

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

LUIS GUILHERME MACHADO CAMARGO
PEDRO ALBERTO DE BORBA
RICARDO FARAH
STEFAN CAMPANA FUCHS
TELMO FRIESEN

MAPEAMENTO DE AMBIENTES COM O ROBÔ BELLATOR

QUARTO ENTREGÁVEL

CURITIBA

2013

**LUIS GUILHERME MACHADO CAMARGO
PEDRO ALBERTO DE BORBA
RICARDO FARAH
STEFAN CAMPANA FUCHS
TELMO FRIESEN**

MAPEAMENTO DE AMBIENTES COM O ROBÔ BELLATOR

Quarto entregável apresentado à Unidade Curricular de Oficina de Integração 3 do Curso de Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para aprovação.

CURITIBA

2013

SUMÁRIO

1 QUARTO ENTREGÁVEL - 24/04/2013	3
2 MODELAGEM UML	5
2.1 REQUISITOS FUNCIONAIS	5
2.2 REQUISITOS NÃO FUNCIONAIS	5
2.3 CASOS DE USO IDENTIFICADOS	6
2.4 DIAGRAMA DE CLASSES DA ESTAÇÃO BASE	8
2.4.1 Descrição das classes da estação base	9
2.4.2 Pacote <i>visual</i>	9
2.4.3 Pacote <i>dados</i>	10
2.4.4 Pacote <i>comunicacao</i>	10
2.4.5 Pacote <i>gui</i>	11
2.5 DIAGRAMA DE CLASSES DO SISTEMA EMBARCADO	12
2.6 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO	14
2.6.1 Codificação das mensagens	15
2.6.2 Diagramas de estados	19
2.6.3 Diagramas de sequência	28
3 DIAGRAMAS DO HARDWARE	32
3.1 DIAGRAMA DE BLOCOS	32
3.2 DIAGRAMA ELÉTRICO/ELETRÔNICO	33
3.3 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	35
3.3.1 Guia de montagem do hardware	37
4 GERAÇÃO DO MAPA	39
4.1 ENCODERS	40
4.1.1 Deslocamento de cada roda	41
4.1.2 Deslocamento do centro de movimento do robô	42
4.1.2.1 Raio do movimento circular uniforme	43
4.1.2.2 Deslocamento linear	44
4.1.2.3 Deslocamento angular	45
4.1.2.4 Casos especiais	45
4.1.2.5 Considerações sobre a notação utilizada	46
4.1.2.6 Velocidade e aceleraçao	47
4.2 ACELERÔMETRO E GIROSCÓPIO	47
4.3 ALGORITMO DE POSICIONAMENTO	49
4.4 SENsoRES INFRA-VERMELHOS	50
5 TESTES	53
5.1 PRIMEIRO TESTE	53
5.2 SEGUNDO TESTE	57
5.3 TERCEIRO TESTE	62
5.4 QUARTO TESTE	67
6 MEDIDAS DO ROBÔ	71
REFERÊNCIAS	72

1 QUARTO ENTREGÁVEL - 24/04/2013

Conforme estabelecido na relação de *deliverables* do documento de análise tecnológica, este quarto entregável consiste nos seguintes itens:

1. Projeto da PCB (Printed Circuit Board).
2. Mapa de conexão da PCB com a alimentação e outros elementos (hardware).
3. Lista de componentes para confecção da PCB completa (hardware) – **Em anexo**.
4. Diagramas de estados (sistema de comunicação).
5. Descrição das mensagens e codificações dos comandos (sistema de comunicação).
6. Descrição do uso do Software (Manual do Usuário) – **Em anexo**.

Além dos itens obrigatórios dos entregáveis, estão presentes neste documento os seguintes adicionais:

1. Diagramas de casos de uso e de classes (estação base).
2. Diagrama de casos de uso (software embarcado).
3. Diagrama de fluxo de dados (software embarcado).
4. Diagrama em blocos (hardware).
5. Explicação detalhada de cada bloco (hardware).
6. Diagrama elétrico/eletrônico (hardware).
7. Requisitos funcionais.
8. Descrição das classes da estação base.
9. Diagrama de classes do sistema embarcado.
10. Descrição das classes do sistema embarcado.

11. Diagramas de estados.
12. Diagramas de sequência.
13. Diagrama em blocos do hardware.
14. Diagrama elétrico/eletrônico do hardware.
15. Cálculos teóricos de posicionamento do robô e geração do mapa.

2 MODELAGEM UML

2.1 REQUISITOS FUNCIONAIS

1. A estação base deve mostrar na interface gráfica um mapa 2D (atualizado automaticamente) representando o robô e os obstáculos detectados por ele. Representado pelo requisito funcional: “**Estação base mostra mapa 2D do robô e dos obstáculos detectados – RF1**”.
2. O usuário pode salvar o mapa 2D no disco rígido. Representado pelo requisito funcional: “**O usuário pode salvar o mapa – RF2**”.
3. O usuário pode carregar o mapa 2D do disco rígido. Representado pelo requisito funcional: “**O usuário pode carregar o mapa – RF3**”.
4. A estação base deve mostrar na interface gráfica a imagem captada pela *webcam* do robô. Representado pelo requisito funcional: “**Estação base mostra a imagem captada pela webcam – RF4**”.
5. O usuário pode movimentar o robô, controlando a velocidade de suas rodas remotamente pelo teclado da estação base. Representado pelo requisito funcional: “**O usuário pode movimentar o robô – RF5**”.
6. A estação base deve ser capaz de estabelecer conexão com o robô, informando o usuário caso a conexão ocorra com sucesso ou não. Representado pelo requisito funcional “**O usuário pode estabelecer a conexão entre o robô e a estação base – RF6**”.

2.2 REQUISITOS NÃO FUNCIONAIS

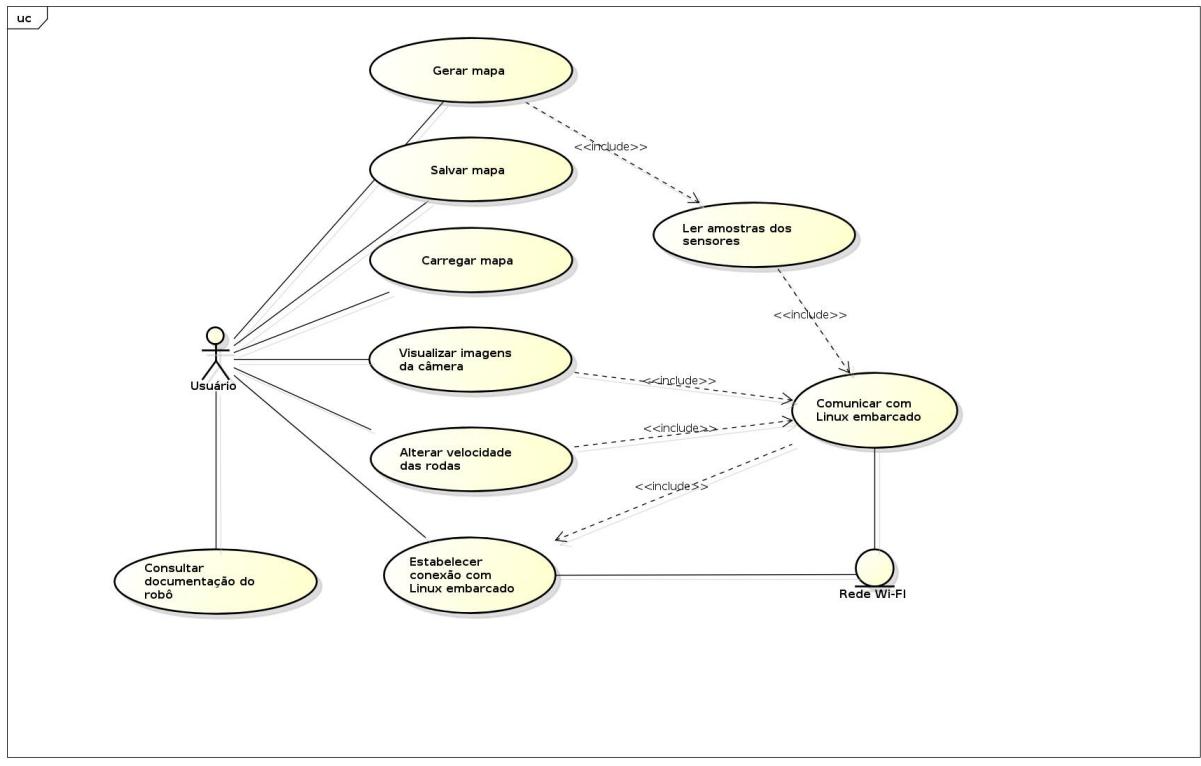
1. A imagem transmitida pela câmera do robô deve ser colorida. Representado pelo requisito não funcional: “**O robô deve enviar vídeo em imagem colorida para a estação base - RNF1**”.
2. O robô deve transmitir as imagens de sua câmera em tempo real. Representado pelo requisito não funcional: “**O robô deve transmitir os dados de vídeo captados pela**

câmera em tempo real - RNF2”.

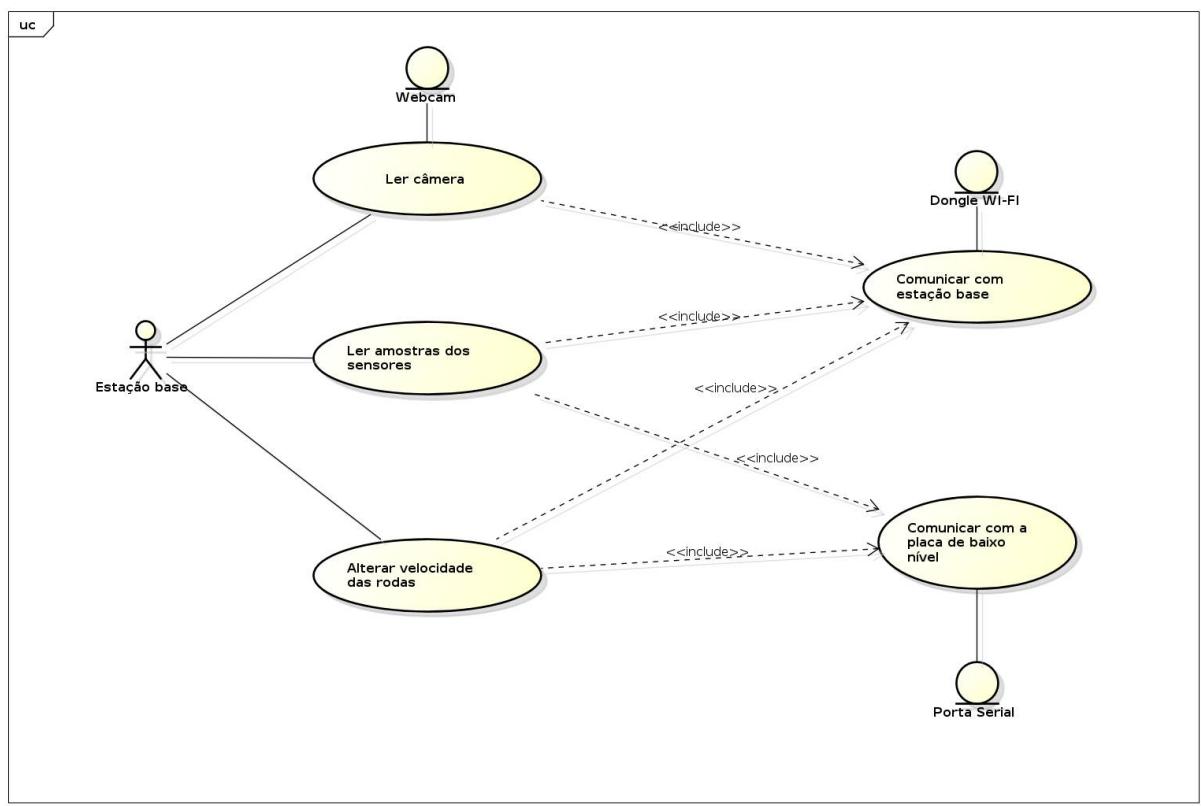
2.3 CASOS DE USO IDENTIFICADOS

1. Visualização de mapa 2D na interface gráfica segundo os dados lidos dos sensores do robô. Representado pelo caso de uso: “**Mostrar mapa - UC1**”.
2. Gravação do mapa em um arquivo no disco rígido. Representado pelo caso de uso: “**Salvar mapa - UC2**”.
3. Leitura do mapa de um arquivo do disco rígido. Representado pelo caso de uso: “**Carregar mapa - UC3**”.
4. Leitura de informações dos sensores do robô. Representado pelo caso de uso: “**Ler amostras dos sensores - UC4**”.
5. Visualização de imagens da *webcam* do robô. Representado pelo caso de uso: “**Visualizar imagens da câmera - UC5**”.
6. Alteração pelo usuário da velocidade das rodas do robô. Representado pelo caso de uso: “**Alterar velocidade das rodas - UC6**”.
7. Solicitação de estabelecimento de conexão com o robô. “**Estabelecer conexão - UC7**”.
8. Consulta à documentação do robô pelo usuário. Representado pelo caso de uso: “**Consultar documentação do robô - UC8**”.

Foram produzidos três Diagramas de Casos de Uso (Figuras 1, 2 e 3) com base nos casos de uso apresentados. O primeiro diagrama representa o *software* da estação base, e o segundo e o terceiro representam o sistema embarcado (TS-7260 e placa de baixo nível, respectivamente).



powered by Astah

Figura 1: Diagrama de casos de uso do *software* da estação base.

powered by Astah

Figura 2: Diagrama de casos de uso do *software* para a placa TS-7260.

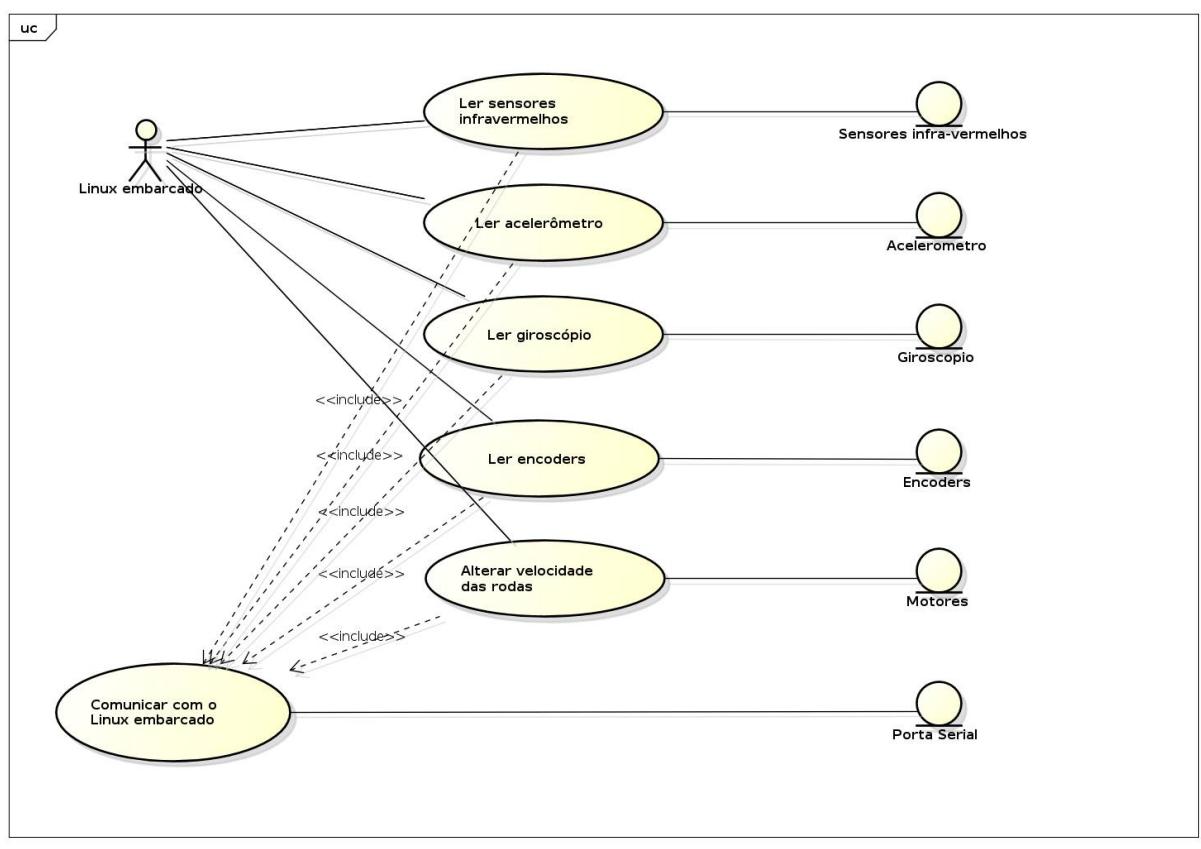


Figura 3: Diagrama de casos de uso do *software* para a placa de baixo nível.

2.4 DIAGRAMA DE CLASSES DA ESTAÇÃO BASE

A Figura 4 mostra o diagrama de classes da estação base.

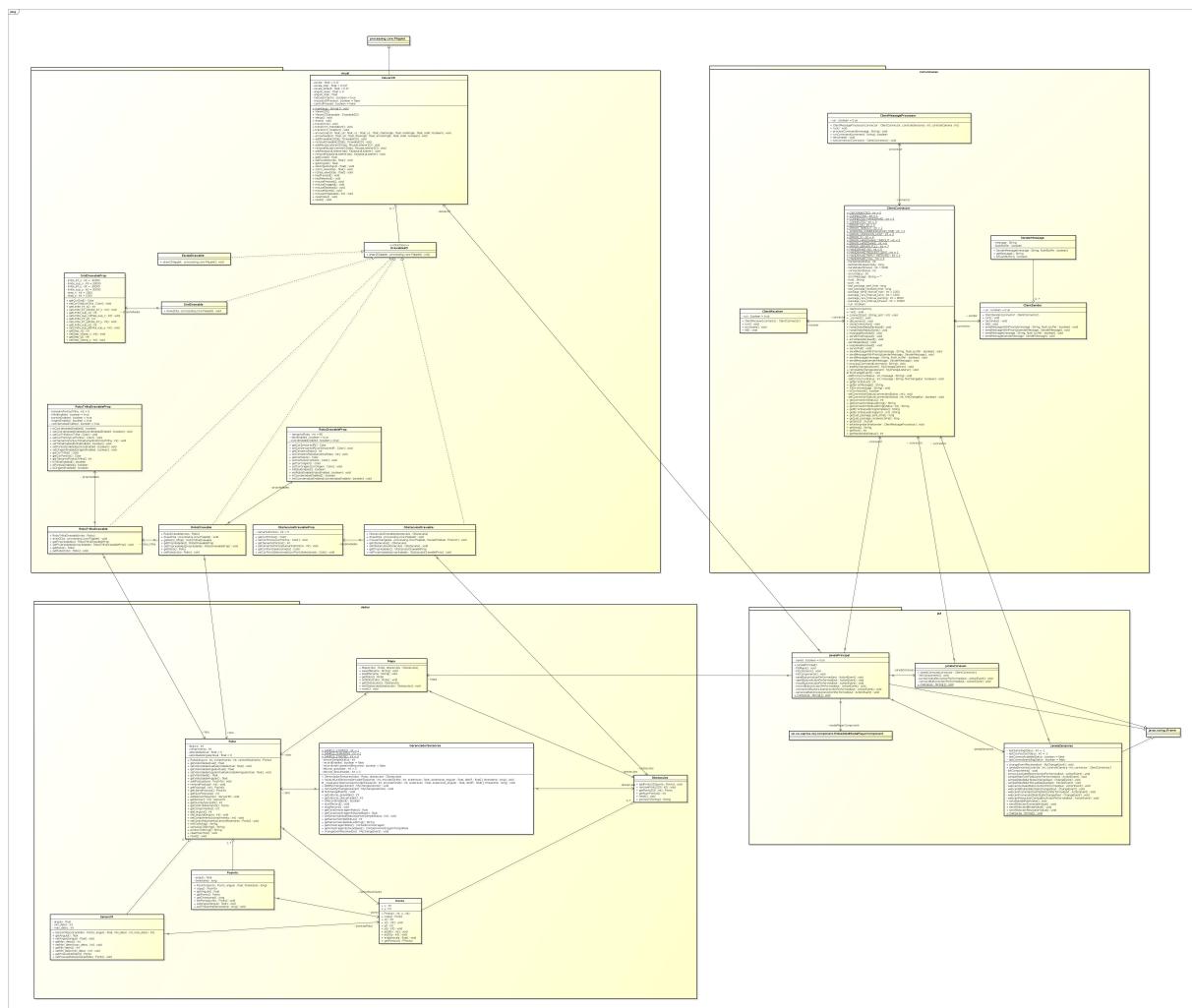


Figura 4: Diagrama de classes da estação base

2.4.1 Descrição das classes da estação base

O software da estação base do robô foi dividido em cinco pacotes: *visual*, *dados*, *comunicao*, e *gui*. A seguir há uma descrição de cada pacote e das suas respectivas classes.

2.4.2 Pacote *visual*

Este pacote consiste de toda a parte visual da estação base e conta com as seguintes classes: Viewer2D, Drawable2D, EscalaDrawable, RoboDrawable, RoboTrilhaDrawable, ObstaculosDrawable, EscalaDrawableProp, RoboDrawableProp, RoboTrilhaDrawableProp e ObstaculosDrawableProp. Na Tabela 1 estão descritas as classes deste pacote.

Tabela 1: Pacote *visual*

Classe	Descrição
Viewer2D	Responsável por exibir os objetos Drawable2D. Possui recursos de pan, zoom e rotate.
Drawable2D	Representa genericamente objetos 2D que podem ser desenhados em um Viewer2D.
EscalaDrawable	Responsável por desenhar uma escala gráfica no mapa.
RoboDrawable	Responsável por desenhar o robô no mapa.
RoboTrilhaDrawable	Responsável por desenhar a trilha percorrida pelo robô no mapa.
ObstaculosDrawable	Responsável por desenhar os pontos de cada obstáculo no mapa.
EscalaDrawableProp	Contém as propriedades visuais de desenho da escala.
RoboDrawableProp	Contém as propriedades visuais de desenho do robô
RoboTrilhaDrawableProp	Contém as propriedades visuais de desenho da trilha do robô.
ObstaculosDrawableProp	Contém as propriedades visuais de desenho dos obstáculos.

2.4.3 Pacote *dados*

Este pacote consiste de toda a parte da estação base que processa e armazena as informações essenciais do robô e do mapa. Conta com as seguintes classes: Mapa, Obstaculos, Robo, ControleSensores, Posinfo, SensorIR e Ponto. Na Tabela 2 estão descritas as classes deste pacote.

2.4.4 Pacote *comunicacao*

Este pacote consiste em toda a parte de comunicação da estação base com o robô e conta com as seguintes classes: ClientMessageProcessor ClientConnection, ClientReceiver, ClientSender e Message. Na Tabela 3 estão descritas as classes deste pacote.

É importante ressaltar que o protocolo TCP requer obrigatoriamente a especificação de um cliente e de um servidor para estabelecimento de uma conexão. Nas implementações desse protocolo em diversas linguagens (como Java e C++) existem tipos de *socket* distintos para cliente e servidor. Na criação de um *socket* de servidor, há obrigatoriamente a atribuição

Tabela 2: Pacote *dados*

Classe	Descrição
Mapa	Responsável por representar o mapa. Armazena as informações essenciais do robô e dos obstáculos detectados.
Obstaculos	Responsável por conter os obstáculos detectados pelo robô.
Robo	Responsável por representar o robô, este contém largura, comprimento e centro de movimento (ponto central entre as duas rodas).
GerenciadorSensores	Responsável por atualizar a posição do robô e dos pontos que representam os obstáculos, de acordo com as leituras feitas pelos sensores.
Posinfo	Responsável por conter as informações de uma posição do robô.
SensorIR	Responsável por representar um sensor IR do robô.
Ponto	Representa um ponto de coordenadas cartesianas (x,y).
GerenciadorCamera	Responsável por gerenciar o status da câmera e o recebimento de imagens.

de uma porta de escuta, na qual o servidor aguarda que um cliente efetue uma requisição de conexão. Não é possível, ao menos nas implementações atuais do TCP, estabelecer conexão entre dois *sockets* de cliente ou entre dois *sockets* de servidor. Como neste projeto, o robô proverá serviços à estação base (envio de imagens da câmera, envio de leituras de sensores, além de prover a possibilidade de comando dos motores) o robô foi escolhido como servidor e a estação base como cliente. Enfatiza-se que o paradigma cliente-servidor não implica de forma alguma que a comunicação seja unidirecional. Pelo contrário, o envio de pacotes pode ser feito bidirecionalmente após uma conexão TCP ser estabelecida, sem nenhuma restrição quanto a isso.

2.4.5 Pacote *gui*

Este pacote consiste em toda a interface gráfica do sistema e conta com as seguintes classes: JanelaConexao, JanelaPrincipal e JanelaSensores. Na Tabela 4 estão descritas as classes deste pacote.

Tabela 3: Pacote *comunicacao*

Classe	Descrição
ClientMessageProcessor	Thread responsável pelo processamento de mensagens recebidas de um host de conexão.
ClientConnector	Thread responsável por efetuar a gerência da conexão do cliente (estaçao base) com o servidor (robô).
ClientReceiver	Thread responsável por receber mensagens de um host de uma conexão.
ClientSender	Thread responsável por enviar mensagens ao host de uma conexão.
SendMessage	Contém uma mensagem que pode ser enviada por um Sender.

Tabela 4: Pacote *gui*

Classe	Descrição
JanelaConexao	Janela com as informações e configurações da conexão com o Bellator.
JanelaPrincipal	Janela principal da interface gráfica da estação base.
JanelaSensores	Janela de configuração dos sensores.

2.5 DIAGRAMA DE CLASSES DO SISTEMA EMBARCADO

A Figura 5 mostra o diagrama de classes do sistema embarcado (placa TS-7260).

