

DOUGLAS WILDGRUBE BERTOL

**CONTRIBUIÇÕES AO DESENVOLVIMENTO E
CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ MÓVEL COM RODAS**

**FLORIANÓPOLIS
2009**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONTRIBUIÇÕES AO DESENVOLVIMENTO E
CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ MÓVEL COM RODAS**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.


DOUGLAS WILDGRUBE BERTOL

Florianópolis, março de 2009.

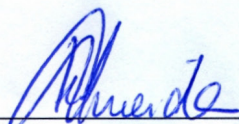
CONTRIBUIÇÕES AO DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ MÓVEL COM RODAS

Douglas Wildgrube Bertol

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Automação e Sistemas*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

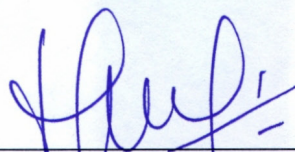


Edson Roberto De Pieri, Dr.
Orientador

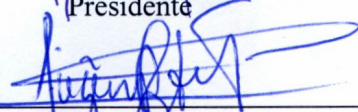


Kátia Campos de Almeida, Dr.
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

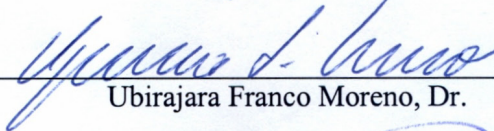
Banca Examinadora:



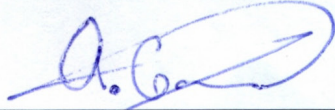
Edson Roberto De Pieri, Dr.
Presidente



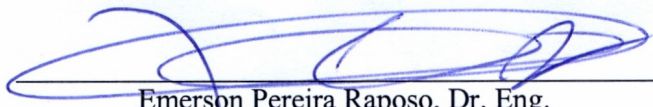
Eugênio de Bona Castelan Neto, Dr.
Co-Orientador



Ubirajara Franco Moreno, Dr.



Alejandro Garcia Ramirez, Dr.



Emerson Pereira Raposo, Dr. Eng.

Para Nubio (Buja) e Regina (Mami)

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

CONTRIBUIÇÕES AO DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ MÓVEL COM RODAS

Douglas Wildgrube Bertol

março/2009

Orientador: Edson Roberto De Pieri, Dr.

Co-Orientador: Eugênio de Bona Castelan Neto, Dr.

Área de Concentração: Controle, Automação e Informática Industrial

Palavras chave: Robôs Móveis com Rodas, Robô Diferencial, Robótica Móvel, Modelagem de Robôs Móveis, Controle de Robôs Móveis.

O presente trabalho contribui para o desenvolvimento e construção de um robô móvel com rodas. A partir de trabalhos teóricos sobre controladores para robôs móveis com rodas, esta dissertação deriva as características necessárias em uma plataforma para desenvolvimento de testes práticos destes. Apresentam-se todas as decisões tomadas no projeto, relacionadas aos aspectos de *hardware* e *firmware*. O projeto mecânico define o leiaute e as características de atuação. Todas as peças são especificadas e cálculos de verificação da plataforma são apresentados. O projeto eletrônico proposto define os sensores, dispositivos e circuitos integrados que compõe a plataforma e proporciona uma solução para interligação destes componentes. Finalizando o trabalho a modelagem do sistema apresenta-se como suplemento ao objetivo do trabalho.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

CONTRIBUIÇÕES AO DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ MÓVEL COM RODAS

Douglas Wildgrube Bertol

março/2009

Advisor: Edson Roberto De Pieri, Dr.

Co-Advisor: Eugênio de Bona Castelan Neto, Dr.

Area of Concentration: Control, Automation and Industrial Computing

Key words: Wheeled Mobile Robots, Differential Robot, Mobile Robots, Mobile Robots Modeling, Mobile Robots Control.

This work contributes to the development and construction of a wheeled mobile robot. As of on theorists control works for mobile robots, this dissertation obtains needful characteristics for a robotic platform to support their practical tests. It presents all the decisions taken on the project of this platform, related to hardware and firmware aspects. The mechanical project relates the layout of the robot platform, the characteristics of the actuation. All the specifications of the parts and, by some calculations results, the verification of the platform motion. The proposed electronic project defines the sensors, dispositive and integrated circuits, which compose the platform and provide a solution for the interconnections of these components. Concluding the dissertation is exhibited the system model as a supplement to this work objective.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	XVII
LISTA DE TABELAS.....	XX
LISTA DE ABREVIATURAS	XXIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 SINOPSE E MOTIVAÇÃO	1
1.2 PROPOSTA DO TRABALHO	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	4
2. CONCEPÇÃO.....	7
2.1 DESCRIÇÃO.....	7
2.2 REQUISITOS	7
2.2.1 Configuração das Rodas	8
2.2.2 Tamanho	9
2.2.3 Materiais.....	9
2.2.4 Variáveis Sensoriadas.....	10
2.3 FORMATO DO ROBÔ.....	13
2.4 CONCLUSÃO	14
3. ASPECTOS FÍSICOS.....	17
3.1 COMPONENTES DO ATUADOR	17
3.1.1 Motor de Corrente Contínua.....	17
3.1.2 Redução	19
3.1.3 Encoder.....	20
3.2 JUNTA	21
3.2.1 Atuação.....	22
3.2.2 Mancal da Roda.....	23

3.2.3	Ligação Motora.....	24
3.3	RODAS	25
3.3.1	Roda Onidirecional Livre	25
3.3.2	Roda Convencional Fixa.....	27
3.4	CARCAÇA DO ROBÔ.....	28
3.4.1	Chassi.....	28
3.4.2	Laterais	29
3.4.3	Tampa	30
3.5	TORRE DA CÂMERA	31
3.5.1	Atuadores da Torre	32
3.6	VERIFICAÇÃO DO ROBÔ.....	33
3.6.1	Torque de Partida e Dinâmico	34
3.6.2	Tarefa de Movimento.....	34
3.7	CONCLUSÃO.....	36
4.	DISPOSITIVOS DE SENSORIAMENTO	39
4.1	INTERFACE DOS MOTORES	39
4.2	SONAR.....	41
4.2.1	Transdutor.....	42
4.2.2	Módulo de Controle do Sonar.....	43
4.2.3	Modos de Operação	44
4.2.4	Ganho.....	47
4.3	SENSOR INFRAVERMELHO	47
4.3.1	Modo de Funcionamento	48
4.3.2	Sensor SHARP GP2D120.....	49
4.4	BÚSSOLA.....	51
4.4.1	Comunicação	51
4.4.2	Calibração	53
4.5	DISPOSITIVO DE IMAGEM.....	54
4.5.1	CMUcam3.....	54
4.6	CONCLUSÃO.....	57

5. PROJETO ELETRÔNICO.....	59
5.1 MEMÓRIA NÃO-VOLÁTIL	60
5.1.1 Cartão Secure Digital (SD).....	60
5.2 MEIO DE COMUNICAÇÃO SEM FIO	62
5.2.1 802.11b/g Wireless LAN.....	63
5.2.2 Airborne WLNG-AN-DP101	66
5.2.3 Comunicação com o Módulo.....	70
5.3 MEIO DE COMUNICAÇÃO COM FIO.....	72
5.3.1 Universal Serial Bus (USB).....	72
5.3.2 USB/UART	75
5.4 CONTROLADOR CENTRAL	76
5.4.1 eLPC64.....	76
5.5 LEIAUTE E ASPECTOS DE OPERAÇÃO	78
5.6 ALIMENTAÇÃO	81
5.7 CONCLUSÃO	81
6. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	83
6.1 ANÁLISE ESTRUTURAL	84
6.1.1 Restrições das Rodas	86
6.1.2 Rodas Convencionais Fixas.....	87
6.1.3 Rodas Onidirecionais Livres.....	88
6.1.4 Variáveis de Configuração do Robô.....	89
6.2 RESTRIÇÕES NA MOBILIDADE	90
6.3 MODELO CINEMÁTICO DE POSTURA	91
6.4 MODELO CINEMÁTICO DE CONFIGURAÇÃO	92
6.5 MODELO DINÂMICO DE CONFIGURAÇÃO	94
6.6 MODELO DINÂMICO DE POSTURA	99
6.7 CONTROLE DINÂMICO.....	99
6.7.1 Problemas de Controle.....	100
6.7.2 Seguimento de Trajetória.....	101
6.7.3 Resultados.....	104
6.8 CONCLUSÃO	106

7. CONCLUSÃO	107
7.1 TRABALHOS FUTUROS	108
ANEXO 1 DESCRIÇÃO DAS PROPRIEDADES DE MOTORES	109
ANEXO 2 PESOS DAS PEÇAS.....	113
ANEXO 3 RESTRIÇÕES DAS RODAS.....	117
A.1 RESTRIÇÕES CINEMÁTICAS	119
ANEXO 4 DESENHOS TÉCNICOS DO PROJETO MECÂNICO	121
ANEXO 5 DADOS DO PROJETO ELETRÔNICO.....	179
ANEXO 6 FOTOS DA PLATAFORMA	211
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	217

Lista de Figuras

Figura 2.1 Diagrama de contexto.....	7
Figura 2.2 Disposição das rodas.....	9
Figura 2.3 Localização dos dispositivos de sensoriamento.....	11
Figura 2.4 Localização das interfaces do motores.....	11
Figura 2.5 Localização do módulo de controle e do transdutor do sonar.....	11
Figura 2.6 Localização dos infravermelhos.....	12
Figura 2.7 Localização da bússola.....	12
Figura 2.8 Localização da câmera.....	13
Figura 2.9 Ilustração do centro de gravidade.....	13
Figura 2.10 Planos de simetria.....	14
Figura 2.11 Formato do robô.....	14
Figura 2.12 Visão explodida dos dispositivos do robô e da torre da câmera.....	15
Figura 2.13 Esboço do robô.....	15
Figura 2.14 Imagem frontal-direita do robô.....	15
Figura 3.1 Dimensões do motor (mm).....	18
Figura 3.2 Faixas de operação do motor.....	18
Figura 3.3 Dimensões da redução (mm).....	19
Figura 3.4 Dimensões do <i>encoder</i> (mm) e sinais disponibilizados.....	20
Figura 3.5 Junta de ligação.....	21
Figura 3.6 Imagem do atuador e dimensões (mm).....	22
Figura 3.7 Mancal da roda.....	23
Figura 3.8 Base da junta e do mancal.....	23
Figura 3.9 Ligação motora.....	24
Figura 3.10 Suporte do motor.....	25
Figura 3.11 Efeito chicote.....	26
Figura 3.12 Roda onidirecional.....	26
Figura 3.13 Montagem do mancal da roda não atuada.....	26
Figura 3.14 Roda convencional fixa.....	27
Figura 3.15 Visão explodida da carcaça do robô.....	28
Figura 3.16 Chassi.....	29

Figura 3.17 Peça frontal da carcaça.	29
Figura 3.18 Peça traseira da carcaça.	30
Figura 3.19 Peça de conexão da carcaça.	30
Figura 3.20 Tampa.	30
Figura 3.21 Janela de acrílico.	31
Figura 3.22 Torre da câmera.	31
Figura 3.23 Rosto da torre.	32
Figura 3.24 Suporte da câmera.	32
Figura 3.25 Tarefa de teste do robô.	34
Figura 4.1 Drive de potência S17-3A-LV-HBRIDGE.	39
Figura 4.2 Diagrama funcional da interface dos motores.	40
Figura 4.3 Transdutor <i>Series 600 Environmental Grade</i>	42
Figura 4.4 Resposta da transmissão/recepção e irradiação.	42
Figura 4.5 Módulo de controle <i>6500 Serie Ranging Module</i>	43
Figura 4.6 Lógica do módulo de controle do sonar.	43
Figura 4.7 Rotina inicial do ciclo de aquisição.	45
Figura 4.8 Ciclo de operação <i>Single-Echo</i>	45
Figura 4.9 Ciclo de operação <i>Multiple-Echo</i>	46
Figura 4.10 Seqüência de valores do ganho.	47
Figura 4.11 Funcionamento do infravermelho.	48
Figura 4.12 V_O vs. distância e V_O vs. iluminação.	49
Figura 4.13 Dimensões (mm) do sensor infravermelho.	49
Figura 4.14 Diagrama de blocos do GP2D120.	50
Figura 4.15 Módulo de orientação CMPS03.	51
Figura 4.16 Ciclo de leitura do PFM.	52
Figura 4.17 Sensor CMOS da câmera com lentes focais.	55
Figura 4.18 Sistema de controle da CMUCam3.	55
Figura 4.19 Diagrama funcional da CMUCam3.	56
Figura 5.1 Cartão <i>Secure Digital</i>	61
Figura 5.2 Modo infra-estrutura.	63
Figura 5.3 Modo ad-hoc.	64
Figura 5.4 Método CSMA/CA.	65
Figura 5.5 Dimensões do módulo WLNG-AN-DP101.	66
Figura 5.6 Diagrama de blocos do módulo sem fio.	69
Figura 5.7 Seqüência para conexão <i>Bridge</i> entre as interfaces do módulo.	71
Figura 5.8 Seqüência de transmissão de dez quadros de dados USB.	73

Figura 5.9 Camadas de comunicação USB.....	74
Figura 5.10 Diagrama de blocos do FT232R.....	75
Figura 5.11 <i>Core</i> de processamento eLPC64.....	77
Figura 5.12 Esquema de comunicação dos componentes.....	77
Figura 5.13 Diagrama de blocos do LPC2148.....	78
Figura 5.14 Circuitos dentro do chassi do robô.....	80
Figura 5.15 Dimensões (mm) das placas de circuito.....	80
Figura 5.16 Visualização 3D da placa de integração.....	81
Figura 6.1 Rodas do sistema.....	84
Figura 6.2 Eixo de simetria e eixo das rodas fixas.....	84
Figura 6.3 Variáveis do modelo cinemático.....	85
Figura 6.4 Ângulos das Rodas.....	86
Figura 6.5 Disposição das rodas convencionais fixas.....	87
Figura 6.6 Disposição das rodas onidirecionais passivas.....	88
Figura 6.7 Estrutura do controlador de trajetória.....	101
Figura 6.8 Resposta ao degrau (a) e amortecimento (b).....	105
Figura 6.9 Trajetória de referência vs. executada (a) e erros de posição (b).....	105
Figura 6.10 Torques aplicados (a) e seguimento de referência de velocidade (b).....	106
Figura A3.1 Representação das variáveis da roda.....	118
Figura A6.1 Foto traseira-lateral esquerda.....	213
Figura A6.2 Foto frontal.....	213
Figura A6.3 Foto traseira.....	214
Figura A6.4 Foto dos componentes internos.....	214
Figura A6.5 Foto inferior.....	215
Figura A6.6 Foto da torre da câmera.....	215
Figura A6.7 Fotos individuais dos componentes internos.....	216

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Dados do motor A-max 22 -110117.....	19
Tabela 3.2 Dados dinâmicos da redução <i>Planetary Gearhead GP 22 A</i>	20
Tabela 3.3 Pinos de conexão do <i>endoder MEnc 13</i>	21
Tabela 3.4 Dados do <i>encoder MEnc 13</i>	21
Tabela 3.5 Características calculadas de torque e velocidade do atuador.....	23
Tabela 3.6 Dados e dimensões (mm) do rolamento de 12 mm	24
Tabela 3.7 Especificações e dimensões (mm) da engrenagem.....	25
Tabela 3.8 Dados e dimensões (mm) do rolamento de 10 mm	27
Tabela 3.9 Características da roda onidirecional.....	27
Tabela 3.10 Características da roda convencional fixa	28
Tabela 3.11 Dados do servomotor.....	33
Tabela 3.12 Características do robô	33
Tabela 3.13 Torques calculados para movimentar o robô em linha reta.....	36
Tabela 3.14 Torques calculados para rotação do robô em torno do eixo vertical.....	36
Tabela 4.1 Níveis de operação recomendada do drive de potência.....	40
Tabela 4.2 Descrição dos pinos do drive de potência	41
Tabela 4.3 Lógica de controle do drive de potência.....	41
Tabela 4.4 Níveis de operação recomendados do módulo de controle do sonar.....	44
Tabela 4.5 Descrição dos pinos do módulo de controle do sonar	44
Tabela 4.6 Características de operação do infravermelho.....	50
Tabela 4.7 Descrição dos pinos do infravermelho	50
Tabela 4.8 Características de operação da bússola.....	51
Tabela 4.9 Descrição dos pinos da bússola	52
Tabela 4.10 Registradores da bússola	53
Tabela 4.11 Características de funcionamento da câmera	56
Tabela 4.12 Características da lente da câmera.....	56
Tabela 4.13 Resumo dos sensores do robô	57
Tabela 5.1 Descrição dos esquemáticos do projeto eletrônico.....	59

Tabela 5.2 Características de operação do cartão de memória.....	61
Tabela 5.3 Descrições dos pinos do cartão de memória em modo SPI.....	61
Tabela 5.4 Características do módulo de comunicação sem fio.....	67
Tabela 5.5 Performance versus alcance do módulo	67
Tabela 5.6 Descrição dos pinos do módulo sem fio.....	68
Tabela 5.7 Descrição dos pinos de estado.....	69
Tabela 5.8 Níveis de usuário em sessões no módulo sem fio	71
Tabela 5.9 Características do circuito integrado USB/UART	75
Tabela 5.10 Descrição das chaves seletoras.....	79
Tabela 5.11 Descrição dos conectores	79
Tabela 5.12 Descrição dos botões.....	79
Tabela 5.13 Resumo dos dispositivos auxiliares.....	82
Tabela A1.1 Descrição de propriedades de motores.....	111
Tabela A2.1 Pesos das peças: grupo 1	114
Tabela A2.2 Pesos das peças: grupo 2	115
Tabela A5.1 Relação de componentes eletrônicos - Parte 1/2	181
Tabela A5.2 Relação de componentes eletrônicos - Parte 2/2	182

Lista de Abreviaturas

ADC – *Analog-To-Digital Converter*
BPSK – *Binary Phase Shift Keying*
CAD – *Computer Aided Design*
CCK – *Complementary Code Keying*
CI – *Circuito Integrado*
CMOS – *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*
DAC – *Digital-To-Analog Converter*
DBPSK – *Differential BPSK*
DQPSK – *Differential QPSK*
DSSS – *Direct Sequence Spread Spectrum*
FAT – *File Allocation Table*
GPIO – *General Purpose Input/Output*
I²C – *Inter-Integrated Circuit*
JTAG – *Joint Test Action Group*
LH – *Logic High* – Nível lógico alto
LL – *Logic Low* – Nível lógico baixo
MMC – *Multi Media Card*
MOSFET – *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*
OEM – *Original Equipment Manufacturer*
OFDM – *Orthogonal frequency-division multiplexing*
PFM – *Pulse Frequency Modulation*
PSD – *Positions Sensing Detector*
PWM – *Pulse Width Modulation*
QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*
QPSK – *Quadrature Phase-Shift Keying*
RMR – *Robô Móvel com Rodas*
RMS – *Root Mean Square*
SD – *Secure Digital*
SPI – *Serial Peripheral Interface*
SSP – *Synchronous Serial Port*
TTL – *Transistor-Transistor Logic*
UART – *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*
WLAN – *Wireless Local Area Network*
μC – *Microcontrolador*

1. Introdução

1.1 Sinopse e Motivação

A robótica alcançou sucesso através da indústria [1], onde se aplica predominantemente robôs manipuladores, fixos ao solo, desempenhando tarefas de precisão em diferentes aplicações e limitadas por um espaço operacional (definido pelos prolongamentos físicos do robô e restrições de movimento). Entre as tarefas mais comumente desempenhadas por estes sistemas, destacam-se: a pintura, a soldagem (fortemente aplicadas na indústria automobilística e de tecnologia da informação – TI), manipulação de objetos em ambientes biologicamente controlados e serviços de reparação em ambientes insalubres [2].

Automatizar um ambiente onde uma mesma ferramenta tenha que ser utilizada em vários pontos da linha de produção, possui soluções como a inserção de equipamentos redundantes espalhados no ambiente de trabalho (soldadores em uma linha de produção) ou o aumento da magnitude dos equipamentos de atuação para que apresentem um espaço operacional maior (gruas atendendo toda a área de uma fábrica). Porém a redundância e o aumento de magnitude dos sistemas robóticos podem classificar-se como soluções inviáveis econômica ou logisticamente.

A robótica móvel torna-se uma solução plausível à indústria sempre que as soluções envolvendo redundâncias de equipamentos mostram-se impossíveis ou não atrativas na prática. Valendo-se de sua capacidade de fácil adaptação e deslocamento em ambientes, robôs móveis são capazes de desenvolver tarefas como o transporte de peças, pessoas, ferramentas (reuso de funções), etc.

Independentemente das funções embarcadas em um robô móvel, sua principal tarefa foca-se em desempenhar um deslocamento entre dois pontos, seguindo uma trajetória predeterminada ou de forma independente. Executar este deslocamento na prática envolve diversas camadas de controle como gerência de torques aplicados aos atuadores, aquisição de variáveis, utilização de técnicas baseadas em inteligência artificial, interfaces de operação manual, etc.

Pesquisas de estratégias de controle, dentro da subárea da robótica que trata de sistemas móveis, são empregadas na prática para viabilizar e facilitar a operação de equipamentos por um humano, e até excluir a necessidade de um operador (autonomia). Na obtenção de tais técnicas são utilizados simuladores computacionais, réplicas, subsistemas e outras abstrações do sistema físico,

para testes de desempenho antes da aplicação sobre a tarefa final. A utilização de equipamentos para o teste prático destas técnicas é imprescindível à conferência prática da eficácia, melhoria e segurança da atuação no meio de trabalho em que estão inseridas.

O projeto de controladores é tratado de forma diferente entre áreas da ciência, pois pode basear-se em teorias de IA [3], controle clássico e moderno[4], controle híbrido [5], etc. Os diferentes métodos possíveis de projeto diferenciam-se, entre outras características, pela utilização ou não do modelo matemático do sistema. Esta representação do sistema por um modelo mapeia estímulos externos às respostas de comportamento, esta abstração geralmente mostra-se parcial sobre todas as características do sistema real, contendo somente aquelas consideradas significantes quanto ao objetivo final do projeto.

Na modelagem de robôs móveis com rodas (RMRs), são abordadas as restrições existentes nas interconexões de suas peças mecânicas e as grandezas físicas (força, torque, momentos de inércia, atrito, etc.) existentes nos pontos de contato. Apresentam-se níveis diferentes e bem definidos de detalhamento, conhecidos como modelo cinemático (de postura e configuração) e modelo dinâmico (de postura e configuração), sendo que este último apresenta variações quanto à quantidade de características do sistema (forças gravitacionais, atritos, etc.) que se deseja representar.

O modelo cinemático pode ser obtido mediante a aplicação de vários métodos vastamente conhecidos e utilizados, tais como os sumarizados em MUIR et al. [6] e CAMPION et al. [7], nos quais relacionam-se o corpo e a ação das rodas representadas por variáveis generalizadas, que respeitam as restrições apresentadas pelo sistema em seu movimento. A partir da cinemática do sistema, pode-se projetar controladores como os apresentados em KANAYAMA et al. [8]. Porém, esses controladores tendem a falhar quando aplicados na prática por não considerarem variáveis que instabilizam o sistema, como o peso e momentos de inércia.

Um único modelo cinemático de RMRs pode representar diferentes robôs que possuam a mesma configuração de rodas, entretanto essa afirmação não se aplica para a dinâmica, a qual apresenta um modelo mais detalhado e fortemente acoplado ao sistema que representa. A dinâmica pode ser derivada a partir de métodos que utilizam as formulações de Newton [9], de Lagrange [10] e de Kane [11], esta última, embora menos disseminada, mostra-se como um objeto de estudo relevante.

Além desses dois níveis, ao modelo do robô podem ser atrelados os modelos de outros sistemas embarcados, tal como a dinâmica dos atuadores [12] e [13], formando uma cascata de modelos que resultam em uma representação mais realista do sistema.

Seja qual for o método utilizado para o projeto de um controlador, se apresentar malha fechada, necessitará da realimentação de variáveis do sistema. A utilização de sensores para obter as variáveis do sistema, tais como, posição, velocidade e aceleração, também se caracteriza como um ramo de pesquisa robótica tendo como meta o reconhecimento de padrões dentro em um ambiente.

As variáveis necessárias para fechar a malha de controle, de um robô móvel com rodas, geralmente não se encontram diretamente acessíveis para aquisição (exceto em um ambiente altamente controlado e sensoriado), o que obriga a estimá-las através de várias técnicas disponíveis, utilizando-se *encoders* incrementais [14], imagens de vídeo [15, 16], sinais de sonares de ultra-som [17, 18], sinais de *scanner* a laser, bússolas [19] ou a fusão destes, tendo cada uma suas vantagens e desvantagens.

Englobando a tarefa básica da robótica móvel, formatos físicos possíveis, formas de observação de suas variáveis e as características matemáticas e de controle destes sistemas, este trabalho objetiva apresentar contribuições ao desenvolvimento de um robô móvel com rodas, constituindo-se de uma plataforma equipada com sensores, atuadores e câmera. Permitindo a implementação prática de diversos resultados teóricos existentes na literatura, entre eles podem ser citados: planejamento de trajetórias, controladores clássicos e avançados [20], posicionamento do robô e da câmera [21], etc.

1.2 Proposta do Trabalho

No atual estado crescente de publicações na área de robótica, aquelas que tratam da mobilidade robótica possuem boa parte de seus resultados obtidos através de simulações matemáticas. Visando um amadurecimento das técnicas já publicadas, há a necessidade da aplicação prática destes resultados, como forma de verificar que possam ser utilizadas em seu objetivo final ou mesmo para definir sua principal aplicação.

A partir da análise de protótipos existentes na literatura optou-se pela construção de um robô móvel com rodas (atuado por apenas duas rodas), apresentando forma octogonal e disposição diferencial das rodas atuadas. Nos próximos capítulos serão exibidas as decisões tomadas na construção deste protótipo e todos os resultados práticos obtidos ao longo de seu desenvolvimento.

1.3 Organização do Trabalho

Os capítulos da presente dissertação foram encadeados como apresentado abaixo:

- Capítulo 1: Introdução

Apresenta considerações iniciais e delimitação do assunto abordado no trabalho, juntamente com referências a trabalhos relacionados, além do objetivo desta pesquisa e sua disposição organizacional.

- Capítulo 2: Concepção

Neste início do desenvolvimento do trabalho reportam-se as decisões tomadas que levaram à forma final do robô e todas suas características. Este capítulo centraliza o assunto abordado na dissertação, provendo uma base geral para compreensão dos assuntos tratados nos capítulos subseqüentes.

- Capítulo 3: Aspectos Físicos

O projeto mecânico do robô, carcaça, junta, rodas, engrenagens, torre da câmera, etc. são descritos neste capítulo. Documenta-se a pré-montagem simulada deste projeto em ferramenta CAD e os dados finais estimados de peso e torques (estáticos e mecânicos), são utilizados na verificação do robô, através da simulação matemática dos torques necessários para execução de duas tarefas de movimentação.

- Capítulo 4: Dispositivos de Sensoriamento

Características e modos de funcionamento, dos sensores escolhidos para compor o sistema do robô, são descritos neste capítulo. Esta documentação apresenta-se como base para as decisões tomadas no projeto eletrônico.

- Capítulo 5: Projeto Eletrônico

Nesta fase do trabalho, a escolha e descrição do controlador central dos sensores, dos módulos de comunicação e de outros equipamentos necessários, para criar um sistema capaz de operar todas as funções que compõe o robô, são apresentados e uma solução teórica é proposta.

- Capítulo 6: Modelagem Matemática

Complementando o objetivo do trabalho, apresenta-se o desenvolvimento dos modelos matemáticos (cinemático e dinâmico) do robô e utiliza-se do modelo dinâmico para obtenção de resultados, a partir da simulação de uma tarefa de seguimento de trajetória, empregando um controlador retirado da literatura.

- Capítulo 7: Conclusão

Considerações finais do trabalho e trabalhos futuros.

2. Concepção

Da intenção de projetar o robô móvel, concatenam-se os pontos de partida da idéia e os requisitos desejados no resultado final, tais como formato, funções, potencial de atuação, capacidade, etc., para formar a meta de projeto.

Este capítulo sumariza o projeto, caracterizando o processo de desenvolvimento de acordo com as decisões tomadas e resultados obtidos que serão detalhadas ao decorrer dos próximos capítulos.

2.1 Descrição

“Robôs móveis apresenta-se como um exemplo típico de sistemas não-holonômicos. Considera-se aqui um robô movimentando-se em um plano horizontal, constituído por um chassi rígido equipado com rodas não deformáveis. Durante a movimentação, o plano de cada roda permanece vertical e as rodas giram em torno de seu eixo horizontal, nas quais a orientação com respeito ao chassi pode ser fixa ou variável. Idealmente o contato entre as rodas e o chão satisfaz as condições de rolamento puro e não-escorregamento. A movimentação do robô é obtida por atuadores provendo torque para a rotação ou orientação do eixo de algumas das rodas” [22].

2.2 Requisitos

O robô deve ser capaz de executar uma tarefa atribuída por um usuário e reportar os resultados obtidos, tais como torques aplicados, trajetória executada, velocidades executadas, etc. Este comportamento é representado no diagrama de contexto da Figura 2.1.

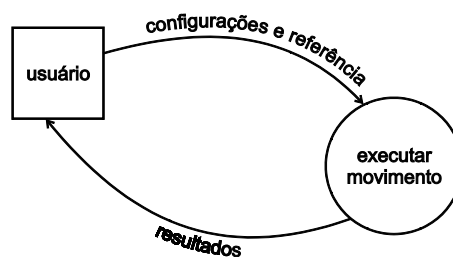


Figura 2.1 Diagrama de contexto.

Sua utilização destina-se para o teste prático de trabalhos teóricos oriundos da área de controle, em especial técnicas de seguimento de referência, seguimento de trajetória e estabilização em um ponto. Nestes trabalhos se utiliza um ambiente altamente controlado, com chão plano e horizontal, e supõe-se, para fins de modelagem, que as rodas do sistema não possuam deslizamentos laterais (*nonslip*) e nem derrapagens durante o giro (*pure rolling*).

Partindo destas definições, abaixo se descrevem os requisitos necessários na composição do robô.

2.2.1 Configuração das Rodas

Dado o ambiente controlado e as características das rodas, o projeto não necessita considerar requisitos de adaptação a superfícies rugosas (suspensão) ou de variação no ângulo do plano de atuação (mudança entre plano horizontal e inclinado).

A gama de configurações possíveis, para robôs móveis com rodas, é vasta, classificam por seu número de rodas e pelo seu grau de liberdade (diferença entre o número de coordenadas generalizadas e o número de restrições independentes).

Na literatura encontram-se projetos de sucesso, exibindo configurações básicas e largamente estudadas, tais como, robôs 3-dof com rodas diferenciais [23], onidirecionais [24], orientáveis [25][26], e exibindo configurações ímpares, tais como, movimentação por esfera [27], articulados [28] e com quatro rodas individualmente direcionáveis [29].

Dentre as opções de configuração das rodas, robôs móveis com rodas dispostas diferencialmente exibem certo desempenho superior sobre outros tipos. Por exemplo, possuem alta mobilidade e a configuração das rodas é relativamente simples. Devido às vantagens, segundo HE [30] estes robôs são considerados candidatos ideais para tarefas como transporte de deficientes físicos [31] e limpeza de ambientes [32].

Portanto opta-se no projeto, principalmente pela simplicidade mecânica e pelo desafio no controle da mobilidade, pela utilização da disposição diferencial das rodas com duas rodas onidirecionais de apoio, conforme ilustrado na Figura 2.2.

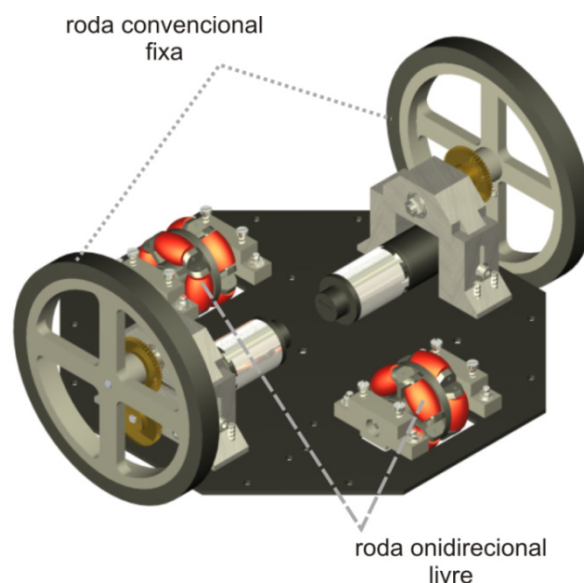


Figura 2.2 Disposição das rodas.

2.2.2 Tamanho

O robô tem como tarefa principal a sua utilização na implementação prática de controladores para seguimento de trajetórias e estabilização do sistema em torno de um ponto. Para este fim, a plataforma não necessita apresentar dimensões suficientes para carregar grandes cargas ou até mesmo uma pessoa e nem tamanho mínimo para representar sistemas cooperativos como um formigueiro.

Portanto o tamanho do robô é definido a partir de todos os dispositivos e peças necessárias para sua operação, de forma a otimizar o quesito espaço/peso, permitindo que o robô seja suficientemente grande para portar todas suas funcionalidades e pequeno suficiente para não sobrar espaços.

2.2.3 Materiais

Os materiais das peças mecânicas foram escolhidos de acordo com quesitos de dureza, peso e oxidação. A principal característica requerida para os materiais é a não oxidação ou baixa oxidação, a dureza é quesito para peças que são utilizadas em tarefas de suporte e de contato dinâmico e o peso dos materiais deve ser levado como quesito de otimização, representando de grande importância na montagem final, porém depreciada em relação às outras duas características.

Três principais materiais são utilizados no robô:

- **Alumínio:** material mais abundante na plataforma. Utilizado na forma de placas, nas peças da carcaça e torre da câmera, necessitando apenas de serviços de dobra e corte para sua fabricação. Presente também, em menor quantidade, nas peças que compõem a junta das rodas atuadas, nos mancais das rodas onidirecionais e na composição das rodas convencionais, necessitando de serviços de torno e fresa para sua fabricação.

- **Bronze:** utilizado na fabricação das engrenagens, devido aos seus quesitos de baixa oxidação e alta dureza.

- **Aço inox:** utilizado nos eixos de fixação de todas as rodas, garantindo também os quesitos de oxidação e dureza.

Outros materiais também são utilizados na composição do robô, tais como acrílicos, plásticos, etc. compondo peças adquiridas comercialmente e pré-fabricadas.

2.2.4 Variáveis Sensoriadas

A utilização de sensores é imprescindível, dada a finalidade do robô para a aplicação de técnicas de controle. As variáveis básicas utilizadas na realimentação de controladores de robôs móveis são: sua posição, orientação e velocidade dos motores. Portanto, estas são necessidades básicas para um robô móvel e além destas, mais algumas variáveis foram escolhidas para compor o grupo de variáveis fornecidas pela plataforma desenvolvida:

- Corrente no motor;
- Velocidade do motor;
- Odometria (indiretamente);
- Distância e presença de objetos;
- Orientação;
- Imagem.

Para aquisição dessas variáveis o robô embarca diferentes sensores para cada uma, havendo também casos de redundância para algumas. A Figura 2.3 apresenta uma vista explodida da localização dos sensores e na seqüência apresentam-se cada uma em particular. Todos estes dispositivos, aqui sumarizados, são descritos adiante em capítulo específico.

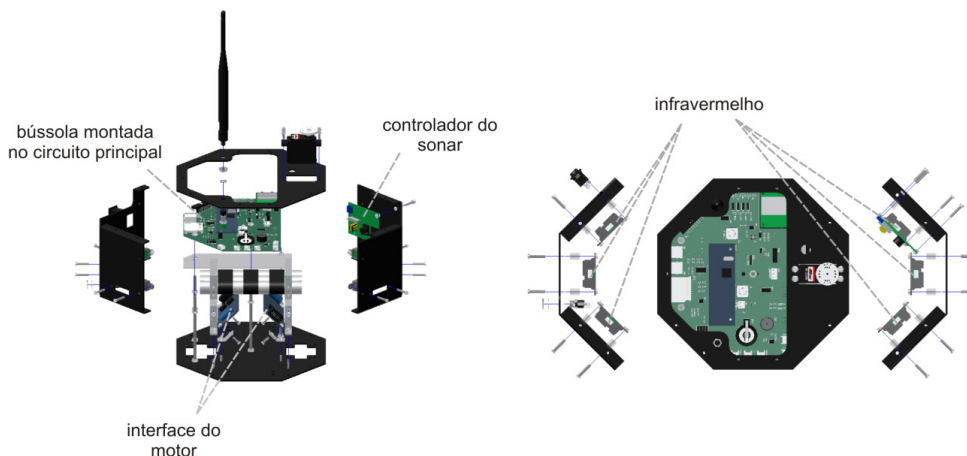


Figura 2.3 Localização dos dispositivos de sensoriamento.

- **Interfaces dos motores:** ilustradas na Figura 2.4, executa três tarefas no sistema: fornece um meio de equipamentos eletrônicos controlarem equipamentos de potência (neste caso os motores), calcula a corrente passante pelo motor e traduz as leituras dos *encoders* para sinais à níveis TTL.

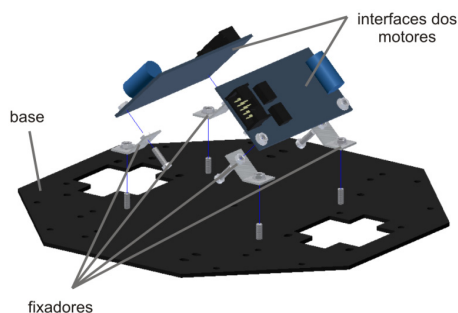


Figura 2.4 Localização das interfaces do motores.

- **Sonar:** executa a aquisição da distância à objetos e em decorrência, a presença dos mesmos. Este equipamento é formado por duas peças: o módulo de controle, fixado à carcaça na peça frontal (Figura 2.5 (a)) e o transdutor fixado à cabeça da torre da câmera (Figura 2.5 (b)).

