



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO



Desenvolvimento de plataforma robótica omnidirecional

Autor: Emílio Dolgener Cantú

Orientador: Eduardo Perondi

Porto Alegre, 22 de dezembro de 2017

Sumário

Resumo	iii
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas	viii
Lista de Símbolos	x
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Fundamentação Teórica	5
2.2 Estado da Arte	7
3 Especificação e montagem do protótipo	9
4 Desenvolvimento Teórico	13
4.1 Modelagem Cinemática	13
4.2 Odometria	15
4.3 Planejamento de Trajetória	16
4.4 Controle	17
4.5 Limitações de Velocidade	19
5 Implementação dos algoritmos	21
6 Testes Experimentais	25
6.1 Trajetórias desejadas do sistema	25
6.2 Resultados	26
7 Conclusão e Trabalhos Futuros	31
8 Referências	33

Resumo

O presente trabalho apresenta a implementação de uma base robótica omnidirecional, utilizando 3 *omniwheels*. É desenvolvido e implementado o modelo cinemático do robô e um controlador de velocidade. Também é descrita uma proposta de algoritmo de odometria e de testes de seguimento de trajetória. Se comprovou o modelo utilizado e foram avaliadas algumas trajetórias em malha aberta para validação do controle de velocidade.

Lista de Figuras

1	Projeção de crescimento do mercado de robótica móvel até 2020.	1
2	Diagrama de um robô móvel com três rodas omnidirecionais.	2
3	Desenho de uma roda omnidirecional.	3
4	Chassi projetado.	11
5	Protótipo montado, sem as canetas.	11
6	Sistemas de coordenadas global I e relativo ao centro do robô R.	13
7	Vista superior do robô, mostrando as convenções adotadas. As grandezas v_x e v_y estão no sistema de coordenadas do robô.	14
8	Deslocamento, velocidade e aceleração durante uma trajetória gerada por polinômio de quinta ordem. Fonte: Lynch e Park (2017).	16
9	Deslocamento e velocidade durante um deslocamento com perfil de velocidades trapezoidal. Fonte: Lynch e Park (2017)	16
10	Diagrama de blocos da estratégia de controle utilizada.	17
11	18
a	Não-linearidade do tipo “zona-morta”.	18
b	Correção a ser aplicada no sinal de controle.	18
12	Limites de velocidade translacional e rotacional em função dos limites de saturação dos motores reais. Fonte: Adaptado de Lynch e Park (2017) para as coordenadas utilizadas.	19
13	Estrutura e hierarquia dos subsistemas propostos inicialmente.	21
14	Um motor em saturação, enquanto o robô sofre alteração de trajetória. O caminho preto é a rota desejada.	23
15	Escalonamento de velocidade ativado.	23
16	Trajetoária de giro.	25
17	Trajetoária retilínea pura.	25
18	Trajetoária combinada.	26
19	Análise da não-linearidade do tipo “zona-morta” presente nos motores utilizados.	27
20	Efeito da zona morta no acionamento das 3 rodas com velocidades distintas.	27
21	Não linearidade compensada – acionamento quase simultâneo de todas as rodas.	28
22	Trajetoária real realizada pelo robô, em que a roda mais transversal ao caminho foi submetida a velocidades muito baixas (e não-nulas). A trajetória tem em torno de 0,5 m de comprimento.	29
23	Trajetoárias em malha aberta, divergindo do ponto de origem. A trajetória desejada é a que está representada em vermelho.	30

Lista de Tabelas

1	Distância percorrida em trajetória retilínea com perfil de velocidade instantâneo. . .	28
2	Custo dos componentes utilizados no projeto.	37

Lista de Abreviaturas e Siglas

AGV	<i>Automated Guided Vehicle.</i> 8,
ARM	<i>Advanced RISC Machine.</i> 10,
GPIO	<i>General Purpose Input/Output.</i> 10, 21, 22,
GPS	<i>Global Positioning Sistem.</i> 6,
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit.</i> 9, 10,
IMU	<i>Inertial Measurement Unit.</i> 10,
NiCd	Níquel-Cádmio. 9,
PID	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo. 6, 7, 17,
PWM	<i>Pulse Width Modulation.</i>
RPi	<i>Raspberry Pi.</i> 10,
TOMR	<i>Three-wheeld Omnidirectional Mobile Robot.</i> 5, 9, 15,

Lista de Símbolos

K_D	Ganho derivativo.
K_I	Ganho integral.
K_P	Ganho proporcional.
R	Distância de cada roda até o centro geométrico da estrutura.
\dot{q}_I	Vetor de velocidades no sistema de coordenadas global.
\dot{q}_R	Vetor de velocidades no sistema de coordenadas do robô.
ω_z	Velocidade angular.
ϕ	Vetor de posições angulares das rodas.
θ	Orientação do robô.
c_{cd}	Coefficiente de compensação de zona morta superior.
c_{ce}	Coefficiente de compensação de zona morta inferior.
n	Número de rodas.
q_I	Vetor de posição no sistema de coordenadas global.
q_R	Vetor de posição no sistema de coordenadas do robô.
r	Raio das rodas utilizadas.
t	Tempo.
x_I	Posição no eixo X do sistema de coordenadas global.
x_R	Posição no eixo X do sistema de coordenadas do robô.
y_I	Posição no eixo Y do sistema de coordenadas global.
y_R	Posição no eixo Y do sistema de coordenadas do robô.
z_{md}	Limite superior da zona morta.
z_{me}	Limite inferior da zona morta.
$\dot{\phi}_i$	Velocidade angular da roda i .
$\dot{\phi}$	Vetor de velocidades das rodas.

- ϕ_i Posição angular da roda i .
- v_x Velocidade linear no eixo X do sistema de coordenadas do robô.
- v_y Velocidade linear no eixo Y do sistema de coordenadas do robô.
- v_{x_I} Velocidade linear no eixo X do sistema de coordenadas global.
- v_{y_I} Velocidade linear no eixo Y do sistema de coordenadas global.

1 Introdução

O interesse na área da robótica se dá pela multi-disciplinaridade do tema, que abrange um espectro de conhecimentos que vai desde mecânica estrutural até a aplicação de teorias de controle sofisticadas. A área ainda se estende por eletrônica, elétrica, computação e até mesmo psicologia. Assim, considera-se que esta área é bastante adequada a um trabalho de conclusão de um curso igualmente abrangente, que é a Engenharia de Controle e Automação.

Em aplicações industriais, a maioria dos robôs utilizados são manipuladores, que realizam tarefas repetitivas – como soldagem ou montagem de peças – com precisão e rapidez adequados a cada aplicação. Estes robôs, no entanto, são em geral fixos, e daí surge o estudo da robótica móvel: como um robô pode se mover sem supervisão humana e interagir com o mundo real? (Siegwart et al., 2011) Além do interesse acadêmico, existe um significativo interesse comercial, visto que o mercado de robôs móveis, que estava em torno de 4,5 bilhões de dólares americanos em 2014, tende a duplicar até 2020 (Markets e Markets, 2015).

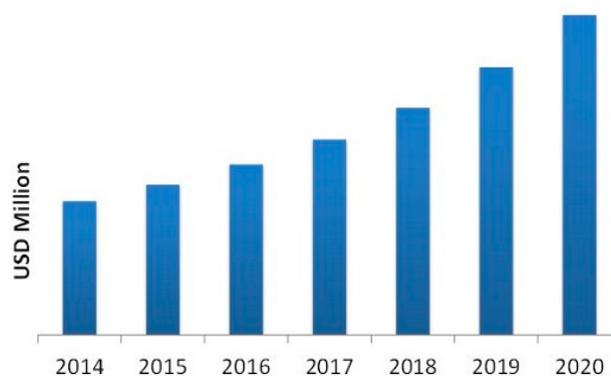


Figura 1: Projeção de crescimento do mercado de robótica móvel até 2020.

Fonte: Markets e Markets (2015)

Segundo Lynch e Park (2017), robôs móveis são divididos em não-holonômicos e omnidirecionais, com diferenças significativas em planejamento de trajetória, controle e modelagem dos dois tipos de robô. Diante da natureza do presente trabalho de conclusão de curso, o escopo foi definido no âmbito dos robôs omnidirecionais, que se destacam pela habilidade de realizar transporte de cargas pequenas em espaços confinados – como corredores de hospital e depósitos de armazenamento que buscam o aumento da capacidade sem perder agilidade logística nem aumentar o espaço necessário nas instalações. Academicamente, o controle de rodas omnidirecionais apresenta diversos problemas atrativos, vários dos quais serão descritos ao longo do presente trabalho. O desenvolvimento de uma plataforma robótica omnidirecional holonômica se torna útil para futuras aplicações em diversas áreas de investigação em robótica, controle e automação.

O presente trabalho consiste no desenvolvimento (tanto teórico quanto experimental) de uma plataforma robótica que possa se movimentar de maneira autônoma em qualquer direção do plano sem necessidade de reorientação – apresentando holonomicidade. Após uma avaliação na bibliografia sobre os tipos de robôs factíveis de serem construídos no tempo previsto e com os recursos financeiros disponíveis, optou-se pela configuração descrita na sequência. A plataforma considerada mais adequada utiliza 3 *omniwheels*, cada uma acionada por um motor elétrico dedicado, conforme o modelo mostrado na Figura 2. Como as rodas são montadas de maneira fixa no chassi, este tipo de robô ainda oferece a vantagem de ser construído com uma estrutura mecânica mais simples, como mencionado por Siciliano e Khatib (2016). As rodas omnidirecionais utilizadas podem ser vistas em detalhes na Figura 3. O sistema de movimentação é controlado por software processado em um computador embarcado a partir dos sinais fornecidos por sensores inerciais e de odometria.

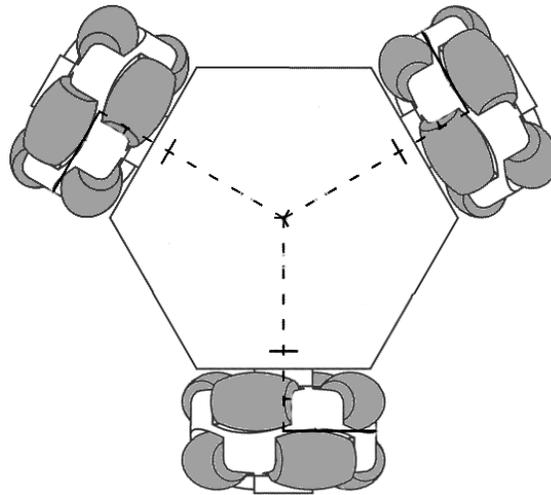


Figura 2: Diagrama de um robô móvel com três rodas omnidirecionais.

Fonte: Adaptado de Ritter (2016)

Este trabalho tem como **objetivo geral** projetar, construir, colocar em operação e testar uma plataforma robótica omnidirecional de baixo custo, mas com características semelhantes às dos sistemas comerciais. Para atingir esse objetivo, se devem alcançar os seguintes **objetivos específicos**:

- Modelagem do robô;
- Especificação e construção de um protótipo;
- Implantação de um algoritmo de controle;
- Implantação de instrumentação;
- Análise de uma proposta preliminar de algoritmo de odometria;

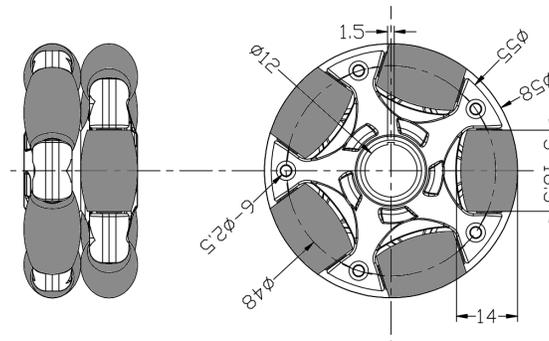


Figura 3: Desenho de uma roda omnidirecional.