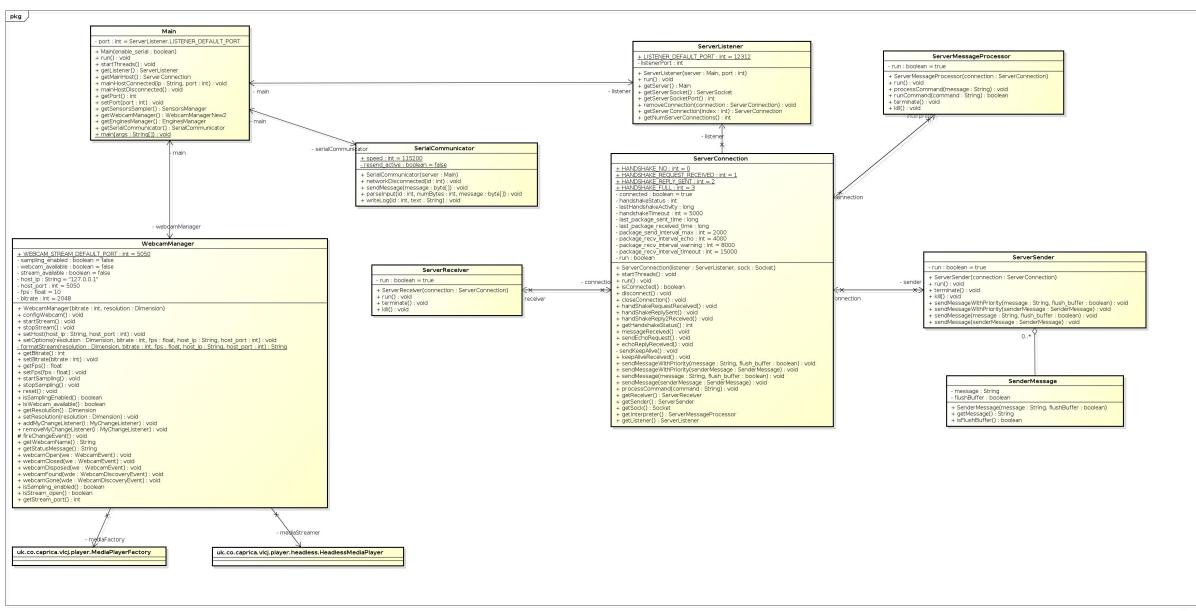


Figura 5: Diagrama de classes do sistema embarcado (placa TS-7260).

Tabela 5: Descrição das classes do sistema embarcado (placa TS-7260)

Classe	Descrição
Main	Classe principal do robô.
SensorsSampler	Thread responsável por requisitar amostras dos sensores da placa de baixo nível em intervalos de tempo previamente programados.
ServerMessageProcessor	Thread responsável por realizar o processamento de mensagens recebidas de um host de conexão.
ServerListener	Thread responsável por escutar requisições de conexão.
ServerSender	Thread responsável por enviar mensagens ao host de uma conexão.
SenderMessage	Contém uma mensagem que pode ser enviada por um Sender.
ServerReceiver	Thread responsável por receber mensagens de um host de uma conexão.
SerialCommunicator	Responsável por gerenciar a comunicação via porta serial entre a TS-7260 e a LPC2103.
WebcamManager	Responsável por gerenciar a abertura e o fechamento da stream de imagens da webcam, além de configurar opções como resolução e taxa de frames.

2.6 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO

Esta seção detalha o protocolo de comunicação estabelecido entre a estação base, a placa TS-7260 (sistema com linux embarcado) e a placa LPC2103 (sistema embarcado de baixo nível).

O protocolo desenvolvido para a comunicação (via Wi-Fi) entre a estação base e a TS-7260 visa utilizar o TCP como camada de transporte. Como foi explicitado anteriormente na seção 2.4.4, o robô foi escolhido como servidor da conexão, e a estação base como cliente. Para haver confirmação da conexão entre os dois, optou-se por criar um protocolo de *handshake* semelhante ao existente no TCP, de 3 passos: requisição, resposta, confirmação. A requisição é feita pelo cliente no início da conexão, a resposta é dada pelo servidor em seguida. Posteriormente, o cliente envia uma mensagem de confirmação, e a conexão é totalmente estabelecida. O uso do *handshake* contribui para tanto a estação base como o sistema embarcado confirmarem que estão conectados um ao outro e não a um servidor/cliente qualquer.

Para possibilitar que o tráfego de mensagens possa ser feito de forma rápida, reduzindo atrasos, o envio e recebimento de mensagens é feito de forma assíncrona. Essa escolha foi feita tendo em vista que, em uma comunicação totalmente síncrona, um programa (ou thread) é bloqueado ao chamar uma função de recebimento ou envio, até que efetivamente seja completa a transação. Supondo que só houvesse uma thread gerenciando a conexão, o programa não poderia enviar ou receber dados ao mesmo tempo em *full-duplex*, mas somente *half-duplex* (somente enviar ou somente receber).

A solução desenvolvida para possibilitar a comunicação assíncrona foi o uso de 4 threads (tanto na estação base quanto no sistema embarcado) para gerenciar os diversos aspectos envolvidos nela. A primeira *thread* (a gerenciadora principal de conexão) é a responsável por estabelecer e manter a conexão, além de gerenciar os potenciais erros que possam ocorrer (tempo excessivo sem comunicação e fechamento de socket). Para a estação base, o diagrama de estados dessa *thread* está representado na Figura 6, e para o sistema embarcado na Figura 7.

A segunda *thread* tem a função de gerenciar o envio de mensagens. O programa principal, ao necessitar enviar uma mensagem, faz uma requisição a essa *thread* que insere a mensagem em uma fila de envio. O programa principal não fica bloqueado, dessa forma, pois não necessita aguardar a mensagem ser completamente enviada, podendo efetuar outras tarefas. O diagrama de estados dessa *thread* está presente na Figura 8.

A terceira *thread* gerencia o recebimento de mensagens. Seu funcionamento é relativamente simples: ela possui um loop, no qual aguarda até alguma mensagem ser recebida.

Quando ocorre o recebimento de alguma mensagem, ela é encaminhada para a quarta *thread* (cuja explicação está a seguir) que processa o conteúdo dela e executa as operações que são necessárias para cada tipo de mensagem. Dessa forma, novas mensagens podem ser recebidas rapidamente, pois o receptor não fica bloqueado realizando o processamento das informações recebidas. O diagrama de estados dessa terceira *thread* está presente na Figura 9.

A quarta *thread*, como já exposto, é a responsável por processar mensagens recebidas e realizar as operações que são necessárias para cada tipo de mensagem, o que depende da codificação exposta na seção 2.6.1. Ela possui uma fila, na qual são inseridas as mensagens a serem processadas. Dessa forma a *thread* receptora não necessita ficar bloqueada aguardando o término do processamento. O diagrama de estados dessa quarta *thread* está presente na Figura 10.

2.6.1 Codificação das mensagens

- Mensagens do TS-7260 para o LPC2103 (via porta serial)

- **SYNC (0xA0)**

Quando o microcontrolador LPC2103 recebe esta mensagem, responde com as leituras mais recentes dos encoders, de cada sensor de distância, do acelerômetro e do giroscópio (enviando uma mensagem SENSORS, explicada abaixo).

- **ENGINES (0xB0)**

(byte) vel_roda_esquerda
(byte) vel_roda_direita
(byte) CHECKSUM_H
(byte) CHECKSUM_L

Ao receber este comando, o microcontrolador utiliza os valores para definir o nível de PWM para as rodas do robô. Os valores de velocidade são representados por um byte cada, nos quais o bit mais significativo indica o sentido de rotação da roda (1 para frente e 0 para trás) e os restantes a intensidade do PWM.

Os bytes de checksum são utilizados para verificar se não há dados corrompidos. Os bytes da mensagem são somados (módulo 65536) e o resultado é atribuído aos bytes (high e low) de checksum.

- Mensagens do LPC2103 para a TS-7260 (via porta serial)

- **ENGINES_ACK (0xB1)**

(byte) vel_roda_esquerda

(byte) *vel_roda_direita*

(byte) *CHECKSUM_H*

(byte) *CHECKSUM_L*

Esta mensagem deve ser enviada toda vez que um comando de mudança de velocidade (ENGINES) for recebido na placa de baixo nível. A mensagem é usada no Linux embarcado para verificar se o comando foi corretamente recebido. Caso uma confirmação não seja recebida em certo intervalo de tempo, outro comando ENGINES é enviado para a placa de baixo nível.

O checksum é tem função idêntica ao que já foi explicitado na mensagem ENGINES.

- SENSORS (0xC0)

(byte) *encoder_esq_H*, (byte) *encoder_esq_L*,

(byte) *encoder_dir_H*, (byte) *encoder_dir_L*,

(byte) *IR1*, (byte) *IR2*, (byte) *IR3*, (byte) *IR4*, (byte) *IR5*,

(byte) *AX_H*, (byte) *AX_L*,

(byte) *AY_H*, (byte) *AY_L*,

(byte) *AZ_H*, (byte) *AZ_L*,

(byte) *GX_H*, (byte) *GX_L*,

(byte) *GY_H*, (byte) *GY_L*,

(byte) *GZ_H*, (byte) *GZ_L*,

(byte) *TIMESTAMP_H*, (byte) *TIMESTAMP_L*

(byte) *CHECKSUM_H*

(byte) *CHECKSUM_L*

Representa a leitura de todos os sensores (encoders, infra-vermelhos, acelerômetro e giroscópio).

Os 4 primeiros bytes são os valores das leituras dos encoders esquerdo e direito (cada um com um byte alto e um baixo). Os valores das leituras dos encoders representam a diferença entre a contagem atual a contagem anterior.

Nos próximos 5 bytes, as leituras do sensores ópticos são enviadas em sequência. As distâncias que os sensores ópticos são capazes de mensurar são divididos em valores discretos de 0 a 255 (MARIN et al., 2012).

Após isso, os 12 bytes que se seguem representam as leituras do acelerômetro e do giroscópio. Os bytes que começam com ‘A’ representam a leitura de cada um dos eixos do acelerômetro. Aqueles que começam com ‘G’ representam a leitura de cada um dos eixos do giroscópio.

O timestamp (valor alto e baixo) é um contador de 16 bits que é incrementado entre cada amostra e zera automaticamente depois que chega ao valor máximo (65535), usado para determinar o instante em que foi feita a leitura dos dados. Como a amostragem dos sensores na placa de baixo nível será efetuada em intervalos fixos, a informação do contador do timestamp pode ser utilizada para obter informações de tempo de cada amostra.

O checksum é tem função idêntica ao que já foi explicitado na mensagem ENGINES.

- Mensagens bidirecionais entre estação base e TS-7260 (via Wi-Fi):

- **ECHO_REQUEST (0x01)**

(byte) END_CMD

Requisição de ping.

- **ECHO_REPLY (0x02)**

(byte) END_CMD

Resposta de ping.

- **DISCONNECT (0x0F)**

Solicitação de desconexão.

- Mensagens da estação base para a TS-7260 (via Wi-Fi):

- **HANDSHAKE_REQUEST (0x10)**

Solicitação de handshake.

- **HANDSHAKE_CONFIRMATION (0x12)**

Confirmação de handshake.

- **SENSORS_START (0x20)**

Solicitação de início da amostragem dos sensores.

- **SENSORS_STOP (0x21)**

Solicitação de parada da amostragem dos sensores.

- **SENSORS_RATE (0x22)**

(float) Nova taxa de amostragem

Solicitação de mudança da taxa de envio de comandos SYNC da TS para a placa de baixo nível (comandos SYNC por segundo).

- **WEBCAM_START (0x30)**

Solicitação de início da amostragem da webcam.

- WEBCAM_STOP (0x31)

Solicitação de parada da amostragem da webcam.

- WEBCAM_RATE (0x32)

(float) Nova taxa de quadros

Solicitação de mudança da taxa de quadros da webcam.

- WEBCAM_RESOLUTION (0x33)

(int) Largura em pixels

(int) Altura em pixels

Solicitação de mudança da resolução da webcam.

- ENGINES (0xB0)

(float) vel_roda_esquerda

(float) vel_roda_direita

Solicitação de mudança da velocidade dos motores. Para cada roda há um valor de -1 até 1, sendo que -1 é a máxima velocidade para trás, 1 a máxima velocidade para frente e 0 é parada da roda.

- Mensagens da TS-7260 para a estação base (via Wi-Fi):

- HANDSHAKE_REPLY (0x11)

Resposta de handshake.

- SENSORS (0xC0)

(byte) encoder1_H, (byte) encoder1_L,

(byte) encoder2_H, (byte) encoder2_L,

(byte) IR1, (byte) IR2, (byte) IR3, (byte) IR4, (byte) IR5,

(byte) AX_H, (byte) AX_L,

(byte) AY_H, (byte) AY_L,

(byte) AZ_H, (byte) AZ_L,

(byte) GX_H, (byte) GX_L,

(byte) GY_H, (byte) GY_L,

(byte) GZ_H, (byte) GZ_L,

(byte) TIMESTAMP_H, (byte) TIMESTAMP_L

Possui a mesma funcionalidade e parâmetros que a mensagem SENSORS enviada da LPC2103 para a TS-7260, com exceção do timestamp, que é trocado por um timestamp UNIX em milissegundos (que representa o horário absoluto em que a

amostra foi obtida na placa de baixo nível). Essa informação de tempo é utilizada pela estação base para efetuar os cálculos de posicionamento do robô.

- SENSORS_STATUS (0xC1)

(boolean) Status da amostragem [on - off]

(float) Taxa de amostragem

Informações de status dos sensores. Usado na interface gráfica para confirmar o recebimento de comandos de mudança de taxa de amostragem e início/parada da amostragem.

- WEBCAM_STATUS (0x34)

(float) Taxa de quadros

(int) Largura em pixels

(int) Altura em pixels

(boolean) Status da stream [on - off]

(int) Porta da stream

Informações de status da webcam. Usado na interface gráfica para confirmar o recebimento de comandos relativos à webcam, e para que a estação base tenha conhecimento do status da stream da webcam.

- ENGINES_STATUS (0xB1)

(byte) vel_roda_esquerda

(byte) vel_roda_direita

Informações sobre as velocidades programadas dos motores. Usado na interface gráfica para confirmar o recebimento de comandos de movimentação efetuados pelo usuário.

2.6.2 Diagramas de estados

Nesta seção estão expostos os diagramas de estados do protocolo de comunicação.

Um aspecto importante a ressaltar é que, nas *threads* de envio (Figura 8) e de processamento de mensagens (Figura 10), pode haver adição assíncrona de elementos na fila. Ou seja, quando é feita a verificação do número de elementos presentes na fila (como representado nos diagramas), tem-se em vista que elementos podem ter sido adicionados a qualquer instante. Obviamente, no ponto de vista da implementação, existem as seções críticas que devem ser devidamente gerenciadas para evitar condições de disputa e outros problemas de concorrência. Porém, as seções críticas se resumem aos acessos à fila somente, o que reduz consideravelmente a complexidade do processo.

Na Figura 11 está explicitado o diagrama de estados da *thread* responsável por gerenciar o envio de comandos de velocidade de motores (ENGINES) para a placa de baixo nível. Ela inicialmente aguarda que um comando ENGINES chegue da estação base, e quando isso ocorre, é enviado via serial o comando para a placa de baixo nível. A *thread* aguarda certo tempo para receber um ENGINES_ACK da placa de baixo nível para confirmar que o comando foi corretamente recebido. Caso isso não ocorra dentro do tempo estabelecido (por exemplo, se houver perda de pacotes), outro comando ENGINES é enviado. Isso ocorre até que um ENGINES_ACK correto seja recebido da placa de baixo nível.

Na Figura 12 está exposto o diagrama de estados da *thread* do Linux embarcado que é responsável por realizar a amostragem dos sensores em intervalos fixos de tempo. Ela realiza a amostragem enviando periodicamente – quando programada – comandos SYNC (vide seção 2.6.1) para a placa de baixo nível. Vale ressaltar que para melhor explicar este processo, na Figuras 17 e 18 da próxima seção está exposto um diagrama de sequência que demonstra a amostragem dos sensores.

Nas Figuras 13 e 14 estão presentes os diagramas de estados da captura e recebimento de imagens da webcam. Foi utilizada a biblioteca externa *libVLC* (VIDEOLAN, 2013) – a componente de baixo nível do *player* de mídia VLC – tanto na estação base como no Linux embarcado para efetuar o processo de transmissão e visualização de imagens. No Linux embarcado, quando um comando de início de webcam é dado pelo usuário, uma *stream* HTTP de imagens é aberta pela *libVLC*, e a estação base é posteriormente notificada sobre o fato. Na estação base, quando ocorre a notificação de que a *stream* foi aberta, a componente de *player* da *libVLC* da janela principal é ativada (conectando dessa forma, na *stream* HTTP de imagens).

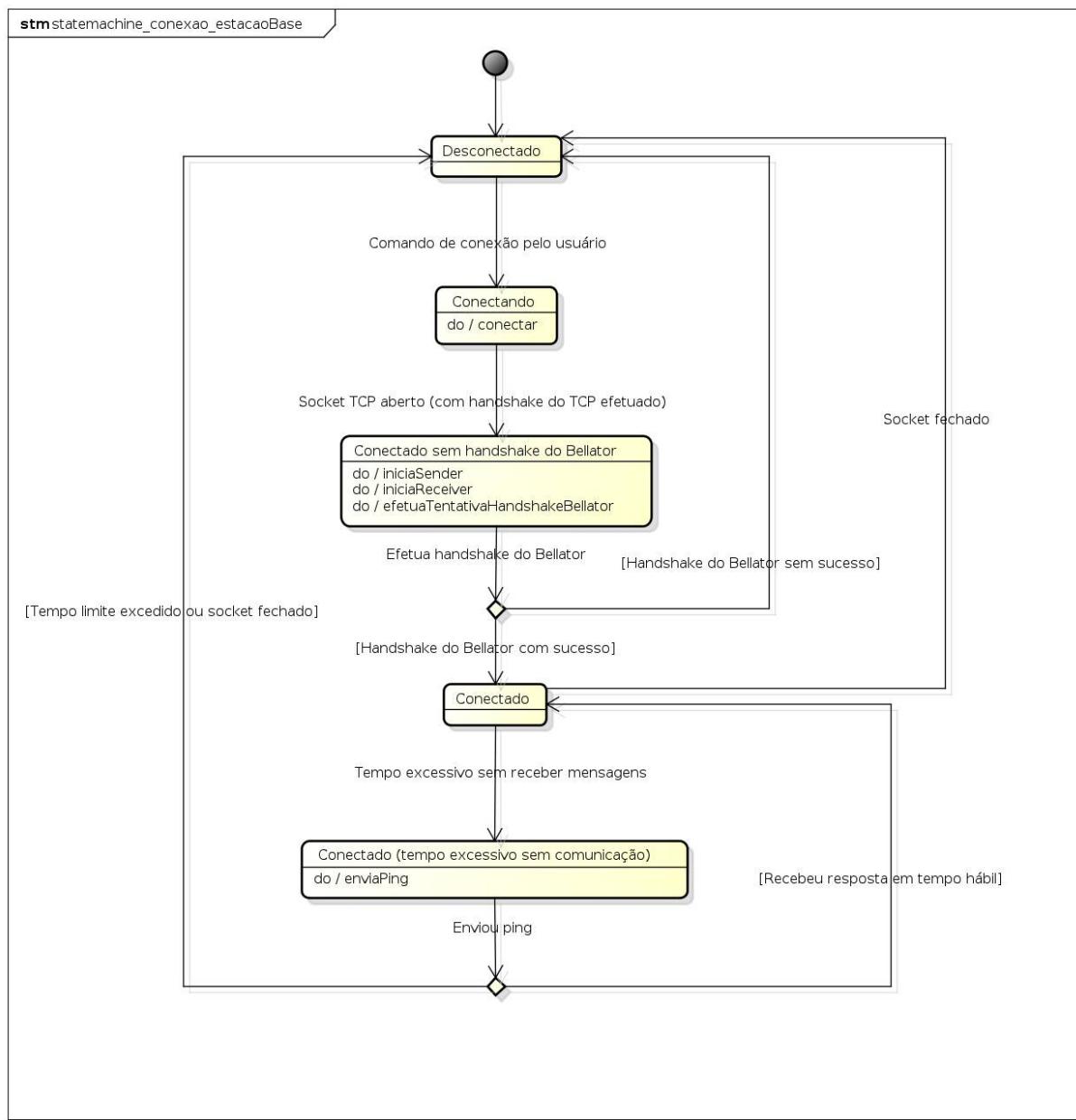


Figura 6: Diagrama estados da *thread* principal da conexão da estação base.

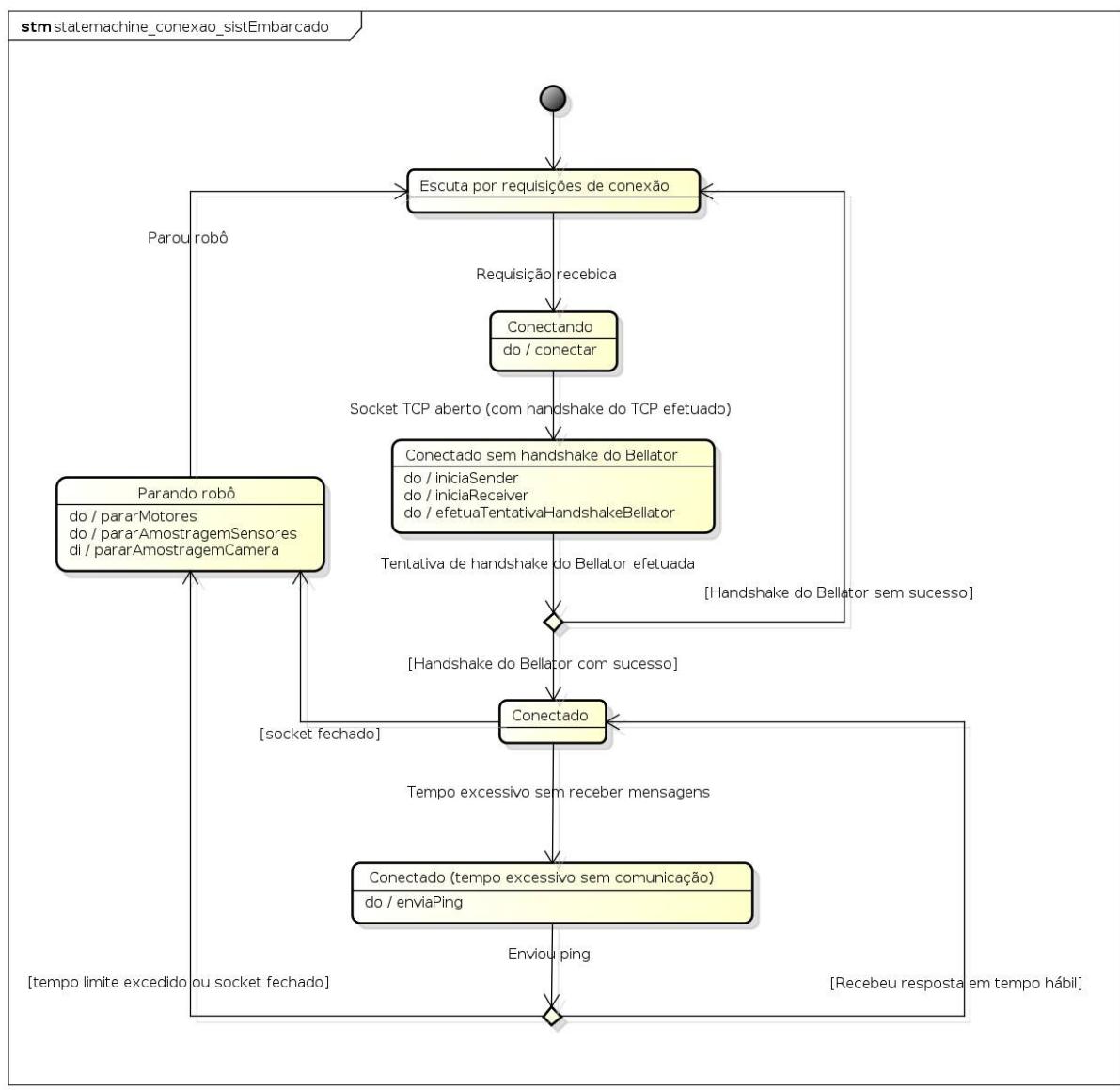


Figura 7: Diagrama de estados da *thread* principal da conexão do linux embarcado.

