



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

BANCADA BIDIMENSIONAL PARA CALIBRAÇÃO
DE SENSORES DE FLUXO ÓPTICO

MARÍLIA FARIA SANTOS

NATAL- RN, 2015

Dedicatória

Gostaria de dedicar este trabalho às pessoas que me apoiaram e me deram forças durante esta etapa tão importante da minha vida. À minha querida mãe que sempre foi meu grande exemplo, ao meu namorado Igor e à minha amiga Maíra, que sempre tiveram paciência e me trataram com carinho nos momentos em que eu mais precisei.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente aos professores do Centro de Tecnologia. Em especial ao professor Márcio Valério de Araújo, meu orientador, sempre muito paciente e solícito. Pablo Javier Alsina, que sempre trabalha muito para fazer o curso progredir. Samaherni Moraes Dias e Igor Lopes por terem me apoiado na conclusão do trabalho.

Um agradecimento especial para Válber César, sem a ajuda dele no laboratório, certamente eu seria uma pessoa com menos conhecimentos. Agradeço também aos meus colegas de curso pelo apoio e experiências que dividimos juntos e aos meus amigos e namorado por sempre me apoiarem.

Resumo

Recentemente, na literatura, o sensor do mouse tem sido alvo de diversos estudos que buscam validá-lo como um sensor de deslocamento de baixo custo que possa ser utilizado na robótica móvel. No presente trabalho é realizada a construção de uma bancada de movimento bidimensional para ser utilizada na calibração desses sensores. A mesma é usada para calibrar o eixo de deslocamento x e y do sensor de maneira independente, gerando curvas de calibração com alto índice de linearidade, apresentando um coeficiente de regressão linear de 1 para o eixo x e 0,9999 para o eixo y. Os erros calculados giraram em torno de 1 mm. A calibração foi feita em cima de uma superfície de papel branco e os valores das curvas obtidas foram testados em uma máquina de medir coordenadas de alta precisão. O sensor utilizado neste trabalho foi o ADNS-2610 e um microcontrolador Arduino Uno realizou a coleta de dados.

Palavras-chave: fluxo óptico, mouse, calibração

Abstract

In recent times, mouse sensors have been the object of various studies in the literature, which seek to validate them as low cost displacement sensors that may be used in mobile robotics. This study presents the construction of a bidimensional movement workbench to be used in the calibration of sensors. It is utilized to calibrate the sensor displacement axis x and y in an independent way, creating calibration curves with a high linearity level, with a coefficient of linear regression of 1 for the x axis and 0,9999 for the y axis . Errors vary around 1mm. The calibration was performed on a white paper surface and the obtained curve values were tested on a high precision coordinates measuring machine. The sensor utilized in this work was the ADNS-2610 and an Arduino Uno microcontroller performed the data collection.

Keywords: optical flow, mouse, calibration

Lista de Ilustrações

Figura 1– Primeiro manipulador robótico: Unimate.	1
Figura 2– Robô Hipbot desenvolvido para auxílio na reabilitação de quadris.	2
Figura 3– Robô utilizado em cirurgias de câncer de próstata.	2
Figura 4– Thermite T2, Robô de combate ao fogo.....	2
Figura 5– a) robô limpador de Calha: Looj, b) robô aspirador: LG V-R4000 e c) robô cortador de grama: Robomaw	3
Figura 6– Esquema geral de um encoder óptico incremental.	11
Figura 7– Tipos de encoders Incrementais: a) encoder simples e b) encoder de quadratura.....	12
Figura 8 - Diagrama de sinais das Fases A, B e Index para o deslocamento positivo e negativo.....	13
Figura 9– Encoders incrementais rotativos comerciais.	13
Figura 10– a) Disco com código Gray, b) Disco com código Binário Natural.	14
Figura 11– Partes da estrutura de um encoder absolute.	15
Figura 12– Encoders absolutos rotativos comerciais.	15
Figura 13– Encoder absoluto de contato.....	16
Figura 14– As duas topológicas do encoder capacitivo: a) com três discos e b) com dois discos.....	17
Figura 15– Encoder magnético em um servo-motor.	18
Figura 16– Gráfico relacionando a variação na resistência de um magneto-resistor com a variação no campo magnético incidente.....	19
Figura 17– Diferença de funcionamento entre a matriz de pixels do CCD e do CMOS durante a aquisição de dados.	22

Figura 18– Exemplos de sensores ópticos comerciais do tipo CMOS e CCD vendidos pela Canon e pela Kodak.	23
Figura 19– Padrão de cores utilizadas no mosaico de Bayer: a) RGB e b) CMY.....	24
Figura 20– Diferentes padrões de cores utilizados em filtros de sensores CCD e CMOS.	25
Figura 21– Principais etapas do processo de odometria visual.....	27
Figura 22– Diagrama de agulhas utilizado para representação do fluxo óptico.	28
Figura 23– O movimento relativo entre a esfera e a fonte de luz nem sempre resultará em fluxo óptico.	29
Figura 24– Princípio de funcionamento do mouse óptico e suas principais partes. ...	30
Figura 25– Imagens processadas pelo CI do mouse	31
Figura 26– Gráficos mostrando o deslocamento obtido pelo mouse para os eixos x e y versus o espaço real percorrido por ele. Valores medidos para z: a) 0 mm, b) 0,25 mm, c) 0,5 mm, d) 0,75 mm, e) 1 mm, f) 1,25 mm.	32
Figura 27– Gráfico do ângulo de orientação da textura nas superfícies x sensibilidade do sensor em: a) papel branco e b) cortiça.	34
Figura 28 – Gráfico da sensibilidade do sensor versus altura.	34
Figura 29– Gráfico da sensibilidade do sensor versus velocidade.....	35
Figura 30 – Gráfico da velocidade média de deslocamento x sensibilidade do sensor, para as superfícies: carpete, linóleo e madeira.	36
Figura 31– Gráficos da sensibilidade do sensor relativa ao posicionamento do laser em: a) eixo x, b) eixo y e c) nos dois eixos.....	37
Figura 32 – Esquema demonstrando como o sensor deve ser montado.	40
Figura 33– Vista seccionada do mouse.	40
Figura 34– Distância entre as lentes e a superfície.....	41

Figura 35– Especificações de pinos do sensor ADNS-2610.	41
Figura 36– Arduino Uno.	42
Figura 37– Bancada de calibração do sensor do mouse.	43
Figura 38 – Suporte do fuso.	43
Figura 39– Bancada com o eixo x e y completamente deslocados.	43
Figura 40– Bancada deslocada no eixo: a) x e b) x e y.	44
Figura 41– Áreas de fixação do mouse e do Arduino.	44
Figura 42 – Bancada de calibração fixa à MQ-Measure 353.	46
Figura 43 – Sonda MH20 da Renishaw.	46
Figura 44 – Blocos padrões de medição de 80, 75, 70, 60 e 50mm.	47
Figura 45 – Procedimento de medição do eixo x da bancada, realizada com o bloco padrão.	47
Figura 46 - Procedimento de medição do eixo y da bancada, realizada com o bloco padrão.	48
Figura 47 - Gráfico de calibração do eixo Y.	51
Figura 48 - Gráfico de calibração do eixo X.	51
Figura 49 – Gráfico dos deslocamentos medido pela máquina (M) versus os deslocamento obtidos pela curva de calibração (D).	53

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tabelas mostrando a mudança de estado dos sinais nos dois sentidos.	12
Tabela 2– Tabela resumando algoritmos de detecção com suas propriedades e performances.	26
Tabela 3– Sensibilidade média do sensor em superfícies diferentes.....	33
Tabela 4 – Relação dos peças utilizadas na construção da bancada de calibração.	45
Tabela 5 – Medições, média e desvio padrão dos pontos de calibração do eixo y. ...	49
Tabela 6 – Medições, média e desvio padrão dos pontos de calibração do eixo x. ...	49
Tabela 7– Comparação entre os resultados obtidos pela reta do eixo y de calibração (D) e pela máquina de coordenadas (M).	52
Tabela 8 – Comparação entre os resultados obtidos pela reta do eixo x de calibração (D) e pela máquina de coordenadas (M).	52

Sumário

Dedicatória	i
Agradecimentos.....	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Ilustrações.....	v
Lista de Tabelas	viii
Sumário	ix
1 Introdução.....	1
2 Revisão Bibliográfica	7
2.1 Metodologias de posicionamento e a importância da Odometria tradicional	7
2.2 Sensores utilizados na odometria tradicional.....	9
2.2.1 Encoder Óptico.....	9
2.2.1 Encoder Elétrico	16
2.2.2 Encoder Magnético.....	18
2.3 Odometria Visual.....	19
2.3.1 Sensores da Odometria Visual	21
2.3.2 Funcionamento da Odometria Visual	25
2.4 Funcionamento do Mouse.....	29
2.5 Uso do sensor do mouse como odometro baseado em fluxo óptico...31	
3 Metodologia	40
4 Resultados e Discussões	46
5 Conclusões.....	54
6 Sugestão de Trabalhos Futuros.....	56
7 Referências	57
8 Anexos.....	63

1 Introdução

De acordo com a *International Federation of robotics* (IFR, 2012), em 1959, George Devol e Joseph Engelberg desenvolveram o primeiro robô industrial, um manipulador robótico chamado Unimate, mostrado na Figura 1. Desde então as indústrias têm incentivado a pesquisa no campo da robótica objetivando a criação de sistemas capazes de atender às suas demandas. Essas pesquisas levaram ao desenvolvimento de diversas novas tecnologias no campo industrial como por exemplo trajetórias cartesianas, linguagem de programação de robôs e sistemas de visão para inspeção, tudo isso tornou possível a automatização das industriais como vemos nos dias de hoje (COX e WILFGONG, 1990).

Figura 1– Primeiro manipulador robótico: Unimate.



Fonte: IFR (2012).

Com a intensificação das pesquisas em robóticas, os robôs passaram a ser mais eficientes, realizando diversas atividades que vão além das linhas de montagem, e, segundo dados da UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe, 2005*), tornaram-se mais baratos, os preços dos robôs vendidos em 2004 caíram em 46% em relação aos de 1990. Isso permitiu que os robôs adentrassem a área de serviço do mercado realizando atividades com propósito comercial como por exemplo robôs de reabilitação (Figura 2), robôs de cirurgia (Figura 3) e robôs de combate ao fogo (Figura 4).

Figura 2– Robô Hipbot desenvolvido para auxílio na reabilitação de quadris.



Fonte: Guzmán-Valdivia et al. (2015).

Figura 3– Robô utilizado em cirurgias de câncer de próstata.



Fonte: Site da RoboticOncology¹.

Figura 4– Thermite T2, Robô de combate ao fogo.



Fonte: Site da *Society of Fire Protection Engineers (SFPE)*².

¹ Disponível em: <http://www.roboticoncology.com/robotic-prostate-surgery/>. Acesso em 24 de nov. 2015.

² Disponível em: http://www.sfpe.org/?page=FPE_ET_Issue_100. Acesso em 24 de nov. 2015.

Além disso, eles se tornaram de uso pessoal também, realizando tarefas de nosso dia a dia. Os aspiradores automáticos, por exemplo, estão ganhando grande popularidade e já foram desenvolvidos por várias marcas como a Electrolux com o seu Trilobite, a LG com o LG V-R4000 mostrado na Figura 5b e a IRobot com o Roomba. Encontramos limpadores de calha como o Looj (Figura 5a), também da IRobot, cortadores de grama como o Robomow (Figura 5c) criado pela Robomow entre outras diversidades de robôs.

Figura 5– a) Robô limpador de Calha: Looj, b) robô aspirador: LG V-R4000 e c) robô cortador de grama: Robomow



Fonte: Site dos fabricantes a) Irobot³, b) LG⁴ e c) Robomow⁵.

Segundo dados da IFA (2014) a demanda por robôs, sejam eles industriais ou de serviço, vem aumentando nos últimos anos. Em 2014 foram vendidos 229 mil robôs industriais, um aumento de 29% em relação à 2013, quando foram vendidos 178 mil. Os robôs de serviço profissional, que são os utilizados para propósitos de comércio, tiveram aumento de 11,5%, foram vendidas 21.712 unidades em 2013 contra 24.207

³ Disponível em: <http://www.irobot.com/For-the-Home/Outdoor-Maintenance/Looj.aspx>. Acesso em 24 de nov. 2015.

⁴ Disponível em: http://www.lg.com/global/img/about/award/2006_18_large_V-R4000.jpg. Acesso em 24 de nov. 2015.

⁵ Disponível em: <http://usa.robomow.com/shop/mowers/rc-306-4/>. Acesso em 24 de nov. 2015.

em 2014. Foram vendidos 4.7 milhões de robôs de serviço pessoal em 2014, um aumento de 28% em comparação com as vendas de 2013.

Em 1977, no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de Tsukuba, Japão, foi criado o primeiro robô móvel autônomo (PISSARDINI, WEI e JÚNIOR, [200-?]). Um robô móvel autônomo, ou veículo autônomo, é uma máquina capaz de mover-se e realizar ações inteligentes sem que necessite de uma guia para seguir ou de um controle teleoperado (COX e WILFONG, 1990), ou seja, o robô é capaz de navegar no ambiente de forma autônoma.

Um dos maiores desafios para os robôs móveis autônomos é lidar com as incertezas ligadas ao ambiente de navegação, para lidar com tais dificuldades é necessário dotar os robôs de diversos sensores e algoritmos de planejamento de trajetórias. Nas indústrias em geral, afim de reduzir custos no desenvolvimento do sistema robótico, os robôs trabalham em ambientes estruturados, ou seja, o ambiente é construído para se adaptar aos movimentos e forma de atuação do robô, quanto mais estruturado for o ambiente mais se reduz as incertezas com as quais o robô precisará lidar de modo que ele se torna mais simples de ser desenvolvido e mais barato.

Segundo Cox e Wilfong (1990) a maioria dos robôs industriais trabalham em um ambiente tão estruturado que eles não precisam de nenhum sensor que atue no ambiente externo, ele simplesmente mantém-se repetindo uma mesma sequência de movimentos. Robôs móveis autônomos, entretanto, são requisitados para atuar em ambientes não estruturados e repletos de incertezas, para que isso seja possível eles precisam ser dotados de um sistema de navegação e sensoriamento robusto.

A Navegação é a área que estuda o posicionamento e orientação do robô no ambiente considerando o caminho realizado pelo mesmo partindo de um ponto inicial até um ponto final (COX e WILFONG, 1990). No caso de robôs autônomos, dado um conhecimento parcial do ambiente e uma localização que deve ser alcançada, navegar significa usar seu conhecimento do ambiente para gerar uma trajetória que deve ser seguida evitando-se quaisquer obstáculos que possam surgir. Isso deve ser feito da maneira mais eficiente e confiável possível (SIEGWART e NOURBARKHSH, 2004).

Leonard e Durrant-Whyte (1991) resumiram a problemática da navegação em três simples perguntas: “Onde estou?”, “Para onde estou indo?” e “Como eu devo chegar lá?”. A primeira pergunta refere-se a problemática da localização, o robô precisa interpretar as informações obtidas através de seu sistema de sensores para ter conhecimento da sua posição no mapa. A segunda e a terceira perguntas referem-se ao planejamento da rota de sua posição atual até a posição em que ele precisa chegar, e da estratégia que o robô deve utilizar para atingir seu objetivo.

Em virtude da importância do papel dos sensores no processo de localização dos robôs móveis e do grande desafio que ainda existe na obtenção de informações precisas do meio, muitos estudos atuais procuram desenvolver novas técnicas de sensoriamento através do desenvolvimento de novos sensores, de métodos de uso desses sensores, metodologias de posicionamento e de algoritmos que busquem minimizar erros e ambiguidades.

Não existe uma técnica universal perfeita, o que há são métodos parciais que, unidos às estratégias de controle, podem atingir bons resultados para uma dada aplicação.

Uma das estratégias mais importantes entre as metodologias de posicionamento é a odometria, segundo Borenstein e Feng (1996) este é o método mais largamente utilizado na robótica móvel. É verdade que a odometria não é um método perfeito, essa técnica se baseia na observação e integração da informação incremental de movimento obtida durante o tempo, isso significa que o erro obtido durante o sensoriamento também será incrementado, caso não haja nenhum tipo de compensação esse erro pode atingir proporções que rapidamente ocasionará na perda da localização do robô. Entretanto o método proporciona vantagens significativas como a simplicidade de implementá-lo e baixos custos (Borenstein et al., 1997), além de utilizar sensores que se encontram fixados na própria estrutura do robô e não dependem de nenhuma estrutura externa para funcionar.

Além disso, diversos métodos que minimizem os erros são e continuam sendo pesquisados e utilizados com sucesso. Em Borenstein e Feng (1996) é estudado um método de calibração prévia que diminui erros odométricos do robô derivados de seu modelo geométrico. Vários trabalhos abordam o uso da fusão sensorial entre um odômetro e algum outro tipo de sensor, em Lee e Jung (2008) é

usado um compasso magnético, em Myung et al. (2006) uma bússola digital e em L. SANDI, HEMERLY e LAGES (1998) um giroscópio.

Dentre os vários sensores disponíveis na atualidade vários trabalhos foram feitos considerando sensores ópticos baseados na odometria visual, à exemplo temos Gutierrez-Gomez, Mayol-Cuevas, Guerrero (2015), Fabian e Clayton (2014), Nistér, Naroditsky e Bergen (2004), Pertile, Chiodini e Debei (2014).

Em vistas de utilizar sensores ópticos baseados em fluxo em aplicações de odometria para robôs móveis, este trabalho apresenta a construção de uma bancada de testes e calibração de um sensor de mouse que pode ser adaptado para esta finalidade. O sensor utilizado nos mouses é um sensor visual do tipo CMOS, sendo, portanto, uma solução de baixo custo e de fácil acesso.

A bancada de testes é composta por uma estrutura mecânica capaz de realizar movimentos bidimensionais no plano cartesiano. A ideia é relacionar a quantidade de pulsos gerados pelo sensor, com a distância percorrida pelo mouse.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será abordado uma breve introdução teórica sobre metodologias de posicionamento dando-se maior ênfase à odometria. Na literatura, existem dois principais tipos: a odometria, que aqui será classificada como tradicional e que usa sensores para medição da velocidade ou do deslocamento angular da roda do robô e a odometria visual, que faz uso de sensores ópticos na identificação e processamento de recursos de imagem.

O modo de funcionamento dos principais sensores utilizados nesses dois tipos de metodologias, voltados para a robótica autônoma móvel, serão apresentados e seus princípios de funcionamento explicados. Ao fim do capítulo, o modo de funcionamento do mouse é apresentado, bem como o estado da arte no uso desses sensores como odômetros.

2.1 Metodologias de posicionamento e a importância da Odometria tradicional

Já foram desenvolvidas várias técnicas e metodologias afim de solucionar o problema da localização do robô, cada aplicação na robótica terá suas particularidades e exigências, como por exemplo recursos computacional e financeiro disponíveis, nível de exatidão necessário e características do ambiente de trabalho. Cabe ao projetista avaliar e determinar quais métodos se adequam mais.

Borenstein e Feng (1996) dividem as metodologias de posicionamento em dois grandes grupos: medição de posicionamento *absoluto* e *relativo*. O posicionamento absoluto utiliza as informações atuais dos seus sensores para informar a localização do robô em relação a um referencial absoluto, enquanto que o posicionamento relativo utiliza informações obtidas em instantes anteriores para estimar a posição do robô. Geralmente os projetistas de robôs autônomos combinam métodos dos dois grupos para o desenvolvimento de seus sistemas de navegação.

Entre as técnicas de posicionamento absoluto, temos as seguintes categorias: navegação baseada em *beacons*, navegação baseada em *landmarks* artificiais, navegação baseada em *landmarks* naturais e navegação baseada em *map-matching*.

A navegação baseada em *beacons* funciona posicionando-se três ou mais transmissores de sinais que ficam mandando informações para o robô de modo que,

conhecendo a posição dos transmissores em um mapa geral previamente computado, o robô é capaz de calcular seu posicionamento. A navegação baseada em *landmarks* funciona através da percepção do robô de recursos do ambiente, no mínimo três devem estar disponíveis a cada instante, assim como na navegação baseada em *beacons*, ele deve ter conhecimento prévio da localização dos marcos. Os recursos podem ser distribuídos no ambiente (*landmarks* artificiais) ou podem ser naturais a ele (*landmarks* naturais). E finalmente, a navegação baseada em map-matching acontece com o robô, primeiramente, construindo um mapa local do ambiente através de seus sensores e então comparando-o com mapas locais inseridos no seu sistema, caso haja correspondências entre os mapas, o robô define a sua posição.

Perceba que, em todos os métodos citados acima é necessário que o espaço de atuação do robô esteja bem estruturado, requisitando altos custos de instalações e manutenção ou, que ele seja bem conhecido (BORESNTEIN e FENG, 1996; SIEGWART e NOURBARKHSH, 2004). É importante salientar também que o map-matching exige altos esforços computacionais. O mesmo não acontece com os métodos odométricos tradicionais, pois seus sensores são em geral mais simples e, como na odometria visual, estão caracteristicamente acoplados à estrutura física do robô, não sendo necessários mapas internos ou estruturas externas a ele.

A medição de posicionamento relativo é dividida em duas categorias: navegação inercial e odometria. A navegação inercial determina a posição através do monitoramento das acelerações em direções espaciais conhecidas por meio de instrumentos que mecanizam as leis de Newton. As acelerações são integradas para a obtenção de velocidade e posição. Os instrumentos primários característicos desse método são giroscópios, acelerômetros e compassos magnéticos. Esses sistemas, entretanto, apresentam erros relacionados ao movimento de rotação da terra e desalinhamentos da plataforma estável. Em geral, eles são aliados à odometria objetivando a atenuação dos erros inerentes a ambos os métodos.

É importante salientar o uso da odometria como um método de simples aplicação e boa funcionalidade. Estando presente na maioria dos sistemas autônomos, seu maior defeito é o acúmulo do erro incremental, que se não forem tratados da maneira correta, após certo espaço percorrido pelo robô, podem acarretar na perda de localização do mesmo. Esse tipo de erro pode estar relacionado ao

escorregamento de rodas, por exemplo, ou às irregularidades inerentes à geometria das rodas.

Por fim, devido à várias técnicas que visam minimizar os erros até que se chegue à uma precisão mínima necessária (fusão sensorial, calibração prévia do robô, etc), a odometria tradicional e visual pode ser uma peça chave em sistemas de localização que atuam em ambientes onde não há disponibilidade de uso do *Global Positioning System* (GPS), por exemplo, como em ambientes fechados, ou em ambientes onde não seja viável a realização de estruturação como em Marte ou na lua.

2.2 Sensores utilizados na odometria tradicional

A maioria dos veículos autônomos dependem de alguma forma da variação de movimento da roda (BORENSTEIN e FENG, 1996), os sensores de roda são sensores proprioceptivos utilizados na medição da velocidade e variação angular das rodas ou do motor, de modo que, com a informação obtida o robô possa realizar simples cálculos e computar seu espaço percorrido ou a sua orientação em relação a um valor anterior.