Fonte: Adaptado de Nexus (2016)

- Realizar experimentos de seguimento de trajetórias e analisar os resultados obtidos.

O trabalho está organizado da seguinte maneira:

- Na Seção 2, é apresentada a revisão bibliográfica, versando sobre robótica móvel, técnicas de controle utilizadas na área e um breve resumo sobre métodos de localização, além de uma exposição dos trabalhos mais recentes envolvendo robôs omnidirecionais;
- Na Seção 3, foca-se na especificação do hardware, estrutura mecânica e montagem do protótipo;
- Na Seção 4, é apresentado o desenvolvimento teórico da modelagem do robô e dos algoritmos de controle e localização;
- Na Seção 5 são implementados os algoritmos descritos na seção anterior;
- Na Seção 6, é descrito um experimento para avaliar o desempenho do robô projetado e são apresentadas as análises e discussões sobre os resultados dos experimentos, a conclusão sobre o trabalho como um todo e algumas propostas para futuros trabalhos.

Além do descrito, o trabalho ainda contém o Apêndice A, da descrição dos custos do projeto.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Fundamentação Teórica

Para compreender o comportamento de um robô e desenvolver aplicações, é usualmente necessário obter um modelo matemático do robô. Para robôs móveis, em contraste com braços robóticos, por exemplo, há um nível de complexidade adicional associado à estimação da posição do robô, visto que a plataforma móvel não possui nenhuma extremidade fixa em um ponto conhecido. No caso do robô omnidirecional com 3 rodas, se deseja obter um **modelo cinemático** que relacione as velocidades de cada roda à posição do robô no ambiente. Nesse caso, não é necessário analisar as restrições de movimento adicionadas ao sistema por cada roda, simplificando a obtenção da cinemática direta do *Three-wheeld Omnidirectional Mobile Robot*. Tal análise é apresentada por diversos autores, como Siegwart et al. (2011), por exemplo, e será abordada nas próximas seções. Ainda de acordo com estes autores, conforme a velocidade de operação aumenta, se torna importante realizar a análise dos efeitos dinâmicos do sistema. A **modelagem dinâmica** do robô em questão ainda é foco de pesquisa, variando conforme a aplicação desejada, sendo uma das opções apresentada por Kim e Kim (2014). Nesse trabalho, se assumiu o centro de massa no centro geométrico do robô e se contabilizaram diversos parâmetros, como a inércia rotacional do robô e de cada roda, o coeficiente de atrito viscoso das engrenagens redutoras dos motores, os parâmetros elétricos dos motores CC e as características das baterias utilizadas. Em Lynch e Park (2017) são apresentados diversos métodos de **planejamento de trajetória** para robôs, ou seja, a maneira como o robô (ou um efetuador) se movimenta de um determinado ponto até outro. Há diversas técnicas de implantação de trajetórias, com diversos níveis de complexidade computacional. Implementações mais simples podem ser uma trajetória em linha reta de um ponto a outro, com atuação relativamente brusca, causando picos de aceleração, ou mais refinadas, realizando interpolações polinomiais para garantir velocidades e acelerações nulas nos pontos de origem e destino. Também é importante analisar o perfil de velocidade executado pelo robô para garantir uma operação eficiente para as características dinâmicas de cada aplicação.

Segundo Lynch e Park (2017), aplicar controle com realimentação em robôs omnidirecionais é relativamente simples, visto que esse tipo de plataforma robótica apresenta controlabilidade – ou seja, sempre há um conjunto de velocidades ϕ para as rodas que ocasiona uma certa velocidade \dot{q} (translacional e rotacional) para o robô. Siegwart et al. (2011) sugerem a utilização de um controlador com realimentação de estados. Nesta estratégia, o algoritmo de geração de trajetória divide o caminho a ser percorrido em diversos pontos, enquanto que o controlador implementado garante que o robô percorra tal trajeto, como se os dois sistemas – de planejamento de trajetória e de controle –, estivessem operando em camadas hierárquicas.

A maioria dos trabalhos se concentra em controladores que levam em consideração apenas a modelagem cinemática do sistema. No entanto, nos casos em que o modelo do robô exija considerações dinâmicas e não-lineares, controladores mais complexos são utilizados. Dentre

outros, Siciliano e Khatib (2016) descrevem o método de controle por torque computado, bastante popular em robótica, no qual o modelo dinâmico inverso é utilizado para linearizar a malha de controle. Ainda, conforme Indiveri (2009), o controle por torque computado configura um sistema de controle centralizado, enquanto a utilização de um controlador PID para cada roda seria um exemplo de aplicação de uma estratégia de controle descentralizado.

Conforme Lynch e Park (2017), a localização do robô no ambiente é essencial para o bom funcionamento de um robô móvel. Uma estratégia para se realizar a **odometria** – a medição da distância percorrida – é através da integração das velocidades das rodas. Como o sensoriamento das mesmas é muito comum, através de *encoders* de quadratura, por exemplo, a odometria é relativamente de baixo custo e conveniente. No entanto, devido às sucessivas integrações realizadas, erros de estimação tendem a se acumular ao longo do tempo de operação, tanto devido a deslizamentos das rodas como a erros numéricos acumulados, principalmente. Sensores como acelerômetros e giroscópios também tendem a acumular o mesmo tipo de erro. Assim, conforme Siegwart et al. (2011), se recomenda utilizar métodos de localização absolutos de tempo em tempo, como magnetômetros, GPS e marcadores fixos no ambiente, ou, conforme complementado por Lynch e Park (2017), se pode realizar uma conjugação das leituras de diversos sensores, por meio do método conhecido como **fusão de dados**.

Poucos trabalhos detalham a implantação dos sistemas desenvolvidos. De acordo com Craig (2017), tal fato se deve às constantes mudanças e atualizações tecnológicas em *hardware* e linguagens de programação. Os autores tratam, então, de apresentar os fundamentos básicos da implementação, cabendo a cada pesquisador definir suas soluções a partir do que está disponível. Para Siciliano e Khatib (2016), a escolha da arquitetura utilizada é muito subjetiva, sendo comum tratar o robô como um conjunto de subsistemas. Tal abordagem busca melhorar a modularidade do sistema, facilitar a reutilização de módulos em outros projetos e facilitar testes, validações e manutenção. Arquiteturas mais voltadas à robótica tendem a incluir capacidades de processamento em tempo real, controle de atuadores e sensores, e, por vezes, operam em diferentes camadas de prioridade, com escalas de tempo diferentes para diferentes tarefas.

Craig (2017) ainda apresenta diversos paradigmas para as linguagens de programação utilizadas em robótica, sendo que uma das grandes tendências hoje é a utilização de linguagens gerais já existentes, com a adição de bibliotecas voltadas para o desenvolvimento de aplicações robóticas (ou o desenvolvimento das próprias bibliotecas). A escolha da linguagem a ser utilizada, conforme Siciliano e Khatib (2016), deve ser realizada com cuidado, com o objetivo de manter o desenvolvimento do sistema mais fácil, seguro e flexível. Assim, essa escolha pode ser baseada nas experiências anteriores do desenvolvedor, no tipo de robô e nas tarefas que se deseja executar, sem haver um consenso da comunidade acadêmica sobre qual a melhor abordagem.

2.2 Estado da Arte

A grande maioria dos robôs construídos com *omniwheels* utiliza 3 rodas em uma configuração triangular simétrica – como apresentado na Figura 2 –, a exemplo de Ritter (2016), Samani et al. (2007), Williams et al. (2002) e Indiveri (2009), entre outros. Alguns autores, como Krinkin et al. (2015) e Rojas e Förster (2006) utilizam 4 rodas, sendo que este último desenvolveu algoritmos para que o robô continuasse operando mesmo que um dos motores deixe de funcionar. Em diversos trabalhos existe uma preocupação em relação a possíveis derrapagens das rodas ao aumentar a velocidade de operação. Williams et al. (2002) apresentam um estudo sobre os coeficientes de atrito de rodas omnidirecionais em diversas superfícies e um modelo dinâmico que leva tal efeito em consideração. Samani et al. (2007) utilizam 3 rodas motrizes e outras 3 rodas livres ligadas a *encoders*, para que deslizamentos devido a torque excessivo não afetem a odometria.

Jung e Kim (2001) construíram um robô omnidirecional e um sistema de transmissão mecânica que permite holonomicidade utilizando rodas convencionais. Sugerem ainda modos de operação para o robô caso algum dos motores pare de funcionar, passando a se comportar de maneira similar a um robô diferencial. Nestes casos de falha, no entanto, se perde a capacidade omnidirecional.

Há muitas técnicas de **controle** desenvolvidas para estes sistemas. Assim, é possível que cada autor utilize a que mais convenha às suas necessidades específicas. Ritter (2016) utiliza um controlador PID para cada roda, com parâmetros escolhidos empiricamente. Por sua vez, o robô torna-se difícil de controlar com velocidades acima de 1 m/s, segundo resultados de simulações. Samani et al. (2007) utilizam 3 controladores PID para controlar posição e orientação do robô, e relatam em detalhes o desenvolvimento de tais controladores. Em contraste, Rojas e Förster (2006) e Indiveri (2009) também utilizam PID, porém para o controle de individual de cada motor, utilizando apenas o modelo cinemático do sistema. Indiveri (2009) também sugere estratégias para evitar saturação dos atuadores.

Tanto Treesatayapun (2011) quanto Oubbati et al. (2005) utilizam redes neurais para ajustar parâmetros dos controladores, sendo que no primeiro se tem uma estrutura de controle baseada em redes neurais enquanto que no segundo se utilizam as redes para calcular os parâmetros de 5 controladores PID, melhorando o desempenho, mesmo levando em consideração não-linearidades nos modelos dinâmicos utilizados. Oubbati et al. (2005) ainda mencionam que os resultados obtidos não foram os melhores possíveis, devido à dificuldade de se coletar dados de treinamento para as redes.

A maioria das implementações de robôs móveis hoje em dia combinam diversas técnicas de **localização e odometria** para implantar a realimentação necessária aos sistemas de controle. Ginzburg e Nokleby (2013) propõem um sistema de localização para robô omnidirecional baseado em odometria (localização relativa) e triangulação ativa de sensores no ambiente (localização absoluta), com fusão de dados para obter o resultado final. Rojas e Förster (2006) utilizam a leitura dos *encoders* das rodas e uma câmera externa, enquanto que Garcia-Saura (2015) utilizam apenas um giroscópio e um sensor de distância. Röhrig et al. (2010), por outro lado, utilizam medições de

distância utilizando sensores laser (aplicados em um AGV).

Carrasco e da Silva (2016) mostram que é possível executar um algoritmo de determinação de atitude a partir de uma unidade de medidas inerciais utilizando métodos de determinação da atitude triaxial e posterior aplicação de filtros de Kalman para melhorar as estimativas na presença de ruído. A caracterização do ruído dos sensores inerciais foi obtida utilizando o método da variância de Allan. O sistema foi implantado em uma plataforma Arduino UNO, com razoável precisão. Park et al. (1996) também analisam fusão de dados utilizando um filtro de Kalman indireto para realizar *dead-reckoning* a partir da leitura de *encoders* e um giroscópio. Métodos de localização também são desenvolvidos em outras áreas, como relata Jimenez et al. (2009), que implementam três métodos de localização baseados em um sistema de navegação inercial para trajetórias de pedestres, concluindo que os resultados podem ser melhorados quando há mais qualidade na detecção da orientação. Steinhoff e Schiele (2010) obtiveram resultados similares na mesma área.