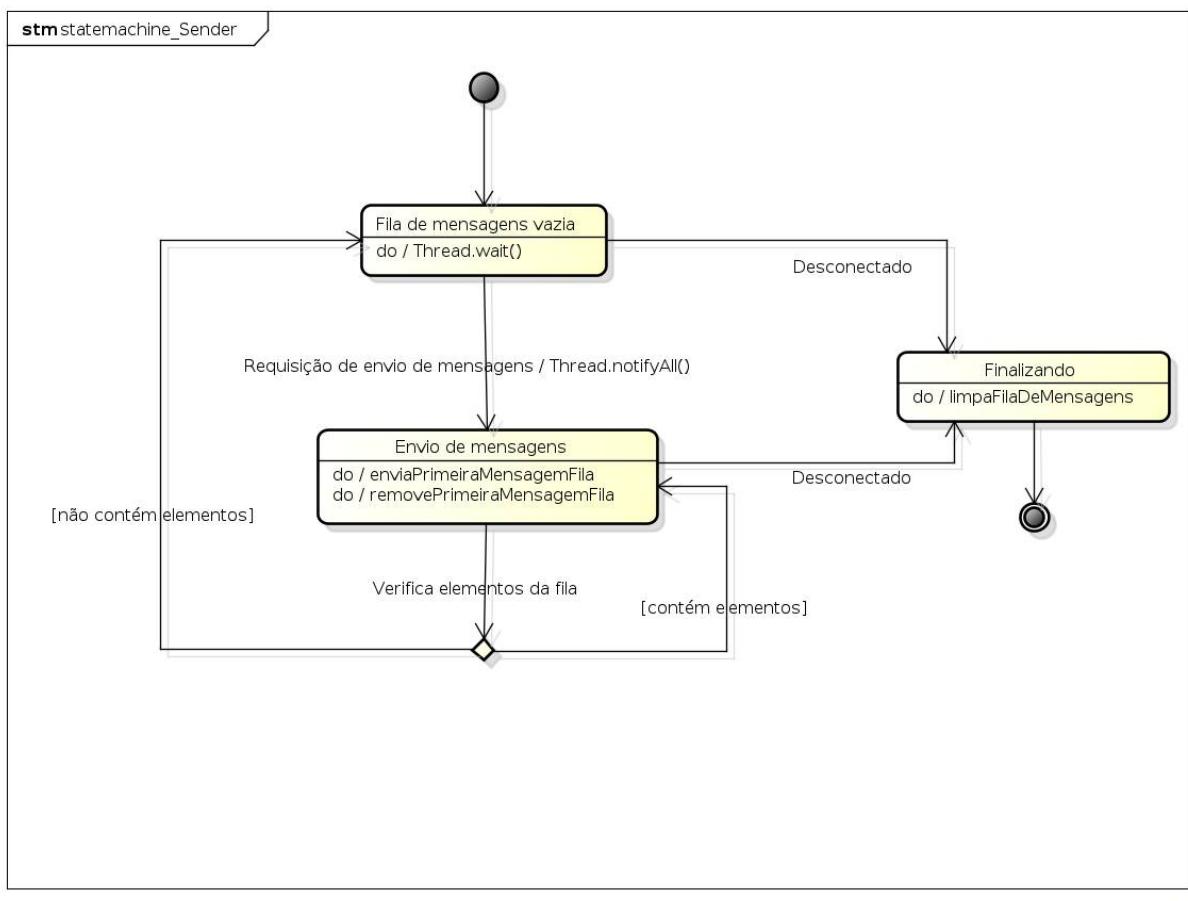
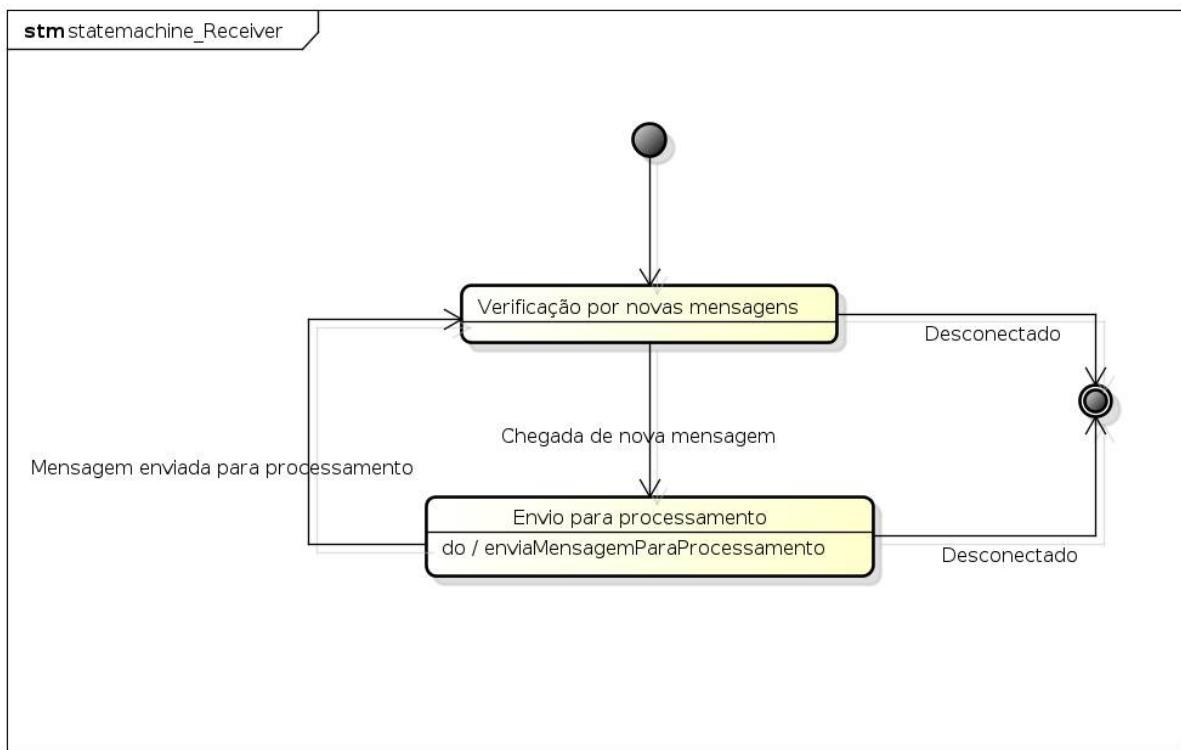
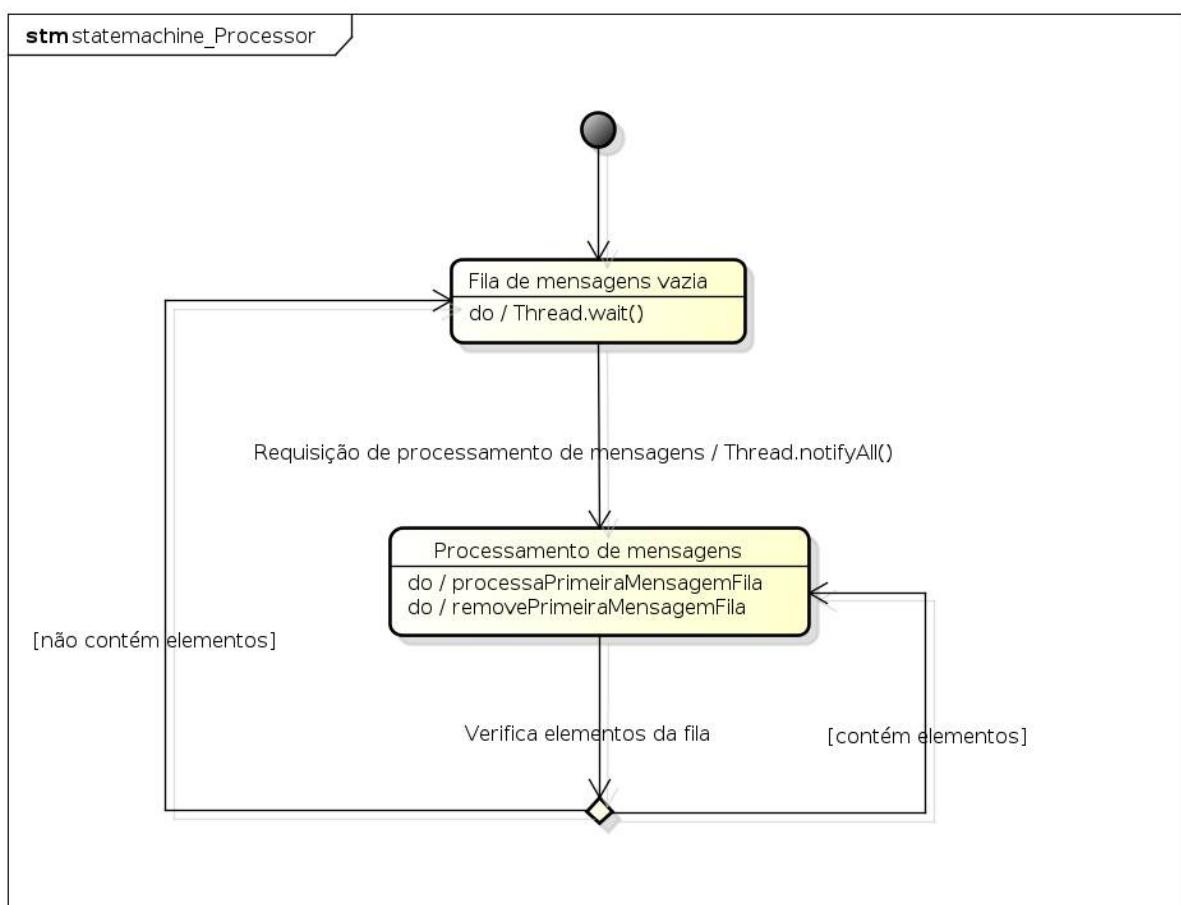


Figura 8: Diagrama de estados da *thread* que envia mensagens (igual para estação base e linux embarcado).



powered by Astah

Figura 9: Diagrama de estados da *thread* receptora de mensagens (igual para estação base e linux embarcado).



powered by Astah

Figura 10: Diagrama de estados da *thread* que processa mensagens recebidas (igual para estação base e linux embarcado).

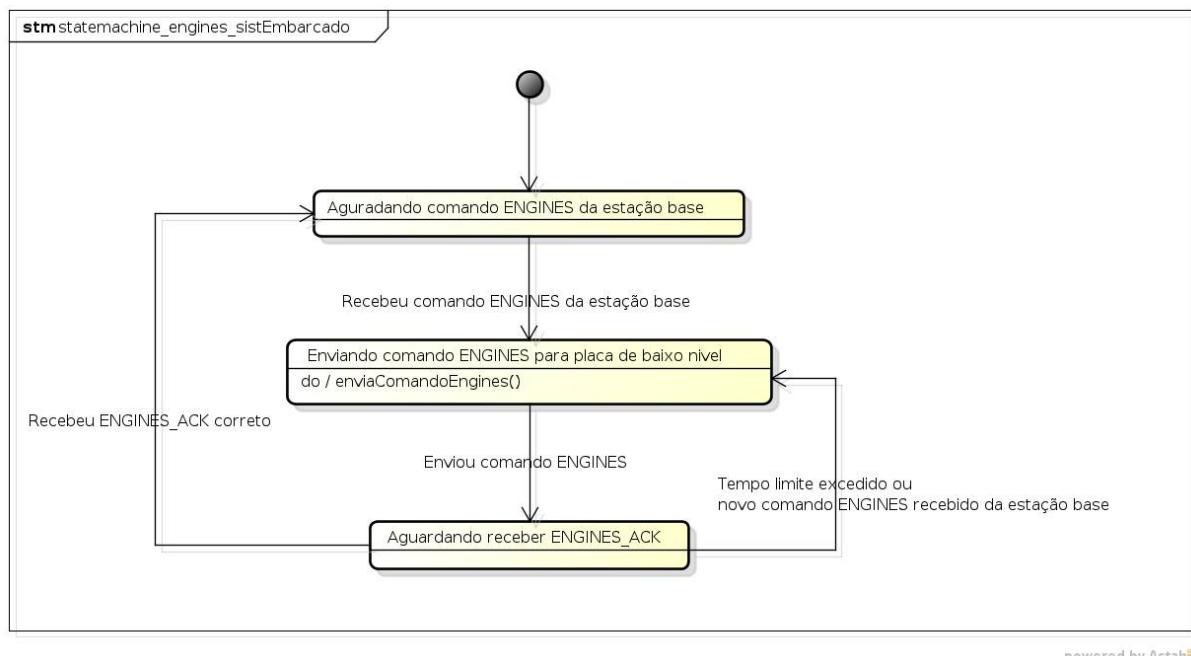


Figura 11: Diagrama de estados da *thread* responsável por gerenciar os comandos dos motores (linux embarcado).

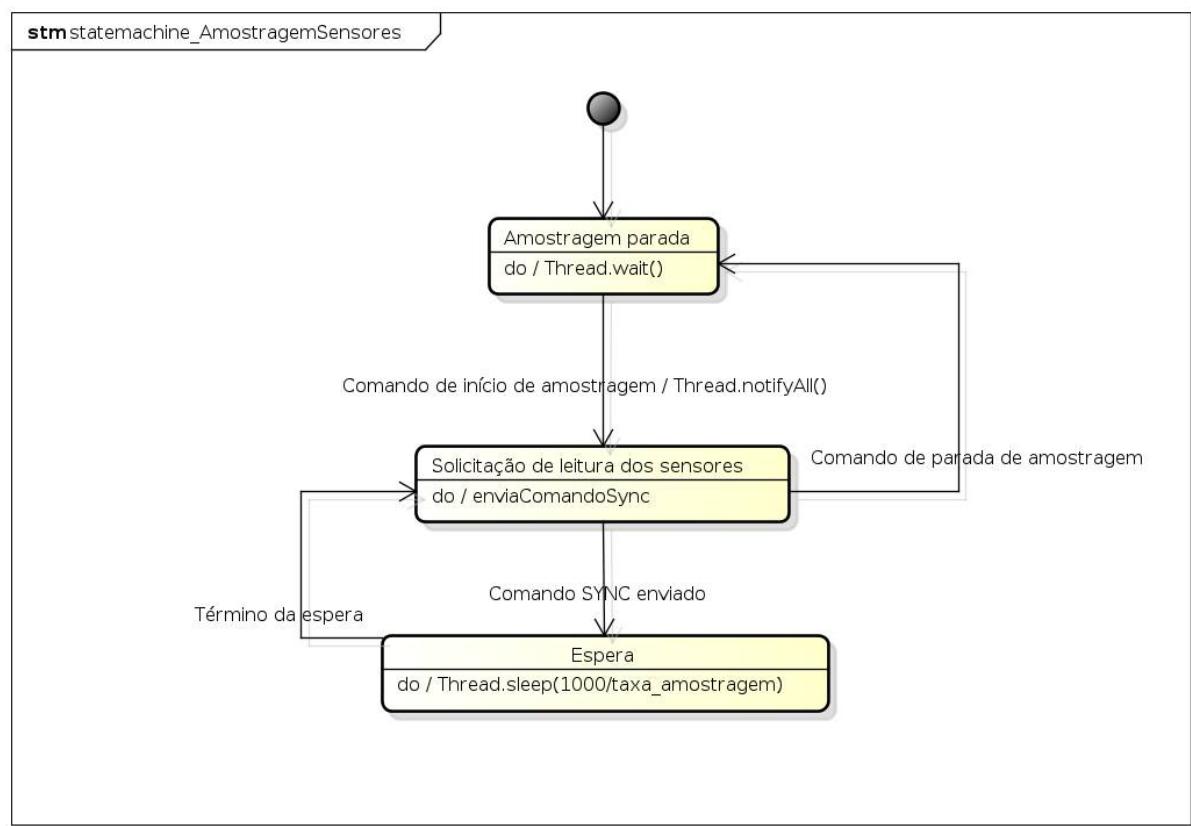
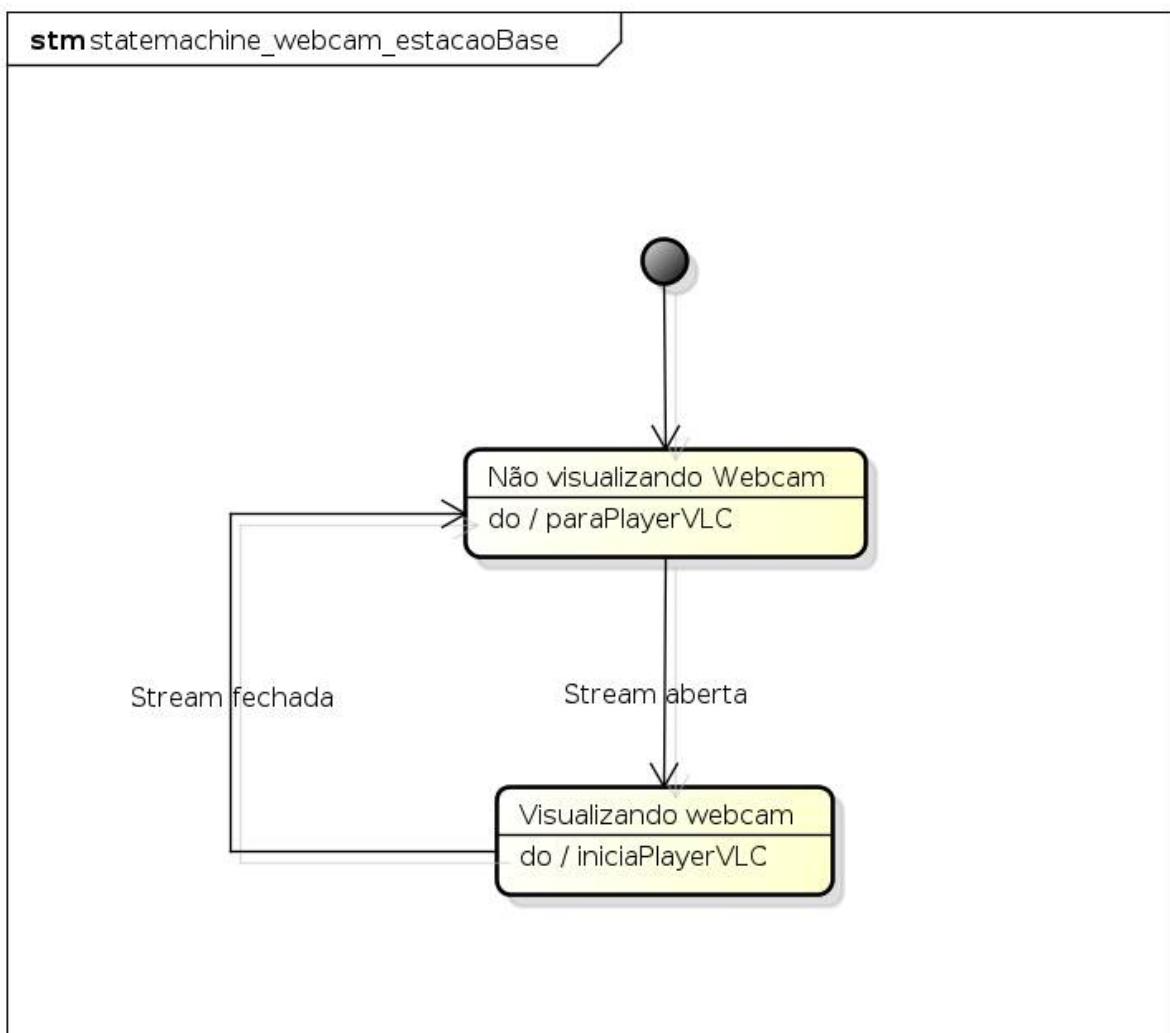
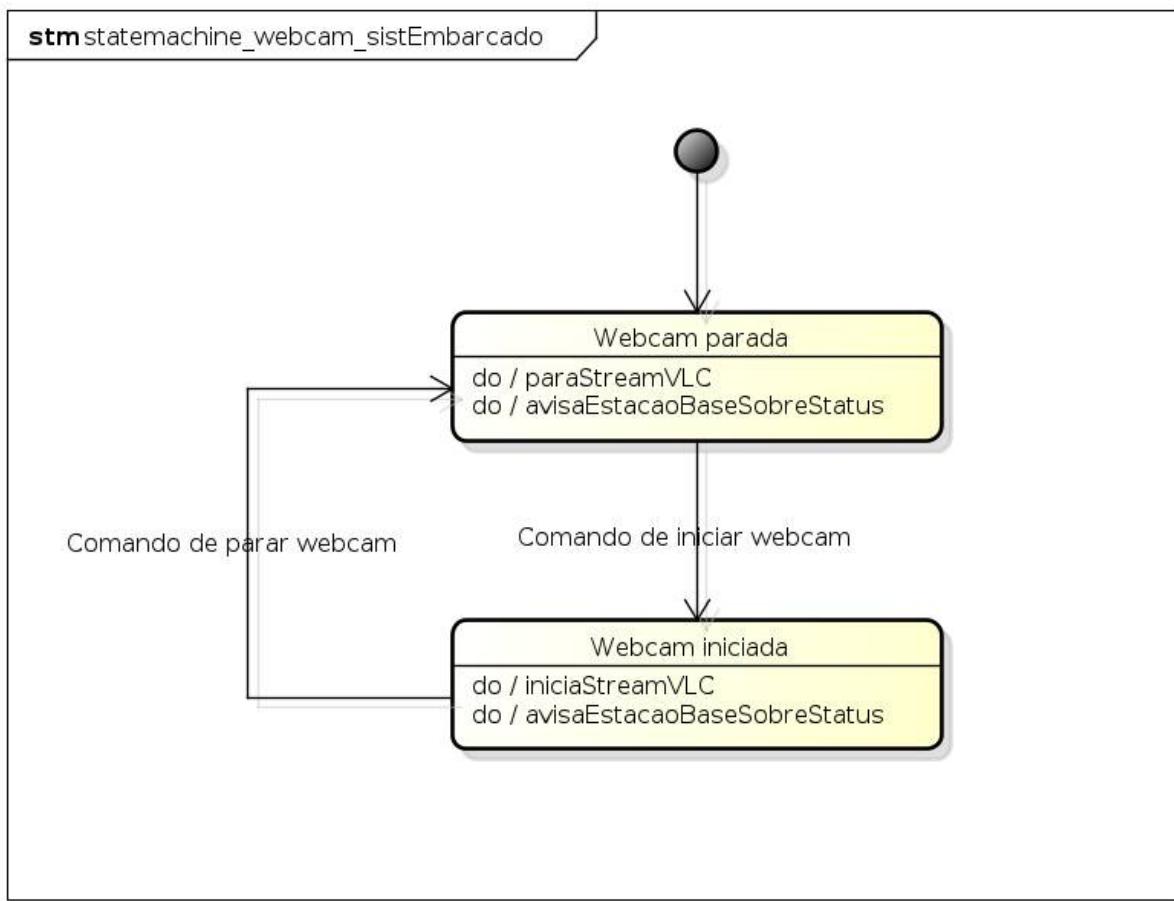


Figura 12: Diagrama de estados da *thread* responsável por efetuar a amostragem dos sensores (linux embarcado).



powered by Astah

Figura 13: Diagrama de estados do visualização de imagens da *webcam* (estaçao base).



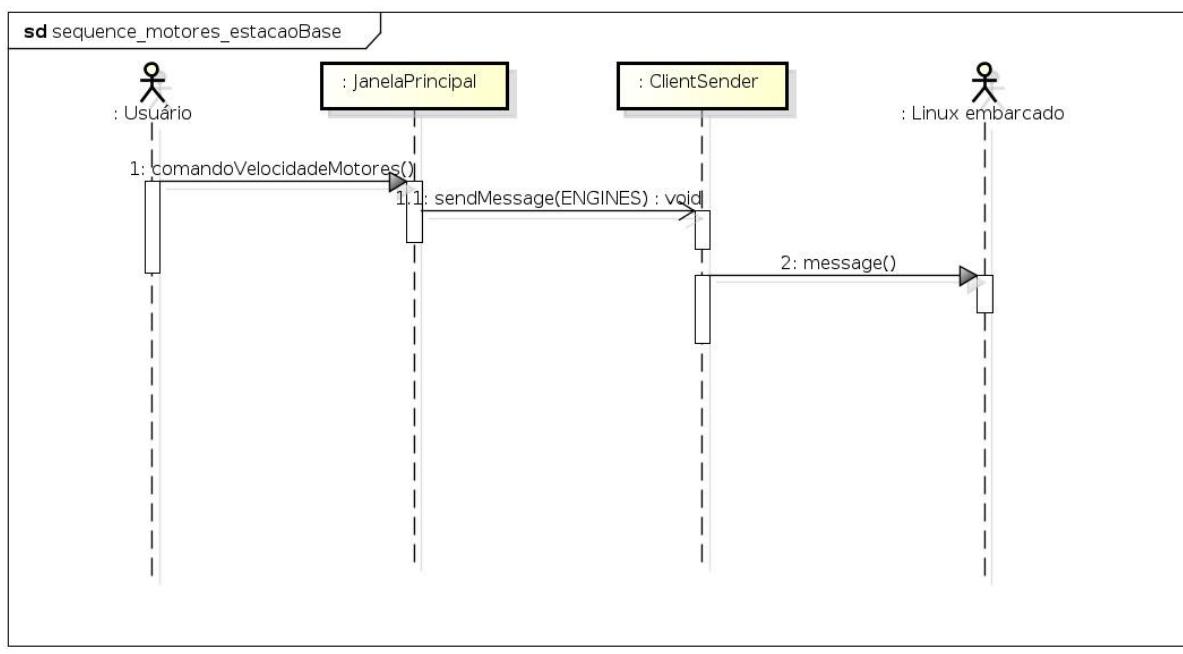
powered by Astah

Figura 14: Diagrama de estados do envio de imagens da *webcam* (linux embarcado).

2.6.3 Diagramas de sequênciа

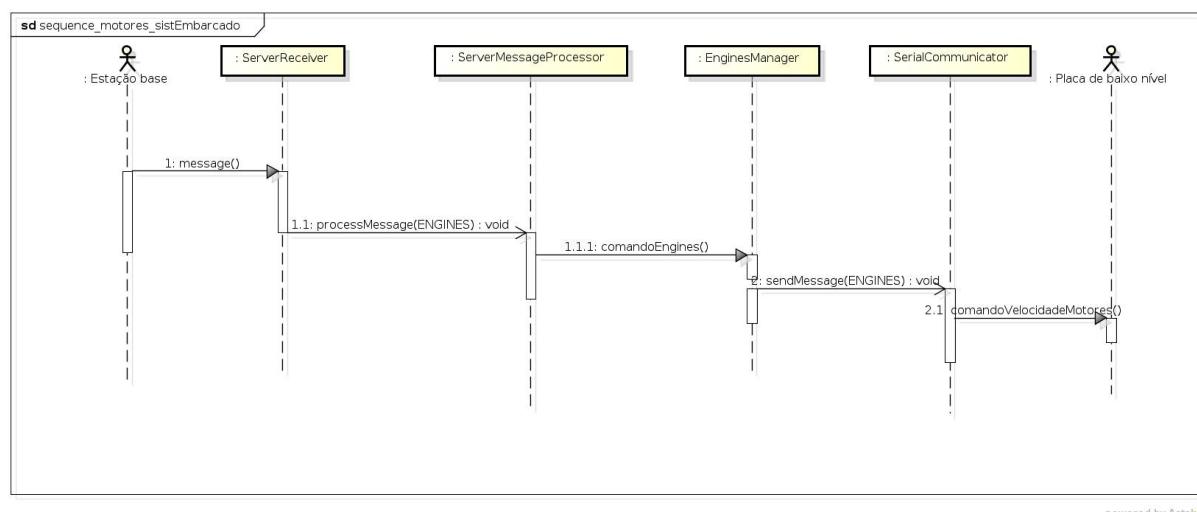
Nessa seção os diagramas de sequência de comandos dos motores, de mensagens de amostras dos sensores e da ativação da webcam. Os diagramas das Figuras 15 e 16 representam como um comando de mudança de velocidade das rodas dado pelo usuário chega até a placa de baixo nível. Os das Figuras 17 e 18 demonstram a sequência dos dados de leituras dos sensores que saem da placa de baixo nível e chegam até o usuário. Os diagramas das Figuras 19 e 20 demonstram um comando de ativação da webcam dado pelo usuário, como ele chega até o Linux embarcado e como posteriormente o usuário recebe as imagens da webcam.