Nesse trabalho serão abordados os sensores do tipo encoder incremental e encoder absoluto. O primeiro mede o deslocamento angular relativo, podendo inferir a posição absoluta da roda, enquanto o segundo mede a posição angular absoluta, podendo inferir o deslocamento rotacional (BORENSTEIN e FENG, 1996).

Esses dois sensores podem existir através de três naturezas de funcionamento: óptica, magnética e elétrica. Em virtude da predominância e disseminação do encoder óptico nas aplicações da robótica móvel, o princípio de funcionamento do encoder incremental e absoluto serão apresentados através da explicação do funcionamento dos encoders ópticos, entretanto, é importante ressaltar que o mesmo princípio é válido para os encoders elétricos e magnéticos. Estes dois últimos terão suas diferenças de funcionalidade descritas ao fim dessa seção.

2.2.1 Encoder Óptico

Segundo Siegwart e Nourbarkhsh (2004), os encoders ópticos são os dispositivos mais populares para a medição de velocidade angular e posicionamento

de rodas ou de juntas motorizadas. Esse tipo de sensor apresenta vasta aplicação além da robótica móvel, eles podem ser utilizados em qualquer sistema de controle que necessite de monitoramento e precisão em suas partes rotativas. Máquinas CNC (*Computerized Numerical Control*) (Wang et al., 2015), equipamentos de manufatura de semicondutores e máquinas de medição de coordenadas são exemplos onde se aplica o uso desse tipo de sensor (LÓPEZ, ARTÉS e ALEJANDRE, 2011).

Por volta dos anos 50 o encoder óptico foi introduzido no mercado (KENNEL e BASLER, 2008). Desde então vários avanços tecnológicos na estrutura e na análise de sinais desses sensores foram desenvolvidos. Segundo Siegart e Nourbarkhsh (2004), o vasto campo de atuação dos encoders ópticos ajudou a impulsionar o seu desenvolvimento, e como resultado, sensores de alta qualidade e baixo custo estão disponíveis atualmente.

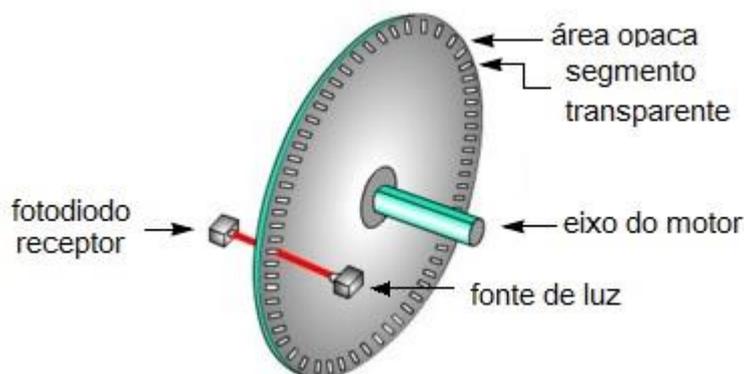
Esses sensores também podem ser utilizados na medição de movimento linear, o princípio de funcionamento é análogo ao de medição angular, e como este trabalho apresenta sensores utilizados na robótica móvel (sensores de roda), será dado ênfase apenas ao sensor de movimento angular. Mais detalhes acerca do encoder óptico linear pode ser encontrado em Wang et al. (2014).

Em Tian, Zhou e Tang (2000) há o desenvolvimento de um sistema de posicionamento para um *Smart Spray* que integra o uso do GPS e de encoders. Em Mardiyanto, Anggoro e Budiman (2015) é apresentado um sistema de criação de mapas em 2D para a navegação de robôs autônomos através do uso de um Kinect e um encoder óptico rotatório.

2.2.1.1 Encoder Óptico Incremental

O encoder óptico incremental é formado por uma ou mais fontes luminosas, geralmente LED's, que emitem luz na direção de um ou mais fotodetectores, que podem ser fotodiodos, LDR's, fototransistores ou uma célula fotoelétrica. Entre eles há um disco com janelas ópticas feitas por segmentos alternados de material opaco e transparente, dispostos de maneira equidistantes ao longo do perímetro do disco, dependendo da posição angular dele, haverá ou não a passagem de luz. O disco deve ser acoplado ao eixo do motor, de modo que o deslocamento angular de ambos seja o mesmo. Na Figura 6 é mostrado o esquema geral do encoder.

Figura 6– Esquema geral de um encoder óptico incremental.



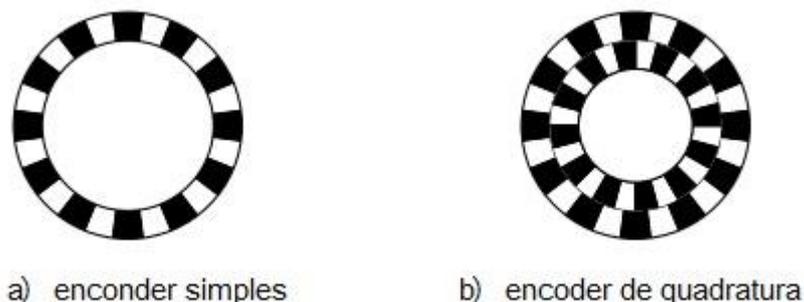
Fonte: Site da Tecnoloxia⁶.

Com o giro do eixo, o encoder deverá produzir sinais senoidais. A senóide resultante é transformada em ondas quadradas discretas (pulsos) através de um limiar que categoriza os valores recebidos em dois estados: luz ou ausência de luz. A quantidade de deslocamento se dá pela contagem de pulsos obtidos pelos fotodetectores. A resolução é medida em *cycles per revolution* (CPR). A resolução típica de encoders utilizados na robótica móvel é de 2000 CPR's (SIEGWART e NOURBARKHSH, 2004), quanto maior a resolução maior será a exatidão do sensor, entretanto também haverá um aumento no custo.

Uma das desvantagens do encoder incremental simples (Figura 7a) é que não é possível identificar o sentido de movimento do eixo, afim de solucionar esse problema foi criado o encoder de quadratura (Figura 7b). Esse encoder funciona com dois anéis, um interno e outro externo, cada um com as suas janelas óticas e seus pares de emissor e receptor de luz, as janelas de cada anel encontram-se deslocadas entre si de modo que o sinal produzido pelo anel interno e pelo externo tenham uma defasagem entre eles, de 90° por exemplo.

⁶ Disponível em: <http://tecnoloxia.org/?p=2520>. Acesso em 28 de nov. 2015.

Figura 7– Tipos de encoders Incrementais: a) encoder simples e b) encoder de quadratura.



Fonte: Elaborado pela autora.

O encoder de quadratura típico apresenta três canais de sinais: Fase A, Fase B e Index. Os sinais da Fase A e da Fase B estão relacionados e só apresentam quatro estados possíveis (01, 00, 10 e 11). Dependendo da ordem que esses estados ocorram, o movimento é caracterizado como positivo (sentido horário) ou como negativo (sentido anti-horário). Na Tabela 1, esses estados são mostrados para um ciclo nos dois sentidos (MICROCHIP TECHNOLOGY, 2007).

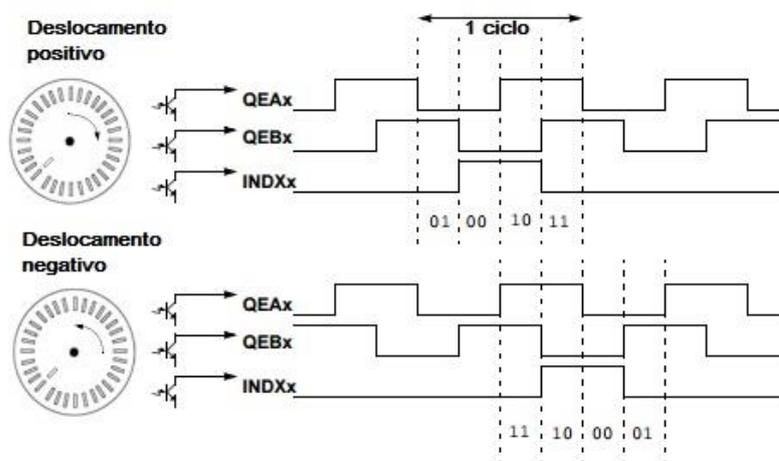
Tabela 1 – Tabelas mostrando a mudança de estado dos sinais nos dois sentidos.

Movimento Positivo		Movimento Negativo	
Fase A	Fase B	Fase A	Fase B
1	1	0	1
1	0	0	0
0	0	1	0
0	1	1	1

Fonte: Elaborado pela autora.

O Index manda um pulso uma vez a cada revolução e é utilizado como referência indicando um posicionamento absoluto do disco (MICROCHIP TECHNOLOGY, 2007). Na Figura 8 há um diagrama dos três sinais do encoder de quadratura no tempo para o deslocamento positivo e para o deslocamento negativo.

Figura 8 - Diagrama de sinais das Fases A, B e Index para o deslocamento positivo e negativo.



Fonte: Microchip Technology (2007).

Os problemas associados aos encoders ópticos podem advir da sujeira no ambiente, limitações de temperatura e tempo de resposta dos componentes optoeletrônicos, e da possível vibração dos elementos de focalização. Além disso, eles estão sujeitos à perda de referência na contagem de pulsos caso haja uma queda de energia.

Na Figura 9 estão imagens de encoders incrementais comerciais retiradas do site de vendas da loja Autonics Sensors & Controllers.

Figura 9– Encoders incrementais rotativos comerciais.



Fonte: Site de vendas da Autonics⁷.

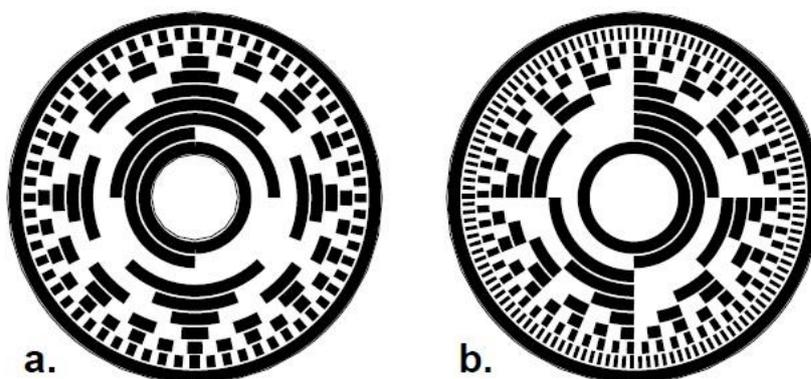
⁷ Disponível em: https://br.autonics.com/products/products_1.php?big=01. Acesso em 28 de nov. 2015.

2.2.1.2 Encoder Óptico Absoluto

Da mesma forma que o encoder incremental, o encoder absoluto também é formado por um disco fixo ao eixo do motor. A diferença é que, ao invés de apresentar janelas ópticas incrementais, os encoders absoluto têm várias faixas de leitura dispostas em anéis concêntricos. Para cada faixa, é necessária que haja um fotodetector correspondente, e cada fotodetector é interpretado como sendo um bit, assim, se tivermos N fotodetectores, teremos também N faixas de leitura e uma resolução de 2^N bits.

Os códigos mais convencionais utilizados nos discos dos encoders absoluto são o código Binário Natural, o código Gray e o código Matrix (Qiu-Hua et al., 2012). Na Figura 2.4 está representado um disco de encoder absoluto de 8 bits gravado com o código Gray (10a) e com o código Binário Natural (10b).

Figura 10– a) Disco com código Gray, b) Disco com código Binário Natural.



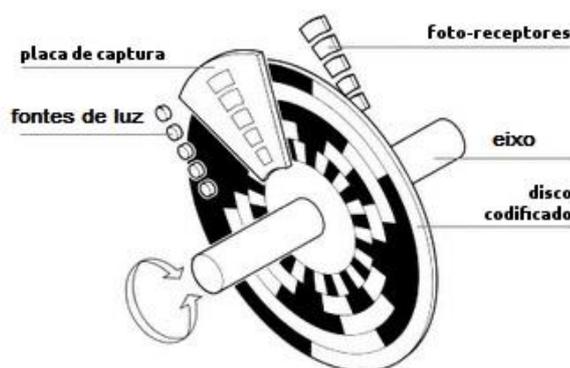
Fonte: Borenstein (1996).

Análogo ao funcionamento do encoder incremental, o encoder absoluto também possui uma fonte de luz localizada em um dos lados do disco, e uma série de fotodetectores, que podem ser da mesma natureza dos citados para o encoder incremental, localizados do lado oposto.

Quando a luz ilumina o disco, cria um padrão modulado pelas faixas de leitura que, após atravessar uma fina placa de captura que limita a largura da passagem do feixe de luz, é detectado pelos fotodetectores. Cada fotodetector é uma entrada para canais de leitura que amplificam os sinais correspondentes gerando sinais digitais que

serão futuramente processados. Assim, o encoder absoluto é capaz de fornecer um valor absoluto para cada posição angular do eixo (LIBERALI, DISINGRINI e GOTTARDI, 2003). Na Figura 11 é mostrado um esquema com os principais componentes da estrutura do encoder absoluto.

Figura 11– Partes da estrutura de um encoder absoluto.



Fonte: Traduzida do site da LBA Industrial Mining y Cia⁸.

Uma das principais vantagens do encoder absoluto sobre o incremental é que ele nunca perde a posição real em que se encontra, mesmo ocorrendo uma eventual queda de energia. Em contrapartida, os encoders absolutos criados recentemente passam muito tempo processando aquisições de imagens e decodificando-as, além disso, em geral, a medição deles apresentam menor precisão (WANG et al. 2015).

Na Figura 12 estão imagens de encoders incrementais comerciais retirados do site de vendas da loja Autonics Sensors & Controllers.

Figura 12– Encoders absolutos rotativos comerciais.



Fonte: Site de vendas da Autonics⁹.

⁸ Disponível em: <http://www.lbaindustrial.com.mx/que-es-un-encoder-absoluto/>. Acesso em 29 de nov. 2015.

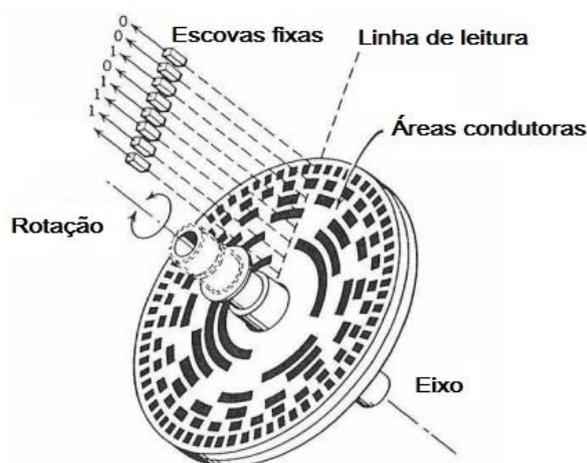
⁹ Disponível em: https://br.autonics.com/products/products_1.php?big=01. Acesso em 29 de nov. 2015

2.2.1 Encoder Elétrico

2.2.1.1 Encoder de contato

O encoder elétrico de contato apresenta um princípio de funcionamento muito semelhante ao encoder óptico, a diferença, é que ao invés de utilizar janelas ópticas, ele faz uso de caminhos condutores de eletricidade gravados entre áreas isolantes no disco de giro e, ao invés de fotorreceptores, ele apresenta escovas. Os caminhos elétricos encontram-se energizados, à medida que o disco gira, ocorre a alternância entre a área condutora e isolante que está em contato com a escova. Quando a área condutora toca na escova, o circuito é fechado e a escova conduz eletricidade, ao passar por uma área isolante, o circuito é aberto, não havendo mais a passagem de corrente. A Figura 13 foi adaptada de (HOESCHELE, 1968), e esquematiza um encoder absoluto de contato.

Figura 13– Encoder absoluto de contato.



Fonte: Traduzida de Hoeschele (1968).

Uma das grandes desvantagens no uso de sensor é justamente o contato, que faz com que ocorra um maior desgaste em virtude do atrito entre as escovas e o disco codificado.

2.2.1.2 Encoder Capacitivo

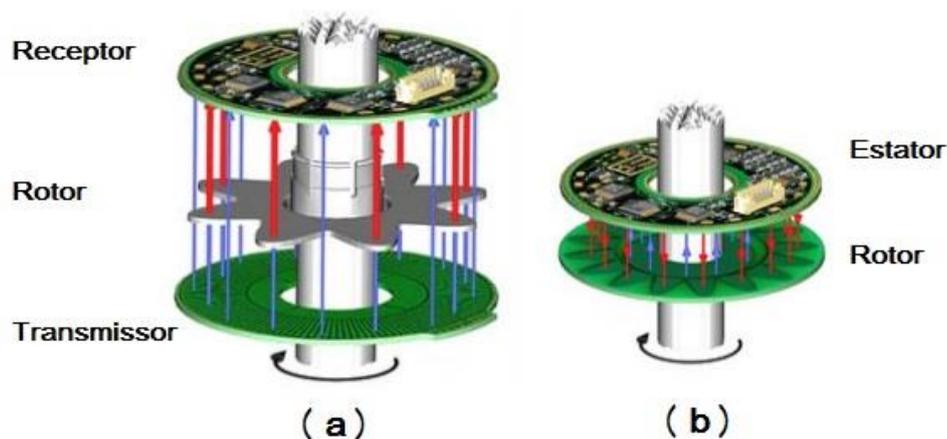
O encoder capacitivo é formado, principalmente, por eletrodos receptores e transmissores estacionários, um rotor móvel e sensores que são capazes de detectar a capacitância entre os eletrodos.

Os eletrodos transmissores emitem sinais de alta frequência na direção dos receptores, esse sinal passa pelo rotor, que é construído com um padrão senoidal e, quando gira, modula o sinal lido pelos sensores através da variação na constante dielétrica que existe entre os eletrodos. O sinal captado é então processado em incrementos de movimentos rotatórios (ZHENG et al., 2015).

A fase da onda senoidal recebida está relacionada com a posição do rotor, quando processado, o sinal obtido é demodulado em quadratura obtendo-se um seno e um cosseno. A partir do cálculo do arco tangente deles, consegue-se a posição angular do rotor (ZHENG et al., 2015).

O encoder capacitivo pode ter duas topologias diferentes, sendo formado por dois discos (Figura 14b) ou três discos (Figura 14a), no primeiro caso o transmissor e receptor estão combinados em um dos discos, enquanto o outro é o rotor, no segundo caso existe um disco para o transmissor, um para o receptor e outro para o rotor.

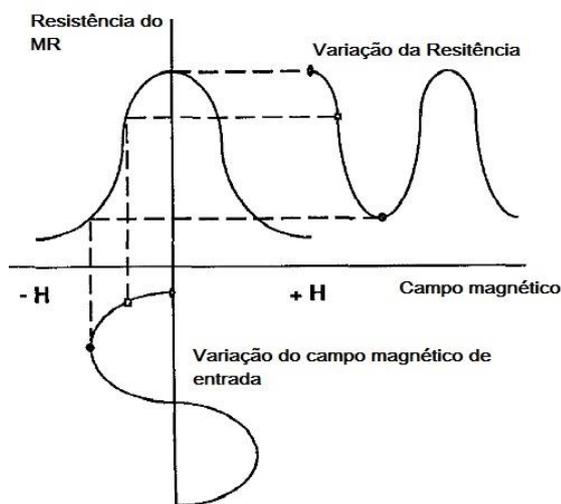
Figura 14– As duas topológicas do encoder capacitivo: a) com três discos e b) com dois discos.



Fonte: Traduzida de Netzer Precision Motion Sensores LTDA (2009).

Em comparação com os encoders ópticos que utilizam partes construtivas mais frágeis, os encoders capacitivos são mais robustos e menos sensíveis às vibrações mecânicas. Eles são capazes de altas resoluções, e uma das suas grandes vantagens em relação ao encoder óptico é que sua leitura do sinal é realizada no círculo completo do encoder (leitura holística) e não apenas em um ponto, como no caso do encoder óptico. Desse modo os encoders capacitivos são menos sensíveis à desalinhamentos do eixo do motor (KENNEL e BASLER, 2008).

Figura 16– Gráfico relacionando a variação na resistência de um magneto-resistor com a variação no campo magnético incidente.



Fonte: Luo et al. (1993).

Os encoders magnéticos apresentam bons níveis de robustez, não são suscetíveis à sujeira e são compactos, se comparados à encoders ópticos (HAO, LIU e HAO, 2008). Assim como os encoders capacitivos, eles realizam uma leitura holística, em compensação, eles não são capazes de atingir resoluções tão altas quanto as dos encoders ópticos ou capacitivos (KENNEL e BASLER, 2008).

Em Lin, Qi et al. (2007), um encoder magnético é utilizado em servo-motores de um helicóptero não tripulado e em Kanda, Maeda e Suzumori (2010), um motor micro ultrasônico é desenvolvido utilizando um micro encoder magnético. Para mais informações do funcionamento do encoder magnético no geral, consultar Luo, Yin-Jao et al. (1993).

2.3 Odometria Visual

O sentido da visão é o sentido que mais detecta aspectos do meio, ele nos provê uma gigantesca quantidade de informações que nos torna capazes de interagir de maneira inteligente em ambientes dinâmicos, na robótica móvel não é diferente, sensores de visão são potencialmente a mais poderosa fonte de detecção de recursos utilizada nos dias de hoje. Entretanto, devido à grande riqueza de informação provida pelos sensores, a extração de recursos visuais pode se mostrar uma tarefa muito complexa (BOREINSTEIN e FENG, 1996).

A odometria visual têm como base de informação os sensores visuais. Basicamente ela é o processo de estimação da trajetória de um agente (veículo, robô ou humano), através da análise de sequências de imagens geradas por uma ou mais câmeras presas à ele (SCARAMUZZA e FRAUNDORFER, 2011). Em analogia com a odometria tradicional, a análise de trajetória da odometria visual se dá através da integração de movimento obtida da dinâmica das sucessivas imagens concebidas pelas câmeras.

Da mesma maneira, ela está sujeita ao acúmulo de erros, entretanto, além de obter mais informações acerca do ambiente através de seus sensores (câmeras), a odometria visual não está sujeita à erros fundamentais da odometria tradicional como o escorregamento das rodas ou tamanhos irregulares de rodas. Segundo Scaramuzza e Fraundorfer (2011), as trajetórias realizadas através da odometria visual apresentam uma precisão maior do que as da odometria tradicional, com um erro relativo variando entre 0,1 e 2%.

Com o avanço tecnológico das câmeras aliado à tendência na diminuição de seus preços no mercado, a odometria visual tem se tornado bastante atrativa sendo alvo de vários estudos que buscam seu desenvolvimento tecnológico e novas formas de aplicações. Em Pertile et al. (2015) é testado e comparado três sistemas diferentes de odometria visual utilizando-se lentes com três comprimentos focais diferentes. Fabian e Clayton (2014) fazem a análise do ruído do sensor e da propagação de erros no sistema odométrico de um robô móvel com rodas.

