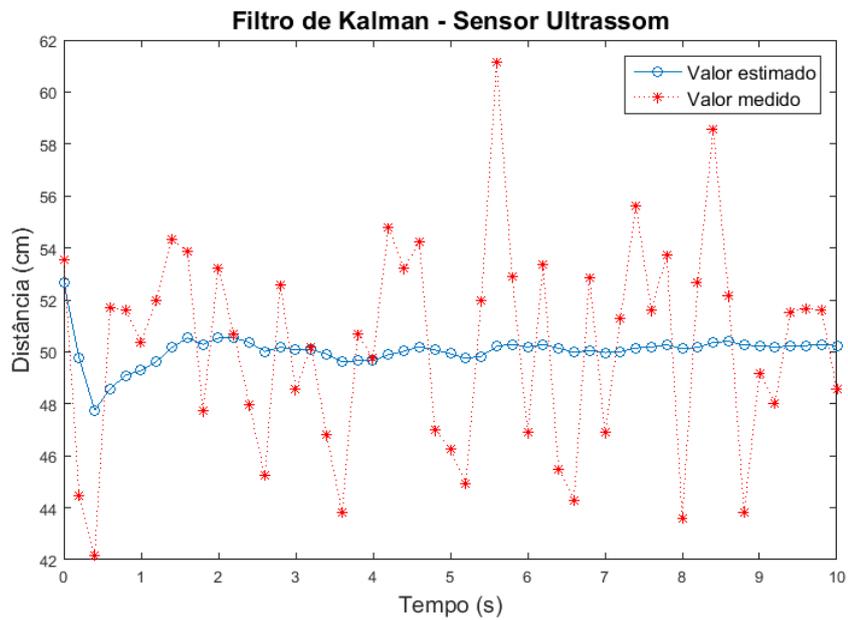


Figura 6 – Filtro de Kalman aplicado a um dado obtido pelo sensor de ultrassom

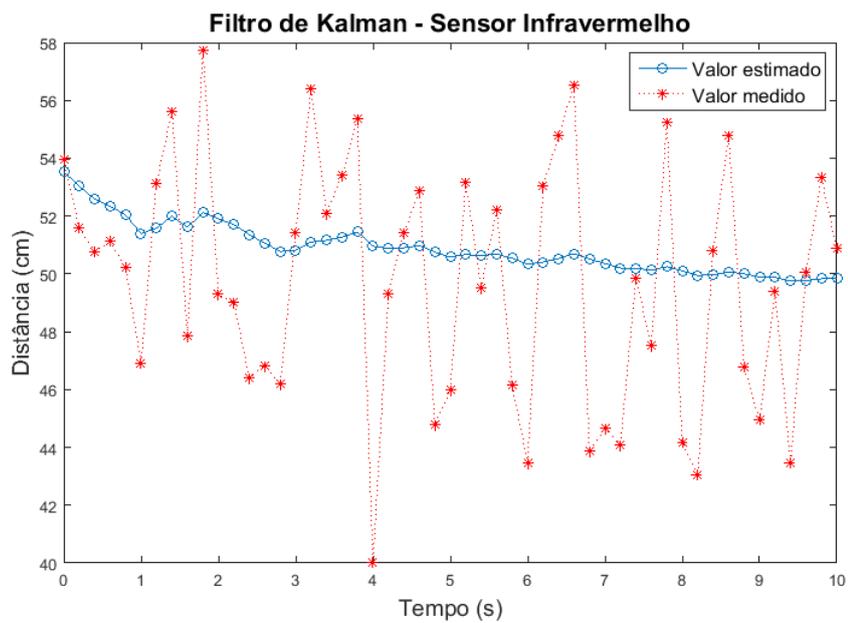


Figura 7 – Filtro de Kalman aplicado a um dado obtido pelo sensor infravermelho

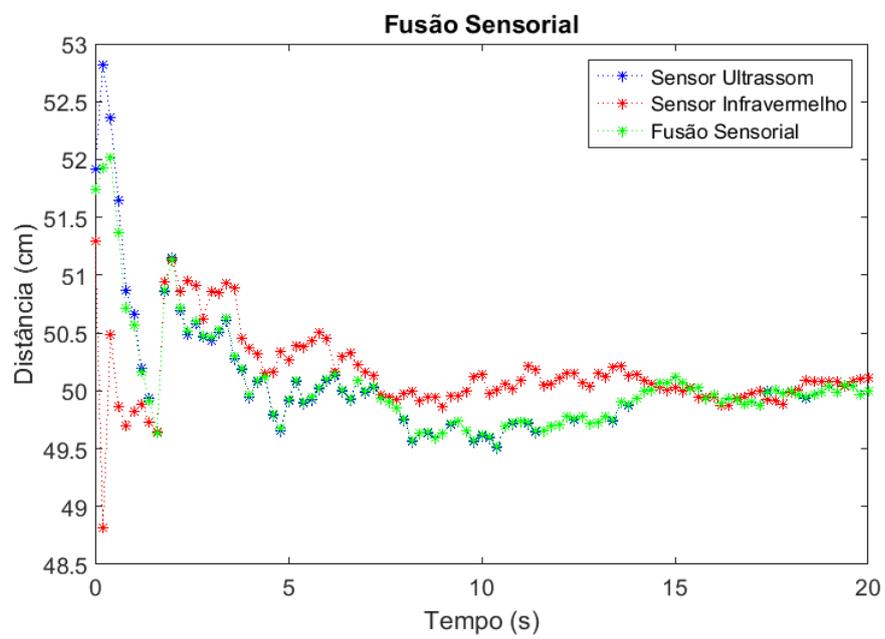


Figura 8 – Fusão sensorial

3 Implementação

A ciência que estuda o projeto, a construção, os testes e que aponta os instrumentos mais indicados em cada categoria de robô (domésticos, industriais, de locomoção, etc) é a instrumentação eletrônica (VASCONCELOS; SILVA; BOAVENTURA, 2010). Este capítulo visa apresentar o processo de instrumentação da cadeira de rodas, descrevendo os sensores utilizados, onde eles estão dispostos, como foi realizada a leitura e o processamento dos sinais recebidos.

3.1 Sensoriamento

Para cumprir o objetivo desse trabalho de medir a distância que os obstáculos estão da cadeira e detectar desníveis, foram escolhidos sensores de ultrassom e infravermelho. Todos esses sensores estão conectados ao Arduino Mega ADK, conforme apresentado na figura 9.

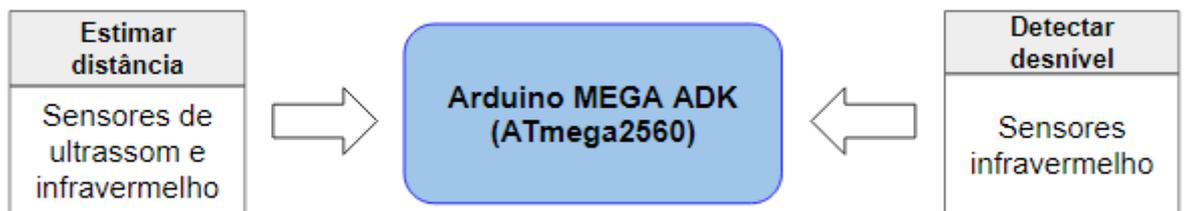


Figura 9 – Diagrama de Blocos dos sensores utilizados.

3.1.1 Sensores

Para estimar a distância foram escolhidos o sensor HC-SR04 (ultrassom) e o sensor SHARP GP2Y0A60SZLF (infravermelho); para detectar desnível, também optou-se por usar os sensores infravermelhos.

- **Sensor de Ultrassom - HC-SR04**

O HC-SR04 é um sensor de ultrassom de baixo custo e que tem saída digital. As especificações técnicas obtidas no *datasheet* do sensor HC-SR04 (FREAKS, 2016), e apresentadas na tabela 3, indicam que o alcance do sensor é de 4 metros com uma resolução de 3mm, atendendo ao trabalho. O HC-SR04 apresenta uma pequena zona morta, porém isso não é um problema relevante, já que essa zona é de apenas 2 centímetros.



Figura 10 – Sensor ultrassônico HC-SR04. Fonte: (Felipe Flop, 2016)

Tabela 3 – Especificações do HC-SR04. Fonte: (FREAKS, 2016)

Característica	Valor
Alimentação	5V DC
Corrente de Operação	15mA
Ângulo de efeito	15°
Alcance	2cm - 4m
Precisão	3mm

O baixo custo do sensor, cerca de 15 reais, também foi um fator importante na decisão sobre qual sensor utilizar, dado que neste trabalho serão utilizados 9 sensores de ultrassom.

- **Sensor infravermelho - GP2Y0A60SZLF**

Para verificar a presença de buracos ou grandes desníveis no solo, é necessário que um sensor esteja apontado para o chão. O sensor de ultrassom se baseia na emissão de ondas sonoras e captura do retorno dessa onda. Se esse sensor ficar apontado para baixo, haverá um eco sonoro que vai aumentar o ruído das medidas. Visando minimizar esse problema, optou-se pela escolha do sensor infravermelho, mostrado na figura 11.

O encapsulamento do emissor e do receptor IR reduz um pouco a interferência da luz visível. A tabela 4 traz as especificações do sensor GP2Y0A21YK0F que possui saída analógica com tensão de saída entre 0.6 V, para 150 cm, e 3.6 V, para 10 cm.

O alcance dele também permite a sua utilização para medir distância de obstáculos com relação à cadeira de rodas fazendo redundância ao sensor de ultrassom.

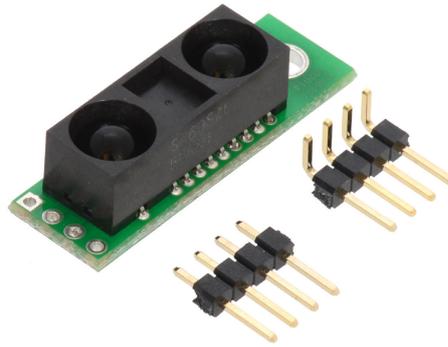


Figura 11 – Sensor Sharp GP2Y0A60SZLF. Fonte: (POLOLU, 2017)

Tabela 4 – Especificação do Sensor GP2Y0A60SZLF. Fonte:(SHARP, 2006)

Característica	Valor
Alimentação	3V/ 5V
Corrente de Operação	33mA - 50mA
Alcance	10cm - 150cm
Preço	40,00

3.1.2 Microcontrolador

O Arduino Mega ADK (figura 12) foi o microcontrolador escolhido para a aquisição e tratamento dos dados dos sensores, por ser capaz de ler os dados dos 16 sensores, sendo 9 de UL e 7 IR com 25 sinais digitais e 7 sinais analógicos.



Figura 12 – Arduino MEGA ADK. Fonte: (ARDUINO, 2018)

A tabela 5 mostra algumas especificações técnicas, como a tensão de operação de 5V, a mesma dos sensores de UL e IR, contando com recurso de 16 pinos analógicos e 54 pinos digitais (ARDUINO, 2018).