Vale ressaltar que as chamadas assíncronas, ou seja, que não bloqueiam a execução da *thread* chamadora, foram representadas também nestes diagramas.



powered by Astah

Figura 15: Diagrama de sequência de comando para mudança de velocidade dos motores (representa comando dado pelo usuário).



powered by Astah

Figura 16: Diagrama de sequência de comando para mudança de velocidade dos motores (representa mensagem chegando no sistema embarcado).

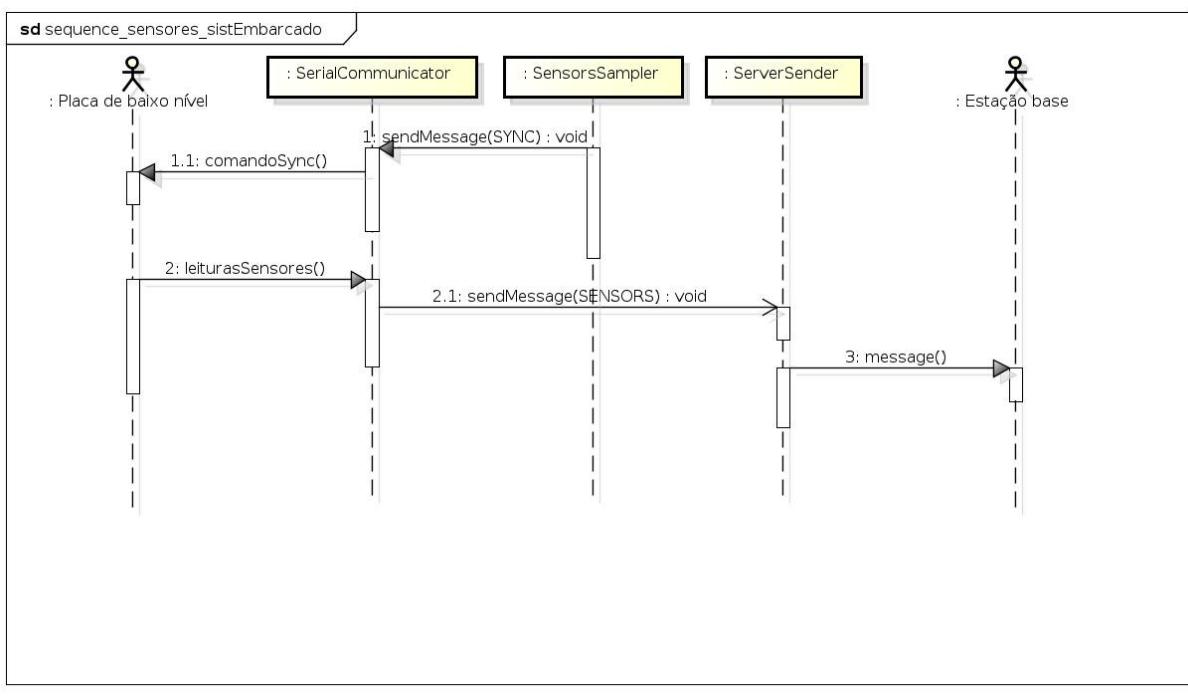


Figura 17: Diagrama de sequência da amostragem dos sensores (representa amostras saindo do sistema embarcado).

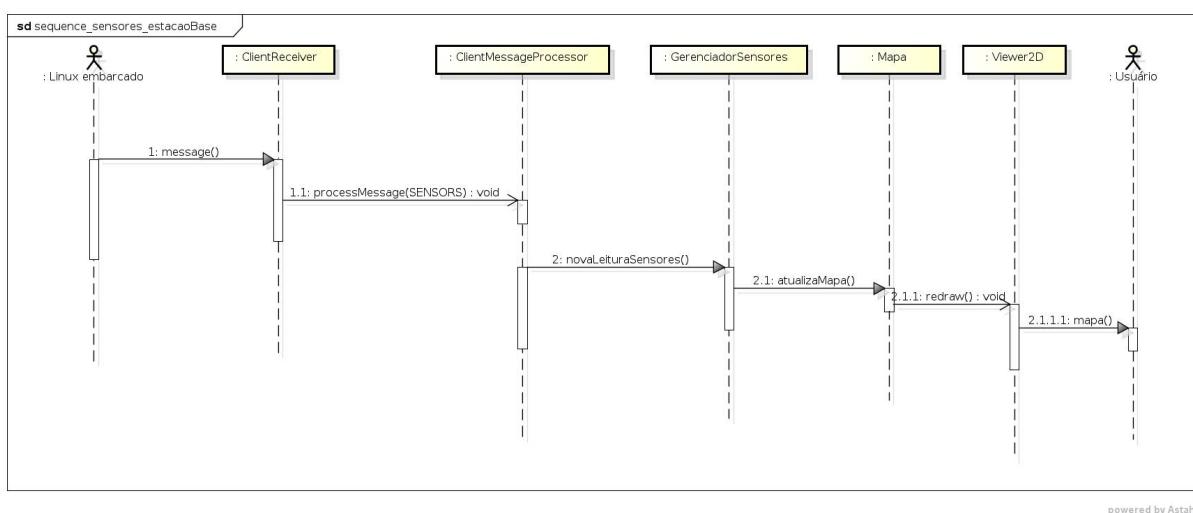


Figura 18: Diagrama de sequência da amostragem dos sensores (representa mensagem chegando na estação base).

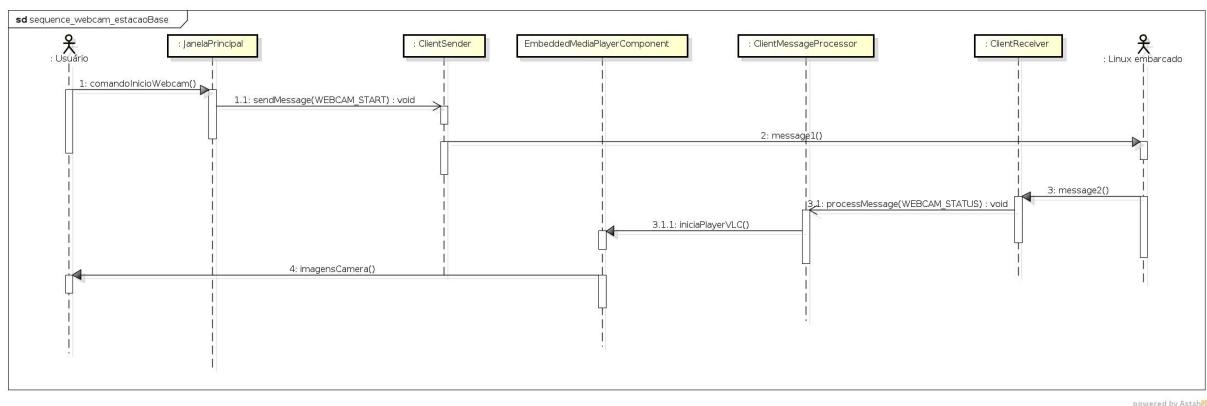


Figura 19: Diagrama de sequência de comando para ativação da webcam (representa comando dado pelo usuário e o *player* da *libVLC* sendo ativado posteriormente).

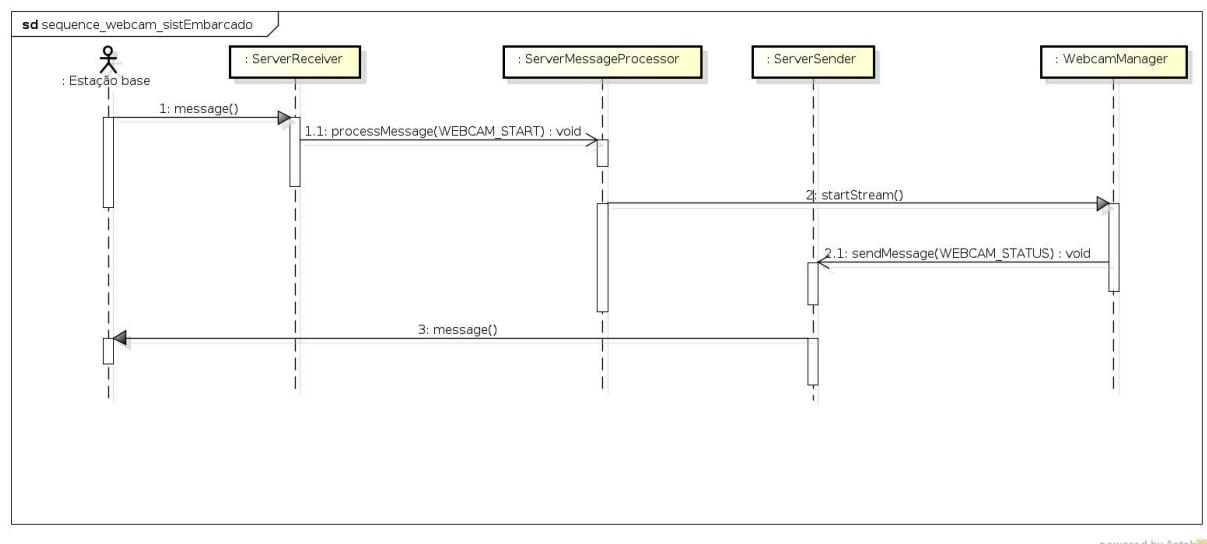


Figura 20: Diagrama de sequência de comando para ativação da webcam (representa mensagem de ativação da webcam chegando no sistema embarcado e estação base sendo posteriormente notificada sobre o novo status).

3 DIAGRAMAS DO HARDWARE

3.1 DIAGRAMA DE BLOCOS

Na figura 21 mostra-se o diagrama de blocos do sistema embarcado e suas conexões com o restante do robô. A seguir está também uma descrição para cada um dos blocos da placa de circuito impresso do sistema embarcado.

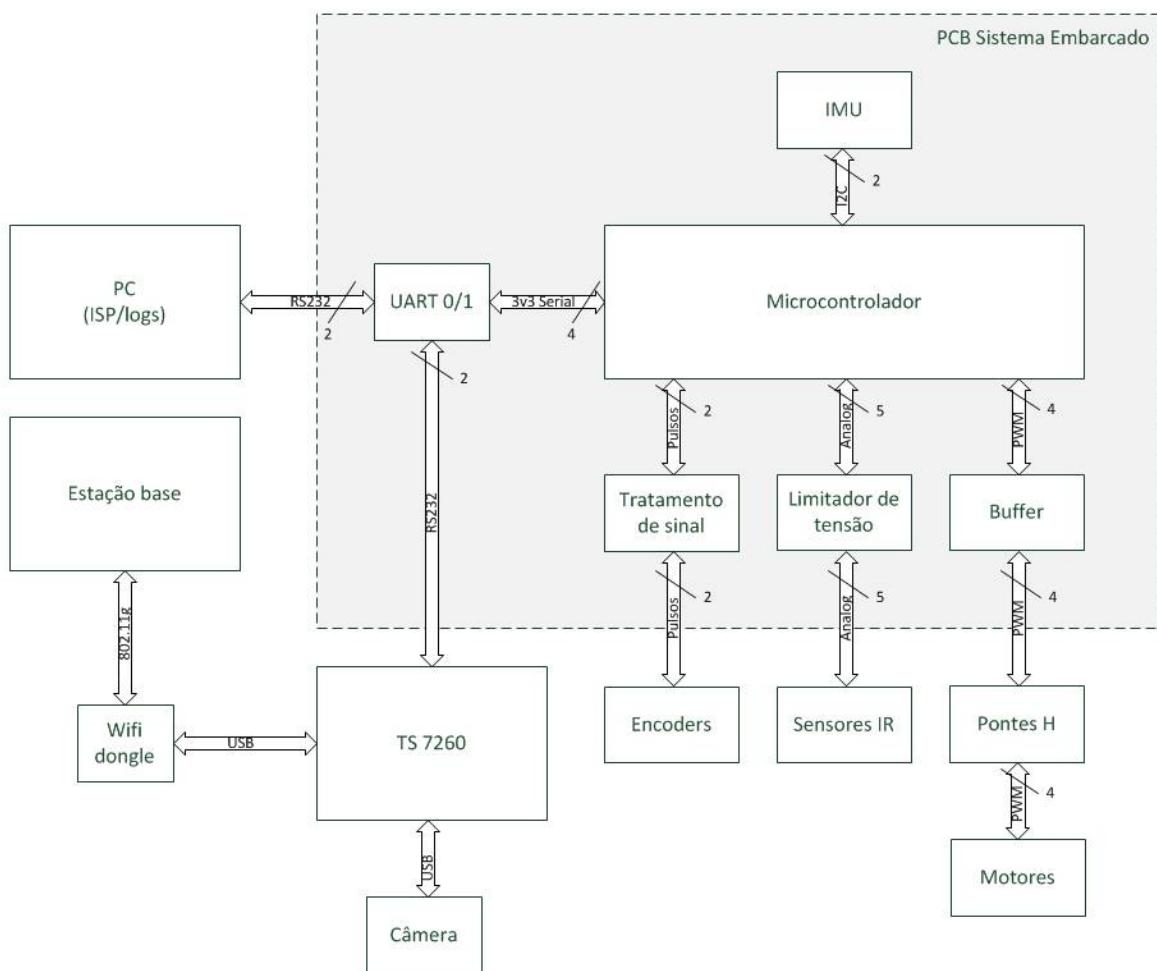


Figura 21: Diagrama de blocos do hardware

1. Microcontrolador: Este bloco fará a leitura dos sensores: encoders, infra-vermelhos, ace-

lerômetro e giroscópios. Além disso possui a implementação do protocolo de comunicação para interação com o linux embarcado da placa TS-7260.

2. UART 0/1: Responsável por ajustar os níveis de tensão para comunicação serial no padrão RS-232 com a placa TS-7260.
3. Buffer: Responsável por fornecer corrente e elevar os níveis de tensão de saída do microcontrolador de 3,3V para 5,0V. Esse buffer é conectado às pontes H já existentes no robô.
4. IMU: possui o acelerômetro e o giroscópio e se comunicará com o microcontrolador por meio do protocolo I2C.
5. Limitador de tensão: Necessário pois os sinais de saída dos sensores de infravermelho que já existem no robô não estão limitados em 5V, podendo a saída ultrapassar 5,0V e danificar o microcontrolador.
6. Tratamento de sinal: Composto por um filtro RC passa baixas e um schmitt trigger para remover qualquer falha que possa ocorrer na geração dos pulsos no encoder.

3.2 DIAGRAMA ELÉTRICO/ELETRÔNICO

Na figura 22 mostra-se o diagrama de elétrico eletrônico do sistema embarcado. Cada bloco da figura 21 corresponde a alguns componentes do diagrama elétrico eletrônico. A seguir detalha-se um pouco mais cada bloco.

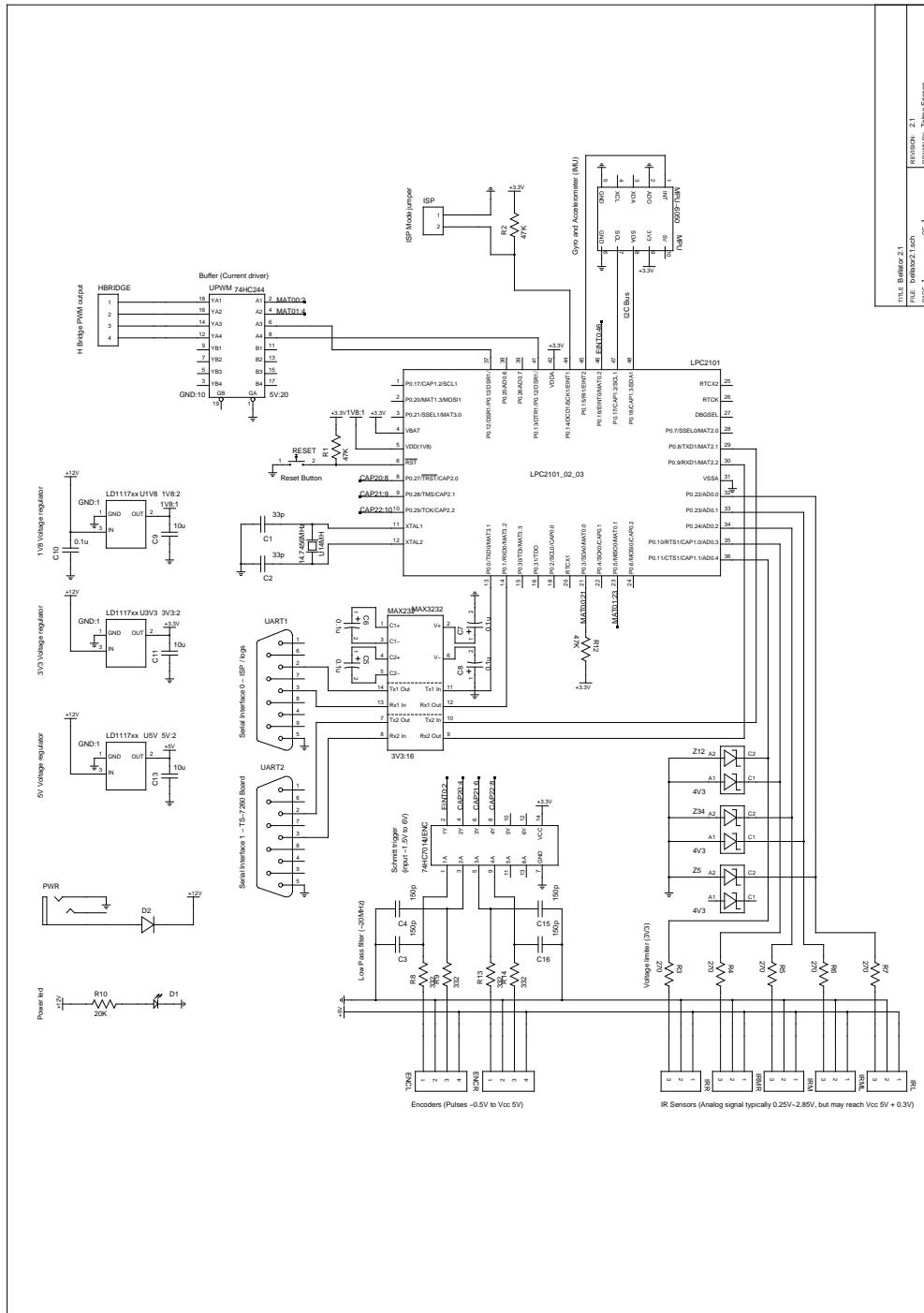


Figura 22: Diagrama elétrico/eletrônico.

1. **Microcontrolador:** Composto pelo microcontrolador LPC2103 da NXP que possui arquitetura ARM. Ele dispõe de duas interfaces seriais, conversor analógico digital com 8 canais, interface i2c, entradas de captura e interrupção, saídas de PWM entre outras funções que não serão utilizadas nesse projeto.

2. UART 0/1: Constituído por um chip max3232 que opera em níveis de tensão CMOS e que gera os níveis adequados para o padrão RS-232 utilizando alguns capacitores.
3. Buffer: Constituído por um chip 74HC244, é responsável por fornecer corrente e elevar os níveis de tensão de saída do microcontrolador de 3,3V para 5,0V.
4. IMU: Composto pela placa de desenvolvimento MPU-6050, que possui um chip com o mesmo nome, MPU-6050, e circuitos RC auxiliares necessários para o funcionamento do MPU-6050.
5. Limitador de tensão: Constituído de um resistor com baixo valor, 270 ohms, e um diodo Zener polarizado reversamente e com tensão de ruptura de 4.3V. Quando a tensão de entrada ultrapassar 4.3V o diodo passa a conduzir e mantém a tensão de 4.3V no resistor. O datasheet do microcontrolador sugere que se mantenha a impedância da carga menor que 40kohms, logo a adição de um resistor de 270 ohms pode ser desconsiderado com relação ao erro que possa causar na leitura do conversor. Um resistor de 270 ohms leva a uma corrente de 3.7mA quando a saída do sensor for 5.3V, que é o valor máximo previsto no datasheet.
6. Tratamento de sinal: Composto por um filtro RC passa baixas e um chip 74HC7014. As frequências acima de 20MHz são atenuadas no sinal do encoder. Esse valor foi calculado com base na forma de onda da saída especificada no datasheet do encoder. Para tanto utilizam-se resistores de 332 ohms e capacitores de 150pF.

3.3 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

O projeto da placa de circuito impresso (PCB) do sistema embarcado de baixo nível está explicitado nas Figuras 23 e 24. Na Figura 25 está presente uma foto da placa pronta com os componentes soldados.

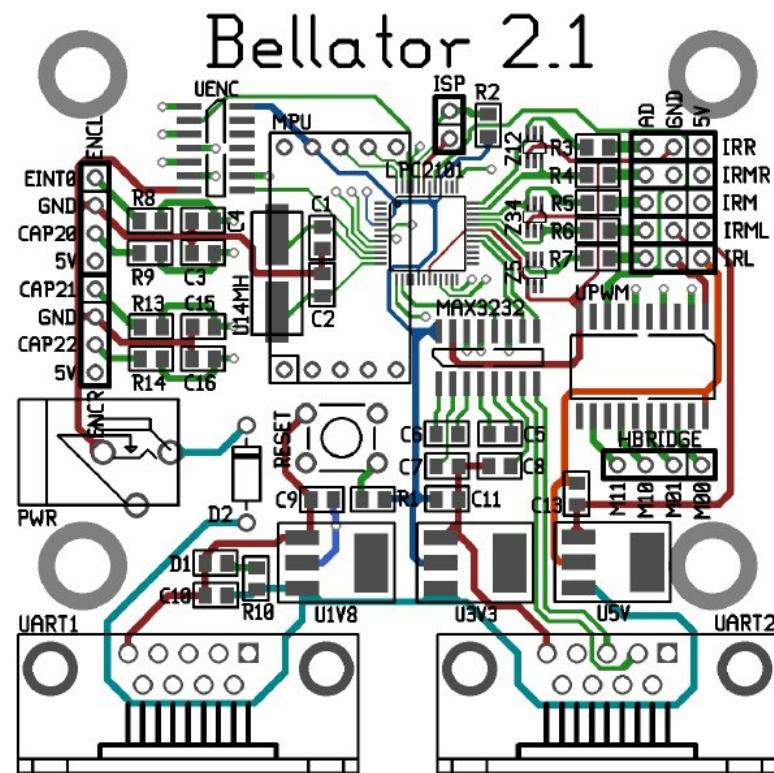


Figura 23: Projeto da PCB – lado de cima.

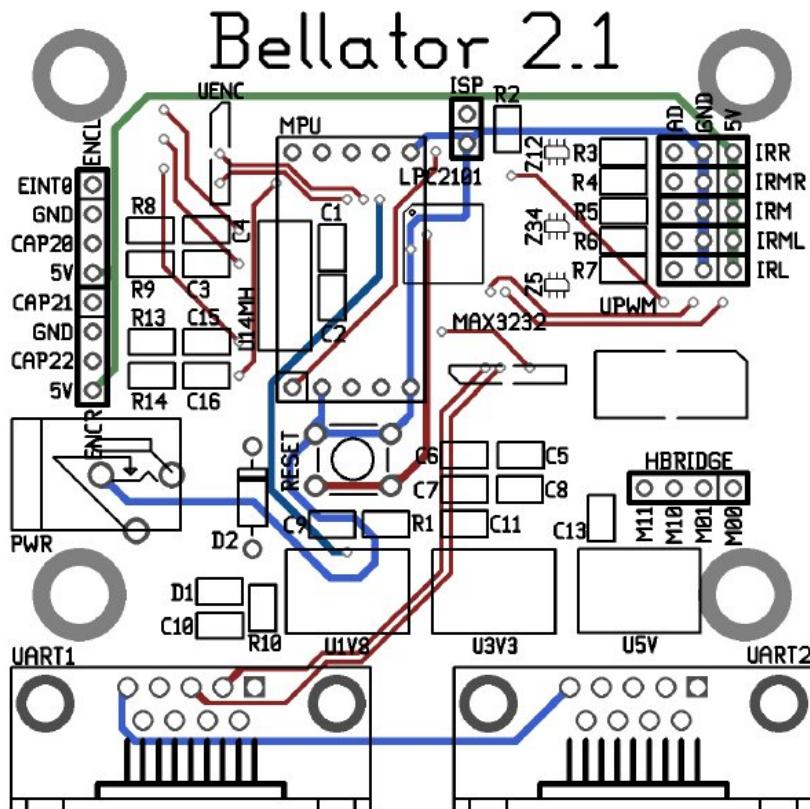


Figura 24: Projeto da PCB – lado de baixo.