A odometria visual pode ser utilizada em todos os tipos de sistemas móveis robóticos. Provavelmente, uma das suas aplicações mais famosas é a sua utilização nos robôs exploradores de marte da NASA, o Spirit e o Opportunity. Desde de 2004 ela tem sido utilizada para rastrear o deslocamento deles, auxiliando no processo de dead reckoning (FRAUNDORFER e SCARAMUZZA, 2012). Em Andert et al. (2014) é proposto um sistema de odometria visual para auxiliar na localização de veículos aéreos não tripulados. Em Wirth et al. é mostrado que a odometria visual pode ser utilizada em veículos móveis aquáticos que navegam próximos ao solo oceânico.

2.3.1 Sensores da Odometria Visual

A tarefa dos sensores de visão é transformar a imagem ótica em uma imagem “elétrica” (NALWA,1993). Os dois sensores mais utilizados para esta finalidade são o CCD e CMOS (SIEGWART e NOURBARKHSH, 2004). Ambos são incorporados às mais diversas variedades de câmeras que são empregadas na odometria visual. Abaixo será explicado como ocorre a captação de imagem por esses sensores.

O *Charged Couple Device* (CCD) é um chip formado por uma matriz de fotodiodos, que são dispositivos sensíveis à iteração luminosa, também denominados pixels. Cada pixel pode ser visto como um capacitor descarregado e sensível à luz de tamanho aproximado entre 5 e $25\mu m$. Os chips CCD podem ter uma média entre 20.000 e milhares de pixels em suas matrizes, essa quantidade é o que definirá a resolução da imagem obtida pela câmera. A FujiFilm, por exemplo, apresenta câmeras com chips CCD apresentando resolução de 12 megapixel, como é o caso da FinePix F50fd e da FinePix F100fd. O funcionamento do CCD pode ser dividido em duas etapas principais: o período de integração e a leitura.

Em um primeiro momento os capacitores são completamente carregados criando-se campos elétricos, inicia-se, então, o período de integração. Quando um feixe de luz incide sobre o sensor, fótons colidem com os pixels liberando elétrons que são capturados pelos campos elétricos e permanecem retidos nas células. Com o tempo, cada pixel acumula uma quantidade variada de carga baseada na quantidade de fótons que o atingiram.

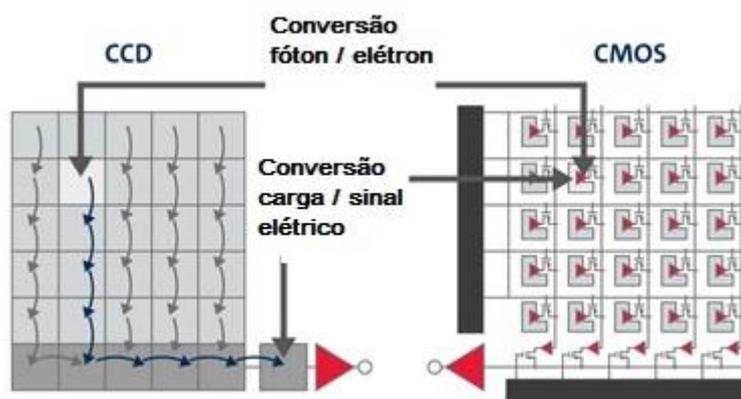
Após a conclusão dessa etapa, inicia-se a etapa de leitura. No CCD, a carga de cada pixel é transportada para ser lida em uma região específica do chip onde será amplificado e convertido em uma voltagem (digitalizado), cada linha de pixel é transportada por vez. Devido a esse movimento de cargas ao longo do CCD, é importante que haja estabilidade e controle do circuito para que não aconteça nenhuma perda de informação (SIEGWART e NOURBARKHSH, 2004).

O *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS) funciona de forma similar ao CCD, ele também é composto por uma matriz de pixels, porém, cada um deles está integrado à um circuito de transistores e outros componentes eletrônicos,

capazes de medir e amplificar os sinais dos fotodiodos. Assim, no CMOS, as cargas individuais de cada pixel são amostradas antes de serem transportadas para leitura.

Um diagrama especificando a principal diferença entre os sensores CCD e CMOS é mostrado na Figura 17.

Figura 17– Diferença de funcionamento entre a matriz de pixels do CCD e do CMOS durante a aquisição de dados.

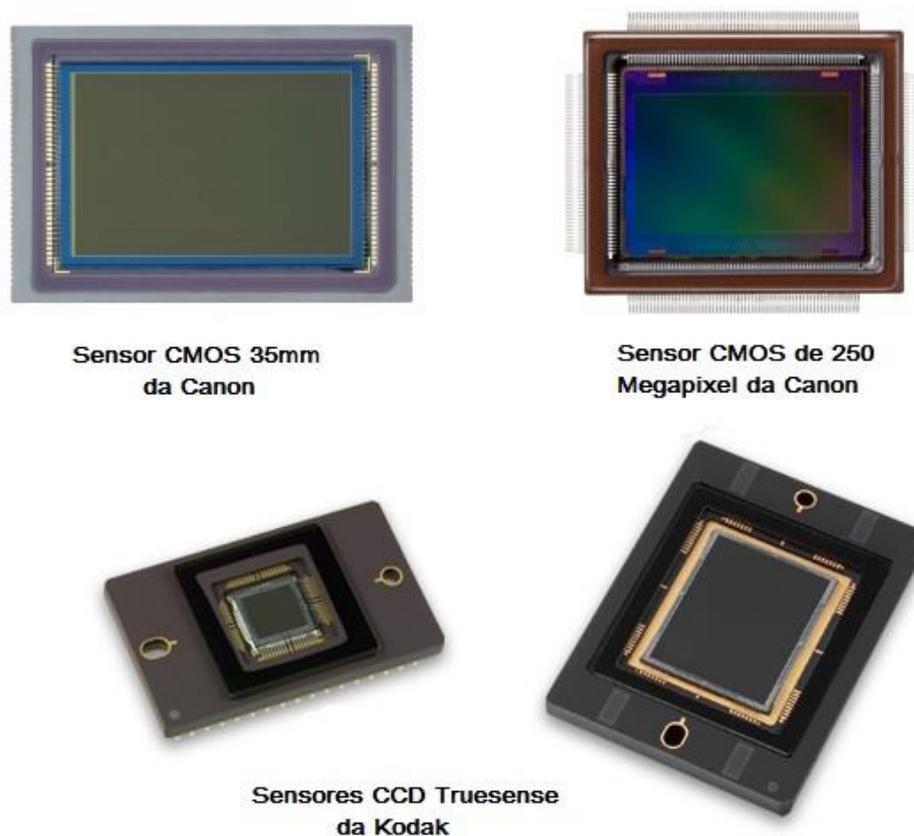


Fonte: Traduzida do site fpvlair¹⁰.

Essa diferença na etapa de transporte do CMOS gera uma série de vantagens e desvantagens em relação ao CCD. O processo de criação do CMOS é mais simples, não sendo necessário nenhum tipo de método especial e diferente dos usados na manufatura de outros semicondutores. Devido à sua simplicidade, o CMOS pode operar com um centésimo da energia necessária para operar um CCD equivalente (SIEGWART e NOURBARKHSH, 2004). Essa, vale salientar, é uma vantagem muito importante na robótica móvel pois energia é um recurso escasso. Como cada pixel é responsável pela amostragem dos sinais, o CMOS apresenta um processo de leitura mais rápido. Além disso, seu design libera espaço para a inclusão de circuitos com outras finalidades, como processamento final de imagens ou diminuição de ruído.

¹⁰ Disponível em: <http://fpvlair.com/index.php/fpv-camera/>. Acesso em 1 de dez. 2015.

Figura 18– Exemplos de sensores ópticos comerciais do tipo CMOS e CCD vendidos pela Canon e pela Kodak.



Fonte: Sites da Canon^{11 12} e da Onsemi¹³.

Perceba que no princípio de funcionamento que foi mostrado, do CCD e do CMOS, ainda não há nenhuma aquisição de cores, para que isso aconteça é necessário que seja aplicado, acima dos pixels, uma matriz de filtros de cores. Cada pixel terá um filtro para um espectro de cor específico, de modo que a informação que é obtida pelo sensor combinado com a matriz de cores é algo parecido com um mosaico (LUKAC e PLATANIOTIS, 2005). Para que as outras cores sejam estimadas, é realizado um processo de interpolação que irá produzir uma imagem totalmente colorida, esse processo é conhecido como *demosaicking*. Mais informações acerca do funcionamento do *demosaicking* se encontram em Lee e Kim (2005).

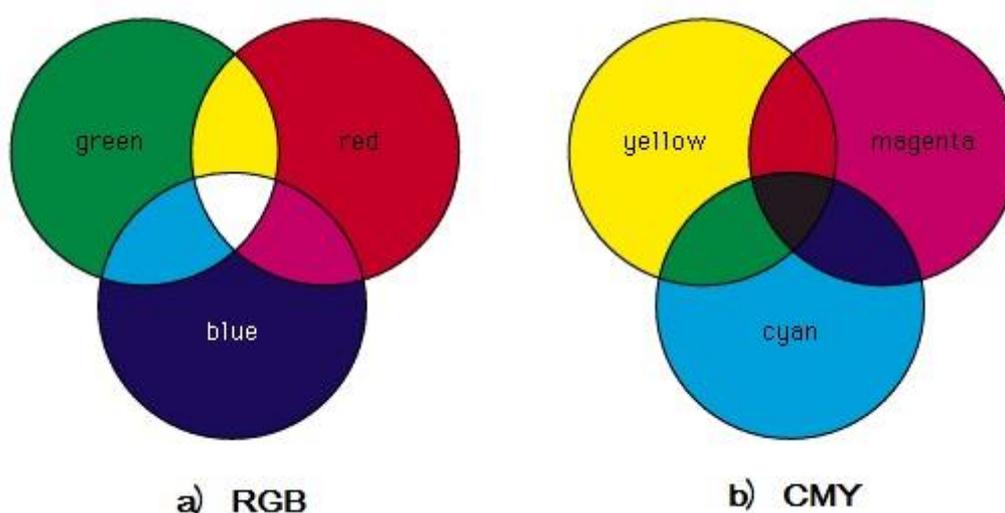
¹¹ Disponível em: http://www.canon.com/technology/canon_tech/explanation/35mm.html. Acesso em 1 de dez. 2015.

¹² Disponível em: <http://www.canon.com/news/2015/sep07e.html>. Acesso em 1 de dez de 2015.

¹³ Disponível em: <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/content.do?id=18439>. Acesso em 1 de dez de 2015.

Existem vários modelos de matrizes de cores, eles vão variar de acordo com a manufatura do produto. O padrão mais comumente utilizado é o padrão que foi proposto por Bayer, conhecido como Bayer RGB, e que utiliza as componentes de cores vermelha (*Red*), verde (*Green*) e azul (*Blue*), como mostrado na Figura 19a. Assim, a matriz de pixels é dividida em grupos de 2 x 2, onde, geralmente, dois pixels são responsáveis pela aquisição do verde enquanto o azul e o vermelho ficam à cargo de um pixel cada. Câmeras como a Canon EOS 500D, Olympus e-450, Lumix DMC-FS12, Sony Alpha 230 são exemplos de câmeras que fazem uso do Bayer RGB. (MENON e CALVAGNO, 2009)

Figura 19– Padrão de cores utilizadas no mosaico de Bayer: a) RGB e b) CMY.



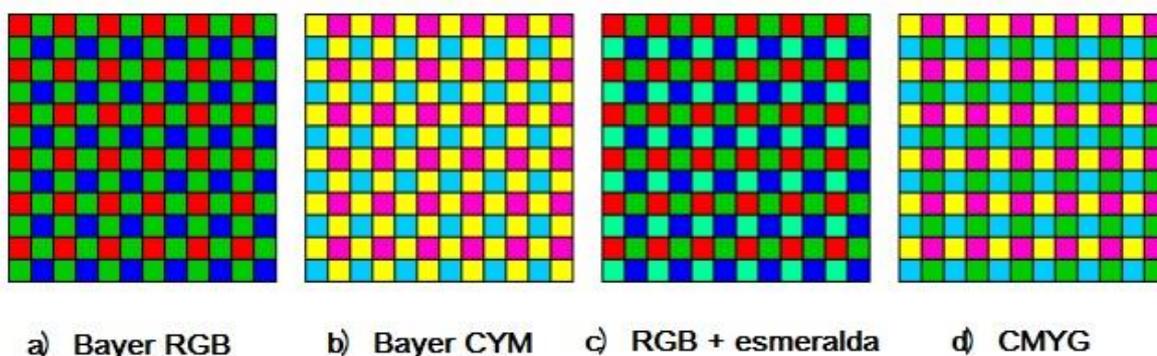
Fonte: Site Siliconimaging¹⁴.

Em Menon e Calvagno (2009), cita-se vários outros padrões da matriz de cores. No caso do RGB, o padrão de Bayer é obtido através do somatório de cores primárias. Esse padrão também pode ser obtido através da subtração das cores complementares ciano (*Cyan*), magenta (*Magenta*) e amarelo (*Yellow*), e é conhecido como padrão Bayer CMY, mostrado na Figura 19b. DSC F828 da Sony é uma câmera que utiliza o Bayer RGB com um adicional de filtro esmeralda. A JVC utiliza um padrão de amarelo, ciano e verde (YCG) em algumas de suas câmeras. Diversos outros

¹⁴ Disponível em: <http://www.siliconimaging.com/ARTICLES/CMOS%20PRIMER.htm>. Acesso em 2 de dez. de 2015

arranjos são previstos na literatura como em Lukac e Platationis (2005) e em Hirakawa e Wolfe (2008). Na figura 20 estão relacionados alguns padrões de cores.

Figura 20– Diferentes padrões de cores utilizados em filtros de sensores CCD e CMOS.



Fonte: Traduzido do PDF Sensores CCD e CMOS¹⁵.

Na odometria visual, o CCD e o CMOS são partes primordiais das câmeras que captam as imagens utilizadas pelos robôs para o cálculo de posicionamento e trajetória. Dois tipos principais de câmeras são utilizados nesse campo, a câmera monocular e a câmera estéreo.

2.3.2 Funcionamento da Odometria Visual

Após a obtenção da imagem via câmeras, para que os cálculos de estimação de posicionamento possam ser realizados é necessário que haja a extração de características das imagens, ou como elas são comumente chamadas, *features*. Os *features* são marcos visuais projetados na imagem da câmera e que se encontram dentro do cenário visualizado, um *feature* local é um recurso da imagem que difere do seu vizinho imediato em cor, intensidade e textura.

Em geral, os detectores de características buscam marcos como bordas (*edges*), bolhas (*blobs*) ou quinas (*corners*), uma quina é definida como a intersecção entre duas ou mais bordas, uma bolha é definida como diferente de seu vizinho imediato em relação à cor, intensidade e textura sem que seja uma quina ou uma borda. Para que sejam bons detectores eles devem apresentar precisão na localização, repetitividade, pois eles devem ser capazes de detectar novamente vários

¹⁵ Disponível em:

http://www.aif.estt.ipt.pt/Ficheiros_PDF/SensitAnalogica_FOTO/Fichas/Cap6c_Sensito.pdf. Acesso em 2 dez. de 2015.

features das imagens seguintes, eficiência computacional, robustez, alta capacidade de distinção, para que as características possam ter correspondência precisa nas imagens seguintes e invariância às mudanças de iluminação ou geométricas (rotação, mudança de escala e distorções de perspectiva) (FRAUNDORFER e SCARAMUZZA, 2012).

Vários algoritmos e técnicas para a detecção de recursos das imagens estão presentes na literatura, o detector de Harris (HARRIS e STEPHENS, 1988), por exemplo, tem como objetivo a localização de quinas em uma imagem através da matriz Hessiana. O detector SIFT (LOWE, 2004), um dos mais populares na detecção de pontos, pode ser utilizado na localização de quinas e bolhas, tendo, entretanto, uma piora de desempenho se utilizado com quinas. Ele apresenta vantagens como sendo invariante à diferentes iluminações, rotações e escalas, funcionando bem para consideráveis distorções de imagens e adição de ruídos. Além desses pode-se citar o SURF (BAY, TUYTELAARS e VAN GOOL, 2006), CENSURE (AGRAWAL e KONOLIGE, 2008), FAST (ROSTEN e DRUMMOND, 2006) e o Shi-Tomasi (SHI e TOMASI, 1994).

Na tabela 2 é apresentada uma tabela feita por Fraundorfer e Scaramuzza (2012) relacionando os algoritmos de detecção citados com suas respectivas propriedades e performances.

Tabela 2– Tabela sumarizando algoritmos de detecção com suas propriedades e performances.

	Detector de quina	Detector de bolhas	Invariância à rotação	Invariância à escala	Invariância à distorções de perspectiva	Repetitividade	Precisão de Localização	Robustez	Eficiência
Haris	x		x			+++	+++	++	++
Shi-Tomasi	x		x			+++	+++	++	++
FAST	x		x	x		++	++	++	++++
SIFT		x	x	x	x	+++	++	+++	+
SURF		x	x	x	x	+++	++	++	++
CENSURE		x	x	x	x	+++	++	+++	+++

Fonte: Fraundorfer e Scaramuzza (2012).

Com os *features* devidamente reconhecidos, o próximo passo para a obtenção da estimação de localização é empacotar as regiões ao redor dele em descritores. Basicamente, os descritores de *features* contém informações sobre a sua aparência, ou seja, sobre a intensidade dos pixels que estão ao redor do recurso em questão.

Inicia-se então o processo de correlação entre os descritores de *features* da imagem obtida e da próxima imagem. O algoritmo irá comparar todos os descritores da primeira imagem com todos os descritores da segunda, após esse processo, a melhor correspondência entre *features* das duas imagens é escolhida.

Após realizada a correlação dos pares de imagem, conhecendo-se bem a transformação do sistema de coordenadas da câmera para o robô, é possível estimar a localização atual dele. Na Figura 21 há um diagrama retirado de Siegwart e Nourbarkhsh (2014), demonstrando as quatro principais etapas do processo da odometria visual.

Figura 21– Principais etapas do processo de odometria visual.

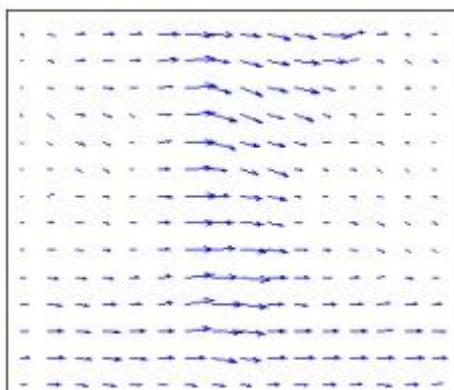


Fonte: Siegart e Nourbarkhsh (2014).

2.3.3 Fluxo Óptico

Segundo Bainbridge-Smith e Lane (1996) a computação do fluxo óptico ou velocidade da imagem é um problema fundamental no processamento de sequências de imagem. O fluxo óptico é definido como sendo a distribuição bidimensional da velocidade aparente da imagem, ele está associado a um campo de vetores de velocidade que, se conhecido o intervalo de tempo de obtenção entre as duas imagens consecutivas, podem ser convertidos em um vetor de deslocamento e vice-versa (LAUREANO e DE PAIVA, 2004; ARAUJO, 2015). No fluxo óptico, cada pixel está relacionado à um vetor de velocidade, o campo de vetores normalmente é representado por um diagrama de agulhas (Figura 22).

Figura 22– Diagrama de agulhas utilizado para representação do fluxo óptico.

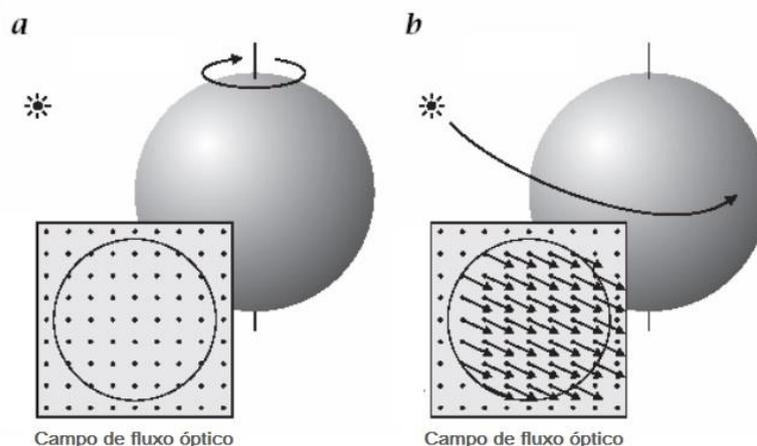


Fonte: Laureano e De Paiva (2004).

Basicamente, o fluxo óptico é a movimentação aparente que ocorre nos *features* da imagem em virtude de mudanças nos padrões de luminosidade deles. A Figura 23, retirada de Faria (1992), ilustra como a mudança nos padrões de iluminação em cima de um objeto pode se relacionar com a movimentação relativa entre ele e a fonte luminosa. Apesar de ser um forte recurso da odometria visual, é verdade também

que, em algumas situações, pode haver movimento relativo entre a fonte luminosa e o objeto, e mesmo assim o fluxo óptico calculado ser igual à zero. Esse caso está demonstrado na Figura 23a onde uma esfera gira e, entretanto, os padrões de iluminação não mudam.

Figura 23– O movimento relativo entre a esfera e a fonte de luz nem sempre resultará em fluxo óptico.



Fonte: Faria (1992).

2.4 Funcionamento do Mouse

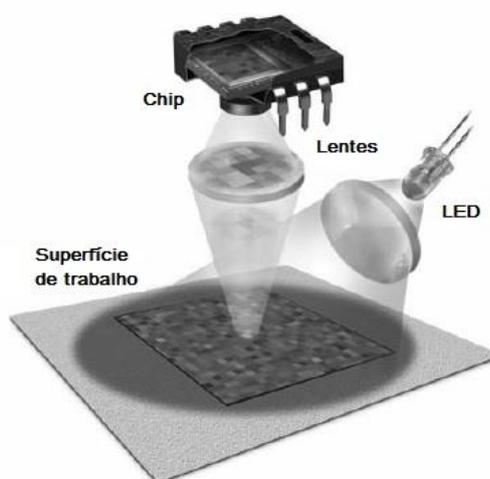
O primeiro mouse foi inventado em 1964, e desde os anos 80 ele é o dispositivo de “apontar” mais popular utilizado entre os computadores pessoais (PALACIN, VALGANON e PERNIA, 2005; MOHD KHAIRUDDIN, UDA e CHOO, 2006). Como os robôs móveis, os mouses também apresentam a necessidade de informar a sua localização em um dado ambiente e, para isso, é necessário que ele possa informar seu deslocamento relativo.