Tabela 5 – Arduino Mega ADK. Adaptada de: (ARDUINO, 2018)

Tensão de operação	5V
Tensão de alimentação (recomendada)	7 - 12V
Pinos digitais	54 (15 PWM)
Corrente - pino digital	40mA
Pinos analógicos de entrada	16

3.1.3 Suporte dos sensores

Foram desenvolvidos suportes que, além de serem responsáveis pela sustentação dos componentes eletrônicos, os protegem. Para conectar cada sensor ao microprocessador, desenvolveu-se uma placa (construída em uma placa de circuito impressoilhada (*Wire-Wrap*) em fenolite) por suporte. Apenas os sensores da parte de trás da cadeira não possuem uma placa própria por já estarem próximos à placa de aquisição central, na qual todas as placas periféricas estão concentradas.

A figura 13 ilustra como as placas estão conectadas e quantos sensores estão ligados em cada placa, destacando as conexões de dados e alimentação das placas frontal e laterais, dos sensores e do computador. É importante salientar que o computador é usada para a obtenção dos dados via comunicação serial. Por conta da posição que cada placa ocupa na cadeira, não foi possível registrar em uma única imagem como a figura 13 foi implementada. Apesar disso, a figura 14 mostra como as placas ficaram após a montagem e quais são os pares de conectores entre a placa central e as demais.

Na maioria dos casos, foi utilizado uma barra de pinos 1x04 horizontal para conectar os sensores às placas periféricas. Para evitar que os sensores sejam conectados incorretamente, as figuras 15 e 16 apresentam uma legenda dos conectores nas 4 placas. Adicionalmente, para minimizar erros de conexão, foram usados conectores RJ45 para os cabos de rede que enviar a informação dos sensores das placas periféricas à placa central. Na figura 16, observa-se que foi previsto um conector para um módulo de cartão SD. Esse módulo foi utilizado no processo de calibração dos sensores que estimam distância. Este processo é explicado com detalhes mais adiante neste capítulo.

A tabela 6 apresenta a pinagem seguida na montagem da placa central. Devido à facilidade de manuseio e, considerando que a parte estrutural desenvolvida nesse trabalho é um protótipo para futuras versões, o material escolhido para fazer os suportes foi o papelão. As imagens 17 e 18 mostram como ficou o suporte frontal e os laterais externamente e as figuras 19 e 20 apresenta a parte interna dos mesmos suportes.

Os sensores UL e IR foram numerados de acordo com o que é mostrado na tabela 7, para auxiliar a referenciar os sensores ao longo deste relatório. Foram excluídos da tabela os sensores do suporte frontal por estarem presentes na imagem 17.

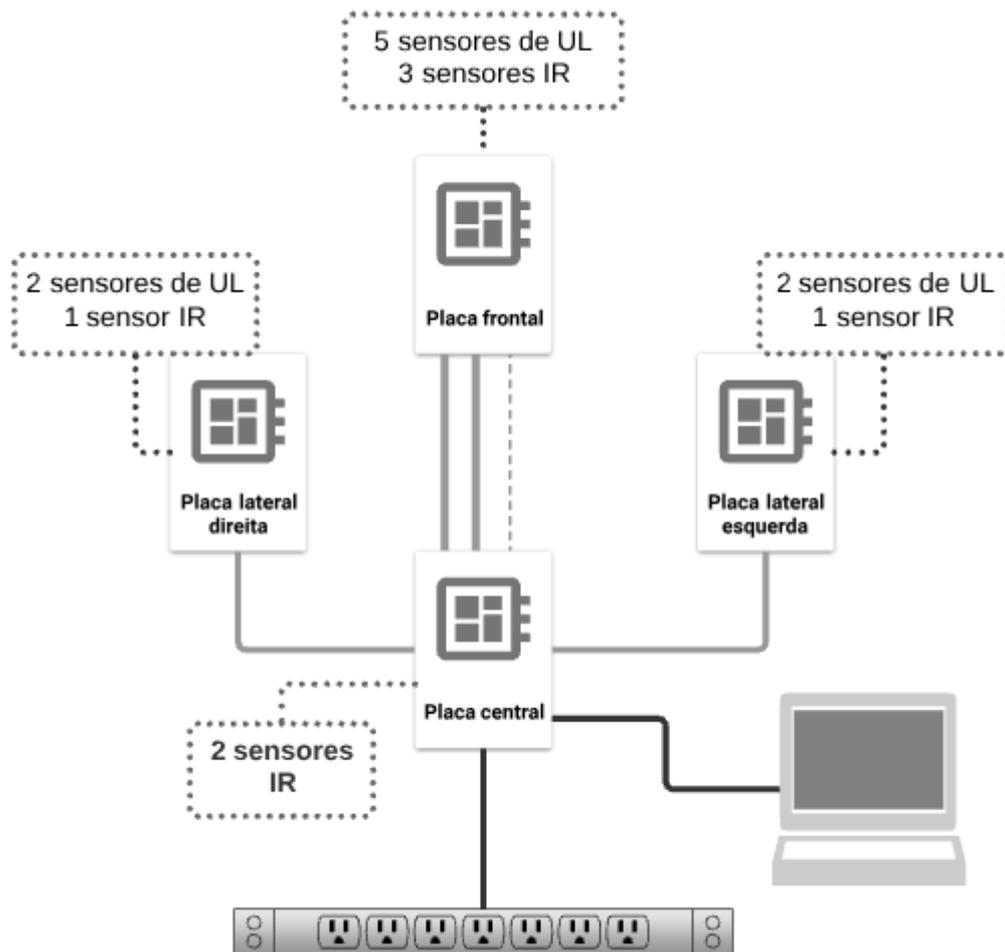


Figura 13 – Visão geral da ligação do sistema de sensores. As linhas contínuas cinzas representam os cabos de rede que conectam a placa central às placas periféricas, enquanto a linha tracejada ilustra o cabo de alimentação dos sensores da placa frontal. Já a linha contínua mais escura liga a placa central à alimentação e ao computador no qual será possível ter acesso aos dados via serial. As linhas pontilhadas se referem ao barramento dos sensores, que possuem 4 pinos cada um.

3.1.4 Calibração

A calibração estática é uma forma de obter as características de desempenho estático de um sensor. Normalmente, esse processo consiste em manter contante todas as entradas, exceto uma (DOEBELIN, 1996). E, utilizando um instrumento com precisão igual ou superior às das medidas esperadas, comparam-se as saídas obtidas com as que eram esperadas para concluir se o sensor está calibrado ou não. Se não estiver, a calibração pode ocorrer no próprio código, fazendo um ajuste nas próximas medidas ou ajuste mecânico, caso o sensor esteja mal posicionado. Dessa maneira, a calibração é um processo que minimiza os efeitos do erro de medição do instrumento, pois por meio dela obtém-se

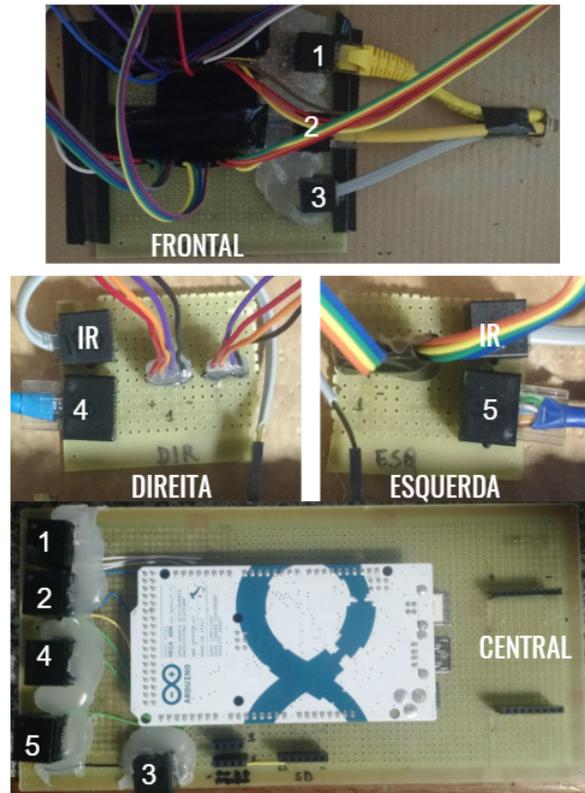


Figura 14 – Placas montadas

um ajuste matemático para os dados lidos pelo sensor.

Todos os sensores de ultrassom e os sensores infravermelho usados no projeto para estimar distância foram calibrados antes de serem instalados na cadeira e a calibração ocorreu nos suportes que foram fixados posteriormente na cadeira.

A calibração foi realizada em duas etapas utilizando um código específico para o processo que realizou 20 leituras em cada ponto de calibração. Isso permite que os dados sejam analisado no *software* MATLAB, com o qual foi possível gerar os modelos matemáticos de calibração de cada sensor. Foram excluídas as duas maiores e menores leituras, para excluir os pontos de medição com valores muito diferentes dos demais, de forma que considerou-se 16 leituras por ponto.

Na primeira etapa, o suporte contendo os 8 sensores (5 ULs e 3 IRs) foi posicionado sobre uma fita métrica aberta de 0 cm (parede) a 300 cm e apontado para a parede branca, de forma que os sensores pudessem medir a distância deles para a parede. Considerando o alcance do sensor IR, a calibração dos sensores desse tipo ocorreu entre 10 cm e 150 cm, com 10 cm de intervalo entre cada ponto, totalizando 15 pontos de calibração. Já os sensores UR foram entre 10 cm e 300 cm, com o mesmo intervalo dos IR, ou seja, foram calibrados em 30 pontos. As imagens 21 e 22 representam como foi realizada a calibração.

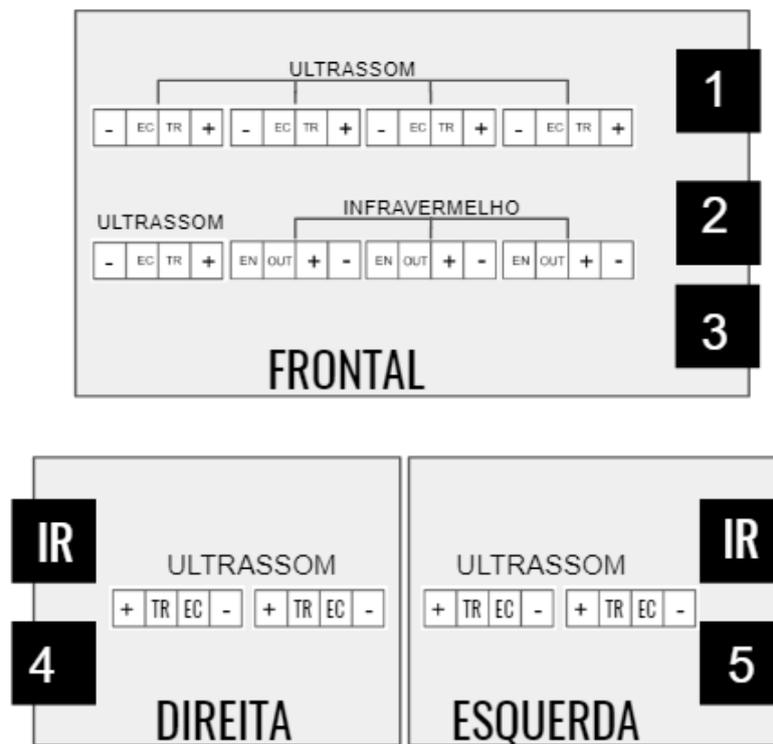


Figura 15 – Descrição dos pinos de cada conector dos sensores nas placas frontal e laterais



Figura 16 – Descrição dos pinos de cada conector dos sensores na placa central

Na segunda etapa, representada na figura 23, foram calibrados os sensores UL dos dois suportes laterais, nos mesmos 30 pontos dos sensores de ultrassom frontais.