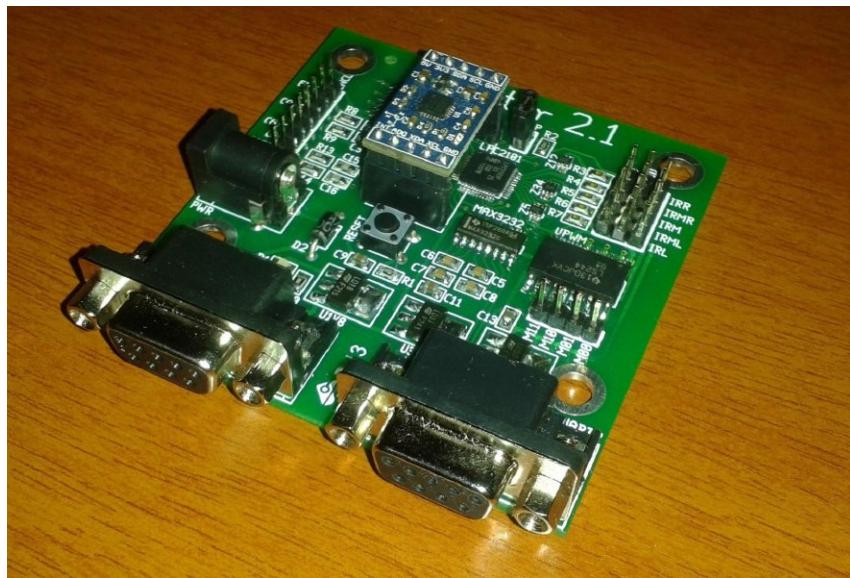


Figura 25: PCB montada.

3.3.1 Guia de montagem do hardware

Os passos a seguir, juntamente com a Figura 26 indicam como a placa embarcada deve ser montada.

1. Conexão com sensores IR. A conexão deve ser feita de acordo com a indicação da placa, respeitando os pinos de alimentação e sinal.
2. Conexão com os encoders. A conexão deve ser feita de acordo com a indicação da placa, respeitando os pinos de alimentação e sinal.
3. Conexão para drivers de potência dos motores. Cada pino é um sinal de PWM.
4. Conexão Serial RS232 com a placa TS-7260.
5. Conexão Serial RS232 para envio de logs ao computador ou programação do microcontrolador. (não necessita obrigatoriamente estar conectado durante operação normal)
6. Jumper para seleção do modo ISP para gravação do microcontrolador. (Modo ISP selecionado quando com o jumper durante o boot ou reset da placa).
7. Conexão da alimentação. 12V, negativo na parte externa do conector jack.

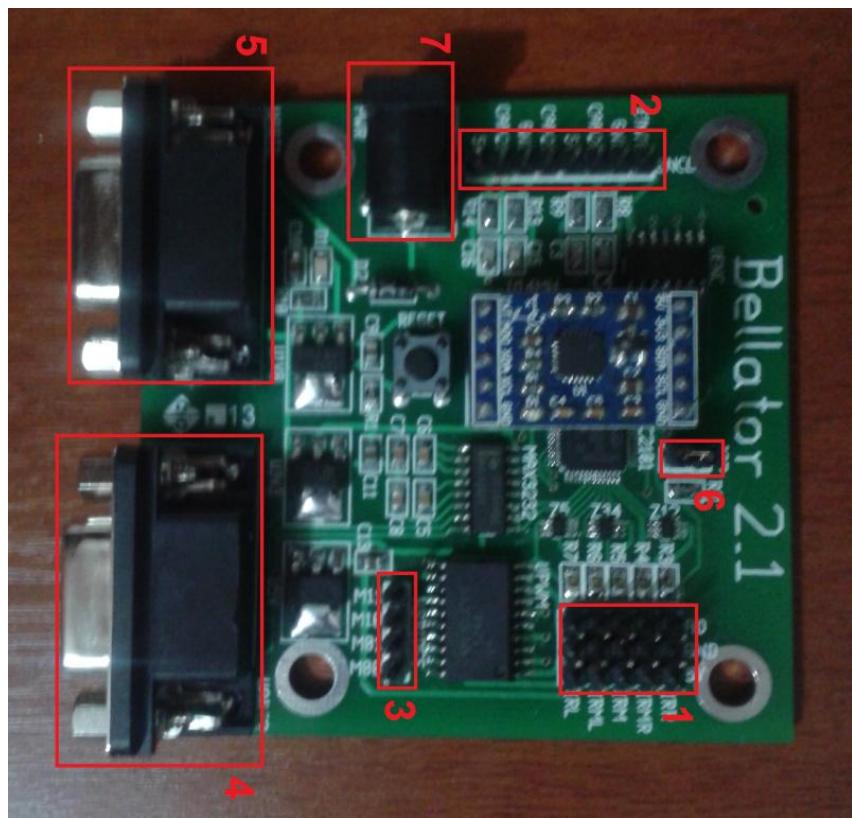


Figura 26: PCB montada.

4 GERAÇÃO DO MAPA

A posição do robô no mapa em cada instante é representada por um ponto no plano cartesiano e por um ângulo, que indica para qual sentido o robô está orientado. Esse ponto no plano indica onde está o centro de movimento do robô, que é o ponto médio entre as duas rodas.

Neste projeto, a determinação do deslocamento do robô é determinada primariamente pelos encoders presentes cada roda. O acelerômetro e o giroscópio são utilizados para aumentar a confiabilidade dos cálculos de deslocamento, principalmente em caso de escorregamento das rodas.

Na próxima seção será explicada a teoria da determinação do deslocamento, velocidade e aceleração do centro de movimento do robô a partir das leituras dos encoders em cada instante. Na seção 4.2 será explicitada a forma como as leituras do acelerômetro e giroscópio serão utilizadas para aumentar a confiabilidade das medições.

Na Figura 27 está presente um esquema básico do robô visto de cima e virado com a frente para a direita. Na figura estão presentes os nomes das variáveis que são utilizadas nos cálculos posteriores. As medidas R , R_D e R_E representam os raios de um movimento circular uniforme descrito pelo robô, supondo que a roda esquerda esteja se deslocando mais do que a direita. Esse aspecto será melhor explicado nas seções seguintes.

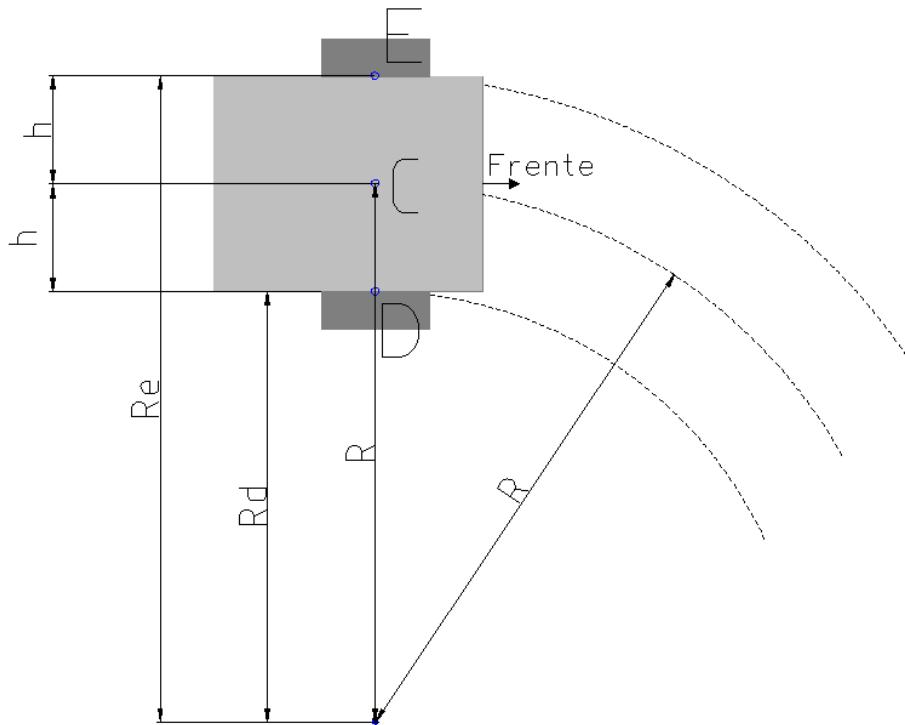


Figura 27: Representação básica do robô em movimento circular uniforme (visão superior).

Um aspecto importante a ressaltar é que o sistema de coordenadas do Processing (a biblioteca usada para desenhar o mapa 2D na interface gráfica) possui o eixo Y invertido. Portanto, os ângulos crescem no sentido horário, e não no anti-horário como seria o convencional. Essa convenção do Processing (ângulos que crescem em sentido horário) é utilizada integralmente no escopo deste projeto.

4.1 ENCODERS

Cada encoder fornece uma medida de contagem de pulsos por volta a cada intervalo de amostragem, e isso permite calcular o deslocamento de cada roda. A partir dessas informações, dois dados importantes podem ser determinados a respeito do deslocamento do centro de movimento do robô: o deslocamento linear (distância absoluta percorrida) e o angular (variação do ângulo de orientação do robô).

Na Figura 28 está presente um representação básica de uma roda, acoplada a um encoder. Os números da figura são utilizados como índices nos cálculos explicitados posteriormente.

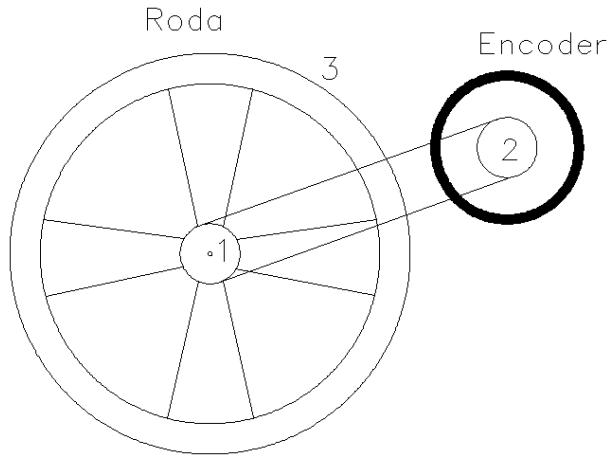


Figura 28: Representação de uma roda acoplada a um encoder.

4.1.1 Deslocamento de cada roda

Um princípio importante utilizado nos cálculos é a relação entre o deslocamento Δx ao redor de uma circunferência (de raio R) e a variação do ângulo $\Delta\theta$:

$$\Delta x = R \cdot \Delta\theta \quad (1)$$

Nos cálculos a seguir, faz-se uso do índice 1 para o eixo da roda, 2 para o eixo do encoder e 3 para a própria roda, de acordo com a figura 28. Para determinar a distância percorrida pela roda, deve-se considerar a circunferência do eixo da roda (C_1), a circunferência do eixo do encoder (C_2) e a circunferência da roda (C_3).

O acoplamento do eixo do encoder com o eixo da roda é feita por uma correia de borracha, e portanto considera-se que o deslocamento (Δx_1) na superfície do eixo da roda é igual ao deslocamento (Δx_2) na superfície do eixo do encoder. Pode-se, com isso, calcular:

$$\Delta x_1 = \Delta x_2 \rightarrow \Delta\theta_1 R_1 = \Delta\theta_2 R_2 \rightarrow \Delta\theta_1 \frac{C_1}{2\pi} = \Delta\theta_2 \frac{C_2}{2\pi}$$

$$\Delta\theta_1 = \frac{C_2}{C_1} \cdot \Delta\theta_2 \quad (3)$$

Calculando-se a relação entre a contagem de pulsos do encoder (E) e o ângulo de rotação ($\Delta\theta_2$) do eixo do encoder, levando-se em conta que há uma contagem de 1800 pulsos por volta:

$$\Delta\theta_2 = \frac{2\pi}{1800} \cdot E \text{ [rad]} \quad (4)$$

Substituindo-se a equação 4 na 3, tem-se que:

$$\Delta\theta_1 = \frac{C_2}{C_1} \frac{2\pi}{1800} \cdot E \text{ [rad]} \quad (5)$$

Calculando-se a relação entre a variação do ângulo do eixo da roda ($\Delta\theta_1$) e o deslocamento da roda (Δx_3):

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta_3 \rightarrow \Delta\theta_1 = \frac{\Delta x_3}{R_3} \rightarrow \Delta\theta_1 = \Delta x_3 \frac{2\pi}{C_3} \rightarrow \Delta x_3 = \Delta\theta_1 \frac{C_3}{2\pi}$$

Substituindo-se o valor de ($\Delta\theta_1$) da equação 5, obtém-se:

$$\Delta x_3 = \frac{C_2}{C_1} \frac{2\pi}{1800} \cdot E \cdot \frac{C_3}{2\pi}$$

$$\boxed{\Delta x_3 = \frac{C_2 C_3}{1800 \cdot C_1} \cdot E} \quad (9)$$

Que é o valor do deslocamento da roda em função da contagem de pulsos do encoder.

4.1.2 Deslocamento do centro de movimento do robô

Como já explicitado anteriormente, o centro de movimento do robô considerado é o ponto médio entre as duas rodas. As duas variáveis para determinar em cada instante de tempo são o deslocamento linear (distância absoluta percorrida) e o angular (variação do ângulo de orientação do robô). Considerando-se que em cada instante o robô descreve um movimento circular uniforme (MCU), o raio da trajetória deve ser determinado para que os cálculos de posicionamento do robô possam ser feitos. Este raio depende do deslocamento das rodas em cada instante, e é uma importante variável que será estudada na próxima subseção.

Nos cálculos que serão explicitados a seguir, utiliza-se o índice E para a roda esquerda, C para o centro de movimento do robô e D para a roda direita.

Uma relação importante a notar a princípio é que a variação do ângulo de orientação em cada instante é igual nos três pontos: E (roda esquerda), C (centro de movimento) e D (roda

direita), visto que todos estão fixos em relação à carcaça do robô. Parte-se da seguinte relação fundamental, portanto:

$$\Delta\theta_E = \Delta\theta_D = \Delta\theta_C \quad (12)$$

4.1.2.1 Raio do movimento circular uniforme

Para determinar o raio (R) descrito pelo centro de movimento do robô em sua trajetória instantânea em MCU, usa-se os dois primeiros termos da igualdade da equação 12:

$$\Delta\theta_E = \Delta\theta_D \rightarrow \frac{\Delta x_E}{R_E} = \frac{\Delta x_D}{R_D}$$

Sabe-se, pela Figura 27, que:

$$R_E = R + h, \quad R_D = R - h$$

Portanto:

$$\frac{\Delta x_E}{R + h} = \frac{\Delta x_D}{R - h} \rightarrow \frac{\Delta x_E}{\Delta x_D} = \frac{R + h}{R - h} \rightarrow \frac{\Delta x_E(R - h)}{\Delta x_D} = R + h$$

$$\frac{\Delta x_E \cdot R - \Delta x_E \cdot h}{\Delta x_D} = R + h \rightarrow \frac{\Delta x_E}{\Delta x_D} \cdot R - \frac{\Delta x_E}{\Delta x_D} \cdot h = R + h \rightarrow \frac{\Delta x_E}{\Delta x_D} \cdot R - R = \frac{\Delta x_E}{\Delta x_D} \cdot h + h$$

$$R \left(\frac{\Delta x_E}{\Delta x_D} - 1 \right) = h \left(\frac{\Delta x_E}{\Delta x_D} + 1 \right) \rightarrow R = h \cdot \frac{\left(\frac{\Delta x_E}{\Delta x_D} + 1 \right)}{\left(\frac{\Delta x_E}{\Delta x_D} - 1 \right)} \rightarrow R = h \cdot \frac{\frac{\Delta x_E + \Delta x_D}{\Delta x_D}}{\frac{\Delta x_E - \Delta x_D}{\Delta x_D}}$$

$$R = h \cdot \frac{\Delta x_E + \Delta x_D}{\Delta x_E - \Delta x_D}$$

(18)

Vê-se que o raio R do movimento circular uniforme em cada instante depende do deslocamento de cada roda (Δx_E e Δx_D) e da distância h entre as rodas e o centro de movimento do robô.

4.1.2.2 Deslocamento linear

Para calcular o deslocamento linear do centro de movimento do robô, usa-se os dois últimos termos da equação 12. Vale ressaltar que poderiam ser escolhidos também o primeiro e o último termos, pois o resultado obtido seria idêntico. Tem-se que:

$$\Delta\theta_D = \Delta\theta_C \rightarrow \frac{\Delta x_D}{R_D} = \frac{\Delta x_C}{R}$$

Mas:

$$R_D = R - h$$

Portanto:

$$\frac{\Delta x_D}{R - h} = \frac{\Delta x_C}{R} \rightarrow x_D = x_C \cdot \frac{R - h}{R}$$

Substituindo-se o valor de R da equação 18:

$$\Delta x_D = \Delta x_C \left[\frac{h \cdot \frac{\Delta x_E + \Delta x_D}{\Delta x_E - \Delta x_D} - h}{h \cdot \frac{\Delta x_E + \Delta x_D}{\Delta x_E - \Delta x_D}} \right]$$

Dividindo-se o numerador e denominador do segundo termo por h :

$$\Delta x_D = \Delta x_C \left[\frac{\frac{\Delta x_E + \Delta x_D}{\Delta x_E - \Delta x_D} - 1}{\frac{\Delta x_E + \Delta x_D}{\Delta x_E - \Delta x_D}} \right]$$

Multiplicando-se o numerador e denominador do segundo termo por $\frac{\Delta x_E - \Delta x_D}{\Delta x_E + \Delta x_D}$:

$$\Delta x_D = \Delta x_C \left[1 - \frac{\Delta x_E - \Delta x_D}{\Delta x_E + \Delta x_D} \right] \rightarrow \Delta x_D = \Delta x_C \left[\frac{(\Delta x_E + \Delta x_D) - (\Delta x_E - \Delta x_D)}{\Delta x_E + \Delta x_D} \right]$$

$$\Delta x_D = \Delta x_C \cdot \left[\frac{2\Delta x_D}{\Delta x_E + \Delta x_D} \right] \rightarrow \Delta x_C = \frac{\Delta x_D}{\left(\frac{2\Delta x_D}{\Delta x_E + \Delta x_D} \right)}$$

$$\boxed{\Delta x_C = \frac{\Delta x_E + \Delta x_D}{2}}$$

(25)

Notas-se que o deslocamento linear do centro de movimento do robô (Δx_C) é uma média simples dos dois deslocamentos lineares das rodas. Vê-se que ele não depende do raio

de deslocamento nem da distância entre as duas rodas.

4.1.2.3 Deslocamento angular

O deslocamento angular ($\Delta\theta_c$) do centro de movimento do robô em cada instante pode ser calculado a partir do deslocamento linear e do raio do movimento circular uniforme. Usando-se a relação da equação 1, tem-se que:

$$\boxed{\Delta\theta_c = \frac{\Delta x_C}{R}} \quad (29)$$

Onde Δx_C é o deslocamento linear do robô (equação 25) e R é o raio do movimento circular uniforme (equação 18).

4.1.2.4 Casos especiais

Há dois casos especiais que devem ser considerados no cálculo do deslocamento (a partir dos dados dos encoders) do centro de movimento do robô. O primeiro é quando as duas rodas têm deslocamento igual ($\Delta x_E = \Delta x_D$). O raio do movimento circular (equação 18) neste caso é:

$$R = h \cdot \frac{\Delta x_E + \Delta x_D}{\Delta x_E - \Delta x_D} = h \cdot \frac{2 \cdot \Delta x_E}{0} \rightarrow \infty \quad (32)$$

O raio tende a infinito, o que implica que o deslocamento angular (equação 29) seja:

$$\Delta\theta_c = \frac{\Delta x_C}{R} = \frac{\Delta x_C}{\infty} \rightarrow 0 \quad (33)$$

Já o deslocamento linear (equação 25) é:

$$\Delta x_C = \frac{\Delta x_E + \Delta x_D}{2} = \frac{2\Delta x_E}{2} = \Delta x_E \quad (34)$$

Isso corresponde à realidade, uma vez que quando as rodas têm deslocamentos iguais o robô está se deslocando sem fazer curvas. Não há deslocamento angular, portanto, e o deslocamento linear do centro de movimento é igual ao deslocamento de cada roda.

O segundo caso especial ocorre quando os deslocamento têm módulos iguais, porém sentidos contrários (ou seja, $\Delta x_E = -\Delta x_D$). O raio nesse caso é:

$$R = h \cdot \frac{\Delta x_E + \Delta x_D}{\Delta x_E - \Delta x_D} = h \cdot \frac{\Delta x_E - \Delta x_E}{\Delta x_E + \Delta x_E} = 0 \quad (35)$$

O deslocamento linear (equação 25) é:

$$\Delta x_C = \frac{\Delta x_E + \Delta x_D}{2} = \frac{\Delta x_E - \Delta x_E}{2} = 0 \quad (36)$$

Esse valor corresponde à realidade, pois quando as rodas se deslocam em sentidos contários, e na mesma quantidade, o centro de movimento do robô não se desloca linearmente, mas apenas muda seu ângulo. Usando-se a equação 29, tenta-se calcular o valor do deslocamento angular:

$$\Delta \theta_c = \frac{\Delta x_C}{R} = \frac{0}{0} \quad (37)$$

O valor obtido é indeterminado quando usa-se essa equação. Porém, analisando-se a natureza deste caso especial, pode ser notado que há um movimento circular cujo centro é o ponto médio entre as rodas (que é o centro de movimento do robô). O raio do MCU é a distância h entre uma roda e o centro do robô, e o deslocamento ao longo da circunferência é o deslocamento de qualquer uma das rodas. Portanto, a equação 1 pode ser utilizada, isolando-se a variável θ , para determinar o deslocamento angular do robô:

$$\Delta \theta_c = \frac{\Delta x_E}{h} \quad (38)$$

4.1.2.5 Considerações sobre a notação utilizada

A notação utilizada no decorrer do texto para representar o estado de uma variável em certo instante discreto de tempo é um número subscrito entre parênteses. Por exemplo, a posição \vec{P} do robô em um instante de tempo n é representado por: $\vec{P}_{(n)}$.

Outro aspecto presente no decorrer do texto, que vale ser ressaltado para que haja melhor entendimento das demonstrações, é o fato de que $\Delta x_{(n)}$ é o deslocamento absoluto do robô no intervalo de tempo discreto de $(n - 1)$ até n .

4.1.2.6 Velocidade e aceleração

A velocidade e aceleração lineares do centro de movimento do robô podem ser calculadas por derivação numérica do deslocamento e velocidade em cada intervalo de tempo. Em cada intervalo discreto n :

$$v_{c(n)} = \frac{\Delta x_{c(n)}}{t_{(n)} - t_{(n-1)}} \quad (39)$$

$$a_{c(n)} = \frac{v_{c(n)} - v_{c(n-1)}}{t_{(n)} - t_{(n-1)}} \quad (40)$$

A velocidade e aceleração angulares podem ser também obtidas por derivação numérica, considerando-se que o raio do movimento circular uniforme do robô é constante dentro do intervalo considerado. Em cada intervalo discreto n :

$$\omega_{c(n)} = \frac{\Delta \theta_{c(n)}}{t_{(n)} - t_{(n-1)}} \quad (41)$$

$$\alpha_{c(n)} = \frac{\omega_{c(n)} - \omega_{c(n-1)}}{t_{(n)} - t_{(n-1)}} \quad (42)$$

4.2 ACELERÔMETRO E GIROSCÓPIO

O acelerômetro e o giroscópio são utilizados para aumentar a confiabilidade dos dados de deslocamento do robô em caso de escorregamento das rodas.

Como definido na seção 2.6.1, é recebido um valor de 2 bytes para cada eixo do acelerômetro. A faixa de funcionamento do acelerômetro está configurada em ± 2 g, logo a sensibilidade pelo *datasheet* é de 16384 LSB/g. Portanto, o valor de aceleração pode ser obtido pela fórmula:

$$a = \frac{\text{valorMedido}}{16384} \cdot g \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (43)$$

Onde g é a aceleração da gravidade (9,80665 [m/s²]).

Para cada eixo do giroscópio, também é obtido um valor de 2 bytes. A faixa de funcionamento do giroscópio está configurada em ± 250 graus/s, logo a sensibilidade pelo *datasheet*

é de 131 LSB/(graus/s). Portanto, o valor de velocidade angular pode ser obtida pela fórmula:

$$\omega = \frac{\text{valorMedido}}{131} \text{ [graus/s]} = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\text{valorMedido}}{131} \text{ [rad/s]} \quad (44)$$

A princípio, apenas o eixo Y do acelerômetro (voltado para trás do robô) e o eixo Z do giroscópio (positionado no sentido baixo/cima, e com ângulos crescentes no sentido anti-horário) serão utilizados para mapeamento, visto que os dados poderão ser dessa forma comparados facilmente com os dados obtidos pelos encoders. Na Figura 29 está explicitada a disposição dos eixos do acelerômetro e giroscópio, extraída do *datasheet* do MPU-6050. Para que uma comparação de acelerações (encoders vs acelerômetro) e velocidades angulares (encoders vs. giroscópio) seja realizada, o circuito integrado deve ser posicionado no centro de movimento do robô (ponto médio entre as rodas).

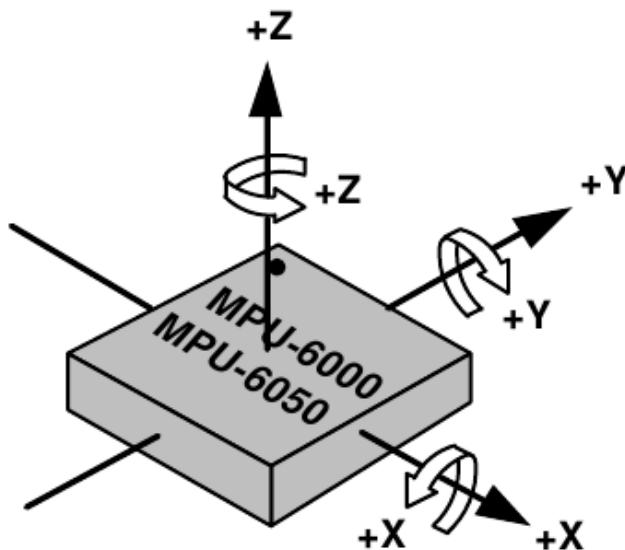


Figura 29: Eixos do acelerômetro e giroscópio.