Dos trabalhos mencionados, poucos entram em detalhes quanto ao *hardware* utilizado. Oubbati et al. (2005) utilizam um computador embarcado de 2,6 GHz, uma grande evolução em relação a Feng et al. (1989), que utilizavam um computador Motorola 68000 com aproximadamente um milésimo da capacidade computacional daquele. Takemura et al. (2007) e Loh et al. (2003) utilizam computadores externos, envolvendo atrasos na comunicação entre tais computadores e o robô. Carrasco e da Silva (2016) apresentam um sistema que implementa um filtro de Kalman em um microprocessador Arduino UNO, uma alternativa de baixo custo. Diversos trabalhos mais recentes, como Krinkin et al. (2015), utilizam especificamente um **Arduino** para a interface com sensores e atuadores e o computador embarcado **Raspberry Pi** para o processamento – solução esta também adotada neste trabalho.

Para a avaliação dos resultados da plataforma construída, Loh et al. (2003) implementaram 4 tipos de trajetória: translação retilínea, translação curvilínea – ambas sem alteração na orientação –, rotação pura e um caminho combinado de rotação em torno do seu centro e translação retilínea em relação às referências globais. Duas canetas foram montadas no robô, uma no centro e outra na periferia, para avaliar o resultado das movimentações executadas.

3 Especificação e montagem do protótipo

Conforme mencionado nas seções anteriores, o robô construído possui três rodas em uma configuração simétrica. Apesar da falta de redundância – pois se alguma das rodas falhar se perde a holonomicidade –, robôs omnidirecionais com 3 rodas (TOMR) são utilizados com mais frequência tanto por serem mais simples de se implementar, como por apresentarem custo mais baixo (pois motores e rodas são responsáveis por 53% do custo do projeto, conforme o Apêndice A), além de proporcionarem geralmente uma certa economia de peso. As rodas utilizadas – mostradas na Figura 3 –, medem 58 mm de diâmetro, com estrutura em plástico e dez roletes emborrachados, e possuem capacidade de carga nominal de 3 kg (Nexus, 2016), suficiente para os fins de demonstração do projeto. As rodas possuem um perfil poligonal, que apesar de causarem mais vibrações do que outros modelos, apresentam mais área de contato com o solo, fator que também auxilia a evitar derrapagens. Cada roda é acionada por um motor de corrente contínua com caixa de redução, com uma velocidade nominal no eixo de saída de 210 rpm para uma tensão de 6 V. A máxima potência do motor está especificada para uma corrente de 1,1 A, a 110 rpm. Incluso no motor está um *encoder* de quadratura, que permite a leitura da velocidade da roda e da direção de rotação. Com a relação de redução, cada revolução da roda corresponde a 341,2 pulsos do sensor, e portanto, cada pulso representa 0,01841 radianos (Banggood.com, 2017). Rodas e motores similares foram utilizados com bons resultados por Samani et al. (2007).

Além da utilização dos *encoders* para implementação da odometria, também foi instalada na estrutura uma bússola, para garantir uma medida absoluta da orientação do robô (sem os erros que se acumulam nos métodos de *dead-reckoning*). O modelo utilizado é a HMC5883L, já instalada em uma placa com alguns componentes necessários para seu funcionamento. A precisão do circuito, de acordo com o fabricante, é de 2 graus (Honeywell, 2013). Este modelo foi escolhido pela compatibilidade com o computador utilizado e por apresentar uma boa precisão em relação ao seu baixo custo. Para complementar a odometria, também foi instalada no robô uma unidade de medidas inerciais MPU6050, uma placa adicionada ao projeto pelo seu baixo custo e por possuir acelerômetro e giroscópio em torno dos três eixos utilizados (Invensense, 2013). Os sensores descritos neste parágrafo foram adquiridos e montados à estrutura para serem utilizados em aplicações futuras. Nenhum software foi desenvolvido para os mesmos. Os dois periféricos utilizam o protocolo de comunicação I2C (Semiconductors, 2000), também compatível com o computador utilizado.

Foi adquirida também uma bateria NiCd, com capacidade de carga de 2000 mAh e 7,2 V de tensão nominal. Este tipo de bateria se caracteriza por apresentar recarga rápida e boa capacidade de utilização com correntes altas. Ligados à bateria, se tem 2 reguladores de tensão *step down* MP2307, especificados para fornecer corrente constante de até 3 A cada um, suportando picos de até 4 A (MPS, 2008). A tensão de saída dos reguladores foi configurada em 5.1 V (para o computador) e 6 V (para os motores). Como cada motor opera em geral com correntes abaixo de 1 A, o regulador utilizado é adequado, porém apresenta margens de operação consideravelmente pequenas. Os *encoders* são alimentados pelo próprio computador, que possui saída regulada de 3,3

V capaz de fornecer até 500 mA (Upton e Halfacree, 2014). A bússola e a IMU tem tensão de alimentação de 3,3 V, podendo ser adicionado ao sistema mais um regulador de tensão quando forem eventualmente integradas ao sistema, pois há espaço suficiente no chassi para tal. Neste caso, se recomenda alimentar os *encoders* a partir do mesmo regulador.

O acionamento dos motores se dá por um circuito de pontes H. Há duas destas placas, e cada uma pode acionar dois motores. Assim, se tem a possibilidade de utilizar mais um motor (ou outro atuador) em trabalhos futuros. Os *drivers* são desenvolvidos baseados no circuito L298N, que pode fornecer 4 A de corrente contínua distribuída entre as cargas (STMicroelectronics, 2000). O chaveamento de cada canal dos *drivers* é feito por meio de modulação de largura de pulso, programada e fornecida pelo computador. Assim como os demais componentes, os *drivers* foram fornecidos integrados a uma placa montada, com terminais para fixação de cabeamento e dissipadores de calor.

Todo o processamento é realizado por meio de um *single board computer* do tipo **Raspberry Pi**, que utiliza a arquitetura ARM em seu processador, ideal para dispositivos alimentados por baterias por consumir relativamente pouca energia e gerar pouco calor. O processador possui quatro núcleos e um *clock* de 1,2 GHz. O RPi utiliza um sistema operacional GNU/Linux, e *software* deve ser desenvolvido para ser executado nesta plataforma. Há ainda 40 pinos de *General Purpose Input/Output* que podem ser utilizados para conectar sensores, atuadores e diversos componentes, e suporte nativo a I2C (Upton e Halfacree, 2014).

Para unir todos os componentes descritos, se projetou uma estrutura central, como um chassi. Tal estrutura pode ser visualizada na Figura 4. No centro geométrico da estrutura e na periferia, próximo a uma das rodas, foram feitos dois orifícios que devem acomodar uma caneta hidrográfica cada. Assim, durante a fase de testes, se pode acompanhar graficamente a evolução do movimento do robô. Devido à localização central de uma das canetas, todos os componentes foram instalados na periferia da estrutura. Se tomou ainda o cuidado de instalar os circuitos integrados do acelerômetro e do giroscópio o mais próximo ao centro possível, para que as componentes de aceleração centrípeta dos movimentos com componentes de rotação não influenciassem em demasia nos resultados. A IMU poderia ter sido colocada no centro geométrico, e este erro poderia ser introduzido no traço da caneta. No entanto, como a odometria e localização dependem mais dos sensores montados nos motores do que da IMU, se preferiu manter a caneta no centro, mantendo o MPU6050 o mais próximo possível. A bússola também foi montada relativamente próxima ao centro do robô, se tomando o cuidado de alinhar os eixos dos sistemas de coordenadas dos sensores com os do robô.

Todos os componentes adquiridos possuem furos para fixação por meio de parafusos com 3 mm de diâmetro. A estrutura foi projetada com furos de 3,5 mm de diâmetro, para compensar possíveis erros de medição (visto que nem todos os componentes apresentaram seus desenhos nas informações técnicas) e possíveis tolerâncias de fabricação. Além dos furos de fixação dos componentes, também foram introduzidos orifícios próximos aos motores, para passagem dos cabos de um lado a outro da placa, e orifícios para fixação da bateria com presilhas plásticas. Na mesma área destinada à fixação da bateria, se adicionou furação capaz de receber uma placa Arduino MEGA, caso se deseje utilizar um microcontrolador em trabalhos futuros. Também foram adicionados 6 furos na periferia do

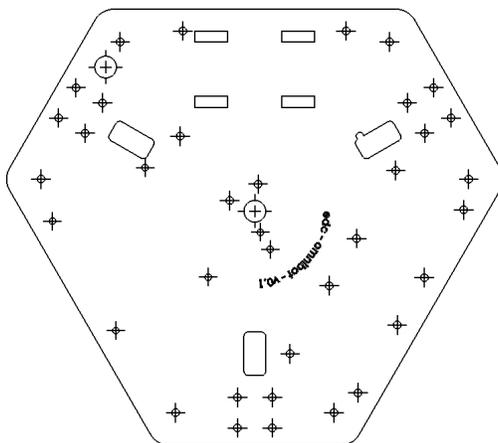


Figura 4: Chassi projetado.

chassi, para possibilitar a montagem de outra chapa sobre a dos componentes, caso sejam realizados trabalhos que exijam a expansão da estrutura.

A plataforma projetada foi então fabricada, utilizando chapas de acrílico transparente de 5 mm de espessura. Se cogitou produzir tal estrutura em alumínio, porém optou-se por utilizar o acrílico por conta da facilidade de obtenção, baixo custo, isolamento elétrico (permitindo montar os componentes eletrônicos diretamente sobre o chassi) e a possibilidade de fabricação utilizando uma máquina de corte a *laser*. A espessura foi escolhida empiricamente, dentro das disponíveis, de maneira relativamente conservadora, e atendeu as necessidades. Na Figura 5 se pode ver a montagem final do protótipo.

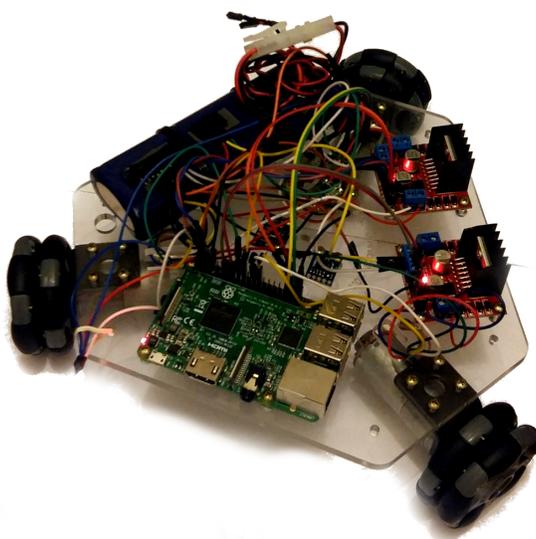


Figura 5: Protótipo montado, sem as canetas.

A bateria foi fixada sobre a estrutura utilizando presilhas plásticas. Ao redor da bateria foram fixados 3 barramentos, para aterramento, alimentação dos *drivers* e alimentação dos *encoders*. Foram instalados um conector para a bateria e outro conector para o caso em que se deseja utilizar uma fonte externa. Além dos fios que alimentam os reguladores de tensão, um par de fios sobressalente (conectados ao terminal positivo e negativo da fonte ou bateria) foi instalado junto a estes conectores, e pode ser utilizado em trabalhos futuros.

O custo de aquisição dos componentes selecionados pode ser visto detalhado no Apêndice A. Cabe ressaltar que todos os itens foram comprados em dobro, para realizar a montagem de dois robôs para futuros trabalhos no LAMECC (Laboratório de Mecatrônica e Controle).