No início, o sistema do mouse consistia em uma esfera emborrachada rotativa que ficava em contato com a superfície de deslocamento girando de acordo com o movimento que era imposto a ela. Dois cilindros se encontravam em constante contato com a esfera, um dos cilindros era relativo ao movimento no eixo x e outro relativo ao movimento do eixo y, um comutador elétrico era usado para relacionar o movimento dos cilindros para o posicionamento do cursor (TUNWATTANA, ROSKILLY e NORMAN, 2008). Esse sistema, entretanto, tendia a ficar sujo, necessitava de muita manutenção e era impreciso, além disso, ele se tornava incapaz de registrar os movimentos corretamente após meses de uso intensivo (NG, 2003).

Em 1999 a Agilent Technologies desenvolveu um novo mouse que integrava em sua placa um sensor óptico CMOS com um Processador Digital de Sinais (DSP) em um mesmo chip. Com esse chip, nenhum recurso computacional adicional é necessário na medição de deslocamento e, ao contrário do seu predecessor, esse mouse não contém partes móveis em seu sistema de localização, não sendo necessária tanta manutenção, além disso ele oferece uma precisão muito superior e pode ser usado em um maior número de superfícies diferentes. Atualmente, os sensores de mouse podem ter como fonte luminosa um LED ou um laser, o segundo apresenta maior performance operacional do que o primeiro. (TUNWATTANA, ROSKILLY e NORMAN, 2008).

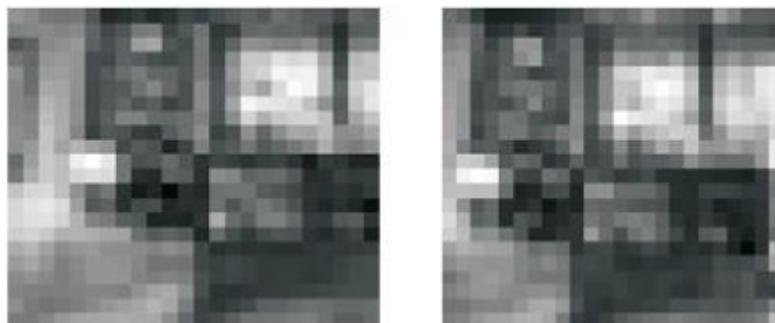
O mouse óptico é baseado em um sistema compacto de aquisição de imagem. Na Figura 24 é mostrado as suas principais partes: o chip que integra o CMOS e o DSP, um LED que ilumina a superfície criando padrões de texturas e lentes convexas que coletam a luz refletida. O sensor tira fotos contínuas da superfície (Figura 25) calculando o fluxo óptico obtido das imagens. Sua resolução é calculada em CPI (*counts per inch*) ou em DPI (*dots per inch*). Ela varia de acordo com a distância entre o sensor e a superfície, de modo que se o mouse se deslocar em uma superfície rugosa, a informação processada será feita em resoluções diferentes (XIN e SHIDA, 2008).

Figura 24– Princípio de funcionamento do mouse óptico e suas principais partes.



Fonte: Xin e Shida (2008).

Figura 25– Imagens processadas pelo CI do mouse



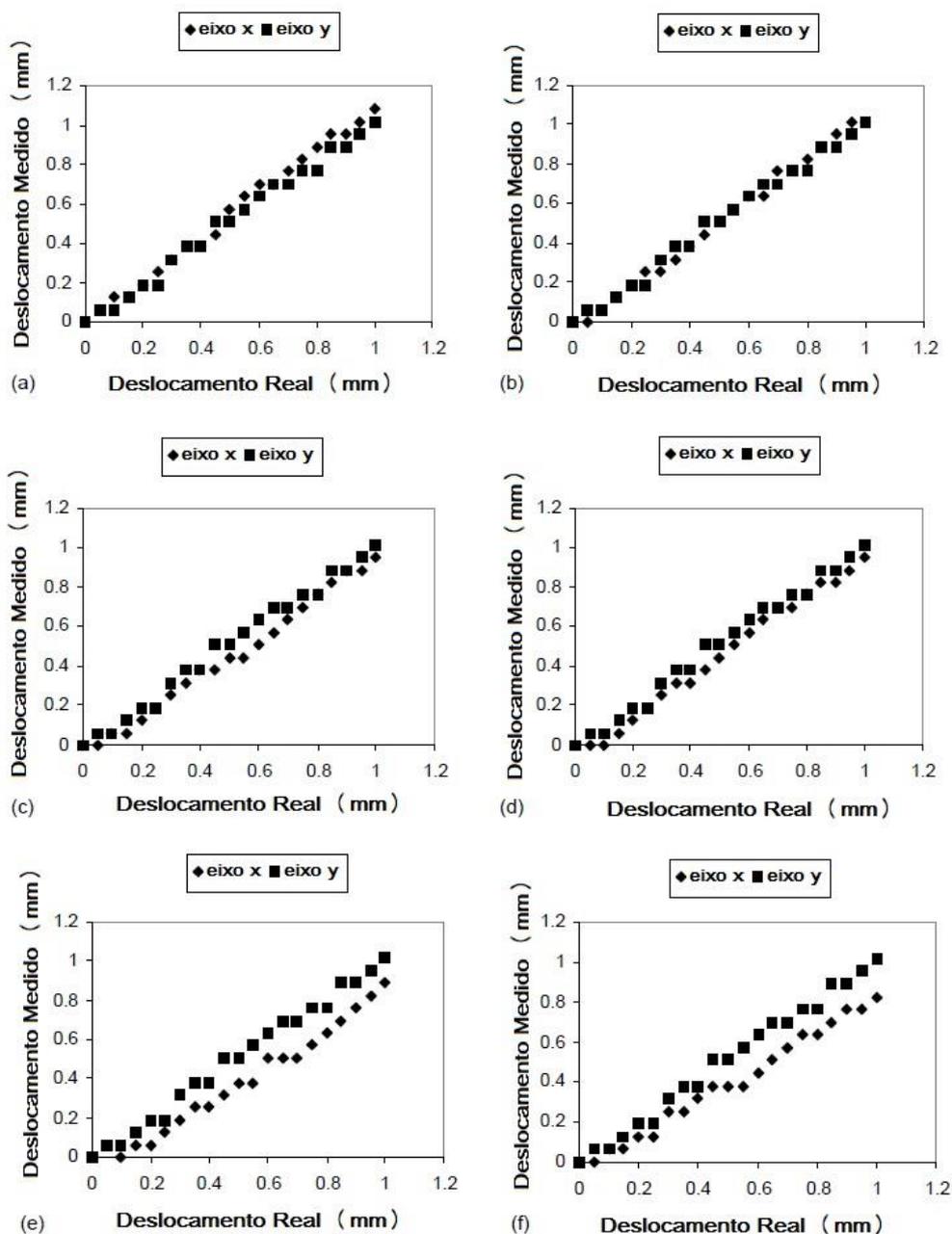
Fonte: Xin e Shida (2008).

2.5 Uso do sensor do mouse como odometro baseado em fluxo óptico

O sensor utilizado no mouse óptico tem sido alvo de diversas pesquisas na literatura atual que buscam validá-lo como uma ferramenta de medição de fluxo óptico que possa ser usada na robótica móvel e em outros setores da automação. Ng (2003) obteve bons resultados utilizando o sensor na medição de translação no eixo xy. Outros trabalhos como em Minoni e Signorini (2006) e Tunwattana, Roskilly e Norman (2008), estudam as características que influenciam os valores obtidos pelos sensores e formas de otimizá-los.

Ng (2003) usou um mouse óptico com 0,0635 mm de resolução, o mouse foi transladado numa distância de 0 à 1 mm colhendo pontos à cada 0,5 mm. O procedimento foi repetido utilizando-se diferentes valores de distância entre o mouse e a superfície, crescendo de 0 até 1,5 mm em intervalos de 0,25 mm. Foram utilizadas três tipos de superfície nos testes: uma chapa difusa branca, uma folha de blindex e um espelho. Como esperado, os resultados, mostrados na Figura 26, foram válidos apenas para a primeira superfície citada.

Figura 26– Gráficos mostrando o deslocamento obtido pelo mouse para os eixos x e y versus o espaço real percorrido por ele. Valores medidos para z: a) 0 mm, b) 0,25 mm, c) 0,5 mm, d) 0,75 mm, e) 1 mm, f) 1,25 mm.



Fonte: Tradução de Ng (2003).

Após 1,25 mm de distância entre o mouse e a superfície, não foi mais possível obter resultados devido à falta de foco. Entretanto, abaixo disso os resultados foram promissores, com um coeficiente de regressão linear $R^2 = 0,9914$, muito próximo ao limite teórico de 1 e um erro quadrático médio de $0,018 \text{ mm}^2$. Mostrando forte linearidade e baixo erro de medição.

A partir desse estudo, já se percebe duas problemáticas relacionadas ao uso do sensor do mouse: a dependência com a distância entre o sensor e a superfície, bem como com o tipo da superfície na qual ele é utilizado. Minoni e Signorini (2006) realizaram experimentos que caracterizam as limitações relativas à utilização desses sensores e destacaram quatro pontos à serem considerados para validar o uso deles: 1) a superfície de referência deve ser de alguma forma cooperativa, 2) os canais x e y do sensor devem ser calibrados em cada superfície em partícula, 3) o sensor deve ser mantido à uma distância fixa da superfície e 4) a velocidade de operação apresenta um limite máximo.

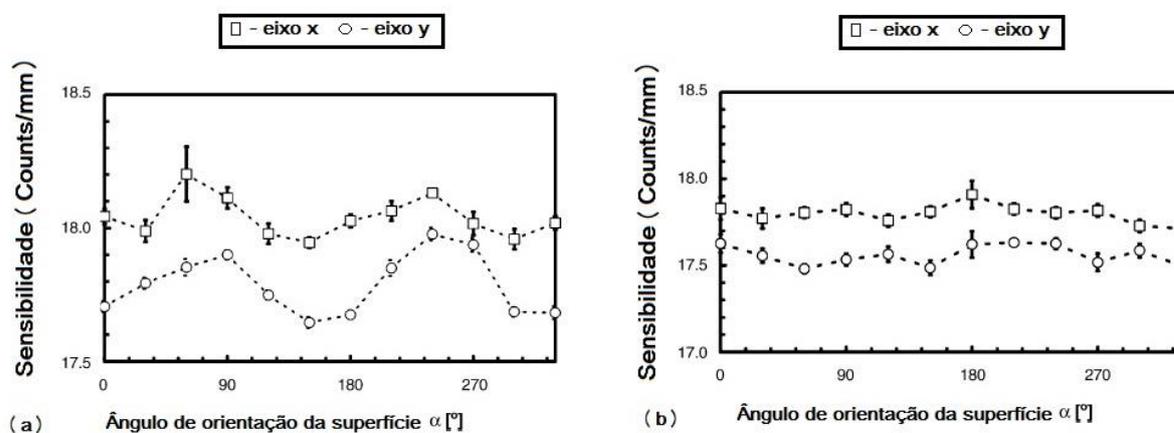
Na Tabela 3 é mostrada uma tabela relacionando a sensibilidade do sensor de acordo com o tipo de superfície em que ele é utilizado. Foi relatado também, que há uma forte dependência da sensibilidade do mouse com o ângulo em que ele se encontra em relação à orientação da textura da superfície. A variação da sensibilidade fica em torno de 2%, como mostrado nos gráficos da Figura 27. O sensor foi testado também em uma superfície com um padrão de listras preto e branco de aproximadamente 0,17 mm de espessura cada, mostrando total inconsistência nos resultados e falta de adequação para medições nesse tipo de padrão.

Tabela 3– Sensibilidade média do sensor em superfícies diferentes.

Superfície de teste	Sensibilidade (counts/mm)
Valor nominal	15.75
Papel branco	17.20
Linóleo	17.04
Parquet	26.37
Azulejo	11.60

Fonte: Traduzida de Minoni e Signorini (2006)

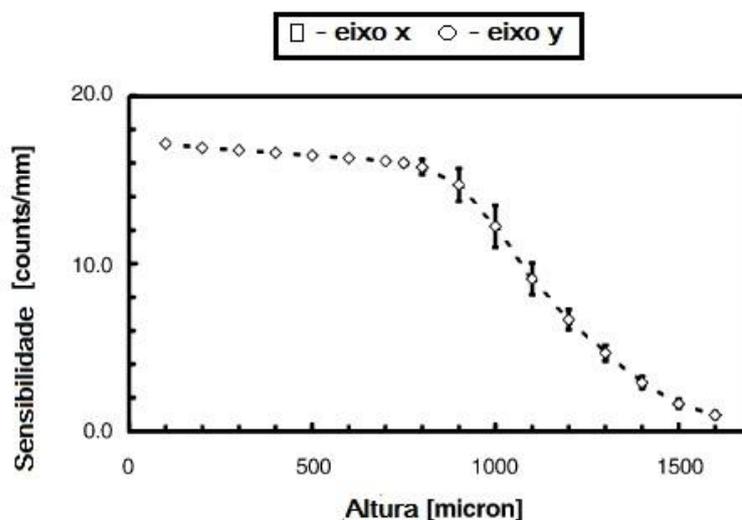
Figura 27– Gráfico do ângulo de orientação da textura nas superfícies x sensibilidade do sensor em: a) papel branco e b) cortiça.



Fonte: Traduzido de Minoni e Signorini (2006).

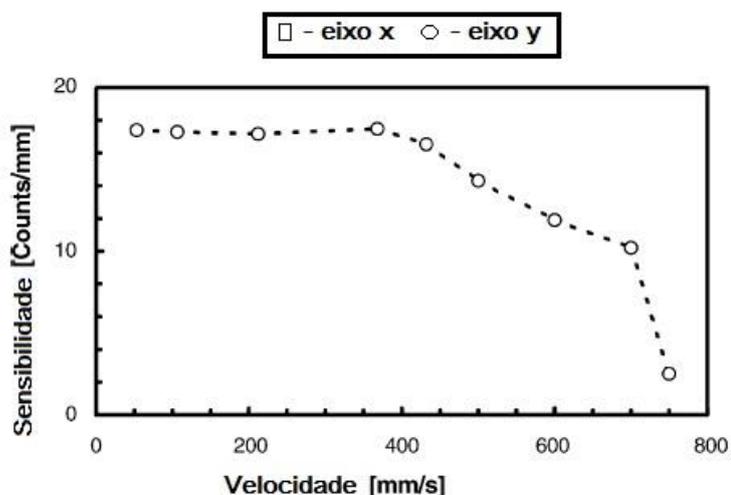
Nas Figuras 28 e 29 é mostrado os gráficos da sensibilidade em relação à variação na distância entre a superfície e o sensor, e em relação à variação da velocidade, respectivamente. Nos dois gráficos é possível notar que há concordância na sensibilidade até um certo limite, onde ela passa a cair em uma área de baixa sensibilidade até um ponto em que não há mais nenhuma.

Figura 28 – Gráfico da sensibilidade do sensor versus altura.



Fonte: Traduzido de Minoni e Signorini (2006).

Figura 29– Gráfico da sensibilidade do sensor versus velocidade.

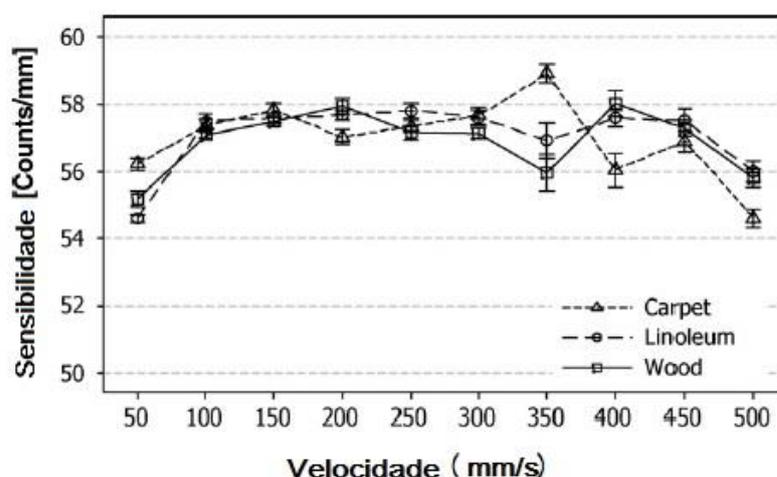


Fonte: Traduzido de Minoni e Signorini (2006).

Em Tunwattana, Roskilly e Norman (2008), duas propriedades do mouse óptico são estudadas, a influência da iluminação de acordo com o eixo em que ela é posicionada (eixo x ou y) e o comportamento da sensibilidade do sensor sob a influência da aceleração e desaceleração. Nesse trabalho, foi construído um sensor de deslocamento utilizando um sensor de mouse óptico, dois lasers (um em cada eixo) e uma lente de uma câmera *C-mount* com distância de trabalho de 65 mm. Devido à adição desta lente, foi possível trabalhar com o sensor à distâncias maiores do que em Ng (2003), onde o sensor parava de informar a partir dos 1,25 mm de altura. Neste arranjo o sensor apresenta uma distância de trabalho de 51 mm.

Nesse estudo, o mouse utilizado apresenta maior resolução e uma taxa de frames mais alta do que em Minoni e Signorini (2006), resultando em níveis de sensibilidades maiores para velocidades constantes (Figura 30). Além disso, a fonte de iluminação utilizada foi um laser, ao contrário de Minoni e Signori (2006) que utilizou um LED. Os testes foram realizados para três superfícies diferentes: Linóleo, carpete e madeira.

Figura 30 – Gráfico da velocidade média de deslocamento x sensibilidade do sensor, para as superfícies: carpete, linóleo e madeira.



Fonte: Tarduzido de Tunwattana, Roskilly e Norman (2008).

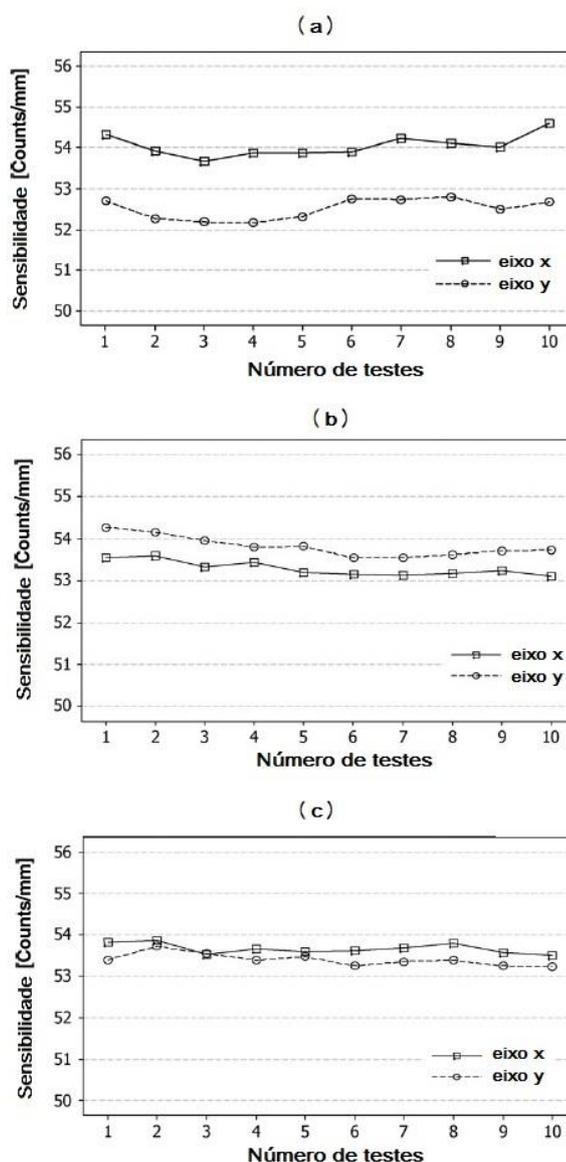
Quanto à aceleração e desaceleração, foram utilizados valores de 50,8, 101,6, 152,4, 203,2, 254, 304,8, 355,6, 406,4 e 457,2 mm/s². Foi mostrado que há influência delas na sensibilidade do mouse, de modo que ela se altera de acordo com a variação na aceleração. A sensibilidade passa a cair expressivamente com acelerações ultrapassando 355,6 mm/s².

Para uma aceleração de 254 mm/s² os valores fornecidos pelo mouse foram obtidos para quatro situações diferentes: aceleração e desaceleração, com o uso das sensibilidades calculadas de cada uma (58.13 e 57.67, respectivamente), e para aceleração e desaceleração utilizando-se uma sensibilidade média calculada através dos valores de sensibilidade obtidos na aceleração e desaceleração à 254 mm/s². O valor de 254 mm/s² foi escolhido pois foi o que mostrou maior diferença entre os valores de sensibilidade, bem como a superfície de teste selecionada, o carpete.

Os erros fornecidos pelo mouse entre os valores de sensibilidade média e das sensibilidades da aceleração e desaceleração, foram de 0,395% e 0,398% respectivamente. Esses baixos erros sugerem que uma sensibilidade mediana do sensor pode ser utilizada em aplicações gerais de posicionamento, entretanto, para aplicações que requerem um maior nível de precisão, separar os níveis de sensibilidade para aceleração e desaceleração se faz necessário.

Quanto à iluminação, concluiu-se que o posicionamento da fonte luminosa influencia na sensibilidade do mouse. A sensibilidade é sempre maior para um eixo que é coincidente com o eixo de iluminação, além disso, quando o movimento do mouse acontece em alinhamento com o eixo da fonte luminosa, os valores de sensibilidade também aumentam. Fica claro, no trabalho, que o uso de duas fontes luminosas, uma no eixo x e outra no eixo y, aumenta consideravelmente a correlação das leituras realizadas para ambas as orientações, em relação ao uso de apenas uma fonte em um dos eixos. A Figura 31 mostra os gráficos para a sensibilidade quando a iluminação está no eixo x (a), no eixo y (b), e nos dois eixos (c).

Figura 31– Gráficos da sensibilidade do sensor relativa ao posicionamento do laser em: a) eixo x, b) eixo y e c) nos dois eixos.



Apesar dessas limitações, diversas estratégias de calibração e posicionamento dos sensores foram desenvolvidas a fim de aproveitar a potencialidade do sensor diminuindo-se erros sistemáticos e não-sistemáticos. Uma das técnicas utilizadas é o uso de vários sensores para que mais informações sejam captadas. Em Cimino e Pagilla (2011) foi desenvolvido um processo sistemático para otimizar a sensibilidade do uso de N sensores, onde N é qualquer número inteiro, a partir de sua localização no robô. Além disso, ele mostra que, quão maior for o número de sensores, desde que alguns cálculos de restrição sejam respeitados, maior será a qualidade dos valores obtidos por eles.

Em Hu et al. (2009) também é mostrado um método de posicionamento e orientação para múltiplos sensores. Um método de calibração para eliminar erros sistemáticos é proposto bem como uma estratégia de checagem para reduzir a imprecisão resultante de erros não-sistemáticos.