Fonte: Datasheet do MPU-6050

Na prática, observou-se que o acelerômetro e o giroscópio possuem um *offset* inicial, mesmo com o robô estando parado. O valor desse *offset* deve ser descontado de todas as medidas obtidas para que os valores finais correspondam à realidade. Outro aspecto a ressaltar é que como o eixo Y do acelerômetro é voltado para trás do robô, os valores devem ser utilizado com sinal invertido. O eixo Z do giroscópio também deve ser utilizado com o sinal trocado,

pois (como explicitado no início do capítulo) o sistema de coordenadas utilizado neste projeto implica em que os ângulos crescem em sentido horário.

Para determinar a velocidade e deslocamento lineares a partir dos dados do acelerômetro, efetua-se uma integração numérica (simples e dupla) da aceleração linear em cada intervalo discreto n :

$$v_{(n)} = v_{(n-1)} + a_{(n)} \cdot (t_{(n)} - t_{(n-1)}) \quad (45)$$

$$\Delta x_{(n)} = v_{(n)} \cdot (t_{(n)} - t_{(n-1)}) \quad (46)$$

Para determinar o deslocamento angular a partir dos dados do giroscópio, efetua-se uma integração numérica (simples) da velocidade angular em cada intervalo discreto n :

$$\Delta \theta_{(n)} = \Delta \theta_{(n-1)} + \omega_{(n)} \cdot (t_{(n)} - t_{(n-1)}) \quad (47)$$

4.3 ALGORITMO DE POSICIONAMENTO

O algoritmo proposto para determinação da posição do robô em cada instante de tempo, utilizando os vários sensores (encoders, acelerômetro e giroscópio), está explicitado nesta seção. Para cada amostra dos sensores que é recebida o algoritmo efetua os seguintes passos:

1. A partir das leituras dos encoders (Δx_E e Δx_D), usando as equações 25 e 29, calcular deslocamento linear (Δx_C , em metros) e angular ($\Delta \theta_c$, em rad) do centro de movimento do robô.
2. Derivar duas vezes o deslocamento linear (Δx_C), usando as equações 39 e 40 para obter aceleração linear (a_C , em m/s^2), e derivar uma vez o deslocamento angular (θ_C), usando a equação 41, para obter a velocidade angular (ω_C , em rad/s).
3. Comparar a aceleração linear (a_C) e a velocidade angular (ω_C), obtidas com os encoders, com as leituras do acelerômetro (a_a) e giroscópio (ω_g). Caso as diferenças dos valores passem de limiares L_a e L_ω (determinados experimentalmente), é provável que um escorregamento de rodas tenha ocorrido. Especificar com base nas comparações pesos p_{a_c} e p_{a_a} para a aceleração linear (encoders vs. acelerômetro) e pesos p_{ω_c} e p_{ω_g} para velocidade angular (encoders vs. giroscópio), dando mais prioridade ao acelerômetro e giroscópio caso escorregamentos sejam detectados.

4. Calcular com base nos pesos obtidos anteriormente a aceleração linear final (a) e a velocidade angular final (ω), de acordo com as equações 48 e 49.

$$a = p_{a_c} \cdot a_c + p_{a_g} \cdot a_a \quad (48)$$

$$\omega = p_{\omega_c} \cdot \omega_c + p_{\omega_g} \cdot \omega_g \quad (49)$$

5. Usando-se as equações 45 e 46, integrar duplamente a aceleração linear (a) para obter o deslocamento linear (Δx) do robô, e a partir da equação 47 integrar uma vez a velocidade angular (ω) para obter o deslocamento angular ($\Delta \theta$) do robô.
6. A partir das equações 50 e 51 explicitadas abaixo, calcular a nova posição ($\vec{P}_{(n)}$) do robô, e a partir da equação 52 calcular o novo ângulo $\theta_{(n)}$ do robô. Decompondo-se o vetor posição (\vec{P}) em suas componentes P_x e P_y , tem-se que no intervalo discreto n :

$$P_{x(n)} = P_{x(n-1)} + \Delta x \cdot \cos(\theta_{(n-1)}) \quad (50)$$

$$P_{y(n)} = P_{y(n-1)} + \Delta x \cdot \sin(\theta_{(n-1)}) \quad (51)$$

$$\theta_{(n)} = \theta_{(n-1)} + \Delta \theta \quad (52)$$

Um ponto importante a ressaltar é que os pesos calculados no passo 3 são utilizados (a princípio) como sendo 0 ou 1. Ou seja, se escorregamentos forem detectados nas rodas os pesos p_{a_g} e p_{ω_g} devem valer 1, e p_{a_c} e p_{ω_c} devem valer 0. Dessa forma os dados do acelerômetro e giroscópio são utilizados (nesses momentos específicos) em detrimento dos dados dos encoders.

4.4 SENsores INFRA-VERMELHOS

Os sensores infra-vermelhos são usados para detectar obstáculos próximos ao robô (de 30 a 150 cm de distância). Na Figura 30 está explicitada uma representação de um sensor infra-vermelho detectando um obstáculo. Na figura estão presentes os nomes das variáveis utilizadas nos cálculos. Como já explicado no começo do capítulo, o sistema de coordenadas utilizado nesse projeto possui o eixo Y invertido. Portanto, os ângulos crescem no sentido horário e não no anti-horário como seria o convencional. Por essa razão, o ângulo “-theta(n)” da figura – que nesse caso específico está em sentido anti-horário em relação ao eixo X (horizontal) do mapa – é negativo. O ângulo “thetaIR” é medido com com relação ao eixo X do robô (e não do mapa), e na figura ele é positivo pois está em sentido horário com relação a esse eixo.

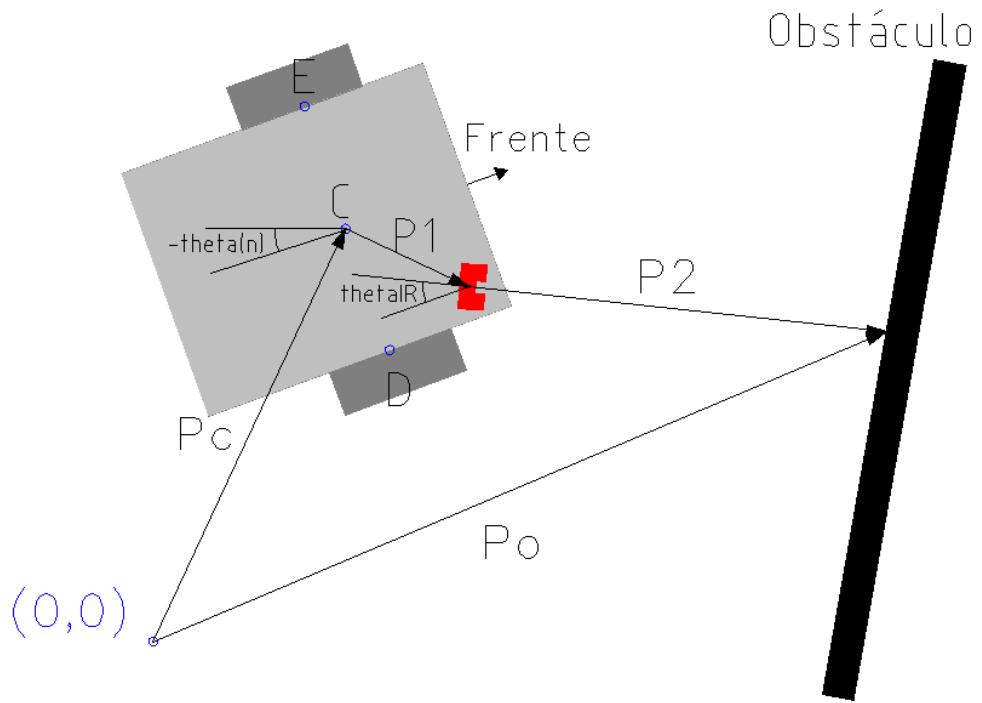


Figura 30: Representação do robô e um sensor infra-vermelho detectando um obstáculo (visão superior).

Para obter a posição em que um obstáculo detectado está no mapa, primeiramente deve-se obter a distância entre o obstáculo e o sensor infra-vermelho. Como explicitado em (MARIN et al., 2012), o valor x recebido em 1 byte do sensor pode ser convertido para a distância d em centímetros pela fórmula (obtida por interpolação polinomial):

$$d = 3,6404 \cdot 10^{-7}x^4 - 2,4435 \cdot 10^{-4}x^3 + 6,0732 \cdot 10^{-2}x^2 - 6,8962x + 339,361 \quad (53)$$

Sendo \vec{P}_C o vetor que sai da origem e vai até o centro de movimento do robô, \vec{P}_1 o vetor que vai do centro do robô até o sensor, e \vec{P}_2 o vetor que vai do sensor até o ponto do obstáculo detectado, faz-se a seguinte soma vetorial para encontrar o vetor \vec{P}_O , que é a posição do obstáculo no mapa:

$$\vec{P}_O = \vec{P}_C + \vec{P}_1 + \vec{P}_2 \quad (54)$$

O vetor \vec{P}_C pode ser facilmente determinado de acordo com a equação abaixo. Sendo $\vec{P}_{(n)}$ a última posição do robô (intervalo discreto n):

$$\vec{P}_C = \vec{P}_{(n)} \quad (55)$$

O vetor \vec{P}_1 é o vetor que vai do centro de movimento do robô até o sensor infra-vermelho. Sendo \vec{P}_{IR} que vai do centro do robô até o sensor (este vetor é especificado nas configurações iniciais, supondo que o robô não esteja rotacionado), e $\theta_{(n)}$ o ângulo em que o robô está orientado em sua última posição (instante discreto n):

$$|\vec{P}_1| = |\vec{P}_{IR}| \quad (56)$$

$$\phi \left\{ \vec{P}_1 \right\} = \phi \left\{ \vec{P}_{IR} \right\} + \theta_{(n)} \quad (57)$$

O vetor \vec{P}_2 é o vetor que vai do sensor infra-vermelho até o obstáculo. Sendo d a distância detectada pelo sensor, θ_{IR} o ângulo em que o sensor infra-vermelho está posicionado relativamente ao robô (este ângulo é especificado nas configurações iniciais, supondo que o robô não esteja rotacionado), e tendo $\theta_{(n)}$ o mesmo significado que na equação anterior:

$$|\vec{P}_2| = d \quad (58)$$

$$\phi \left\{ \vec{P}_2 \right\} = \theta_{IR} + \theta_{(n)} \quad (59)$$

5 TESTES

Nesta seção serão expostos os testes realizados na prática com o robô. Durante os testes foi possível chegar ao ponto de utilizar com sucesso o giroscópio para correção de erros de escorregamento e de falhas de leituras dos encoders, como explicado a seguir.

5.1 PRIMEIRO TESTE

O primeiro teste bem-sucedido foi realizado utilizando com o *layout* do ambiente da Figura ???. O robô fez um trajeto em sentido anti-horário no ambiente retangular, voltando à posição inicial (0,0) ao final do caminho. Os encoders sofreram imprecisões nas medições em certos momentos do trajeto. No gráfico da Figura 35 está explicitada uma comparação entre as velocidades angulares obtidas com os encoders e com o eixo Z do giroscópio. Vê-se que o giroscópio provedeu medidas razoavelmente confiáveis no decorrer do tempo.

Na Figura 31 está presente o mapa produzido a partir desse teste somente utilizando os dados dos encoders, e na Figura 32 está presente um mapa que foi produzido utilizando as leituras do giroscópio para correção de erros (o limiar utilizado foi $L_\omega = 0.025$ [rad/s]). Vê-se que o trajeto do robô pôde ser determinado com maior exatidão no segundo mapa, usando-se o giroscópio. A posição final do robô ficou próxima da origem, e o mapa ficou mais semelhante à forma retangular que corresponde à realidade.

O acelerômetro, por outro lado, não provou-se eficaz para o fim de correção de erros, ao menos não da forma os dados estão sendo atualmente obtidos e tratados. A obtenção de dados é feita a partir de amostras instantâneas a 3.89 Hz. Na Figura 36 está explicitada uma comparação (produzida a partir desse mesmo teste) das acelerações lineares obtidas com os encoders e com o eixo Y do acelerômetro. Vê-se que há grandes diferenças entre as acelerações, e que o acelerômetro provê medidas bastante discrepantes. No escopo do projeto (tendo em vista as limitações de tempo) não foi possível trabalhar mais à fundo com os dados do acelerômetro. Porém, deixa-se a possibilidade para trabalhos futuros. Como alternativa de tratamento desses dados, possivelmente possa ser utilizada uma taxa de amostragem maior para o acelerômetro,

utilizando um processo de filtragem para reduzir os ruídos da aceleração. Na Figura 34 está presente um mapa que foi gerado somente a partir das amostras do acelerômetro e giroscópio, exposto para fins de comparação. A trilha em azul representa o caminho calculado que o robô supostamente percorreu de acordo com esses sensores. É visível que os resultados obtidos fogem muito da realidade.

Um aspecto que vale ressaltar é que nos dois primeiros mapas foi utilizada uma filtragem de média móvel de 3 períodos para os sensores IR. No mapa da Figura 33, exposto para comparação, não foi utilizada a filtragem por média móvel.

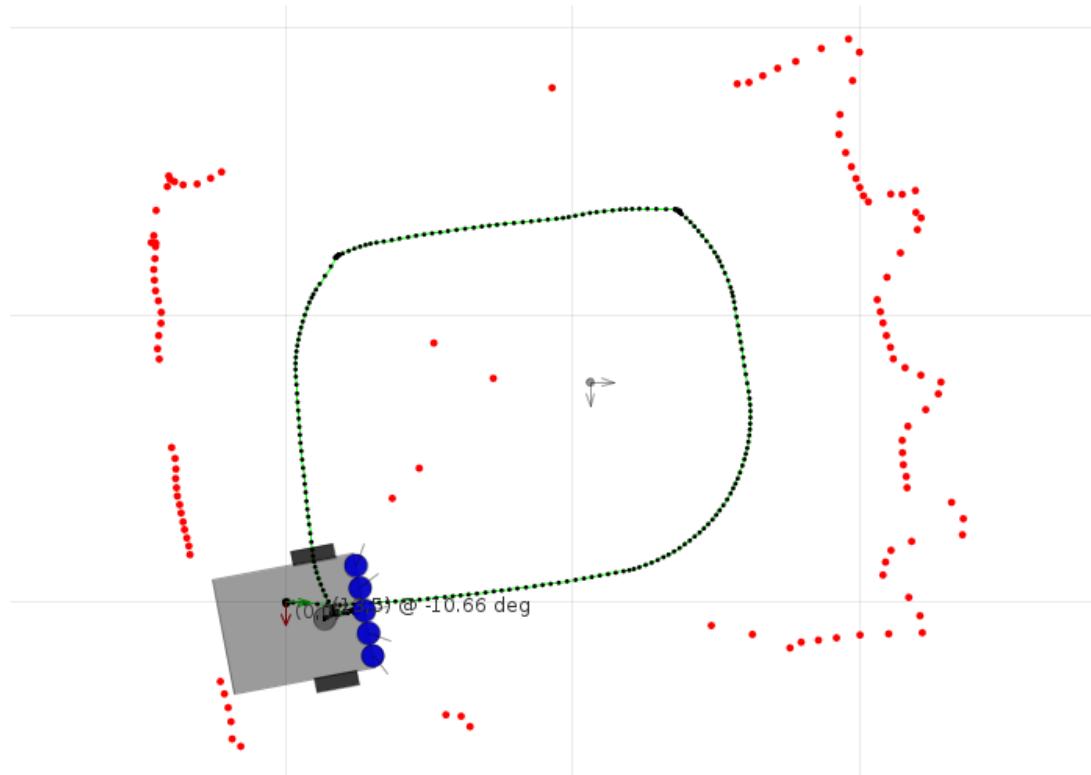


Figura 31: Mapa gerado no primeiro teste a partir dos dados dos encoders usando filtragem por média móvel de 3 períodos para sensores IR.

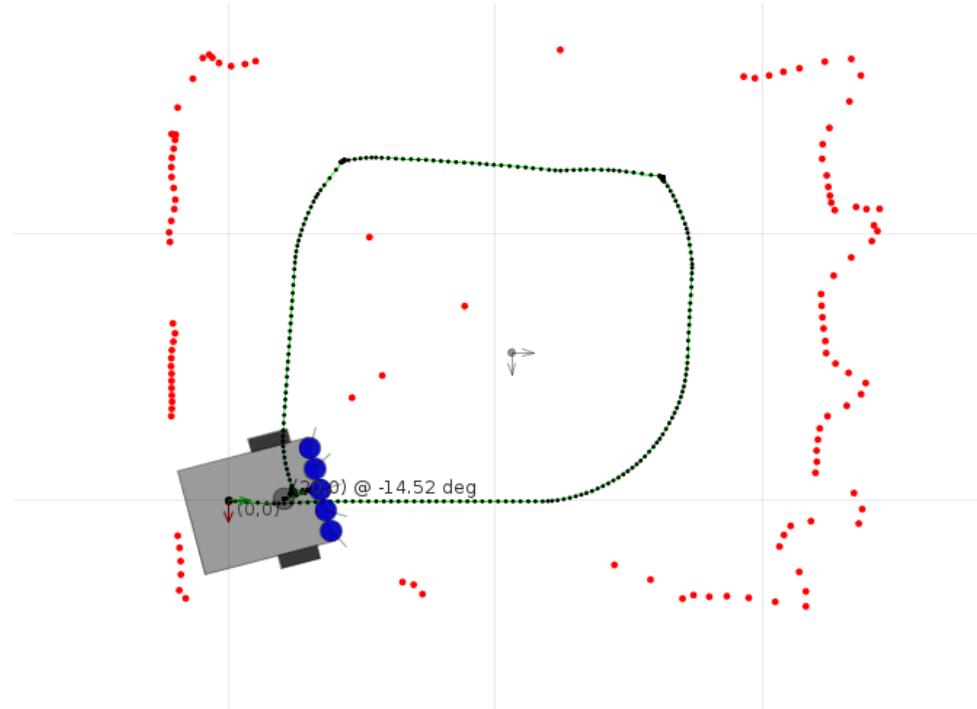


Figura 32: Mapa gerado no primeiro teste a partir dos dados dos encoders, com correção de erros pelo giroscópio ($L_\omega = 0.0025$ [rad/s]) e filtragem por média móvel de 3 períodos para sensores IR.

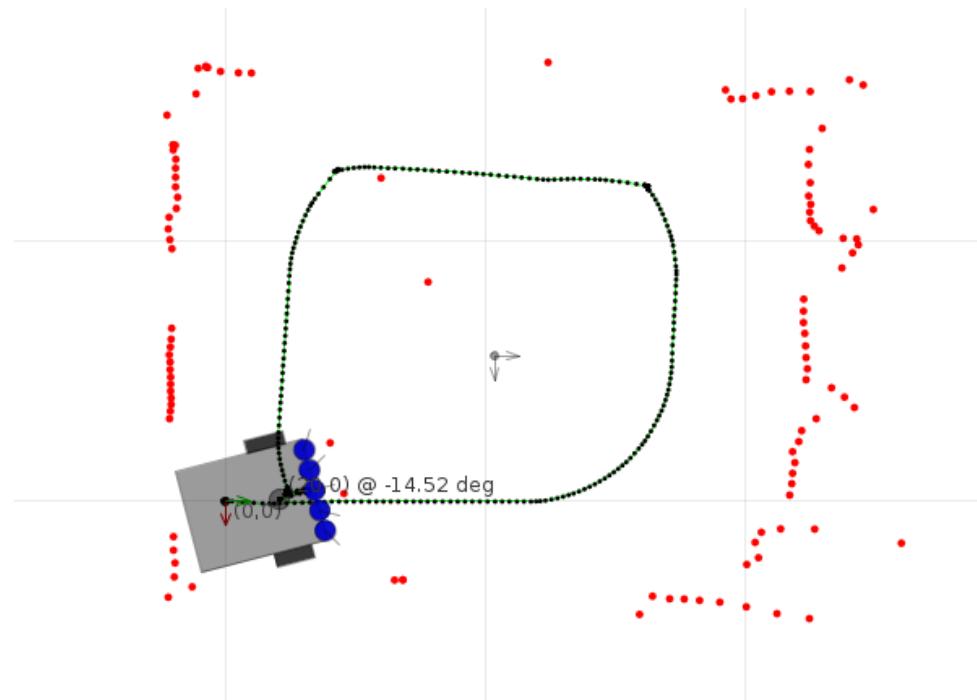


Figura 33: Mapa gerado no primeiro teste a partir dos dados dos encoders, com correção de erros pelo giroscópio ($L_\omega = 0.0025$ [rad/s]) sem filtragem por média móvel dos sensores IR.

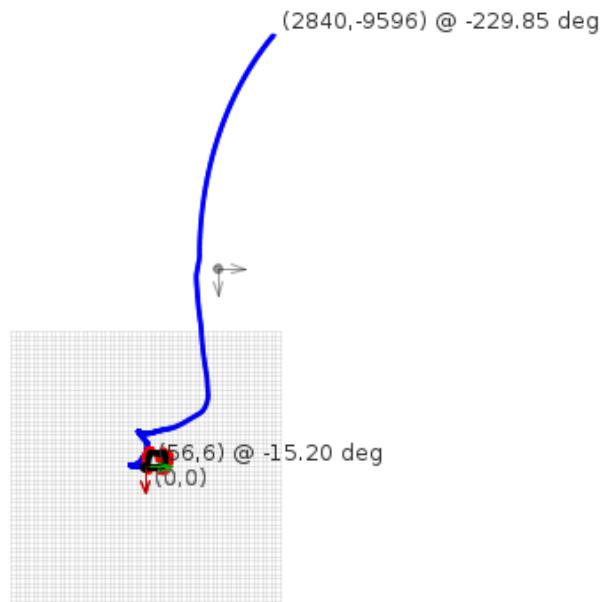


Figura 34: Trilha do robô no primeiro teste calculada somente a partir dos dados do acelerômetro e do giroscópio.

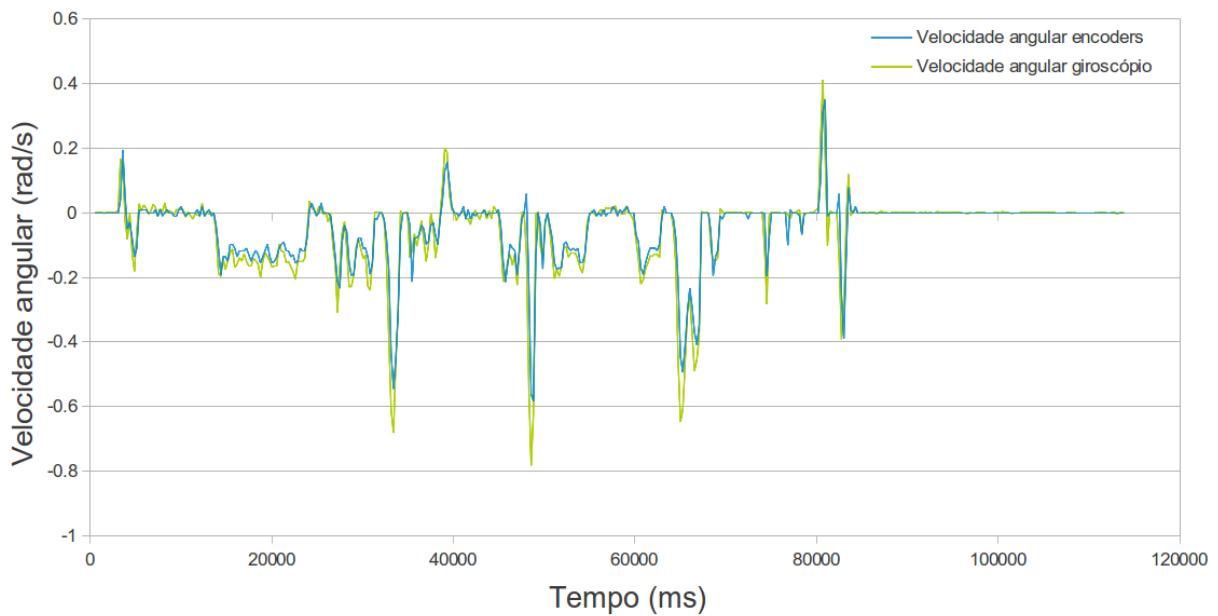


Figura 35: Gráfico comparativo de velocidades angulares obtidas no primeiro teste.