4 Desenvolvimento Teórico

4.1 Modelagem Cinemática

Para análise de desempenho e projeto de controladores é geralmente adequado dispor de um modelo matemático do robô. Tal modelo permite relacionar o ambiente com o robô e suas partes, em termos de posições e velocidades. Para referenciamento, primeiramente se define dois sistemas de coordenadas. O primeiro, (x_I, y_I) , é o sistema de coordenadas global, fixo no ambiente. O segundo, (x_R, y_R) , está centrado no próprio robô. Ainda se pode definir o ângulo θ como a orientação do robô – ou seja, o ângulo entre os dois sistemas de coordenadas. Tal relação pode ser vista na Figura 6, e a transformação homogênea de um ponto no sistema do robô para o global é descrita na Equação (1), conforme Siegwart et al. (2011) e Ritter (2016).

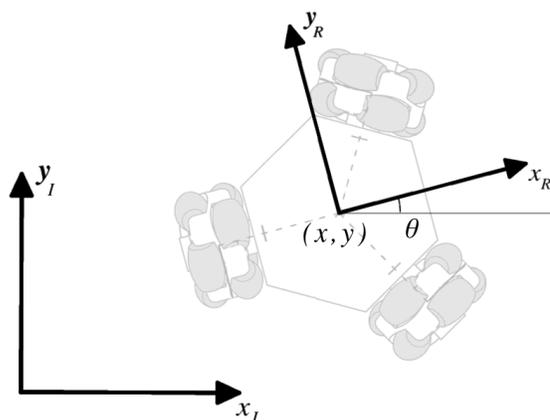


Figura 6: Sistemas de coordenadas global I e relativo ao centro do robô R.

Fonte: Adaptado de Ritter (2016)

$$\begin{pmatrix} x_I \\ y_I \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & x \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

No entanto, a modelagem cinemática utilizada se preocupa apenas com as velocidades do corpo do robô e das rodas. Utilizando as velocidades ao invés das posições, não interessa a distância entre um sistema de coordenadas e o outro, apenas a orientação. Assim, pode-se utilizar a matriz de rotação apresentada na Equação (2) durante os cálculos da cinemática.

$$\begin{pmatrix} v_{xI} \\ v_{yI} \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & 0 \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

O último termo da Equação (1) também pode ser descrito como q_R , e o vetor de velocidades $[v_x, v_y, \omega_z]^T$, centrado no sistema de coordenadas do robô, como \dot{q}_R . Com o objetivo de mapear a velocidade de giro das rodas $\dot{\phi} = [\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3]^T$ correspondente ao vetor de velocidades \dot{q}_R , se utiliza a modelagem cinemática apresentada por Siegwart et al. (2011), com as referências apresentadas na Figura 7, na qual a mesma configuração é apresentada conforme utilizada por Ritter (2016), porém com outra sequência e sentido de giro para as rodas.

Assim, para um robô com 3 rodas dispostas em simetria radial em torno do centro da estrutura, a cinemática direta é dada pela Equação (3). Diversos autores utilizam variações da mesma modelagem (Rojas e Förster (2006), Pin e Killough (1994), entre outros).

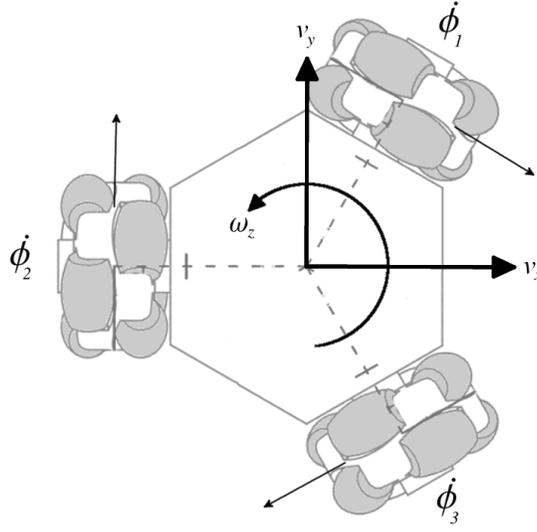


Figura 7: Vista superior do robô, mostrando as convenções adotadas. As grandezas v_x e v_y estão no sistema de coordenadas do robô.

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Nas Equação (3) apresentadas, r é o raio de cada roda e R o raio do robô (a distância do centro da roda ao centro da estrutura do robô). A cinemática inversa do modelo pode ser obtida realizando-se a inversão da matriz de transformação apresentada na Equação (3), resultando na Equação (4).

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & R \\ 0 & -1 & R \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

Nota-se que esta inversão é simplificada no caso do robô com 3 rodas, visto que quando há mais rodas, é obtida uma matriz $3 \times n$, sendo n o número de rodas, e se torna necessário utilizar uma matriz pseudo-inversa, conforme demonstram Rojas e Förster (2006). Como pela classificação de Campion et al. (1996) um TOMR é caracterizado na categoria (3,0), o modelo cinemático das equações 3 e 4 é controlável, estável e descreve a posição, orientação e suas derivadas de forma adequada.

4.2 Odometria

Após movimentações, se torna necessário calcular a nova posição do robô, para que se possa relacionar novamente o robô ao ambiente utilizando as relações obtidas na modelagem. Para o cálculo da odometria, se utiliza a metodologia apresentada em Lynch e Park (2017), assumindo que durante um certo intervalo de tempo Δt se tenha velocidades de rotação constantes nas rodas, o que permite considerar $\dot{\phi}_i \Delta t = \Delta\phi_i$. Este procedimento pode ser implantado na Equação (5), modificada a partir da Equação (3). Na prática, é fácil contar os deslocamentos angulares $\Delta\phi_i$, visto que o número de pulsos por revolução dos *encoders* é conhecido.

$$\begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \frac{r}{3R} \begin{pmatrix} -\frac{3R}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{3R}{\sqrt{3}} \\ R & -2R & R \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

De posse das velocidades da plataforma durante o período de tempo unitário Δt – lembrando que v_x , v_y e ω_z estão vinculados ao sistema de coordenadas centrado no corpo do robô –, se deve avaliar o deslocamento em relação ao centro do robô na posição anterior. Para o caso em que $\omega_z = 0$, em uma trajetória retilínea, se tem simplesmente que $\Delta q_R = \dot{q}_R$.

No entanto, quando houver mudança de orientação no período e, conseqüentemente, $\omega_z \neq 0$, se deve levar em consideração os desvios de trajetória causados por essa rotação. Assim, se obtém Δq_R de acordo com a Equação (6) (Lynch e Park, 2017), onde k é o instante anterior ao período de tempo analisado. Para se obter a nova posição q_I do robô no sistema de coordenadas global, se deve utilizar a rotação $R(\theta_k)$ apresentada na Equação (2), e atualizar os valores da última iteração conforme a Equação (7).

$$\Delta q_R = \begin{pmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ((v_x \Delta t) \text{sen}(\omega_z \Delta t) + (v_y \Delta t)(\text{cos}(\omega_z \Delta t) - 1))/(\omega_z \Delta t) \\ ((v_y \Delta t) \text{sen}(\omega_z \Delta t) + (v_x \Delta t)(1 - \text{cos}(\omega_z \Delta t)))/(\omega_z \Delta t) \\ \omega_z \Delta t \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$q_{I(k+1)} = q_{I(k)} + \Delta q_I = q_{I(k)} + R(\theta_k) \Delta q_R \quad (7)$$

4.3 Planejamento de Trajetória

Para o robô desenvolvido, não há a necessidade de implementar algoritmos complexos de planejamento de trajetória (detecção de obstáculos, caminhos de mínima energia, etc.). Serão abordados, nesta primeira abordagem, apenas caminhos “ponto a ponto”, que levam de um ponto inicial a um ponto final, ambos em repouso (Lynch e Park, 2017).

Apesar de ser uma trajetória relativamente simples, ainda é necessário realizar estudos visando definir procedimentos que garantam operação adequada do sistema. Uma dessas estratégias consiste na definição do chamado *time-scaling* da trajetória, ou seja, a geração de uma função $s(t)$ que suavize o comportamento do robô por meio de restrições em velocidades e acelerações. Na Figura 8 se pode ver uma curva de perfil de velocidade polinomial de quinta ordem, que pode garantir velocidades e acelerações nulas nos pontos de origem e destino.

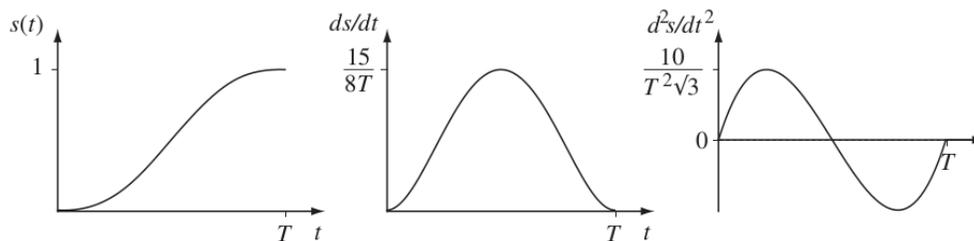


Figura 8: Deslocamento, velocidade e aceleração durante uma trajetória gerada por polinômio de quinta ordem. Fonte: Lynch e Park (2017).

No entanto, a interpolação de um polinômio a cada ciclo de processamento pode envolver um custo computacional elevado, que poderia levar a um sobrecarregamento do *hardware* utilizado. Portanto, neste trabalho se optou por utilizar para os testes iniciais um perfil de velocidade trapezoidal, conforme mostrado na Figura 9. Tal perfil é um dos mais comuns em robótica, devido a sua simplicidade de implementação. Os limites de aceleração foram definidos na fase de implantação do *software*, de modo a evitar o deslizamento das rodas utilizadas na superfície de testes.

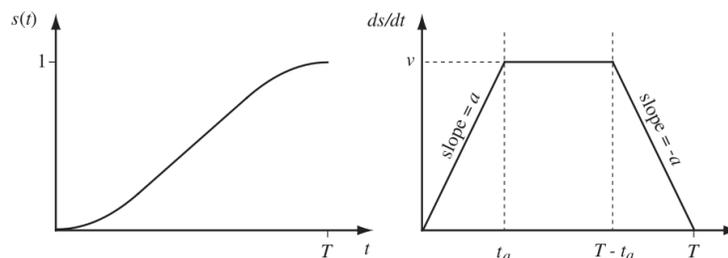


Figura 9: Deslocamento e velocidade durante um deslocamento com perfil de velocidades trapezoidal. Fonte: Lynch e Park (2017)

Utilizando a curva do perfil de velocidade se pode dividir a trajetória a ser realizada, e fixar *setpoints* de velocidade específicos a pontos específicos no tempo. Assim, se fixa a aceleração do robô à curva desejada.

4.4 Controle

A teoria de controle aplicada a robos móveis é bastante ampla, sendo utilizadas na prática diversas técnicas. O controle do tipo PID, no entanto, ainda é um dos mais utilizados, pela sua simplicidade de implementação e resultados eficazes. Na bibliografia se encontram trabalhos que envolvem modelagens dinâmicas e que utilizam controladores PID que levam em conta os aspectos dinâmicos (Samani et al. (2007), por exemplo), enquanto que o mesmo tipo de controlador pode também ser utilizado quando o modelo disponível, como neste trabalho, é puramente cinemático (Indiveri, 2009).