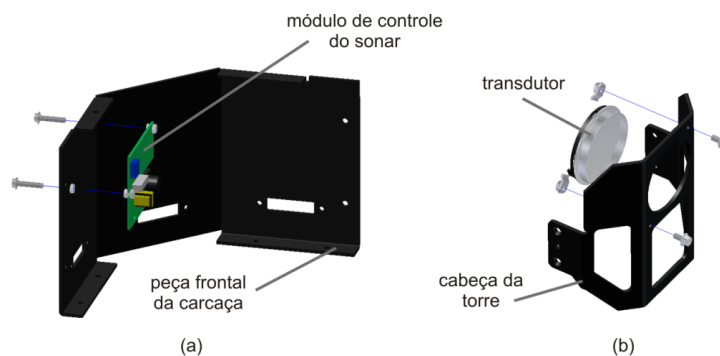


Figura 2.5 Localização do módulo de controle e do transdutor do sonar.

- **Infravermelho:** executa, assim como o sonar, a aquisição de distância e presença de objetos, porém a um custo energético e campo de sensoriamento menor. São seis unidades fixas à carcaça e dispostos ao longo do perímetro do robô (Figura 2.6).

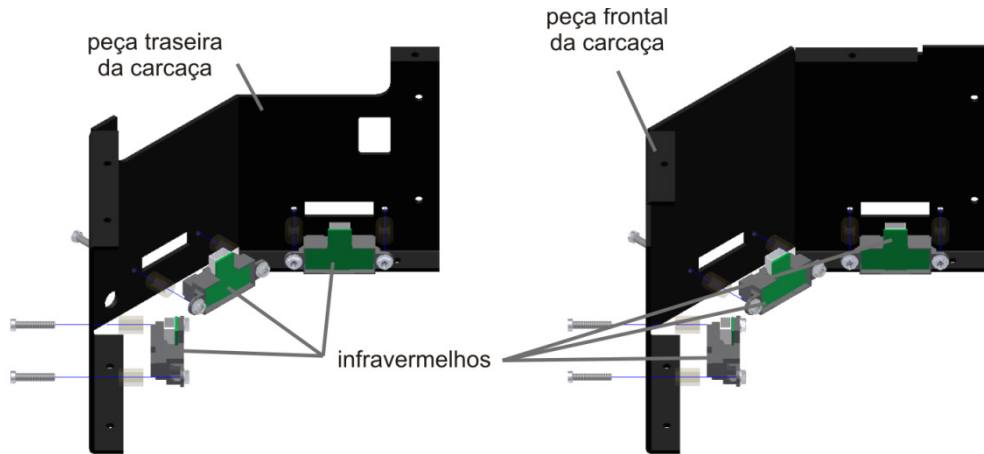


Figura 2.6 Localização dos infravermelhos.

- **Bússola:** executa a aquisição da orientação em relação ao campo magnético da terra. Este dispositivo é montado junto com a placa do circuito eletrônico do robô (Figura 2.7).

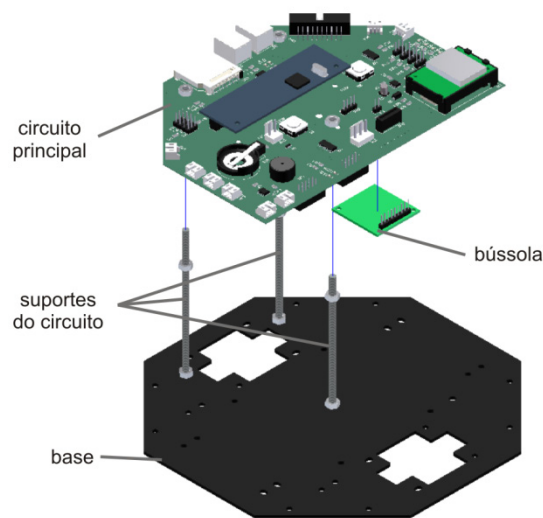


Figura 2.7 Localização da bússola.

- **Câmera:** executa a captura de imagens que são utilizadas em conjunto com técnicas de processamento, para aquisição de inúmeras informações do meio onde o robô móvel está inserido. A câmera é localizada acima do robô e fixada a uma torre capaz de modificar sua orientação em relação ao robô (Figura 2.8).

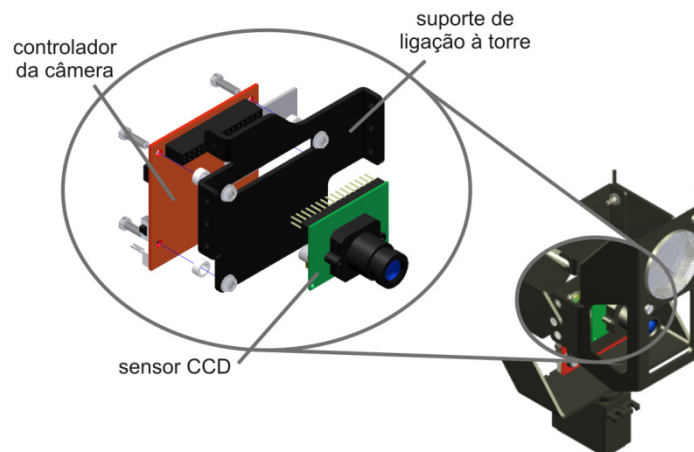


Figura 2.8 Localização da câmera.

2.3 Formato do Robô

A preocupação na acomodação de todos os componentes da plataforma do robô teve como principal objetivo a disposição horizontalmente uniforme do peso das peças, objetivando a alocação do centro de gravidade (Figura 2.9) do robô o mais próximo possível do eixo central vertical da plataforma.

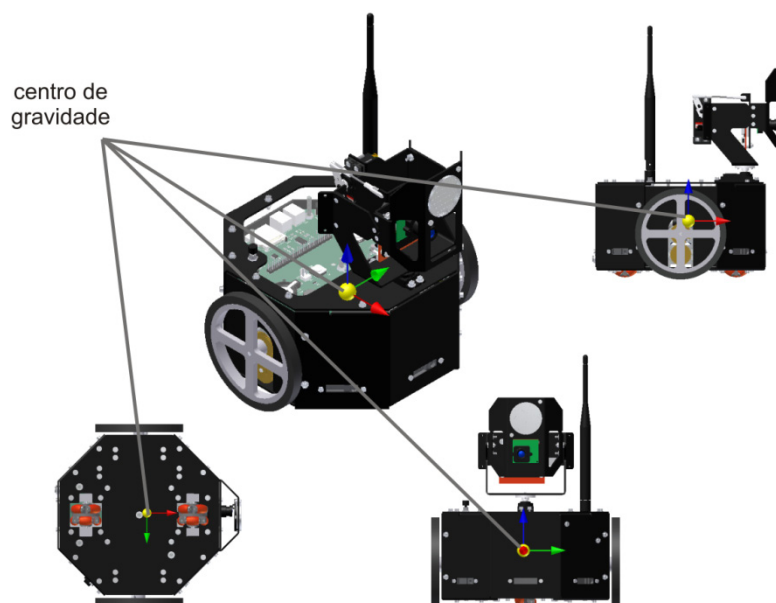


Figura 2.9 Ilustração do centro de gravidade.

Assim o robô possui, características de simetria com relação ao plano vertical que contém o eixo paralelo às rodas e que cruza o centro do robô (Figura 2.10 (a)) e também em relação ao plano vertical que contém a linha passante pelo eixo das rodas convencionais fixas (Figura 2.10 (b)).

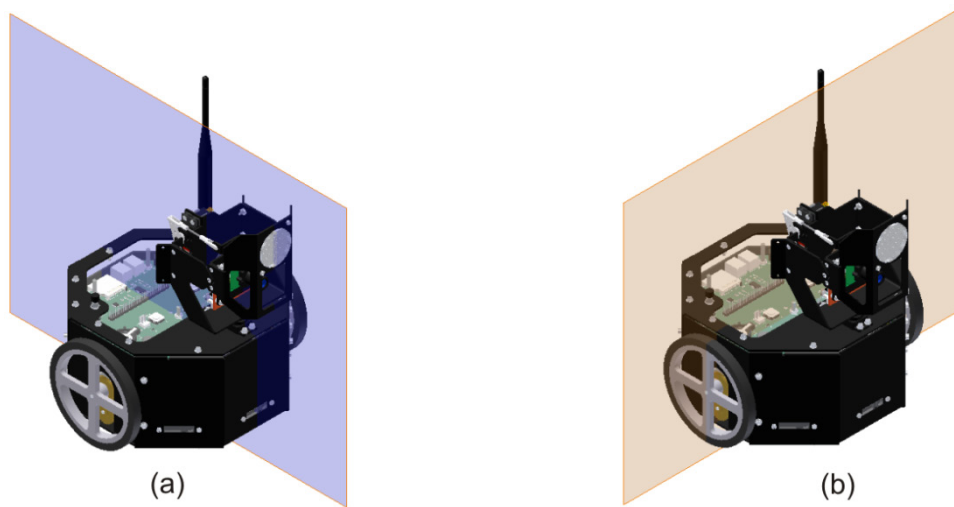


Figura 2.10 Planos de simetria.

Outra característica peculiar do robô é seu formato octogonal (Figura 2.11). Esta decisão de projeto se baseou na aproximação do formato de uma carcaça cilíndrica, porém sem as complicações existentes na fabricação de equipamentos circulares.

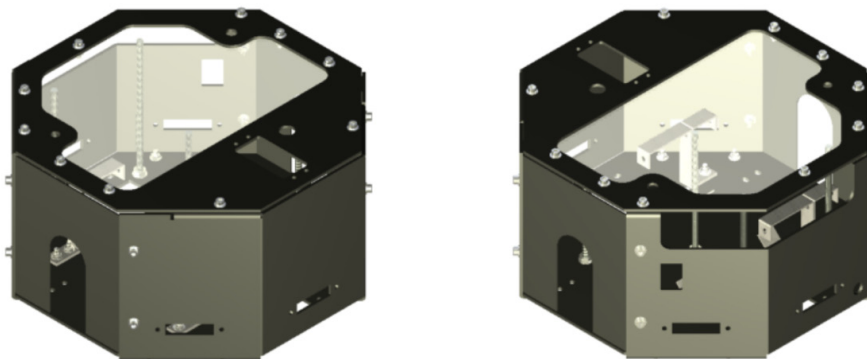


Figura 2.11 Formato do robô.

2.4 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se o robô de forma geral e alguns de seus componentes, localizando o assunto da dissertação em torno do projeto do robô e suas características embarcadas. Definindo seu esboço físico e componentes mecânicos primordiais, ilustrados na Figura 2.12 e Figura 2.13. Na Figura 2.14 exibe-se uma foto real do robô já montado e no ANEXO 6 encontram-se mais algumas fotos.

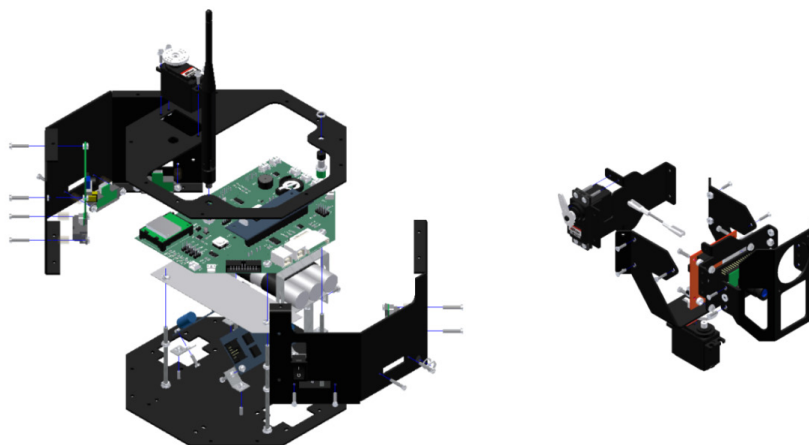


Figura 2.12 Visão explodida dos dispositivos do robô e da torre da câmera.

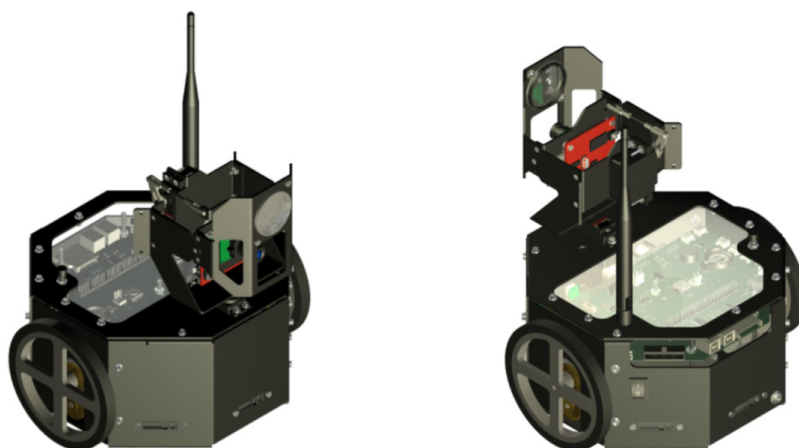


Figura 2.13 Esboço do robô.



Figura 2.14 Imagem frontal-direita do robô.

3. Aspectos Físicos

Um robô móvel com rodas pode assumir diversas configurações físicas, das quais se extraem características que influenciam em sua maneira de movimentação e na forma de controle de sua atuação. O sistema adotado neste trabalho apresenta atributos de um robô diferencial caracterizado, principalmente, por movimentar-se através de duas rodas propulsoras independentes e dispostas paralelamente entre si e ao eixo de simetria do robô.

Neste capítulo descrevem-se as características físicas do formato do robô, explicitando cada componente mecânico desenvolvido no trabalho e que irão influenciar diretamente nos modelos cinemático e dinâmico do robô.

Obteve-se o projeto mecânico do robô através do auxílio de ferramenta CAD (*Computer-Aided Design*) *Autodesk Inventor Professional 2008*, na qual todas as peças foram desenvolvidas para observação prévia de quesitos como disposição espacial, praticidade de montagem e momentos de inércia.

No ANEXO 4 apresentam-se todos os desenhos técnicos com as especificações das peças desenvolvidas no trabalho e no ANEXO 2, uma lista com os pesos de todas as peças é disponibilizada como referência.

3.1 Componentes do Atuador

As duas rodas que movimentam o robô são atuadas, cada uma por uma combinação de três equipamentos, motor, redução e *encoder*, todos fabricados pela *Maxon*. A seguir são mostradas as características técnicas de cada componente deste conjunto motor.

3.1.1 Motor de Corrente Contínua

Utilizam-se no robô dois motores A-max 22 [33] (modelo 110117). O motor de corrente contínua é basicamente formado por duas estruturas magnéticas, um estator e um rotor, e possui várias formas de montagem, e conseqüentemente, de operação. Os motores utilizados são controlados através da diferença de potencial aplicada em seus conectores e são compostos por um estator, formado por um ímã permanente, e um rotor, formado por uma bobina.

Neste trabalho, a aplicação deste tipo de motor de corrente contínua, ao invés de outros motores da mesma família (motores de passo, motores *brushless*, etc.), é mais adequada por atender quesitos como tamanho reduzido, baixa potência elétrica necessária e facilidade no controle.

Na Figura 3.1 são mostradas características físicas do motor, a Tabela 3.1 apresenta as características dinâmicas do motor e em complemento, no ANEXO 1, é detalhado cada item da tabela.

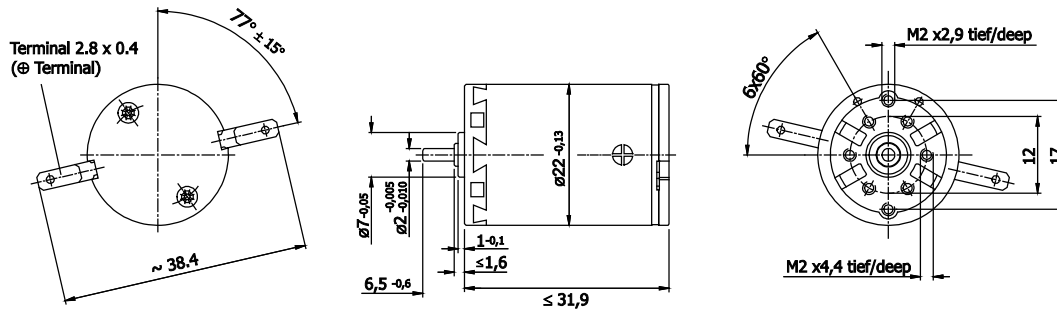


Figura 3.1 Dimensões do motor (mm).

Na Figura 3.2 é ilustrada a faixa de operação do motor. O funcionamento dentro da faixa de operação recomendada corresponde ao funcionamento dentro da potência de 5 W. Já na faixa de operação contínua, a uma temperatura ambiente de 25°C, o rotor alcança a temperatura máxima permitida comprometendo o motor. Fora dessas duas faixas, caso não possa ser evitado, recomenda-se a operação esporádica por um curto período de tempo.

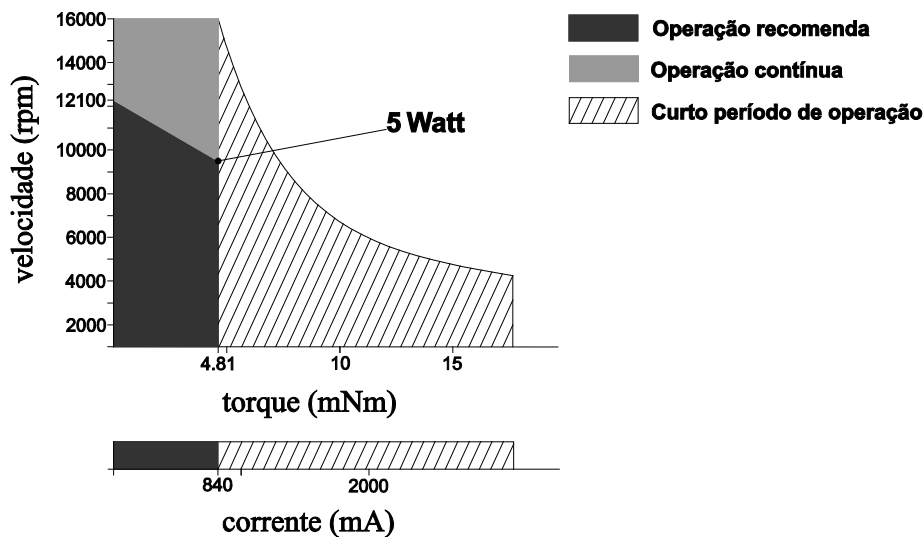


Figura 3.2 Faixas de operação do motor.

Tabela 3.1

Dados do motor A-max 22 -110117

1	Potência nominal	5,0	W
2	Voltagem nominal ¹	6,0	V
3	Velocidade sem carga ¹	9640	rpm
4	Corrente sem carga ¹	29,6	mA
5	Velocidade nominal ¹	7480	rpm
6	Torque nominal (máx. torque contínuo) ¹	$4,81 \times 10^{-3}$	Nm
7	Corrente nominal (máx. torque contínuo) ¹	840	mA
8	Torque parado ¹	$21,5 \times 10^{-3}$	Nm
9	Corrente de arranque ¹	3,65	A
10	Eficiência máxima ¹	83	%
11	Resistência nos terminais	1,64	Ω
12	Indutância nos terminais	0,106	mH
13	Constante de torque	$5,90 \times 10^{-3}$	Nm/A
14	Constante de velocidade	1620	rpm/V
15	Gradiente velocidade/torque	452×10^3	rpm/Nm
16	Constante de tempo mecânica	19,1	ms
17	Inércia do rotor	4,04	gcm ²
18	Velocidade máxima admissível	16000	rpm
19	Peso do motor	54	g

3.1.2 Redução

Foram usadas as reduções disponibilizadas pelo fabricante dos motores, por possuírem garantia de funcionamento com os motores da linha *A-max 22*, evitando incompatibilidades e erros no dimensionamento das engrenagens e na qualidade de fabricação.

Deste modo, o conjunto motor é formado também pela redução (modelo 110338), da linha de produtos *Planetary Gearhead GP 22 A* [34]. Na Figura 3.3 demonstram-se as medidas que dão forma a redução e na Tabela 3.2 apresentam-se as características físicas relevantes à dinâmica que a rege.

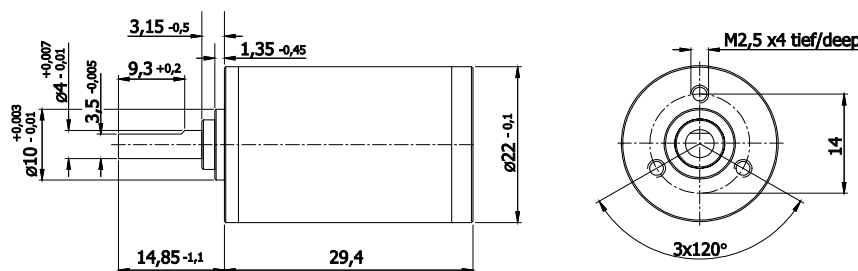


Figura 3.3 Dimensões da redução (mm).

¹ Valores à voltagem nominal

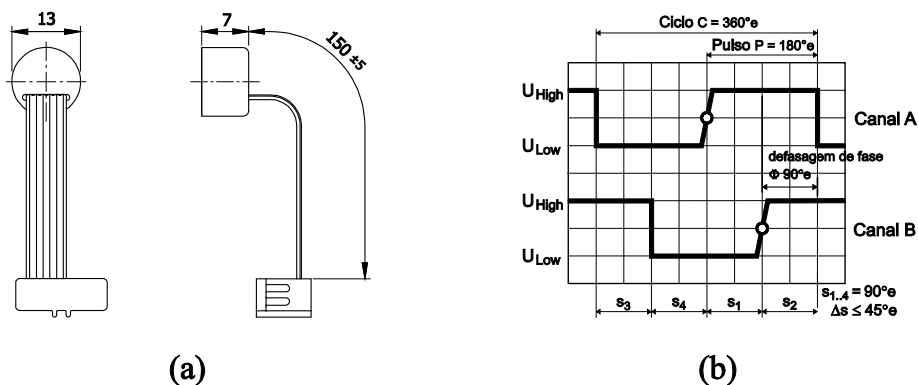
Tabela 3.2

Dados dinâmicos da redução *Planetary Gearhead GP 22 A*

1	Redução	19:1	
2	Redução absoluta	$3249/169$	
3	Número de estágios	2	
4	Torque máximo intermitente na saída da redução	0,5	Nm
5	Torque máximo permitido na saída da redução	0,8	Nm
6	Eficiência Máxima	70	%
7	Folga média	1,2	°
8	Massa de inércia	0,5	gcm ²
9	Peso	55	g

3.1.3 Encoder

Tecnicamente, o *encoder* provê dois canais contendo sinais digitais de onda quadrada defasados em 90° com frequências variáveis (Figura 3.4(b)). Estes sinais são utilizados para contagem de marcadores e a velocidade de passagem por eles, a soma de um número fixo de marcadores caracteriza-se por uma volta (no caso do utilizado nesse trabalho são 16 marcadores). Esta informação é utilizada para obter o número de voltas dadas em um determinado tempo (velocidade de rotação), a direção de giro e, indiretamente, a posição do robô (odometria). No sistema motor é utilizado o *encoder MEnc 13* [35] (Figura 3.4(a)).

Figura 3.4 Dimensões do *encoder* (mm) e sinais disponibilizados.

O *encoder* é montado com um conector (Tabela 3.3) que provê além dos sinais do sensor, os pinos de ligação ao motor, tornando prática a conexão da interface de controle com o sistema motor. Completando as informações do *encoder*, a Tabela 3.4 contém dados de como é operado.

Tabela 3.3
Pinos de conexão do *encoder MEnc 13*

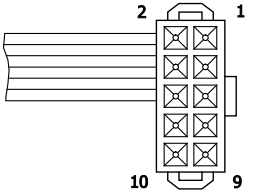
Pino	Descrição	Conector
1	Motor +	 <p>Tipo DIN 41651 (3M 89110-0101HA) Flat band cable AWG 28</p>
2	V_{cc}	
3	Canal A	
4	Canal B	
5	GND	
6	Motor -	

Tabela 3.4
Dados do *encoder MEnc 13*

1	Voltagem de alimentação (V_{cc})	3,8 - 24	V
2	Sinal de saída ($V_{cc} = 5$ VDC)	TTL Compatível	
3	Contagens por volta	16	
4	Número de canais	2	
5	Defasagem de fase entre os canais	90	°e
6	Corrente de entrada máxima ($V_{cc} = 5$ VDC)	8	mA
7	Inércia dos discos magnéticos	0,07	gcm ²
8	Frequência máxima de operação	20	kHz

3.2 Junta

Ligar a roda à plataforma base, fixar o atuador e ligá-lo ao eixo da roda, regulagens de altura entre chão e base, ajuste fino na junção das engrenagens, durabilidade, robustez a choques, etc., são algumas das funcionalidades construtivas da junta que faz a ligação do robô móvel ao chão. Neste item detalham-se a montagem e as características de cada elemento constituinte do grupo funcional designado por junta (Figura 3.5).

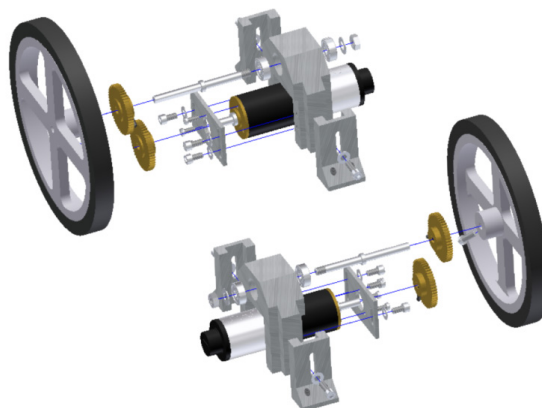


Figura 3.5 Junta de ligação.

3.2.1 Atuação

No item 3.1 encontram-se as características físicas de cada parte da unidade motora do robô (motor, redução e *encoder*). Estes valores são utilizados para calcular as características físicas finais, quando os três equipamentos operam em conjunto, do grupo funcional designado como atuador (Figura 3.6).

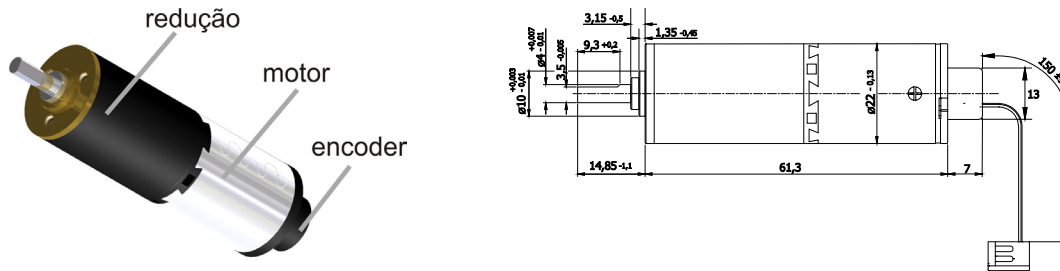


Figura 3.6 Imagem do atuador e dimensões (mm).

A velocidade de operação nominal do motor n_{mot} é 7480 rpm, a velocidade máxima exercida por ele sem carga $n_{\text{max,mot}}$ é 9640 rpm (Tabela 3.1) e a redução possui uma relação de redução i de 19:1 ($3249/169$) (Tabela 3.2). Então, utilizando a equação

$$n_b = \frac{n_{\text{mot}}}{i}, \quad (1)$$

calcula-se que a velocidade máxima contínua aplicável pelo atuador n_b é de 393 rpm e sua velocidade máxima sem carga $n_{\text{max,b}}$ é de 504 rpm.

O torque nominal do motor τ_{mot} é de $4,81 \times 10^{-3}$ Nm, o torque máximo exercido por ele parado $\tau_{\text{max,mot}}$ é de $21,5 \times 10^{-3}$ Nm (Tabela 3.1), a redução possui uma eficiência máxima η de 70% (Tabela 3.2) e a partir da equação

$$\tau_b = \tau_{\text{mot}} \cdot i \cdot \eta, \quad (2)$$

deduz-se que o máximo torque contínuo aplicável pelo atuador τ_b é de $63,97 \times 10^{-3}$ Nm e seu máximo torque intermitente exercido $\tau_{\text{max,b}}$ é de $285,95 \times 10^{-3}$ Nm.

Caracteriza-se por estes resultados (sumarizados na Tabela 3.5) que o atuador, operando em voltagem nominal $U_n = 6$ V, poderá exercer continuamente no máximo um torque de $63,97 \times 10^{-3}$ Nm e uma velocidade de 393 rpm. Valores fora dessas faixas são aplicáveis, porém em curtos espaços de tempo e esporadicamente. Torque e corrente são grandezas relacionadas diretamente, um aumento do torque acima da faixa nominal culmina no aumento rápido da

temperatura do estator, o que pode ocasionar comprometimento das características do motor dependendo do período de tempo de duração da sobrecarga.

Tabela 3.5
Características calculadas de torque e velocidade do atuador

n_b	Velocidade contínua máxima	393	rpm
$n_{max,b}$	Velocidade máxima sem carga	504	rpm
τ_b	Torque contínuo máximo	$63,97 \times 10^{-3}$	Nm
$\tau_{max,b}$	Toque máximo intermitente	$285,95 \times 10^{-3}$	Nm

3.2.2 Mancal da Roda

O mancal da roda (Figura 3.7) além de apoiar o eixo da roda, serve de base de sustentação e montagem para todas as outras peças da junta. Sua estrutura basicamente compõe-se por um mancal para o eixo da roda, base do mancal (direita da Figura 3.8) e a base da junta (esquerda da Figura 3.8).

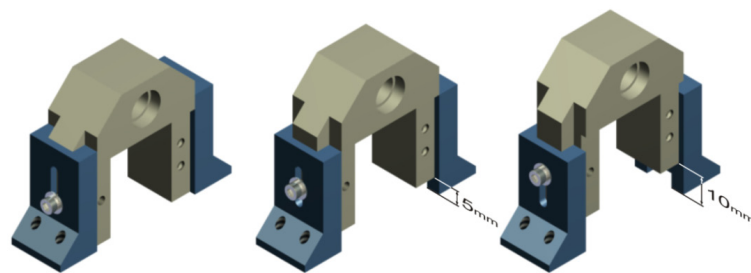


Figura 3.7 Mancal da roda.

A base do mancal utiliza rolamentos (Tabela 3.6) para minimizar o atrito e aumentar a robustez mecânica nos pontos de contato do eixo da roda, além de apresentar pontos de fixação para o suporte dos motores. Já a base da junta caracteriza-se como a peça de fixação da junta à base do robô.

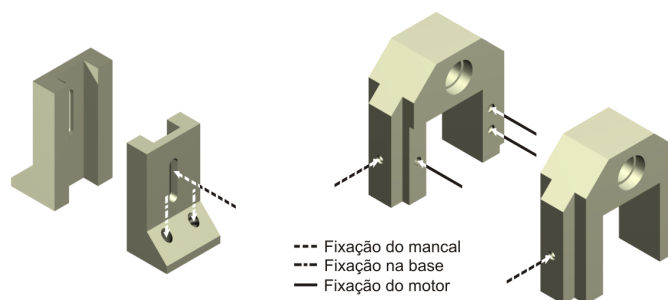


Figura 3.8 Base da junta e do mancal.

O suporte do eixo da roda em conjunto com a base da junta, viabiliza a regulagem de altura do robô. A variação da altura relativa ao chão possibilita que o robô possa utilizar diâmetros de roda variados e sua utilização em terrenos irregulares. Mas a principal motivação para inserção dessa característica de regulagem é a possibilidade de balancear longitudinalmente a estrutura do robô.

Tabela 3.6
Dados e dimensões (mm) do rolamento de 12 mm

Fabricante	NTN – <i>New Technology Network</i>	
<i>Part number</i>	604ZZ	
Carga dinâmica	132 kg	
Carga estática	49 kg	
Coef. de atrito de rolamento	$2,0 \sim 2,5 \times 10^{-3}$	
Coef. de atrito de partida	$5,0 \times 10^{-3}$	

3.2.3 Ligação Motora

A utilização de um eixo para alocação da roda atuada, ao invés da ligação direta ao eixo do motor, culmina na necessidade de criação de um meio de ligação entre o eixo do motor e o da roda. Opta-se no trabalho pela utilização de engrenagens cilíndricas retas (Tabela 3.7) para compor esta ligação, formando um meio robusto de passagem do torque fornecido pelo motor com suficiente eficiência.

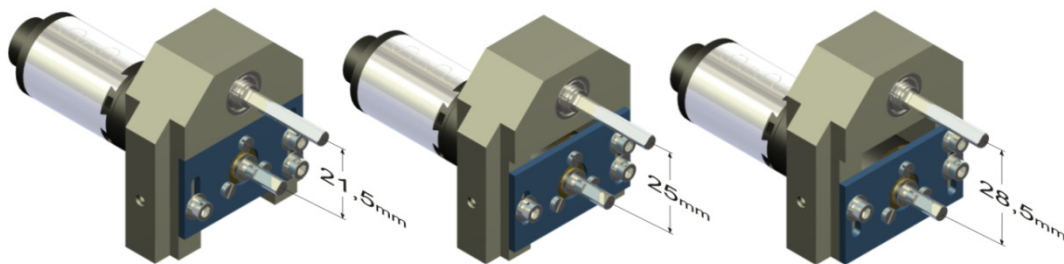


Figura 3.9 Ligação motora.

A regulagem do acoplamento das duas engrenagens, fixas ao eixo do motor e da roda, é feita por uma peça fixada ao motor (Figura 3.10) e ajustável em relação ao mancal, criando assim uma regulagem da distância entre estes eixos.

Tabela 3.7

Especificações e dimensões (mm) da engrenagem

Tipo	cilíndrica reta	
Número de dentes	50	
Módulo	0,5	
Furo	4 mm	
Diâmetro primitivo (b)	25 mm	
Diâmetro de pé (a)	24 mm	
Diâmetro de cabeça (c)	26 mm	
M. de inércia no eixo	0,001 gm ²	

Esta regulagem serve, primordialmente, para ajuste fino no ponto de contato entre as engrenagens, mas secundariamente, serve para inserção de outro nível de relação de velocidades em contra partida ao exibido pela redução existente no atuador (item 3.1.2). Resultando na liberdade de escolha de reduções diversas para funcionar em conjunto com a relação fixa do atuador.

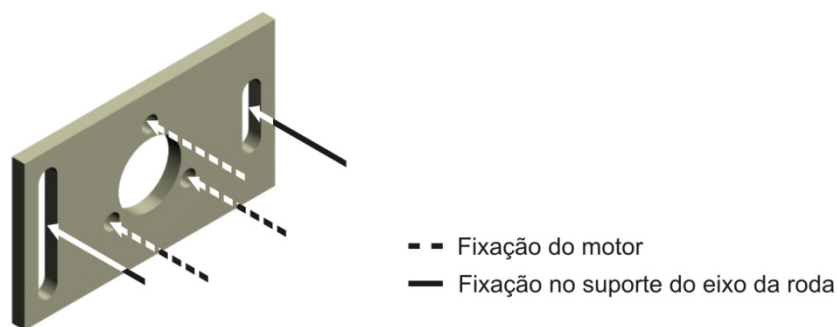


Figura 3.10 Suporte do motor.

3.3 Rodas

Dois tipos de rodas, mostrados na Figura 2.2, são usados na montagem do robô e são detalhados a seguir.

3.3.1 Roda Onidirecional Livre

A montagem rodas propulsoras de forma coaxial resulta, quando há mudanças de direção ou velocidade, em alterações dinâmicas no sistema devido a um movimento de “chicote” (Figura 3.11), que se caracteriza como uma perturbação indesejada ao sistema. O chicoteamento é facilmente evitado inserindo-se mais pontos de contato com o chão além das duas rodas fixas.

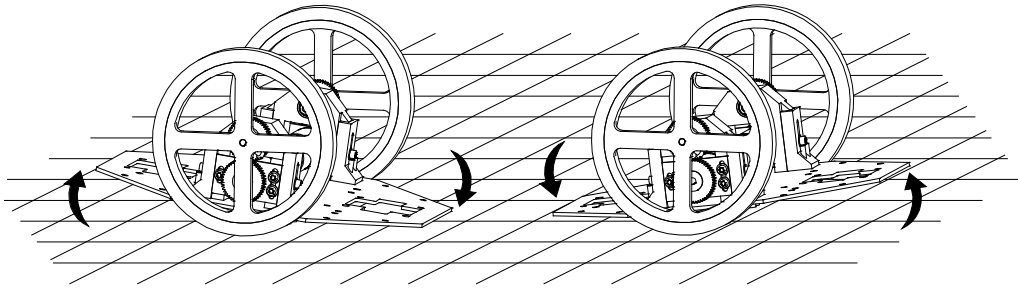


Figura 3.11 Efeito chicote.

Opta-se pela utilização de duas rodas onidirecionais, com rolos dispostos a 90° (Figura 3.12), não atuadas para balanceamento do corpo do robô. Esta roda se caracteriza por conseguir decompor o vetor velocidade, ao qual está submetida, em dois movimentos: dos rolos dispostos em seu perímetro e em torno do eixo principal da roda, ambos ilustrados na Figura 3.12. Embora não seja tão eficiente quanto uma esfera livre (exprime maior atrito e deslizamentos), a roda onidirecional consegue substituí-la eficientemente na tarefa de apoio do sistema.

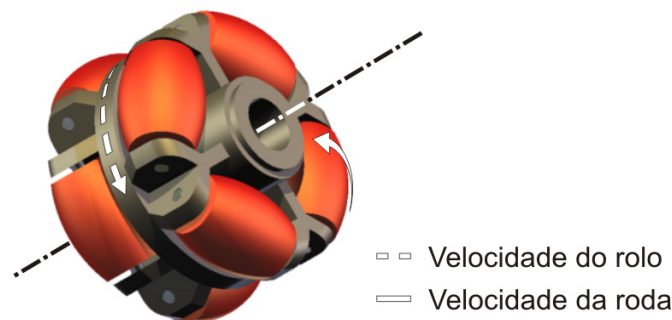


Figura 3.12 Roda onidirecional.

As rodas onidirecionais são fixadas à carroceria do robô através de mancais (Figura 3.13) com rolamentos (Tabela 3.8). Os mancais também possuem a liberdade de alterar a distância do centro das rodas não atuadas em relação à base do robô, possibilitando assim o equilíbrio da postura do sistema em relação ao chão.