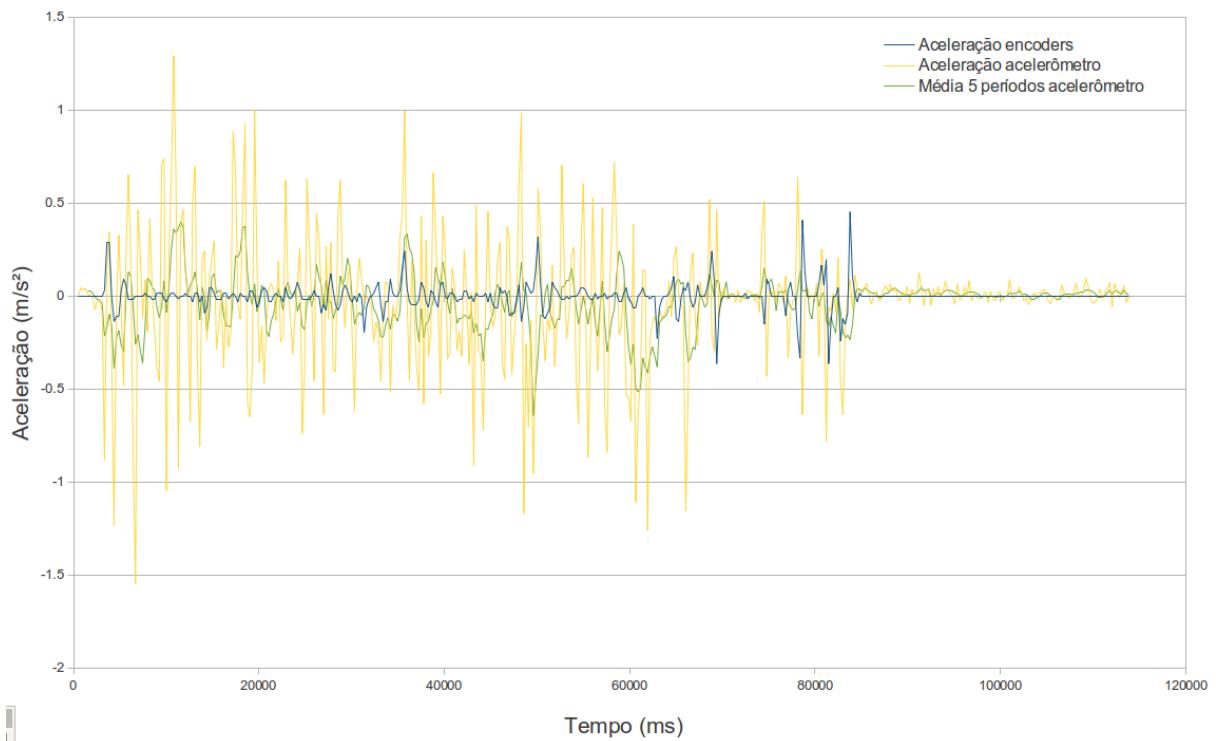


Figura 36: Gráfico comparativo de acelerações obtidas no primeiro teste.

5.2 SEGUNDO TESTE

O segundo teste foi realizado em um corredor de 2,25m de largura, no ambiente da Figura 37. A mochila que pode ser vista na foto foi posicionada no centro do corredor para que a detecção dela fosse feita pelo robô. Na Figura 38, está presente o mapa produzido apenas com dados dos encoders. Vê-se que eles sofreram erros de medição nas curvas. Na Figura 39, pode-se ver um mapa produzido com correções desses erros pelo giroscópio, usando um limiar $L_\omega = 0.0025$ [rad/s].

Nos mapas das Figuras 38 e 39, não foi utilizado nenhum tipo de filtragem (além do passa-faixa de 30 a 150cm) para os sensores infra-vermelhos. O uso de média móvel de 3 períodos (Figura 40) não resultou em diferenças muito consideráveis, e a de 8 períodos (Figura 41) gerou resultados visivelmente piores.

Percebe-se nesse teste, novamente, que o giroscópio foi confiável nas medições de velocidade angular. Já o acelerômetro, assim como no teste anterior, não pôde ser utilizado para correção de erros (pelos mesmos motivos já apresentados). A Figura 42 expõe a trilha do robô gerada apenas com os dados do acelerômetro e do giroscópio. Percebe-se que os resultados obtidos fogem muito da realidade.



Figura 37: Ambiente utilizado no segundo teste.

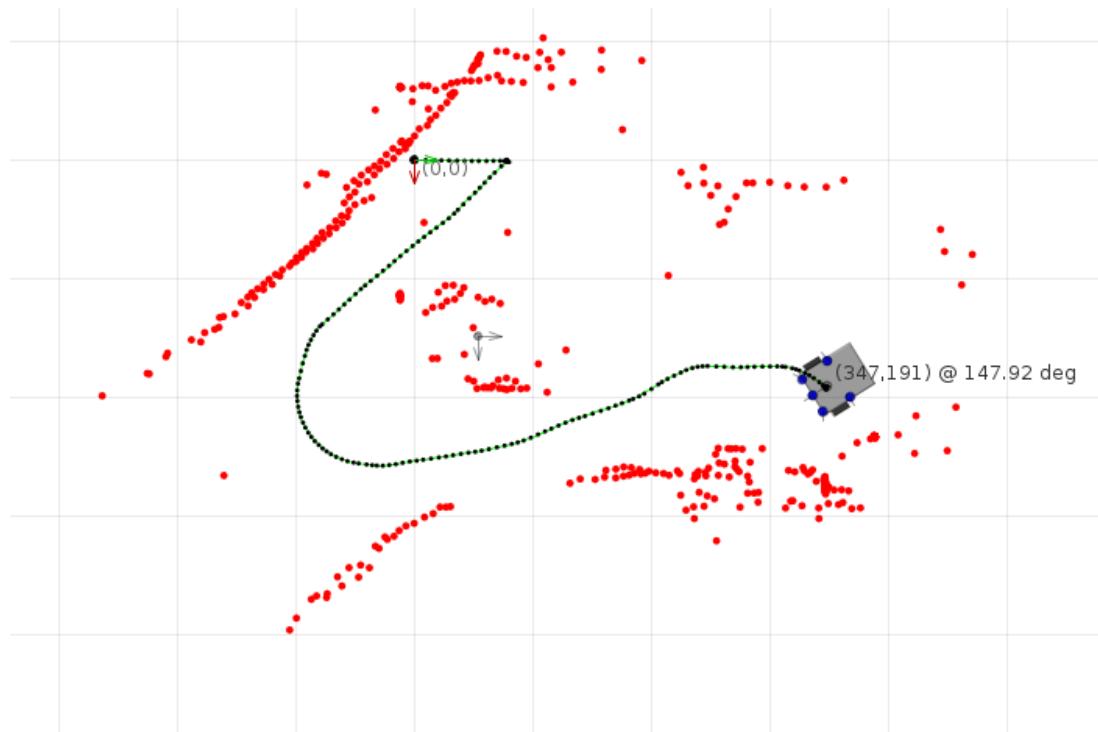


Figura 38: Mapa gerado no segundo teste a partir dos dados dos encoders.

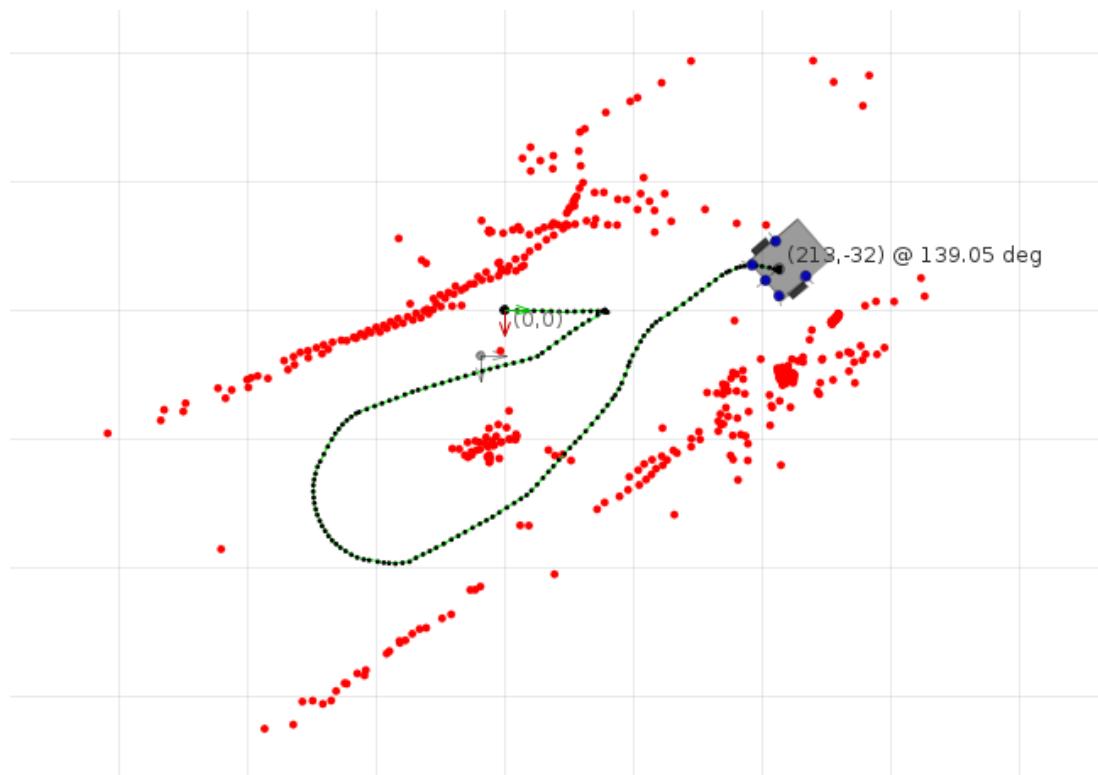


Figura 39: Mapa gerado no segundo teste a partir dos dados dos encoders, com correção de erros pelo giroscópio ($L_\omega = 0.0025$ [rad/s]).

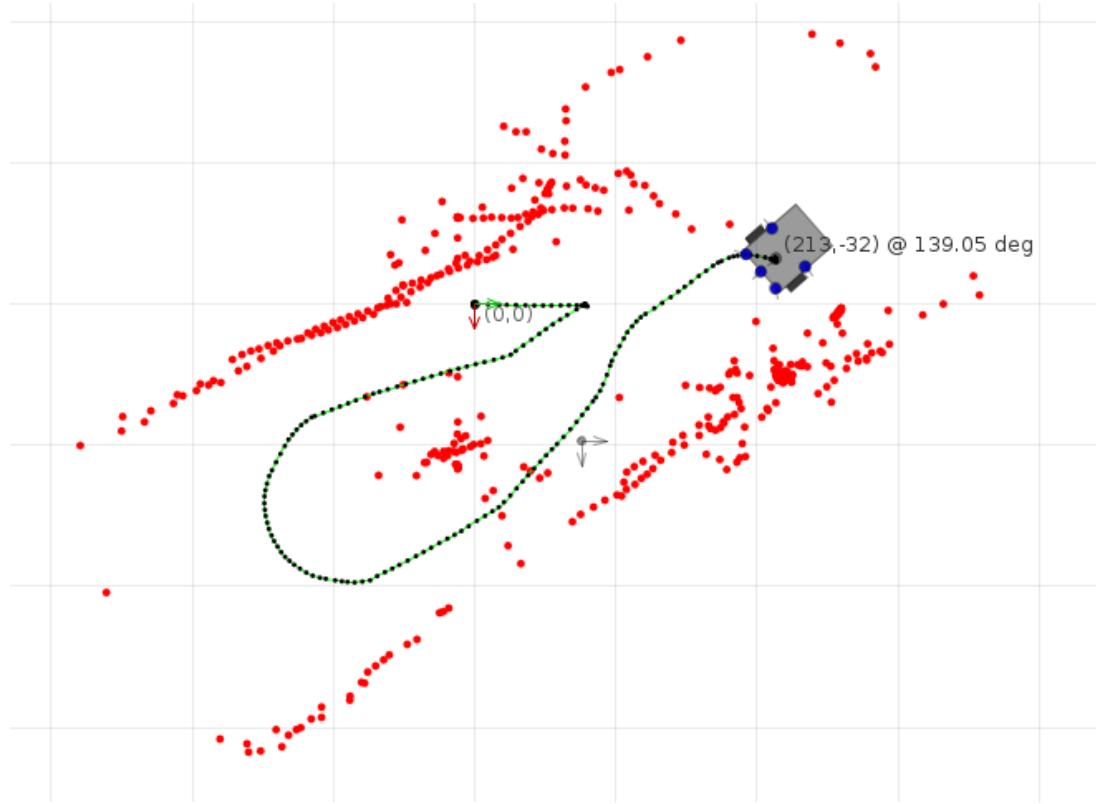


Figura 40: Mapa gerado no primeiro teste a partir dos dados dos encoders, com correção de erros pelo giroscópio ($L_\omega = 0.0025$ [rad/s]) e filtragem por média móvel de 3 períodos para sensores IR.

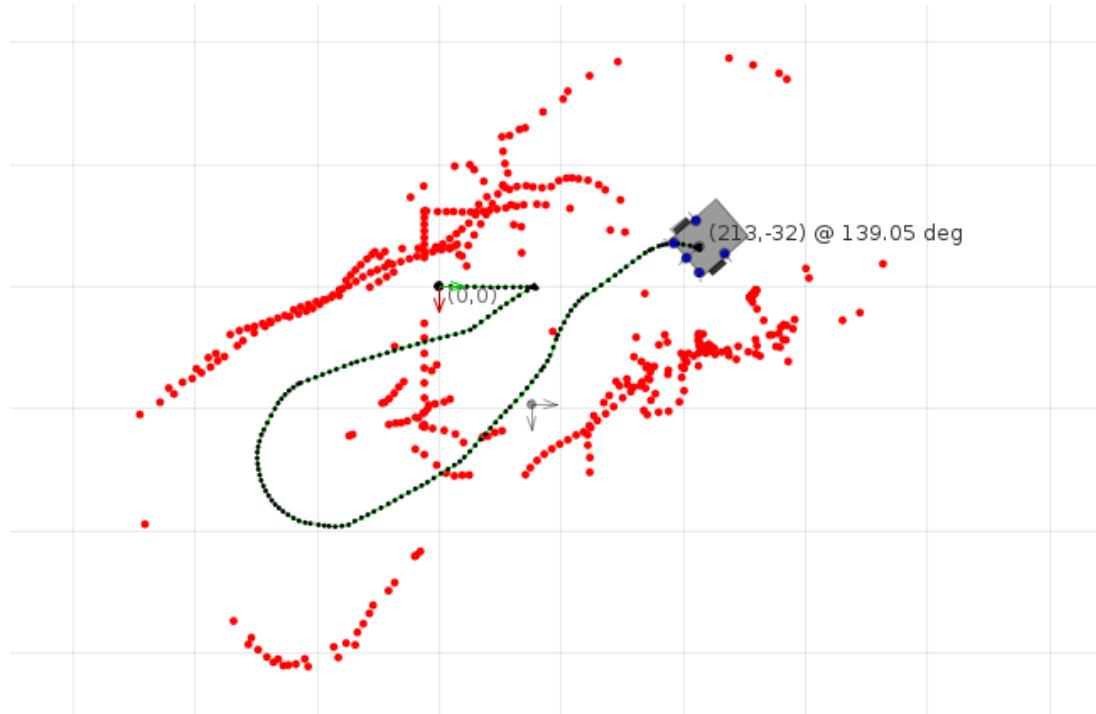


Figura 41: Mapa gerado no primeiro teste a partir dos dados dos encoders, com correção de erros pelo giroscópio ($L_\omega = 0.0025$ [rad/s]) e filtragem por média móvel de 8 períodos para sensores IR.

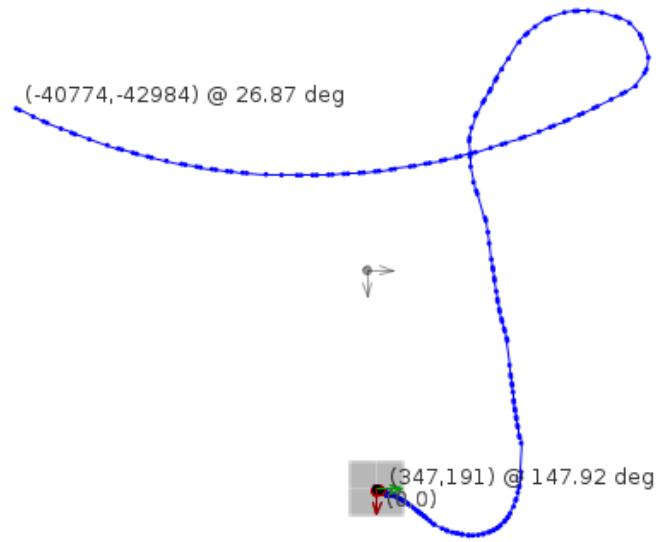


Figura 42: Trilha do robô no segundo teste calculada somente a partir dos dados do acelerômetro e do giroscópio.

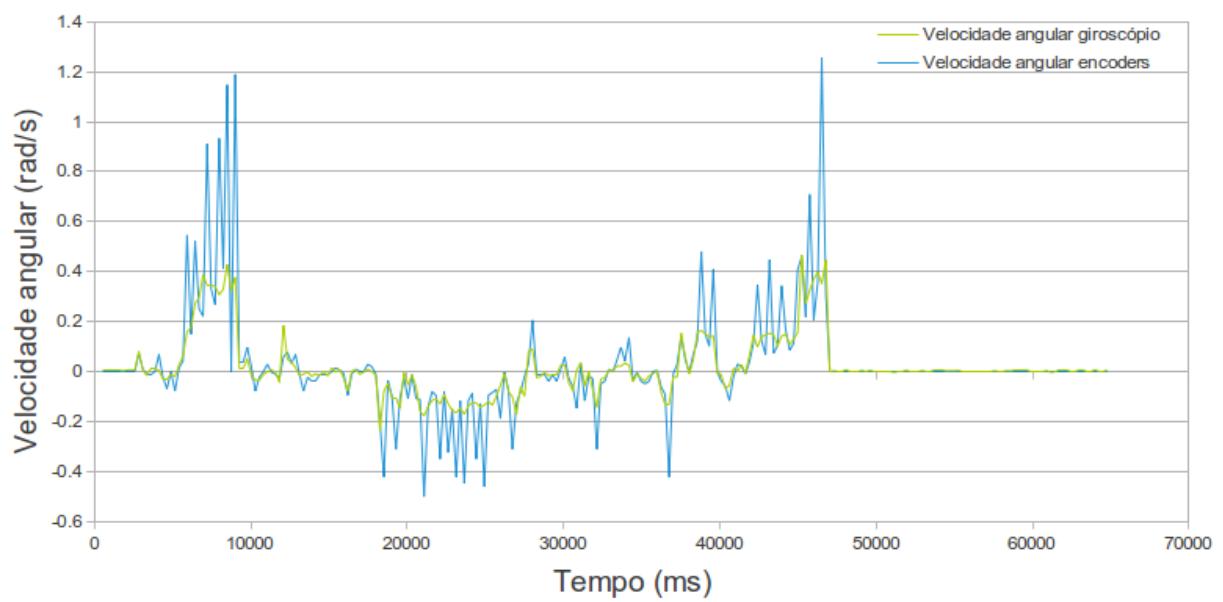


Figura 43: Gráfico comparativo de velocidades angulares obtidas no segundo teste.

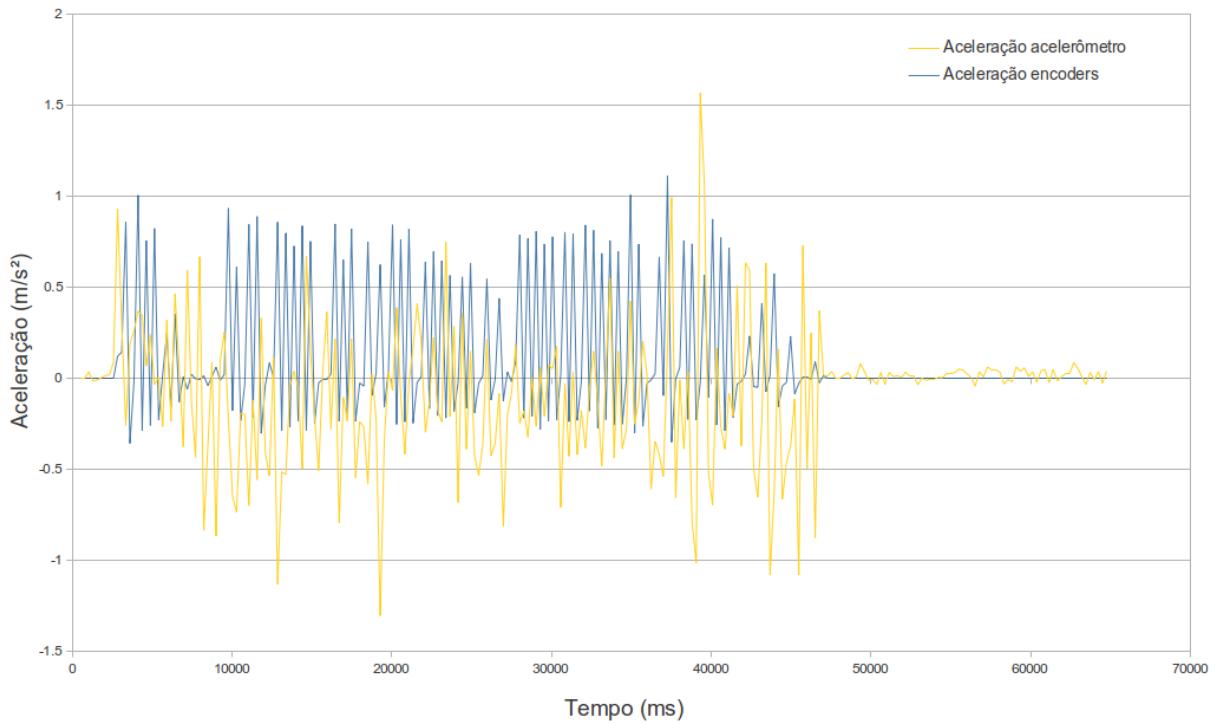


Figura 44: Gráfico comparativo de acelerações obtidas no segundo teste.

5.3 TERCEIRO TESTE

O terceiro teste foi realizado partindo-se de um corredor de 2,25m de largura (à direita na Figura), saindo dele e voltando ao ponto de partida novamente. O ambiente está representado na Figura 45. Na Figura 46, está presente o mapa produzido apenas com dados dos encoders. Vê-se que eles sofreram erros de medição nas curvas, assim como no teste anterior. Na Figura 47, pode-se ver um mapa produzido com correções desses erros pelo giroscópio, usando um limiar $L_\omega = 0.0025$ [rad/s].

Nos mapas das Figuras 46 e 47, não foi utilizado nenhum tipo de filtragem (além do passa-faixa de 30 a 150cm) para os sensores infra-vermelhos. O uso de média móvel de 5 períodos (Figura 48), a melhor configuração encontrada, resultou em leves melhorias na qualidade do mapa.

Percebe-se nesse teste, novamente, que o giroscópio foi confiável nas medições de velocidade angular. Já o acelerômetro, assim como nos testes anteriores, não pôde ser utilizado para correção de erros (pelos mesmos motivos já apresentados). A Figura 49 expõe a trilha do robô gerada apenas com os dados do acelerômetro e do giroscópio. Percebe-se novamente que os resultados obtidos fogem muito da realidade.



Figura 45: Ambiente utilizado no terceiro teste.

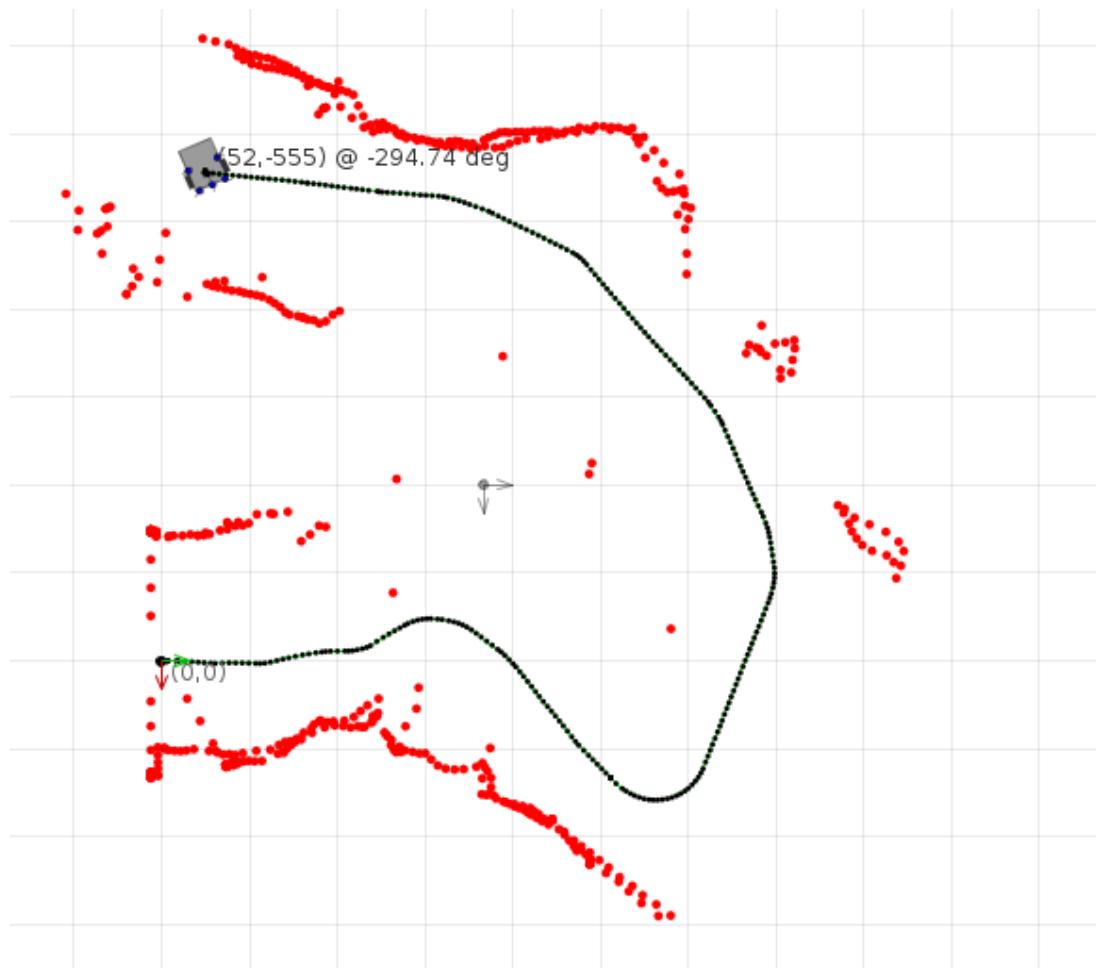


Figura 46: Mapa gerado no terceiro teste a partir dos dados dos encoders.