As figuras 24, 25, 26 e 27 mostram as curvas de calibração referentes ao modelo

Tabela 6 – Pinagem do Arduino

Placa	Sinal	Pino do Arduino
Frontal	Trigger do sensor UL1	19
	Echo do sensor UL1	18
	Trigger do sensor UL2	27
	Echo do sensor UL2	25
	Trigger do sensor UL3	14
	Echo do sensor UL3	15
	Trigger do sensor UL4	32
	Echo do sensor UL4	17
	Trigger do sensor UL5	30
	Echo do sensor UL5	16
	Enable do sensor IR1	23
	Output do sensor IR1	A13
	Enable do sensor IR2	24
	Output do sensor IR2	A14
	Enable do sensor IR3	22
Output do sensor IR3	A15	
Lateral direita	Trigger do sensor UL6	41
	Echo do sensor UL6	43
	Trigger do sensor UL7	42
	Echo do sensor UL7	44
	Enable do sensor IR4	46
Output do sensor IR4	A12	
Lateral esquerda	Trigger do sensor UL8	37
	Echo do sensor UL8	45
	Trigger do sensor UL9	47
	Echo do sensor UL9	49
	Enable do sensor IR5	37
Output do sensor IR5	A11	
Central	Enable do sensor IR6	40
	Output do sensor IR6	A10
	Enable do sensor IR7	48
	Output do sensor IR7	A9

Tabela 7 – Nomenclatura dos sensores

Nomenclatura	Sensor
UL 6	Sensor UL lateral direito
UL 7	Sensor UL lateral direito
UL 8	Sensor UL lateral esquerdo
UL 9	Sensor UL lateral esquerdo
IR 4	Sensor IR lateral direito
IR 5	Sensor IR lateral esquerdo
IR 6	Sensor IR traseiro esquerdo
IR 7	Sensor IR traseiro direito



Figura 17 – Estrutura externa do suporte frontal



Figura 18 – Estrutura externa dos suportes laterais (vista frontal e inferior)

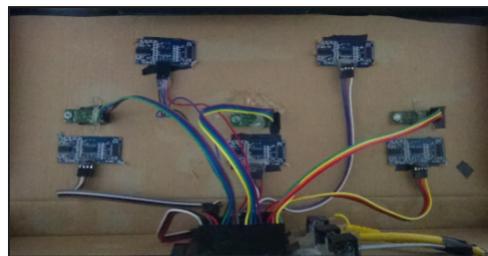


Figura 19 – Estrutura interna do suporte frontal



Figura 20 – Estrutura interna dos suportes laterais

matemático obtido para os sensores de ultrassom e as equações de 3.1 a 3.9 seus respectivos modelos matemáticos.



Figura 21 – Vista superior da estrutura para calibração dos sensores frontais



Figura 22 – Vista frontal da estrutura para calibração dos sensores frontais



Figura 23 – Vista frontal da estrutura para calibração dos sensores laterais

Ajuste matemático do sensor de ultrassom 1:

$$f(x) = 1.03x + 3.3 \quad (3.1)$$

Ajuste matemático do sensor de ultrassom 2:

$$f(x) = 1.06x - 0.23 \quad (3.2)$$

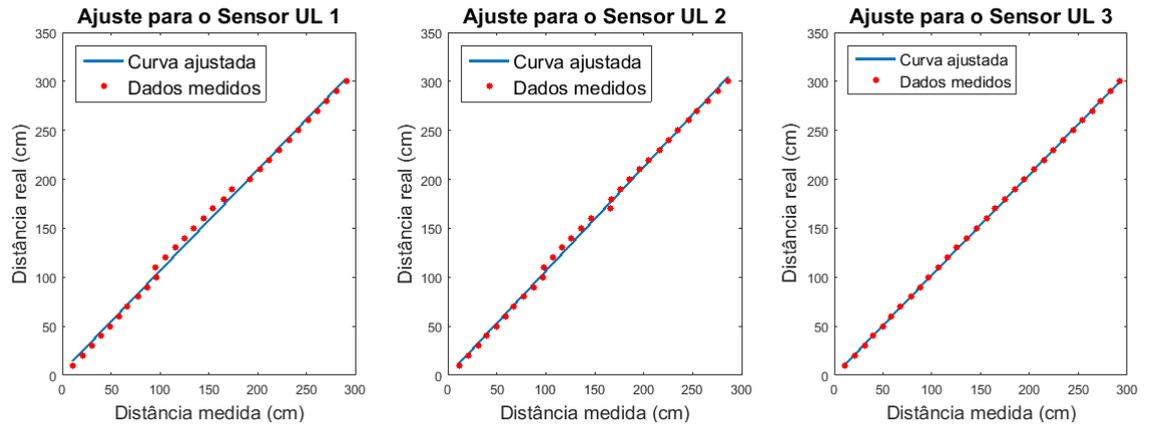


Figura 24 – Curva de calibração dos sensores UL 1, 2 e 3

Ajuste matemático do sensor de ultrassom 3:

$$f(x) = 1.03x - 0.4 \quad (3.3)$$

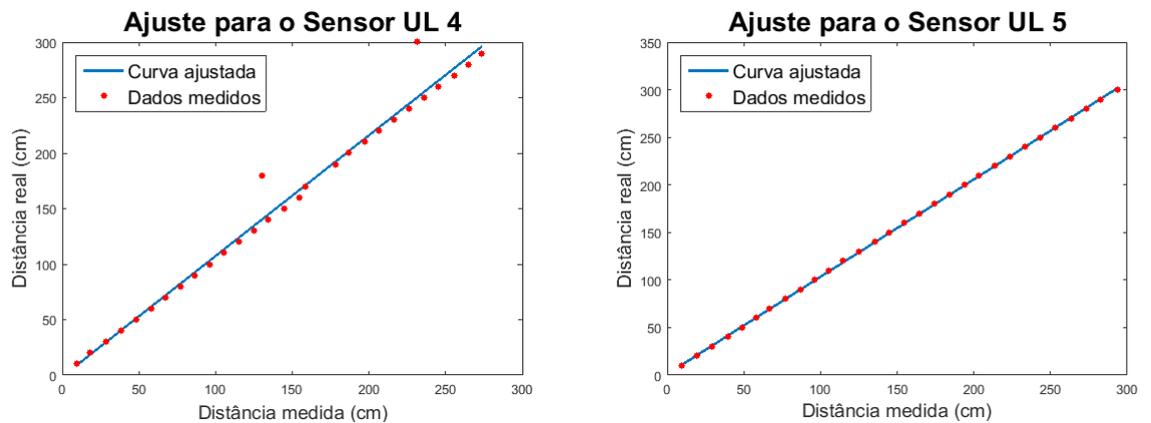


Figura 25 – Curva de calibração dos sensores UL 4 e 5

Ajuste matemático do sensor de ultrassom 4:

$$f(x) = 1.09x - 1.32 \quad (3.4)$$

Ajuste matemático do sensor de ultrassom 5:

$$f(x) = 1.02x + 0.99 \quad (3.5)$$

Ajuste matemático do sensor de ultrassom 6:

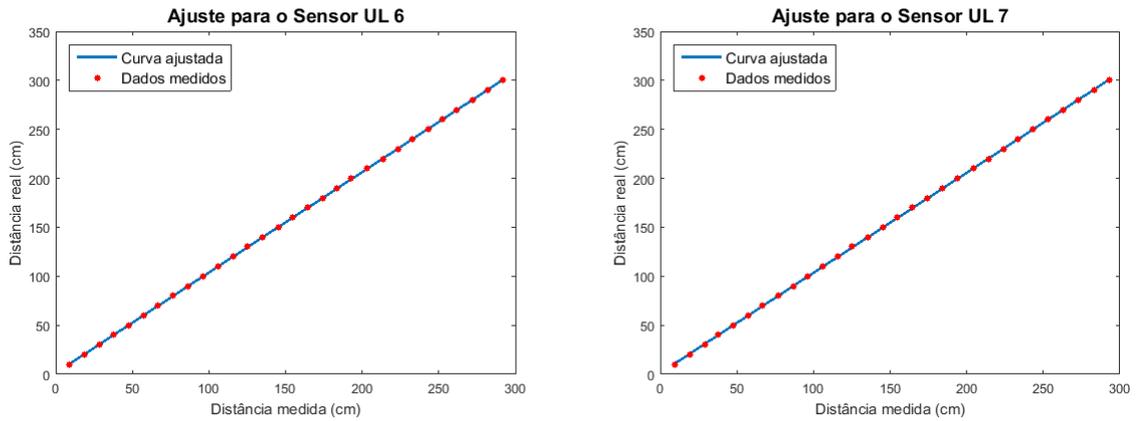


Figura 26 – Curva de calibração dos sensores UL 6 e 7

$$f(x) = 1.02x + 1.26 \quad (3.6)$$

Ajuste matemático do sensor de ultrassom 7:

$$f(x) = 1.02x + 1.22 \quad (3.7)$$

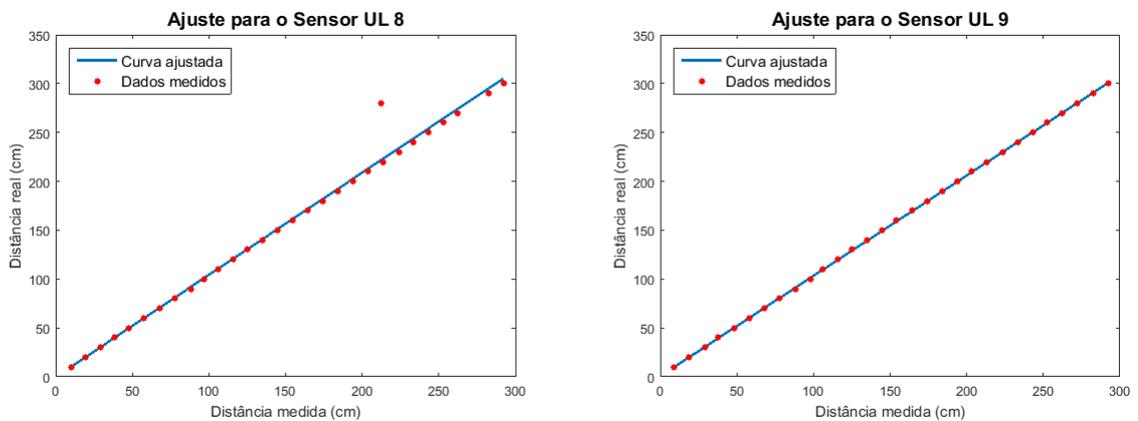


Figura 27 – Curva de calibração dos sensores UL 8 e 9

Ajuste matemático do sensor de ultrassom 8:

$$f(x) = 1.05x - 0.21 \quad (3.8)$$

Ajuste matemático do sensor de ultrassom 9:

$$f(x) = 1.03x + 0.60 \quad (3.9)$$

Para os três sensores infravermelhos frontais foram testados dois ajustes, um polinomial de terceira ordem (figura 28) e um exponencial de segunda ordem (figura 29). Observando as imagens dos dois ajustes, observa-se que o exponencial representa melhor os dados do que o polinomial. Por isso, ele foi o escolhido para ser aplicado aos sensores.