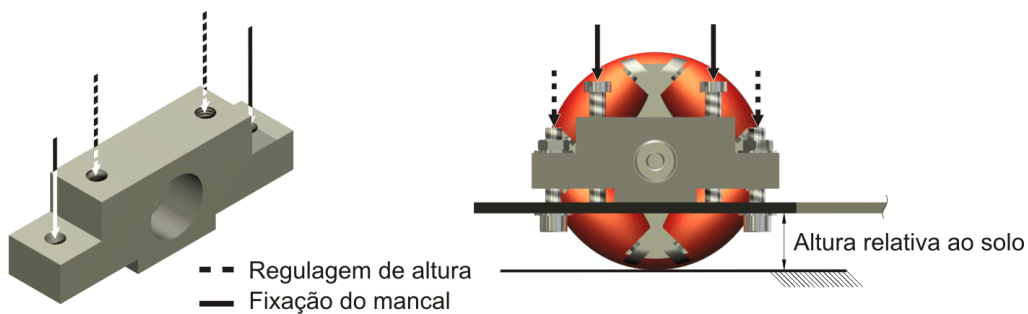


Figura 3.13 Montagem do mancal da roda não atuada.

Tabela 3.8

Dados e dimensões (mm) do rolamento de 10 mm

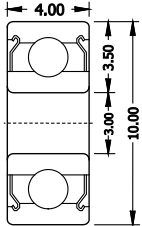
Fabricante	NTN – <i>New Technology Network</i>	
<i>Part number</i>	623ZZA	
Carga dinâmica	65 Kg	
Carga estática	22 Kg	
Coef. de atrito de rolamento	$2,0 \sim 2,5 \times 10^{-3}$	
Coef. de atrito de partida	$5,0 \times 10^{-3}$	

Tabela 3.9

Características da roda onidirecional

r_2	Raio	20	mm
m_2	Massa	32	g
I_{2w}	Momento de inércia em torno do eixo central	0,005	g m^2
I_{2m}	Momento de inércia em torno do eixo no plano da roda	0,003	g m^2

3.3.2 Roda Convencional Fixa

As rodas fixas (Figura 3.14) apenas fazem o papel de ligação da junta ao chão, para que o robô possa imprimir um torque para deslocar-se. Sua estrutura é composta por alumínio e disposto por todo o seu perímetro encontra-se, fazendo o papel de pneu, uma camada de Espuma Vinílica Acetinada (EVA), com a finalidade de aumentar o coeficiente de atrito entre o chão e a superfície da roda. Na Tabela 3.10 listam-se as características advindas da construção e composição da roda.

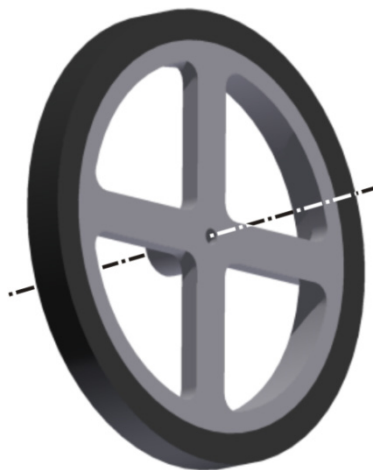


Figura 3.14 Roda convencional fixa.

Tabela 3.10
Características da roda convencional fixa

r_l	Raio	55	mm
m_l	Massa	90	g
I_{lw}	Momento de inércia em torno do eixo central	0,186	$g\ m^2$
I_{lm}	Momento de inércia em torno do eixo no plano da roda	0,094	$g\ m^2$

3.4 Carcaça do Robô

A carcaça do robô (Figura 3.15), pode ser representada como uma caixa que fornece fixação e proteção para os equipamentos contidos internamente e externamente, propiciando ao robô, meios de alocação para os equipamentos eletrônicos e circuitos descritos nos capítulos 4 e 5, a torre da câmera, as juntas e as rodas onidirecionais, além de especificar locais para a bateria e para o circuito de alimentação.

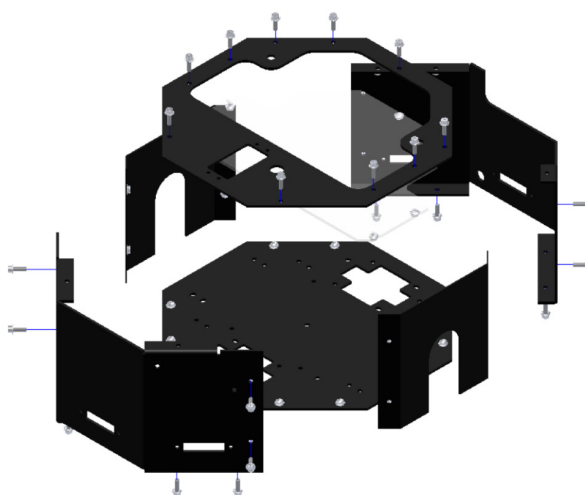


Figura 3.15 Visão explodida da carcaça do robô.

As imagens, apresentadas a seguir, não seguem especificações técnicas de escala, sendo apenas ilustrativas. As especificações de todas as peças componentes do corpo do robô estão agrupadas no ANEXO 4.

3.4.1 Chassi

O chassi (Figura 3.16) representa o elemento mais importante na árvore de fixação, conseqüentemente, direta ou indiretamente ele sustenta todos os componentes do robô. Para tal fim o chassi deve sustentar eficientemente todo peso que lhe é imposto, possuindo como elemento base

de projeto chapas de alumínio de 2 mm que apresentam suficiente rigidez relativa ao tamanho do robô e custo menor de produção por necessitarem somente de serviços de corte e dobra.

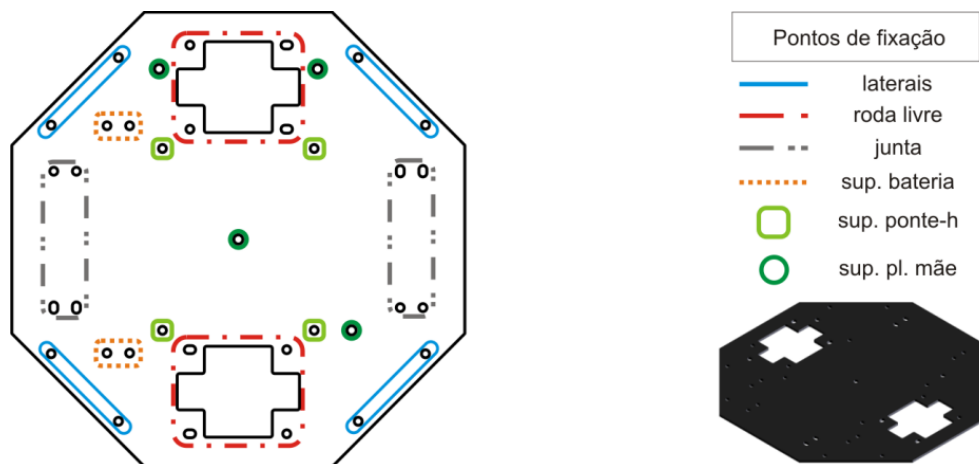


Figura 3.16 Chassi.

3.4.2 Laterais

As laterais são projetadas com chapas de alumínio com espessura de 2 mm, servem como sustento para peças menores e provêem proteção aos equipamentos internos na tentativa de evitar avarias capazes de ocorrer em pequenos choques.

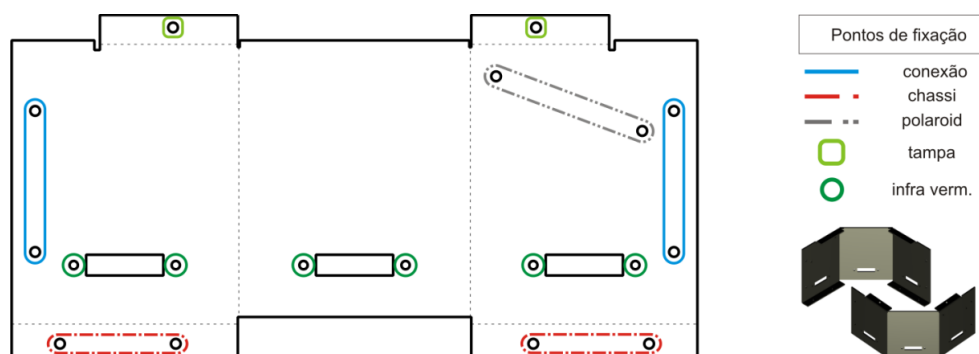


Figura 3.17 Peça frontal da carcaça.

Três peças formam as laterais da carcaça, a peça frontal (Figura 3.17), a peça traseira (Figura 3.18) e a conexão (Figura 3.19). As peças, frontal e a traseira, além da característica comum de proteção, possuem pontos de fixação para alocar componentes do sistema eletrônico. As conexões apenas aumentam a rigidez da carcaça (ligando a peça frontal e traseira) e protegendo engrenagens e juntas de impactos diretos.

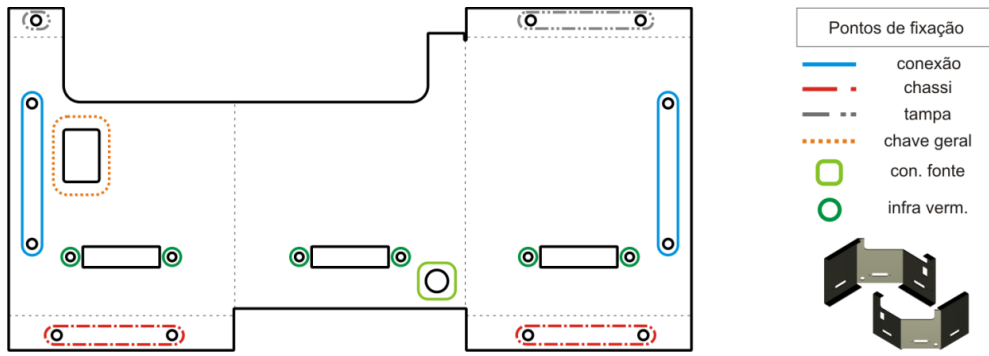


Figura 3.18 Peça traseira da carcaça.

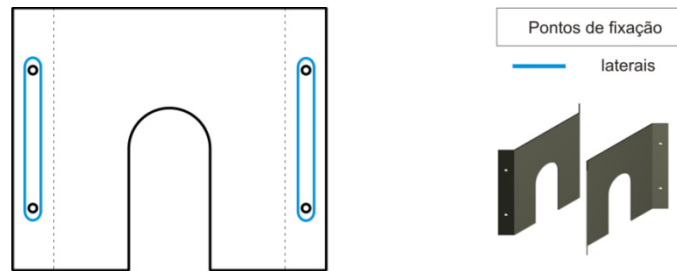


Figura 3.19 Peça de conexão da carcaça.

3.4.3 Tampa

A última peça que completa a carcaça do robô se compõe, na prática, por duas peças duas peças, o capô (Figura 3.20) e a janela (Figura 3.21), fechando o corpo do robô, provendo proteção contra impactos superiores e pontos de fixação para a antena do módulo sem fio, um botão de *reset* e a torre da câmera.

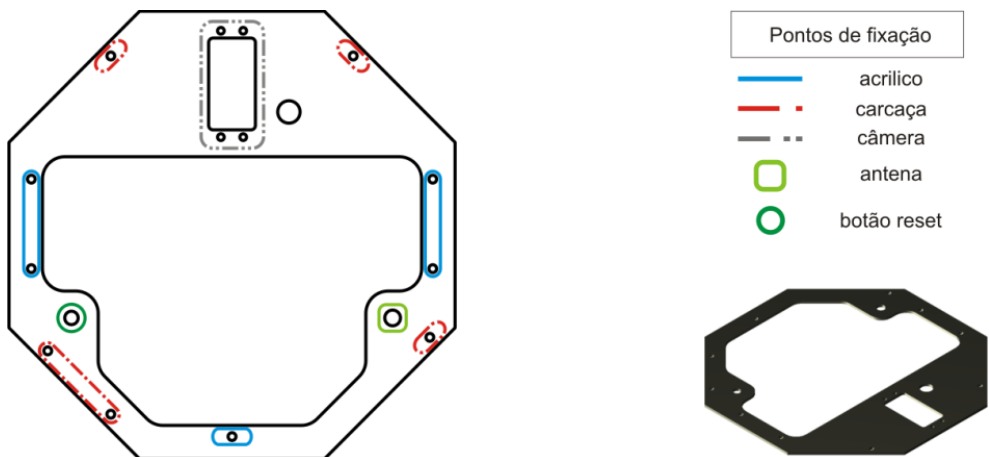


Figura 3.20 Tampa.

A janela é feita de acrílico para possibilitar a visualização de informações proporcionadas pelas placas eletrônicas internas ao corpo e manter a proteção contra impactos diretos a equipamentos internos ao robô.

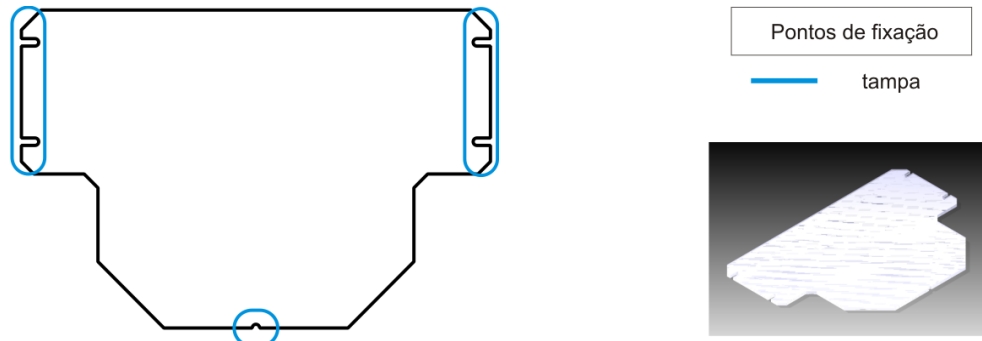


Figura 3.21 Janela de acrílico.

3.5 Torre da Câmera

A torre da câmera (Figura 3.22) suporta e fornece dois graus de liberdade no posicionamento da câmera. Este componente é distribuído pela empresa *Acroname Inc.* e é especialmente projetado para câmeras da *Carnegie Mellon University* (CMUcam1, CMUcam2, CMUcam3), porém para este trabalho o projeto da torre sofreu algumas alterações mecânicas para portar o transdutor e o cartão de memória.

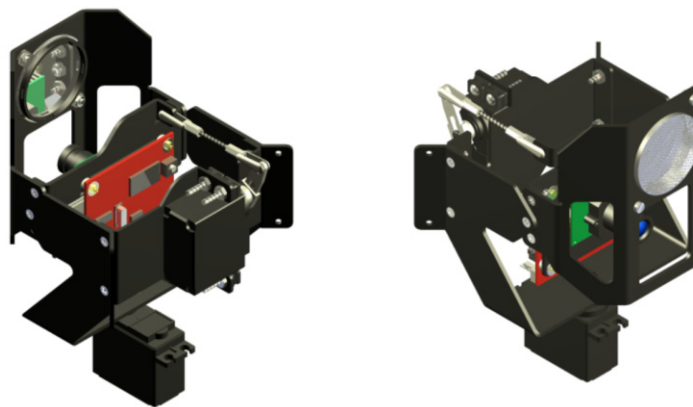


Figura 3.22 Torre da câmera.

Essencialmente duas peças foram trocadas, o rosto da torre (Figura 3.23) e o suporte da câmera (Figura 3.24). No rosto da torre alterou-se sua estrutura para que possa ser montado nele o transdutor, o qual não é previsto no projeto original da torre.

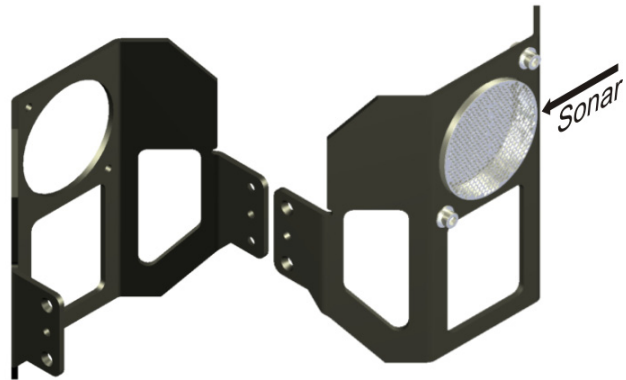


Figura 3.23 Rosto da torre.

O suporte da câmera foi substituído por uma peça que pudesse comportar a CMUcam3 com um cartão de memória. Na peça original o espaço disponível para a placa da câmera não é suficiente para inserção do cartão de memória, assim a nova peça traz uma solução para esse problema.

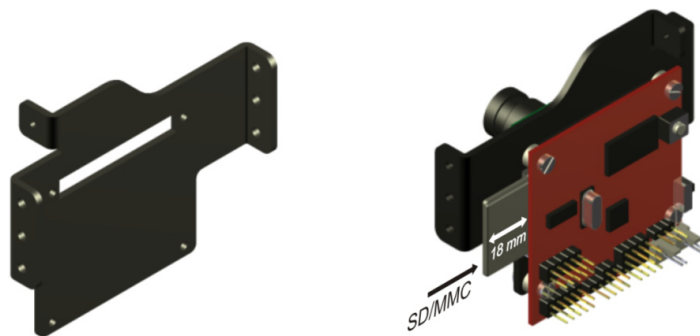


Figura 3.24 Suporte da câmera.

3.5.1 Atuadores da Torre

Para movimentar os dois graus de liberdade da torre, são utilizados dois servomotores HS-322HD [36] da empresa *Hitec RCD USA*. Na Tabela 3.11 as informações sobre este servomotor são apresentadas.

Estes motores devem ser controlados com uma onda quadrada com pico entre 3 V e 5 V, duração de pulso entre 0,9 ms a 2,1 ms (centro em 1,5 ms) e com frequência de 50 Hz. Os fios de ligação são o terra (preto), alimentação (vermelho) e controle (amarelo).

Tabela 3.11

Dados do servomotor

1	Voltagem de operação	4,8 – 6,0	V
2	Velocidade de operação	0,19 – 0,15	s/60°
3	Torque parado (<i>stall</i>)	3 – 3,7	kg.cm
4	Corrente parado e sem carga	7,4 – 7,7	mA
5	Corrente em movimento sem carga	160 – 180	mA/60°
6	Corrente parado com carga	700 – 800	mA
9	Largura de banda mínima	5	μs
10	Peso	43	g
11	Direção	horária	

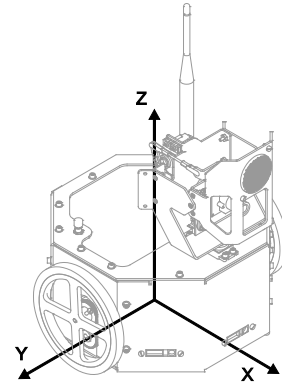
3.6 Verificação do Robô

A partir da montagem simulada de todas as peças (mecânicas e eletrônicas) do robô em uma ferramenta CAD (*Autodesk Inventor Professional 2008*) consegue-se estimar o peso final do robô, a distância entre as rodas, a posição do centro de gravidade e seus momentos de inércia (Tabela 3.12).

Tabela 3.12

Características do robô

Matriz dos momentos inércia do robô			
	x	y	z
x	23,128 gm ²		
y	-0,047 gm ²	20,950 gm ²	
z	-3,345 gm ²	0,224 gm ²	15,801 gm ²
Características da montagem			
Dist. entre rodas fixas		217	mm
Dist. entre rodas onidirecionais		134	mm
Peso		2,4	kg
Centro de gravidade			
Coord. X a partir do centro do robô		9,053	mm
Coord. Y a partir do centro do robô		-4,275	mm
Coord. Z a partir do chão		55,756	mm



Para localização do centro de gravidade considera-se que o plano xy é co-planar com o chão e o eixo y é paralelo ao eixo das rodas fixas.

A partir destes valores, apresenta-se nos próximos subitens um levantamento do torque necessário para executar uma tarefa de movimentação do robô para duas trajetórias, com a finalidade de demonstrar que os atuadores são capazes de operá-lo eficientemente. As equações utilizadas para cálculo destes torques podem ser verificadas em BEER et al. [37] e BEER et al. [38].

Este levantamento leva em consideração apenas os atritos inseridos pelos rolamentos dos mancais e os momentos de inércia da roda fixa e do sistema completo. Atritos viscosos, assim

como outras forças contrárias ao movimento não são alvo de estudo. Os momentos de inércia do rotor do motor, do eixo da roda e das engrenagens não são levados em consideração nos cálculos devido aos seus valores muito inferiores em relação aos momentos de inércia apresentados pelas rodas.

3.6.1 Torque de Partida e Dinâmico

Primeiramente há necessidade de se calcular o torque de atrito de partida, que expressa o torque necessário para retirar o robô do repouso. Como o robô apóia-se sobre mancais com rolamentos, o coeficiente de atrito de partida f_p (Tabela 3.6) segue as especificações do rolamento. Este coeficiente junto com o diâmetro da roda fixa d_1 (Tabela 3.10), a massa do robô m (2,4 kg) e a aceleração da gravidade g (9,8 m/s²), aplicados na equação

$$\tau = m g f \left(\frac{d_1}{2} \right), \quad (3)$$

chega-se ao valor de $\tau_s = 6,4 \times 10^{-3}$ Nm para o torque de partida. O torque dinâmico, que representa o torque necessário para manter o robô em movimento uniforme, é calculado com a mesma formula (3), diferenciando-se apenas na troca do coeficiente de atrito de partida pelo coeficiente de atrito dinâmico dos rolamentos f_d (Tabela 3.6). Assim, o valor encontrado para o torque dinâmico é de $\tau_d = 3,2 \times 10^{-3}$ Nm.

3.6.2 Tarefa de Movimento

Levando-se em consideração a execução de tarefas de movimentação do robô, testa-se o conjunto robótico desenvolvendo, a partir do repouso, uma aceleração até a velocidade de 0,5 m/s em 0,5 segundos, permanecendo nesta por 2 segundos e em seguida voltando ao repouso em 0,5 segundos (Figura 3.25), exercendo esta tarefa em uma trajetória retilínea e em torno de seu eixo vertical.

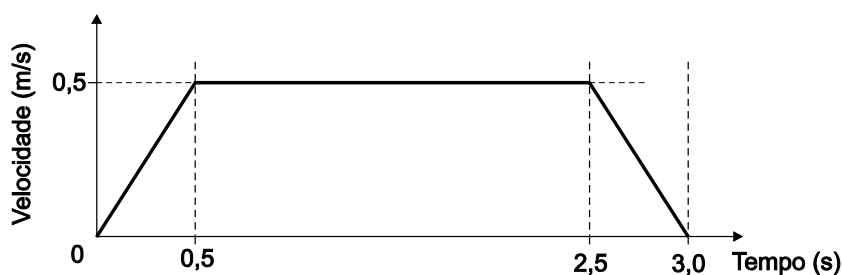


Figura 3.25 Tarefa de teste do robô.

Para calcular o torque necessário para movimentar em linha reta o robô requer que se conheça o momento de inércia das rodas fixas que propulsionam o robô. O torque necessário para acelerar a roda τ_{1w} é calculado utilizando a equação

$$\tau_{1w} = I_{1w} \vartheta, \quad (4)$$

sendo I_{1w} o momento de inércia da roda e ϑ a aceleração tangencial da roda. O momento de inércia dos rotores é ignorado, dado que seu valor é ínfimo em relação ao valor apresentado pela roda ($0,186 \text{ gm}^2$). Considerando a fórmula da aceleração tangencial:

$$\vartheta = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} r_1, \quad (5)$$

sendo r_1 o raio da roda convencional fixa, $\Delta\omega$ a variação da velocidade angular da roda e Δt a variação do tempo de aplicação da aceleração. Sabendo que para o robô andar em linha reta a uma velocidade de $0,5 \text{ m/s}$, as duas rodas terão que apresentar uma velocidade de aproximadamente $86,81 \text{ rpm}$. Por conseguinte, a velocidade tangencial necessária para acelerar as rodas é de $0,5 \text{ rad/s}^2$.

Automaticamente a partir de (5) o torque para acelerar as rodas é de $0,093 \times 10^{-3} \text{ Nm}$. Já para acelerar o corpo do robô é necessário aplicar uma força de $2,4 \text{ N}$, assim utilizando a relação

$$\tau = F_{ap} r_1, \quad (6)$$

na qual F_{ap} é a força aplicada ao corpo e r_1 é o raio da roda convencional fixa, chega-se ao valor de $132 \times 10^{-3} \text{ Nm}$ necessários para desenvolver o movimento.

Deste modo, para a primeira parte da tarefa necessitam-se de $132 \times 10^{-3} \text{ Nm}$ para acelerar o corpo do robô. Isto somado ao torque necessário para movimentar as duas rodas e o torque dinâmico anteriormente calculado, chega-se ao valor de $135,39 \times 10^{-3} \text{ Nm}$ necessários.

Durante a etapa de velocidade constante, apenas um valor igual ao torque dinâmico precisa ser aplicado para compensá-lo e durante a etapa de frenagem, necessita-se aplicar um valor relativo ao torque da primeira etapa em conjunto (agora atuando no mesmo sentido do trabalho) com o torque dinâmico. Os resultados para a trajetória retilínea apresentam-se na Tabela 3.13.

Tabela 3.13

Torques calculados para movimentar o robô em linha reta

Fase	Duração	Torque
Aceleração	0,5 s	$135,39 \times 10^{-3}$ Nm
Velocidade constante	2 s	$3,2 \times 10^{-3}$ Nm
Frenagem	0,5 s	$-132,19 \times 10^{-3}$ Nm

Já considerando a trajetória em torno do eixo vertical do robô, o movimento é caracterizado basicamente como uma rotação, o cálculo do torque necessário para desempenhá-lo faz-se a partir dos momentos de inércia do corpo do robô.

O robô possui uma distância entre rodas de 217 mm, assim à velocidade de 0,5 m/s o corpo do robô gira à velocidade de 44 rpm. Utilizando (4) e (5) para calcular o torque necessário para acelerar o robô até a velocidade final chega-se ao valor de $15,8 \times 10^{-3}$ Nm. Este valor ponderado da mesma forma que na trajetória retilínea resulta nos valores apresentados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14

Torques calculados para rotação do robô em torno do eixo vertical

Fase	Duração	Torque
Aceleração	0,5 s	$19,19 \times 10^{-3}$ Nm
Velocidade constante	2 s	$3,2 \times 10^{-3}$ Nm
Frenagem	0,5 s	$-15,99 \times 10^{-3}$ Nm

3.7 Conclusão

A partir dos cálculos desenvolvidos, o torque necessário para retirar o robô do repouso ($6,4 \times 10^{-3}$ Nm) comparado ao valor relativo ao torque contínuo do atuador ($63,97 \times 10^{-3}$ Nm), observa-se que o torque necessário é inferior e como robô é propulsionado por dois motores o torque aplicável por ele é na verdade duas vezes maior ($127,94 \times 10^{-3}$ Nm). Logo, em termos de torque necessário para retirar o robô do repouso conclui-se que os motores apresentam-se suficientes.

Executando a trajetória retilínea, o maior torque aplicado em uma das etapas é de $135,39 \times 10^{-3}$ Nm, comparando-se ao torque máximo capaz de ser exercido por um motor ($285,95 \times 10^{-3}$ Nm) apresenta-se menor. Como o robô utiliza dois motores, comparado ao torque passível de aplicação deste conjunto de atuadores ($571,9 \times 10^{-3}$ Nm), o valor da etapa mais custosa apresenta-se contida nos valores possíveis de operação.

A execução da tarefa em uma trajetória retilínea caracteriza-se como a mais complexa (apresenta valores de torque maiores para execução da tarefa), assim calculando-se o torque RMS da tarefa completa:

$$\tau_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{t_t}(t_1\tau_1^2 + t_2\tau_2^2 + t_3\tau_3^2)} = \sqrt{\frac{1}{3}(0,5 \cdot 135,39^2 + 2 \cdot 3,2^2 + 0,5 \cdot (-132,19)^2)} \approx 78 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

Como o torque RMS apresenta-se menor do que o torque de operação contínua dos dois motores ($127,94 \times 10^{-3} \text{ Nm}$), conclui-se que o robô é apto a executar a tarefa. Em relação aos torques necessários para execução da segunda trajetória, obtêm-se resultados menores aos apresentados pela primeira, deste modo, o robô também se mostra apto a executá-la.

Os detalhes do projeto mecânico apresentados neste capítulo são complementados com a documentação fornecida nos ANEXOS 1, 2, 3 e 4.

4. Dispositivos de Sensoriamento

Um dos objetivos desta dissertação é projetar um equipamento capaz de realizar experimentos com técnicas de controle de RMRs, as quais necessitam de variáveis obtidas por leituras realizadas por sensores. Assim a plataforma, além dos sensores de velocidade e torque dos motores, constitui-se também de sensores que disponibilizam diretamente ou indiretamente variáveis úteis em tarefas de controle.

No total, seis tipos de variáveis são sensoriadas no sistema do robô: rotação, diferença de potencial, distância, presença, orientação e visão. Cada uma destas é obtida por um dispositivo especializado, sendo que a rotação e a diferença de potencial são adquiridas pelo mesmo dispositivo (interface dos motores). Neste capítulo é realizada uma descrição sobre os sensores previstos na montagem da plataforma robótica, suas características principais e algumas peculiaridades de seu funcionamento.

4.1 Interface dos Motores

Basicamente o drive de potência S17-3A-LV-HBRIDGE [39] (Figura 4.1) permite que o sistema do robô móvel controle motores que necessitem no máximo de uma corrente contínua de 3,5 A para operação e provê toda a interface de sensoriamento necessária para leitura das variáveis do motor acoplado a ele. Na Tabela 4.1 exibem-se as principais características de operação deste dispositivo.

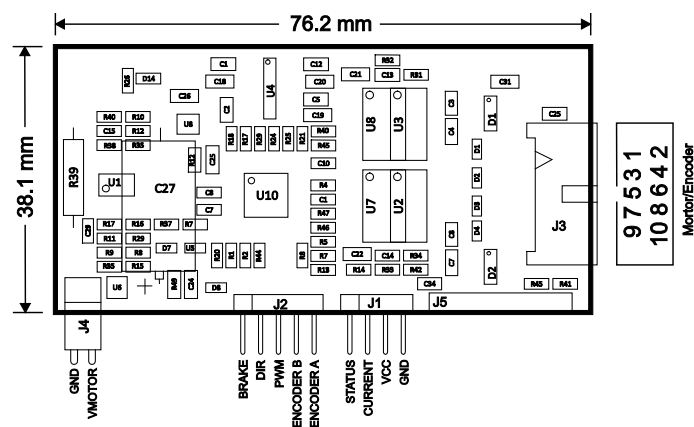


Figura 4.1 Drive de potência S17-3A-LV-HBRIDGE.

Tabela 4.1
Níveis de operação recomendada do drive de potência

Voltagem de alimentação (V_{cc})	4,5 – 5,5	V
Corrente de operação (I_{cc})	50	mA
Voltagem de alimentação do motor (V_m)	3,6 – 12	V
Corrente máxima do motor (I_m)	3,5	A

O drive de potência fornece uma forma de leitura das variáveis do motor ligado a ele, o valor analógico (relativo em Volts) da corrente passante pelo motor (I_m), o sinal dos sensores de volta do motor (ligados a resistores de *pull-up*) e um sinal do estado de funcionamento do módulo (explicado na Tabela 4.2).

Para controle do motor, este equipamento fornece pinos de frenagem, escolha da direção e alteração da diferença de potencial entre os contatos do motor (PWM até 50 KHz). Os sinais do módulo devem seguir os padrões TTL ou CMOS. Na Tabela 4.2 obtém-se a descrição de todos os pinos disponíveis na interface deste módulo, na

Tabela 4.3 apresenta-se a lógica de controle para os possíveis estados dos pinos e na Figura 4.2 ilustra-se os blocos funcionais da interface.

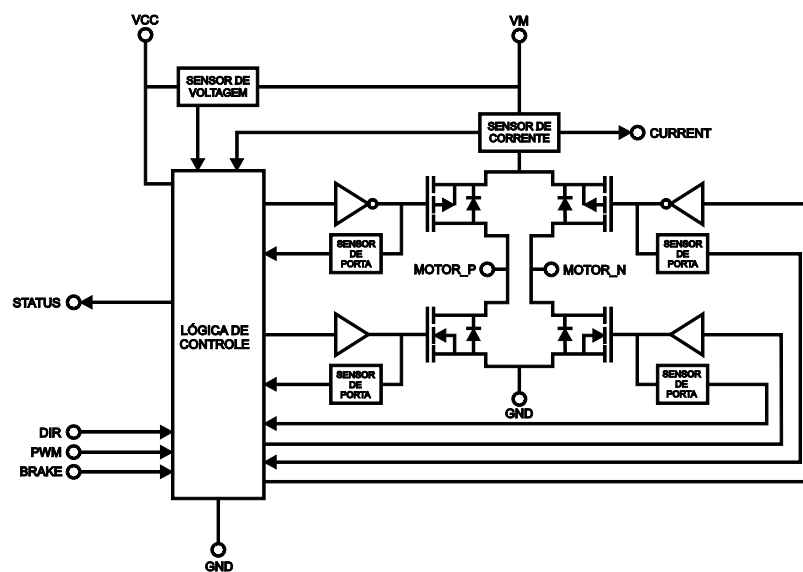


Figura 4.2 Diagrama funcional da interface dos motores.

Além destas características supracitadas o módulo apresenta também algumas proteções incorporadas, separação entre as alimentações do motor e do módulo, desligamento automático por corrente excessiva e voltagem insuficiente, bem como contra uma possível reversão na direção da corrente durante o chaveamento dos MOSFETs.

Tabela 4.2
Descrição dos pinos do drive de potência

Pino	Nome	Tipo ²	Descrição
J1-1	STATUS	I	Ativo (LH) quando em funcionamento correto. Inativo (LL) quando detectada corrente excessiva ou voltagem insuficiente (quando inativo os motores estão em giro livre).
J1-2	CURRENT	O	Sinal analógico correspondente a quantidade de corrente passando pelo motor (unidade é 1 V/A).
J1-3	VCC	S	Fonte de alimentação do circuito, normalmente 5 V.
J1-4	GND	S	Terra.
J2-1	BRAKE	I	Controla a frenagem, seu funcionamento é descrito na Tabela 4.3.
J2-2	DIR	I	Controla a direção do motor.
J2-3	PWM	I	Controla a voltagem aplicada ao motor.
J2-4	ENC_B	O	Sinal do canal B do <i>encoder</i> do motor ligado a um resistor de pull-up.
J2-5	ENC_A	O	Sinal do canal A do <i>encoder</i> do motor ligado a um resistor de pull-up.
J4-1	VM	S	Fonte de alimentação do motor.
J4-2	GND	S	Terra.

Tabela 4.3
Lógica de controle do drive de potência

Entradas			Saídas		Função
BRAKE	DIR	PWM	MOTOR_P	MOTOR_N	
0	0	0	VM	VM	<i>Brake High</i>
0	0	1	GND	VM	<i>Reverse</i>
0	1	0	VM	VM	<i>Brake High</i>
0	1	1	VM	GND	<i>Forward</i>
1	0	0	-- ³	--	<i>Free Spin</i>
1	0	1	GND	GND	<i>Brake Low</i>
1	1	0	--	--	<i>Free Spin</i>
1	1	1	VM	VM	<i>Brake High</i>

4.2 Sonar

O sonar utiliza-se da constante de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, no meio que está imerso, para obtenção de sua distância relativa a objetos capazes de refleti-las e que estejam dentro de seu campo de propagação. Na natureza é encontrado no sistema de orientação de morcegos e artificialmente é comumente utilizado em meio aquático (onde o ultra-som se propaga com maior velocidade que no ar), especificamente em embarcações marítimas. Em arquiteturas

² S = Fonte de potência; I = Entrada; O = Saída.

³ Nível flutuante.

robóticas de RMRs é utilizado na fusão com outros sensores para obtenção de uma única variável (distância).

Nas próximas subseções descrevem-se os dispositivos montados em conjunto na estrutura do RMR, um transdutor e um módulo de controle, que compõe o sonar utilizado nesta dissertação. Ambos são fabricados pela empresa *SensComp, Inc.*

4.2.1 Transdutor

O transdutor eletrostático *SensComp's Series 600 Environmental Grade* [40] (Figura 4.3), é específico para operação no ar à frequências ultra-sônicas e capaz de medir distâncias entre 15 centímetros e 10,7 metros com uma resolução de $\pm 1\%$.

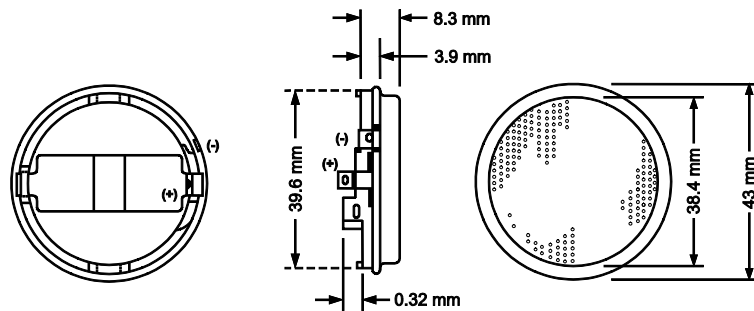


Figura 4.3 Transdutor *Series 600 Environmental Grade*.

As frequências passíveis de operação para transmissão/recepção e o gráfico de irradiação são apresentadas na Figura 4.4.

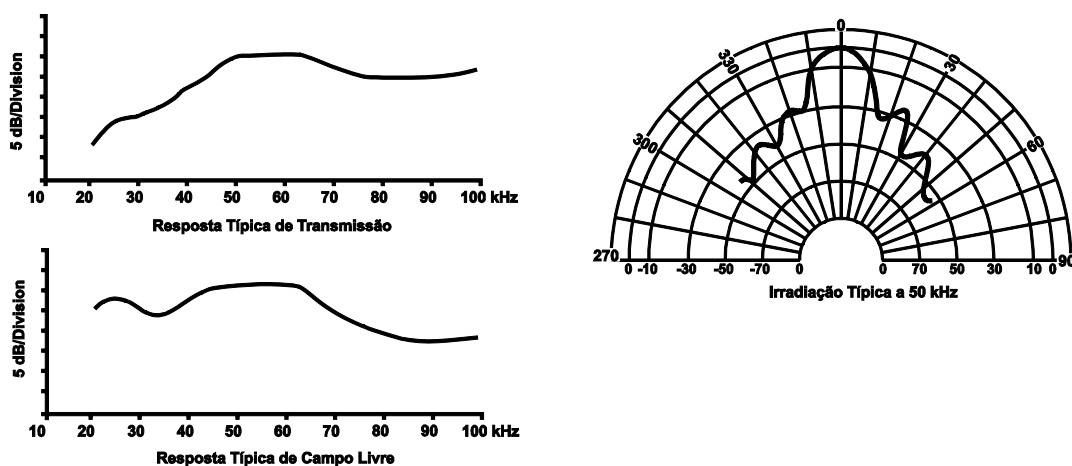


Figura 4.4 Resposta da transmissão/recepção e irradiação.