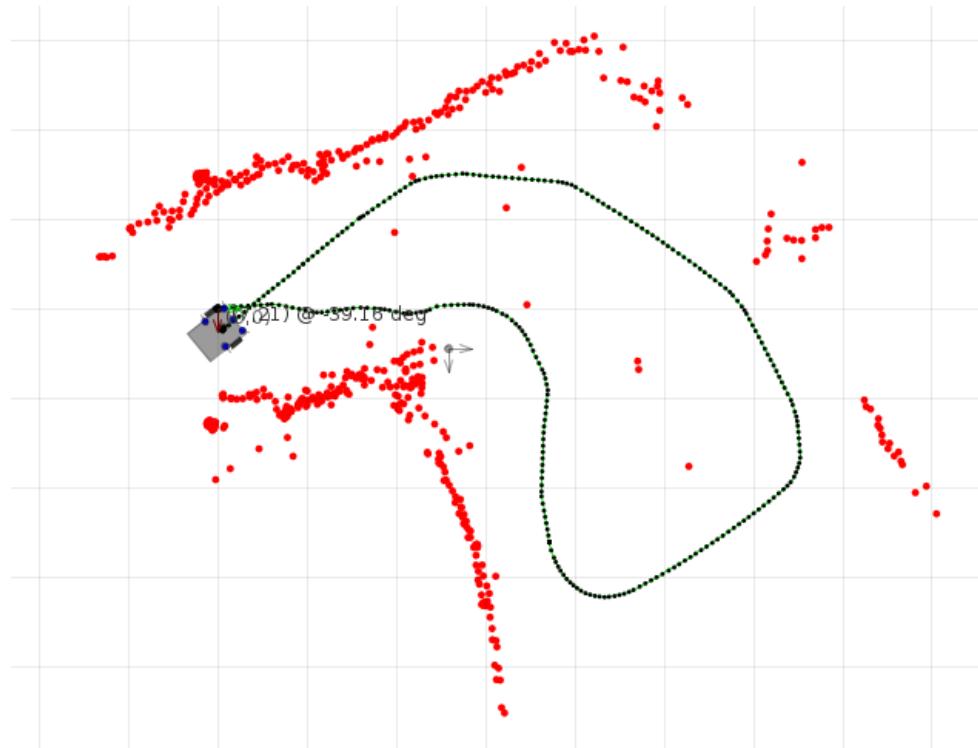


Figura 47: Mapa gerado no terceiro teste a partir dos dados dos encoders, com correção de erros pelo giroscópio ($L_\omega = 0.0025$ [rad/s]).

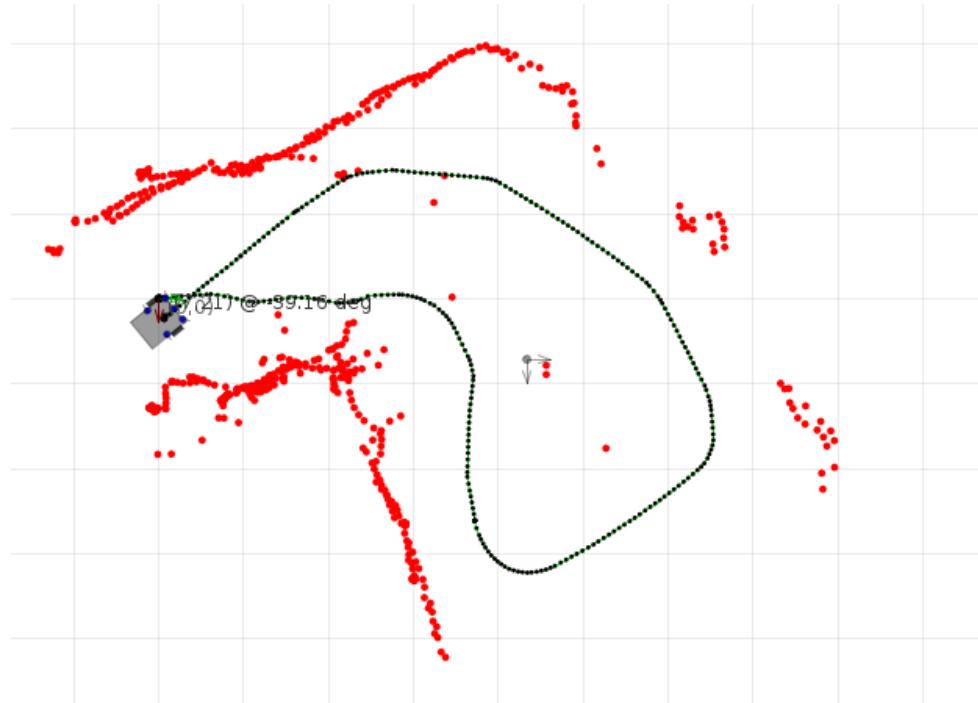


Figura 48: Mapa gerado no primeiro teste a partir dos dados dos encoders, com correção de erros pelo giroscópio ($L_\omega = 0.0025$ [rad/s]) e filtragem por média móvel de 5 períodos para sensores IR.



Figura 49: Trilha do robô no terceiro teste calculada somente a partir dos dados do acelerômetro e do giroscópio.

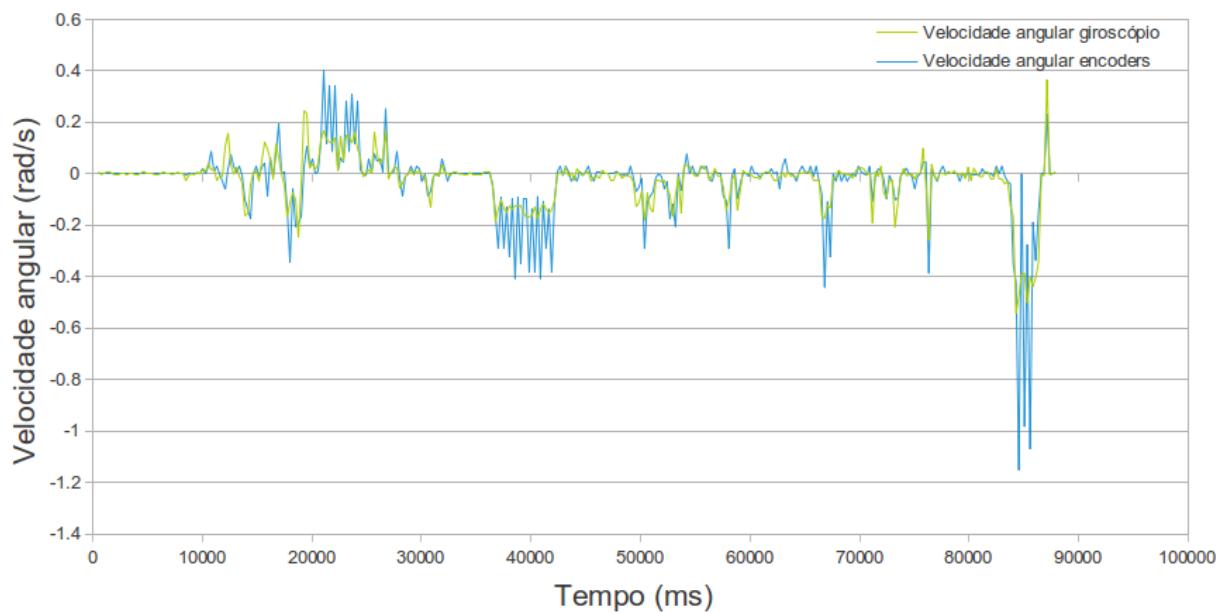


Figura 50: Gráfico comparativo de velocidades angulares obtidas no terceiro teste.

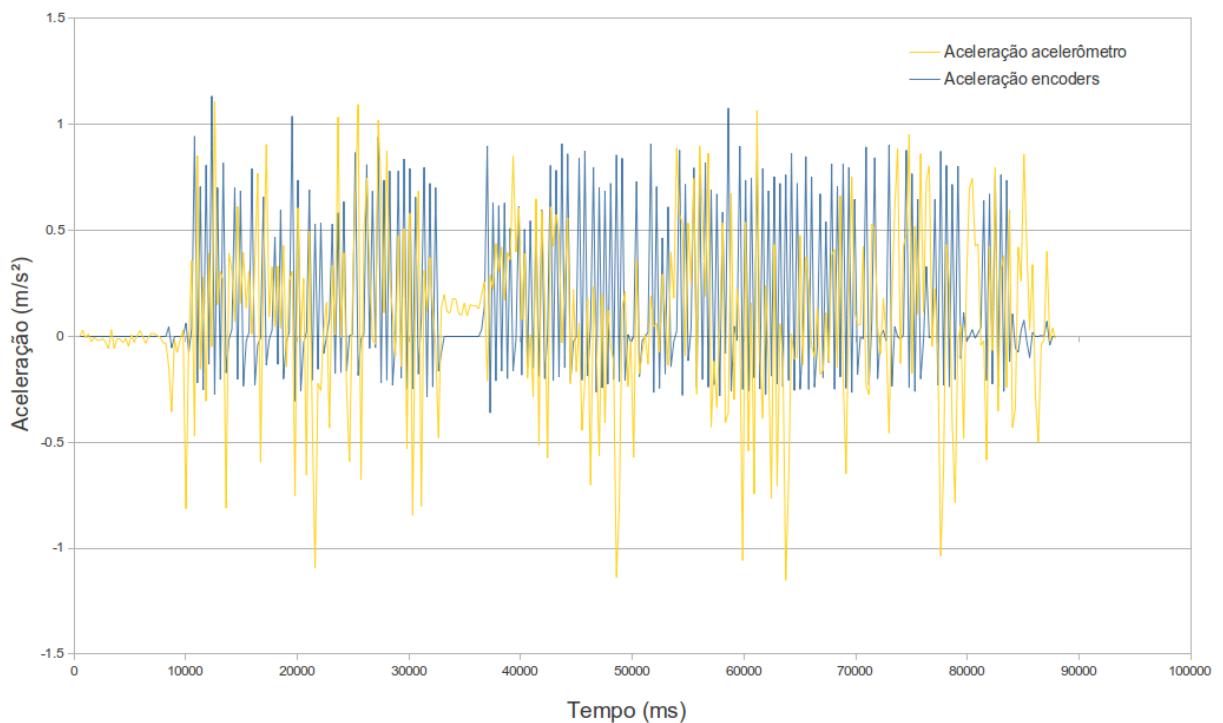


Figura 51: Gráfico comparativo de acelerações obtidas no terceiro teste.

5.4 QUARTO TESTE

O quarto teste foi realizado na extensão do corredor principal do terceiro andar dos blocos A, B, C e D da UTFPR campus Curitiba. O ambiente está representado na Figura 52. Na Figura 53, está presente o mapa produzido apenas com dados dos encoders. Vê-se que eles sofreram erros de medição, pois o mapa aparece com a forma curvada. Na Figura 54, pode-se ver um mapa produzido com correções desses erros pelo giroscópio, usando um limiar $L_\omega = 0.0025$ [rad/s].

Nos mapas das Figuras 53 e 54, não foi utilizado nenhum tipo de filtragem (além do passa-faixa de 30 a 150cm) para os sensores infra-vermelhos. O uso de média móvel de 5 períodos (Figura 55), a melhor configuração encontrada, resultou em leves melhorias na qualidade do mapa.

Percebe-se nesse teste, novamente, que o giroscópio foi confiável nas medições de velocidade angular. Já o acelerômetro, assim como nos testes anteriores, não pôde ser utilizado para correção de erros (pelos mesmos motivos já apresentados). A Figura ?? expõe a trilha do robô gerada apenas com os dados do acelerômetro e do giroscópio. Percebe-se novamente que os resultados obtidos fogem muito da realidade.



Figura 52: Ambiente utilizado no quarto teste.

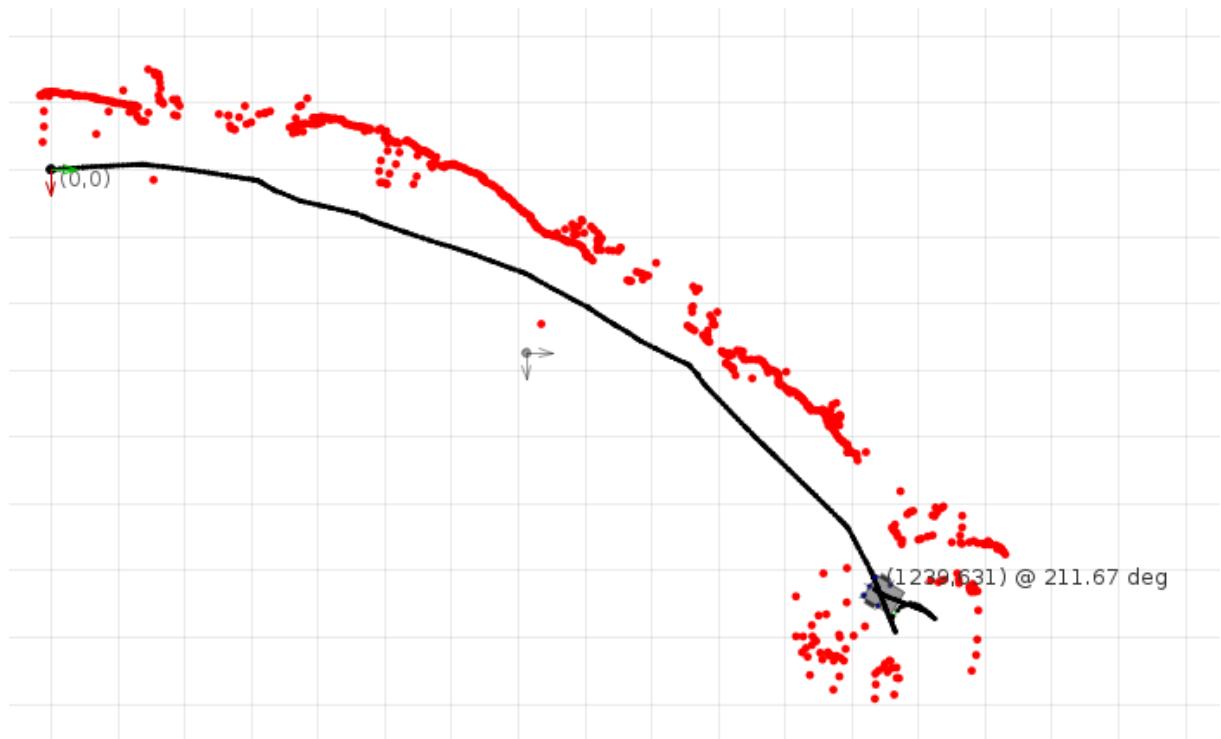


Figura 53: Mapa gerado no quarto teste a partir dos dados dos encoders.

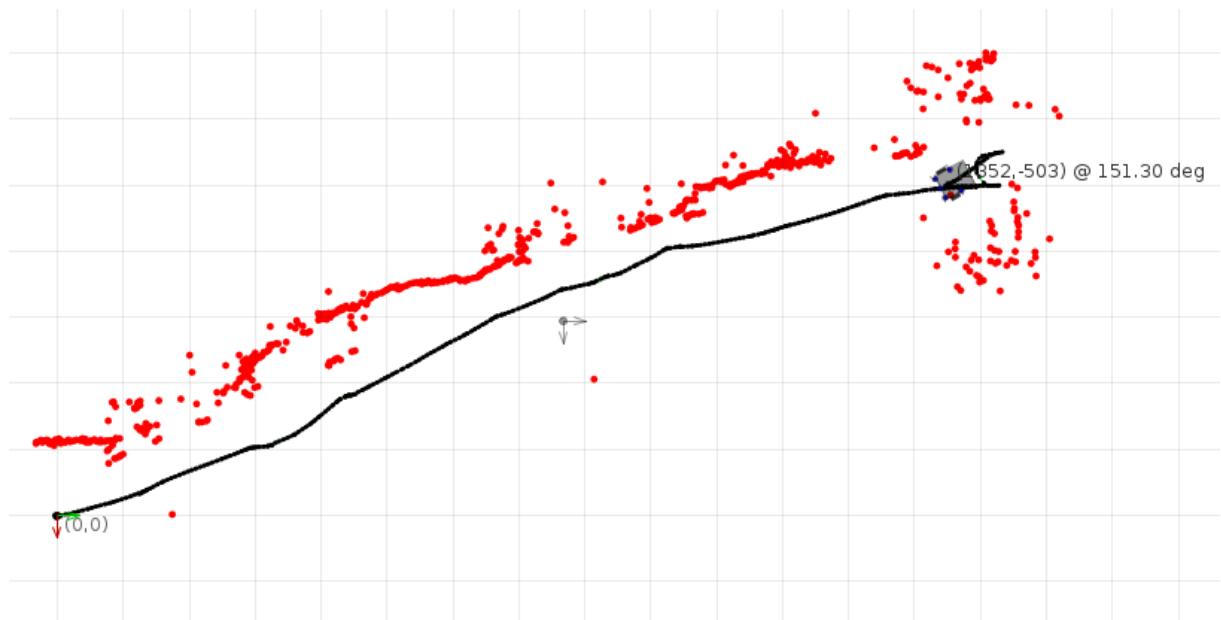


Figura 54: Mapa gerado no quarto teste a partir dos dados dos encoders, com correção de erros pelo giroscópio ($L_\omega = 0.0025$ [rad/s]).

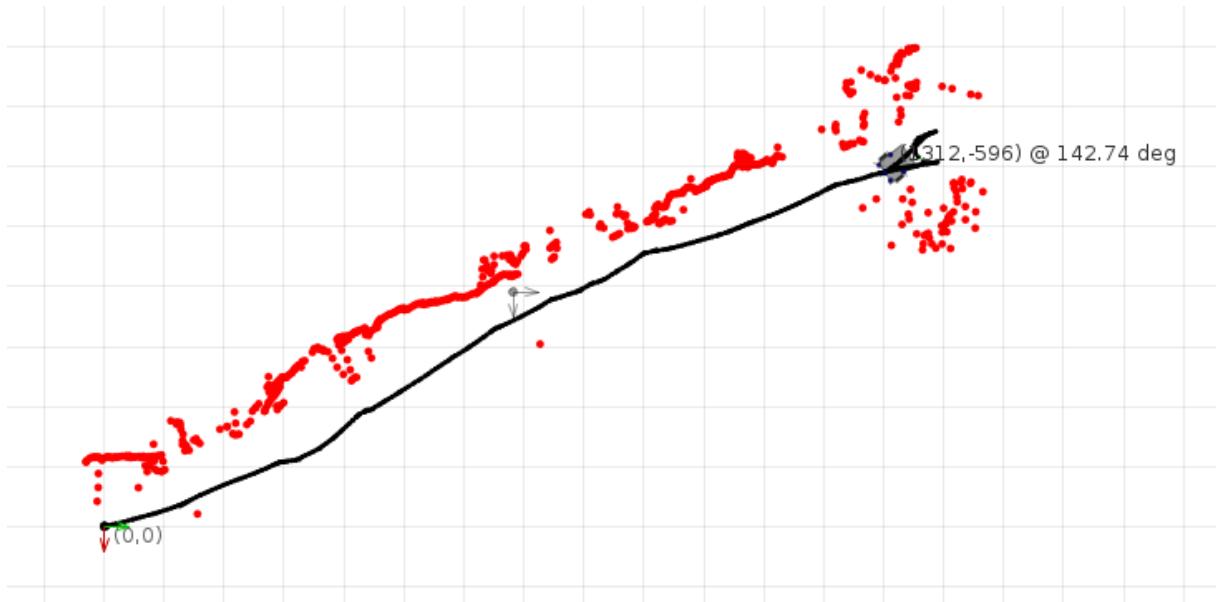


Figura 55: Mapa gerado no primeiro teste a partir dos dados dos encoders, com correção de erros pelo giroscópio ($L_\omega = 0.0025$ [rad/s]) e filtragem por média móvel de 5 períodos para sensores IR.

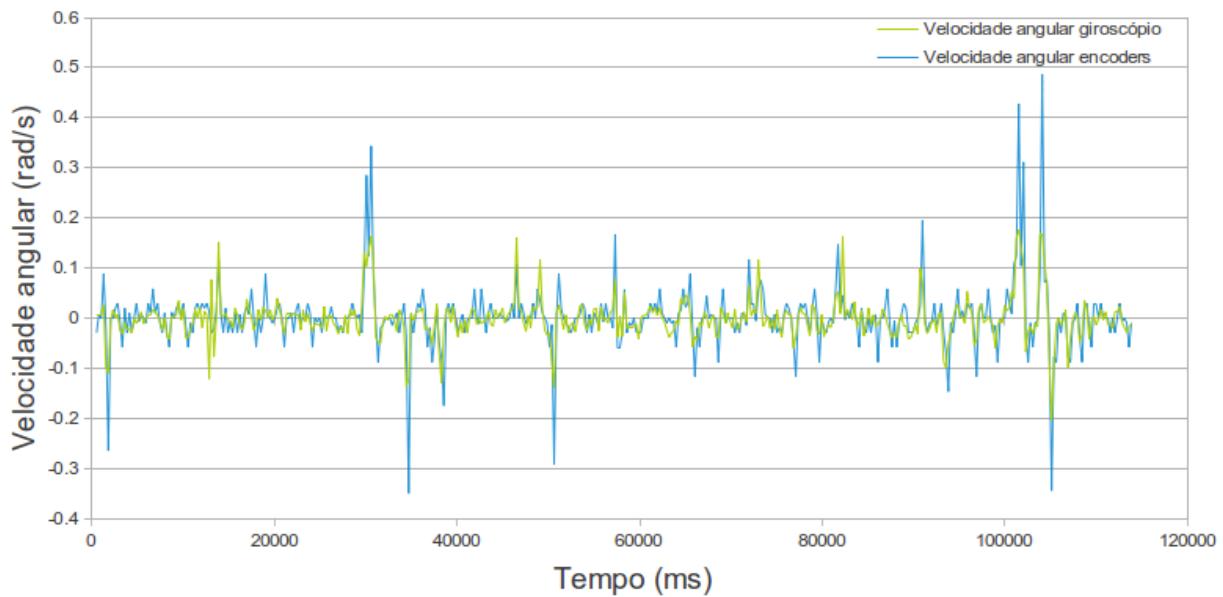


Figura 56: Gráfico comparativo de velocidades angulares obtidas no quarto teste.

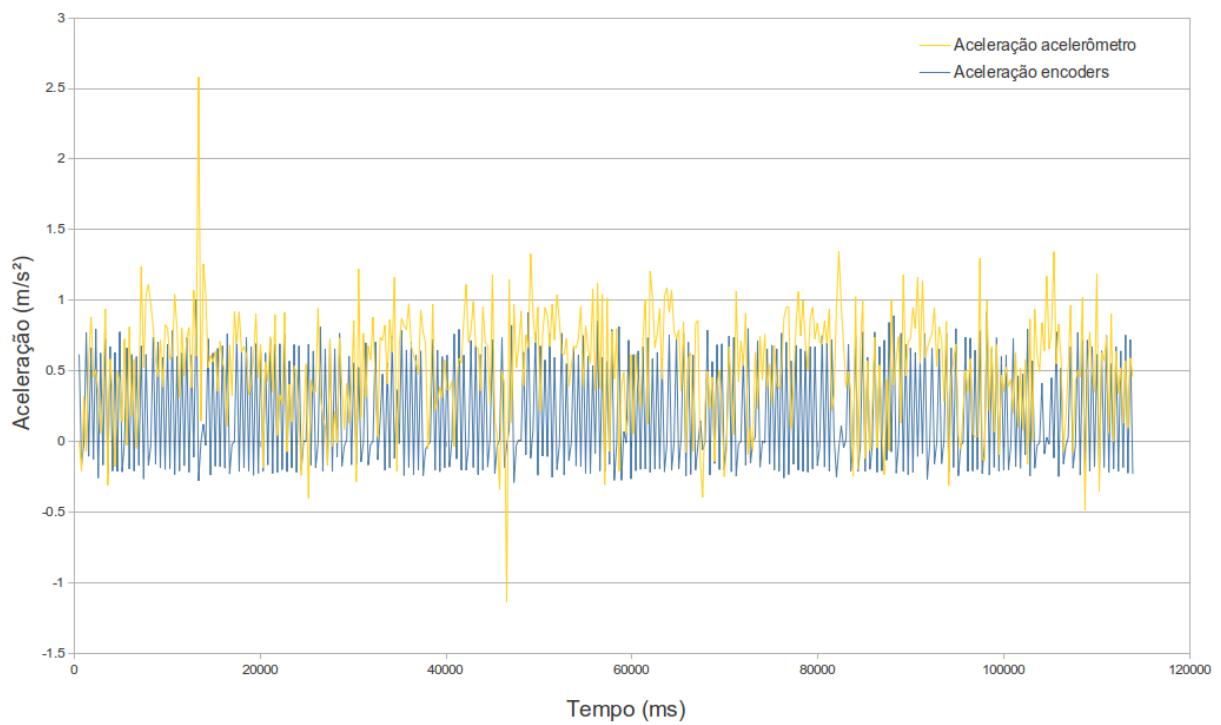


Figura 57: Gráfico comparativo de acelerações obtidas no quarto teste.

6 MEDIDAS DO ROBÔ

Na Tabela 6 estão presentes as medidas do robô.

Tabela 6: Medidas do robô.

Medida	Valor
Comprimento da carcaça	50 cm
Largura da carcaça	40 cm
Distância entre a parte da frente do robô e os eixos das rodas	14 cm
Largura de cada roda	4 cm
Circunferência de cada roda	64 cm
Circunferência do eixo de cada roda	7,5 cm
Circunferência do eixo de cada encoder	22 cm

REFERÊNCIAS

MARIN, A. J.; BORGES, J. C. N.; WERGRZN, Y. A. **Desenvolvimento de robô móvel e análise qualitativa de algoritmos de navegação fuzzy**. Curitiba, 2012.

VIDEOLAN. 2013. Disponível em: <<http://www.videolan.org/vlc/>>.