Em Lee e Song (2004) faz-se o uso de dois sensores de mouse para que seja possível a obtenção não apenas do deslocamento no plano xy mas também do deslocamento angular do robô. Investiga-se também o melhor posicionamento dos sensores para que erros de leitura sejam diminuídos e, para obter maior precisão nos resultados, encoders são combinados com os sensores de fluxo óptico através de um filtro de Kalman estendido.

Outras metodologias de uso além de calibração e múltiplos sensores foram investigadas também. Tresanchez et al. (2009) valida o uso do sensor do mouse de forma análoga ao de um encoder incremental, fixando-o na lateral da roda de modo a eliminar um dos principais problemas relacionados ao uso desse sensor, que é o problema da variação de altura em virtude de superfícies irregulares. Trabalho que assemelha o uso do sensor como encoder é visto em Ghosh et al. (2014), um sensor do mouse é combinado com um magnetometro encontrado em celulares androids para criar um sistema de localização. Já em Tresanchez et al. (2010) a sugestão é do uso do sensor do mouse como um encoder absoluto rotatório. Em Ng e Ang (2004) estuda-se o uso dele como um sensor de movimentos vibratórios.

Nos trabalhos citados acima, o sensor do mouse é utilizado como uma alternativa na implementação do *dead-reckoning* em ambientes fechados e relativamente controlados. Ross et al. (2011) fogem desse paradigma quando propõe

o uso do mouse óptico em espaços abertos, mais especificamente, são realizados testes para a superfície do asfalto.

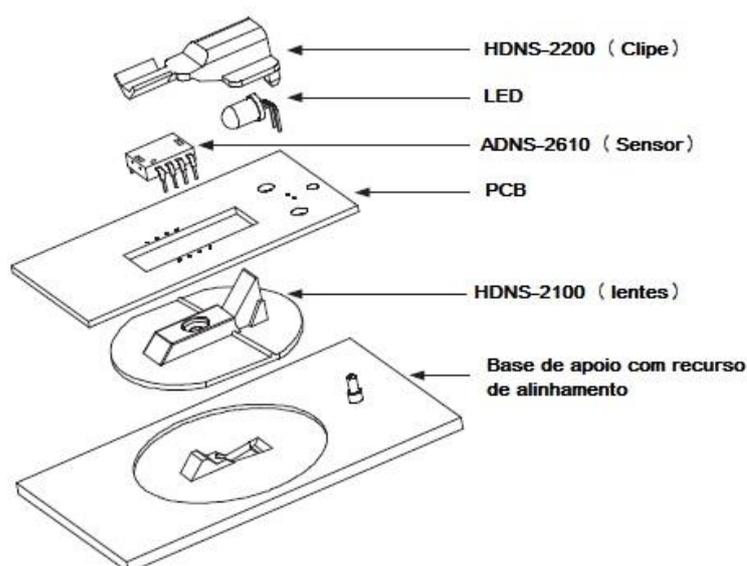
Acoplando lentes aos sensores, que permitam uma distância de trabalho de 50 mm acima do asfalto, os testes são realizados utilizando-se dois métodos: 1) compensação simultânea dos erros sistemáticos advindos das alterações de altura entre o sensor e a superfície e 2) utilização de um conjunto de sensores que apresentam pesos diferentes em suas leituras relativas ao SQUAL (quantidade de características significantes observadas na imagem, retornada pelo mouse), aliados à algoritmos de posicionamento e orientação, para melhorar a precisão da navegação no caso em que um ou mais sensores estiverem fora de foco.

Os resultados obtidos foram promissores nos dois casos, com a compensação de altura simultânea, o erro sistemático foi de 0,8% para uma alteração de 1 mm. E a utilização de pesos diferentes na leitura do SQUAL resultou em melhores resultados do que não havendo nenhum tipo de compensação, quando dois sensores são usados na medição da orientação, foi relatado um erro de 15°, utilizando esses dois sensores com pesos relativos ao SQUAL, o erro foi menor do que 1,6°, utilizando-se três o erro passou a ser menor do que 1,1°. A recomendação é que as técnicas sejam utilizadas simultaneamente para que os erros relativos à odometria sejam minimizados.

3 Metodologia

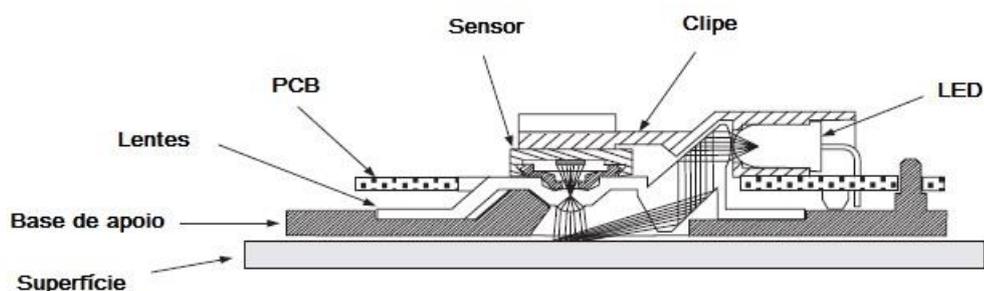
Neste trabalho foi utilizado o sensor ADNS-2610 da Avago Technologies, que foi retirado de um velho mouse óptico com conector PS/2. O sensor é formado por uma câmera CMOS monocromática de 18x18 pixels, integrada ao DSP. Operando normalmente, o sensor apresenta uma resolução de 400 cpi ou 0,0635 mm e uma velocidade de aquisição de imagens de 1500 frames/s (fps). Na Figura 32 há um esquema, retirado do *datasheet* do sensor, mostrando a vista explodida de como ele deve ser montado. Nesse esquema, o HDNS-2200 é um clipe utilizado para fixar o LED e o chip em relação às lentes. A Figura 33 mostra uma vista seccionada do mouse.

Figura 32 – Esquema demonstrando como o sensor deve ser montado.



Fonte: Traduzido de Avago Technologies (2008).

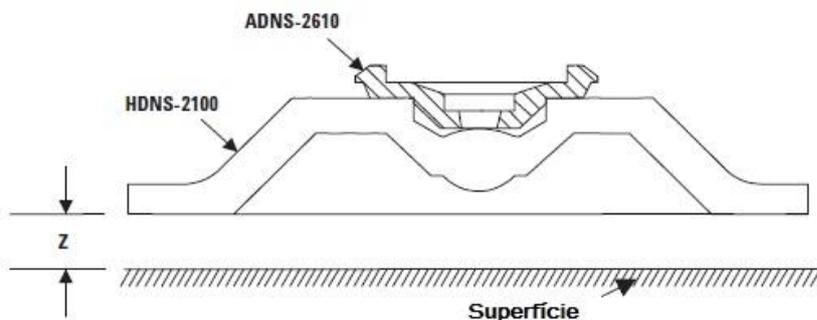
Figura 33– Vista seccionada do mouse.



Fonte: Traduzido de Avago Technologies (2008).

A altura nominal (z) que deve existir entre o referencial da lente (Figura 34) e a superfície é de 2,4 mm sendo máxima de 2,5mm e mínima de 2,3mm.

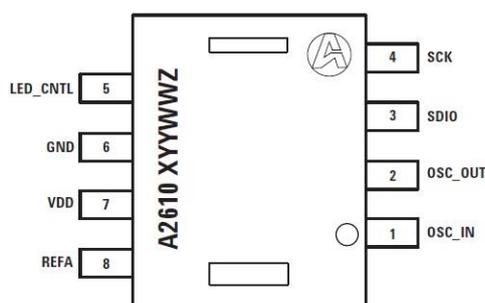
Figura 34– Distância entre as lentes e a superfície.



Fonte: Traduzido de Avago Technologies (2008).

Os registradores internos do ADNS-2610 são acessados através de comunicação Serial Peripheral Interface (SPI) utilizando 8 bits de endereço e 8 bits de informação. Existem um total de doze registradores, os registradores que guardam a informação de deslocamento são o Delta_Y e o Delta_X. A Figura 35 mostra os pinos do ADNS-2610. Os pinos relevantes para a aquisição do deslocamento são o SCK (clock), VDD (power), GND (ground) e o SDIO (data).

Figura 35– Especificações de pinos do sensor ADNS-2610.



Fonte: Avago Technologies (2008).

Os pinos do sensor são conectados aos seus respectivos pinos de um microcontrolador Arduino Uno (Figura 36) que utiliza o ATmega328 como microprocessador. O Arduino apresenta 14 pinos digitais IO e uma entrada USB que pode ser conectada ao computador.

Um programa de comunicação, que se encontra no anexo A, foi escrito para obter a leitura dos registradores de deslocamento do sensor à uma taxa de 38400

baud. A informação obtida do mouse são pulsos relativos à quantidade de deslocamento, que são contados pelo microcontrolador. O ADNS-2610 é alimentado com 5V, fornecidos pelo próprio Arduino, a sua frequência de clock interna é definida pelo cristal da placa, nesse caso, é de 24MHz, porém, a frequência de clock na saída serial equivale à doze avos da interna, ou seja, 2MHz.

Figura 36– Arduino Uno.

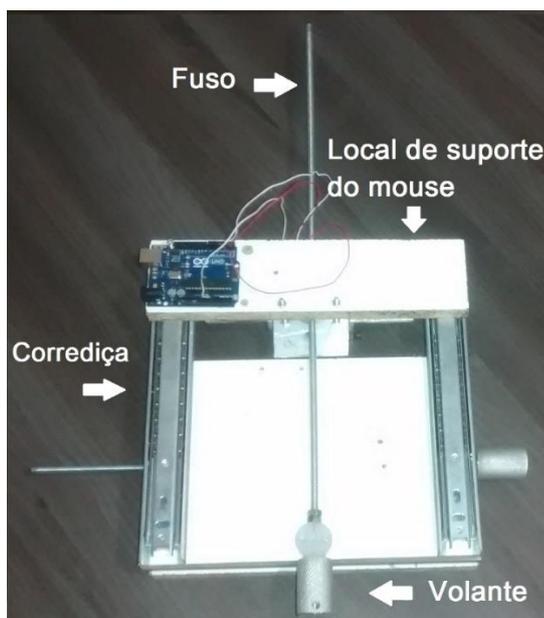


Fonte: Site do fabricante do Arduino¹⁶.

Após feita a comunicação entre o Arduino e o ADNS-2610, iniciou-se o processo de construção de uma bancada de movimento bidimensional de baixo custo para a realização e validação da calibração do sensor. A bancada é construída com três bases, inferior, mediana e superior, de madeira MDP presas à dois pares de corrediças telescópicas de gavetas, um par é responsável pelo deslocamento no eixo x e o outro no y. A Figura 37 mostra a bancada, as bases ficam conectadas à suportes com roscas que permitem a passagem de um fuso M6 com passo de 1 mm, mostrado na Figura 38, girando-se o fuso através de um volante recartilhado, o MDP se desloca. Na Figura 39 está a bancada deslocada totalmente no eixo x e y, na Figura 40 o deslocamento é parcial, em 3.8a no eixo x e em 3.8b no eixo x e y.

¹⁶ Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. Acesso em 7 de dez.

Figura 37– Bancada de calibração do sensor do mouse.



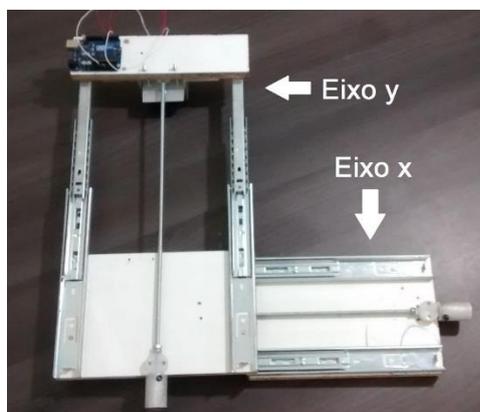
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 38 – Suporte do fusão.



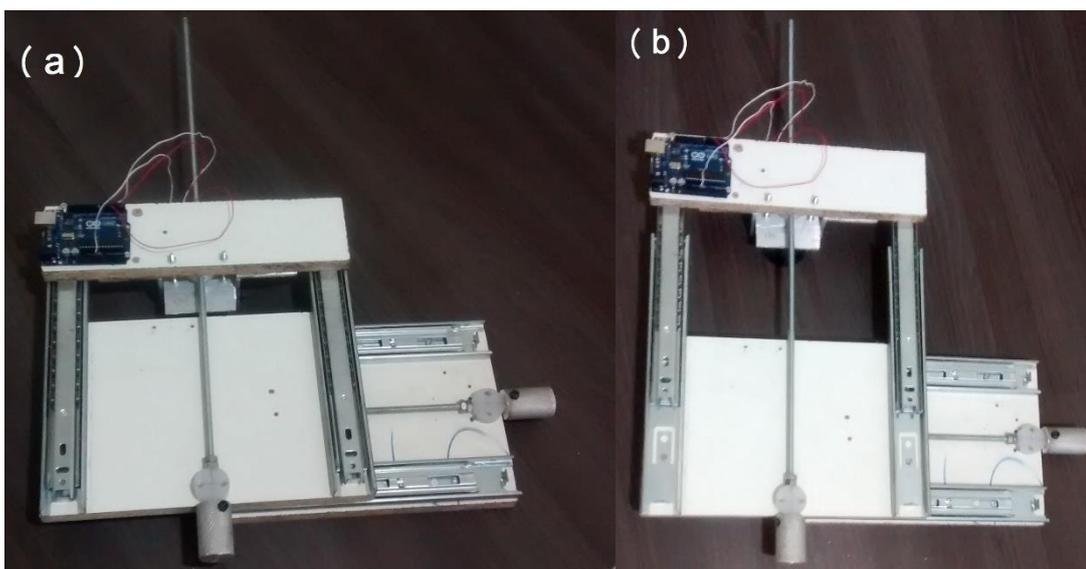
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 39– Bancada com o eixo x e y completamente deslocados.



Fonte: Elaborado pela autora.

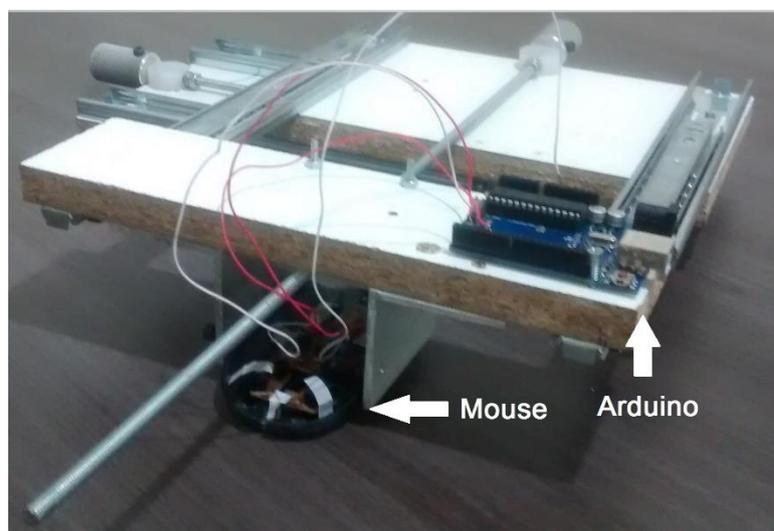
Figura 40– Bancada deslocada no eixo: a) x e b) x e y.



Fonte: Elaborado pela autora.

O mouse e o Arduino são fixados na base superior de MDP como mostra a Figura 41. Mais detalhes sobre a montagem encontram-se nos desenhos das peças no anexo B.

Figura 41– Áreas de fixação do mouse e do Arduino.



Fone: Elaborado pela autora.

Na Tabela 4 encontra-se a relação das peças utilizadas na construção da bancada de calibração com as suas respectivas quantidades, mais detalhes consulte o Anexo B.

Tabela 4 – Relação dos peças utilizadas na construção da bancada de calibração.

Peças	Quantidade
Madeira MDP (160mm x 250mm x 16,5mm)	2
Madeira MDP (65mm x 250mm x 16,5mm)	1
Corrediças telescópica aço zincado 500 mm 25 KG	4
Fuso M6, passo 1 mm	2
Suporte para passagem do fuso (Em Nylon)	4
Volante recartilhado em alumínio	2
Cantoneira (50mm x 50mm x 3,4mm)	2
Suporte para o mouse em alumínio (75mm x 61mm x 3,4mm)	1

Fonte: Elaborado pela autora.

4 Resultados e Discussões

Para realizar a calibração do sensor, o mouse foi preso à bancada de calibração e esta foi fixada em cima de uma máquina de medir distâncias por coordenadas modelo QM-Measure 353 da Mitutoyo, com exatidão de 3μ , mostrada na Figura 42 e calibrada pela última vez em 17 de novembro de 2015. A máquina utiliza uma sonda MH20 da Renishaw (Figura 43). Girando-se o fuso do eixo y, através do volante, o mouse foi deslocado em 50, 60, 70, 75 e 80 mm. Foram realizadas cinco medições para cada um dos pontos citados, elas foram feitas iniciando-se do ponto zero, de maneira progressiva até o ponto final (80 mm) e então, de maneira regressiva, do ponto final ao ponto zero, repetindo-se o processo de ida e volta até o fim da obtenção dos cinco conjuntos de dados. O mesmo procedimento foi realizado para o eixo x da bancada de calibração.

Figura 42 – Bancada de calibração fixa à MQ-Measure 353.



Fonte: Elaborado pela autora.

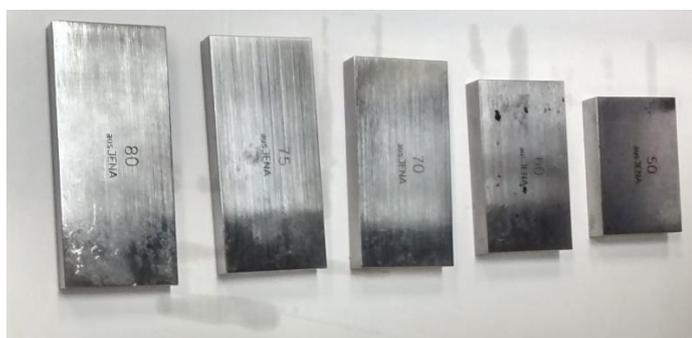
Figura 43 – Sonda MH20 da Renishaw.



Fonte: Elaborado pela autora.

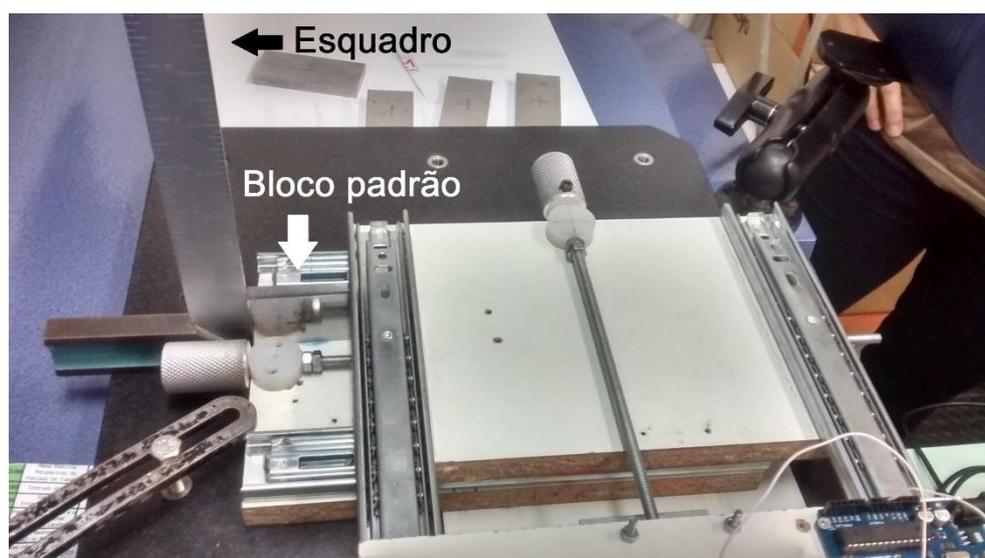
Os valores dos pontos de deslocamento foram conferidos a partir de blocos padrões de aço inoxidável da Aus Jena (Figura 44), calibrados pela última vez em 11 de agosto de 2012. No eixo x, para cada ponto, o mouse foi deslocado até passar um pouco da medida buscada, o bloco padrão era então posicionado entre a base do meio da bancada e um esquadro, que ficava rente à base inferior, como mostrado na Figura 45. Após isso, a mesa é deslocada de modo a ajustar bem o bloco padrão entre as duas superfícies. No eixo y o procedimento foi semelhante, a diferença é que o bloco padrão era posicionado entre a base inferior e a parte final do mouse (Figura 46). Para cada deslocamento medido, as contagens de pulsos enviadas pelo sensor eram obtidas através do Arduino.

Figura 44 – Blocos padrões de medição de 80, 75, 70, 60 e 50mm.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 45 – Procedimento de medição do eixo x da bancada, realizada com o bloco padrão.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 46 - Procedimento de medição do eixo y da bancada, realizada com o bloco padrão.



Fonte: Elaborado pela autora.

Foi realizado um ajuste de curvas, através do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), com os pontos obtidos, criando-se um gráfico de calibração relacionando as contagens de pulsos do mouse versus o seu deslocamento em milímetros. Esse gráfico foi utilizado para caracterizar o comportamento do sensor. Testes de deslocamento aleatório do mouse foram feitos com o uso da máquina de medir coordenadas para comparar o valor obtido pela máquina e o valor dado na curva de calibração. Eles funcionavam deslocando-se o mouse aleatoriamente, na superfície do papel, até um ponto qualquer. Esse deslocamento era então aferido pela máquina e pela reta de calibração.

Em um primeiro momento, o mouse foi deslocado no eixo y da bancada de calibração. Na Tabela 5, na primeira linha, estão relacionados os deslocamentos (D_y) realizados, da segunda à sexta linha, encontram-se as quantidades de pulsos (p_y) que foram contadas pelo mouse para cada ponto. Na segunda linha estão os pulsos do primeiro teste, na terceira estão os do segundo e assim por diante. Na sétima e na oitava linha encontram-se, respectivamente, a média aritmética para o conjunto de contagens de pulsos de cada valor de deslocamento e o desvio padrão dele.

É importante ressaltar que, devido à possíveis desalinhamentos do sensor e vibrações causadas no sistema de testes, ao deslocarmos o mouse em um dos eixos, o registrador (Δ_X ou Δ_Y) do outro eixo sempre apresenta um incremento de seus valores, em nenhum momento conseguiu-se manter um registro do mouse

com contagem zerada enquanto apenas o registrador pertinente ao eixo testado alterava seus valores. De modo que foi considerado apenas as contagens obtidas pelos registradores equivalentes ao eixo que estava sendo analisado.

Tabela 5 – Medições, média e desvio padrão dos pontos de calibração do eixo y.