4.2.2 Módulo de Controle do Sonar

O módulo de controle, *6500 Serie Ranging Module* [41] (Figura 4.5), fornece uma interface para interligar transdutores eletrostáticos a dispositivos que trabalhem com níveis TTL. Na prática, este módulo fornece o circuito básico para funcionamento em conjunto dos componentes TL851 [42] (controle de sonar) e TL852 [43] (receptor de sonar) fabricados pela *Texas Instruments, Inc.*

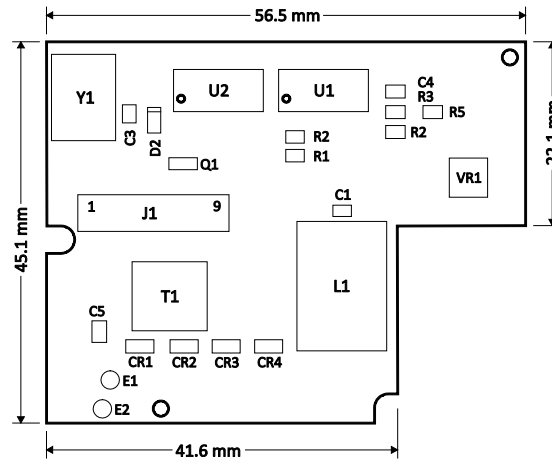


Figura 4.5 Módulo de controle *6500 Serie Ranging Module*.

O OSC (Figura 4.6) é um pino de saída habilitado junto com a ativação do pino INIT, onde sua frequência é dada por um ressonador dividida por 8,5 durante os primeiros 16 pulsos iniciais do ciclo (durante a transmissão) e dividida por 4,5 durante o restante do ciclo.

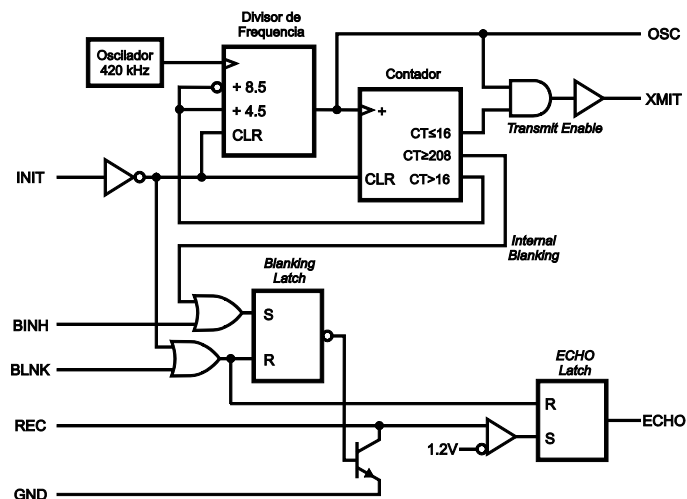


Figura 4.6 Lógica do módulo de controle do sonar.

Complementando as informações do módulo do sonar, na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5, são especificadas as suas características elétricas e a descrição de sua pinagem, respectivamente

Tabela 4.4

Níveis de operação recomendados do módulo de controle do sonar

Voltagem de alimentação (V_{cc})	4,5 – 6,8	V
Corrente de alimentação (I_{cc}) – durante transmissão	2000	mA
Corrente de alimentação (I_{cc}) – regular	100	mA
Intervalo entre alimentação e ativação do pino INIT	5	ms

Tabela 4.5

Descrição dos pinos do módulo de controle do sonar

Pino	Nome	Tipo ⁴	Descrição
1	GND	S	Terra.
2	BLNK	I	<i>Blanking</i> – desabilita o recebimento e zera o pino ECHO.
3	--	--	Não utilizado.
4	INIT	I	<i>Init</i> – inicia o ciclo de aquisição.
5	--	--	Não utilizado.
6	OSC	O	<i>Oscilator</i> – saída da frequência do oscilador.
7	ECHO	O	Ativa-se (LH) quando é detectado um retorno na leitura do sonar.
8	BINH	I	<i>Blanking inhibit</i> – utilizado para detectar objetos próximos (a menos de 40 centímetros).
9	VCC	S	Fonte.

4.2.3 Modos de Operação

Este módulo possui dois modos de operação denominados *Single-Echo* e *Multiple-Echo*. Ambos os modos possuem a mesma rotina de inicialização do ciclo de aquisição.

O ciclo do módulo inicia-se quando o pino INIT é ativado (LH). Deve haver no mínimo 5 milissegundos entre a aplicação de potência no pino VCC, conforme mostrado por **A** na Figura 4.7, e o sinal de início INIT, assinalado por **B** na mesma figura, para que todos os componentes internos estabilizem-se.

O dispositivo inicia o ciclo de aquisição com a transmissão sequencial de 16 pulsos e termina o ciclo quando houver a desativação da porta INIT (de acordo com **B** na Figura 4.8). Repete-se o ciclo somente quando INIT for ativado novamente.

⁴ S = Fonte de potência; I = Entrada; O = Saída.

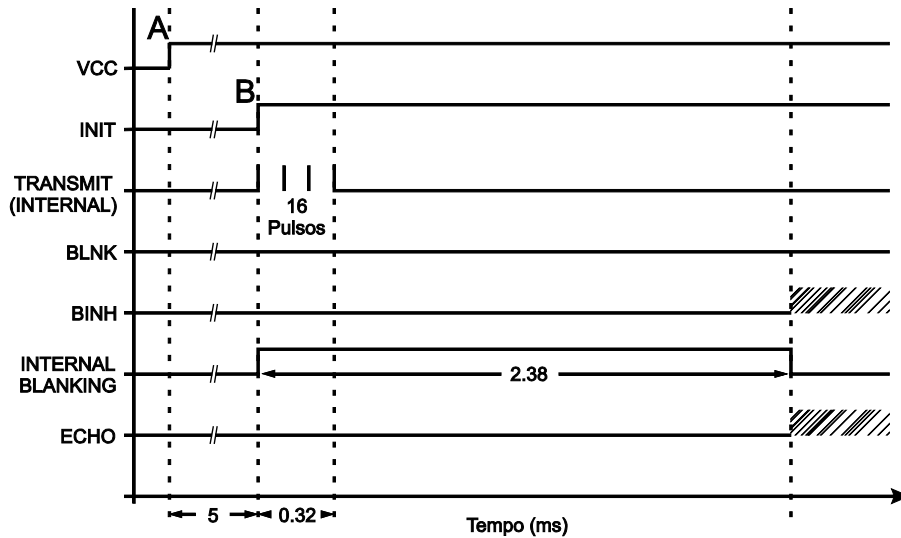


Figura 4.7 Rotina inicial do ciclo de aquisição.

Após o envio dos pulsos, o módulo permanece desabilitado por um tempo de 2,38 milissegundos antes de iniciar o recebimento, a fim de excluir falsos retornos que podem ser causados pelo tempo de estabilização do transdutor. Esta ação também inviabiliza a detecção de objetos a menos de 41,23 centímetros do transdutor, considerando a velocidade do som a 25°C (346,3 m/s). Se for necessário detectar objetos dentro dessa faixa, o tempo que o módulo permanece desabilitado deve ser eliminado ativando-se o pino BINH (LH). Esta ação permitirá o reconhecimento destes objetos, porém poderá haver falsas detecções no módulo.

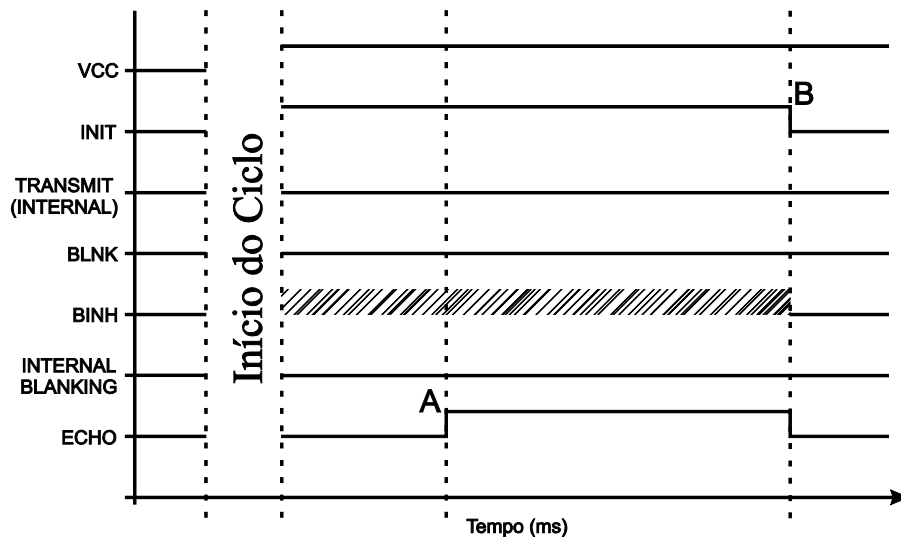


Figura 4.8 Ciclo de operação *Single-Echo*.

O pino BLNK pode ser utilizado para desabilitar o recebimento e zerar o pino ECHO. A qualquer momento durante o ciclo de aquisição, isso se faz necessário quando se quer selecionar o

signal de retorno ou quando se utiliza o modo *Multiple-Echo*. Logo, o módulo pode reconhecer os sinais de retorno de dois modos:

- ***Single-Echo:***

Este modo de operação, ilustrado na Figura 4.8, caracteriza-se por uma rotina, que após a transmissão, os 16 pulsos seqüenciais de início espera pelo primeiro retorno do sinal transmitido, o qual se propaga a aproximadamente 28,88 microssegundos por centímetros (considerando a velocidade do som a 25°C). Este sinal de retorno é amplificado e aparece como um sinal lógico alto no pino ECHO (assinalado por **A** na Figura 4.8).

O tempo entre a ativação do INIT e a resposta no pino ECHO é proporcional a distância do alvo ao transdutor. Se desejado, o ciclo pode ser repetido retornando INIT ao nível lógico baixo e colocado em alto quando a transmissão for desejada.

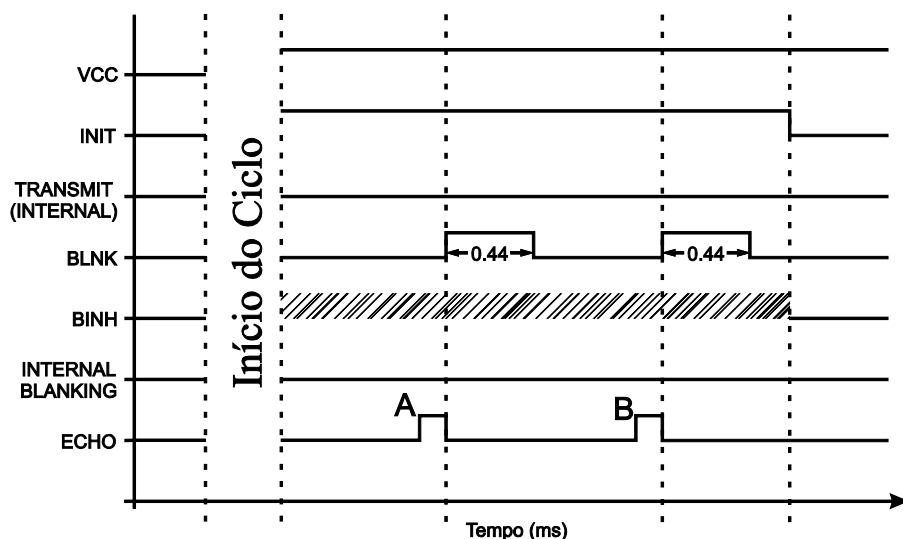


Figura 4.9 Ciclo de operação *Multiple-Echo*.

- ***Multiple-Echo:***

Caso exista mais de um alvo e deseja-se com uma única transmissão detectarem-se as distâncias a eles, então o ciclo deve ser levemente diferente (Figura 4.9). Após receber o primeiro sinal de retorno, o qual causa uma saída no pino ECHO (notado por **A** na Figura 4.9), um pulso deve ser aplicado no pino BLNK, zerando a saída ECHO, para que o próximo sinal de retorno possa ser reconhecido (apontado por **B** na mesma figura). O pulso em BLNK deve ter duração mínima de 0,44 ms para conseguir contabilizar o retorno dos 16 pulsos enviados, bem como para atendimento aos quesitos de atraso interno. Assim, devido ao tempo em que o sinal BLNK permanece habilitado, torna-se impossível detectar objetos a menos de 7,62 centímetros entre si.

4.2.4 Ganho

Durante o todo o ciclo, o ganho do amplificador, utilizado na amplificação do sinal recebido, é acrescido a intervalos de tempo, devido à atenuação do sinal transmitido ao longo de sua propagação. Este ganho é acrescido automaticamente pelo controlador e segue o padrão apresentado na Figura 4.10 e ele é diretamente proporcional ao ganho estático definido pelo resistor R1 (Figura 4.5) no circuito do módulo.

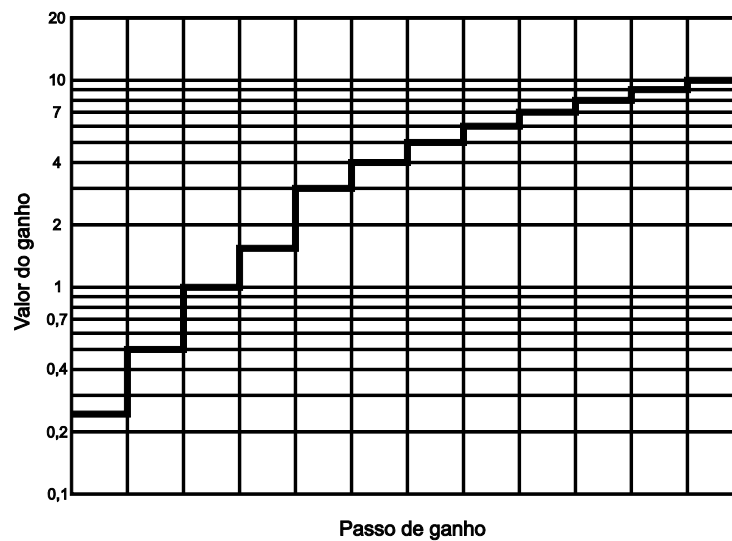


Figura 4.10 Seqüência de valores do ganho.

Após, aproximadamente, 38 ms decorridos a partir do início do ciclo, o ganho máximo é alcançado. O módulo possui dois níveis de ganho, o primeiro nível é fixo e definido pelo resistor R1 e o segundo nível é definido pelo potenciômetro VR1 (Figura 4.5) que provê um nível de ajuste ao ganho. Este segundo estágio é utilizado como um ajuste fino do ganho principal fixado pelo resistor R1.

4.3 Sensor Infravermelho

Robôs utilizam dispositivos de frequências infravermelhas para tarefas abrangentes, tais como comunicação sem fio, dispositivos de visão, sensores de presença, *encoders*, etc.

Neste trabalho o sensor infravermelho é utilizado para aquisição da distância do robô a objetos posicionados ao seu redor. Estes dispositivos em conjunto com o sonar e a câmera, realizarão uma leitura única da variável de distância (fusão de sensores).

Infravermelhos não permitem uma leitura precisa da distância a que se encontram do objeto refletor, porém sua leitura possui um menor consumo de energia, suprimindo a primeira vista, a

leitura da variável até que seja necessário utilizar sensores de custo superior, tais como o sonar e a câmera.

4.3.1 Modo de Funcionamento

A técnica de aquisição utilizada nestes sensores infravermelhos não somente fornecem a detecção do objeto como sua distância, além de apresentar maior imunidade às condições de luz do ambiente devido ao método de leitura.

Estes sensores utilizam triangulação [44] e um pequeno PSD (*Positions Sensing Detector*) linear para computar a distância e a presença de objetos dentro de seu campo de visão. A idéia básica é a emissão de um pulso de luz infravermelha que propaga no ambiente, onde este pode ou não ser refletido por um objeto. No caso de ser refletido ele voltará para o detector e criará um triângulo entre o ponto de reflexão, o emissor e o detector.

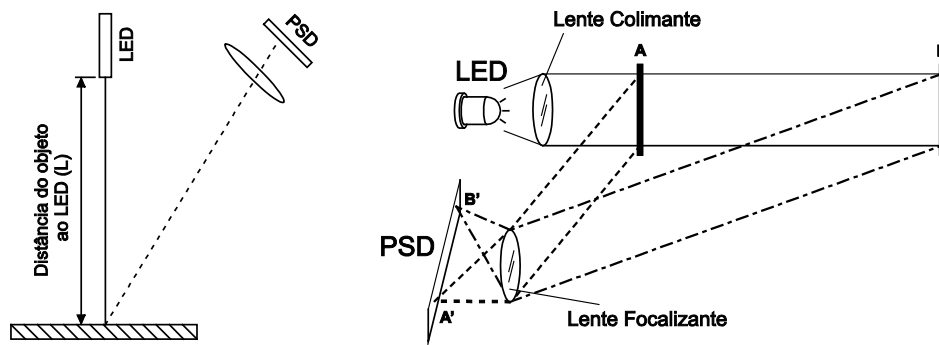


Figura 4.11 Funcionamento do infravermelho.

Os ângulos neste triângulo irão variar de acordo com a distância ao objeto (Figura 4.11). A porção receptora desses detectores é na verdade uma lente que transmite a luz refletida para o PSD que pode assim determinar em qual ângulo a luz refletida retornou e a partir deste valor derivar a distância ao objeto.

Este método de obtenção da distância possui grande imunidade à interferência luminosa do ambiente, visto na Figura 4.12(b) através baixa da variação na saída de acordo com a intensidade da iluminação no objeto refletor, e apresenta baixa alteração do sinal quanto à cor do objeto que está sendo detectado, visto na Figura 4.12(a) pela diferença mínima entre as curvas de saída para objetos de cores diferentes (branco e cinza).

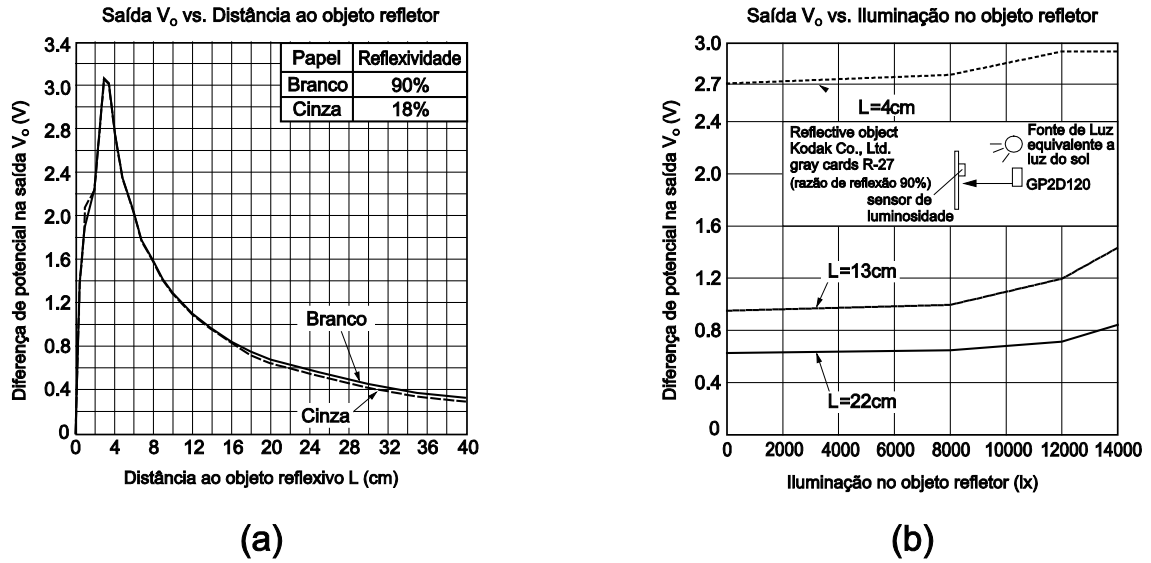


Figura 4.12 V_o vs. distância e V_o vs. iluminação.

4.3.2 Sensor SHARP GP2D120

Neste trabalho opta-se pela utilização de 6 sensores infravermelho fabricados pela empresa SHARP, modelo GP2D120 [45] (Figura 4.13). Suas características de operação estão citadas na Tabela 4.6.

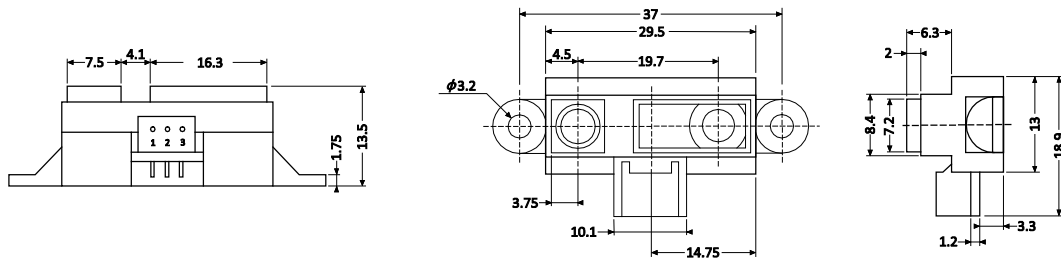


Figura 4.13 Dimensões (mm) do sensor infravermelho.

Estes sensores possuem a tecnologia citada na subseção 4.3.1. Utiliza um pequeno PSD para detectar o retorno do sinal de infravermelho e também para identificar a distância ao objeto refletor, retornando como leitura um valor analógico (V_o) variando entre 0 e 3,1 V. Para tanto, este componente já embarca todos os circuitos necessários para obtenção desta leitura (Figura 4.14) e necessita apenas de três pinos de conexão (Tabela 4.7).

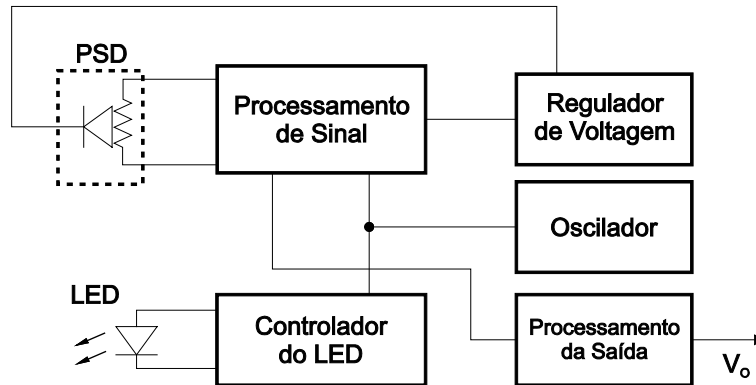


Figura 4.14 Diagrama de blocos do GP2D120.

Tabela 4.6

Características de operação do infravermelho

<i>Part Number</i>	GP2D120	
Voltagem de operação	4,5 -5,5	V
Corrente de operação	33 – 55	mA
Alcance de medição	4 – 30	cm
Tempo de resposta	44	ms

Tabela 4.7

Descrição dos pinos do infravermelho

Pino	Sinal	Descrição
1	V_o	Saída analógica. Retorna uma diferença de potencial relativa ao objeto refletor.
2	GND	Terra
3	V_{CC}	Entrada de potência

Verificando o gráfico na Figura 4.12(a), nota-se que para um mesmo valor de saída pode-se ter dois valores de distância atrelados, para que isto não ocorra em uma leitura, deve-se montar o sensor distante o suficiente da borda do dispositivo ao qual está embarcado, levando a leitura de objetos detectados para fora da região dúbia do gráfico. Neste sensor a região duplicada encontra-se abaixo de 4 cm, automaticamente uma boa prática de construção colocaria os sensores a pelo menos esta distância da borda do robô.

Neste trabalho o espaço disponível para alocação dos sensores não é suficiente para dispô-los a quatro centímetros de distância sem ter que aumentar consideravelmente o tamanho final do robô, o que se caracteriza como um elevado custo adicional ao projeto final. Assim, fica a critério do software inserir algum processamento à leitura do sinal, como utilizar a primeira derivada do sinal, desviando do problema de duplicidade.

4.4 Bússola

Na obtenção de referências de navegação, a bússola representa um dispositivo consolidado ao longo de anos, de uso freqüente em navegação marítima e aérea. Utilizada em RMRs, a bússola se soma à gama de sensores de posicionamento, para completar a leitura da localização do robô no ambiente de operação.

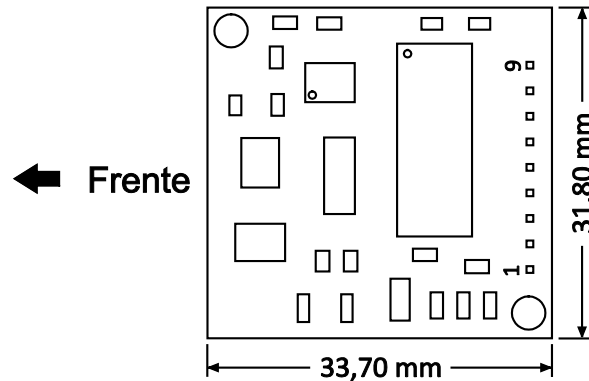


Figura 4.15 Módulo de orientação CMPS03.

O módulo CMPS03 (ver Figura 4.15 e Tabela 4.8 com as características elétricas) é projetado especificamente para navegação de robôs. Ele produz um número que representa a direção em que o robô se encontra relativo ao campo gravitacional da Terra. Utiliza-se de dois sensores magnéticos (Philips KMZ51[46]) que são suficientemente sensíveis para detectar o campo magnético da Terra. Ambos são perpendicularmente montados entre si e utilizados para medir a componente horizontal do campo magnético da Terra.

Tabela 4.8

Características de operação da bússola

<i>Part Number</i>	CMPS03	
Voltagem de operação	5	V
Corrente de operação	15	mA
Resolução	8 ou 16	bits
Frequência de aquisição	50 ou 60	Hz
Frequência do barramento I ² C	até 1,3	MHz

4.4.1 Comunicação

Este módulo de orientação possui duas formas de comunicação, modulação do valor lido através de PFM (*Pulse Frequency Modulation*) ou protocolo I²C (*Inter-Integrated Circuit*), com o dispositivo conectado a ele.

- **PFM:**

Neste método de comunicação (Figura 4.16), o pino 4 (Tabela 4.9) do módulo exibe um pulso modulado por PFM, onde o tempo de sinal alto do pulso representa o ângulo formado pelo módulo relativo ao campo gravitacional da Terra. A largura do pulso varia entre 1 ms (0°) e 36,99 ms ($359,9^\circ$), em outros termos $100 \mu\text{s}/^\circ$ com 1 ms de contrabalanço. O sinal fica baixo entre os pulsos durante 65 ms, portanto o período do PFM pode variar entre 66 ms e 102 ms, e é gerado a partir de um contador de 16 bits proporcionando uma resolução de 1 μs , porém não é recomendada nenhuma leitura menor que $0,1^\circ$ (10 μs).

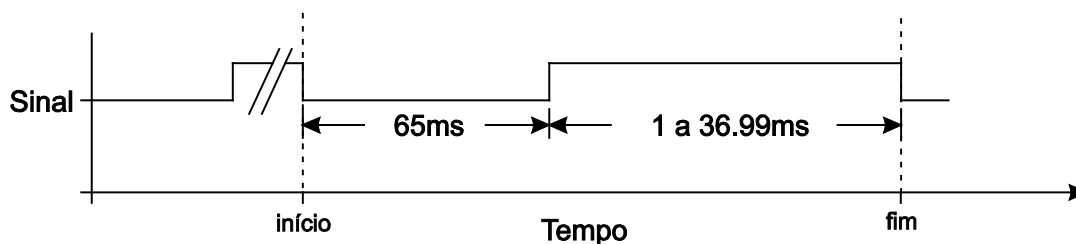


Figura 4.16 Ciclo de leitura do PFM.

Tabela 4.9

Descrição dos pinos da bússola

Pino	Sinal	Descrição
1	V_{CC}	Entrada de potência.
2	SCL	SPI – <i>Clock</i> .
3	DAS	SPI – Dados.
4	PFM	Saída modulada (PFM) do sinal de leitura.
5	--	Indisponível.
6	CALIBRATE	Pino de calibração.
7	50/60 Hz	Seleção da frequência de aquisição do módulo, a cada 40 milissegundos (50 Hz) ou 33,3milissegundos (60 Hz).
8	--	Indisponível.
9	GND	Terra.

- **I²C:**

A leitura do ângulo de orientação do módulo através do protocolo I²C é feita de maneira semelhante ao ciclo de leitura de memórias EEPROM (tais como a 24C04[47]). Primeiro envia-se o endereço do módulo com o bit de R/W baixo (0xC0) e, na seqüência, envia-se o número do registrador (Tabela 4.10) que se deseja ler. O módulo irá responder o mesmo endereço, porém com o bit de R/W alto (0xC1) e, em seguida, lê-se um ou dois bytes relativos ao registrador requerido.

Tabela 4.10
Registadores da bússola

Registrador	Função
0	Versão do software.
1	Orientação do modulo (valor entre 0 e 255).
2,3	Orientação do modulo (valor entre 0 e 3599 - 0° e 359.9° respectivamente).
4-11	Registadores de uso interno.
12,13,14	Indisponível – lê-se zero.
15	Comando de calibração.

A interface I²C do módulo é projetada para funcionar à velocidade de 100 kHz, porém pode funcionar até 1 MHz se tomado o cuidado de se utilizar resistores de *pull-up* nas linhas do barramento I²C (resistores de 47 kΩ).

Com velocidades de comunicação no barramento I²C em torno de 160 kHz, o módulo torna-se inapto a responder ao comando de leitura dentro do tempo necessário, porém inserindo-se um pequeno atraso de 50 μs antes ou após a escrita do endereço do registro é possível alcançar velocidades até 1,3 MHz.

4.4.2 Calibração

A calibração do módulo faz-se necessária devido ao campo gravitacional da Terra possuir componentes horizontais diferentes por toda sua superfície. Uma vez feita esta calibração para uma localidade, não será necessário refazê-la toda vez que reinicializar o módulo.

Dois métodos de calibração são possíveis no módulo, pela interface I²C ou uso de pinos especializados. A bússola deve ser mantida na horizontal com os componentes voltados para cima durante todo o processo.

- **Método I²C:**

Para calibrar o módulo utilizando o barramento I²C deve-se escrever 255 (0xFF) no registrador 15 para cada um dos quatro principais pontos cardeais (norte, sul, leste e oeste). Os pontos podem ser definidos em qualquer ordem, porém todos devem ser calibrados.

- **Método dos pinos especializados:**

O pino 6 é utilizado para calibrar a bússola. Este método baseia-se na utilização do pino 6, inserindo-se um pulso lógico (nível baixo seguido de um alto) para cada ponto cardeal. Novamente todos os pontos devem ser calibrados e em qualquer ordem.

4.5 Dispositivo de Imagem

A percepção do ambiente através de imagens, que é uma abstração do sistema de visão humana que, por ser o principal método de sensoriamento utilizado pela maioria dos seres vivos, é de fácil compreensão e atraente em um projeto de robótica. A “visão”, como é nomeada, se desenvolvida e aproveitada em um sistema robótico é capaz de substituir outros sensores, devido à riqueza de informações derivadas de uma seqüência de imagens.

Existem diferentes topologias de sistemas capazes de adquirir imagens (planas, estéreas, panorâmicas) com diferentes espectros de cores e resoluções. Todos esses fatos influenciam diretamente no tamanho, na potência, no desempenho e principalmente no custo do equipamento de aquisição. Para o trabalho a escolha foi uma câmera do tipo *pinhole* para se utilizada em tarefas de seguimento de objetos tal como apresentado em LOMBARDI et al. [21].

No âmbito deste trabalho a arquitetura do robô possui uma torre de suporte de câmera, permitindo que possa ser anexada, a esta, qualquer câmera que respeite seus limites de tamanho e carga.

4.5.1 CMUcam3

Optou-se dentro da gama de câmeras disponíveis no mercado, por uma de custo relativamente baixo, que apesar de sua dimensão reduzida, possui a capacidade de programação da arquitetura de aquisição, permitindo a criação de aplicações de pré-processamento ou até de controle de sistemas sem necessitar de outros controladores externos.



Figura 4.17 Sensor CMOS da câmera com lentes focais.

A CMUcam3 [48] é a terceira geração de uma plataforma de visão programável desenvolvida por pesquisadores da *Carnegie Mellon University*. Na Tabela 4.11 encontram-se alguns dados acerca de sua operação. O projeto caracteriza-se por ser de código aberto e mantido por pesquisadores da instituição citada, além do grupo de desenvolvedores que a utilizam direta ou indiretamente em seus projetos.

O sistema utiliza um módulo sensorial CMOS de câmera fabricado pela *Ominivision*, o *OV6620* [49], montado sob uma lente (Figura 4.17) e especificada na Tabela 4.12. O controlador (Figura 4.18) é baseado no microcontrolador Philips LPC2106[50], capaz de executar aplicações para tarefas de processamento das imagens adquiridas, controle de servomotores, comunicação externa e manipulação de alguns pinos de GPIO.

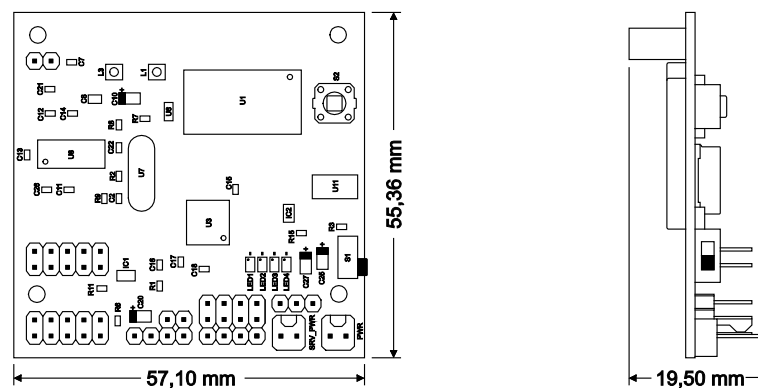


Figura 4.18 Sistema de controle da CMUCam3.

Este módulo de visão também contém uma solução completa para utilização de cartões de memória não-volátil seguindo o padrão MMC/SD, disponibilizando a arquitetura física e a biblioteca para transferência de dados entre o microcontrolador e o cartão, incluindo um sistema de arquivos FAT16.

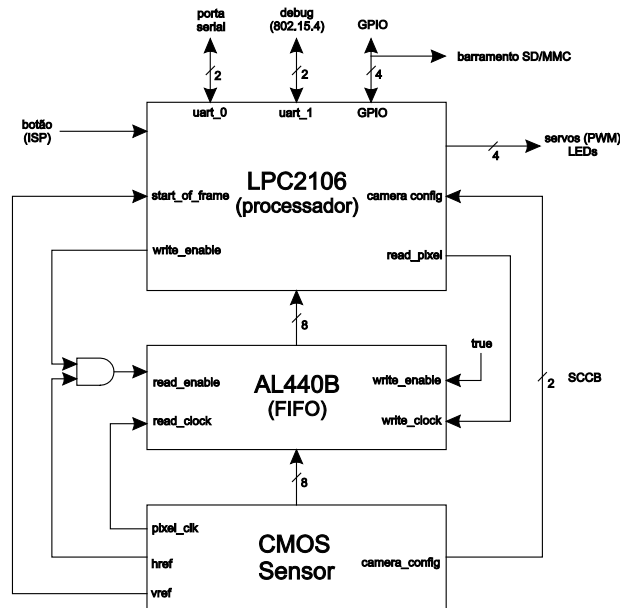


Figura 4.19 Diagrama funcional da CMUCam3.

O processador é ligado ao sensor por um circuito impresso de memória FIFO com 1 MB de espaço (Figura 4.19), a *AL440B* [51] fabricada pela *Averlogic*. Esta arquitetura é suportada pelo módulo por uma biblioteca de gerenciamento capaz de carregar as imagens a uma velocidade de até 26 quadros por segundo operando na resolução máxima (352x288 pixels).

Tabela 4.11

Características de funcionamento da câmera

Voltagem de operação	5	V
Corrente de operação	130	mA
Frequência do CPU	14 – 60	MHz
CPU RAM	64	KB
CPU ROM	128	KB
Capacidade da memória externa	1	MB
Resolução máxima da câmera	352x288	pixel
Profundidade de cores da câmera	8	bits/pixel
Velocidade máxima da UART	115,200	kbps

Tabela 4.12

Características da lente da câmera

Área de sensoriamento	pol	1,47	<p>Diagrama de corte da lente da câmera. O plano da imagem está a uma distância de 4,88 mm da lente.</p>
Distância focal	mm	3,6	
Distância focal traseira	mm	5,7	
Distorção ótica	%	-27	
Ângulo de visão	°	(D) 92, (H) 80, (V) 59	
Extensão do foco	cm	40 - ∞	

4.6 Conclusão

No total, seis tipos de variáveis são sensoriadas no sistema do robô, rotação, diferença de potencial, distância, presença, orientação e visão. Cada uma destas é obtida por um dispositivo especializado, sendo que a rotação e a diferença de potencial são adquiridas pelo mesmo dispositivo.

Na Tabela 4.13 deliniam-se os dispositivos descritos no desenvolvimento deste capítulo, contendo informações resumidas de sua procedência e carga que inserem ao sistema eletrônico. Destas informações deriva-se que embora a corrente necessária para operação normal dos sensores não se caracterize como um problema de projeto, em momentos esporádicos (como a fase de transmissão do sonar) a carga demandada pelo sistema torna-se crítica, sendo este é um ponto relevante ao projeto eletrônico.

Outra informação importante contida na Tabela 4.13 é o número de portas (especializadas, analógicas e digitais) necessárias para a operação dos sensores, o que é primordial na escolha do microcontrolador que compõe a interface de disponibilização de suas leituras.