Os primeiros testes com os sensores IRs frontais mostraram uma instabilidade nos dados. Para investigar essa instabilidade, a calibração dos três sensores infravermelhos foi feita. Ao invés de coletar dados a cada 10 cm, os dados foram coletados a cada 2 cm, iniciando a 10 cm da parede até 150 cm. As figuras 30, 31 e 32 mostram o ajuste exponencial de segunda ordem após a calibração em 70 pontos e as equações 3.10, 3.11 e 3.12 representam matematicamente esse ajuste.

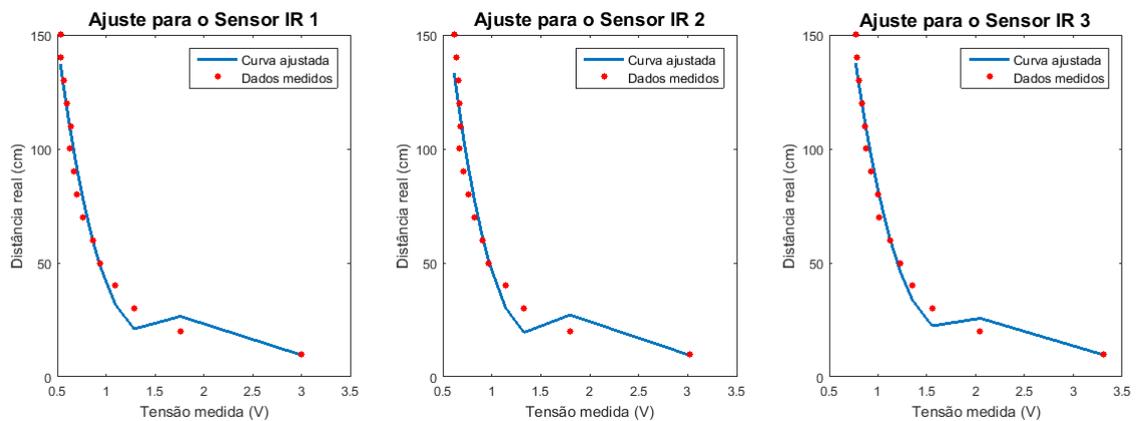


Figura 28 – Curva de calibração polinomial dos sensores IR 1, 2 e 3

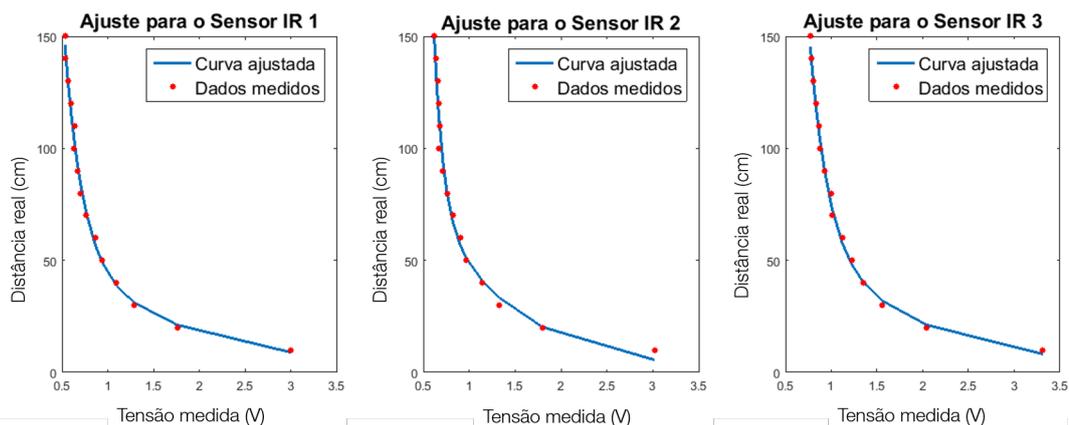


Figura 29 – Curva de calibração exponencial dos sensores IR 1, 2 e 3

Analisando as curvas de ajustes de calibração, observa-se que o sensor IR1 não faz um ajuste confiável a partir 60 cm, o sensor IR3 não é indicado para passar no ajuste para distâncias superiores à 40cm e o sensor IR2, apesar de apresentar uma pequena instabilidade, parece estimar relativamente bem ao longo de todo o seu alcance.

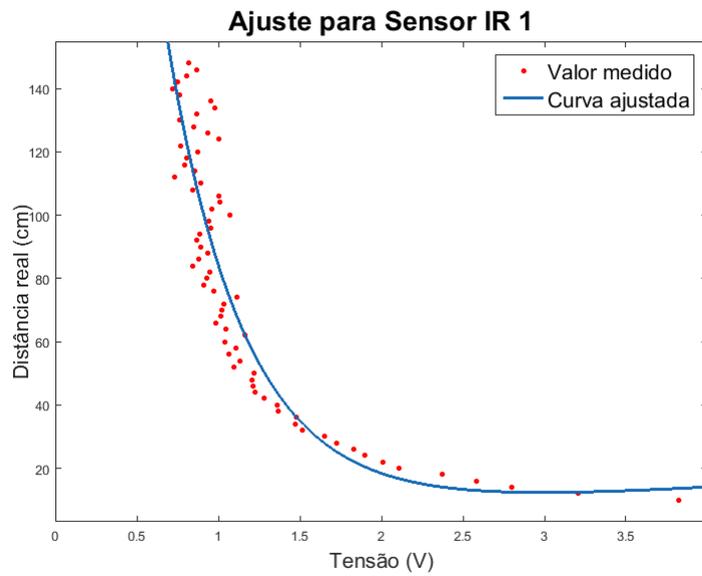


Figura 30 – Curva de calibração do sensor IR 1

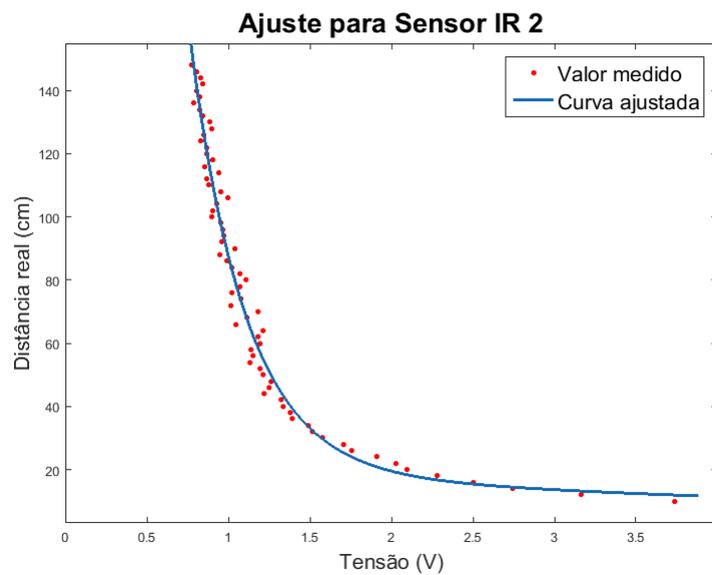


Figura 31 – Curva de calibração do sensor IR 2

Ajuste matemático do sensor infravermelho 1:

$$f(x) = 1294 * e^{(-2.931*x)} + 21.96 * e^{(-0.1637*x)} \quad (3.10)$$

Ajuste matemático do sensor infravermelho 2:

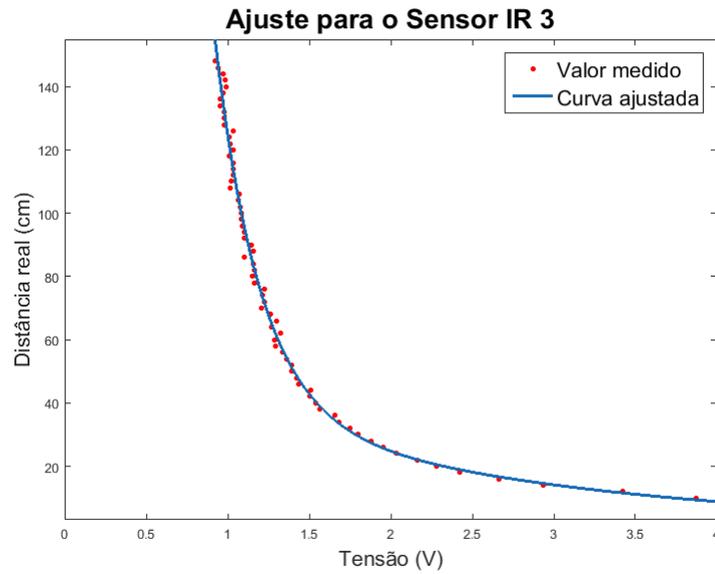


Figura 32 – Curva de calibração do sensor IR 3

$$f(x) = 3327 * e^{(-3.621*x)} + 156.86 * e^{(-0.4654*x)} \quad (3.11)$$

Ajuste matemático do sensor infravermelho 3:

$$f(x) = 631.2 * e^{(-2.104*x)} + 5.821 * e^{(0.2186*x)} \quad (3.12)$$

3.1.5 Posicionamento e instalação dos sensores

Além dos suportes previamente descritos, foram feitos dois suportes com o auxílio da impressora 3D que fixaram os IRs da parte de trás na bandeja da cadeira. Os suportes dos sensores frontais e laterais foram fixados em um suporte de madeira anexado à cadeira com abraçadeiras metálicas (figura 33), permitindo que o suporte frontal não atrapalhe o usuário, quando sentado na cadeira.

O suporte frontal está fixo (com dobradiças) em apenas um dos lados, do outro lado ele se prende ao suporte por imãs que permitem o movimento de abrir e fechar para que o usuário possa sentar na cadeira. Já os suportes laterais estão presos ao suporte de madeira com parafusos.

Também na figura 33 é possível observar que a projeção dos suportes laterais estão à frente dos pneus dianteiros da cadeira. Dessa forma, os sensores infravermelhos instalados na parte inferior dos suportes laterais, vide figura 18, estão em posições que os permitem detectar desníveis ou obstáculos à frente desses pneus.