Para implementar o controle de velocidade do robô, se tem duas opções para o conjunto de variáveis controladas. Se pode controlar as velocidades do corpo do robô, v_x , v_y e ω_z , sendo a saída de cada controlador sobreposta para acionamento das rodas, como feito por Rojas e Förster (2006), que se beneficiam deste esquema pois seu robô foi construído com 4 rodas, o que tornaria necessário utilizar mais um controlador. A outra maneira é controlando a velocidade de cada motor independentemente, a partir dos dados recebidos dos cálculos da cinemática. Tal abordagem foi utilizada no presente trabalho, devido ao modo como havia sido implementada a cinemática por Ritter (2016). O esquema do controlador utilizado está apresentado na Figura 10.

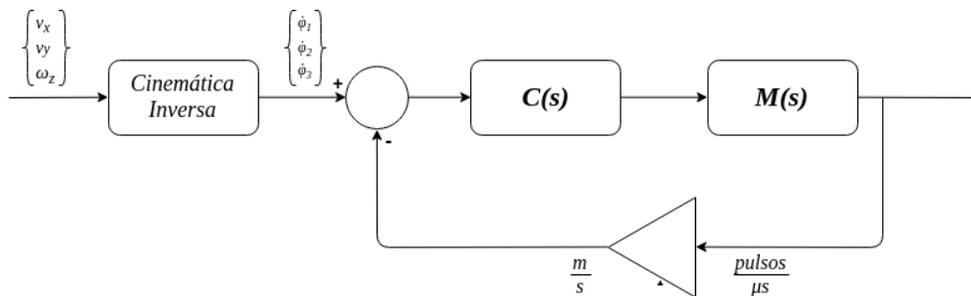


Figura 10: Diagrama de blocos da estratégia de controle utilizada.

Na Figura 10, se evidencia a operação do controlador utilizado. As variáveis de estado do robô são convertidas em velocidades das rodas pela cinemática inversa, e a partir daí é aplicado o controle realimentado proporcional. O bloco no caminho de *feedback* converte a leitura de velocidade realizada pelo *hardware* para as mesmas unidades utilizadas no restante da modelagem.

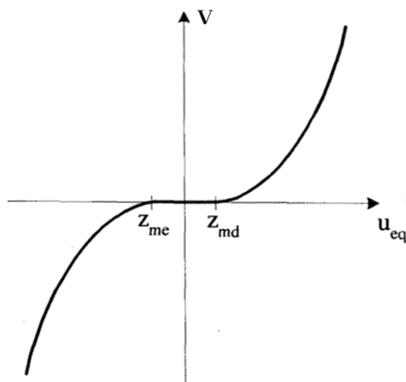
Como o sistema de controle foi implementado em um computador, a atualização dos valores ocorre apenas uma vez a cada período de tempo T , conforme a Equação (8), sendo K_P , K_I e K_D os termos que multiplicam, respectivamente, o erro, a integral do erro e a taxa de variação do erro no caso de um sistema de controle contínuo, u o sinal de controle e x a grandeza controlada (Dorf e

Bishop, 2008).

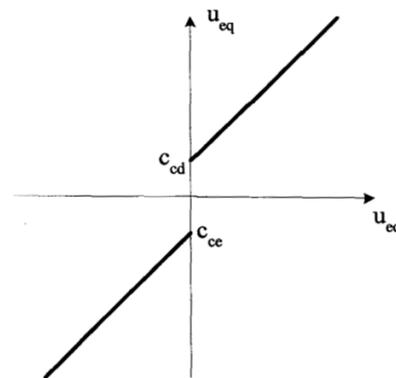
$$u[k] = (K_P + K_I T + \frac{K_D}{T}) x[k] - K_D T x[k - 1] + K_I u[k - 1] \quad (8)$$

Em um sistema como um motor elétrico, ganhos mais altos costumam tornar a resposta do sistema mais rápida. Entretanto, ganhos relativamente grandes podem acarretar na saturação de atuadores, mudanças repentinas de torque, vibrações na estrutura e até mesmo instabilidade (Lynch e Park, 2017).

Outro fator inerente às aplicações de sistemas de controle é a possível presença de não-linearidades. Em motores elétricos que utilizam um trem de engrenagens como redução mecânica é muito comum haver a não-linearidade chamada de “zona-morta”, conforme ilustra a Figura 11a. Como se pode ver no gráfico, um atuador só responde para valores do sinal de controle u_{eq} acima de z_{md} ou abaixo de z_{mc} . Uma estratégia de compensação simples está ilustrada na Figura 11b: se adiciona ao sinal de controle calculado u_{ec} um coeficiente c_{ed} , no caso de sinal positivo. No caso de sinal negativo, se subtrai um coeficiente c_{ce} . Nota-se que nem sempre a zona morta é simétrica.



(a) Não-linearidade do tipo “zona-morta”.



(b) Correção a ser aplicada no sinal de controle.

Figura 11

Fonte: Adaptado de Cunha (2001)

O controle de posição de um robô móvel, de acordo com Siegwart et al. (2011), pode ser de três tipos. Se pode desejar atingir uma certa configuração estática, seguir uma trajetória dependente do tempo ou seguir um caminho geométrico. As soluções mais precisas utilizam controle com realimentação, e dependem fortemente do bom funcionamento do sistema de odometria (Samani et al., 2007). Há, também, robôs que operam em malha aberta, decompondo trajetórias em trajetórias simples (retas e curvas). Nessa estratégia, o controle se torna um problema de computar com antecedência ao movimento o perfil de velocidade a ser executado (Siegwart et al., 2011).

4.5 Limitações de Velocidade

É importante ressaltar que toda a cinemática desenvolvida no presente trabalho não considera limites de velocidade para os atuadores. Em uma aplicação real, entretanto, existe um ponto de saturação no acionamento de cada motor, que deve ser levada em consideração. Na Figura 12 se pode ver o efeito dessas limitações, conforme descrito em Lynch e Park (2017).

Quando não há rotações ($\omega_z = 0$), o limite de velocidade do corpo do robô é descrito pelo hexágono mostrado na porção esquerda da Figura 12: a maior velocidade possível é na direção em que uma das rodas está sendo “arrastada”, e as componentes de velocidade das outras rodas se somam. Em uma situação em que haja necessidade de rotação, a velocidade angular do robô se torna limitada, da maneira mostrada no volume tridimensional à direita da Figura 12. É fácil perceber que, para realizar um movimento de rotação na maior velocidade angular possível, não se pode ter movimentos de translação para que todos os componentes de velocidade das rodas contribuam apenas para a rotação.

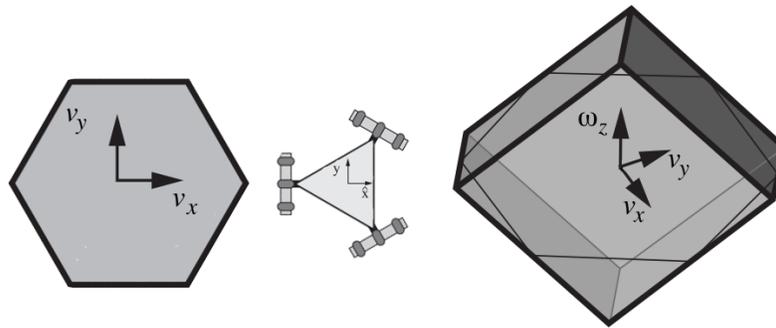


Figura 12: Limites de velocidade translacional e rotacional em função dos limites de saturação dos motores reais. Fonte: Adaptado de Lynch e Park (2017) para as coordenadas utilizadas.

Se pode dizer, então, que para aplicações reais nas quais a holonomicidade da plataforma é de fato desejável, se deve implantar um sistema de planejamento de trajetória que leve em consideração as limitações de velocidade descritas acima.

5 Implementação dos algoritmos

Os equacionamentos apresentados na Seção 4 foram implementados em software para a aplicação prática do sistema. Na Figura 13 se pode enxergar o sistema proposto inicialmente. Foram omitidos da figura, por simplicidade, os algoritmos de limitação de velocidade, compensação de zona-morta e geração de trajetórias.

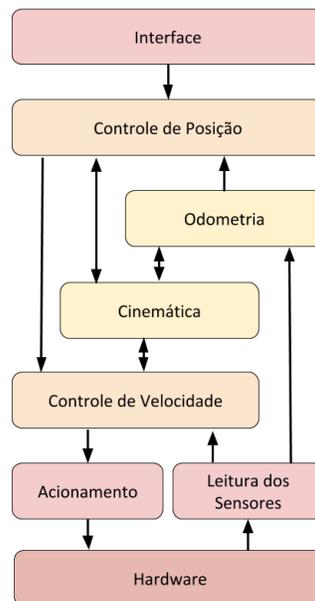


Figura 13: Estrutura e hierarquia dos subsistemas propostos inicialmente.

O *software* de controle foi implementado em um computador embarcado Raspberry Pi, conforme proposto por Ritter (2016), utilizando a linguagem C++, uma das linguagens suportadas pelas bibliotecas de acesso às portas *General Purpose Input/Output* que apresenta melhores velocidades de execução. Com esta escolha de linguagem, também se pode utilizar parcialmente os códigos implementados para o trabalho de Ritter (2016), também escritos em C++.

A primeira etapa do desenvolvimento foi a de separar o código desenvolvido por Ritter (2016) em duas partes: uma destinada aos comandos de acionamento, que naquele trabalho eram realizados em um simulador, e outra relacionada à modelagem cinemática do robô. Esta segunda parte foi encapsulada em uma biblioteca, analisada e testada no computador embarcado.

Em seguida, foram realizados testes de acionamento e leitura dos sensores dos motores, a biblioteca “PiGPIO” (Joan, 2017) para a utilização das entradas e saídas físicas do computador. Utilizando o conceito de orientação a objetos, foi criada uma classe que descreve os parâmetros de cada conjunto motor/sensor e as operações a serem realizadas sobre eles. Esta classe foi batizada de

“RPiInterface”, pois realiza o interfaceamento do processamento da Raspberry Pi com os sensores e atuadores físicos. Na mesma classe se implementou a função de atualização da lei de controle de velocidade de cada motor, com variáveis destinadas aos ganhos proporcional, integral e derivativo pré-allocadas.

Para os testes iniciais, foi usado apenas o ganho proporcional, e a lei de controle similar a da Equação (8) foi aplicada nos três motores, sendo executada a cada 10 ms. Este período de tempo arbitrário foi escolhido por ser o menor permitido por uma das funções da biblioteca PiGPIO, mas de fácil substituição. Apesar de simples, este controlador apresentou bons resultados durante os testes, e a única mudança realizada durante o desenvolvimento do trabalho foram alguns ajustes do ganho K_p .

Após esta configuração inicial do controlador, foram revisadas as conversões de velocidade. O encoder é dividido em 341,2 pulsos por rotação, e a unidade de tempo utilizada para a leitura é de μs . A biblioteca de cinemática utiliza as velocidades lineares das rodas, em m/s, e utilizando as dimensões do robô, das rodas e as características dos sensores, se encontrou o fator de conversão de uma relação para a outra. Assim, internamente ao programa se têm todas as velocidades na mesma unidade (com exceção da velocidade angular do chassi).

A decodificação dos *encoders* é feito por meio de “interrupções”, que, em contraste com sistemas que utilizam microcontroladores, não são executadas imediatamente. No caso, um pedido de interrupção é feito ao sistema operacional e assim que possível uma função pré-definida é executada (no caso, a função que atualiza o estado dos sensores). Este sistema não garante temporização com alta precisão, porém se mostrou satisfatório para a aplicação.

Conforme descrito na Seção 4, robôs holonômicos possuem uma limitação de velocidade. Durante a movimentação, caso seja exigida uma velocidade muito alta, pode ocorrer a saturação de algum dos motores. Caso a velocidade desejada continue aumentando, as rodas mais lentas continuarão acelerando enquanto a roda saturada se mantém na mesma velocidade. Este novo conjunto de velocidades para as rodas corresponde a uma trajetória não desejada. Tal efeito pode ser visualizado na Figura 14.