Tabela 4.13
Resumo dos sensores do robô

Nome	Fabricante	Número de Portas		Corrente (mA)	
		Analógica	Digital	op. normal	max.
Drive de potência	Acroname Inc.	1	6	50	--
Sonar	SensComp, Inc.	--	4	100	2000
Infravermelho	Sharp	6	--	33	55
Bússola ⁵	--	--	2	15	--
Câmera ⁶	<i>Carnegie Mellon University</i>	--	2	130	--
Total		7	14	328	2250

Portanto as informações contidas no desenvolvimento deste capítulo junto com as resumidas na Tabela 4.13, são pontos de partida para as considerações e decisões tomadas no projeto eletrônico e para trabalhos futuros (como no desenvolvimento futuro de um circuito de alimentação para o robô).

⁵ Barramento I²C

⁶ Porta UART

5. Projeto Eletrônico

Este capítulo apresenta a proposta de um circuito eletrônico capaz de por em funcionamento todos os dispositivos eletrônicos abordados no capítulo 4, interligando-os, fornecendo recursos para controle e operação dos dispositivos. O projeto do circuito atém-se às especificações contidas nas folhas de dados dos componentes e à experiência prática em eletrônica.

A análise prática do circuito, investigando ruídos e qualidade nos sinais, não se apresenta como objetivo deste trabalho. Ao contrário do projeto mecânico, este apenas é exposto como ponto de partida para trabalhos futuros que tenham foco na construção prática do sistema eletrônico.

Tabela 5.1
Descrição dos esquemáticos do projeto eletrônico

Título	Descrição
<i>Main</i>	Esquemático principal, contendo a representação das principais ligações do controlador central aos componentes.
<i>Antenna</i>	Circuito para ligação do módulo WLNG-NA-DP101 (subseção 5.2.2) ao controlador central, contendo proteção contra sobre-corrente, uma chave de barramento para evitar a aplicação de sinais ao módulo enquanto estiver desligado e LEDs indicadores de estado.
<i>Core</i>	Representação das portas disponíveis pelo módulo eLPC64 (subseção 5.4.1) junto com a interface JTAG, um circuito de <i>reset</i> automático e chaves de seleção explicadas na Tabela 5.10.
<i>Buzzer</i>	Circuito gerador de frequência audível. Utilizado para executar campanhas exprimindo alarmes ou estados do robô.
<i>IR Array</i>	Circuito multiplexador de leitura de sinais analógico. Previsto para ser utilizado na leitura dos sinais dos infravermelhos.
<i>Motors</i>	Conectores dos <i>drives</i> de potência para, controle dos atuadores, aquisição dos <i>encoders</i> e leitura dos torques dos motores, junto com LEDs de estado dos <i>drives</i> .
<i>SD</i>	Conector de cartões MMC/SD à porta SPI, junto com resistores de proteção e CI controlador da linha de alimentação.
<i>UART</i>	Circuito de montagem do CI especializado na conexão USB/UART junto com conector USB.
<i>USB</i>	Circuito para conexão a uma porta USB, contendo um MOSFET de <i>soft-connect</i> , resistores de proteção e conector USB.
<i>Compass</i>	Conector da bússola ao barramento I ² C e conector para disponibilização externa do barramento.

Neste capítulo são mostrados mais alguns componentes adicionados ao projeto do robô, com a finalidade de controlar ou viabilizar a cooperação de todas as funções disponíveis no robô e citadas neste trabalho. No ANEXO 5 apresentam-se todos os esquemáticos dos circuitos desenvolvidos e citados na Tabela 5.1.

5.1 Memória Não-Volátil

A memória de caráter não-volátil, embarcadas em microcontroladores, caracteriza-se normalmente pela capacidade na ordem de poucos Kbytes devido a restrições de custo do componente. Esta memória embarcada destina-se principalmente para utilização em aplicações do microcontrolador que necessitem manter, entre ciclos de desligamento, configurações ou outros dados de software.

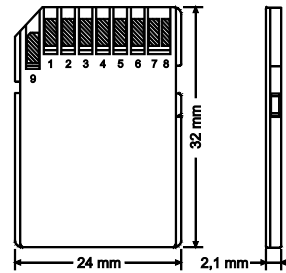
Quando em casos de aplicações que desenvolvem tarefas de aquisição de dados e não há comunicação com outro equipamento externo capazes de receber e armazenar estes dados, a capacidade limitada desta memória torna-se insuficiente para conter o volume de armazenagem requerido. Existem equipamentos no mercado especializados na armazenagem de grandes volumes de dados, possuindo velocidades e métodos de acesso e armazenagem variados e podem ser usados para aumentar a capacidade de armazenamento a um custo inferior à memória de dados.

5.1.1 Cartão Secure Digital (SD)

O cartão SD (Figura 5.1) fornece uma solução de armazenamento de grandes volumes de dados em memória não-volátil de baixo custo.

As especificações do padrão SD definem que suas capacidades podem chegar até 2 Gbytes utilizando um sistema de arquivos FAT16 (*File Allocation Table*). Porém outros padrões já se encontram disponíveis, o *Secure Digital High-Capacity* (SDHC), exibindo capacidades entre 4 e 32 Gbytes com velocidades de 2, 4 e 6 MB/s utilizando FAT32 e recentemente iniciou-se a disponibilização de outro padrão da família SD, o *Secure Digital Extended Capacity* (SDXH), suportando capacidades de 32 GB a 2 TB, com taxas de dados até 104 MB/s com planos para viabilizar taxas até 300 MB/s.

Para este trabalho, o padrão SD com capacidades até 2 GB (FAT16) é perfeitamente adequado ao volume de dados oriundos dos sensores a serem utilizados no robô. A Figura 5.1 e a Tabela 5.2 detalham as informações relativas a este padrão de memória não-volátil.

Figura 5.1 Cartão *Secure Digital*.

O padrão de nível físico SD [52] define dois modos de comunicação com o dispositivo controlador, o modo SD *Card* e o modo SPI. O primeiro modo necessita de uma linha de comando e quatro linhas de dados dedicadas para cada SD presente no sistema, apresentando uma taxa de 25 Mb/s para cada linha de dados. O segundo modo utiliza um barramento compartilhado SPI para comunicação com o cartão de memória, apresentando uma taxa máxima de dados de 25 Mb/s (3 MB/s), necessitando um número menor de pinos dedicados para a operação do cartão.

Tabela 5.2

Características de operação do cartão de memória

Voltagem de operação (oscilador interno)	2,7 – 3,6	V
Máximo valor de <i>ripple</i> (pico a pico)	60	mA
Corrente durante leitura	65	mA
Corrente durante escrita	75	mA
Corrente em modo <i>sleep</i>	250	μ A
Tempo máximo de acesso a leitura	100	ms
Tempo máximo de acesso a escrita	250	ms

As descrições dos pinos do cartão SD, de acordo com uma comunicação SPI, estão descritos na Tabela 5.3 e na Tabela 5.2 apresenta-se algumas características de funcionamento e tempo de execução de tarefas.

Tabela 5.3

Descrições dos pinos do cartão de memória em modo SPI

Pino	Nome	Tipo ⁷	Descrição
1	CS	I	Selecionador do cartão.
2	DataIn	I	Linha de comandos e dados (mestre para escravo).
3	VSS1	S	Terra.
4	VDD	S	Fonte de alimentação.
5	CLK	I	Sinal de sincronismo.
6	VSS2	S	Terra.
7	DataOut	O	Linha de dados e estados (escravo para mestre).
8	RSV	I	Reservado.
9	RSV	I	Reservado.

⁷ S = Fonte de potência; I = Entrada; O = Saída.

Além da programação do *host* para comunicar-se utilizando o modo SPI do cartão, o controlador deve integrar, para pleno funcionamento de suas aplicações, um sistema de arquivos FAT16 para conseguir manipular a quantidade total de espaço disponível no cartão inserido no sistema. A FAT é padronizada por alguns órgãos, sendo uma das publicações deste padrão [53] disponibilizada pela associação ECMA (*European Computer Manufacturers Association*) e que serve como referência para este sistema de arquivos.

5.2 Meio de Comunicação Sem Fio

Ao se projetar plataformas que se movem pelo ambiente, devem-se evitar conexões físicas com os equipamentos que o controlem, monitorem ou forneçam qualquer outro serviço. Evitando-se que características do sistema, tais como seu espaço de operação e grau de mobilidade, apresente novas restrições além das impostas por seu formato físico.

Dois tipos de conexão externa por cabos são comuns entre RMRs: a alimentação elétrica e a transferência de dados. A primeira conexão é resolvida pela inserção de baterias e constitui-se em um problema para a autonomia e tamanho do sistema, conforme será discutido nas seções seguintes.

O problema de transferência de dados caracteriza-se como um meio de comunicação entre o robô e um dispositivo externo para seu monitoramento ou controle. A forma de se evitar a utilização de cabos para essa tarefa é a utilização de tecnologias de comunicação sem fio. Existem inúmeras tecnologias e padrões no mercado sobre redes sem fio, ao optar-se por um deles consideram-se algumas características necessárias para a utilização no sistema desenvolvido neste trabalho, tais como:

- Tempo gasto para desenvolvimento do sistema (protocolos de modulação e comunicação);
- Interface de comunicação (sistema embarcado/módulo e módulo/equipamento externo);
- Alimentação e impacto na autonomia do sistema como um todo;
- Facilidade de compra e distribuição da tecnologia;
- Tamanho do módulo e equipamentos externos necessários.

Como tecnologia de comunicação optou-se pela descrita pelo padrão IEEE 802.11g [54] compatível com o padrão IEEE 802.11b [55, 56] ambos amplamente utilizados pela indústria e usuários caseiros. Equipamentos que utilizam esses padrões são de fácil aquisição, de baixo custo e apresentam vasta documentação sobre configuração e forma de funcionamento.

A seguir descrevem-se pontos importantes dos padrões 802.11b/g e, na seqüência, descreve-se o módulo escolhido, suas características eletrônicas e físicas, seu funcionamento e configuração.

5.2.1 802.11b/g Wireless LAN

O padrão IEEE 802.11 [57] define uma família de especificações para Wireless LANs (WLAN) desenvolvida por um grupo de trabalho da IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). O objetivo principal deste padrão é desenvolver uma especificação de *Medium Access Control* (MAC) e camada física para conexão de equipamentos sem fio a uma rede local. Existem várias especificações nesta família e outras ainda em fase de desenvolvimento, neste projeto apenas os padrões 802.11b e 802.11g podem ser utilizados pelo módulo wireless optado.

Há duas formas básicas de configuração ou modos de operação para um sistema 802.11, infra-estrutura ou *ad-hoc* [58]. No modo infra-estrutura como mostrado na Figura 5.2, os dispositivos sem fio comunicam-se com a LAN através de pontos de acesso. Cada ponto de acesso e seus clientes são conhecidos como *Basic Service Set* (BSS). Um *Extended Service Set* (ESS) consiste de dois ou mais BSSs na mesma sub-rede. Pontos de acesso não somente provêem caminhos de comunicação entre WLANs e LANs como também gerenciam o tráfego de dados no ambiente. Múltiplos pontos de acesso podem fornecer grandes coberturas como, por exemplo, todo um prédio ou campus.

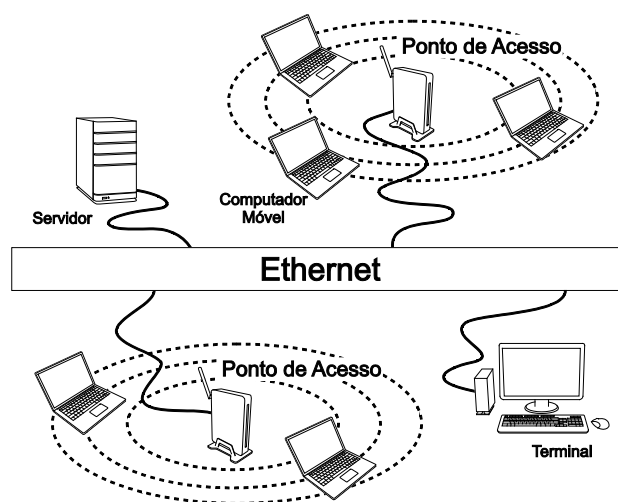


Figura 5.2 Modo infra-estrutura.

O modo *ad-hoc*, também conhecido como *peer-to-peer*, como mostrado na Figura 5.3, é a mais simples configuração de WLAN, neste modo equipamentos sem fio podem se comunicar entre si diretamente sem utilizar um ponto de acesso. Nomeados também como IBSS (*Independent*

BSS), estas redes independentes usualmente não requerem qualquer administração ou pré-configuração e pontos de acesso podem ser utilizados para estender seu alcance funcionando como repetidores, eficientemente ampliando a distância entre os aparelhos.

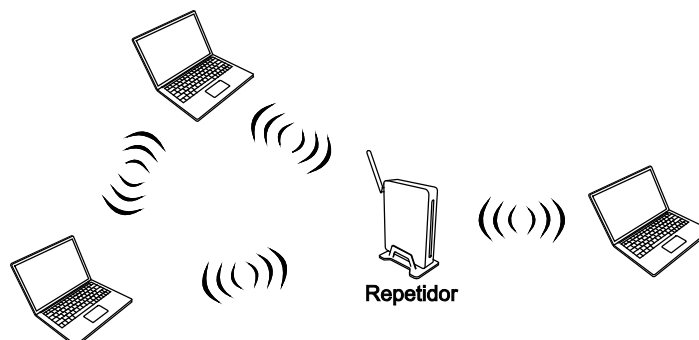


Figura 5.3 Modo ad-hoc.

- **Padrão 802.11b**

A especificação 802.11b foi ratificada em 1999. Este é o primeiro sistema sem fio comercial e vastamente distribuído por todo o mundo sendo capaz de providenciar taxas de dados de 1 a 11 Mbps (com uma cobertura de 30 metros) em uma rede sem fio compartilhada. Opera na banda 2.4 GHz *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) que faz parte do espectro de rádio que pode ser usado livremente sem licenciamento na maioria dos países. Utiliza como método de modulação do sinal o método *Complementary Code Keying* (CCK) e o método *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA-CA) na camada MAC para divisão do meio de comunicação.

- **Padrão 802.11g**

802.11g é um padrão IEEE aprovado em 2003 que oferece taxas de dados até 54 Mbps e provê compatibilidade com o padrão 802.11b, suportando a codificação Barker, modulação CCK e utiliza a mesma técnica de divisão do meio (CSMA-CA).

- **Performance em sistemas mistos (802.11g e 802.11b)**

Embora os benefícios da alta velocidade e a compatibilidade com aparelhos do legado 802.11b tenham tornado o padrão 802.11g a mais promissora tecnologia WLAN, há alguns pontos importantes que podem causar degradação no desempenho da rede sem fio, especialmente em um ambiente onde estão em funcionamento aparelhos com os dois padrões [59].

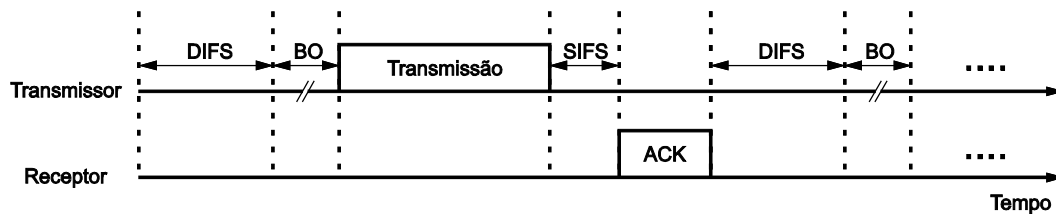


Figura 5.4 Método CSMA/CA.

No envio de pacotes, um equipamento 802.11 necessita acessar o canal de acordo com o protocolo contido em sua camada MAC. O padrão 802.11b/g utiliza CSMA/CA, o qual tenta evitar que diferentes aparelhos transmitam ao mesmo tempo para fim de evitar colisões, ilustrado na Figura 5.4. Quando um dispositivo detecta que o canal está livre por um período de tempo, especificado pela constante nomeada *Distributed Inter Frame Space* (DIFS), ele entra em espera por mais um período variável (*backoff* - BO) antes de enviar os dados. Isto irá reduzir a probabilidade de que outro aparelho tente transmitir ao mesmo tempo. Após enviar o pacote de dados, o aparelho aguarda pelo sinal de confirmação (ACK) que irá aparecer após outro período de tempo, porém agora especificado pela constante *Short Inter Frame Space* (SIFS), antes de começar a próxima transmissão.

Durante o procedimento de acesso ao canal, o tempo é contado em uma unidade básica chamada de tempo de *slot*. No padrão 802.11b é definido por 20 μ s e no padrão 802.11g suporta-se dois tamanhos 20 e 9 μ s, para garantir compatibilidade. Na camada MAC, a disputa de conexão e o *backoff* variável são baseados nestes valores. Quanto menor o *slot*, menor o tempo de transmissão e, portanto, maior a eficiência do sistema. Em um cenário misto, todavia, equipamentos 802.11g têm que usar o *slot* de 20 μ s para competir de uma forma justa com aparelhos 802.11b. Isto é necessário para evitar favorecimento de equipamentos que possuem *slot* menor, o que ocasionaria acesso preferencial ao meio sem fio.

Outro ponto a ser considerado em um meio misto é a não detecção, por aparelhos 802.11b, de sinais OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) transmitidos por equipamentos 802.11g, ocasionando na incorreta dedução do meio estar livre para transmissão. Isto acarreta colisões e degradação do desempenho do sistema. Como prevenção, o padrão 802.11g especifica dois métodos para correção deste problema: *Request-To-Send* (RTS)/*Clear-To-Send* (CTS) e CTS-to-self.

Ambos os mecanismos são utilizados para reduzir as colisões na transmissão dos pacotes. Porém, o custo dessas proteções acarreta no aumento do tempo de transmissão, e assim reduz-se o rendimento efetivo. A redução no desempenho neste caso pode chegar a 30%.

5.2.2 Airborne WLNG-AN-DP101

Dos módulos existentes no mercado, capazes de criarem uma WLAN 802.11b/g, optou-se pelo *Airborne WLNG-AN-DP101* [60, 61] (Figura 5.5). Fabricado pela empresa Quatech, Inc., este módulo se caracterizou atrativo para o projeto por ser de fácil aquisição (embora importado), tamanho relativamente menor aos concorrentes, suporte claro e direto do fabricante e gama de sistemas embarcados mais completa. Esta subseção do capítulo se foca na descrição dos sistemas embarcados neste módulo e suas características construtivas.

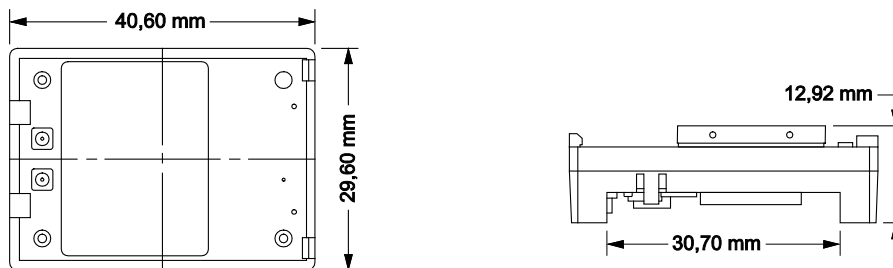


Figura 5.5 Dimensões do módulo WLNG-AN-DP101.

Na Tabela 5.4 estão seqüenciadas as principais características do módulo, incluindo as características de potência de funcionamento, protocolos embarcados e velocidades de comunicação entre as interfaces. Na Tabela 5.5 descrevem-se as velocidades de transmissão de dados comparadas à distância entre o módulo e dispositivo de conexão, ponto de acesso (infra-estrutura) ou outro dispositivo sem fio (*ad-hoc*). Na Figura 5.6 ilustram-se cada componente interno do módulo e suas interligações juntamente com as entradas e saídas existentes e completando as informações técnicas do módulo, na Tabela 5.6, descrevem-se os pinos do módulo e complementando estas informações, na Tabela 5.7, a descrição dos sinais de estado.

Tabela 5.4
Características do módulo de comunicação sem fio

<i>Part Number</i>	WLNG-AN-DP101	
Padrão Wireless	IEEE 802.11b/g, WiFi compatível (802.11i, 802.11e 802.11d apto)	
Tecnologia de Modulação	DSSS, CCK, OFDM	
Tipo de Modulação	DBPSK, DQPSK, CCK, BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	
Taxas de dados	802.11b – 11, 5.5, 2, 1 Mbps 802.11g – 54, 48, 36, 24, 18, 12, 9, 6 Mbps	
MAC	CSMA/CA com ACK, RTS, CTS	
Protocolos	TCP/IP, ARP, ICMP, DHCP, DNS, TFTP, UDP, UDAP Discovery	
Segurança	WEP 64 e 128bits (RC4), WPA (TKIP) e 802.1x (LEAP)	
Modos de acesso à rede	Infra-estrutura e <i>ad-hoc</i>	
Processador	16-bits, 120MIPS @ 120MHz	
Interface	UART: até uma taxa de 921600 bps	
Taxa de passagem de dados ⁸	UART-to-LAN – até 250 kbps (max) LAN-to-UART – até 203 kbps (max)	
Pinos GPIO	Até 8 portas compartilhadas com os pinos de estado.	
Entradas analógicas	Até 8 de 10-bits – referência de 2,5 V	
Voltagem de operação	V	3.3
Corrente durante transmissão	mA	575
Corrente durante recepção	mA	375
Corrente máxima	mA	3000 (durante a inicialização – <i>Inrush</i> – 20ms)
Conector	36 pinos (pn: HRS DF12-36DS-0.5 V) 4-mm de altura	

Tabela 5.5
Performance versus alcance do módulo

Taxa de dados	Alcance (sem ganho de antena) ⁹	Alcance (2 dBi de ganho de antena) ⁹
1 Mbps	530 m	950 m
6 Mbps	235 m	535 m
11 Mbps	150 m	240 m
54 Mbps	12 m	19 m

⁸ As taxas são baseadas na operação à taxa máxima de dados na rede sem fio, com opção de *scape checking* desligada, *buffer* serial máximo, interferência mínima no ambiente e sem outro tráfego no meio sem fio.

⁹ Distância em campo aberto.

Tabela 5.6
Descrição dos pinos do módulo sem fio

Pino	Sinal	<i>Sink</i> (mA)	<i>Source</i> (mA)	Descrição
1	GND			Terra.
2	TSI			Reservado (ISP – <i>Serial Data In</i>).
3	DV _{DD}			Entrada de potência.
4	DV _{DD}			Entrada de potência.
5	V2.5			Saída de referência de 2,5V.
6	RFU			Reservado.
7	/RESET			Reset – ativo baixo (LL). Uma transição para alto libera a condição de reset.
8	/TSS			Reservado (ISP – <i>Slave Select</i>).
9	G6	4	4	Entrada analógica ou saída digital ¹⁰ .
10	TSO			Reservado (ISP – <i>Serial Data Out</i>).
11	G3	4	4	Entrada analógica ou saída digital ¹⁰ . Pode ser utilizado para restaurar o módulo para os padrões de fábrica.
12	F5	8	8	Entrada UART : CTS.
13	G5	4	4	Entrada analógica ou saída digital ¹⁰ .
14	G4	4	4	Entrada analógica ou saída digital ¹⁰ .
15	V _{SS}			Terra.
16	V _{SS}			Terra.
17	G2	4	4	Entrada analógica ou saída digital ¹⁰ .
18	F4	8	8	Saída UART : RTS.
19	G1	4	4	Entrada analógica ou saída digital ¹⁰ .
20	TSCK			Reservado (ISP – <i>Serial Clock</i>).
21	G7	4	4	Entrada analógica ou saída digital ¹⁰ .
22	G0	4	4	Entrada analógica ou saída digital ¹⁰ .
23	F6	8	8	Entrada ou saída digital ou saída de estado. Pré-configurado como saída do sinal CONN de estado do módulo.
24	F7	8	8	Entrada UART : RXD.
25	F0	8	8	Entrada ou saída digital ou saída de estado. Pré-configurado como saída do sinal POST de estado do módulo.
26	F3	8	8	Entrada ou saída digital ou saída de estado. Pré-configurado como saída do sinal WLAN de estado do módulo.
27	F2	24	24	Entrada ou saída digital ou saída de estado. Pré-configurado como saída do sinal LINK de estado do módulo.
28	F1	24	24	Saída UART : TXD.
29	E6	24	24	GPIO – 5V tolerante.
30	E5	24	24	GPIO – 5V tolerante.
31	E7	8	8	GPIO – 5V tolerante.
32	E4	8	8	GPIO – 5V tolerante.
33	DV _{DD}			Entrada de potência.
34	DV _{DD}			Entrada de potência.
35	/RF_LED	2		Saída do sinal RACT de estado do módulo.
36	V _{SS}			Terra.

¹⁰ Provê uma saída de 3.3V : CMOS – compatível ($V_{OL} \leq 0.4, 2.4 \leq V_{OH}$).

Tabela 5.7

Descrição dos pinos de estado

Porta	Estado	Descrição
F0	POST	Indica que o módulo passou pelo seu teste de inicialização (<i>Power On Self Test</i> – POST).
F2	LINK	Indica que o módulo se associou a um ponto de acesso ou a um ponto ad-hoc.
F3	WLAN	Indica que o módulo possui um IP especificado estaticamente ou por um servidor DHCP.
F6	CONN	Indica que o módulo se conectou a algum aparelho na LAN.
/RF_LED	RACT	Pisca quando o módulo está procurando por um ponto de acesso e mantém-se ligado quando está associado e ligado.

O módulo funciona de acordo com o padrão industrial IEEE 802.11. Através de sua pilha TCP/IP, do sistema operacional (RTOS), e da aplicação em firmware, provê um dispositivo embarcado para acesso direto a uma LAN, sem requerer programação do módulo. Possui padrões de segurança WEP, WPA e EAP configurável através de uma interface web ou um cliente por linha de comando.

Este módulo possui todo o hardware e firmware necessário para montar uma conexão *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) compatível com o padrão IEEE 802.11b/g. Também, possui de forma embarcada todos os protocolos de comunicação e o sistema de configuração, o que reduz o tempo de desenvolvimento do projeto evitando-se a implementação de protocolos de modulação de sinal e dados, preocupando-se apenas com suas variáveis de configuração.

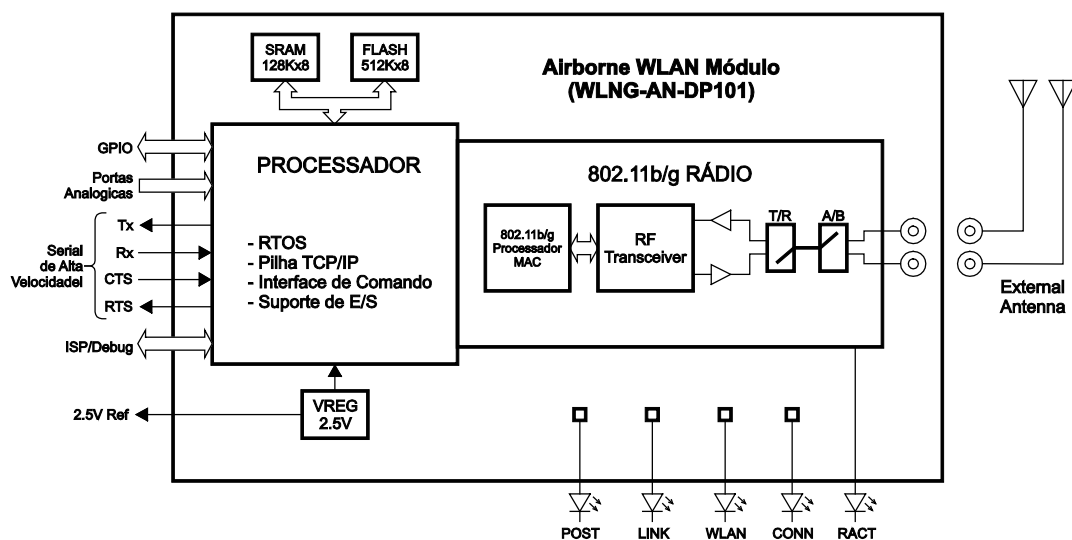


Figura 5.6 Diagrama de blocos do módulo sem fio.

O módulo é capaz de criar uma conexão sem fio a uma LAN através de pontos de acesso ou diretamente a aparelho 802.11b/g. Possui portas analógicas e digitais acessíveis e configuráveis através de um terminal de comando, conectado através de uma conexão UART ou pela LAN. Este

módulo também pode ser configurado para funcionar como um canal de comunicação direto entre o sistema onde está montado e qualquer outro aparelho pertencente à rede.

Mostra-se assim uma solução para sensoriamento remoto, obtenção de dados e qualquer tipo de aplicação que necessite troca de informações com um dispositivo remoto. Equipamentos com este módulo embarcado podem ser monitorados e controlados por um controle remoto, por um computador pessoal, ou pela internet, sem a necessidade de cabos, o que permite a movimentação livre do equipamento.

5.2.3 Comunicação com o Módulo

O módulo possui para administração dos serviços que disponibiliza um sistema operacional (SO) de tempo real que é acessado pelos equipamentos ligados ao módulo (pela serial e pela rede sem fio) utilizam uma interface de linha de comando (ILC). A ILC possui três modos (ILC, PASS e LISTEN) de operação selecionados durante uma sessão no cliente ou carregados na inicialização do módulo seguindo pré-definição de uma variável de configuração do módulo.

- **Modo ILC**

O modo de processamento de comandos permite que usuários e aplicações executem comandos de configuração, podendo-se alternar a partir dos outros modos para este quando estiver habilitada a detecção de uma seqüência de caracteres nas transmissões de dados.

- **Modo PASS**

Identifica um estado de comunicação direta entre as interfaces do módulo. Permite que uma sessão aberta pela interface e uma sessão aberta pela interface serial transfiram dados entre si (diz-se que o módulo estar em *bridge*). Se não configurada para ser carregada na inicialização do sistema, este modo pode ser executado manualmente a partir do comando **pass**.

- **Modo LISTEN**

Neste modo, o sistema do módulo entra em estado de espera por conexões pela interface sem fio. Este modo só é permitido ser carregado a partir da interface serial, através do comando **listen**, ou automaticamente durante a inicialização do módulo.

Adicionalmente, o SO fornece cinco níveis de segurança (Tabela 5.8) para cada sessão, fornecendo um meio seguro para controle dos comandos executados pelos vários tipos de usuários. Durante uma sessão ILC atribui-se ao usuário um dos cinco níveis de segurança, que lhe darão

acesso a um conjunto de métodos capazes de administrar e supervisionar o funcionamento dos serviços disponibilizados pelo módulo. Em QUATECH [62] listam-se todos os métodos disponíveis no SO juntos com suas descrições e os níveis de usuário necessários para cada um.

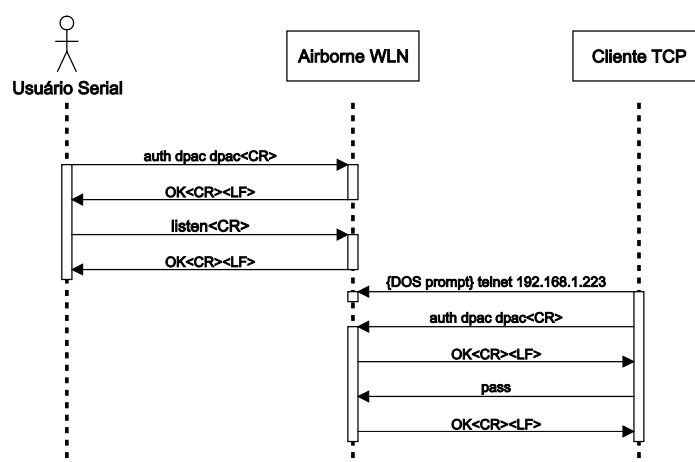
Tabela 5.8

Níveis de usuário em sessões no módulo sem fio

Nível	Identificador	Descrição
1	L1	Conectado, mas não identificado. Permite executar a maioria dos comandos sem atributos, o que ocasiona no retorno dos valores dos atributos atuais configurados.
2	L2	Comandos de transmissão de dados.
3	L3	Comandos de configuração do módulo.
4	L4	Restrição apenas a alguns comandos que alteram a identificação do fabricante.
5	L5	Acesso livre.

Quando em *bridge*, o módulo funciona como um elo entre a interface serial e a sem fio, criando um caminho para ambos comunicarem-se diretamente. Na Figura 5.7 mostra-se um meio de criação deste “caminho” entre os dois lados do módulo, a partir desta configuração qualquer dado transmitido por um dos lados do módulo, irá ser repassado completamente para o outro lado.

A desconexão do *bridge* acontece quando se verifica a desconexão da interface sem fio, ou quando uma seqüência (se habilitada) de caracteres pré-definida na configuração do módulo é detectada entre os dados transmitidos. Existem mais sub-modos configuráveis para a operação em *bridge*, porém para o objetivo deste trabalho, a interconexão do robô e uma aplicação na rede, o método apresentado mostra-se suficiente.

Figura 5.7 Seqüência para conexão *Bridge* entre as interfaces do módulo.

5.3 Meio de Comunicação Com Fio

A sessão anterior tratou da comunicação sem fio do robô com um dispositivo externo (computador), que é atrativa para manter uma conexão durante a execução de uma tarefa que requer mobilidade do RMR. Porém para tarefas como a configuração do robô torna-se mais eficaz mantê-lo fixo a uma base de acesso, permitindo taxas mais rápidas de transferência de dados, fornecendo uma fonte de energia que evita a utilização da bateria.

Duas formas de conexão física estão disponíveis no robô a partir do circuito desenvolvido, ambas através de portas USB, porém com métodos e equipamentos diferentes. Utiliza-se em um destes somente o padrão USB com um cabo ligando o computador diretamente ao controlador central, funcionando como um periférico do barramento USB. Abordando outra técnica um conversor especializado conecta-se por um lado a um computador pelo barramento USB e por outro ao controlador central através de uma porta UART, onde este CI irá trabalhar como uma ponte transmitindo transparentemente dados entre as duas interfaces.

5.3.1 Universal Serial Bus (USB)

USB é um padrão disponibilizado com a finalidade de interligar através de um barramento serial, quaisquer dispositivos periféricos dispondendo de *hot swapping* (conexão e desconexão durante funcionamento) em conjunto com o mecanismo de *software plug and play* (periféricos inseridos ao sistema sem necessitar reiniciá-lo).

Três versões do padrão já se encontram publicadas, USB 1.1[63], USB 2.0 [64] e USB 3.0[65]. Descrevem-se nelas os atributos mecânicos e elétricos do barramento, os tipos de transações, os problemas de gerenciamento e a interface de programação de alto nível. Apresentam-se como padrões abertos, viabilizando teoricamente que equipamentos de diferentes fabricantes possam operar entre si.

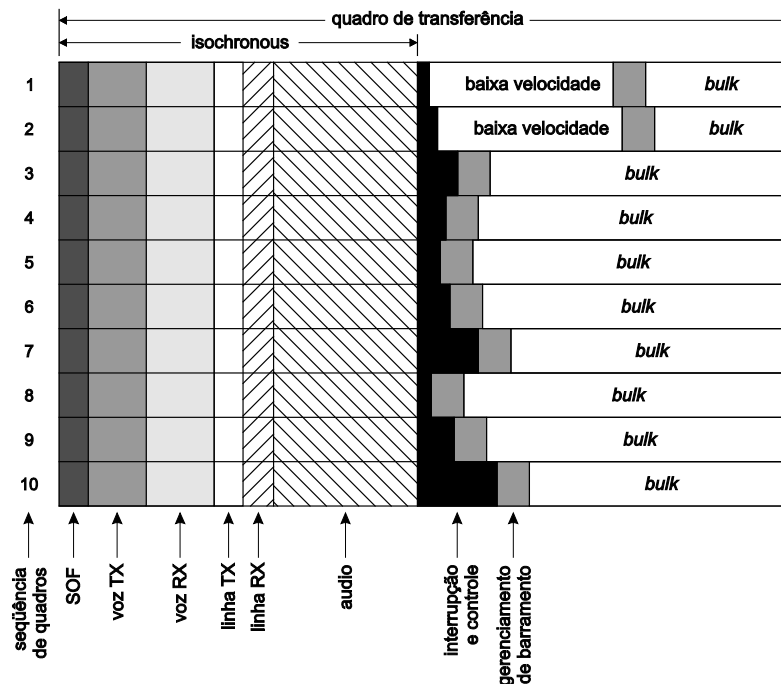


Figura 5.8 Seqüência de transmissão de dez quadros de dados USB.

O padrão intensifica o quesito de flexibilidade, porém em equipamentos eletrônicos esta característica vem agregada de complexidade. Assim embora seja, a USB, uma forma fácil de um sistema *host* conectar-se a periféricos, sua programação e construção torna-se mais complexa que uma conexão UART, I²C, SPI, etc.

A arquitetura do padrão USB divide-se em *hosts* e periféricos, onde cada aplicação no *host* acessa serviços contidos em periféricos e acessados através de *endpoints*. Cada serviço disponibilizado pelos periféricos aparece no *host* como um endereço, portanto o endereço final de cada serviço é composto pelo endereço do periférico mais o número do *endpoint* ao qual está unida.

Basicamente a comunicação entre *host* e periféricos resume-se no envio dos dados em quadros de tempo fixo (este tempo varia entre os padrões), portando a cada período de tempo o barramento inicia uma nova transferência de dados independentemente se há ou não dados a serem transferidos. Os quadros de tempo são divididos internamente por tipos de transferências diferentes (*bulk*, *control*, *interrupt* e *isochronous*) contendo informações dos até 127 periféricos possíveis de serem conectados ao *host* USB. A forma de comunicação USB é ilustrada na Figura 5.8 com uma seqüência de transmissão de dez quadros de dados.