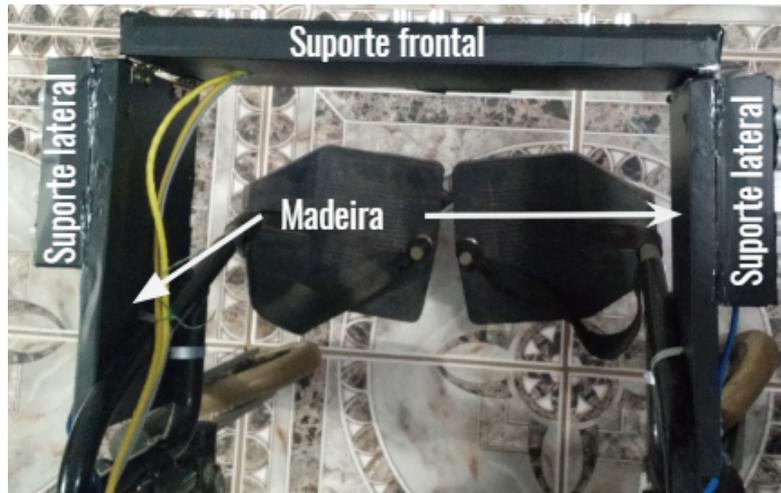


Figura 33 – Vista superior dos suportes frontal e laterais

Com o objetivo de detectar desníveis atrás da cadeira, foram fixados dois sensores infravermelhos na bandeja localizada na parte de trás da cadeira, como pode ser visto na figura 34. Os sensores estão presos a um suporte, impresso em uma impressora 3D, que tem 40° de inclinação com relação ao plano perpendicular do piso. Como essa inclinação, será possível detectar desníveis dispostos cerca de 10 centímetros de distância do último ponto da roda.

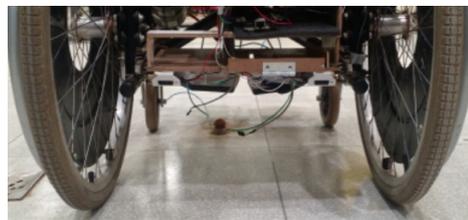


Figura 34 – Sensores IRs da parte de trás

A placa central está na bandeja da cadeira e, após a fixação de todos os sensores e suportes, os cabos dos suportes periféricos e dos sensores de trás foram devidamente conectados, concluindo assim a etapa de instalação dos sensores.

A figura 35 mostram como era a cadeira antes da instalação e como ela se encontra atualmente.

3.2 Aquisição e processamento dos sinais

Considerando a atuação dos 16 sensores, podemos separá-los em três categorias: sensores de ultrassom/sensores infravermelho que estimam distância realizando uma fusão sensorial; sensores de ultrassom que também estimam distância mas não realizam fusão



Figura 35 – Visão frontal, lateral e traseira da cadeira antes e depois da instalação dos sensores.

sensorial e os sensores de infravermelho que detectam desnível. Essas categorias foram determinantes no desenvolvimento do *firmware* utilizado nesse projeto.

Para os sensores da primeira categoria, o sensor de UL foi lido, seu dado foi ajustado e filtrado. Da mesma forma, procedeu-se com os dados do sensor IR e, em posse dos dados filtrados, realizou-se a fusão sensorial.

Como todos os sensores da segunda categoria são de ultrassom, eles foram lidos, ajustados e filtrados, sendo que a distância estimada é o valor filtrado.

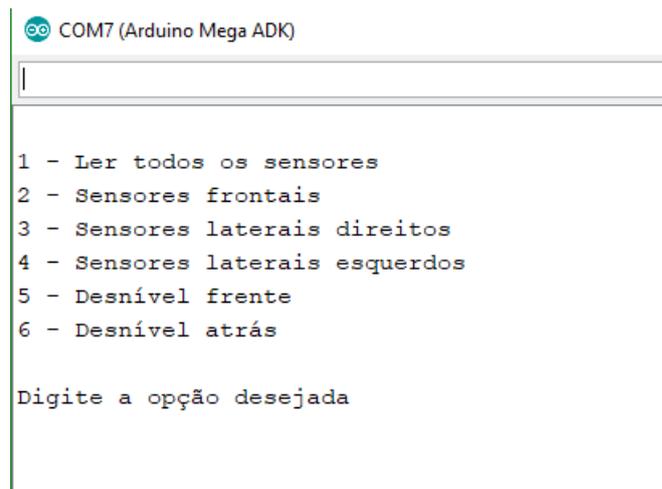
Já para a terceira categoria, os sensores infravermelhos, os sensores infravermelhos estão configurados para detecção de desnível e, portanto, o seu processamento consiste na comparação com um valor de referência que representa a distância entre ele e o piso.

Como a leitura do sensor IR pode ser influenciada por diversos fatores, como cor e material do objeto para o qual ele está apontado e luminosidade do ambiente, não é possível obter um valor absoluto que servirá de referência para todos os tipos de piso. Pensando nisso, uma das primeiras operações do código é calibrar todos os sensores IR da terceira categoria. Essa calibração consiste em realizar 100 leituras do sensor, encontrar o valor máximo e mínimo dessas leituras e estabelecê-las como referências. Se o valor lido pelo IR estiver entre esses valores, os sensores estão apontados para o chão, se o valor for maior do que o valor máximo, significa que há um obstáculo naquele ponto e, por fim, se o valor lido for menor do que o valor mínimo, há um desnível naquele ponto.

Apesar de todos os cuidados tomados na instalação, os sensores não estão com-

pletamente alinhados, ou seja, não estão todos à mesma distância do chão. Por isso, cada um dos sensores é calibrado e define seus respectivos valores mínimos e máximos.

A interface com o usuário será realizada via comunicação serial no Arduino *Software* (IDE). Para facilitar a interação usuário-máquina, foi implementado um menu, mostrado na figura 36, no qual é possível selecionar o grupo de sensores que se obter os dados (todos os sensores, sensores frontais, sensores laterais esquerdos ou direitos, sensores de desnível da frente ou de trás). A figura 37 mostra como são apresentados os dados.



```

COM7 (Arduino Mega ADK)
|
|
|
1 - Ler todos os sensores
2 - Sensores frontais
3 - Sensores laterais direitos
4 - Sensores laterais esquerdos
5 - Desnível frente
6 - Desnível atrás

Digite a opção desejada

```

Figura 36 – Menu

```

Ler os sensores laterais esquerdos
*****
                Sensor UL 8
Valor sem calibração: 73.90
Valor calibrado: 79.42
Filtro de Kalman: 77.52
*****
                Sensor UL 9
Valor sem calibração: 89.01
Valor calibrado: 94.98
Filtro de Kalman: 92.48
*****

```

Figura 37 – Exemplo de apresentação dos dados na serial do Arduino

Quando o usuário escolhe a opção de ler todos os sensores, a leitura se inicia pelo sensor UL1, seguido do ajuste e filtragem do dado obtido. Após um delay de 100 ms, o sensor IR1 é lido, ajustado e filtrado. Os valores filtrados passam pela fusão sensorial. Depois de mais 100ms, o sensor UL2, IR2, UL3 e IR3 passam pelo mesmo processo. Finalizada a fusão sensorial do terceiro par e passados 100 ms, o sensor UL4 é lido, ajustado e filtrado, seguido dos sensores UL5, UL6, UL7, UL8 e UL9, sempre com o

intervalo de 100 ms entre eles. Em seguida, verifica-se desnível pela referência do sensor IR4, IR5, IR6 e IR7.

Os códigos de calibração e leitura estão disponíveis em: https://github.com/mdccbranco/Cadeira_de_rodas.

3.3 Metodologia dos testes

Para validar a proposta de instrumentação apresentada neste relatório, foram realizados testes com a cadeira de rodas já com os sensores nela instalados. É importante ressaltar que antes desses testes, cada sensor foi testado individualmente diversas vezes a fim de garantir que todos estivessem funcionando corretamente. O próprio procedimento de calibração serviu como um teste prévio para os sensores. Foram realizados dois tipos de testes: estáticos e dinâmicos.

- **Testes estáticos**

Para testar os sensores de distância, foram montados alguns cenários simples com sofá, de tecido aveludado e de cor marrom, e paredes brancas. A distância dela para os objetos foi previamente mensurada com uma fita métrica e, em seguida, foi realizada a coleta dos dados dos sensores. Por serem testes estáticos, cada sensor foi lido 20 vezes e a média dessas leituras é que foi ajustada e filtrada.

- **Testes dinâmicos**

Os testes dinâmicos foram separados em três etapas. O teste com os sensores frontais, com os sensores laterais e com os sensores de desnível.

Na primeira etapa, a cadeira foi posicionada a cerca de 3 metros de distância de uma parede e, no momento em que foi iniciada a trajetória retilínea da cadeira de rodas em direção à parede, iniciou-se a coleta de dados dos sensores frontais. Quando a cadeira ficou a cerca de 10 cm da parede finalizou-se a coleta dos dados.

Na segunda etapa, a cadeira foi posicionada lateralmente a mais de 3 metros de uma parede e uma pessoa foi caminhando em direção aos sensores laterais da cadeira. O teste foi feito tanto com os sensores da esquerda, quanto da direita.

Por fim, a cadeira foi posicionada de modo que o sensor lateral infravermelho estivesse alinhado com o piso sem nenhum obstáculo entre eles, entre eles, possibilitando a calibração do sensor. Em seguida, a cadeira foi empurrada em direção a um degrau de uma escada até o ponto que detectou o desnível. Nesse ponto, mediu-se a distância entre a roda traseira e o degrau. O teste foi realizado colocando tanto a frente quando a parte de trás da cadeira próxima à escada.

3.4 Custo do projeto

A Tabela 8 apresenta uma estimativa do custo para instrumentar a cadeira de rodas. Foi considerando apenas o valor gasto com os materiais principais e com os sensores, sem incluir o valor da impressão 3D e sem fretes.

Tabela 8 – Custo da instrumentação

Componente	Quantidade	Valor unitário	Valor total
Arduino Mega ADK	1	R\$ 220,00	R\$ 220,00
Suportes de madeira	1	R\$ 30,00	R\$ 30,00
HC-SR04	9	R\$ 9,85	R\$ 88,65
GP2Y0A60SZLF	7	R\$ 15,80	R\$ 110,60
Resistores, fios e conectores	-	R\$ 150,00	R\$ 150,00
TOTAL			R\$ 599,25

4 Resultados

A presente seção deste trabalho mostra quais foram os resultados obtidos durante o desenvolvimento das atividades descritas na seção de metodologia apresentada no capítulo anterior. Dois tipos de medições foram realizadas, são elas: (i) medições estáticas no qual a cadeira de rodas se manteve parada e realizou leituras de distância do ambiente ao redor; (ii) medições dinâmicas no qual a cadeira de rodas ou objetos no ambiente se movimentaram a velocidade constante. Todos os resultados foram realizados em ambientes estruturados e controlados usando diversos cenários.