D_y (mm) \ p_y	50 mm	60 mm	70 mm	75 mm	80 mm
p_y 1	639	760	882	946	1012
p_y 2	645	771	891	953	1012
p_y 3	649	773	895	965	1040
p_y 4	671	789	915	976	1035
p_y 5	670	794	921	988	1050
Média (\bar{p}_y)	654,8	777,4	900,8	965,6	1029,8
Desvio Padrão (σ_y)	0,937996	0,882856	1,049576	1,078192	1,087316

Fonte: Elaborado pela autora.

A mesma tabela foi construída para os valores de deslocamento (D_x) e contagens de pulsos (p_x) dos testes realizados no eixo x da bancada (Tabela 6).

Tabela 6 – Medições, média e desvio padrão dos pontos de calibração do eixo x.

D (mm) \ p_x	50 mm	60 mm	70 mm	75 mm	80 mm
p_x 1	746	899	1043	1113	1188
p_x 2	739	883	1041	1116	1187
p_x 3	743	889	1049	1115	1191
p_x 4	722	880	1032	1109	1188
p_x 5	725	874	1021	1095	1164
Média (\bar{p}_x)	735	885	1037,2	1109,6	1183,6
Desvio Padrão (σ_x)	0,688324	0,604085	0,693285	0,545509	0,702242

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da comparação das duas Tabelas (5 e 6) é notável que, para um mesmo deslocamento, o eixo x sempre obteve um número maior de contagens de pulsos do que o eixo y, sugerindo que a sensibilidade nesse eixo seja maior do que no outro, de modo que é condizente o fato de que o desvio padrão do eixo y, que gira em torno de

1,01 mm, seja consideravelmente maior do que o de x, que fica em torno de 0,54 mm. Existe aí um possível erro sistemático que pode ou não estar ligado à sensibilidade, de qualquer maneira, é possível eliminar este erro com facilidade caso se deseje utilizar as curvas de calibração em aplicações futuras.

Concluir que a sensibilidade do eixo y do mouse é menor do que a do eixo x contradiz os resultados obtidos por Tunwattana, Roskilly e Norman (2008), que dizem que a sensibilidade é sempre maior no eixo em que há alinhamento com a fonte emissora de luz, nesse caso, o eixo y. Esses valores podem ser justificados devido a ordem na qual o *software* acessa os registradores, primeiro o Delta_X e depois o Delta_Y, se essa ordem for invertida, o eixo y passa a ser mais sensível do que o eixo x.

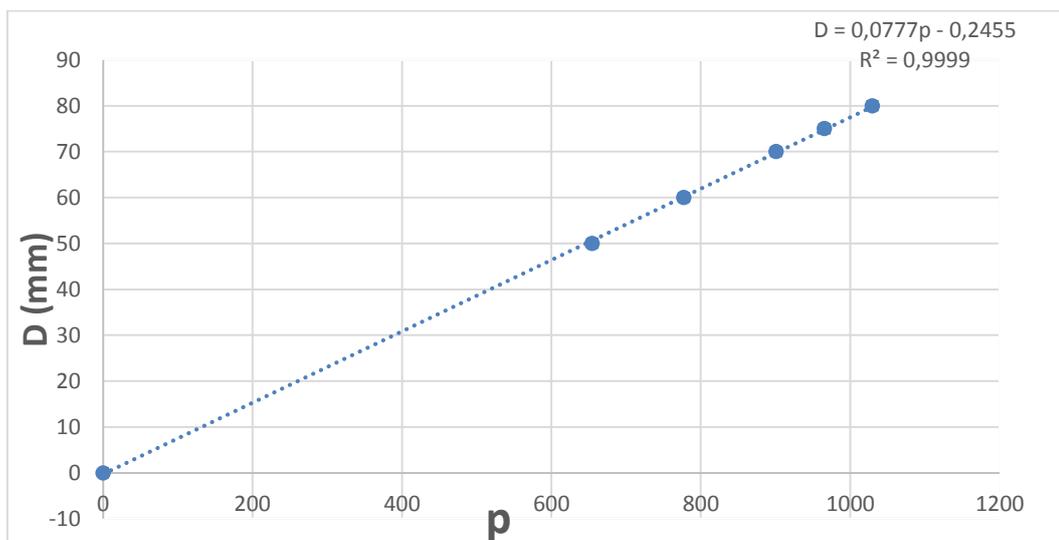
Segundo o datasheet do sensor, entre uma operação de leitura seguida de escrita e vice-versa é necessário que haja um delay de 100 microssegundos para que o CI possa se preparar para o envio de dados. Esse delay é o que causa a perda de sensibilidade no eixo que é acessado por último. O ideal, seria que os dois registradores pudessem ser acessados ao mesmo tempo.

É importante perceber também que o desvio padrão apresenta uma tendência em aumentar de acordo com o aumento do deslocamento, sendo uma característica esperada, visto que o sensor é odométrico e acumula erros com o aumento de incrementos de deslocamento.

Utilizando o pior desvio padrão calculado, de aproximadamente 1,1 mm (Tabela 5), é possível afirmar que a bancada de calibração pode ser utilizada quando a aplicação do sensor exigir uma exatidão de 3,3mm ou mais.

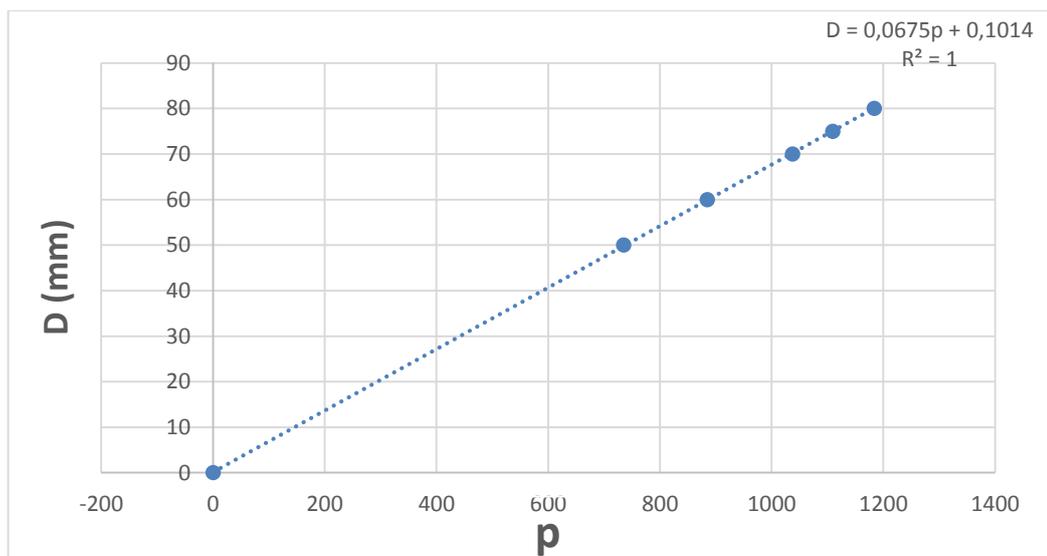
A Figura 47 e 48 mostram os gráficos de calibração feitos a partir dos dados da Tabela 5 para y, e 6 para x, respectivamente. No eixo das ordenadas estão relacionados os valores de deslocamento do mouse e no eixo das abscissas estão a média da quantidade de pulsos.

Figura 47 - Gráfico de calibração do eixo Y.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 48 - Gráfico de calibração do eixo X.



Fonte: Elaborado pela autora.

As retas obtidas através do MMQ para o eixo y e x são mostradas em 1 e 2.

$$\text{Reta do eixo y: } D = 0,0777p - 0,2455 \quad (1)$$

$$\text{Reta do eixo x: } D = 0,0675p + 0,1014 \quad (2)$$

O coeficiente de regressão linear (R^2) para y foi de 0,9999 e para x foi de 1, demonstrando alto índice de linearidade para ambos os eixos.

No segundo momento dos testes, o mouse foi movido de maneira aleatória na superfície do papel. A quantidade de pulsos gerada pelo mouse, para cada deslocamento, foi substituída na reta de calibração e um valor de D foi obtido. À critério de comparação, o deslocamento do mouse também foi medido pela máquina de medir coordenadas. A Tabela 7 relaciona os resultados obtidos para o D da equação da reta de y, os valores de deslocamento dado pela máquina de coordenadas (M) e o e o erro (E) existente entre os valores de D e M, calculados a partir da Equação 3. Na Tabela 8 as mesmas medições são relacionadas, sendo que para o eixo x.

$$E = M - D \quad (3)$$

Tabela 7– Comparação entre os resultados obtidos pela reta do eixo y de calibração (D) e pela máquina de coordenadas (M).

D (mm)	M (mm)	Erro (mm)
62,8079	61,007	-1,8009
55,0379	53,77	-1,2679
44,393	45,33	0,937
34,7582	33,187	-1,5708
25,962	27,3767	1,4145

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 8 – Comparação entre os resultados obtidos pela reta do eixo x de calibração (D) e pela máquina de coordenadas (M).

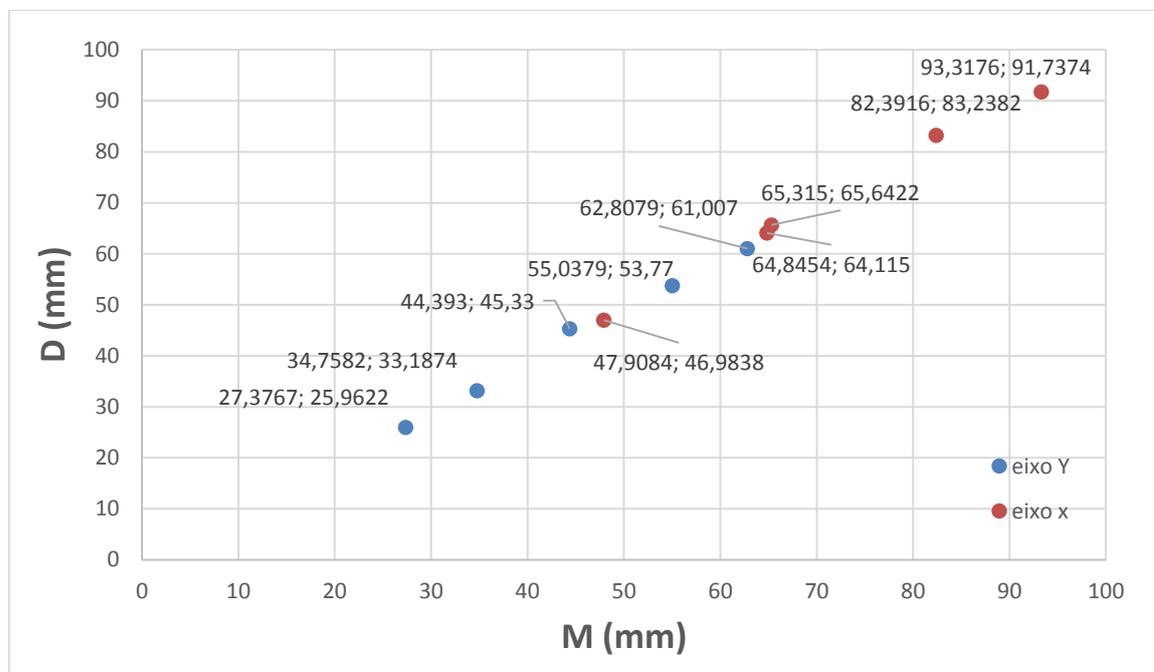
D (mm)	M (mm)	Erro (mm)
46,9838	47,9084	0,9246
64,115	64,8454	0,7304
83,2382	82,3916	-0,8466
65,6422	65,315	-0,3272
91,7374	93,3176	1,5802

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir das tabelas acima, percebemos que a ordem de grandeza do erro se encontra em concordância com o valor obtido pelos desvios padrões de cada um

dos eixos. A Figura 49 mostra o gráfico D versus M, em azul para o eixo Y e em vermelho para o eixo X.

Figura 49 – Gráfico dos deslocamentos medido pela máquina (M) versus os deslocamento obtidos pela curva de calibração (D).



Fonte: Elaborado pela autora.

5 Conclusões

Neste trabalho foi proposto o uso do sensor do mouse como um sensor de baixo custo utilizado para medir o deslocamento em dois eixos. Foi sugerido também, um modelo para uma bancada de calibração que possa ser utilizada nesse tipo de sensor. A calibração foi realizada de maneira independente para o eixo x e y do mouse, gerando curvas que relacionam a quantidade de pulsos enviadas pelo sensor com o espaço deslocado por ele. À critério de comparação, os valores de deslocamento obtidas nas curvas foram comparados com valores medidos por uma máquina de medir coordenadas de alta precisão.

Os gráficos encontrados a partir da calibração são promissores. Foram obtidas retas com coeficientes de regressão linear (R^2) de 0,999 para o eixo y do mouse e de 1 para o eixo x, sugerindo alto índice de linearidade por parte do sensor. É de se esperar que esses valores tendam a diminuir caso seja realizada uma calibração que leve em conta um número maior de pontos de deslocamentos, entretanto, como mostrado no trabalho de Ng (2003), mesmo utilizando 20 pontos, que é quatro vezes o número utilizado neste trabalho, o R^2 se manteve alto, em uma média de 0,9914.

Os valores no desvio padrão giraram em torno de 1,01 mm para o eixo y e de 0,54 mm para o x, dando a ideia da existência de um erro sistemático inserido no sistema, que pode facilmente ser corrigido para aplicações futuras das retas de calibração obtidas. Além disso, o maior desvio padrão calculado foi de aproximadamente 1,1 mm, assim, podemos afirmar que a bancada pode ser utilizada com sucesso na calibração de um sensor que venha a ser utilizado em uma aplicação que exija valores de exatidão igual ou maiores do que 3,3 mm.

Os valores de deslocamento encontrados experimentalmente a partir do modelo obtido pela calibração do sensor na bancada, estão correlacionados de maneira muito próxima aos encontrados pela máquina de medir coordenadas. O maior erro no eixo y foi de aproximadamente -1,8 mm e no eixo x de 1,58 mm. É possível perceber que em geral, os valores obtidos pelo eixo x foram mais exatos do que pelo eixo y.

Fica bem claro nas tabelas, que, para mesmos valores de deslocamento, o eixo x sempre obtém um número maior de contagens. Isso sugere que a sensibilidade do mouse no eixo x seja maior do que a do eixo y, contradizendo os estudos Tunwattana, Roskilly e Norman (2008), que afirmam que a sensibilidade sempre será maior no eixo que estiver alinhado com a luz do LED, no caso deste trabalho, o y. Esses valores podem ser justificados devido a ordem na qual o *software* acessa os registradores, primeiro o Delta_X e depois o Delta_Y e devido ao delay de 100 microssegundos existente entre os acessos, se essa ordem for invertida, o eixo y passa a ser mais sensível do que o eixo x.

Um dos problemas que foi analisado durante os testes foi a impossibilidade de alinhar perfeitamente o sensor do mouse na bancada de calibração, de modo que, quando um dos eixos estava sendo testado, o registrador do sensor relativo ao outro eixo também realizava contagens de pulsos. Assim, em nenhum momento foi possível fazer com que o sensor mantivesse um dos registradores zerados, enquanto o registrador do eixo de teste realizava as contagens, que seria o ideal.

Apesar dessa dificuldade, em geral as retas de calibração foram condizentes com os valores de deslocamento medidos sugerindo que o sensor possa ser utilizado com sucesso como odômetro e a bancada possa ser utilizada na calibração desses sensores.

6 Sugestão de Trabalhos Futuros

Um dos maiores problemas relacionados ao uso do mouse como sensor de deslocamento na robótica móvel é a forte influência que o tipo de superfície apresenta na sensibilidade dele. Assim, faz-se importante que haja conhecimento das reações do mouse em diferentes tipos de superfície. Outro problema ligado ao seu uso é a variação da sua sensibilidade que ocorre em função da altura entre a lente do sensor e a superfície de deslocamento. Testes com lentes de focos diferentes podem ser realizados a fim de traçar uma linha de comportamento com relação a variações de níveis focais.

O mouse não é capaz de medir a variação angular, apenas deslocamentos no plano cartesiano, assim, trabalhos podem ser realizados utilizando dois ou mais sensores de modo que seja possível a medição da orientação por parte da análise de seus valores em conjunto.

Outra sugestão de trabalho seria encontrar uma função que relacione uma curva de calibração com a variação diagonal do mouse. Como dito anteriormente, há um problema relacionado a dificuldade de alinhar o sensor, de modo que a variação no eixo y do mouse influencia nas contagens realizadas pelo registrador relacionado ao eixo x e vice-versa. No presente trabalho, as análises e curvas de calibração foram realizadas para cada eixo de forma isolada, trabalha-las de forma conjunta (deslocamentos na diagonal) é o próximo passo.

7 Referências

AGRAWAL, Motilal; KONOLIGE, Kurt; BLAS, Morten Rufus. Censure: Center surround extremas for realtime feature detection and matching. In: **Computer Vision–ECCV 2008**. Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 102-115.

ANDERT, Franz et al. On the safe navigation problem for unmanned aircraft: Visual odometry and alignment optimizations for UAV positioning. In: **Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014 International Conference on**. IEEE, 2014. p. 734-743.

Avago Technologies, ADNS-2610 Data Sheet, Avago Technologies Document 5988-9774EN, 2008.

BAINBRIDGE-SMITH, A.; LANE, R. G. Measuring confidence in optical flow estimation. **Electronics Letters**, v. 32, n. 10, p. 882-884, 1996.

BAY, Herbert; TUYTELAARS, Tinne; VAN GOOL, Luc. Surf: Speeded up robust features. In: **Computer vision–ECCV 2006**. Springer Berlin Heidelberg, 2006. p. 404-417.

BORENSTEIN, Johann et al. **Mobile robot positioning-sensors and techniques**. NAVAL COMMAND CONTROL AND OCEAN SURVEILLANCE CENTER RDT AND E DIV SAN DIEGO CA, 1997.

BORENSTEIN, Johann et al. Where am I? Sensors and methods for mobile robot positioning. **University of Michigan**, v. 119, n. 120, p. 27, 1996.

CIMINO, Mauro; PAGILLA, Prabhakar R. Optimal location of mouse sensors on mobile robots for position sensing. **Automatica**, v. 47, n. 10, p. 2267-2272, 2011.

COX, Ingemar J.; IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, 1989, Tsukuba, Japan. **Blanche: Position Estimation for na Autonomous Robot Vehicle**. p. 432-439.

COX, Ingemar J.; WILFONG, Gordon T.; **Autonomous Robot Vehicles**. 1. ed. New York: Springer-Verlag, 1990.

DE SOUSA PISSARDINI, Rodrigo; WEI, Daniel Chin Min; DA FONSECA JÚNIOR, Edvaldo Simões. VEÍCULOS AUTÔNOMOS: CONCEITOS, HISTÓRICO E ESTADO-DA-ARTE.

FABIAN, Joshua; CLAYTON, Garrett M. Error analysis for visual odometry on indoor, wheeled mobile robots with 3-d sensors. **Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on**, v. 19, n. 6, p. 1896-1906, 2014.

FARIA, Alexandre Wagner Chagas. Fluxo Óptico. **Universidade Federal de Minas Gerais, IEx-DCC-Visão Computacional**, 1992.

FRAUNDORFER, Friedrich; SCARAMUZZA, Davide. Visual odometry: Part II: Matching, robustness, optimization, and applications. **Robotics & Automation Magazine, IEEE**, v. 19, n. 2, p. 78-90, 2012.

GHOSH, R. K.; KATARIA, Vinit; MISHRA, Vedant. Indoor Navigation System using Optical Mouse Sensor and Smartphone.

GUTIÉRREZ-GÓMEZ, Daniel; MAYOL-CUEVAS, Walterio; GUERRERO, J. J. Dense RGB-D visual odometry using inverse depth. **Robotics and Autonomous Systems**, 2015.

GUZMÁN-VALDIVIA, C. H. et al. HipBot–The design, development and control of a therapeutic robot for hip rehabilitation. **Mechatronics**, v. 30, p. 55-64, 2015.

HAO, Shuanghui; LIU, Yong; HAO, Minghui. Study on a novel absolute magnetic encoder. In: **Robotics and Biomimetics, 2008. ROBIO 2008. IEEE International Conference on**. IEEE, 2009. p. 1773-1776.

HARRIS, Chris; STEPHENS, Mike. A combined corner and edge detector. In: **Alvey vision conference**. 1988. p. 50.

HIRAKAWA, Keigo; WOLFE, Patrick J. Spatio-spectral color filter array design for optimal image recovery. **Image Processing, IEEE Transactions on**, v. 17, n. 10, p. 1876-1890, 2008.

HOESCHELE, David F. Analog-to-digital/digital-to-analog Conversion Techniques. 1968.

HU, Jwu-Sheng; CHANG, Yung-Jung; HSU, Yu-Lun. Calibration and on-line data selection of multiple optical flow sensors for odometry applications. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 149, n. 1, p. 74-80, 2009.

IKEDA, M.; KAKU, H. MR sensor for magnetic encoder. **Magnetics in Japan, IEEE Translation Journal on**, v. 7, n. 9, p. 705-713, 1992.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS – IFR. *History of Industrial Robots: Milestones of Technology and Commercialization*, 2012. Disponível em: <<http://www.ifr.org/history/>>. Acesso em: 24 de nov. de 2015.

KANDA, Takefumi; MAEDA, Hiraku; SUZUMORI, Koichi. A micro ultrasonic motor controlled by using a built-in micro magnetic encoder. In: **Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2010 IEEE/ASME International Conference on**. IEEE, 2010. p. 1029-1034.

KENNEL, R. M.; BASLER, St. New developments in capacitive encoders for servo drives. In: **Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. SPEEDAM 2008. International Symposium on**. IEEE, 2008. p. 190-195.

LAUREANO, Gustavo Teodoro; DE PAIVA, Maria Stela Veludo. Detecção de Obstáculos Utilizando Fluxo Óptico em Sequências de Imagens. 2004.

LEE, Jeong-Hyeong; JUNG, Seul. Global position tracking control of an omnidirectional mobile robot using fusion of a magnetic compass and encoders. In: **Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2008. MFI 2008. IEEE International Conference on**. IEEE, 2008. p. 246-251.

LEE, Wonjae; KIM, Jaeseok. A cost-effective demosaicked image enhancement for a single chip CMOS image sensor. In: **Signal Processing Systems Design and Implementation, 2005. IEEE Workshop on**. IEEE, 2005. p. 148-153.

LEE, Sooyong; SONG, Jae-Bok. Robust mobile robot localization using optical flow sensors and encoders. In: **Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on**. IEEE, 2004. p. 1039-1044.

LEONARD, John J.; DURRANT-WHYTE, Hugh F.; Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons. **IEEE Transactions on robotics and automation**, V. 7, n. 3, p. 376-382, 1991.

LIBERALI, Valentino et al. A digital self-calibration circuit for absolute optical rotary encoder microsystems. **Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on**, v. 52, n. 1, p. 149-157, 2003.