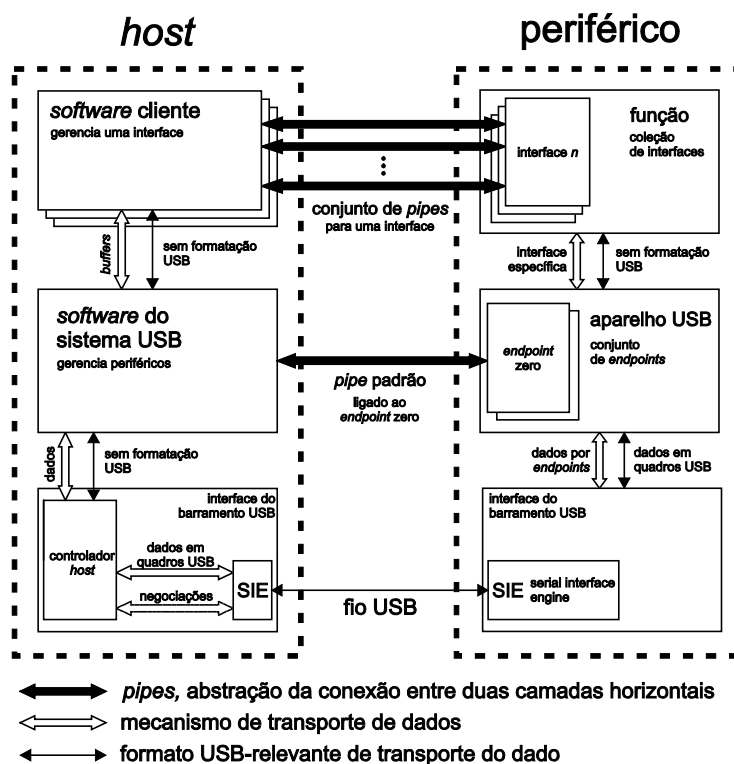


Figura 5.9 Camadas de comunicação USB.

Na Figura 5.9 ilustram-se todas as comunicações entre o *host* USB e um periférico gerenciado por ele. O *software* do sistema USB gerencia os recursos USB alocando banda, designando endereços, agendando interrupções de serviço, etc., separando a tarefa de gerenciamento dos periféricos do resto do sistema. Assim, as camadas superiores (*software* cliente) não precisam possuir métodos para diferenciar se estão interagindo com um equipamento inserido na USB ou nativo do *chipset*. Estas camadas superiores se comunicam com o controlador *host* por um *driver* USB. Em termos lógicos as aplicações apenas manipulam *pipas* de comunicação tornando a comunicação transparente para as aplicações contidas tanto no *host* quanto no periférico.

Nos periféricos, como é o caso do robô, o microcontrolador LPC2148 (microcontrolador escolhido, especificado na subseção 5.4.1) disponibiliza um controlador integrado em *hardware* que consegue passar por todas as etapas (*attached*, *powered*, *default*, *address assigned*, *configured*) de conexão a um *host* USB. Quando corretamente conectado ao *host*, o LPC2148 fornece uma interface DMA (*Direct Memory Access*) para escrita e leitura dos dados da comunicação.

5.3.2 USB/UART

Fabricado pela empresa *Future Technology Devices International Ltd.* (FTDI), o componente FT232R [66] é capaz de criar uma interface de ligação, entre uma porta USB e um dispositivo contendo uma porta UART, com um mínimo de componentes externos, encaixando-se perfeitamente nos requisitos de baixo consumo deste trabalho. Na Tabela 5.9 encontram-se algumas informações sobre as características de funcionamento deste CI.

O fabricante fornece para este CI duas opções de *drivers*, para diferentes sistemas operacionais[67, 68], um capaz de transformar a conexão com o dispositivo em uma porta serial emulada (*Virtual COM Port – VCP*) e outro permitindo acesso direto a porta USB através de uma interface DLL (D2XX) [69].

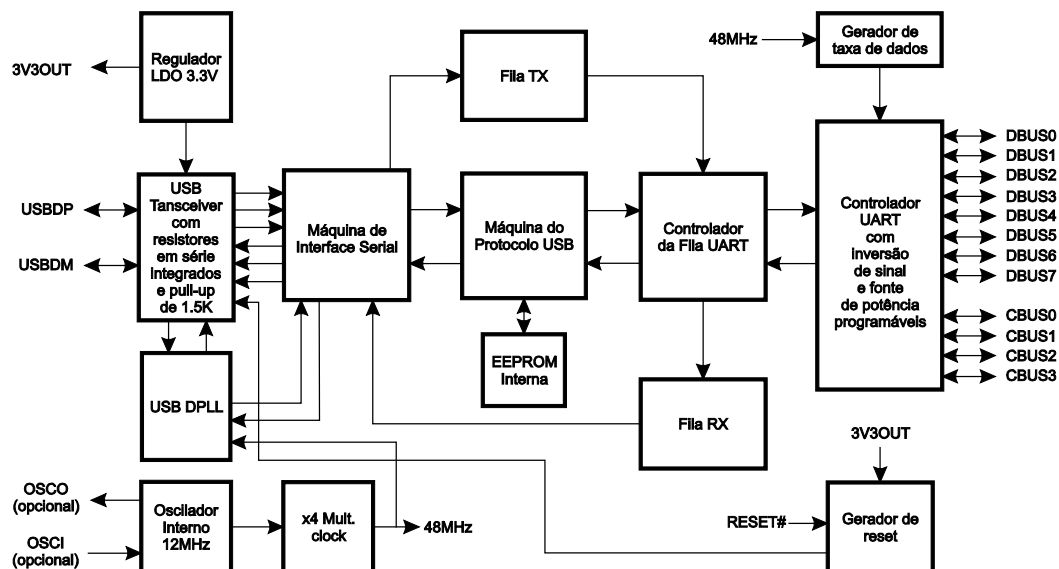


Figura 5.10 Diagrama de blocos do FT232R.

O FT232R reduz o número de componentes necessários integrando uma memória EEPROM internamente. Ele é designado para operar eficientemente através de um controlador *host* USB utilizando o mínimo possível da banda USB disponível.

Tabela 5.9

Características do circuito integrado USB/UART

<i>Part Number</i>	FT232RL	
Voltagem de operação (oscilador interno)	4,0 – 5,25	V
Corrente de operação	15	mA
Corrente em modo suspenso	70	μ A
Frequência do oscilador interno	12	MHz
Taxa de dados UART	183 baud a 3 Mbaud	

Através da memória EEPROM é possível configurar algumas funções do componente, tais como, as funções de cinco pinos de E/S (pinos CBUS), inversão dos pinos DBUS, identificação do fabricante (VID), identificação do produto (PID), número serial, etc. A alteração dos valores de configuração guardados na memória é feita através do programa MProg [70] fornecido gratuitamente pelo fabricante.

Este CI também apresenta um modo de funcionamento chamado de *Bit Bang* [71] possuindo três variações: assíncrono, síncrono e CBUS. Nas duas primeiras variações do modo, os pinos DBUS e CBUS funcionam como pinos de entrada e saída comandados diretamente através da USB e no terceiro modo, apenas os CBUS são configurados como GPIO enquanto os DBUS permanecem com suas funcionalidades padrões (pinos de UART).

5.4 Controlador Central

Alguns sensores (por exemplo, *encoder* e sonar) e os atuadores inclusos no sistema robótico necessitam de um sistema externo de controle capaz de gerir suas funcionalidades e outros sensores (por exemplo, bússola, câmera e infravermelhos) necessitam de um dispositivo que consiga traduzir suas leituras em informações padronizadas.

Focando estas necessidades, insere-se um Controlador Central (CC) contendo as interfaces necessárias para controle e monitoramento de sensores e atuadores, além de fornecer a capacidade de portar aplicações capazes, por exemplo, de executar o pré-processamento de informações ou um controle primário dos atuadores (por exemplo, PID de controle do torque de referência do motor).

Além da interação com sensores e atuadores, o CC traz ao sistema mais algumas qualidades, como a capacidade de se comunicar com uma memória não-volátil de alta capacidade (MMC/SD) e a ligação direta com dispositivos capazes de se comunicar externamente a computadores (USB 2.0, USB/UART e WLAN).

5.4.1 eLPC64

A arquitetura do microcontrolador utilizado como controlador central baseia-se no padrão ARM7TDMI-S. O grupo Philips através da empresa NXP utiliza esta arquitetura em seus microcontroladores LPC21. No Brasil a empresa eSystech comercializa módulos contendo estes microcontroladores e as funcionalidade básicas (alimentação e oscilador) para sua operação.

O equipamento selecionado para testes iniciais com o robô é o módulo eLPC64 [72] (Figura 5.11) fabricado pela eSystem, composto pelo microcontrolador LPC2148 [73, 74] da NXP. Este microcontrolador opera com frequências selecionáveis em software até a máxima de 60 MHz (54 MIPS), contém 47 pinos de E/S, periféricos internos (I²C, UARTs, SPI, SSP, ADCs, DAC, temporizadores, etc.), instruções de 16 ou 32 bits (selecionável), entre outras características ilustradas no digrama de blocos da Figura 5.13.

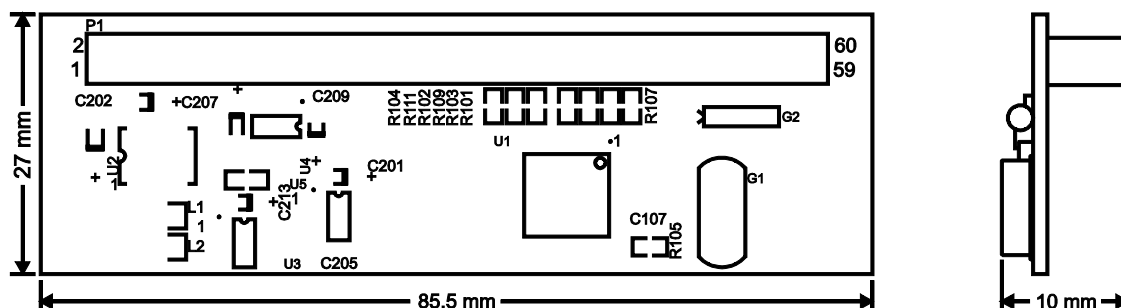


Figura 5.11 Core de processamento eLPC64.

Este módulo é utilizado para controle da aquisição de todos os sensores expostos no capítulo 4, pela disponibilização destas informações através das interfaces de comunicação, USB (subseção 5.3.1), USB/UART (subseção 5.3.2) e WLAN (subseção 5.2), pelo controle dos atuadores das rodas do robô através do *driver* de potência e pelo gerenciamento do cartão de memória não-volátil (subseção 5.1.1). O padrão de comunicação e montagem pode ser visto na Figura 5.12.

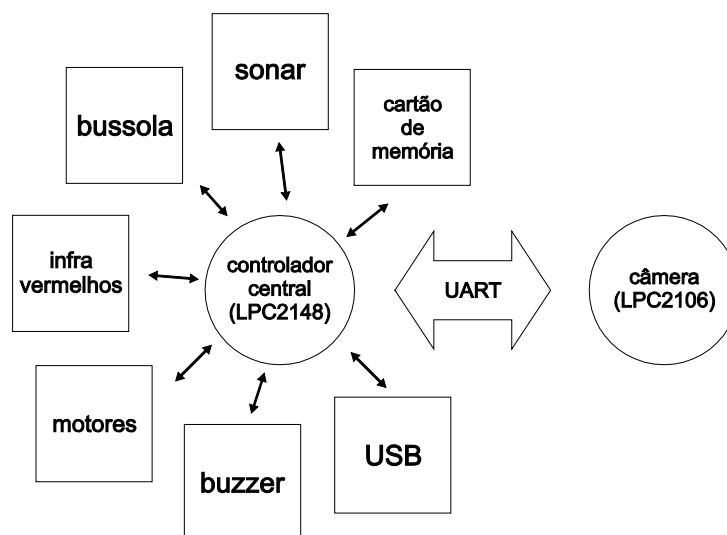


Figura 5.12 Esquema de comunicação dos componentes.

Para desenvolvimento de aplicações o microcontrolador fornece uma porta JTAG que permite o teste destas em circuito. A interface pode ser acessada, por exemplo, com equipamentos como o *JTAG key* fabricado pela Amontec em conjunto com softwares de teste e programação.

Além da interface JTAG o microcontrolador pode ser programado através da interface serial UART0 e os pinos P0.14 e /RST, utilizando um software de gravação que acessa o microcontrolador através de uma porta serial do computador. A conexão física do microcontrolador ao computador é feita através de uma porta USB e um CI especializado (assuntos abordados na subseção 5.3.2).

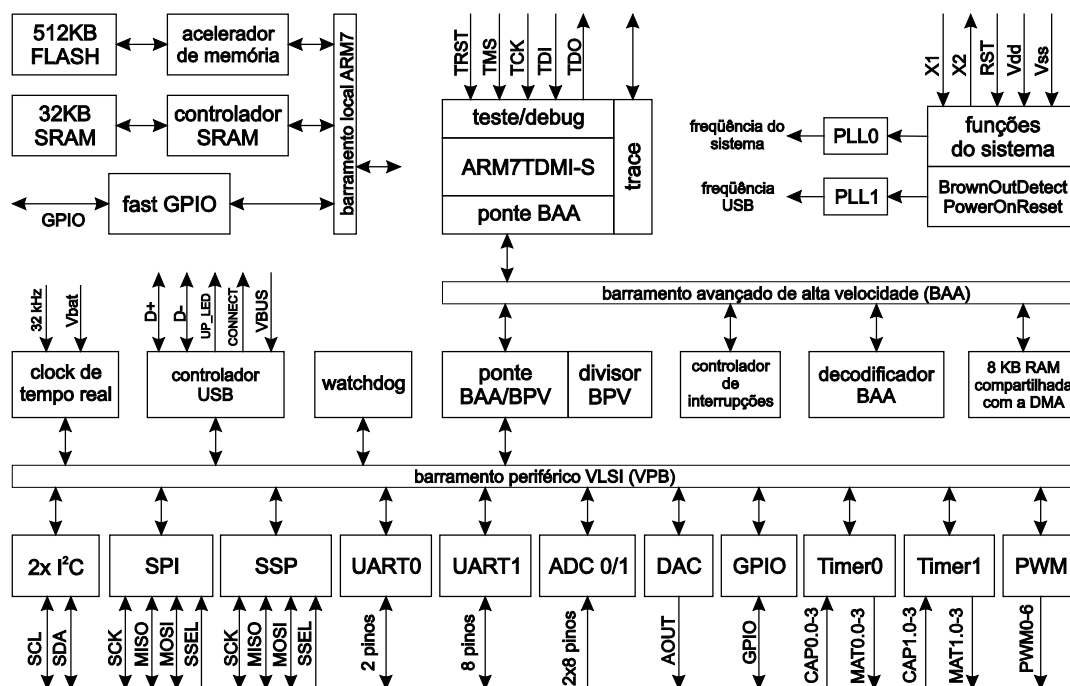


Figura 5.13 Diagrama de blocos do LPC2148.

Para utilizar a programação serial, as chaves S3 e S4 do circuito apresentado no ANEXO 5 devem estar configuradas para que as portas TX0 e RX0 do microcontrolador estejam conectadas ao CI USB/UART de acordo com a Tabela 5.10. Seguindo também esta tabela, as portas RST e P0.14 também podem ser configuradas para se comportarem de acordo com as capacidades de gerenciamento do software de programação utilizado.

5.5 Leiaute e Aspectos de Operação

O projeto mecânico do robô prevê um espaço específico para cada componente descrito neste trabalho. A localização da placa principal do sistema eletrônico do robô pode ser vista na Figura 5.14 e suas dimensões na Figura 5.15.

Algumas características do circuito são configuráveis por *jumpers* dispostos pela placa. Suas funcionalidades e opções selecionáveis são vistas na Tabela 5.10. Na Tabela 5.11 descrevem-se os conectores presentes no projeto e na Tabela 5.12 descrevem-se as funcionalidades dos botões.

Tabela 5.10

Descrição das chaves seletoras

Chave	Descrição
S1	1-2 – Liga o pino RST a porta JTAG. 2-3 – Liga o pino RST a interface de gravação serial.
S2	1-2 – Liga o pino P0.14 a um <i>pull-up</i> (operação normal do μ C). 2-3 – Liga o pino P0.14 a um <i>pull-down</i> (inicializa o μ C em modo de gravação).
S3	1-2 – pino RX da UART0 ligado ao módulo WLAN. 2-3 – pino RX da UART0 ligado ao CI USB/UART.
S4	1-2 – pino TX da UART0 ligado ao módulo WLAN. 2-3 – pino TX da UART0 ligado ao CI USB/UART.
S5 a S8	1-2 – conecta ao módulo WLAN LEDs para visualização dos sinais POST, LINK, WLAN e RACT, respectivamente. 2-3 – conecta um <i>pull-down</i> aos pinos POST, LINK, WLAN e RACT, respectivamente.
S9	Quando o conectado, a bússola funciona à frequência de aquisição de 50 Hz.

Tabela 5.11

Descrição dos conectores

Conector	Descrição
CN1	Liga a CMUCam3 a porta UART1 do controlador central.
CN2	Interface para ligação do controlador central ao controlador do sonar.
CN3	Disponibiliza a inserção de um botão externo de <i>reset</i> do controlador central.
CN4	Interface JTAG.
CN5	Conector para cartão MMC/SD.
CN6	Saída para conexão de equipamentos no barramento I ² C.
CN7	Conector USB da função USB do controlador serial.
CN8	Conector USB do CI especializado USB/UART.
CN9 e CN10	Conectores do controlador central aos <i>drives</i> de potência dos motores.
CN11	Conector da fonte de 5V.
CN12	Conector da fonte de 3.3V.
SS1 a SS8	Portas analógicas multiplexadas (6 para os infravermelhos e 2 reservas).

Tabela 5.12

Descrição dos botões

Botão	Descrição
B1	Reinicializa o controlador central.
B2	Retorna o módulo sem fio aos padrões de fábrica.

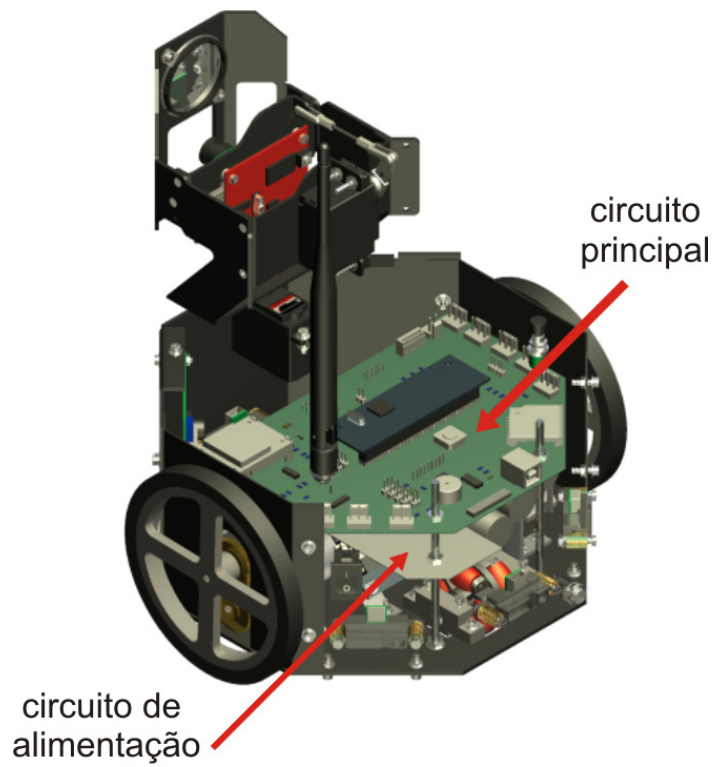


Figura 5.14 Circuitos dentro do chassi do robô.

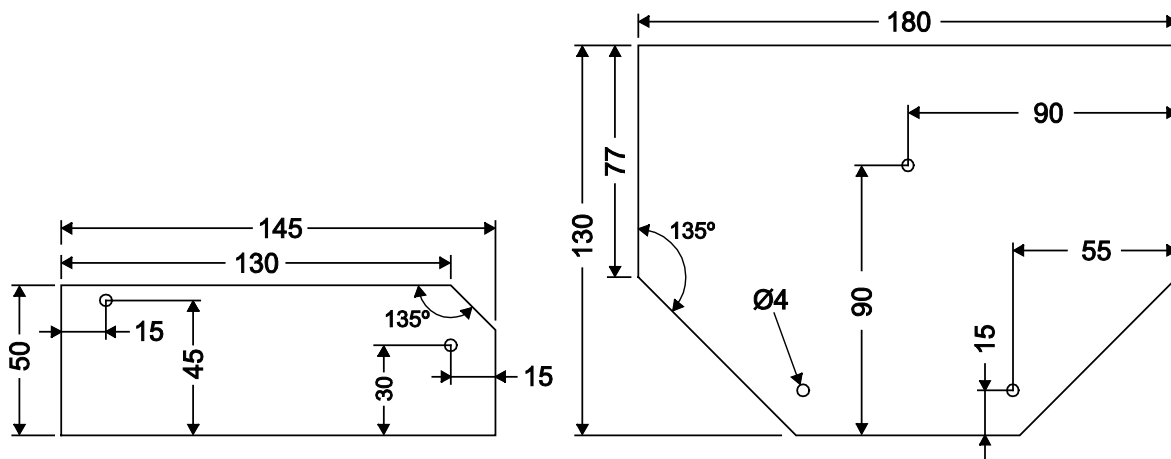


Figura 5.15 Dimensões (mm) das placas de circuito.

5.6 Alimentação

A alimentação do circuito é prevista para ser feita por uma placa de potência destacada do circuito, devido a questões de temperatura, tamanho da placa e disposição dos componentes. Neste projeto especifica-se apenas o local de fixação (Figura 5.14) e o padrão de tamanho (Figura 5.15) para a placa de alimentação, o desenvolvimento é tido apenas como trabalho futuro.

5.7 Conclusão

Partindo dos dados fornecidos no capítulo 4, quatro dispositivos são inseridos ao projeto do circuito eletrônico (memória de dados, módulo sem fio, CI USB/UART e controlador central), para viabilizar o funcionamento dos dispositivos de sensoriamento. Neste capítulo foram descritas características eletrônicas e de operação dos quatro, as quais são imprescindíveis para a criação de aplicações e para escolha dos componentes eletrônicos secundários que formam o circuito proposto neste capítulo.

Utiliza-se também, das disposições mecânicas documentadas no capítulo 2, derivando-se o formato e localização das placas do circuito principal e de alimentação. Estas disposições são ponto de partida para o arranjo dos dispositivos e componentes eletrônicos ao longo da placa. Este arranjo físico é simulado (Figura 5.16) em ferramenta computacional (*Altium Designer 6*), assim sua alocação no robô pode ser prevista, minimizando erros relativos a espaçamento interno.

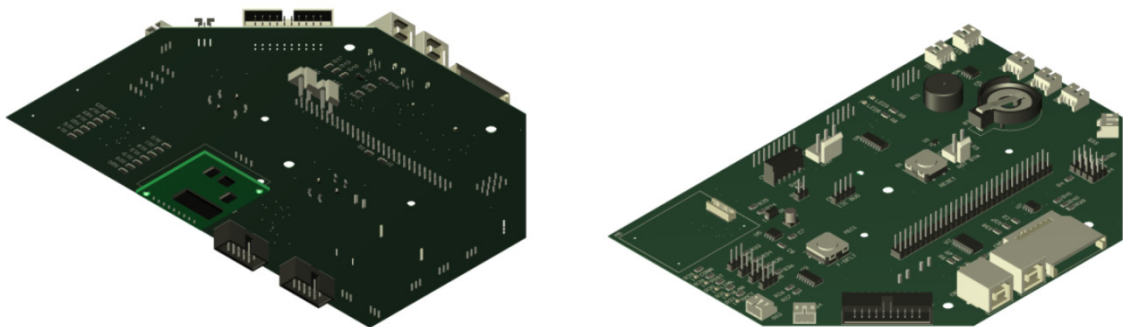


Figura 5.16 Visualização 3D da placa de integração.

Além da simulação do arranjo físico dos dispositivos, utiliza-se também de ferramenta computacional para capaz de portar o projeto em seus quesitos técnicos, facilitando os passos de desenvolvimento (esquemáticos, interligação e roteamento). Através do auxílio deste software, documentado no ANEXO 5, propõe-se a interligação entre os dispositivos descritos neste capítulo e os descritos no capítulo 4, inserindo mais alguns componentes básicos (Tabela A5.1 e

Tabela A5.2), tais como, capacitores, resistores, MOSFETs, LEDs, etc. Além de um exemplo de roteamento de trilhas entre os dispositivos e os componentes eletrônicos básicos.

Finaliza-se assim o projeto eletrônico com a disponibilização de material introdutório, formando um ponto de partida para a execução prática do sistema eletrônico de controle e de alimentação (Tabela 5.13), que se caracterizam como temas de trabalhos futuros.

Tabela 5.13
Resumo dos dispositivos auxiliares

Nome	Fabricante	Número de Portas		Corrente (mA)	
		Analogica	Digital	op. normal	max.
Memória de dados	--	--	6	0,250	75
Módulo sem fio	Quatech	--	3	575	3000
CI UART/USB	FTDI	--	2	15	--
Controlador Central	eSystemch	--	--	--	100
Total		--	11	690,25	3190

6. Modelagem Matemática

A proposta deste capítulo é prover o modelo matemático que descreve o RMR desenvolvido neste trabalho do ponto de vista de sua mobilidade respeitando certas restrições de movimento e características dinâmicas.

Supõe-se que as rodas idealmente respeitem suas restrições cinemáticas sem exibir características de deslizamento. Estes efeitos apresentam dinâmicas relativamente rápidas ao total do sistema, como o modelo tem a finalidade de realizar a experimentação de controladores, segundo SICILIANO et al. [10], estas podem ser negligenciadas, porém alguns trabalhos apresentam modelagens onde efeitos de deslizamentos são levados em consideração, tais como D'ANDRÉA-NOVEL et al. [75] e LEROQUAIS et al.[76].

Diferentes métodos para obtenção do modelo cinemático de RMRs já foram propostos e alguns deles são mais empregados. Em MUIR et al. [6] e MUIR et al.[77] a análise cinemática é realizada através de um método espelhado na forma como empregado em manipuladores estacionários (aplicando a convenção de Denavit-Hartenberg), alocando eixos coordenados nas juntas de direção e nas rodas para através da convenção de Sheth-Uicker definir as matrizes de transformação do sistema. Já em ALEXANDER et al.[78] apresenta-se uma abordagem um pouco diferente e complementar, onde a maior diferença está na análise do caso em que o rolamento ideal falha baseando-se assim em modelos físicos de atrito.

Em MUIR et al. [9] é realizada uma extensão pela aplicação da formulação Newtoniana, do princípio de D'Alembert e mais algumas características para calcular o modelo dinâmico de RMRs, inserindo os efeitos de torque e força inerciais e incorporando também os efeitos do atrito seco e viscoso. Outras duas formulações para se abstrair o modelo dinâmico de um RMR são a Lagrangeana [79] e a de Kane [11].

Esta dissertação não tem como objetivo comparar as formulações para chegar a um modelo dinâmico do robô. Isto é feito, por exemplo, em COSTA et al. [80] onde as formulações Lagrangeana e Newtoniana são comparadas apontando-se vantagens e desvantagens de cada.

Para desenvolver o modelo do RMR exposto neste trabalho o presente capítulo baseia-se no método de modelagem apontado em CAMPION et al. [7] onde se especifica a cinemática do robô em termos de suas restrições de movimento e sua dinâmica através da formulação de

Lagrange. Exemplos de aplicação são encontrados em YUN et al. [81] e COELHO et al. [12] modelando robôs diferenciais, porém também são encontrados trabalhos utilizando outras configurações de RMRs como em CHUNG et al. [82], onde se utiliza uma plataforma onidirecional com três rodas orientáveis.

6.1 Análise Estrutural

O modelo matemático que representa o RMR, foco deste trabalho, espelha algumas características que são diretamente ligadas ao formato e disposição das rodas nele empregadas. Portanto, as rodas e suas influências ao sistema, restrições e velocidades, são focos dessa subseção. Na Figura 6.1 apresentam-se os dois tipos de rodas utilizadas no sistema e na Tabela 3.9 e Tabela 3.10 apresentam-se suas características físicas.

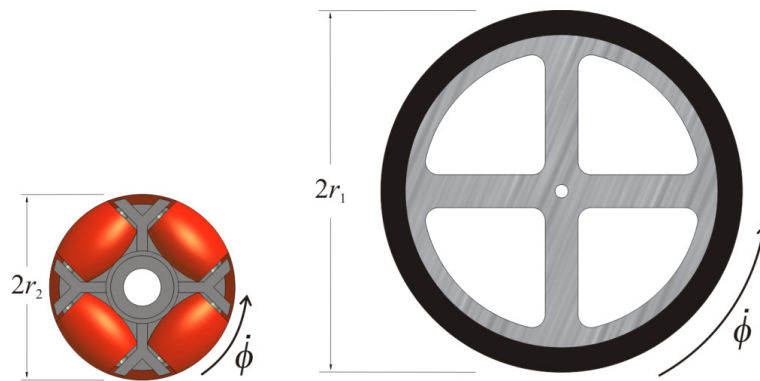


Figura 6.1 Rodas do sistema.

Primeiramente faz-se necessário citar que o sistema possui duas características representadas, cada uma, por uma linha imaginária, perpendiculares entre si, estas linhas funcionam como base na medida de distâncias utilizadas no modelo do sistema. São elas, a linha central que representa o eixo de simetria do robô e a linha do eixo perpendicular ao de simetria e passante concentricamente aos centros de rotação das rodas convencionais fixas (Figura 6.2).

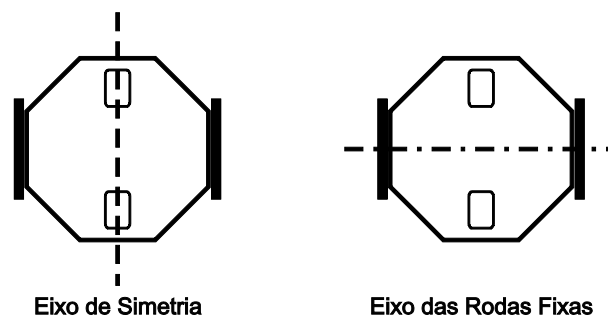


Figura 6.2 Eixo de simetria e eixo das rodas fixas.

Das quatro rodas que compõe o RMR, duas são rodas convencionais fixas atuadas de raio r_c paralelas ao eixo de simetria e distanciadas por b deste. As duas rodas restantes são passivas onidirecionais de raio r_s (conhecidas como rodas suecas) também dispostas paralelamente ao eixo de simetria, porém colineares a este e a uma distância a do eixo das rodas fixas. Esta configuração aparece ilustrada na Figura 6.3 onde os pontos de contato de cada roda com o chão estão representados pelos seguintes pontos com coordenadas referentes à base coordenada inercial, E (x_e, y_e) (roda fixa esquerda), D (x_d, y_d) (roda fixa direita), F (x_f, y_f) (roda passiva frontal) e T (x_t, y_t) (roda passiva traseira).

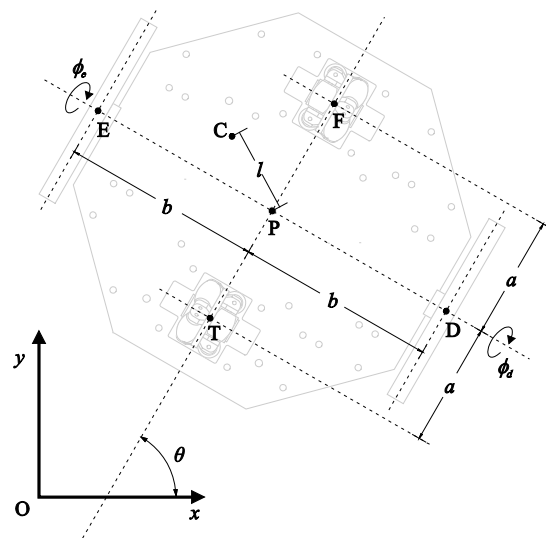


Figura 6.3 Variáveis do modelo cinemático.

Na Figura 6.3 além das acima citadas rodas e configurações ilustram-se também todas as variáveis necessárias para representar o sistema, chamadas *variáveis generalizadas do sistema*, representadas por: ϕ_e , posição angular da roda esquerda em relação ao seu centro; ϕ_d , posição angular da roda direita em relação ao seu centro; $\{O, x, y\}$, base inercial ligada a superfície sobre a qual o RMR movimenta-se; θ , posição angular do robô em relação a base inercial; P (x_p, y_p), ponto central do robô com suas coordenadas referenciadas à base inercial; e C (x_c, y_c), ponto representativo do centro de massa do robô, este ponto tem uma distância l do centro do robô.

Mais algumas considerações devem ser esclarecidas antes de apresentar o desenvolvimento do modelo matemático do sistema. Diferente de trabalhos como TAKAHASHI et al. [83] para se abstrair as restrições que as rodas inserem ao sistema é considerado uma base cartesiana fixada no ponto de centro de massa do robô C ao invés do ponto onde se cruzam o eixo de simetria e o eixo das rodas fixas P (o ponto P e C podem ser coincidentes), pois segundo FIERRO [84] algumas técnicas de controle tais como a exposta em JAGANNATHAN et al. [85] falham ao se levar em consideração apenas P. Porém este ponto não apenas se distancia do ponto central do robô sobre o

eixo de simetria, como utilizado em FIERRO et al. [5], e sim considera-se que este pode estar deslocado também lateralmente. Assim o modelo apresenta um centro de massa modelado mais próximo do centro de massa real do sistema.

6.1.1 Restrições das Rodas

De acordo com a literatura as rodas presentes no RMR projetado neste trabalho idealmente inserem ao sistema (cada uma) as condições restritivas:

- **Rolamento Puro** (*pure rolling*): equivale a dizer que a velocidade do centro da roda é proporcional a velocidade de rotação da roda. Esta restrição é representada por

$$[\text{sen}(\alpha_i + \beta_i) \quad -\text{cos}(\alpha_i + \beta_i) \quad -l_i \text{cos}(\beta_i)] \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi} - r_1 \dot{\phi}_i = 0, \quad (7)$$

onde α , β e l são identificados na Figura 6.4; $\mathbf{R}(\theta)$, é a matriz de rotação; e ξ , representa o vetor de velocidades do robô,. Esta restrição é igual para rodas onidirecionais e convencionais, visto que o ângulo dos rolos (γ) das utilizadas neste trabalho é zero.

- **Sem Deslizamento** (*nonslip*): significa que a velocidade do centro da roda é paralela ao plano da roda. Esta restrição é aplicada somente às rodas fixas.

$$[\text{cos}(\alpha_i + \beta_i) \quad -\text{sen}(\alpha_i + \beta_i) \quad -l_i \text{sen}(\beta_i)] \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi} = 0. \quad (8)$$

Este trabalho não objetiva explicar sobre diferentes rodas seus formatos e como influenciam na modelagem do sistema. Assim maiores informações sobre as rodas utilizadas e como foram obtidas suas formulações podem ser encontradas em SICILIANO et al. [10], SIEGWART et al. [1] e no ANEXO 2.

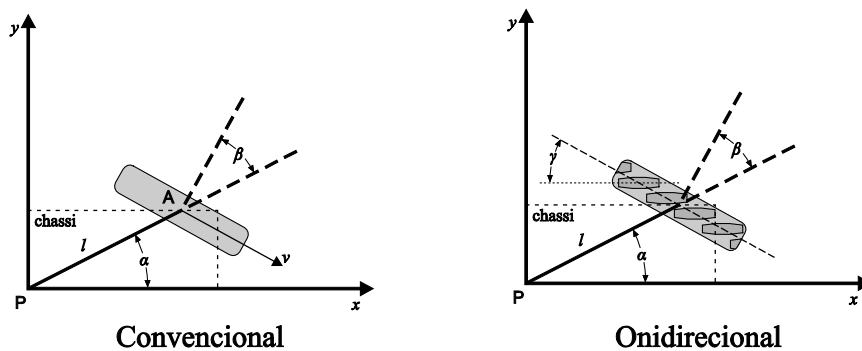


Figura 6.4 Ângulos das Rodas.

6.1.2 Rodas Convencionais Fixas

No RMR existem duas rodas fixas presentes, também conhecidas como rodas convencionais não-orientáveis. Estas rodas são montadas de acordo como ilustrado na Figura 6.5.

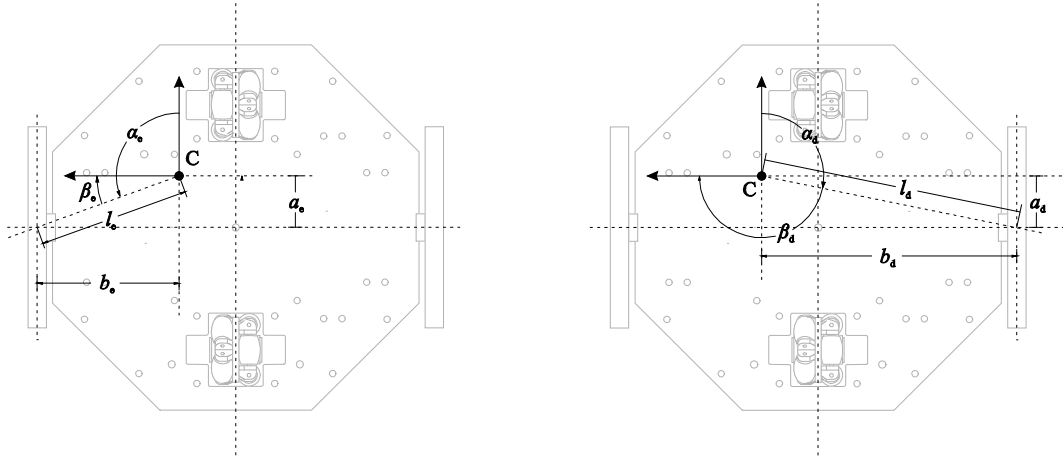


Figura 6.5 Disposição das rodas convencionais fixas.

Interpretando trigonometricamente as variáveis desenhadas na Figura 6.5, onde α_i é o ângulo em relação à ordenada tomado positivo no sentido anti-horário, β_i é o ângulo em relação a abscissa tomado positivo no sentido anti-horário, l_i representa a distância do centro de massa até o ponto representativo da roda, a_i a distância do eixo que passa pelas rodas até o centro de massa e b_i é a distância do plano da roda até o centro de massa, derivam-se as seguintes relações exibidas por cada roda, onde i é igual a “d” para direita e “e” para esquerda:

$$\alpha_d + \beta_d = -270^\circ; \quad -270^\circ < \beta_d < -90^\circ; \quad (9)$$

$$\alpha_e + \beta_e = 90^\circ; \quad -90^\circ < \beta_e < 90^\circ; \quad (10)$$

isto implica que pode-se definir as seguintes igualdades:

$$l_d \cos(\beta_d) = -b_d; \quad (11)$$

$$l_e \cos(\beta_e) = b_e; \quad (12)$$

$$l_i \sin(\beta_i) = a_i, \quad (13)$$

as quais, empregadas em (7) e (8) e considerando o centro de massa posicionado no segundo quadrante trigonométrico relativo ao ponto onde se cruzam os eixos imaginários, levam às seguintes restrições de rolamento puro:

$$[1 \quad 0 \quad b_d] \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi} - r_1 \dot{\phi}_d = 0; \quad (14)$$

$$[1 \quad 0 \quad -b_e] \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi} - r_1 \dot{\phi}_e = 0. \quad (15)$$

e às seguintes restrições de sem deslizamento,

$$[0 \quad -1 \quad a_d] \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi} = 0; \quad (16)$$

$$[0 \quad -1 \quad a_e] \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi} = 0. \quad (17)$$

Estes resultados são utilizados abaixo para computar o modelo final do robô.