4.1 Testes estáticos

Cenário 1: A figura 38 ilustra a montagem do primeiro cenário. A distância entre a cadeira e a parede frontal é de 153,5 cm, entre a cadeira e a parede lateral esquerda é de 75,5 cm e entre a cadeira e o sofá é de 62 cm. Os sensores foram lidos em dois momentos e o resultado está apresentado nas tabelas 9 a 14.

Nesse cenário, o principal objetivo é analisar o comportamento dos 5 sensores UL frontais e verificar se eles conseguem estimar corretamente a distância. A distância entre a cadeira e a parede é superior à 150 centímetros, ou seja, a distância está fora do alcance dos sensores IR, por isso não serão apresentados os valores da fusão sensorial. Além disso, será possível verificar se os sensores laterais estão fazendo a estimativa correta.

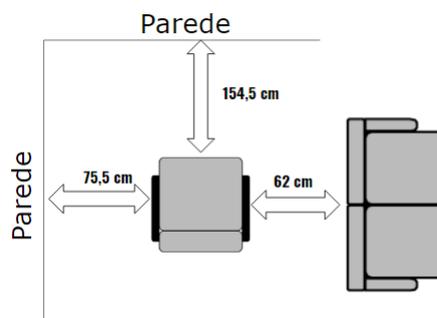


Figura 38 – Cenário de teste 1

Observando os dados dos sensores UL4 e UL5, percebe-se que o sensor UL4 mede distâncias menores do que o UL5. Tal fato pode ter sido gerado por uma possível inclinação da cadeira que passou despercebida.

A média simples dos dados ajustados à primeira leitura é de 154,11 cm e dos dados filtrados é de 154,54 cm. Na segunda leitura, esses valores são, respectivamente, 154,56

Tabela 9 – Dados do sensor UL1 e IR1 no primeiro cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL1	IR1	UL1	IR1
Valor lido	145.79 cm	—	146.13 cm	—
Valor ajustado (cm)	155.85	—	156.21	—
Valor filtrado (cm)	156.32	—	156.67	—
Fusão sensorial (cm)	—		—	

Tabela 10 – Dados do sensor UL2 e IR2 no primeiro cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL2	IR2	UL2	IR2
Valor lido	145.69 cm	—	147.29 cm	—
Valor ajustado (cm)	157.48	—	159.22	—
Valor filtrado (cm)	157.99	—	159.74	—
Fusão sensorial (cm)	—		—	

Tabela 11 – Dados do sensor UL3 e IR3 no primeiro cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL3	IR3	UL3	IR3
Valor lido	157.99 cm	—	145.76 cm	—
Valor ajustado (cm)	151.14	—	151.12	—
Valor filtrado (cm)	151.57	—	151.55	—
Fusão sensorial (cm)	—		—	

Tabela 12 – Dados do sensor UL4 e UL5 no primeiro cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL4	UL5	UL4	UL5
Valor lido (cm)	146.15	146.03	146.68	145.67
Valor ajustado (cm)	150.12	155.96	150.67	155.58
Valor filtrado (cm)	150.53	156.28	151.07	155.89

cm e 154,98 cm. Esses resultados mostram que, apesar da diferença entre a leitura dos sensores, a média entre eles é bem próxima do valor real.

Tabela 13 – Dados do sensor UL6 e UL7 no primeiro cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL6	UL7	UL6	UL7
Valor lido (cm)	58.89	59.76	60.27	59.91
Valor ajustado (cm)	61.33	62.18	62.73	62.34
Valor filtrado (cm)	62.10	62.85	63.50	63.01

Tabela 14 – Dados do sensor UL8 e UL9 no primeiro cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL8	UL9	UL8	UL9
Valor lido (cm)	72.37	71.93	72.37	71.96
Valor ajustado (cm)	75.78	74.68	75.78	74.72
Valor filtrado (cm)	76.33	75.35	76.33	75.38

Nas tabelas 13 e 14, é possível observar que os valores estimados pelos sensores laterais são próximos aos valores reais. Os resultados do cenário 1 apontam que os sensores ultrassom estão conseguindo estimar satisfatoriamente a distância da cadeira com relação aos obstáculos quando ela está parada.

No que se refere ao filtro de Kalman, algumas vezes ele ajuda o valor a chegar mais perto do real e outras vezes afasta um pouco, quando comparado com o valor ajustado. Apesar disso, o filtro é importante para a aplicação na cadeira de rodas porque a cadeira estará em um ambiente bem mais ruidoso do que o cenário de teste e o filtro será muito importante para que a estimativa do valor seja menos ruidosa após a filtragem.

Cenário 2: Após observar o comportamento dos sensores UL frontais, o cenário 1 foi reajustado para que os sensores frontais ficassem mais próximos da parede e dentro do alcance dos sensores IR. Esse ajuste acabou modificando um pouco as distâncias laterais que deram origem ao cenário 2, ilustrado na figura 39. A distância entre a cadeira e a parede frontal é de 81,5 cm, entre a cadeira e a parede lateral esquerda é de 76 cm e entre a cadeira e o sofá é de 61 cm. Os sensores foram lidos em dois momentos e o resultado está apresentado nas tabelas 15 a 20.

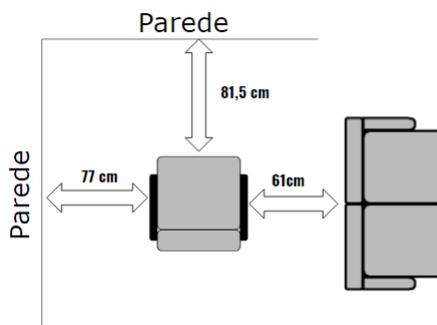


Figura 39 – Cenário de teste 2

Considerando as curvas de ajustes dos sensores IRs, na distância de 81 cm, apenas o sensor IR 2 estaria numa região menos instável para estimar a distância. Porém, em contraste com o que foi observado durante a calibração, este sensor também não consegue obter um dado estável. Na primeira leitura, ele mediu 1.11 V e na segunda 0.94 V, o que resulta em cerca de 20 centímetros de distância quando o ajuste é aplicado.

Tabela 15 – Dados do sensor UL1 e IR1 no segundo cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL1	IR1	UL1	IR1
Valor lido	77.11 cm	0.73 V	78.23 cm	0.77 V
Valor ajustado (cm)	84.43	172.58	85.59	153.92
Valor filtrado (cm)	83.96	171.92	85.13	153.26
Fusão sensorial (cm)	—		—	

Tabela 16 – Dados do sensor UL2 e IR2 no primeiro segundo de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL2	IR2	UL2	IR2
Valor lido	77.72 cm	1.11 V	77.77 cm	0.94 V
Valor ajustado (cm)	83.40	93.81	83.45	147.99
Valor filtrado (cm)	82.89	93.26	82.94	147.44
Fusão sensorial (cm)	92.40		142.08	

Tabela 17 – Dados do sensor UL3 e IR3 no primeiro segundo de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL3	IR3	UL3	IR3
Valor lido	77.47 cm	0.70 V	77.52 cm	0.67 V
Valor ajustado (cm)	80.78	151.83	80.84	161.02
Valor filtrado (cm)	80.36	151.24	80.41	160.43
Fusão sensorial (cm)	—		—	

Tabela 18 – Dados do sensor UL4 e UL5 no segundo cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL4	UL5	UL4	UL5
Valor lido (cm)	77.27	77.57	77.32	77.25
Valor ajustado (cm)	79.17	82.71	79.22	82.37
Valor filtrado (cm)	78.76	82.40	78.82	82.05

A diferença entre as leituras 1 e 2 foi de aproximadamente 2 segundos e, nesse tempo, houve essa variação. Como o sensor IR está suscetível à diversas interferências, provavelmente nesse intervalo de tempo houve alguma variação (possível incidência de luz solar).

Já os sensores IR1 e IR3 seguiram o esperado e os valores ajustados indicaram uma distância bem diferente da real, já que, na faixa em que foram realizados os testes, o ajuste não é confiável.

De modo geral, todos os sensores de ultrassom continuaram estimando uma dis-

Tabela 19 – Dados do sensor UL6 e UL7 no segundo cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL6	UL7	UL6	UL7
Valor lido (cm)	59.42	59.89	58.99	59.50
Valor ajustado (cm)	61.86	62.32	61.43	61.92
Valor filtrado (cm)	61.09	61.64	60.66	61.25

Tabela 20 – Dados do sensor UL8 e UL9 no segundo cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL8	UL9	UL9	UL9
Valor lido (cm)	75.07	74.31	74.32	73.95
Valor ajustado (cm)	78.62	77.14	77.83	76.77
Valor filtrado (cm)	78.06	76.47	77.27	76.11

tância próxima da real tanto à frente quando nas laterais da cadeira.

Cenário 3: A figura 40 ilustra a montagem do terceiro cenário. Nos dois primeiros cenários, os sensores laterais estavam relativamente próximos do obstáculo e os sensores frontais não estavam muito perto do obstáculo da frente. Pensando nisso, o terceiro cenário foi montado de forma que o obstáculo frontal estivesse mais próximo (32 cm) e os laterais mais distantes (189cm - esquerdo; 262 - direito). Os sensores foram em dois momentos e o resultado está apresentado nas tabelas 21 a 26.

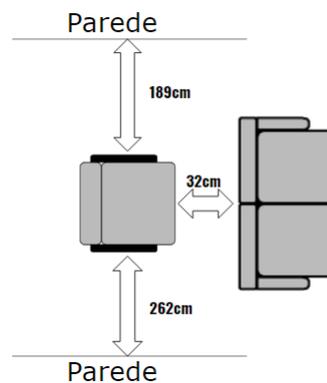


Figura 40 – Cenário de teste 3

Analisando as três fusões sensoriais, observa-se que, como nos sensores IR1 e IR2 o ajuste fica distante do valor real, eles prejudicam a fusão sensorial, mesmo o UL dando medições próximas ao valor real.

Tabela 21 – Dados do sensor UL1 e IR1 no terceiro cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL1	IR1	UL1	IR1
Valor lido	28.88 cm	1.38 V	30.50 cm	1.39 V
Valor ajustado (cm)	34.27	40.30	35.95	39.63
Valor filtrado (cm)	34.73	40.96	36.41	40.29
Fusão sensorial (cm)	40.59		40.06	

Tabela 22 – Dados do sensor UL2 e IR2 no terceiro cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL2	IR2	UL2	IR2
Valor lido	31.20 cm	1.58 V	31.62 cm	1.59 V
Valor ajustado (cm)	32.68	38.22	33.15	37.47
Valor filtrado (cm)	33.20	38.77	33.66	38.02
Fusão sensorial (cm)	38.31		37.66	

Tabela 23 – Dados do sensor UL3 e IR3 no terceiro cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL3	IR3	UL3	IR3
Valor lido	31.08 cm	1.26 V	31.09 cm	1.25 V
Valor ajustado (cm)	33.00	52.12	33.02	53.49
Valor filtrado (cm)	33.43	52.72	33.44	54.09
Fusão sensorial (cm)	—		—	

Tabela 24 – Dados do sensor UL4 e UL5 no terceiro cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL4	UL5	UL4	UL5
Valor lido (cm)	31.01	32.11	31.04	32.06
Valor ajustado (cm)	31.53	34.07	31.56	34.02
Valor filtrado (cm)	31.93	34.38	31.97	34.33

Tabela 25 – Dados do sensor UL6 e UL7 no terceiro cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL6	UL7	UL6	UL7
Valor lido (cm)	255.65	254.51	254.80	254.12
Valor ajustado (cm)	262.02	260.83	261.15	260.43
Valor filtrado (cm)	262.79	261.50	261.92	261.10

Os dados dos sensores de ultrassom laterais indicam que eles também são bons estimadores de distância mesmo quando ela é maior que 2 metros.