Procurando atenuar este problema, foi implementado um algoritmo similar ao descrito por Indiveri (2009): caso a cinemática resolva para alguma roda uma velocidade acima de um certo limite, esta roda tem sua velocidade fixada no valor máximo, enquanto as outras são diminuídas também, sem perder a proporcionalidade. Na Figura 15 é mostrado o efeito deste algoritmo na movimentação retílinea do robô (com o mesmo comando da situação anterior). Após experimentos, se fixou este valor limite em 0,45 m/s.

Após a verificação do sistema de controle de velocidade, foram implementadas da maneira descrita na s[Seção 4] a Equação (5) relacionada à odometria. Para evitar acúmulos de possíveis erros de medição, se evitou utilizar a velocidade computada. Os dados utilizados foram a própria contagem de pulsos de cada *encoder*, de forma que, avaliando a taxa de variação desta contagem e de uma contagem imediatamente anterior, se estimaram as velocidades no referencial de coordenadas

do robô.

A função de odometria, em tese, é invocada logo antes da lei de controle dos motores ser atualizada, também a cada 10 ms. No entanto, a função não apresentou bons resultados, e deixou de ser utilizada durante os últimos testes. Assim, o controle de posição proposto no diagrama da Figura 13 teve de ser abandonado, visto que seu desempenho é muito dependente da precisão do algoritmo de odometria.

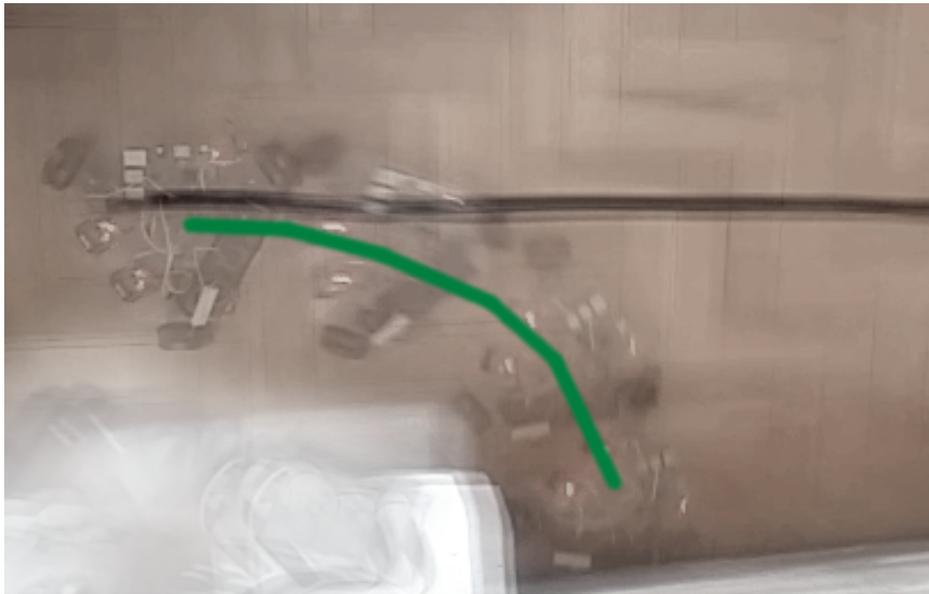


Figura 14: Um motor em saturação, enquanto o robô sofre alteração de trajetória. O caminho preto é a rota desejada.



Figura 15: Escalonamento de velocidade ativado.

6 Testes Experimentais

6.1 Trajetórias desejadas do sistema

Para validar o desenvolvimento exposto acima, se optou por utilizar um planejamento de trajetória em malha aberta. São sugeridos os modos de movimentação citados por Loh et al. (2003): translação retilínea (sem alteração na orientação), rotação pura e uma trajetória híbrida, de translação e rotação. Para cada trajetória foi criada uma função específica, responsável pela geração da trajetória e dos perfis de velocidade a serem seguidos.

No movimento de giro, ilustrado na Figura 16, se deseja avaliar a calibração da cinemática e da estimação da orientação, com todas rodas girando na mesma velocidade. Por todas as rodas serem acionadas igualmente, nessa situação se espera que não haja efeitos relacionados à zona morta do atuador utilizado.

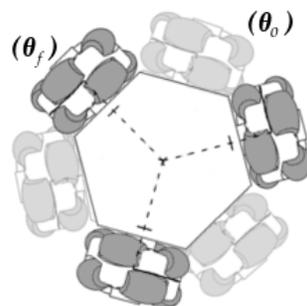


Figura 16: Trajetória de giro.

Na trajetória retilínea pura, se deseja validar a cinemática desenvolvida, e comprovar a eficiente compensação das não-linearidades dos atuadores e do algoritmo de limitação de velocidade. É a trajetória mostrada na Figura 17.

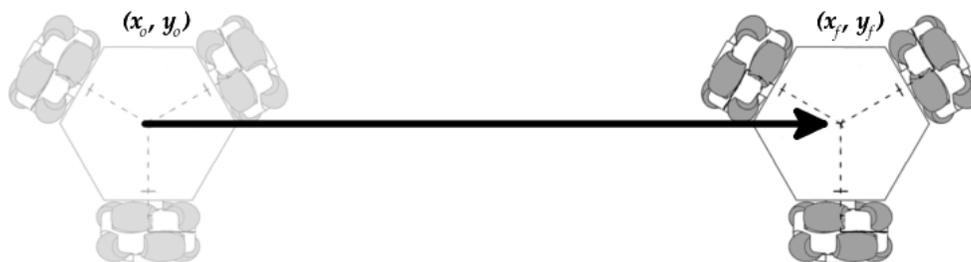


Figura 17: Trajetória retilínea pura.

Combinando ambas trajetórias, se deseja mover o robô da maneira mostrada na Figura 18. Para esta trajetória, é necessário recalcular as velocidades de acionamento a cada período de tempo, visto que o sistema referencial do robô é reorientado a cada instante pela rotação do chassi. No caso em que a odometria completa não está apresentando bons resultados, se pode acumular apenas a posição das rodas para a estimação da orientação atual do robô.

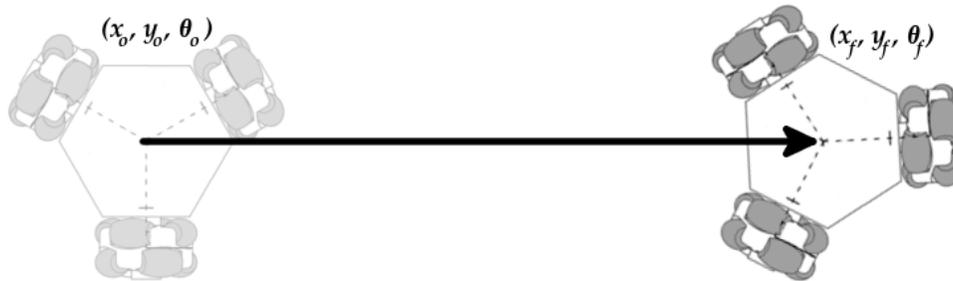


Figura 18: Trajetória combinada.

6.2 Resultados

A implantação do sistema descrito nas seções anteriores é, de certa maneira, hierárquica: para que um subsistema de alto-nível funcione, os que estão abaixo dele devem estar funcionando também. Tal conceito pode ser visto na Figura 13.

Os testes e validações ocorreram de maneira concomitante ao desenvolvimento do software e montagem da estrutura. Durante os testes de acionamento dos motores, se percebeu a presença de uma não linearidade do tipo “zona-morta”, tendo sido realizado um ensaio para quantificar seu efeito. Os resultados de tal ensaio podem ser vistos na Figura 19. Foi implementado um controlador proporcional para a velocidade, com ganho bastante baixo, de modo a tornar lenta a resposta do sistema. Foram então definidos *setpoints* que propositalmente levassem a saturação dos *drivers* dos atuadores. Na figura, se pode enxergar a zona morta em torno de $t = 1,5$ s, quando a velocidade da roda se eleva repentinamente. Entre $t = 4$ s e $t = 5$ s, é realizado o comando de inversão da velocidade da roda, e para um intervalo de valores de acionamento em torno do eixo horizontal, não há movimento no eixo. Esta não linearidade é oriunda do atrito estático introduzido pelos componentes mecânicos responsáveis pela relação de redução.

O ensaio foi realizado simultaneamente com as três rodas, e como todas as leituras apresentaram resultados similares, apenas uma está mostrada no gráfico.

Uma consequência deste efeito foi verificada no acionamento do robô em trajetórias que exigem baixas velocidades de alguma das rodas. Esta situação pode ser vista na Figura 20, na qual se pode ver como os motores que devem operar em velocidades menores entram em operação com atraso, causando desvios de trajetória.

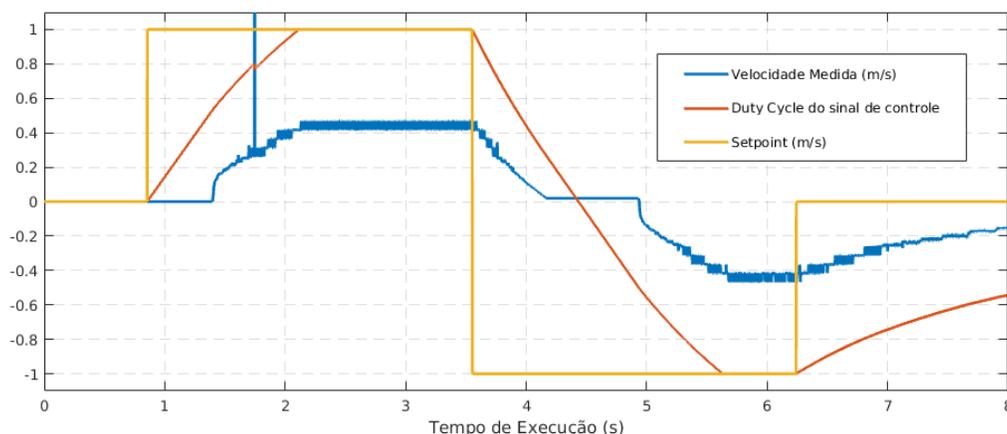


Figura 19: Análise da não-linearidade do tipo “zona-morta” presente nos motores utilizados.

Foi aplicada a técnica descrita anteriormente (Cunha, 2001). Pela análise dos dados mostrados na Figura 20, se pode perceber que a constante de compensação de zona morta é de aproximadamente 50% do *duty cycle* do PWM que aciona o *driver*. Este método se mostrou bastante eficaz, conforme mostra a resposta simultânea de todos os motores na Figura 21.

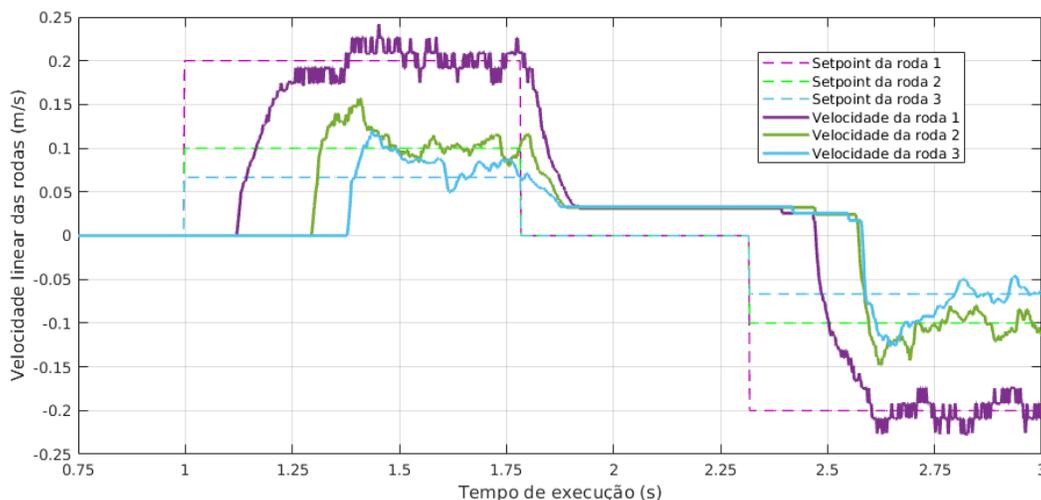


Figura 20: Efeito da zona morta no acionamento das 3 rodas com velocidades distintas.