LIN, Qi et al. Application of the magnetic encoder in actuator servo system. In: **Mechatronics and Automation, 2007. ICMA 2007. International Conference on**. IEEE, 2007. p. 3031-3035.

LOPEZ, J.; ARTES, M.; ALEJANDRE, I. Analysis of optical linear encoders' errors under vibration at different mounting conditions. **Measurement**, v. 44, n. 8, p. 1367-1380, 2011.

LOWE, David G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. **International journal of computer vision**, v. 60, n. 2, p. 91-110, 2004

LUKAC, Rastislav; PLATANIOTIS, Konstantinos N. Color filter arrays: Design and performance analysis. **Consumer Electronics, IEEE Transactions on**, v. 51, n. 4, p. 1260-1267, 2005.

LUO, Yin-Jao et al. Multi-pole magnetization of high resolution magnetic encoder. In: **Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 1993. Proceedings., Chicago'93 EEIC/ICWA Exposition**. IEEE, 1993. p. 237-242.

MARDIYANTO, Ronny; ANGGORO, Janu; BUDIMAN, Fajar. 2D map creator for robot navigation by utilizing Kinect and rotary encoder. In: **Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 2015 International Seminar on**. IEEE, 2015. p. 81-84.

MENON, Daniele; CALVAGNO, Giancarlo. Color image demosaicking: an overview. **Signal Processing: Image Communication**, v. 26, n. 8, p. 518-533, 2011.

MICROCHIP TECHNOLOGY. Quadrature Encoder Interface. **dsPIC33F Family Reference Manual**, 2007 Microchip Technology Inc.

MINONI, Umberto; SIGNORINI, Andrea. Low-cost optical motion sensors: An experimental characterization. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 128, n. 2, p. 402-408, 2006.

MOHD KHAIRUDDIN, Md Arshad; UDA, Hashim; CHOO, C. M. Characteristics of Serial Peripheral Interfaces (SPI) timing parameters for optical mouse sensor. 2006.

MYUNG, Hyun et al. Constrained Kalman filter for mobile robot localization with gyroscope. In: **Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on**. IEEE, 2006. p. 442-447.

NALWA, Vishvjit S. **A guided tour of computer vision**. Reading MA: Addison-Wesley, 1993.

NETZER PRECISION MOTION SENSORES LTDA. Application Note 01 – The Electric Encoder™. Misgav, 2009. Disponível em: <<http://www.netzerprecision.com/files/AN-01%20Electrical%20Encoder-1.pdf>>. Acesso em: 8 de dez. 2015.

NISTÉR, David; NARODITSKY, Oleg; BERGEN, James. Visual odometry. In: **Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on**. IEEE, 2004. p. I-652-I-659 Vol. 1.

NG, T. W. The optical mouse as a two-dimensional displacement sensor. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 107, n. 1, p. 21-25, 2003.

NG, T. W.; ANG, K. T. The optical mouse for vibratory motion sensing. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 116, n. 2, p. 205-208, 2004.

PALACIN, J.; VALGANON, I.; PERNIA, R. The optical mouse for indoor mobile robot odometry measurement. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 126, n. 1, p. 141-147, 2006.

PERTILE, Marco; CHIODINI, Sebastiano; DEBELI, Stefano. Comparison of visual odometry systems suitable for planetary exploration. In: **Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), 2014 IEEE**. IEEE, 2014. p. 232-237.

PISSARDINI, Rodrigo de Souza; WEI, Daniel Chin Min; JÚNIOR, Edvaldo Simões da Fonseca Júnior. Veículos Autônomos: Coceito, Histórico e Estado-da-Arte. São Paulo, [200-?].

QIU-HUA, Wan et al. A Novel Miniature Absolute Metal Rotary Encoder Based on Single-track Periodic Gray Code. In: **Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2012 Second International Conference on**. IEEE, 2012. p. 399-402.

ROSS, Robert; DEVLIN, John; WANG, Song. Toward refocused optical mouse sensors for outdoor optical flow odometry. **Sensors Journal, IEEE**, v. 12, n. 6, p. 1925-1932, 2012.

ROSTEN, Edward; DRUMMOND, Tom. Machine learning for high-speed corner detection. In: **Computer Vision—ECCV 2006**. Springer Berlin Heidelberg, 2006. p. 430-443.

L. SANDI, Franz A.; HEMERLY, Elder M.; LAGES, Walter F. Sistema para Navegação e Guiagem de Robôs Móveis Autônomos. **SBA Controle & Automação**, v. 9, n. 3, p. 107-118, 1998.

SHI, Jianbo; TOMASI, Carlo. Good features to track. In: **Computer Vision and Pattern Recognition, 1994. Proceedings CVPR'94., 1994 IEEE Computer Society Conference on**. IEEE, 1994. p. 593-600.

SIEGWART, Rolan; NOURBAKHS, Illah R.; **Autonomous Mobile Robots**. 1. ed. Cambridge: A Bradford Book; London: The MIT Press, 2004.

TIAN, Lei; ZHOU, Yunshan; TANG, Lie. Improving GPS positioning precision by using optical encoders. In: **Intelligent Transportation Systems, 2000. Proceedings. 2000 IEEE**. IEEE, 2000. p. 293-298.

TRESANCHEZ, M. et al. The optical mouse sensor as an incremental rotary encoder. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 155, n. 1, p. 73-81, 2009.

TRESANCHEZ, M. et al. Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 157, n. 1, p. 161-167, 2010.

TUNWATTANA, N.; ROSKILLY, A. P.; NORMAN, R. Investigations into the effects of illumination and acceleration on optical mouse sensors as contact-free 2D measurement devices. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 149, n. 1, p. 87-92, 2008.

United Nations Economic Commission for Europe, Robots Investments Surge to Record Levels, 2005.

XIN, Wang; SHIDA, Katsunori. Optical mouse sensor for detecting height variation and translation of a surface. In: **Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on**. IEEE, 2008. p. 1-6.

WANG, Han et al. Novel linear optical encoder with absolute imaging position. In: **Consumer Electronics-China, 2014 IEEE International Conference on**. IEEE, 2014. p. 1-2.

WANG, Han et al. Absolute optical imaging position encoder. **Measurement**, v. 67, p. 42-50, 2015.

WIRTH, Stephan; NEGRE CARRASCO, Pep Lluís; CODINA, Gabriel Oliver. Visual odometry for autonomous underwater vehicles. In: **OCEANS-Bergen, 2013 MTS/IEEE**. IEEE, 2013. p. 1-6.

ZHENG, Dezhi et al. A Capacitive Rotary Encoder Based on Quadrature Modulation and Demodulation. **Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on**, v. 64, n. 1, p. 143-153, 2015.

8 Anexos

ANEXO A – Código Utilizado para a comunicação entre Arduino e ADNS-2610

```

#define          CONFIG          0x00
#define          STATUS          0x01

#define          DELTAY          0x02
#define          DELTAX          0x03

int cycle = 1;
int SCLK = 2;
int SDIO = 3;
int Vdd = 5;

int x = 0;
int y = 0;
int x2 = 0;
int y2 = 0;

void setup(){

  Serial.begin(38400);

  //inicializacao dos pinos!

  pinMode(Vdd,OUTPUT);
  digitalWrite(Vdd,HIGH);

  pinMode(SDIO,OUTPUT);
  pinMode(SCLK,OUTPUT);
  digitalWrite(SDIO,HIGH);
  digitalWrite(SCLK,HIGH);

  mouse_init();
  force_awake(); //mantem o mouse acordado o tempo todo
}

void loop(){

  x = x + delta_x();
  if(x != x2){
    Serial.print("X= ");
    Serial.print(x);
    Serial.print(" Y= ");
    Serial.println(y);
    x2 = x;
  }
  delayMicroseconds(100);
  y = y + delta_y();
}

```

```

if(y != y2){
  Serial.print("X= ");
  Serial.print(x);
  Serial.print(" Y= ");
  Serial.println(y);
  y2 = y;
}
delayMicroseconds(100);

if(sincronismo() == 0){
  Serial.println("erro!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!");
  delay(90);
}

delayMicroseconds(100);

force_awake();
}

void escrever(byte addr, byte data){ //funcao para escrever Byte
                                     // No ADNS 2610
  pinMode(SDIO,OUTPUT);
  addr = addr|0x80;

  digitalWrite(SCLK,HIGH);
  delayMicroseconds(cycle);

  for(int i=0; i<8; i++){
    digitalWrite(SDIO, ((addr & 0x80)>0));
    addr = addr << 1;
    digitalWrite(SCLK, LOW);
    delayMicroseconds(cycle);
    digitalWrite(SCLK,HIGH);
    delayMicroseconds(cycle);
  }
  for(int i=0; i<8; i++){
    digitalWrite(SDIO, ((data & 0x80)>0));
    data = data << 1;
    digitalWrite(SCLK, LOW);
    delayMicroseconds(cycle);
    digitalWrite(SCLK,HIGH);
    delayMicroseconds(cycle);
  }
}

byte ler(byte addr){ //Funcao para ler os registradores
                    // do ADNS 2610
  byte lido = 0;

```

```

pinMode(SDIO, OUTPUT);

//escrever endereco de leitura
digitalWrite(SCLK,HIGH);
delayMicroseconds(cycle);

for(int i=0;i<7;i++){
  digitalWrite(SDIO, ((addr & 0x80)>0));
  addr = addr << 1;
  digitalWrite(SCLK,LOW); //microcontrolador escreve na descida
  delayMicroseconds(cycle);
  digitalWrite(SCLK, HIGH); //adns lê na subida
  delayMicroseconds(cycle);
}

digitalWrite(SDIO, ((addr & 0x80)>0));
addr = addr << 1;
pinMode(SDIO,INPUT); //liberando o SDIO para o ADNS antes da descida de
clk
digitalWrite(SCLK,LOW); //microcontrolador escreve na descida
delayMicroseconds(cycle);
digitalWrite(SCLK, HIGH); //adns lê na subida
delayMicroseconds(cycle);

delayMicroseconds(100);

for(int i=0;i<8;i++){
  digitalWrite(SCLK,LOW); //ADNS escreve
  delayMicroseconds(cycle);
  digitalWrite(SCLK,HIGH);
  delayMicroseconds(cycle);
  lido = (lido<<1)|digitalRead(SDIO); //micro le na subida
}

return lido;
}

void mouse_init(){ //Inicializacao do mouse
  delay(100); //tempo de estouro do SDIO

  if(sincronismo()==0){
    Serial.println("Erro de comunicacao");
  }else{
    Serial.println("Comunicacao OK!");
  }
}
Serial.print("X= ");
Serial.print(x);
Serial.print("Y= ");
Serial.println(y);

```

```

}

void force_awake(){ //forca o estado acordado do sensor
    escrever(CONFIG, 0x01);
}

```

```

int delta_x(){ // le o registrador DELTA_X
    byte x_lido;
    byte comparar;
    int valor;
    x_lido = ler(DELTAX);
    if((x_lido)&(0x80)){
        comparar = 0xFF;
        valor = -1;
        while(x_lido != comparar){
            comparar = comparar - 1;
            valor = valor-1;
        }
    }else{
        comparar = 0x00;
        valor = 0;
        while( x_lido != comparar){
            comparar = comparar + 1;
            valor = valor+1;
        }
    }
    return valor;
}

```

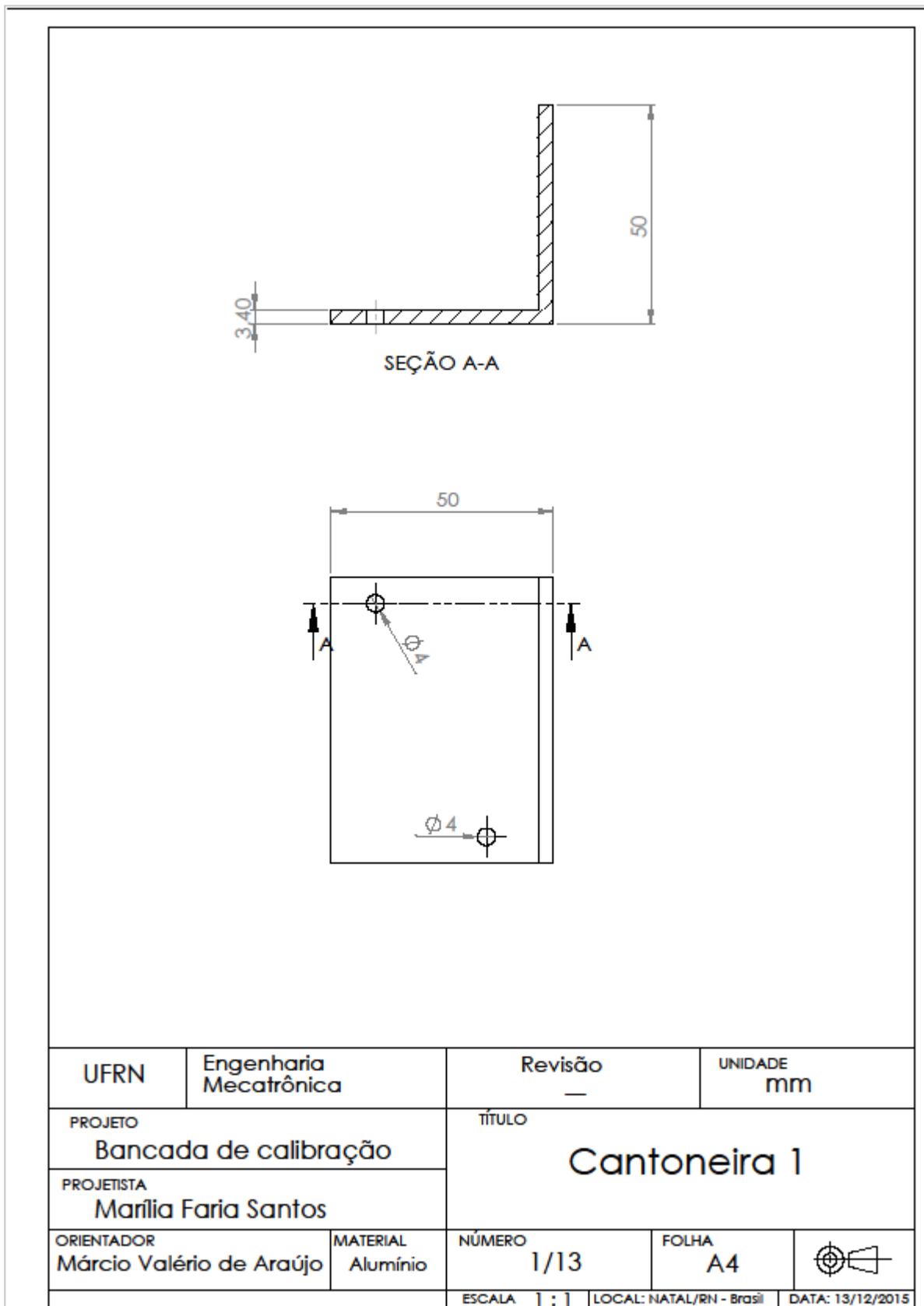
```

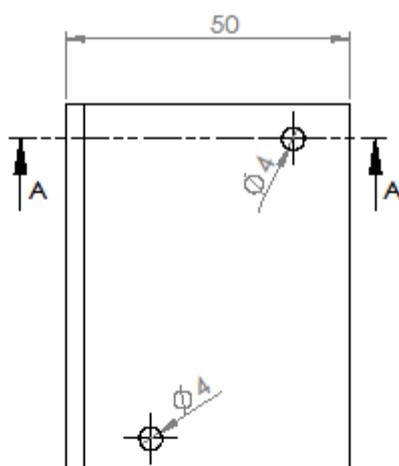
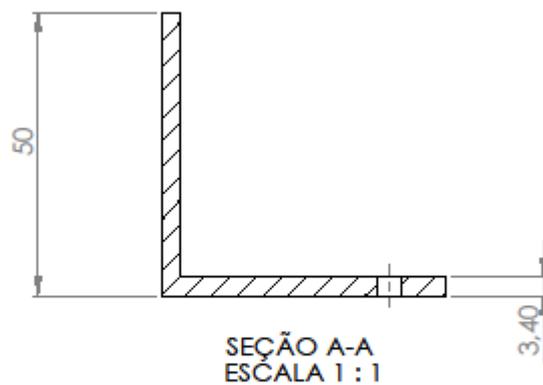
int delta_y(){ // le o registrador DELTA_X
    byte y_lido;
    byte comparar;
    int valor;
    y_lido = ler(DELTAY);
    if((y_lido)&(0x80)){
        comparar = 0xFF;
        valor = -1;
        while(y_lido != comparar){
            comparar = comparar - 1;
            valor = valor-1;
        }
    }else{
        comparar = 0x00;
        valor = 0;
        while( y_lido != comparar){
            comparar = comparar + 1;
            valor = valor+1;
        }
    }
    return valor;
}

```

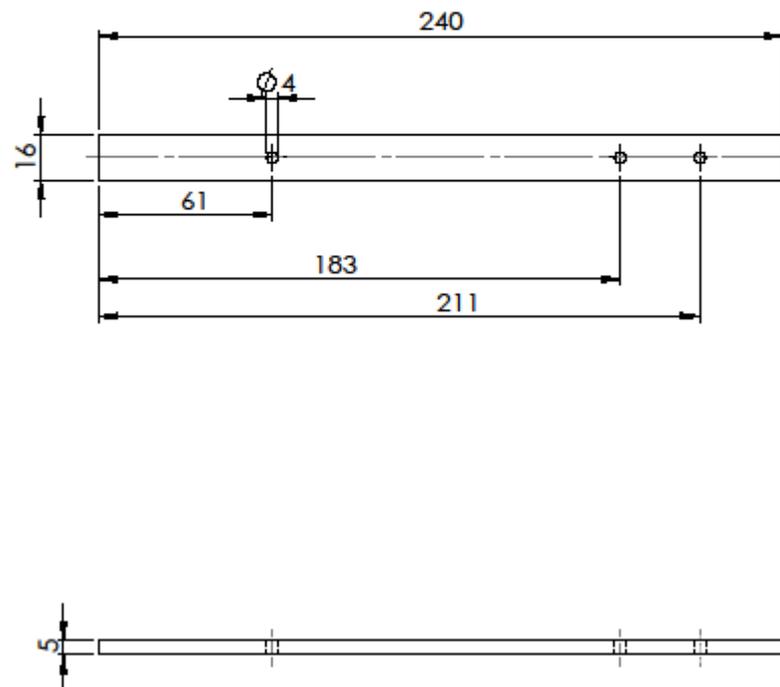
```
}  
  
int sincronismo(){ //testa se a comunicacao esta ok  
    if((ler(STATUS)|0x0F)>0x1F){  
        return 0;  
    }else return 1;  
}
```

Anexo B – Desenho Técnico das peças da bancada de calibração

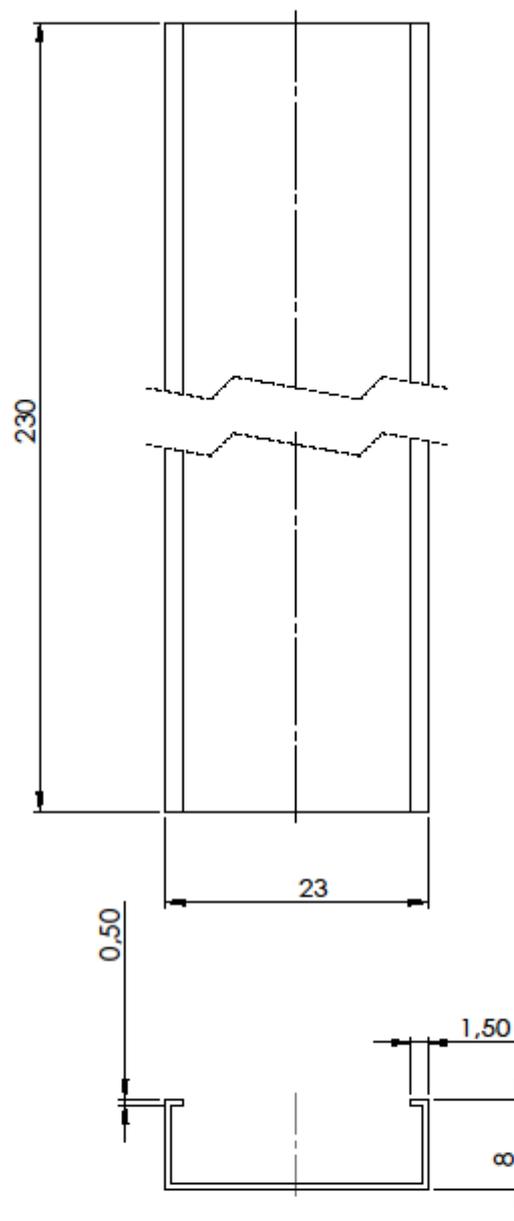




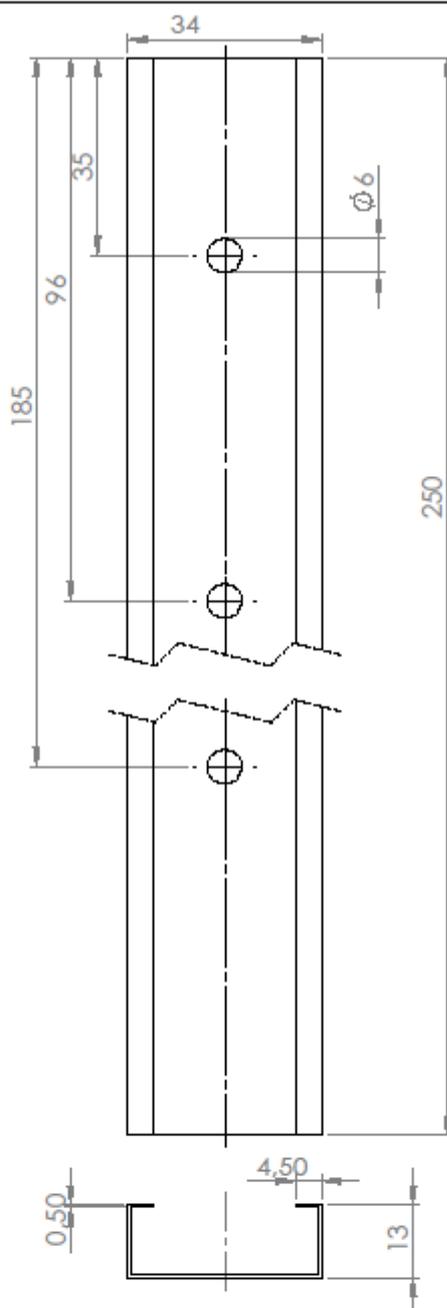
UFRN	Engenharia Mecatrônica	Revisão —	UNIDADE mm
PROJETO Bancada de calibração		TÍTULO Cantoneira 2	
PROJETISTA Marília Faria Santos			
ORIENTADOR Márcio Valério de Araújo	MATERIAL Alumínio	NÚMERO 2/13	FOLHA A4
ESCALA 1 : 1		LOCAL: NATAL/RN - Brasil	DATA: 13/12/2015