6.1.3 Rodas Onidirecionais Livres

As duas rodas onidirecionais presentes no RMR, possuem características muito semelhantes as da roda convencional fixa. Elas diferem somente por inserirem, cada uma, ao sistema apenas uma condição restritiva de rolamento puro, pois possuem rolos de giro livre em torno de seu perímetro (neste caso formando um ângulo $\gamma = 0^\circ$ com o plano da roda) que possibilitam a existência de velocidades não paralelas ao plano da roda, ou seja, permitindo deslocamentos laterais.

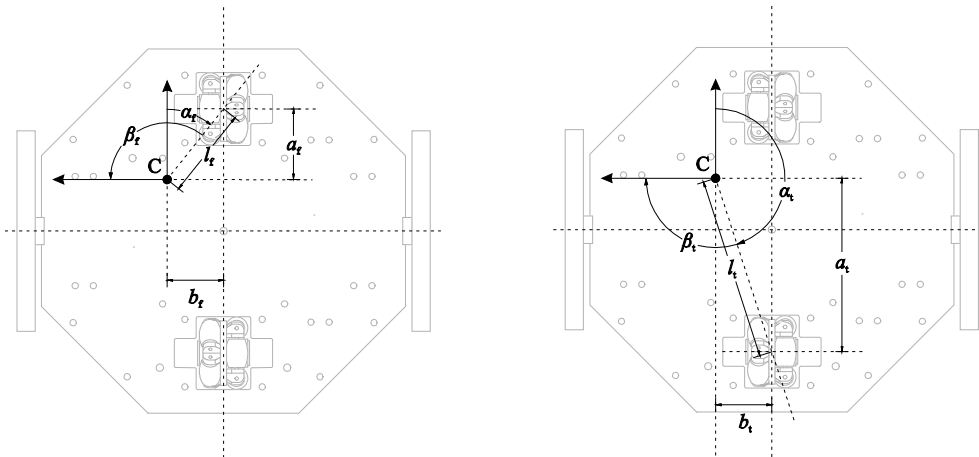


Figura 6.6 Disposição das rodas onidirecionais passivas.

A partir da ilustração contida na Figura 6.6 e levando em consideração que o centro de massa possa apenas localizar-se dentro de um retângulo formado pela intersecção dos planos das rodas fixas com os eixos das rodas onidirecionais encontra-se as seguintes relações trigonométricas, onde i é igual a “f” para frontal e “t” para traseira:

$$\alpha_f + \beta_f = 90^\circ; \quad 0^\circ < \beta_f < 180^\circ; \quad (18)$$

$$\alpha_t + \beta_t = -270^\circ; \quad -180^\circ < \beta_t < 0^\circ, \quad (19)$$

isto implica na seguinte igualdade,

$$l_i \cos(\beta_i) = -b_i. \quad (20)$$

Tem-se, então, a partir de (7) as seguintes restrições de rolamento puro para cada roda onidirecional,

$$[1 \quad 0 \quad b_f] \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi} - r_2 \dot{\phi}_f = 0, \quad (21)$$

$$[1 \quad 0 \quad b_t] \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi} - r_2 \dot{\phi}_t = 0, \quad (22)$$

onde $b_f = b_t$.

6.1.4 Variáveis de Configuração do Robô

Considerando o RMR com $N = 4$ rodas e utilizando os seguintes subscritos para dividí-las em seus dois tipos, ‘F’ fixas e ‘SW’ suecas, o número de rodas para cada tipo é denotado por $N_F = 2$ e $N_{SW} = 2$, com $N = N_F + N_{SW}$.

A configuração do robô é totalmente descrita pelos seguintes vetores de coordenadas generalizadas.

- coordenadas de postura: composto pelo vetor de postura,

$$\xi = [x_c \quad y_c \quad \theta]'. \quad (23)$$

- coordenadas de orientação: neste caso em específico por não possuir rodas orientáveis, o vetor de coordenadas de orientação é nulo.
- coordenadas de rotação: composto pelos N ângulos de rotação das rodas,

$$\phi = [\phi_d \quad \phi_e \quad \phi_f \quad \phi_t]'. \quad (24)$$

O conjunto total das coordenadas é definido como conjunto das coordenadas de configuração. Portanto o número total de coordenadas de configuração para o robô proposto neste trabalho é $N_F + N_{SW} + 3 = 7$, e é representado pelo vetor de coordenadas de configuração:

$$q = [x_c \quad y_c \quad \theta \quad \phi_d \quad \phi_e \quad \phi_f \quad \phi_t]'. \quad (25)$$

6.2 Restrições na Mobilidade

Antes de expor o modelo cinemático e dinâmico do robô é interessante fazer uma análise da mobilidade do sistema para garantir que ele é passível de atuação e em qual categoria de robôs móveis ele se enquadra.

Reescrevendo as restrições de rolamento puro de ambas as rodas na forma,

$$J_1 \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi} + J_2 \dot{\phi} = 0, \quad (26)$$

chega-se as matrizes,

$$J_1 = \begin{bmatrix} J_{1F} \\ J_{1SW} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & b_d \\ 1 & 0 & -b_e \\ 1 & 0 & b_f \\ 1 & 0 & b_t \end{bmatrix} \quad (27)$$

e

$$J_2 = \begin{bmatrix} -r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r_2 \end{bmatrix}. \quad (28)$$

onde J_{1F} e J_{1SW} , são matrizes de dimensões $(N_F \times 3)$ e $(N_{SW} \times 3)$, respectivamente, retiradas diretamente das restrições cinemáticas (14), (15), (21) e (22), e J_2 é uma matriz $(N \times N)$ diagonal e constante formada pelos raios das rodas do sistema.

Já as restrições sem deslizamento, aplicadas apenas nas rodas fixas, resumam-se na forma:

$$C_1^* \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi} = 0, \quad (29)$$

com

$$\mathbf{C}_1^* = [\mathbf{C}_{1F}] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & a_d \\ 0 & -1 & a_e \end{bmatrix}. \quad (30)$$

As restrições na mobilidade do robô resultam apenas das condições (30) envolvendo as rodas fixas. Estas condições implicam que o vetor $\mathbf{R}(\theta)\dot{\xi}$ pertence a $\mathbf{N}(\mathbf{C}_1^*)$ (espaço nulo da matriz \mathbf{C}_1^*). Para qualquer $\mathbf{R}(\theta)\dot{\xi}$ que satisfaça essa condição existe um vetor $\dot{\phi}$ que satisfaz (26), pois \mathbf{J}_2 é uma matriz não-singular. Uma implicação direta é o $\text{posto}(\mathbf{C}_1^*) \leq 3$, que caso seja igual a 3 implica que $\mathbf{R}(\theta)\dot{\xi} = 0$ que equivale a dizer que nenhum tipo de movimentação no plano é possível.

Caracterizando a mobilidade do robô ao posto da matriz \mathbf{C}_1^* , define-se grau de mobilidade do robô δ_m como

$$\delta_m = 3 - \text{posto}(\mathbf{C}_1^*), \quad (31)$$

que aqui calculado tem-se $\delta_m = 2$, visto que $a_d = a_e$ implica em $\text{posto}(\mathbf{C}_1^*) = 1$,

Como o robô não possui rodas orientáveis o seu grau de dirigibilidade δ_s é igual a zero e implica que o tipo do robô, que é definido por essas duas variáveis (δ_m, δ_s) , pertence ao tipo $(2, 0)$ definido em CAMPION et al. [7] onde se lê:

“Robôs tipo $(2, 0)$: Estes robôs não possuem rodas orientáveis, mas uma ou mais rodas fixas com eixo comum. A mobilidade é restrita no sentido de que, dada certa postura $\xi(t)$, a velocidade $\dot{\xi}(t)$ é limitada por uma distribuição bidimensional definida pelo campo de vetores formado por $\mathbf{R}'(\theta)s_1$ e $\mathbf{R}'(\theta)s_2$, onde s_1 e s_2 são dois vetores constantes pertencentes a $\mathbf{N}(\mathbf{C}_{1F})$. Um exemplo típico é a cadeira de rodas.”

6.3 Modelo Cinemático de Postura

O modelo cinemático de postura é o modelo mais simples capaz de descrever o estado global do robô e define-se como:

$$\dot{\xi} = \mathbf{R}'(\theta)\boldsymbol{\Sigma}\eta \quad (32)$$

onde $\dot{\xi}$ representa as velocidades referentes a base inercial e é definido

$$\dot{\xi} = [\dot{x}_c \quad \dot{y}_c \quad \dot{\theta}]', \quad (33)$$

η o vetor das velocidades atuadas do robô, ou seja das rodas convencionais da direita e esquerda

$$\eta = [\dot{\phi}_d \quad \dot{\phi}_e]', \quad (34)$$

a matriz de rotação ligada ao centro do robô para a base inercial

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

e

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{bmatrix} cb_e & cb_d \\ ca_d & -ca_d \\ c & -c \end{bmatrix} \quad (36)$$

que deriva-se diretamente das restrições (14), (15), (16) e (17).

Substituindo (33), (34), (35), (36) em (32) chega-se a

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(b_e \cos \theta - a_d \sin \theta) & c(b_d \cos \theta + a_d \sin \theta) \\ c(b_e \sin \theta + a_d \cos \theta) & c(b_d \sin \theta - a_d \cos \theta) \\ c & -c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_d \\ \dot{\phi}_e \end{bmatrix}, \quad (37)$$

sendo $c = r_1 / (b_e + b_d)$ e $a_d = a_e$.

A equação em (37) é chamada de modelo cinemático de postura. Este modelo permite classificar a capacidade de manobra de RMRs. O grau de mobilidade δ_m é igual ao número de graus de liberdade que podem ser diretamente manipulados a partir da entrada η , sem necessitar reorientar as rodas orientáveis.

Como o robô possui apenas rodas convencionais fixas o número de graus de dirigibilidade δ_s acessíveis a partir das entradas ζ é igual a zero, portanto o número total de graus de liberdade do robô que podem ser manipulados a partir da entrada η é igual a $\delta_M = \delta_m$, o qual pode ser chamado também de grau de manobrabilidade.

6.4 Modelo Cinemático de Configuração

No modelo cinemático de postura utiliza-se as restrições do sistema apenas implicadas às variáveis de postura do robô móvel. Descreve abaixo o comportamento de todo robô incluindo todas as variáveis de configuração.

Escreve-se o sistema para representar cinematicamente o robô através do vetor das velocidades generalizadas \dot{q} em função das velocidades das rodas atuadas η ,

$$\dot{q} = \mathbf{S}(q)\eta. \quad (38)$$

Para o robô em questão neste trabalho $\mathbf{S}(q)$ assume a forma

$$\mathbf{S}(q) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}'(\theta)\boldsymbol{\Sigma} \\ \mathbf{E}\boldsymbol{\Sigma} \end{bmatrix}, \quad (39)$$

onde

$$\mathbf{E} = -\mathbf{J}_2^{-1}\mathbf{J}_1. \quad (40)$$

Substituindo (27) e (28) em (40) e esta junto com (35) e (36) em (39):

$$\mathbf{S}(q) = \begin{bmatrix} c(b_e \cos\theta - a_d \sin\theta) & c(b_d \cos\theta + a_d \sin\theta) \\ c(b_e \sin\theta + a_d \cos\theta) & c(b_d \sin\theta - a_d \cos\theta) \\ c & -c \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{c(b_e + b_f)}{r_2} & \frac{c(b_d - b_f)}{r_2} \\ \frac{c(b_e + b_t)}{r_2} & \frac{c(b_d - b_t)}{r_2} \end{bmatrix} \quad (41)$$

As restrições (14), (15), (16), (17), (21) e (22) podem ser sumarizadas na forma

$$\mathbf{J}(q)\dot{q} = 0 \quad (42)$$

onde $\mathbf{J}(q)$ é a matriz de restrições e apresenta a seguinte forma para o robô em questão:

$$\mathbf{J}(q) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 R(\theta) & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{C}_1^* R(\theta) & 0 \end{bmatrix}. \quad (43)$$

Calculada utilizando-se (27), (28), (30) e (35) para este robô, apresenta a forma

$$\mathbf{J}(q) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & b_d & -r_1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) & -b_e & 0 & -r_1 & 0 & 0 \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) & b_f & 0 & 0 & -r_2 & 0 \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) & b_t & 0 & 0 & 0 & -r_2 \\ \sin(\theta) & -\cos(\theta) & a_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & -\cos(\theta) & a_e & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (44)$$

As duas matrizes $\mathbf{J}(q)$ e $\mathbf{S}(q)$ satisfazem a relação

$$\mathbf{J}(q)\mathbf{S}(q) = 0. \quad (45)$$

O modelo cinemático de configuração do robô é representado pela equação (38) calculada com a equação (41).

6.5 Modelo Dinâmico de Configuração

Nesta subseção descreve-se o modelo sob um ponto de vista mecânico de todo o sistema, permitindo relacionar as entradas de controle fornecidas pelos atuadores internos à evolução das coordenadas generalizadas q . Este é o modelo de espaço de estados mais geral, que fornece uma descrição completa da dinâmica incluindo as forças fornecidas pelos atuadores.

Utiliza-se a formulação de Lagrange [10] para obter a equação:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = \tau + J'(q)\lambda \quad (46)$$

onde $T(q, \dot{q})$ representa a energia cinética do robô, τ é o vetor das forças generalizadas associadas aos torques dos atuadores

$$\tau = [\tau_d \quad \tau_e]', \quad (47)$$

sendo τ_d o torque do motor direito e τ_e representa o torque de entrada do motor esquerdo. O termo $J'(q)\lambda$ é o vetor das forças generalizadas associadas às restrições cinemáticas. O vetor λ é o vetor de multiplicadores de Lagrange associado às restrições.

A energia cinética do robô é calculada somando-se todas as parcelas relativas as rodas, e ao corpo do robô, que é representada por

$$T = T_b + T_{rc} + T_{ro} + T_{xc} + T_{xo} \quad (48)$$

com T_b representando a energia cinética do corpo do robô sem as rodas, T_{rc} a energia cinética das rodas convencionais relativas ao plano das rodas, T_{ro} a energia cinética das rodas onidirecionais relativas ao plano das rodas, T_{xc} representando a energia cinética das rodas convencionais em relação ao seu eixo de giro e T_{xo} representando a energia cinética das rodas onidirecionais em relação ao seu eixo de giro.

- **Cálculo de T_b :** a energia cinética inserida ao sistema pelo corpo do robô sem considerar as rodas é definida por

$$T_b = \frac{1}{2}m_b(\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2) + \frac{1}{2}I_b\dot{\theta}^2, \quad (49)$$

onde m_b é a massa do robô sem as rodas, I_b é o momento de inércia do corpo do robô sem as rodas (em relação ao eixo passante no centro P do robô e perpendicular ao plano do chão) e com \dot{x}_p e \dot{y}_p definidos, relativos ao centro de massa do robô, na forma:

$$\begin{cases} \dot{x}_p = \dot{x}_c + l\dot{\theta}\text{sen}(\alpha + \theta) \\ \dot{y}_p = \dot{y}_c - l\dot{\theta}\text{cos}(\alpha + \theta) \end{cases} \quad (50)$$

Tem-se então a partir de (49) e (50) a representação da parcela de energia cinética inserida pelo corpo do robô:

$$T_b = \frac{1}{2}m_b(\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + m_b(l\text{sen}(\alpha + \theta)\dot{\theta}\dot{x}_c - l\text{cos}(\alpha + \theta)\dot{\theta}\dot{y}_c) + \frac{1}{2}(m_b l^2 + I_b)\dot{\theta}^2. \quad (51)$$

- **Cálculo de T_{rc} :** a energia cinética inserida ao sistema pelas duas rodas fixas pode ser dividida para melhor entendimento de forma a representar cada parcela relativa a sua posição no robô

$$T_{rc} = T_d + T_e \quad (52)$$

que possuem a seguinte forma, onde i é igual a “d” para direita e “e” para esquerda:

$$T_i = \frac{1}{2}m_1(\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) + \frac{1}{2}I_{1m}\dot{\theta}^2. \quad (53)$$

sendo m_1 a massa da roda fixa e I_{1m} o momento de inércia da roda fixa em relação a um eixo contido no plano da roda.

A velocidade da roda direita relativa ao ponto onde se cruzam os eixos de simetria e das rodas é representada da seguinte forma

$$\begin{cases} \dot{x}_d = \dot{x}_p + b\dot{\theta}\text{cos}(\theta) \\ \dot{y}_d = \dot{y}_p + b\dot{\theta}\text{sen}(\theta) \end{cases} \quad (54)$$

e a velocidade inserida pela roda esquerda é representada por

$$\begin{cases} \dot{x}_e = \dot{x}_p - b\dot{\theta}\text{cos}(\theta) \\ \dot{y}_e = \dot{y}_p - b\dot{\theta}\text{sen}(\theta) \end{cases} \quad (55)$$

onde (55) difere de (54) pela velocidade angular aplicada por $\dot{\theta}$, que cria movimentos opostos em sentido nas rodas considerando-se a referência o ponto central entre os eixos que as intersectam.

Unindo-se (52) a (53), (54), (55) e utilizando (50) para que a referência global da energia cinética seja em torno do centro de massa, chega-se a igualdade

$$T_{rc} = m_1(\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + 2m_1(l\text{sen}(\alpha + \theta)\dot{\theta}\dot{x}_c - l\text{cos}(\alpha + \theta)\dot{\theta}\dot{y}_c) + (m_1(l^2 + b^2) + I_{1m})\dot{\theta}^2 \quad (56)$$

- **Cálculo de T_{ro} :** a energia cinética inserida ao sistema pelas duas rodas onidirecionais passivas pode também ser dividida de forma a representar cada parcela relativa a sua posição no robô

$$T_{ro} = T_f + T_t \quad (57)$$

que possuem a seguinte forma, onde i é igual a “f” para frontal e “t” para traseira:

$$T_i = \frac{1}{2}m_2(\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) + \frac{1}{2}I_{2m}\dot{\theta}^2. \quad (58)$$

sendo m_2 a massa da roda onidirecional e I_{2m} o momento de inércia do da roda onidirecional em relação a um eixo contido no plano da roda.

A velocidade da roda frontal relativa ao ponto onde se cruzam os eixos de simetria e das rodas é representada da seguinte forma

$$\begin{cases} \dot{x}_f = \dot{x}_p - a\dot{\theta}\text{sen}(\theta) \\ \dot{y}_f = \dot{y}_p + a\dot{\theta}\text{cos}(\theta) \end{cases} \quad (59)$$

e a velocidade inserida pela roda traseira é representada por

$$\begin{cases} \dot{x}_t = \dot{x}_p + a\dot{\theta}\text{sen}(\theta) \\ \dot{y}_t = \dot{y}_p - a\dot{\theta}\text{cos}(\theta) \end{cases} \quad (60)$$

Unindo-se (57) a (58), (59), (60) e utilizando (50) para que a referência global da energia cinética seja em torno do centro de massa, chega-se a igualdade

$$T_{ro} = m_2(\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + 2m_2(l\text{sen}(\alpha + \theta)\dot{\theta}\dot{x}_c - l\text{cos}(\alpha + \theta)\dot{\theta}\dot{y}_c) + (m_2(l^2 + a^2) + I_n)\dot{\theta}^2 \quad (61)$$

- **Cálculo de T_{xc} :** a energia cinética inserida ao sistema pelo giro de cada roda convencional em torno de seu eixo é representada pela equação, com i igual a “d” para direita e “e” para esquerda

$$T_{xi} = \frac{1}{2}I_{1w}\dot{\phi}_i^2 \quad (62)$$

com I_{1w} o momento de inércia da roda fixa em relação ao eixo central da roda.

Como existem duas rodas fixas, T_{xc} é representado pelo somatório destas duas rodas, o que gera

$$T_{xc} = \frac{1}{2} I_{1w} (\dot{\phi}_d^2 + \dot{\phi}_e^2). \quad (63)$$

• **Cálculo de T_{xi} :** a energia cinética inserida ao sistema pelo giro de cada roda onidirecional em torno de seu eixo é representada pela equação, com i igual a “f” para frontal e “t” para traseira

$$T_{xi} = \frac{1}{2} I_{2w} \dot{\phi}_i^2 \quad (64)$$

com I_{2w} representando o momento de inércia da roda onidirecional em relação ao eixo central da roda.

Como existem duas rodas onidirecionais, T_{xi} é representado pelo somatório destas duas rodas, o que gera

$$T_{xc} = \frac{1}{2} I_{2w} (\dot{\phi}_f^2 + \dot{\phi}_t^2). \quad (65)$$

Com os resultados de (51), (56), (61), (63) e (65), a energia cinética total obtida a partir de (48) toma a forma:

$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2} m (\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + ml (\sin(\alpha + \theta) \dot{\theta} \dot{x}_c - \cos(\alpha + \theta) \dot{\theta} \dot{y}_c) \\ & + \frac{1}{2} (m_b l^2 + 2m_1 (l^2 + b^2) + 2m_2 (l^2 + a^2) + I_b + 2I_{1m} + 2I_{2m}) \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_{1w} (\dot{\phi}_d^2 \\ & + \dot{\phi}_e^2) + \frac{1}{2} I_{2w} (\dot{\phi}_f^2 + \dot{\phi}_t^2) \end{aligned} \quad (66)$$

sendo $m = m_b + 2m_1 + 2m_2$ o peso total do robô.

Resolvendo a formulação de Lagrange (46) para componente do vetor de coordenadas generalizadas q , obtém-se:

$$m\ddot{x}_c + ml(\cos(\alpha + \theta)\dot{\theta}^2 + \sin(\alpha + \theta)\ddot{\theta}) = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)\cos(\theta) + (\lambda_5 + \lambda_6)\sin(\theta); \quad (67)$$

$$m\ddot{y}_c + ml(\sin(\alpha + \theta)\dot{\theta}^2 - \cos(\alpha + \theta)\ddot{\theta}) = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)\sin(\theta) - (\lambda_5 + \lambda_6)\cos(\theta); \quad (68)$$

$$ml(\sin(\alpha + \theta)\ddot{x}_c - \cos(\alpha + \theta)\ddot{y}_c) + I\ddot{\theta} = b_d\lambda_1 - b_e\lambda_2 + b_f\lambda_3 + b_t\lambda_4 + a_d\lambda_5 + a_e\lambda_6; \quad (69)$$

$$I_{1w}\ddot{\phi}_d = \pi_d - r_1\lambda_1; \quad (70)$$

$$I_{1w}\ddot{\phi}_e = \pi_e - r_1\lambda_2; \quad (71)$$

$$I_{2w}\ddot{\phi}_f = -r_2\lambda_3; \quad (72)$$

$$I_{2w}\ddot{\phi}_t = -r_2\lambda_4, \quad (73)$$

sendo $I = m_b l^2 + 2m_1(l^2 + b^2) + 2m_2(l^2 + a^2) + I_b + 2I_{1m} + 2I_{2m}$ e λ_i os multiplicadores de Lagrange com $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$. Estas equações são utilizadas para obter as matrizes:

- **Matriz de inércia**

$$\mathbf{M}(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & m\text{lsen}(\alpha + \theta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & -m\text{lc}(\alpha + \theta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m\text{lsen}(\alpha + \theta) & -m\text{lc}(\alpha + \theta) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{1w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{1w} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{2w} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{2w} \end{bmatrix} \quad (74)$$

- **Matriz de Coriolis e centrípetos**

$$f(q, \dot{q}) = [m\text{lc}(\alpha + \theta)\dot{\theta}^2 \quad m\text{lsen}(\alpha + \theta)\dot{\theta}^2 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]' \quad (75)$$

para serem aplicadas na fórmula

$$\mathbf{M}(q)\ddot{q} + f(q, \dot{q}) = \mathbf{B}\tau + \mathbf{J}'(q)\lambda, \quad (76)$$

onde \mathbf{B} é a matriz de transformação da entrada definida por

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}' \quad (77)$$

Os multiplicadores de Lagrange podem ser eliminados da equação (76) multiplicando-se a esquerda $\mathbf{S}(q)$ e utilizando propriedade (45). Para eliminar \dot{q} e \ddot{q} utiliza-se a equação (38), o que resulta na equação

$$[\mathbf{S}'(q)\mathbf{M}(q)\mathbf{S}(q)]\dot{\eta} + [\mathbf{S}'(q)\mathbf{M}(q)\dot{\mathbf{S}}(q)\eta + \mathbf{S}'(q)f(q, \mathbf{S}(q)\eta)] = \mathbf{S}'(q)\mathbf{B}\tau \quad (78)$$

Compactamente

$$\mathbf{H}(q)\dot{\eta} + \mathbf{F}(q, \eta) = \mathbf{S}'(q)\mathbf{B}\tau \quad (79)$$

A equação (79) junto com a equação (38) constituem o modelo dinâmico de configuração do robô.

6.6 Modelo Dinâmico de Postura

No contexto de controle do planejamento de trajetória é explicitamente necessário controlar a postura do robô, representada pelo vetor de postura ξ a partir do vetor de entradas de controle u . Por isso pode-se ignorar as variáveis das rodas e se preocupar diretamente com estas coordenadas de postura, utilizando a formulação:

$$\dot{\xi} = L(\xi)\eta \quad (80)$$

com

$$L(\xi) = [R'(\theta)\Sigma] \quad (81)$$

6.7 Controle Dinâmico

A partir do modelo dinâmico de postura do robô

$$\dot{\xi} = L(\xi)\eta, \quad (82)$$

$$H(q)\dot{\eta} + F(q, \eta) = S'(q)B\tau, \quad (83)$$

apresenta-se neste subitem um exemplo de controlador da trajetória e da velocidade (angular e linear) do robô. Os resultados obtidos neste subitem são oriundos dos trabalhos realizados em FIERRO et al. [84] e KANAYAMA et al. [86] aplicados no modelo desenvolvido acima.

A técnica baseia-se na reutilização de um controlador cinemático, que regula as velocidades angular e linear do robô ($p = [v \ w]'$), na montagem de um controlador de torque τ que leva em consideração os parâmetros dinâmicos do robô. Isto é possível fazendo u igual a uma entrada de controle auxiliar, e aplicando a realimentação não-linear,

$$\tau = f_{\tau}(q, \eta, u) = (S'(q)B)^{-1}[H(q)u + F(q, \eta)], \quad (84)$$

na equação (83) convertendo o problema do controle dinâmico em um problema de controle cinemático [84]:

$$\dot{\eta} = u. \quad (85)$$

Os resultados apresentados nestes artigos citados consideram a regulagem das velocidades, linear e angular do robô ($p = [v \ w]'$) e tendo em vista que o modelo do robô foi desenvolvido em termos das velocidades das rodas ($\eta = [\dot{\phi}_d \ \dot{\phi}_e]'$), faz-se necessário definir a conversão entre estas variáveis para serem utilizadas na malha de controle:

$$\eta = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_1} & \frac{1}{(2c)} \\ \frac{1}{r_1} & -\frac{1}{(2c)} \end{bmatrix} p \quad (86)$$

6.7.1 Problemas de Controle

Considerando cada um dos problemas básicos de navegação para o robô móvel em questão:

Seguimento de referência: dada uma referência do robô

$$\dot{x}_r = v_r \cos \theta_r, \dot{y}_r = v_r \sin \theta_r, \dot{\theta}_r = w_r, \xi_r = [x_r \ y_r \ \theta_r]', p_r = [v_r \ w_r]',$$

com $p_r > 0$ para todo t , deve-se encontrar uma entrada de controle de velocidade estável $p_c = f_c(e, p_r, K)$ de tal forma que $\lim_{t \rightarrow \infty} (\xi_r - \xi) = 0$;

Seguimento de trajetória: dada uma trajetória P no plano e uma velocidade linear v para o robô, deve-se encontrar uma entrada de controle amortecida de velocidade $p_c = f_c(e_\theta, p, b, K)$, onde e_θ e b são o erro de orientação e a distância entre o ponto de referência no robô móvel e a trajetória P respectivamente, de tal forma que $\lim_{t \rightarrow \infty} (e_\theta) = 0$ e $\lim_{t \rightarrow \infty} (b) = 0$;

Estabilização em um ponto: dada uma configuração arbitrária q_r, q_r , deve-se encontrar uma entrada de controle de velocidade estável e variante no tempo $p_c = f_c(e, p_r, K, t)$ tal que $\lim_{t \rightarrow \infty} (\xi_r - \xi) = 0$.

Cada um destes problemas pode ser solucionado utilizando entradas amortecidas de controle de velocidade adequadas e se o sistema do robô móvel consegue seguir uma gama de entradas de controle de velocidade estes podem ser solucionados através da mesma estrutura de controle.

Por exemplo, selecionada a tarefa de controle define-se uma lei de controle realimentado auxiliar $\sigma = \dot{p}_c + k_4(p_c - p)$ de modo que $p > p_c$ quando $t \rightarrow \infty$. Finalmente, computa-se o torque $\tau = f_\tau(q, \eta, u)$ utilizando (84) sendo u definido como

$$u = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_1} & \frac{1}{(2c)} \\ \frac{1}{r_1} & -\frac{1}{(2c)} \end{bmatrix} \sigma, \quad (87)$$

devido a mudança de velocidades do robô p para a velocidade das rodas η , conforme a equação (86).

O controle amortecido de velocidade, denotado por p_c , pode ser encontrado por qualquer técnica contida na literatura. Utilizando o algoritmo explicado em FIERRO et al. [84], os três problemas básicos de navegação podem ser solucionados, porém neste trabalho, a fim de exemplo e verificação do modelo, apenas o seguimento de trajetória será abordado.

6.7.2 Seguimento de Trajetória

Uma estrutura genérica para o sistema de controle de seguimento é apresentada na Figura 6.7. Assume-se que é conhecida toda a dinâmica do robô, portanto (84) e (87) são utilizadas para computar τ dado σ . Esta técnica se valida na obtenção de σ e τ a partir de um p_c específico que controla o sistema de navegação (82).

Considera-se comumente que o problema assume “seguimento de velocidade perfeito” (assumindo $\sigma = \dot{p}_c$), o qual pode falhar na prática, assim a melhor alternativa para contornar esta suposição é o método do integrador *backstepping* [87], desenvolvido em FIERRO et al. [84].

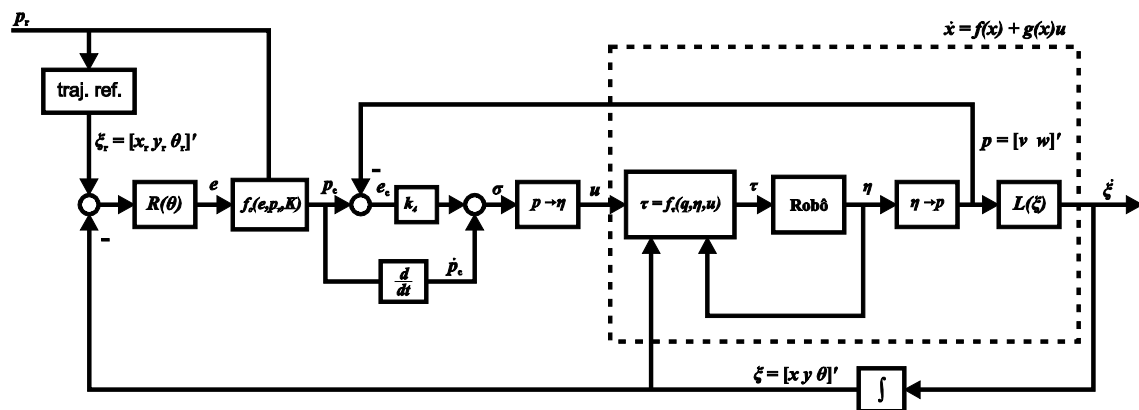


Figura 6.7 Estrutura do controlador de trajetória.

Parte-se para a obtenção do controlador da solução para o problema de seguimento de trajetória do sistema, denotado como p_c , apresentado em KANAYAMA et al. [86]:

O vetor de erro de seguimento e é expresso na base fixa à plataforma móvel

$$e = \mathbf{R}(\theta)(\xi_r - \xi) = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix}, \quad (88)$$

e a derivada do erro define-se como

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} w e_2 - v + v_r \cos e_3 \\ -w e_1 + v_r \sin e_3 \\ w_r - w \end{bmatrix}, \quad (89)$$

onde v e w representam a velocidade linear e angular atual do robô, respectivamente e v_r e w_r representam a velocidade linear e angular de referência do robô, respectivamente.

A entrada de controle auxiliar que executa o seguimento para (82) é dada por

$$p_c = \begin{bmatrix} v_r \cos e_3 + k_1 e_1 \\ w_r + k_2 v_r e_2 + k_3 v_r \sin e_3 \end{bmatrix} = f_c(e, p_r, K). \quad (90)$$

onde k_1 , k_2 e k_3 são constantes positivas.

A derivada de p_c torna-se

$$\dot{p}_c = \begin{bmatrix} \dot{v}_r \cos e_3 \\ \dot{w}_r + k_2 \dot{v}_r e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 & -v_r \sin e_3 \\ 0 & k_2 v_r & k_3 v_r \cos e_3 \end{bmatrix} \dot{e}, \quad (91)$$

e assumindo que as velocidades linear e angular de referência (v_r e w_r) são constantes, obtém-se

$$\dot{p}_c = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & -v_r \sin e_3 \\ 0 & k_2 v_r & k_3 v_r \cos e_3 \end{bmatrix} \dot{e}. \quad (92)$$

Portanto a entrada de controle de aceleração não-linear realimentado proposta é

$$\sigma = \dot{p}_c + k_4(p_c - p), \quad (93)$$

onde $k_4 > 0$. Nota-se também que na equação (93) também é válido o caso onde v_r e w_r são funções variantes no tempo.

Teorema: Dado um sistema não-holonômico, (82) - (85), com n coordenadas generalizadas q , m restrições independentes e r atuadores, toma-se as seguintes suposições: **a.1** o número de atuadores é igual ao número de graus de liberdade ($r = n - m$). **a.2** A velocidade linear de referência é diferente de zero e limitada, $v_r > 0$ para todo t , e a velocidade angular w_r é limitada. **a.3** Uma entrada de controle de velocidade auxiliar amortecida p_c é dada por (90). **a.4** $K = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]'$ é um vetor de constantes positivas. **a.5** k_4 é uma constante positiva suficientemente grande.

Assumindo que o controle realimentado não-linear $u \in \mathfrak{R}^{n-m}$ dado por (93) seja usado e que as entradas de comando do robô são dadas por (84), então a origem $e = 0$ é uniformemente assintoticamente estável e o vetor de velocidades no robô móvel satisfaz $p \rightarrow p_c$ quando $t \rightarrow \infty$.

Prova: define-se um erro de velocidade auxiliar

$$e_c = p - p_c = \begin{bmatrix} e_4 \\ e_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 - v_r \cos e_3 - k_1 e_1 \\ v_2 - w_r - k_2 v_r e_2 - k_3 v_r \sin e_3 \end{bmatrix}. \quad (94)$$

Utilizando (93) obtém-se

$$e_c = -k_4 e_c. \quad (95)$$

Então através da suposição **a.5** o vetor auxiliar de velocidades converge exponencialmente para zero. \therefore o vetor de velocidades da base móvel satisfaz $p \rightarrow p_c$ quando $t \rightarrow \infty$.

Considerando a seguinte função candidata de Lyapunov:

$$V = k_1(e_1^2 + e_2^2) + \frac{2k_1}{k_2}(1 - \cos e_3) + \frac{1}{2k_4}\left(e_4^2 + \frac{k_1}{k_2 k_3 v_r} e_5^2\right), \quad (96)$$

onde $V \geq 0$ e $V = 0$ somente se $e = 0$ e $e_c = 0$. Além disso, utilizando (89), (94) e (95)

$$\dot{V} = -k_1^2 e_1^2 - \frac{k_1 k_3}{k_2} v_r \sin^2 e_3 - (e_4 + k_1 e_1)^2 - \frac{k_1}{k_2 k_3 v_r} (e_5 + k_3 v_r \sin e_3)^2, \quad (97)$$

decorre-se que $\dot{V} \leq 0$ e o erro $\mathbf{e} = [e \quad e_c]'$ é limitado. Utilizando as equações (89), (94), (97) e a suposição a.3, deduz-se que $\|e\|$ e $\|\dot{e}\|$ são limitadas, portanto $\|\dot{V}\| < \infty$, visto que \dot{V} é uniformemente contínuo. Visto que V não cresce e converge para um valor constante, pelo lema de Barbalat, $\dot{V} \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$. Considerando que $e_c = [e_4 \quad e_5]'$ $\rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$, então no limite

$$0 = k_1 e_1^2 + \frac{k_3}{k_2} v_r \sin^2 e_3. \quad (98)$$

A equação (98) implica que $[e_1 \quad e_3]'$ $\rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$. Finalmente usando a definição de e_c nota-se que $e_2 \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$. Portanto, o ponto de equilíbrio $\mathbf{e} = 0$ é uniformemente assintoticamente estável.

A prova apresentada está detalhada em FIERRO et al. [84].

- **Parâmetros de controle**

O sistema apresentado é estável para qualquer combinação de valores dos parâmetros k_1 , k_2 e k_3 . No entanto para que os resultados da simulação, a serem apresentados, do sistema não apresente oscilação e nem de resposta lenta, utiliza-se da análise apresentada no trabalho de KANAIAMA et al. [8], para escolha dos parâmetros.

No artigo citado a análise do conjunto de parâmetros conclui que, $1/k_1$ corresponde à constante de tempo de convergência exponencial do sistema e os ganhos k_2 e k_3 definem a o amortecimento ζ e a frequência natural do sistema γ de acordo com

$$\zeta = \frac{k_3}{2\sqrt{k_2}} \text{ e } \gamma = V_r \sqrt{k_2}, \quad (99)$$

de onde se retira a condição de amortecimento crítico

$$k_3^2 = 4 k_2. \quad (100)$$

6.7.3 Resultados

Usando o Matlab[®]/Simulink[®], dois experimentos simulados foram testados com o modelo dinâmico do robô:

- **Resposta ao degrau**

O primeiro teste exercido no modelo com o controlador acima exposto foi a aplicação de um degrau no seu posicionamento. Ou seja, com o robô em repouso e com a configuração $\xi_0 = [1 \ 1 \ 0]$, aplica-se um controlador com referência fixa $v_r = 0,5 \text{ m/s}$ e $w_r = 0 \text{ rad/s}$ e altera-se a referência de trajetória no eixo Y para diferentes valores.