Tabela 26 – Dados do sensor UL8 e UL9 no terceiro cenário de teste

	Sensores			
	Leitura 1		Leitura 2	
	UL8	UL9	UL8	UL9
Valor lido (cm)	182.07	181.24	182.05	180.66
Valor ajustado (cm)	190.96	187.27	190.95	186.68
Valor filtrado (cm)	191.52	187.94	191.50	187.34

Todos os resultados obtidos nos testes estáticos foram realizados em um ambiente controlado, sem objetos de deslocando em relação à cadeira e com obstáculos maiores do que a altura dos sensores.

Com esse controle, foi possível concluir que os sensores de ultrassom conseguem estimar distância e que os sensores infravermelhos não geram dados ajustados confiáveis a partir de 32cm.

4.2 Testes dinâmicos

4.2.1 Sensores de distância

Sensores frontais: Durante a realização desse teste, houve uma grande dificuldade em realizar um trajetória completamente reta porque facilmente a cadeira se inclinava para um lado ou para o outro por conta dos pneus dianteiros. Após algumas tentativas, foi possível realizar uma trajetória quase retilínea. Esses pequenos desvios na trajetória podem ser um dos fatores que influenciaram nos resultados obtidos, que podem ser vistos na figura 41. Nela, são apresentadas as leituras realizadas pelos sensores de ultrassom 1 e infravermelho 1.

O sensor de UL1 consegue fazer a leitura dentro no esperado, porém, no final da trajetória observa-se um pequeno de desvio da cadeira que resultou no pico que se observa no gráfico. Já o sensor IR1 já começa bem fora da distância esperada e a distância medida por ele só converge para os valores do sensor de ultrassom na faixa dos 30 cm. E foi apenas nesse ponto que foi possível realizar a fusão sensorial com sucesso.

A figura 42 mostra os dados do par frontal 2. Como esse teste foi realizado com os valores instantâneos, sem média, em alguns momentos o sensor faz uma leitura incorreta por conta do ruído proveniente da leitura dos outros 5 sensores de UL que eventualmente deixam algum resquício de onda sonora para trás.

Apesar da primeira leitura incorreta, percebe-se que as demais leituras seguem o esperado e, que o sensor UL2 também captou o desvio na trajetória da cadeira.

O sensor IR2 par tem leituras mais reais do que o sensor IR1, porém não acompanha o UL que é o sensor mais confiável dos dois. Como esperado, os valores deles só vão

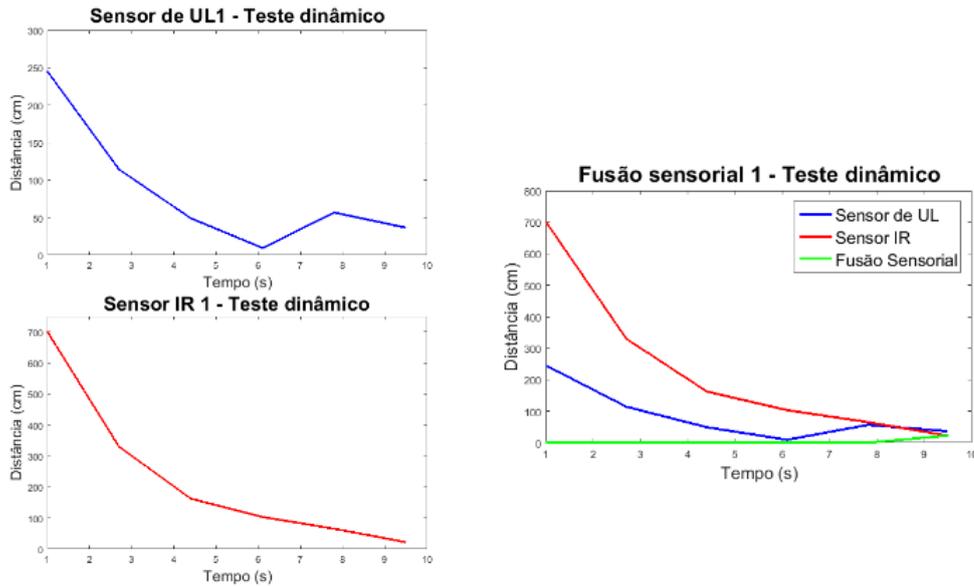


Figura 41 – Teste dinâmicos - Par frontal 1

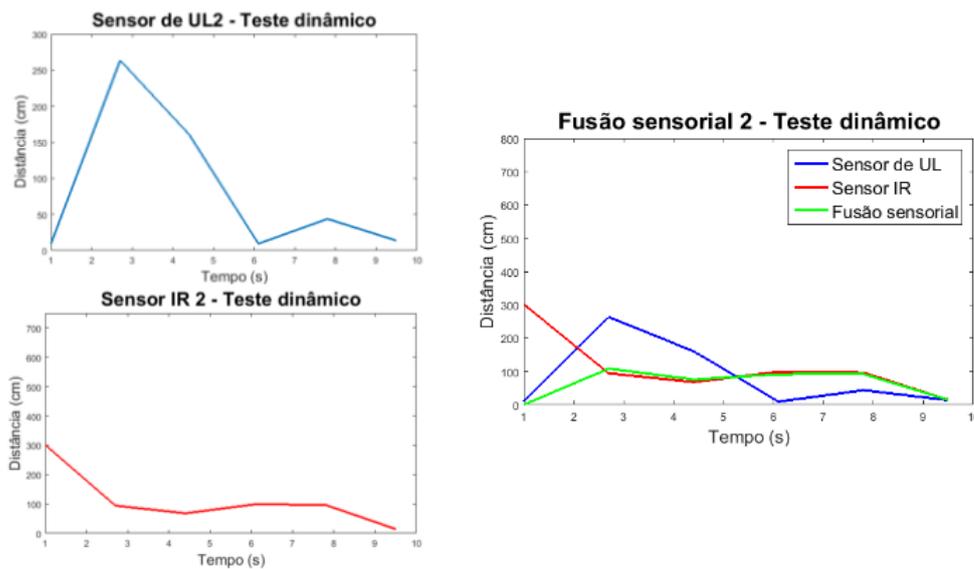


Figura 42 – Teste dinâmicos - Par frontal 2

convergir abaixo da faixa dos 50 centímetros.

O comportamento do par 3 de sensores frontais está representado na figura 43. No gráfico do sensor UL3 observa-se um outro desvio na trajetória da cadeira. Fora isso, o sensor captou bem a trajetória da cadeira. Já o sensor IR3 estimou distância cerca de 1 metro maior do que o valor do UL e também só convergiu com o valor do UL abaixo da faixa de 50 centímetros.

A figura 44 apresenta os dados dos sensores UL4 e UL5.

Dos sensores frontais, o sensor UL4 é o que tem o pior desempenho nesse teste.

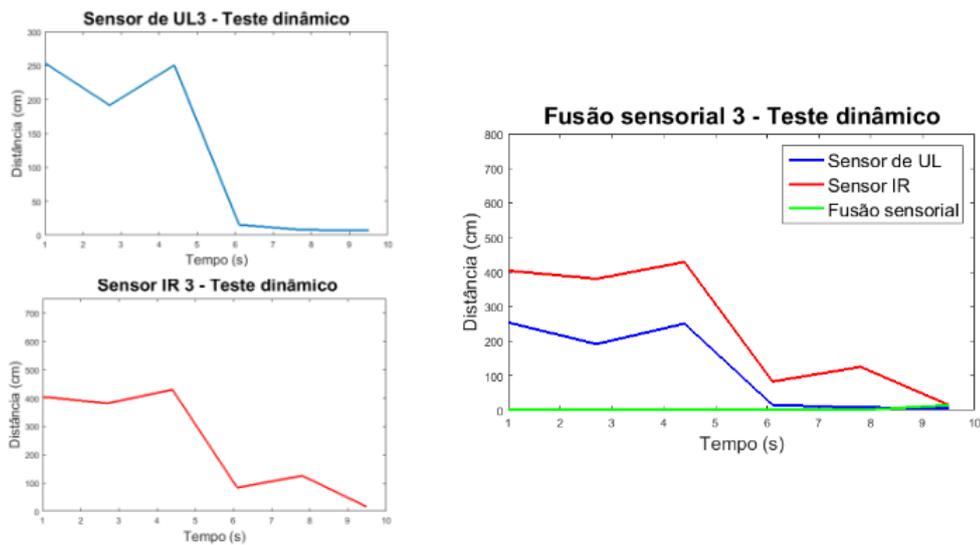


Figura 43 – Teste dinâmicos - Par frontal 3

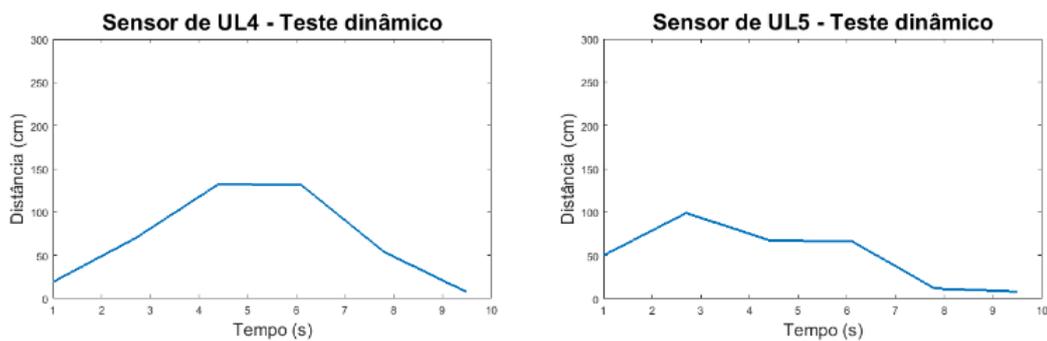


Figura 44 – Teste dinâmicos - Sensores UL4 e UL5

Das seis medidas de cada sensor, as duas primeiras são ruidosas. Apesar disso, as quatro medidas seguintes seguem o comportamento esperado.