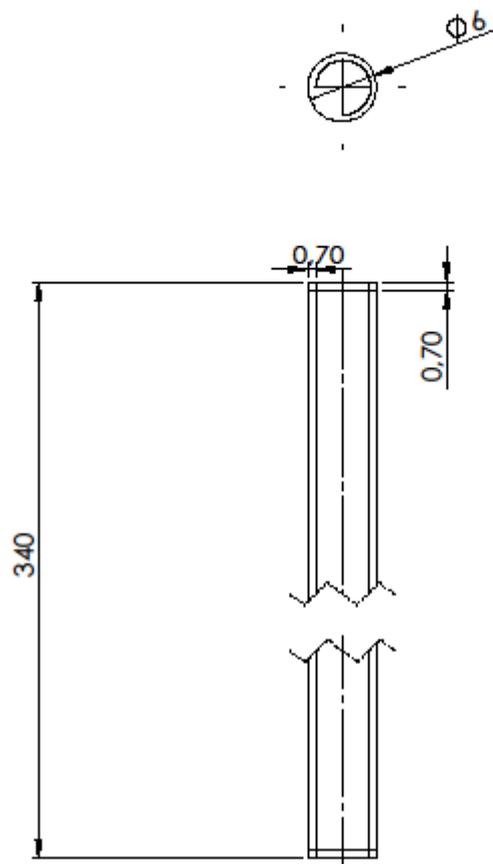
UFRN	Engenharia Mecatrônica	Revisão —	UNIDADE mm
PROJETO Bancada de calibração		TÍTULO Simplificação da Parte interna da Corrediça	
PROJETISTA Marília Faria Santos			
ORIENTADOR Márcio Valério de Araújo	MATERIAL Aço Zincado	NÚMERO 3/13	FOLHA A4
ESCALA 1 : 2		LOCAL: NATAL/RN - Brasil	DATA: 13/12/2015



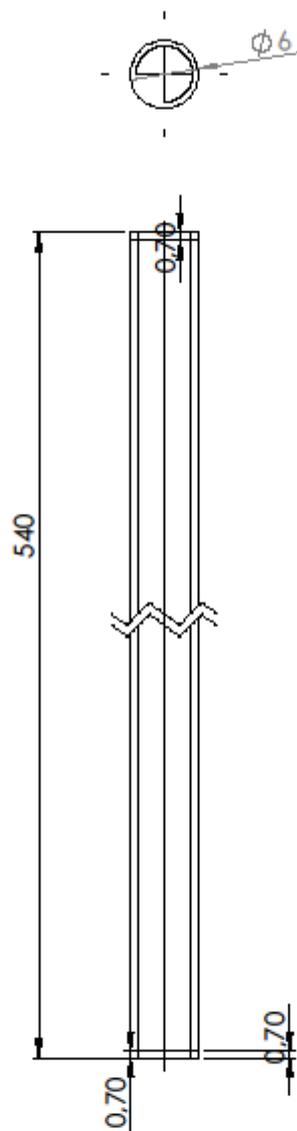
UFRN	Engenharia Mecatrônica	Revisão —	UNIDADE mm
PROJETO Bancada de calibração		TÍTULO Simplificação da Parte Mediana da Corrediça	
PROJETISTA Marília Faria Santos			
ORIENTADOR Márcio Valério de Araújo	MATERIAL Aço Zincado	NÚMERO 4/13	FOLHA A4
ESCALA 2 : 1		LOCAL: NATAL/RN - Brasil	DATA: 13/12/2015



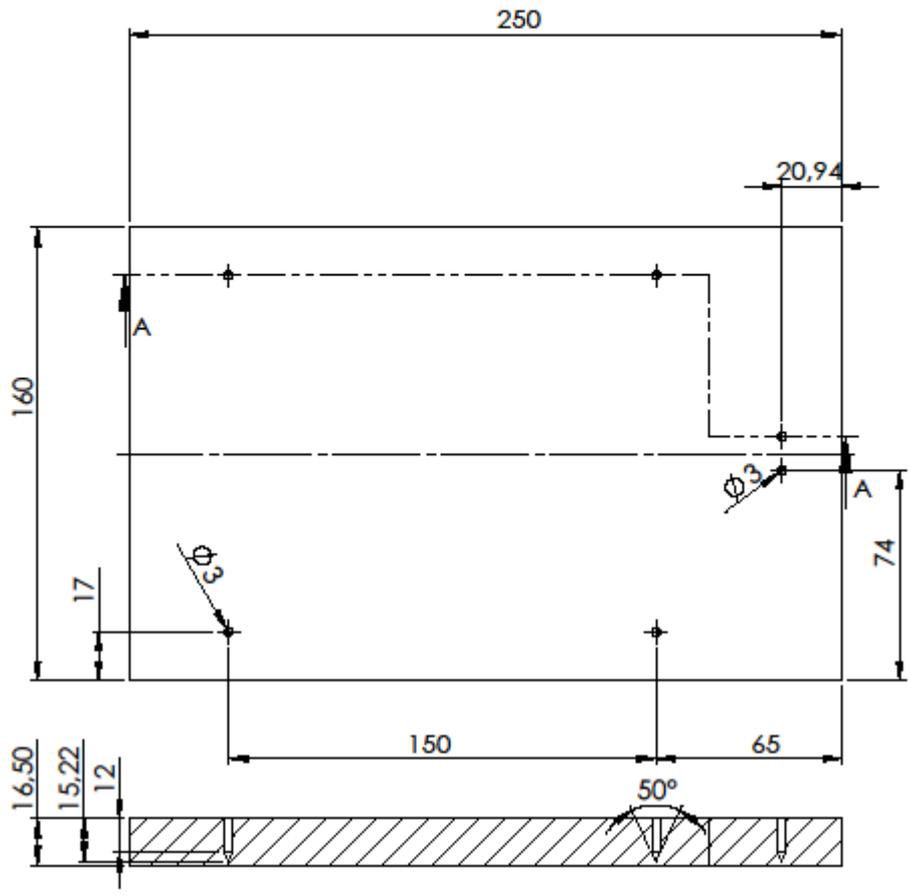
UFRN	Engenharia Mecatrônica	Revisão —	UNIDADE mm
PROJETO Bancada de calibração		TÍTULO Simplificação da Parte Externa da Corrediça	
PROJETISTA Marília Faria Santos			
ORIENTADOR Márcio Valério de Araújo	MATERIAL Aço Zincado	NÚMERO 5/13	FOLHA A4
ESCALA 1 : 1		LOCAL: NATAL/RN - Brasil	DATA: 13/12/2015



UFRN	Engenharia Mecatrônica	Revisão —	UNIDADE mm
PROJETO Bancada de calibração		TÍTULO Fuso 1, M6 passo 1	
PROJETISTA Marília Faria Santos			
ORIENTADOR Márcio Valério de Araújo	MATERIAL Alumínio	NÚMERO 6/13	FOLHA A4
ESCALA 2 : 1		LOCAL: NATAL/RN - Brasil	DATA: 13/12/2015



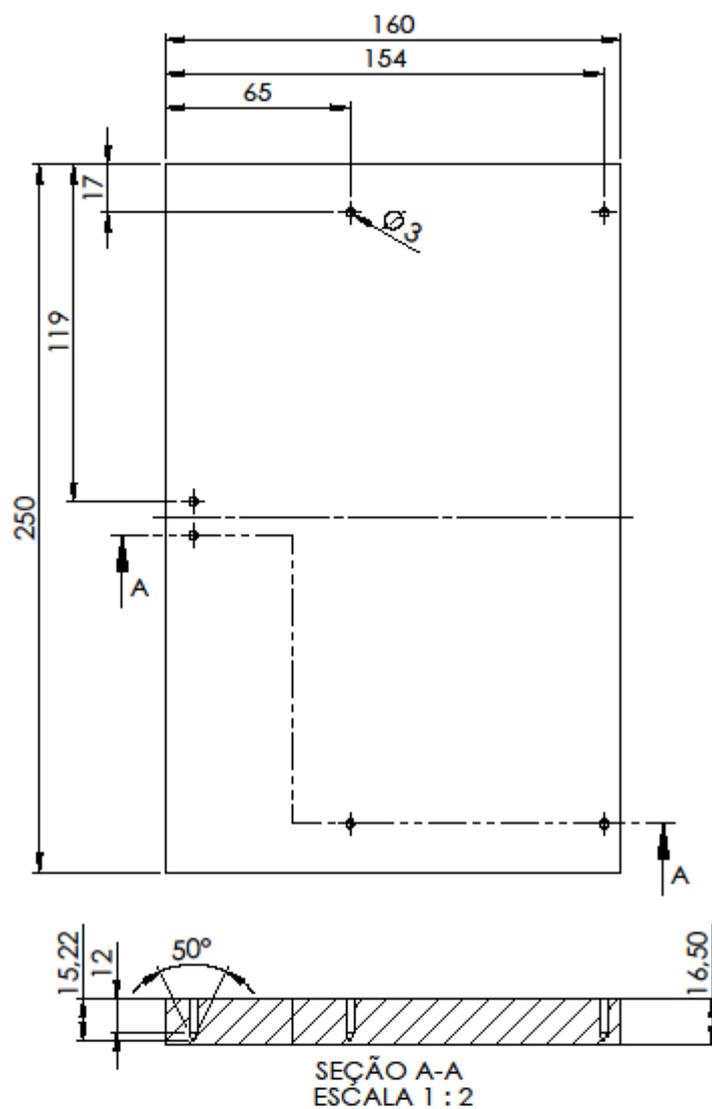
UFRN	Engenharia Mecatrônica	Revisão —	UNIDADE mm
PROJETO Bancada de calibração		TÍTULO Fuso 2, M6 Passo 1	
PROJETISTA Marília Faria Santos			
ORIENTADOR Márcio Valério de Araújo	MATERIAL Alumínio	NÚMERO 7/13	FOLHA A4
ESCALA 2 : 1		LOCAL: NATAL/RN - Brasil	DATA: 13/12/2015



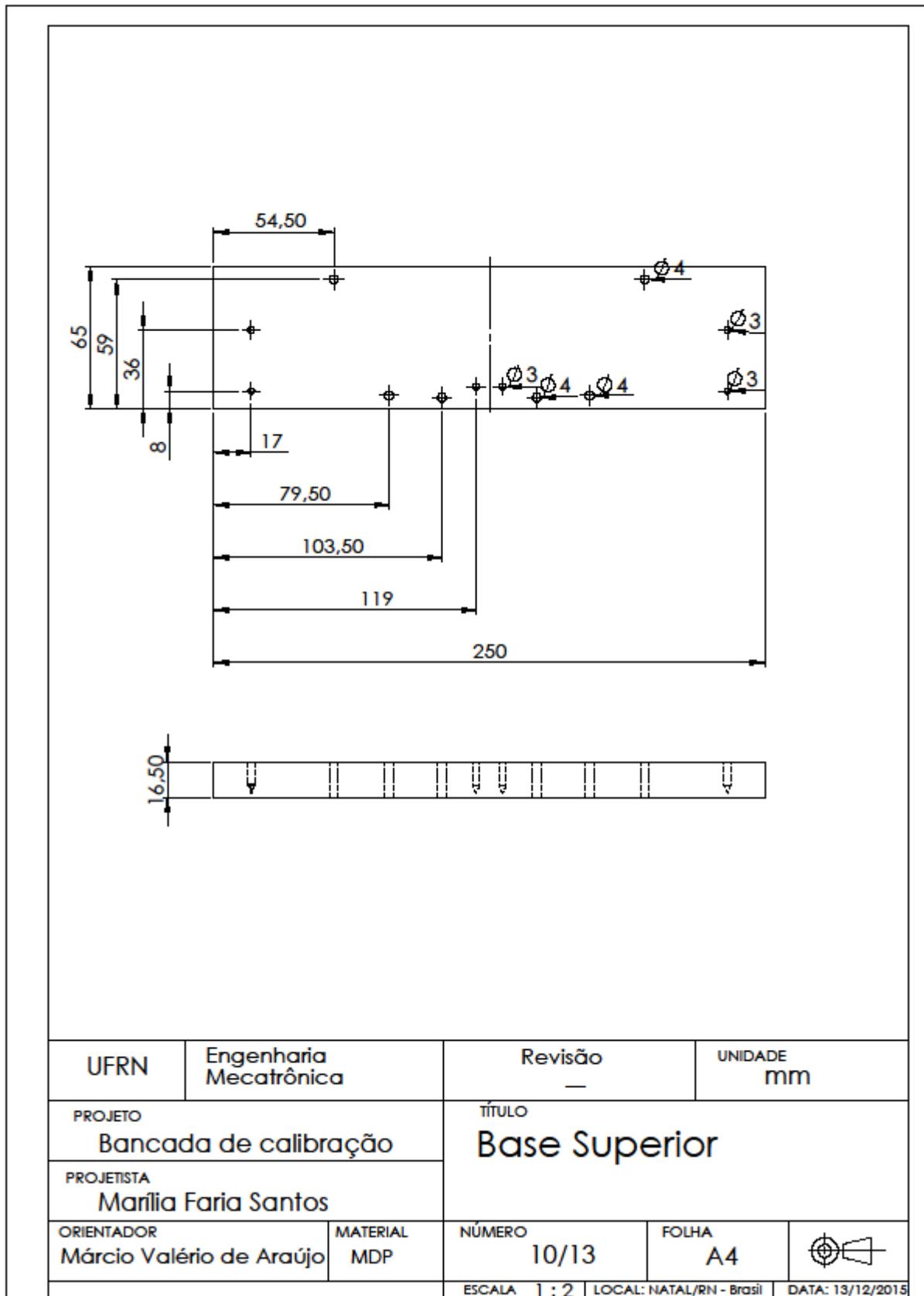
SEÇÃO A-A
ESCALA 1 : 2

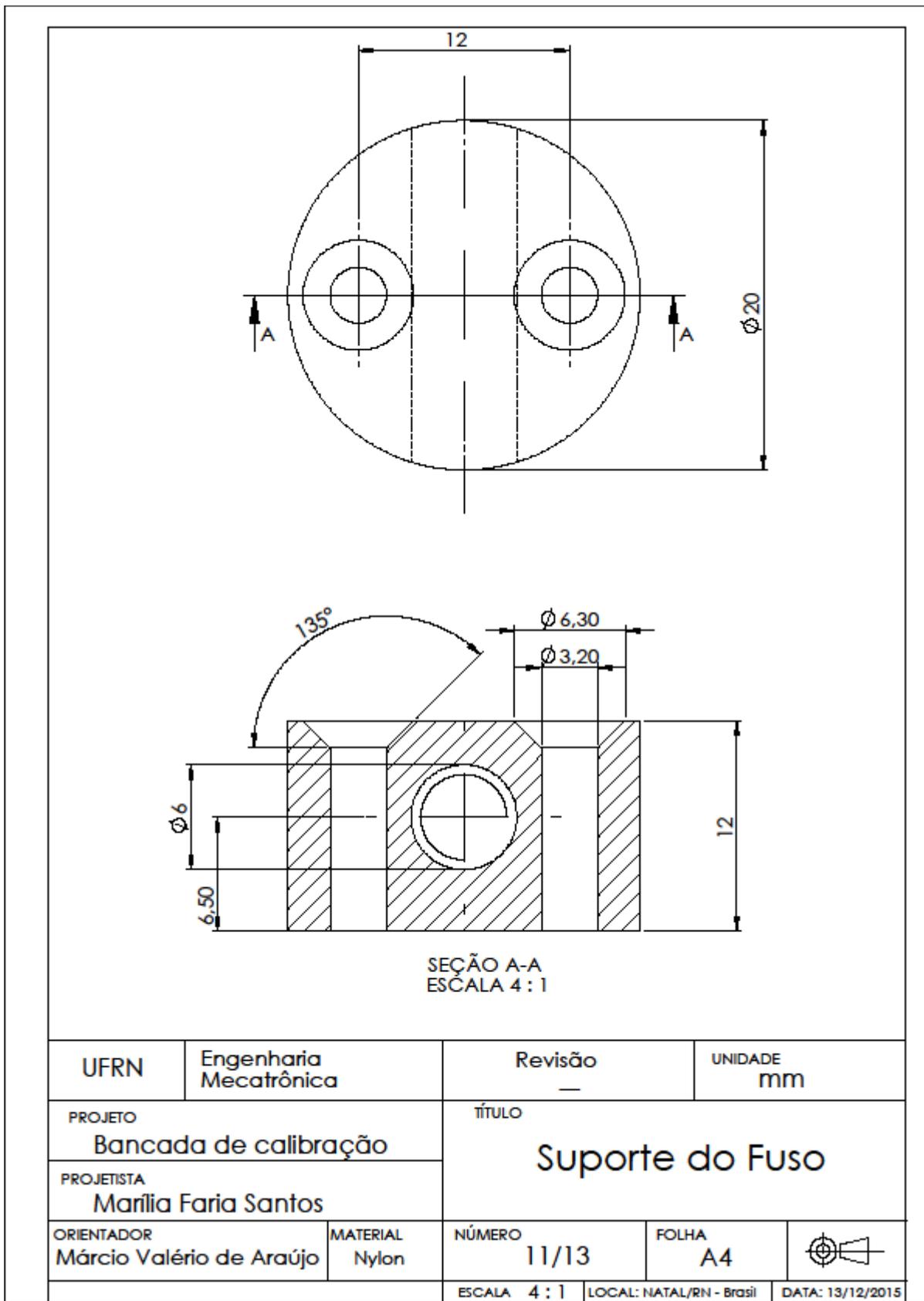
UFRN	Engenharia Mecatrônica	Revisão —	UNIDADE mm
PROJETO Bancada de calibração		TÍTULO Base Inferior	
PROJETISTA Marília Faria Santos			
ORIENTADOR Márcio Valério de Araújo	MATERIAL MDP	NÚMERO 8/13	FOLHA A4
ESCALA 1 : 2		LOCAL: NATAL/RN - Brasil	DATA: 13/12/2015



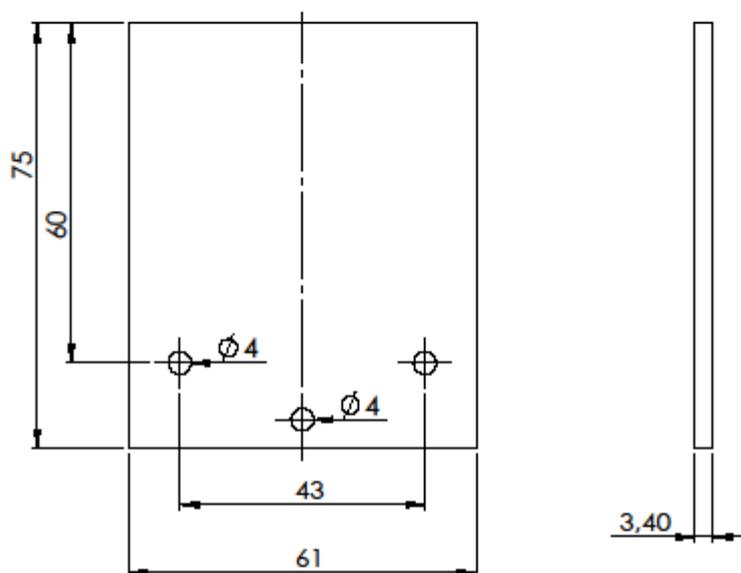


UFRN	Engenharia Mecatrônica	Revisão —	UNIDADE mm
PROJETO Bancada de calibração		TÍTULO Base Mediana	
PROJETISTA Marília Faria Santos			
ORIENTADOR Márcio Valério de Araújo	MATERIAL MDP	NÚMERO 9/13	FOLHA A4
ESCALA 1 : 2		LOCAL: NATAL/RN - Brasil	DATA: 13/12/2015

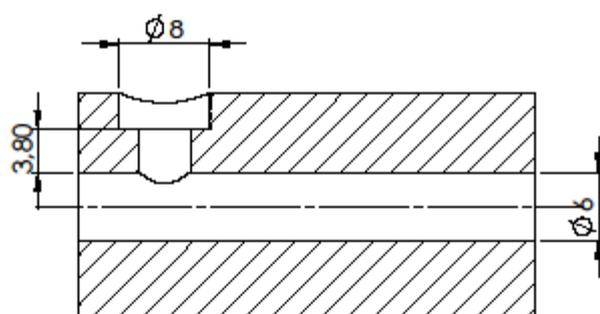
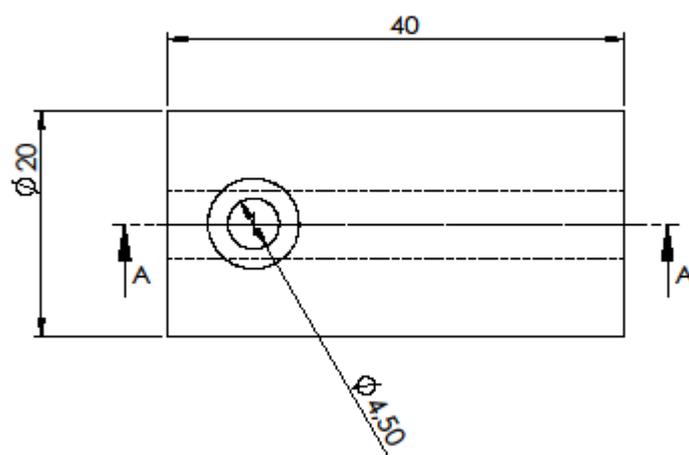




UFRN	Engenharia Mecatrônica	Revisão —	UNIDADE mm
PROJETO Bancada de calibração		TÍTULO Suporte do Fuso	
PROJETISTA Marília Faria Santos			
ORIENTADOR Márcio Valério de Araújo	MATERIAL Nylon	NÚMERO 11/13	FOLHA A4
ESCALA 4 : 1		LOCAL: NATAL/RN - Brasil	DATA: 13/12/2015



UFRN	Engenharia Mecatrônica	Revisão —	UNIDADE mm
PROJETO Bancada de calibração		TÍTULO Suporte do Mouse	
PROJETISTA Marília Faria Santos			
ORIENTADOR Márcio Valério de Araújo	MATERIAL Alumínio	NÚMERO 12/13	FOLHA A4
ESCALA 1 : 1		LOCAL: NATAL/RN - Brasil	DATA: 13/12/2015



SEÇÃO A-A
ESCALA 2 : 1

UFRN	Engenharia Mecatrônica	Revisão —	UNIDADE mm
PROJETO Bancada de calibração		TÍTULO Volante	
PROJETISTA Marília Faria Santos			
ORIENTADOR Márcio Valério de Araújo	MATERIAL Alumínio	NÚMERO 13/13	FOLHA A4
ESCALA 2 : 1		LOCAL: NATAL/RN - Brasil	DATA: 13/12/2015