Nota-se que no caso em que um motor deva operar com velocidades bastante baixas, como a roda 3 da figura, se introduz uma vibração em torno do *setpoint*. Este efeito acontece pois quando o sinal de controle está muito perto do coeficiente de compensação, podem ocorrer “pulos” até o coeficiente de compensação do sentido oposto. Apesar de existirem técnicas para suavizar este efeito, as vibrações nas trajetórias realizadas não afetaram significativamente o trajeto percorrido

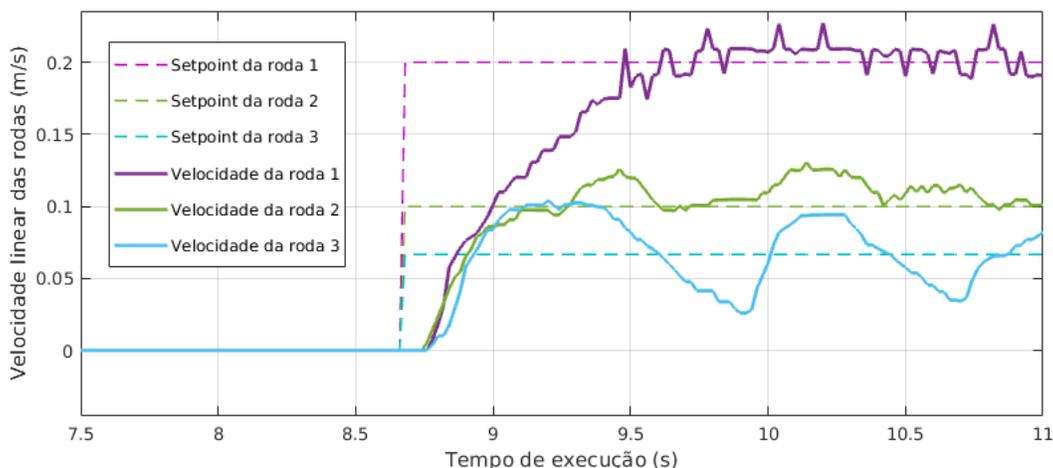


Figura 21: Não linearidade compensada – acionamento quase simultâneo de todas as rodas.

pelo robô.

Conforme mencionado anteriormente, o controlador de velocidade é do tipo proporcional (devido à necessidade de sua rápida implementação para continuar o desenvolvimento do restante do robô). Após alguns testes, se percebeu que $K_p > 20$ resulta em instabilidades (na forma de vibrações descontroladas no eixo do motor), e se optou por utilizar o ganho $K_p = 15$, que apresentou bom desempenho.

Outra verificação que foi feita durante a implementação foi a do fator de conversão da leitura da velocidade – de pulsos/ μ s para m/s. Este fator, pelos parâmetros do robô, é de 534,18, no entanto se admite que possa haver alguma variação neste valor. Portanto, foi realizado um experimento para verificar a equivalência das unidades que o robô utiliza com referências externas. O robô foi operado em 3 trajetórias retílineas: uma no eixo X, uma no eixo Y, e outra em X e Y, exatamente na diagonal do sistema de referência. O robô foi acionado com duas velocidades diferentes (0,15 m/s e 0,4 m/s) em cada trajetória, 5 vezes em cada velocidade, com um perfil de velocidade instantâneo, pelo tempo que resultaria na distância de 0,5 m se o robô estivesse adequadamente calibrado. O registro dos valores médios das distâncias medidas está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Distância percorrida em trajetória retilínea com perfil de velocidade instantâneo.

Velocidade:	Distância em X:	Distância em XY:	Distância em Y:
0,15 m/s	0,475 m	0,495 m	0,495 m
0,4 m/s	0,397 m	0,410 m	0,395 m

Da tabela, se nota claramente que, quanto maior a velocidade, maior o erro na posição atingida. Tal resultado também foi observado durante a operação do robô em outras ocasiões, mostrando a grande influência da dinâmica do próprio robô. Poderia se argumentar que um controlador com

tempo de ciclo menor pudesse responder de maneira mais ágil, porém o constatado no experimento está de acordo com Lynch e Park (2017): “Na maioria das aplicações robóticas modernas, altas taxas de atualização de controladores apresentam benefícios limitados, devido às constantes de tempo associadas com a dinâmica do robô e do ambiente.”

Também se percebeu que 0,15 m/s está perto do limite mínimo de velocidade desejado para uma operação confiável, devido aos efeitos introduzidos pela compensação de zona morta do atuador, recomendando-se assim a operação em torno de 0,25 m/s.

Ainda se analisando os resultados do experimento descrito acima, pode-se afirmar que as trajetórias realizadas pelo robô foram gravadas na superfície utilizando canetas hidrográficas nos furos do chassi destinados para tal. Na Figura 22 se pode visualizar as oscilações introduzidas pela compensação de zona morta para rodas que tenham que andar muito devagar, conforme mostrado também na Figura 21.

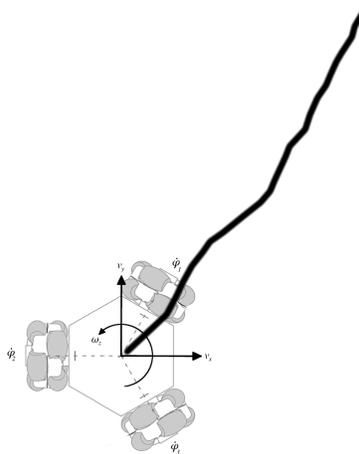


Figura 22: Trajetória real realizada pelo robô, em que a roda mais transversal ao caminho foi submetida a velocidades muito baixas (e não-nulas). A trajetória tem em torno de 0,5 m de comprimento.

Também é interessante observar a divergência das trajetórias em malha aberta. Na Figura 23 se pode ver o ponto de partida do robô nos ensaios de trajetória reta no eixo Y com velocidade de 0,4 m/s. Para uma trajetória de 0,4 m, aproximadamente, se mediu em torno de 10 cm de desvio da trajetória desejada. Em trabalhos futuros, será realizado um estudo estatístico visando a avaliar se existe um erro sistemático no desvio, que possa permitir algum tipo de compensação.

Após a implementação dos algoritmos de odometria, foram realizados testes do sistema, sendo que o equacionamento proposto por Lynch e Park (2017) não apresentou resultados adequados. A causa disso ainda está sendo analisada. Foram também testadas as equações para o caso em que não se considera a velocidade angular. Sobre uma trajetória retilínea de aproximadamente 1,5 m no eixo X, se obtiveram valores razoáveis para a distância percorrida neste eixo: entre 1,2 m e 1,8 m. A

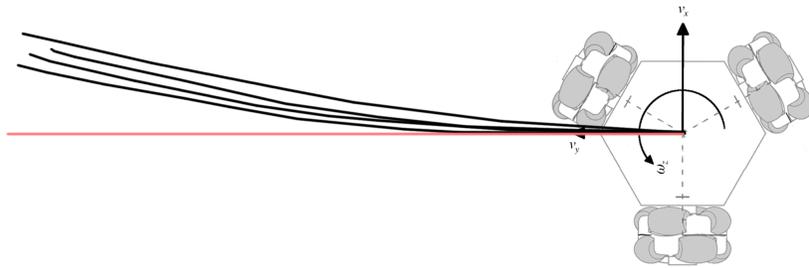


Figura 23: Trajetórias em malha aberta, divergindo do ponto de origem. A trajetória desejada é a que está representada em vermelho.

variação entre os valores é grande, porém as amostras se mostraram consistentes entre si, mantendo sempre a mesma ordem de grandeza.

No eixo Y, perpendicular ao movimento, no entanto, foram contabilizadas distâncias variadas, na mesma ordem de grandeza que as do eixo X e para ambos os lados, com variação muito maior (de até 2 m, por exemplo). Tal resultado inviabilizou a utilização de algoritmos de controle de posição. Tal constatação é corroborada na mesma situação por Siegwart et al. (2011): “Note que a incerteza em Y cresce muito mais rápido do que na direção do movimento. Isso resulta da integração da incerteza a respeito da orientação do robô.”

O algoritmo de odometria completo foi abandonado, pois o uso de variáveis globais na biblioteca de cinemática faz com que a função de atualização da odometria altere os parâmetros utilizados para acionamento. Foi, no entanto, aproveitada a parte do algoritmo que identifica a orientação do robô, já que o ângulo θ pode ser obtido diretamente das variáveis que acumulam todos os pulsos dos *encoders* desde o início da execução do programa. Esta estimativa se mostrou relativamente precisa para trajetórias circulares ou com alguns segmentos pequenos de reta. Não foi avaliada a estimativa do ângulo de orientação em trajetos mais complexos pois não se tem implementada nenhuma função de acionamento deste tipo.

7 Conclusão e Trabalhos Futuros

Diante dos resultados obtidos é possível concluir que o protótipo desenvolvido mostrou estar apto para o desenvolvimento do tipo de trabalho proposto. Como o desenvolvimento teórico e implementação de *softwares* são relativamente flexíveis e não envolvem nenhum custo de material, a utilização de uma plataforma pronta em trabalhos futuros é bastante desejável.

A modelagem cinemática desenvolvida para o robô se mostrou adequada, sendo possível converter os valores de velocidade desejados em termos de coordenadas globais em velocidades das rodas de maneira bastante adequada.

Os motores utilizados apresentam uma faixa relativamente restrita de velocidades, sendo que os efeitos de atrito da caixa de redução afeta os limites mais baixos e a própria relação de redução aliada à tensão nominal do robô limita a velocidade máxima. Os limites mínimos podem ser melhorados por meio de técnicas de controle melhores do que a utilizada. Para aplicações reais, se estima que a velocidade máxima esteja adequada na maioria das situações domésticas e industriais. Uma exceção importante seria, por exemplo, o uso do protótipo para futebol de robôs, onde a agilidade é valorizada. Neste caso, também seria necessário um método para decodificação mais rápida dos *encoders*, aumento da taxa de amostragem do controlador e um possível estudo sobre a derrapagem das rodas.

O controle de velocidade das rodas apresenta limitações, devido à sua implementação simples. No entanto, para a maioria das aplicações e situações experimentadas, apresentou resultados satisfatórios. As rodas apresentaram deslizamento em relação ao chão apenas em situações extremas (reversão instantânea sobre chão empoeirado).

A instrumentação, para fins de controle de velocidade na faixa de velocidades utilizada, se mostrou suficiente. Para realização das integrações necessárias à odometria, no entanto, se deve investigar melhor os resultados obtidos.

Foram realizados seguimentos de trajetória simples, em malha aberta, sem contar com dados da odometria, apresentando alguns desvios significativos. Em trajetos curtos (menores do que 1 m), tais desvios poderiam ser desprezados em aplicações que não necessitem precisão. No entanto, como os desvios se propagam conforme a trajetória aumenta, se mostrou que um sistema de controle de posição é essencial para utilização prolongada.