O sensor UL5 tem o primeiro dado ruidoso e os demais acompanham o que deveria acompanhar o valor real. Comparando com o UL1, as medidas do UL5 são inferiores porque foram realizadas quase 1 segundo após o primeiro sensor e a cadeira se locomoveu bastante durante esse tempo.

- **Sensores laterais direitos**

Na figura 45, são apresentados os três testes que foram realizados. Neles, à medida que a pessoa se aproxima, os sensores percebem essa aproximação. Porém, em alguns pontos, a pessoa sai da linha de percepção do sensor.

De um modo geral, o teste mostrou que os sensores percebem bem a aproximação

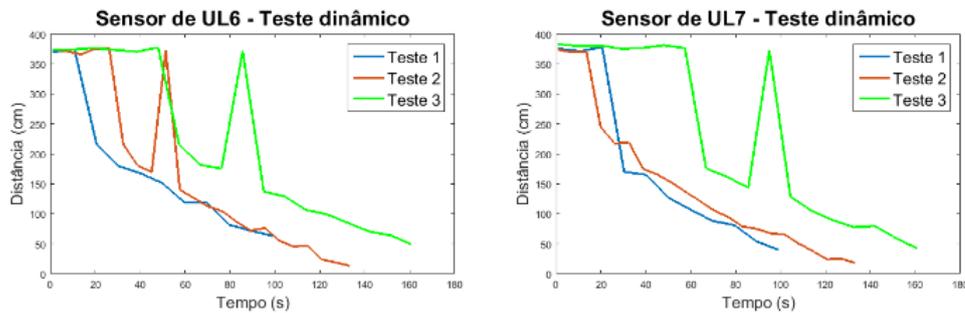


Figura 45 – Teste dinâmicos - Sensores UL6 e UL7

de uma pessoa, pois, com o passar do tempo, a distância que os sensores detectaram foram diminuindo.

- Sensores laterais esquerdos

Assim como nos resultados dos testes dos sensores laterais da direita, os sensores da esquerda perceberam bem a aproximação de uma pessoa. A figura 46 traz os dados dos testes realizados.

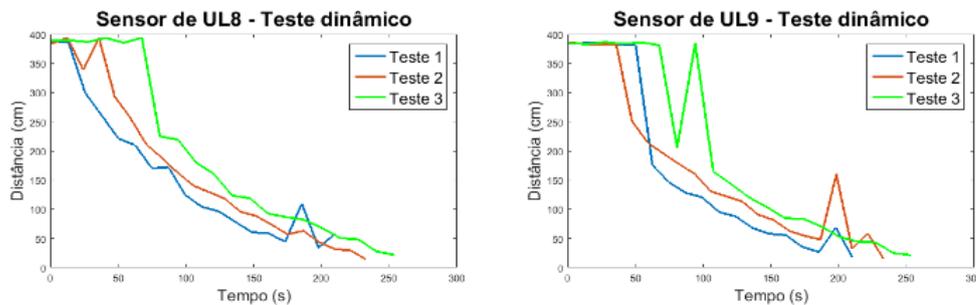


Figura 46 – Teste dinâmicos - Sensores UL8 e UL9

4.2.2 Sensores de desnível

Desnível à frente: Após a calibração dos sensores, a cadeira foi colocada à 42 centímetros de um degrau, medida da ponta do degrau até o centro do eixo do pneu dianteiro. Nessa distância, os sensores infravermelho ainda não estavam detectando o degrau, por isso, retornaram "OK!", ou seja, nenhum desnível, nem obstáculo foi detectado.

Ao aproximar a cadeira da beira da escada, a uma distância de 22 centímetros, como representado na figura 47, o sensor detectou corretamente o desnível.



Figura 47 – Posição na qual os sensores infravermelhos detectam o degrau à frente da cadeira

Desnível atrás: De forma semelhante ao que ocorreu com a detecção do desnível à frente da cadeira de rodas, que foi posicionada à 95 centímetros da escada (distância medida do centro do eixo da roda traseira) e não detectou nenhum obstáculo nem desnível. Em seguida, a cadeira foi aproximada para 60 cm e nenhum desnível foi detectado, em seguida, foi aproximada para 45 cm e ainda assim não detectou. Quando a distância foi de 25 centímetros, o desnível foi detectado, conforme ilustrado na figura 48.



Figura 48 – Posição na qual os sensores infravermelhos detectam o degrau atrás da cadeira

5 Considerações finais

Os resultados obtidos pelos testes, mostram que a instrumentação proposta funciona: é possível estimar medidas e detectar desnível. Porém, devido ao fato do sensor IR estar muito suscetível a interferências externas, colocá-lo na frente da cadeira para estimar distância não trouxe mais exatidão e sim fez com que o valor pós fusão divergisse do valor lido pelo ultrassom.

Pelas curvas de calibração, observa-se que até 40 centímetros todos os 3 sensores infravermelhos funcionam bem. Como a distância dos sensores de desnível para o chão é inferior à 40 cm, eles seriam melhor aproveitados se instalados para detectar desnível, já que, por conta da reflexão das ondas sonoras, não se pode utilizar o UL para medir desnível.

Já os sensores de ultrassom funcionam bem para estimar distância. Lateralmente, a presença de dois gera um redundância importante e a distribuição de 5 sensores frontais permite que toda a área frontal seja coberta.

Recomenda-se como trabalhos futuros, a elaboração de um projeto mecânico para estrutura externa e resistente, envolvendo toda a cadeira de rodas e permitindo a fixação, a estabilização e a proteção dos sensores. Como essa estrutura externa, seria possível pensar em um anel de sensores mais completo e que cobrisse todos os lados da cadeira.

Além disso, os sensores de desnível de trás estão colocados no último ponto possível, que é a bandeja. Porém, a bandeja não está suficientemente distante da roda traseira para permitir a detecção do desnível com segurança. Dessa forma, nessa estrutura externa, seria importante haver uma parte para conter toda a parte eletrônica e que fosse mais recuada para permitir a instalação desses sensores permitindo uma detecção com segurança.

Referências

- AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas: Técnicas lineares e não lineares: Teoria e aplicação*. 4. ed. Brasil: Editora UFMG, 2015. Citado na página 34.
- ARDUINO. *ARDUINO MEGA ADK REV3*. 2018. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-adk-rev3>>. Citado 4 vezes nas páginas 15, 17, 43 e 44.
- BAREA, R. et al. System for assisted mobility using eye movements based on electrooculography. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, v. 10, n. 4, 2009. Citado na página 31.
- BECKER, M. *Aplicação de tecnologias assistivas e técnicas de controle em cadeira de rodas inteligente*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2000. Citado na página 26.
- BERSCHE, R.; TONOLLI, J. C. Tecnologia assistiva. 2014. Acessado em 03 de novembro de 2016. Citado na página 25.
- BRAGA, R. A. M. *Plataforma de desenvolvimento de cadeira de rodas inteligentes*. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010. Citado na página 31.
- BRASIL. *Decreto nº 6.949. Promulga a Convenção Internacional sobre os Direitos das Pessoas com Deficiência e seu Protocolo Facultativo, assinados em Nova York, em 30 de março de 2007*. Brasília, 2009. Diário Oficial da União, 26 de jan. 2007. Citado na página 25.
- BRAUNL, T. *Embedded Robotics: Mobile robot design and applications with embedded systems*. 2. ed. USA: Springer, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 34.
- DIAO, C. et al. Design and realization of a novel obstacle avoidance algorithm for intelligent wheelchair bed using ultrasonic sensors. *Chinese Automation Congress (CAC)*, Beijing, China, 2017. Citado na página 31.
- DOEBELIN, E. O. *Measurement Systems: Application and design*. 4. ed. USA: McGraw-Hill Publishing Company, 1996. Citado na página 45.
- Felipe Flop. *Sensor de Distância Ultrassônico HC-SR04*. 2016. Disponível em: <<http://www.filipeflop.com/pd-6b8a2-sensor-de-distancia-ultrassonico-hc-sr04.html?ct=41d97&p=1&s=1>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 42.
- FILHO, W. B. V. et al. Desenvolvimento de kit para automação de cadeira de rodas convencional. *VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Campinha Grande-PB, 2010. Citado na página 32.
- FREAKS, E. *Ultrasonic ranging module hc-sr04*. [S.l.], 2016. Acessado em 24 de novembro de 2016. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 42.
- IBGE. *Censo demográfico: Características gerais da população, religião e pessoas com deficiência*. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

- IVO, R. M. Sistema de controle de cadeira de rodas motorizada para usuários portadores de tetraplegia. 2017. Citado na página 32.
- KIM, P. Kalman filter for beginners with matlab examples. 2011. Citado na página 34.
- MOREIRA, A. S.; TREVIZANO, W. A. Cadeira de rodas inteligente o uso de técnicas de programação, automação e eletrônica para maior autonomia e qualidade de vida aos cidadãos de mobilidade reduzida. I, 2016. Citado na página 25.
- POLOLU. *Pololu Carrier with Sharp GP2Y0A60SZLF*. 2017. Disponível em: <<https://www.pololu.com/product/2474>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 43.
- ASSOCIAÇÃO DE APOIO AOS PORTADORES DE NECESSIDADES ESPECIAIS E DA COMUNIDADE DO DISTRITO FEDERAL; TIPO D DESIGN INDUSTRIAL LTDA; FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. C. H. L. Quintero, R. H. Van Els, M. L. Siqueira, W. de B. V. Filho, D. M. M. Arboleta, R. A. Pereira, G. de S. L. Queiroga, M. L. de L. Torres e J. C. M. Franco. *Kit para motorização de cadeira de rodas manuais*. MU 8903008-7, 19 julho 2011 ,23 maio 2017. Citado na página 32.
- ROFER, T.; LANKENAU, A. Architecture and applications of the bremen autonomous wheelchair. *Information Sciences*, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 30.
- RUÍZ-SERRANO, A. et al. Obstacle avoidance embedded system for a smart wheelchair with a multimodal navigation interface. *11th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, Orizaba, México, 2014. Citado na página 31.
- SHARP. *GP2Y0A21YK0F: Distance Measuring Sensor Unit*: Measuring distance: 10 to 80 cm. [S.l.], 2006. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 43.
- SILVA, R. M.; FILHO, D. J. S.; MIYAGI, P. E. Modelagem de sistema de controle da indústria 4.0 baseada em holon, agente, rede de petri e arquitetura orientada a serviços. *Anais do XII SBAI*, Natal-RN, 2015. Citado na página 25.
- VASCONCELOS, F. H.; SILVA, E. J.; BOAVENTURA, W. C. Instrumentação eletrônica com metrologia: bases para uma abordagem integrada. *Revista Controle & Automação*, v. 21, n. 6, 2010. Citado na página 41.
- WELCH, G.; BISHOP, G. An introduction to the kalman filter. 1995. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 35.
- WOLF, D. F. et al. Robótica móvel inteligente: Da simulação às aplicações no mundo real. *SBC Jornada de Atualizaçã em Informática*, São Carlos-SP, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 29.
- YANCO, H. A. et al. Initial report on wheelesley: A robotic wheelchair system. 1995. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 30.