De um modo geral, se percebeu a forte interdependência entre todas as partes que compoem um sistema robótico. Se compreendeu que para o desenvolvimento de um projeto em robótica, é necessário que o engenheiro tenha um conhecimento profundo de todas as partes, isoladamente, e que saiba prever a influência de um componente na integração do todo. No caso de um trabalho em equipe, onde cada membro seja responsável por (e especialista em) um tipo específico de subsistema, ainda assim é necessário entender a influência da sua área nas demais, reforçando o caráter interdisciplinar da área e a importância de uma boa comunicação entre as partes.

Dentre os tipos de subsistema a serem projetados, se destaca a importância de uma boa seleção de hardware, visto que esta parte é bem menos flexível do que o desenvolvimento dos algoritmos de acionamento, por exemplo. No caso em que se deseja alguma modificação de software, basta reprogramar o sistema. Mesmo que tal ato envolva mão-de-obra especializada e tempo de trabalho, não envolve os custos de material, prazos de entrega, disponibilidade comercial e demais requisitos de um sistema físico.

Se considera duas abordagens possíveis para trabalhos futuros relacionados ao tema. Se pode finalizar a implementação de um sistema completo, conforme o diagrama da Figura 13, ou realizar esforços no sentido de aprimorar um subsistema específico. As duas abordagens são complementares.

Em se adotando uma abordagem mais geral, trabalhos futuros podem ser tocados no desenvolvimento um algoritmo de odometria mais preciso e um controle de posição capaz de seguir trajetórias em malha fechada. O trabalho de desenvolvimento de uma interface com o usuário também é importante e poderia ser focado.

Para melhorias específicas, futuros trabalhos podem ser sobre estudos relacionados aos seguintes tópicos:

- desenvolver uma modelagem dinâmica para o robô, considerando as massas e distribuição geométrica dos componentes utilizados;
- aprimorar o controle de velocidade para operação em velocidades baixas;
- terminar a implementação dos sensores inerciais e da bússola, aplicando algum algoritmo de fusão de sensores a esses dados e a odometria;
- implementação de uma biblioteca com diversas trajetórias pré computadas;
- realizar estudos sobre o desempenho real do computador utilizado, e otimizar a operação do código para ciclos de execução mais rápidos. Alternativas incluem a utilização de *kernel* de tempo real, *multithreading* e utilização da GPU do computador;
- quantificar o consumo de energia do robô, e implementar estratégias de operação mais eficientes;
- organizar e documentar o código-fonte seguindo boas práticas de programação, para agilizar o desenvolvimento de futuros trabalhos utilizando os mesmos recursos;
- desenvolver aplicações práticas para o robô.

8 Referências

- Banggood.com, 2017. Specifications for 6v 210rpm dc motor with encoder and geared reduction. <https://www.banggood.com/6V-210RPM-Encoder-Motor-DC-Gear-Motor-with-Mounting-Bracket-and-Wheel-p-1044064.html>, acessado em 03/10/2017.
- Campion, G., Bastin, G., Dandrea-Novel, B., 1996. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE transactions on robotics and automation* 12 (1), 47–62.
- Carrasco, M. M., da Silva, A. L., 2016. Attitude determination for low cost imu and processor board using the methods of triad, kalman filter and allan variance. *Revista Brasileira de Iniciação Científica* 3 (2), 26–41.
- Craig, J., 2017. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson.
URL <https://books.google.com.br/books?id=JblZuwAACAAJ>
- Cunha, M. A. B., 2001. *Controle em cascata de um atuador hidráulico: contribuições teóricas e experimentais*. Tese de doutorado em Controle, Automação e Informática Industrial.
- Dorf, R., Bishop, R., 2008. *Modern Control Systems*. Pearson Prentice Hall.
URL <https://books.google.com.br/books?id=V-FpzJP5bEIC>
- Feng, D., Friedman, M. B., Krogh, B. H., 1989. The servo-control system for an omnidirectional mobile robot. In: *Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 1566–1571.
- Garcia-Saura, C., 2015. Self-calibration of a differential wheeled robot using only a gyroscope and a distance sensor. arXiv preprint arXiv:1509.02154.
- Ginzburg, S., Nokleby, S., 2013. Indoor localization of an omni-directional wheeled mobile robot. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. Canada 37, 1043–1056.
- Honeywell, 2013. Hmc5883l 3-axis digital compass ic. Acessado em 17/11/2017.
URL https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf
- Indiveri, G., 2009. Swedish wheeled omnidirectional mobile robots: Kinematics analysis and control (1), 164–171.
- Invensense, 2013. Mpu6050. Acessado em 18/11/2017.
URL https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf
- Jimenez, A. R., Seco, F., Prieto, C., Guevara, J., 2009. A comparison of pedestrian dead-reckoning

- algorithms using a low-cost mems imu. In: Intelligent Signal Processing, 2009. WISP 2009. IEEE International Symposium on. IEEE, pp. 37–42.
- Joan, 2017. Reference for pigpio c interface. Acessado em 27/11/2017.
URL <http://abyz.me.uk/rpi/pigpio/cif.html>
- Jung, M.-J., Kim, J.-H., 2001. Fault tolerant control strategy for omnikity-iii. In: Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on. Vol. 4. IEEE, pp. 3370–3375.
- Kim, H., Kim, B. K., 2014. Online minimum-energy trajectory planning and control on a straight-line path for three-wheeled omnidirectional mobile robots. IEEE Transactions on industrial electronics 61 (9), 4771–4779.
- Krinkin, K., Stotskaya, E., Stotskiy, Y., 2015. Design and implementation raspberry pi-based omni-wheel mobile robot. In: Artificial Intelligence and Natural Language and Information Extraction, Social Media and Web Search FRUCT Conference (AINL-ISMW FRUCT), 2015. IEEE, pp. 39–45.
- Loh, W., Low, K. H., Leow, Y., 2003. Mechatronics design and kinematic modelling of a singularityless omni-directional wheeled mobile robot. In: Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on. Vol. 3. IEEE, pp. 3237–3242.
- Lynch, K., Park, F., 2017. Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control. Cambridge University Press.
URL <https://books.google.com.br/books?id=86G0nQAACAAJ>
- Markets, Markets, 2015. Mobile robots market by environment (aerial, ground, and marine), component (hardware and software), application (professional service and personal service), and geography (north america, europe, asia-pacific, and the row) - global forecast to 2020. <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/mobile-robots-market-43703276.html>, acessado em 27/09/2017.
- MPS, 2008. Synchronous rectified step-down converter. Acessado em 30/11/2017.
URL <https://cdn.solarbotics.com/products/datasheets/mp2307.pdf>
- Nexus, 2016. 58mm plastic omniwheel. Acessado em 8/10/2017.
URL <http://www.nexusrobot.com/product/58mm-plastic-omni-wheel-for-lego-nxt-and-servo-motor-14135.html>
- Oubbati, M., Schanz, M., Buchheim, T., Levi, P., 2005. Velocity control of an omnidirectional robocup player with recurrent neural networks. In: RoboCup. Springer, pp. 691–701.
- Park, K., Chung, D., Chung, H., Lee, J. G., 1996. Dead reckoning navigation of a mobile robot using an indirect kalman filter. In: Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 1996. IEEE/SICE/RSJ International Conference on. IEEE, pp. 132–138.

- Pin, F. G., Killough, S. M., 1994. A new family of omnidirectional and holonomic wheeled platforms for mobile robots. *IEEE transactions on robotics and automation* 10 (4), 480–489.
- Ritter, G. A., 2016. Modelo genérico de plataforma robótica omnidirecional em código aberto. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Computação.
- Röhrig, C., Heß, D., Kirsch, C., Künemund, F., 2010. Localization of an omnidirectional transport robot using iee 802.15. 4a ranging and laser range finder. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2010 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, pp. 3798–3803.
- Rojas, R., Förster, A. G., 2006. Holonomic control of a robot with an omnidirectional drive. *KI-Künstliche Intelligenz* 20 (2), 12–17.
- Samani, H. A., Abdollahi, A., Ostadi, H., DaneshPanah, M., 2007. Comprehensive omni-directional soccer player robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*.
- Semiconductors, P., 2000. The i2c-bus specification. Philips Semiconductors 9397 (750), 00954.
- Siciliano, B., Khatib, O., 2016. Springer handbook of robotics. Springer.
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I., Scaramuzza, D., 2011. *Introduction to Autonomous Mobile Robots. Intelligent robotics and autonomous agents*. MIT Press.
URL <https://books.google.com.br/books?id=4of6AQAAQBAJ>
- Steinhoff, U., Schiele, B., 2010. Dead reckoning from the pocket-an experimental study. In: *Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, 2010 IEEE International Conference on. IEEE, pp. 162–170.
- STMicroelectronics, 2000. Dual full-bridge driver. Acessado em 30/11/2017.
URL <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/82/cc/3f/39/0a/29/4d/f0/CD00000240.pdf/files/CD00000240.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000240.pdf>
- Takemura, Y., Sanada, A., Ichinose, T., Nakano, Y., Nassiraei, A. A., Azeura, K., Kitazumi, Y., Ogawa, Y., Godler, I., Ishii, K., et al., 2007. Development of “hibikino-musashi” omni-directional mobile robot. In: *International Congress Series*. Vol. 1301. Elsevier, pp. 201–205.
- Treesatayapun, C., 2011. A discrete-time stable controller for an omni-directional mobile robot based on an approximated model. *Control Engineering Practice* 19 (2), 194–203.
- Upton, E., Halfacree, G., 2014. *Raspberry Pi user guide*. John Wiley & Sons.
- Williams, R. L., Carter, B. E., Gallina, P., Rosati, G., 2002. Dynamic model with slip for wheeled omnidirectional robots. *IEEE transactions on Robotics and Automation* 18 (3), 285–293.

Apêndice A: Custo dos componentes utilizados

Há no mercado uma variada gama de componentes a serem utilizados em projetos robóticos. Para o projeto em questão, se utilizaram componentes que mostrassem um preço de mercado competitivo e grande disponibilidade. Dessa forma, se pode manter o projeto viável, mesmo que por vezes sacrificando um possível incremento de desempenho que se daria ao utilizar um componente mais robusto, por exemplo.

Na Tabela 2 se pode ver a lista de componentes adquirida e os respectivos custos. Nota-se que no caso das 3 rodas há – integrado ao valor apresentado – as taxas de importação e conversão de moedas, visto que esses componentes foram importados dos Estados Unidos. Também é importante mencionar que o chassi foi produzido sem custo utilizando a estrutura da universidade.

Tabela 2: Custo dos componentes utilizados no projeto.

Item:	Valor por unidade:	Quantidade:	Valor total:
Omniwheel	R\$ 46,76	3	R\$ 140,29
Motor c/ encoder	R\$ 119,00	3	R\$ 357,00
Driver	R\$ 15,00	2	R\$ 30,00
Raspberry Pi	R\$ 148,00	1	R\$ 148,00
microSD 16GB	R\$ 34,00	1	R\$ 34,00
IMU MPU6050	R\$ 9,00	1	R\$ 9,00
Magnetômetro HMC5883	R\$ 12,80	1	R\$ 12,80
Placa de Acrílico	R\$ 25,00	1	R\$ 25,00
Bateria	R\$ 120,00	1	R\$ 120,00
Reguladores de Tensão	R\$ 4,98	3	R\$ 14,97
Parafusos	R\$ 14,00	X	R\$ 14,00
Diversos	R\$ 30,00	X	R\$ 30,00
Custo Total:			R\$ 935,06