Dois resultados para este teste foram obtidos e apresentados: na Figura 6.8 (a) quatro amplitudes de degrau foram testadas (5, 10, 20 e 40 cm) para os mesmos parâmetros ($k_1 = 1$, $\zeta = 1$, $\gamma = 4$ e $k_4 = 4$) e na Figura 6.8 (a) para a mesma amplitude de degrau (40 cm) três níveis diferentes de amortecimento foram utilizados, 0,75 (sub-amortecido), 1 (amortecimento crítico) e 1,25 (sobre-amortecido).

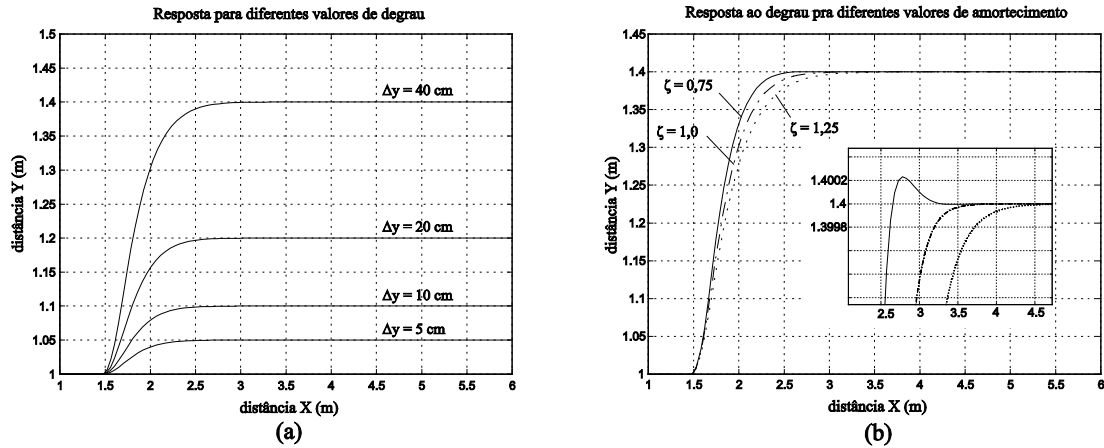


Figura 6.8 Resposta ao degrau (a) e amortecimento (b).

- **Seguimento de uma trajetória**

O segundo teste realizado, com o modelo do robô utilizando o controlador exposto, foi o seguimento de uma trajetória mista formada por um trecho em reta e outro em curva. A trajetória, ilustrada na Figura 6.9 (a) em linha contínua, inicia-se em uma reta com velocidade linear constante ($v_r = 0,5 \text{ m/s}$) do ponto (1;1) até o ponto (3;2) quando altera-se a velocidade angular para um valor diferente de zero ($w_r = 0,175 \text{ rad/s}$), terminando no ponto (4,6;4,1).

A simulação utilizou os mesmos parâmetros utilizados no primeiro testes ($k_1 = 1$, $\zeta = 1$, $\gamma = 4$ e $k_4 = 0$) com amortecimento crítico. A trajetória exercida pelo robô é mostrada na Figura 6.9 (a) e os erros de posição estão exibidos na Figura 6.9 (b).

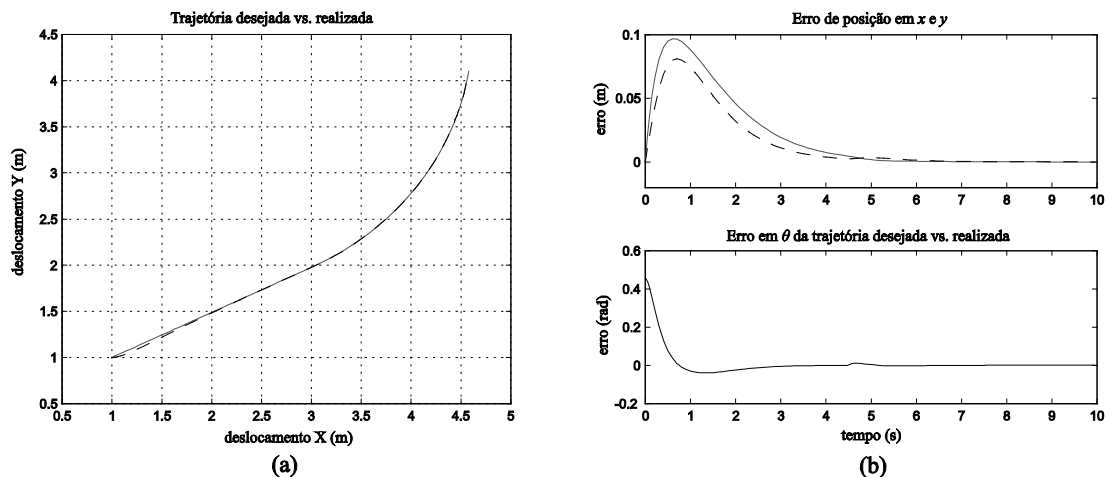


Figura 6.9 Trajetória de referência vs. executada (a) e erros de posição (b).

Mais dois resultados são apresentados contendo mais dados sobre a segunda simulação, na Figura 6.10 (a) apresenta-se os torque calculados para os motores, estes dados são importantes para avaliar a viabilidade de execução da tarefa pelos atuadores, e na Figura 6.10 (b) os gráficos de

seguimento de referência das velocidades, linear e angular, do robô, exibindo a propriedade seguimento de velocidade p_r de referência herdada do controlador cinemático.

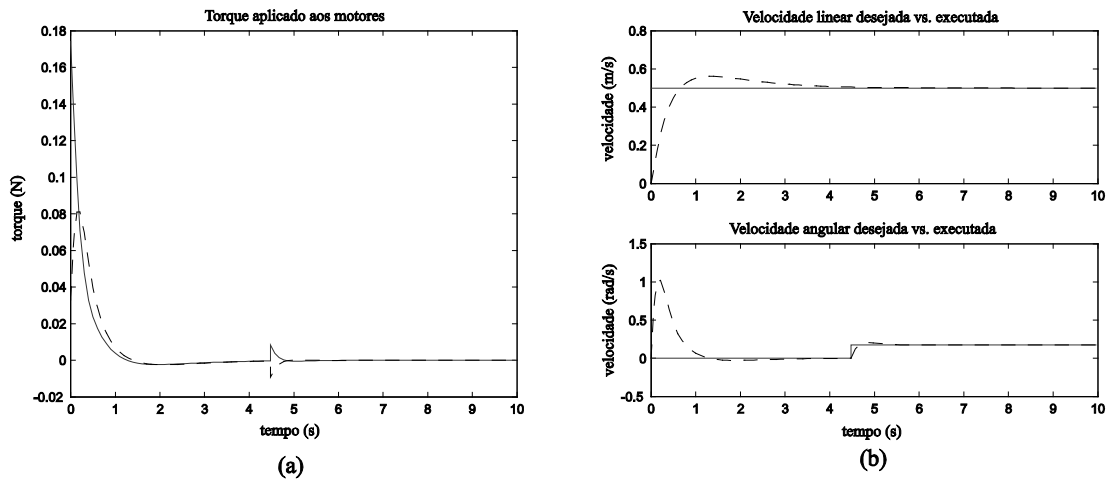


Figura 6.10 Torques aplicados (a) e seguimento de referência de velocidade (b).

6.8 Conclusão

Neste capítulo derivaram-se as restrições associadas às rodas usadas no robô e que caracterizam a mobilidade do sistema. Junto com as variáveis de configuração do robô estas restrições permitiram a obtenção do modelo cinemático. Complementando, a partir das características físicas do robô e as informações do modelo cinemático formou-se o modelo dinâmico do robô móvel.

Complementando o capítulo, verificando o modelo e caracterizando sua funcionalidade no desenvolvimento de controladores, um exemplo de controlador, com estabilidade assintótica provada, retirado da literatura foi aplicado ao robô móvel para a tarefa de seguimento de trajetória.

Dois testes foram executando com este controlador (trajetória em degrau e híbrida). Dos resultados apresentados verifica-se seguimento da trajetória através da Figura 6.9 (a) e conclui-se, pelo gráfico de torques calculados na Figura 6.10 (a), que o torque fornecido pelos atuadores é suficiente para executar a trajetória, havendo operação fora da faixa recomendada (por um período curto), mas não há operação fora da faixa permitida (saturação).

Os resultados documentados neste capítulo, munidos dos dados mecânicos expostos no capítulo 2, oferece um suplemento ao objetivo desta dissertação, formando material para desenvolvimento de controladores que necessitem do modelo matemático (cinemático ou dinâmico) da planta a ser controlada, em sua obtenção.

7. Conclusão

Neste trabalho apresentaram-se os resultados obtidos no projeto de um robô móvel com rodas, partes mecânicas, eletrônicas e seus modelos matemáticos (cinemático e dinâmico). Além de uma documentação do projeto, este trabalho apresenta-se como um manual de utilização de todos os componentes do robô.

Todo o desenvolvimento de peças mecânicas, formato, disposição na montagem, características físicas, etc., foram assuntos no capítulo 3, assim como informações sobre a potência de trabalho dos atuadores utilizados no projeto. Resultados sobre dados ideais de atrito e simulados de momento de inércia foram utilizados para cálculo dos torques necessários para movimentação do robô móvel, sobre uma superfície plana e lisa. Estes resultados concluem o capítulo verificando a montagem da plataforma como apta a se movimentar a partir dos atuadores selecionados.

Completando o objetivo de criar uma base para aplicação prática de técnicas de controle, o quarto capítulo documentou os dispositivos escolhidos para sensoriamento do robô. Todos os dispositivos escolhidos viabilizam a realimentação de pelo menos uma variável capaz de ser utilizada no fechamento da malha de controladores. Completou-se o capítulo 4, apresentando-se referências das folhas de dados destes equipamentos, suas principais características elétricas, seus modos de utilização, técnicas de aquisição e disposições físicas.

A descrição de dispositivos eletrônicos, no quinto capítulo, dedicou-se aos métodos de comunicação entre um centro externo de controle ou monitoramento (computador) com o robô, contêineres de dados e um controlador central embarcado, compondo um projeto eletrônico para viabilização prática do robô. Os dispositivos documentados no capítulo 5 distinguem-se como uma interface para os módulos de sensoriamento. Finalizando-se o capítulo, fez-se a documentação de uma proposta de projeto de uma placa de interligação, completando o objetivo global de propor um projeto funcional de um robô móvel com rodas.

No sexto capítulo desenvolveram-se o modelo cinemático e dinâmico do robô móvel. Este prolongamento do objetivo fundamenta-se na forte interligação desta dissertação com a área de controle de sistemas móveis, onde a modelagem matemática do sistema facilita os testes, via simulação de diferentes controladores, evitando a execução direta de aplicações na plataforma antes da verificação dos algoritmos. Fechou-se o capítulo apresentando resultados simulados de um

exemplo de controlador dinâmico empregado na solução do problema de seguimento de trajetória do robô, verificando os modelos apresentados.

Concluindo o trabalho, no ANEXO 6 apresentam-se fotos da montagem prática das peças mecânicas e eletrônicas do robô.

7.1 Trabalhos Futuros

Este trabalho traz um equipamento para validação prática de controladores desenvolvidos teoricamente, assim a plataforma robótica descrita tem uma vasta gama de trabalhos futuros na área de controle de robôs móveis. Alguns trabalhos relativos à interface de ligação do hardware/software podem ser citados:

- Desenvolver uma biblioteca para a interface de comunicação como a memória não-volátil (MMC/SD) e para manipulação de dados organizados de acordo com o padrão FAT16;
- Produzir a placa de interface exposta no capítulo 5, contendo testes de validação;
- Desenvolver o circuito de alimentação do robô;
- Criar uma interface de comunicação, independente do meio utilizado (com ou sem fio), entre o robô e uma aplicação em sistema externo (computador);
- Desenvolver os protocolos de comunicação entre os sensores e o controlador central;
- Identificar os parâmetros do robô e validação do modelo matemático;
- Desenvolver diferentes tarefas que necessitem da mobilidade do robô e que utilizem recursos de visão a partir da câmera instalada;
- Desenvolver leis de controle para seguimento de trajetória do robô e posicionamento da câmera;
- Testes de validação dos algoritmos desenvolvidos.

ANEXO 1 DESCRIÇÃO DAS PROPRIEDADES DE MOTORES

Tabela A1.1

Descrição de propriedades de motores

1	Potência nominal	<i>Assigned power rating</i> , potência máxima dissipada, limite da faixa de operação
2	Voltagem nominal	<i>Nominal voltage</i> , voltagem, aplicada ao motor, na qual todos os dados nominais são baseados.
3	Velocidade sem carga	<i>No load speed</i> , velocidade do motor à voltagem nominal e sem carga.
4	Corrente sem carga	<i>No load current</i> , corrente de operação do motor à voltagem nominal e sem carga.
5	Velocidade Nominal	<i>Nominal Speed</i> , velocidade do motor à voltagem nominal e torque nominal, à 25°C.
6	Torque nominal	<i>Nominal torque (max. continuous torque)</i> , toque gerado à voltagem nominal e corrente nominal, à 25°C. Valores acima podem superaquecer o motor.
7	Corrente nominal	<i>Nominal current (max. continuous current)</i> , corrente que esquentar a armadura a temperatura máxima, à 25°C (ambiente).
8	Torque parado	<i>Stall torque</i> , toque apresentado pelo motor quando não apresenta rotação (0 rpm), à voltagem nominal
9	Corrente de arranque	<i>Starting current</i> , relação entre a voltagem nominal e a resistência entre os terminais
10	Eficiência máxima	<i>Max. Efficiency</i> , a máxima relação entre a potência de entrada e a de saída, durante o aumento contínuo de carga
11	Resistência nos terminais	<i>Terminal resistance</i> , resistência entre os terminais do rotor à 25 °C.
12	Indutância nos terminais	<i>Terminal inductance</i> , indutância do enrolamento da armadura, em repouso e medida a 1 kHz.
13	Constante de torque	<i>Torque constant</i> , constante da relação entre torque e a corrente aplicada no motor.
14	Constante de velocidade	<i>Speed constant</i> , constante da relação entre a velocidade e a voltagem aplicada ao motor, ignorando o atrito mecânico.
15	Gradiente velocidade/torque	<i>Speed / torque gradient</i> , relação entre a velocidade e o torque. Quanto menor este valor, mas força possui o motor e menos sensível a carga é sua velocidade.
16	Constante de tempo mecânica	<i>Mechanical time constant</i> , o tempo necessário para o motor alcançar 63% da velocidade sem carga e a partir do repouso.
17	Inércia do rotor	<i>Rotor inertia</i> , inércia do rotor sobre seu eixo de rotação.
18	Velocidade máxima admissível	<i>Max. permissible speed</i> , limite superior da velocidade segura de operação do motor.

ANEXO 2 PESOS DAS PEÇAS

Tabela A2.1

Pesos das peças: grupo 1


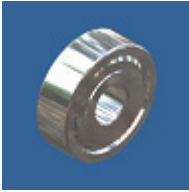





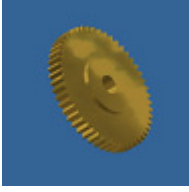











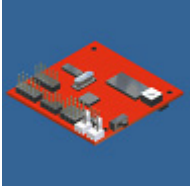


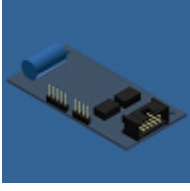



Peça	Imagem	Peso (g)	Peça	Imagem	Peso (g)
Roda fixa		90	Rolamento 12 mm		2
Roda onidirecional		32	Rolamento 10 mm		1,5
Mancal da roda onidirecional		11	Atuador		125
Mancal da junta		62	Engrenagem		17
Base da junta		11	Chassi		160
Suporte do motor		4	Capô		85
Eixo da roda fixa		5	Frontal		145
Eixo da roda onidirecional		7	Traseira		125

Tabela A2.2

Pesos das peças: grupo 2

Peça	Imagem	Peso (g)	Peça	Imagem	Peso (g)
Conexão		35	Abraçadeira da bateria		3
Janela		58	Suporte da bateria P.1		3
Servomotor		43	Suporte da bateria P.2		2
Rosto da torre		36	Módulo de controle da câmera		22
Base da câmera		20	Câmera		12
Suporte da torre		56	Ponte-h		19
Suporte do servomotor		20	Controladora do sonar		15
Suporte da ponte-h		1,5	Transdutor		8

ANEXO 3 RESTRIÇÕES DAS RODAS

Neste anexo trata-se sobre as restrições inseridas por rodas convencionais e onidirecionais a um sistema robótico móvel com rodas.

A inserção deste anexo faz-se necessária devido a não explicitação por completo de sua teoria no Capítulo 6, assim faz-se deste anexo uma referência rápida ao texto contido em [7] e [10].

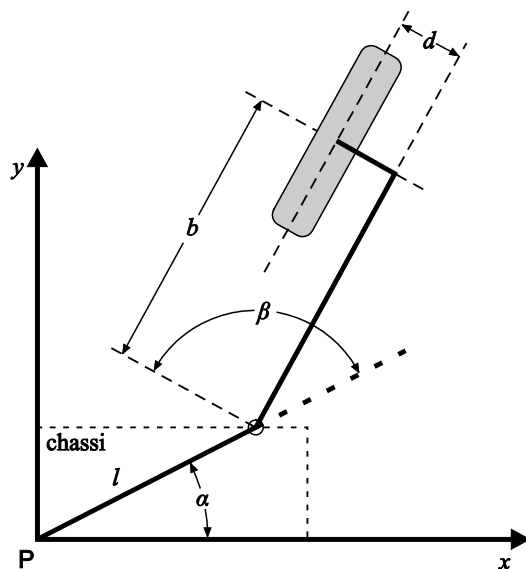


Figura A3.1 Representação das variáveis da roda.

Para projetar uma roda três condições devem ser consideradas:

- A determinação das duas distâncias d e b : esta condição é um problema de projeto, o parâmetro d pode ser maior ou igual a zero e o parâmetro b é a distância lateral da roda que é considerado igual a zero para as próximas considerações.
- Permitir o direcionamento ou não da roda (roda fixa ou não): este é um problema de projeto na medida em que se define se a orientação da roda pode ou não ser mudada. Se o eixo da roda é fixo, a roda prevê velocidades restritas a uma única direção.
- Determinar se á atuação de direção e giro. (roda atuada ou passiva): o problema neste caso resume-se a definir se a roda em questão necessita ter seu direcionamento ou giro atuado para cumprir a tarefa que lhe foi definida.

Existem quatro tipos de rodas convencionais comumente usadas, estes tipos variam a configuração das variáveis mostrada na Figura A3.1. Neste trabalho apenas rodas convencionais não direcionáveis com distância d igual a zero e rodas especiais onidirecionais que possuem rolos de giro livre ao redor de seu perímetro (Figura 6.4) são levadas em consideração.

A.1 Restrições cinemáticas

Assume-se primeiramente que o robô em estudo é composto por um chassi rígido com rodas não deformáveis e não há movimentação no plano horizontal. A posição do robô no plano é descrita, referente a uma base inercial arbitrária, pelo vetor de postura $\xi = [x \quad y \quad \theta]'$, onde x e y são as coordenadas de um ponto P qualquer dentro do robô enquanto θ descreve a orientação de uma base móvel fixa ao robô em relação à base inercial.

Considera-se também que durante o movimento o plano de cada roda permaneça vertical e a roda gira em torno de seu eixo horizontal. Distingue-se entre as classes básicas de rodas ideais, nomeadas convencionais e Suecas. Em cada caso é assumido que o contato da roda com o chão é reduzido a um único ponto. A restrição cinemática resulta do fato da velocidade do ponto da roda em contato com o solo é igual a zero.

Para uma roda convencional a restrição cinemática implica que a velocidade do centro da roda é paralela ao plano da roda (condição de *nonslip*) e é proporcional a velocidade de rotação da roda (condição de *pure rolling*). Para cada roda as restrições cinemáticas resultam em duas condições independentes.

Para uma roda sueca devido a rotação dos rolos relativos ao corpo da roda, apenas uma das componentes da velocidade do ponto de contato da roda é zero. A direção dessa componente nula é fixa relativa ao plano da roda e depende da construção da roda. Para estas rodas as restrições cinemáticas resultam em apenas uma condição.

Deriva-se a forma geral da cinemática para rodas convencionais a partir da forma generalizada apresentada na Figura A3.1. Primeiramente avalia-se a velocidade do centro da roda, o que resulta na seguinte expressão vetorial $\frac{d}{dt}OB = \frac{d}{dt}OP + \frac{d}{dt}PA$. Os dois componentes deste vetor na base do robô são expressos como $\dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta - l\dot{\theta}\sin\alpha + (\dot{\theta} + \dot{\beta})d\cos(\alpha + \beta)$ e $-\dot{x}\sin\theta + \dot{y}\cos\theta - l\dot{\theta}\cos\alpha + (\dot{\theta} + \dot{\beta})d\sin(\alpha + \beta)$.

As projeções desses vetores na direção do plano da roda, ou seja, no vetor $[\cos(\alpha + \beta - \pi/2), \sin(\alpha + \beta - \pi/2)]$ e o vetor do eixo da roda $[\cos(\alpha + \beta), \sin(\alpha + \beta)]$, são $r\dot{\phi}$ e 0, respectivamente, correspondendo as condições de *pure rolling* e *nonslip*.

Para uma roda fixa apenas se considera $d = 0$ e a constante β é fixa ocasionando $\dot{\beta} = 0$. Após algumas manipulações, estas condições podem ser reescritas na forma compacta:

- Condição de *pure rolling*:

$$[\sin(\alpha + \beta) \quad -\cos(\alpha + \beta) \quad -l\cos(\beta)]R(\theta)\dot{\xi} - r\dot{\phi} = 0 \quad (101)$$

- Condição de *nonslip*:

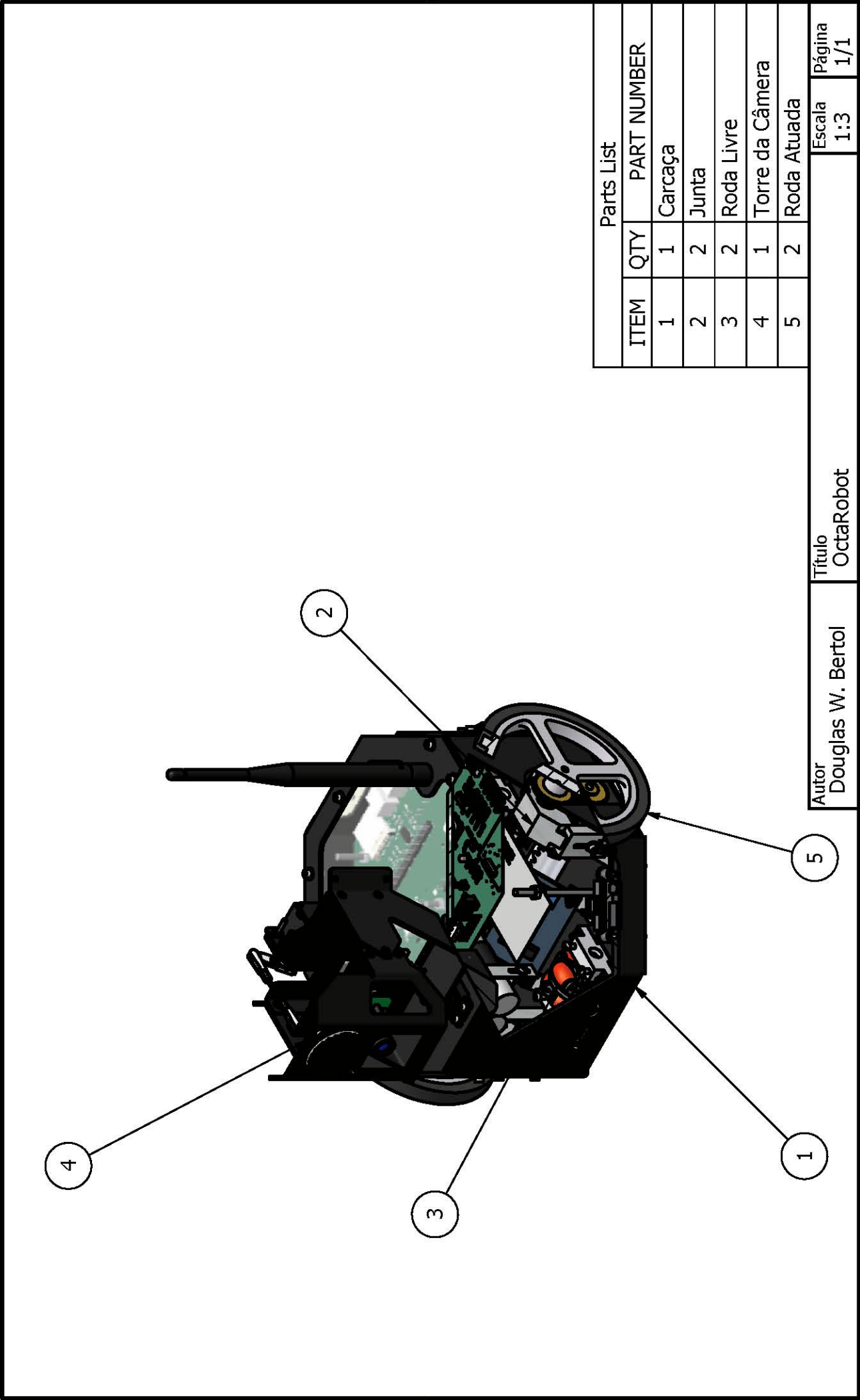
$$[\cos(\alpha + \beta) \quad -\sin(\alpha + \beta) \quad -l\sin(\beta)]R(\theta)\dot{\xi} = 0 \quad (102)$$

Nestas expressões $R(\theta)$ é a matriz ortogonal de rotação expressando a orientação do robô com respeito a base inercial e expressa em (35).

A posição de uma roda sueca com respeito ao chassi é descrito, assim como as rodas fixas, por três parâmetros: α , β e l . Um parâmetro adicional é requerido para caracterizar a direção, com respeito ao plano da roda, da componente nula da velocidade no ponto de contato da roda com o chão. Este parâmetro é γ , o qual representa o ângulo entre o eixo dos rolos e o plano da roda. Neste caso as restrições cinemáticas impõem somente uma condição:

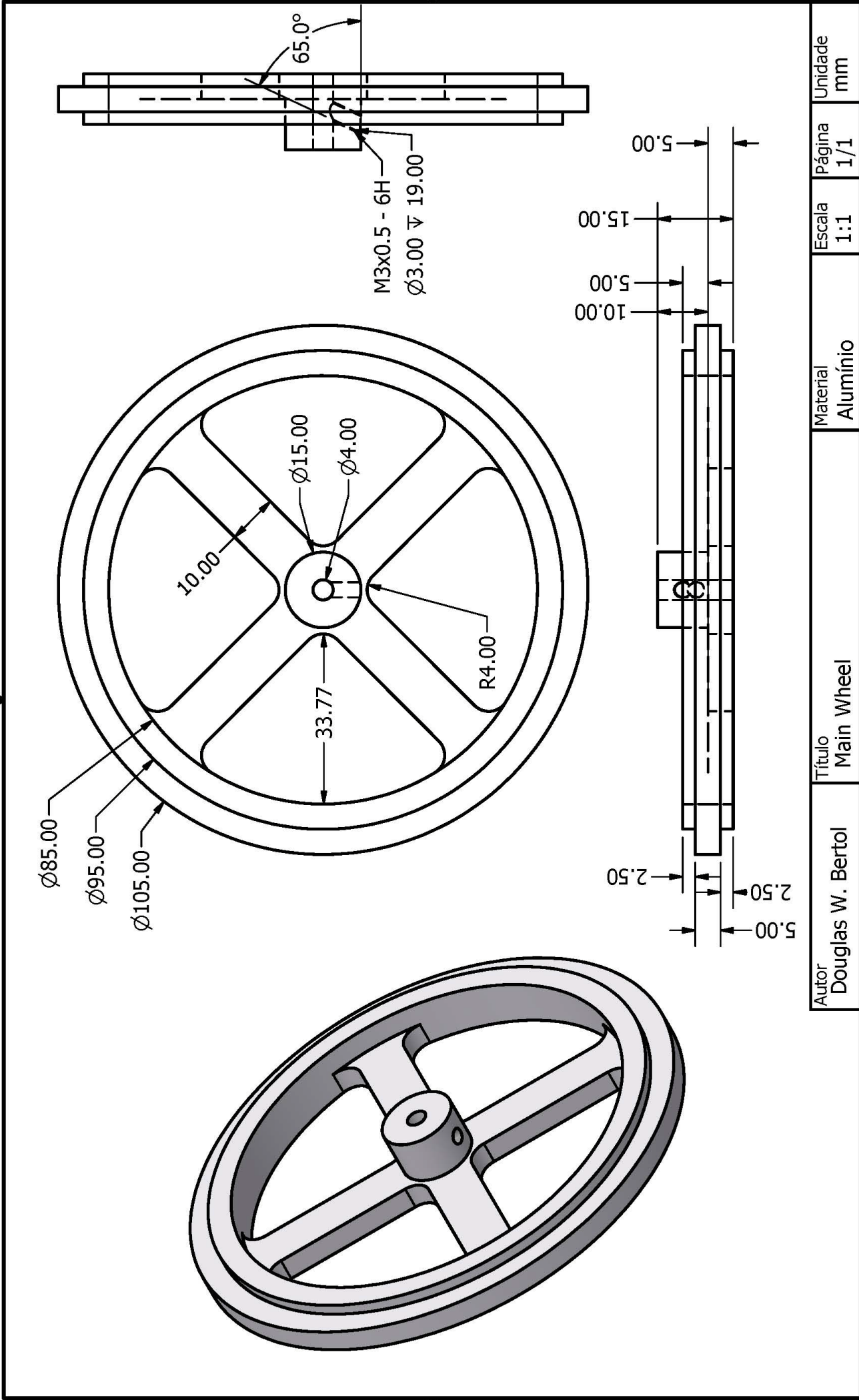
$$[\sin(\alpha + \beta + \gamma) \quad -\cos(\alpha + \beta + \gamma) \quad -l\cos(\beta + \gamma)]R(\theta)\dot{\xi} - r\cos\gamma\dot{\phi} = 0 \quad (103)$$

ANEXO 4 DESENHOS TÉCNICOS DO PROJETO MECÂNICO



Parts List

ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	Carcaça
2	2	Junta
3	2	Roda Livre
4	1	Torre da Câmera
5	2	Roda Atuada



Autor
Douglas W. Bertol

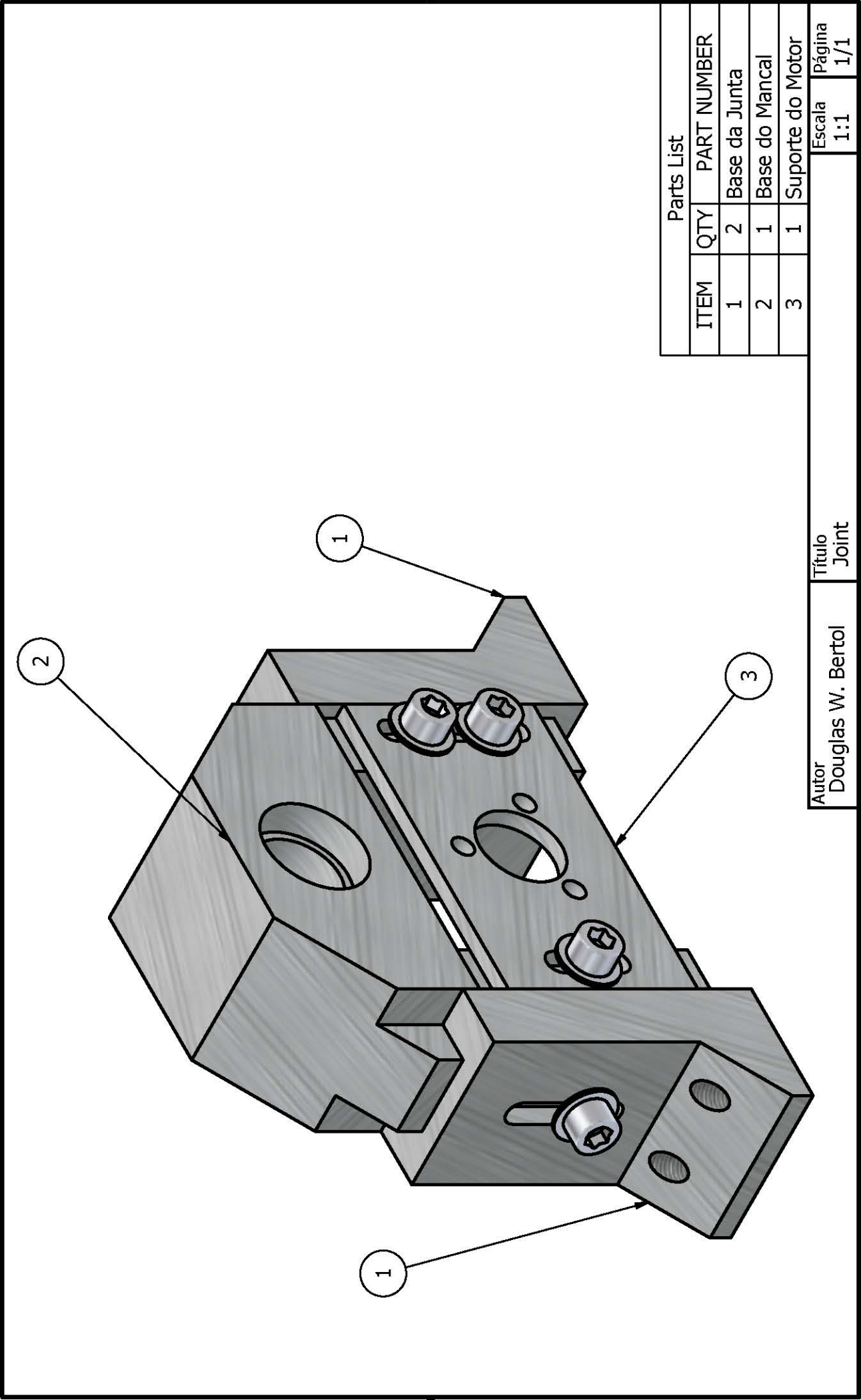
Título
Main Wheel

Material
Alumínio

Escala
1:1

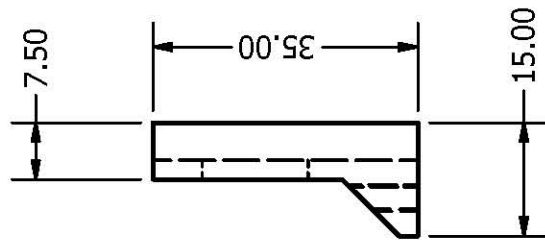
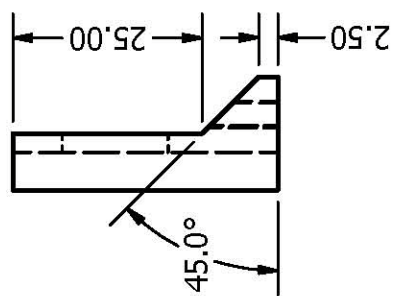
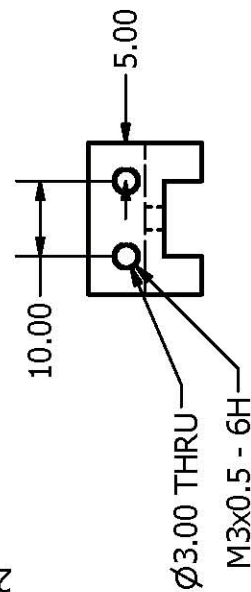
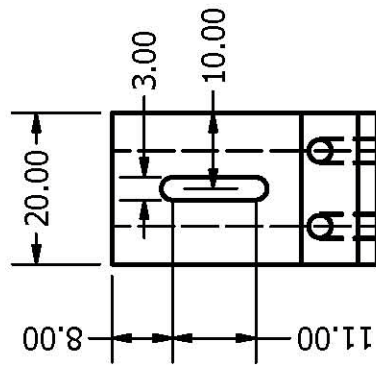
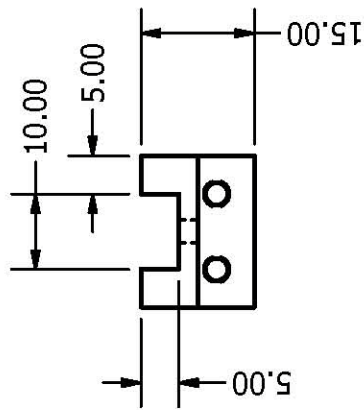
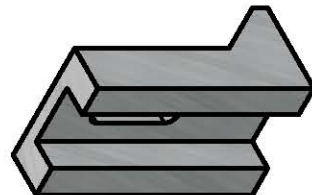
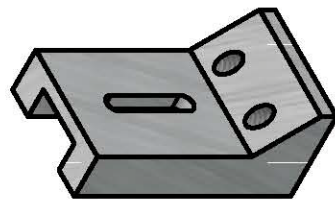
Página
1/1

Unidade
mm



Parts List		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	2	Base da Junta
2	1	Base do Mancal
3	1	Suporte do Motor

Autor Douglas W. Bertol	Título Joint	Escala 1:1	Página 1/1
----------------------------	-----------------	---------------	---------------



Autor
Douglas W. Bertol

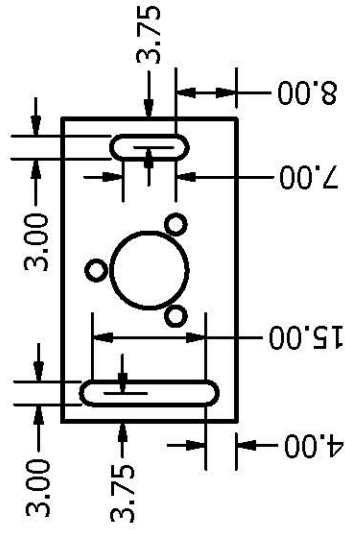
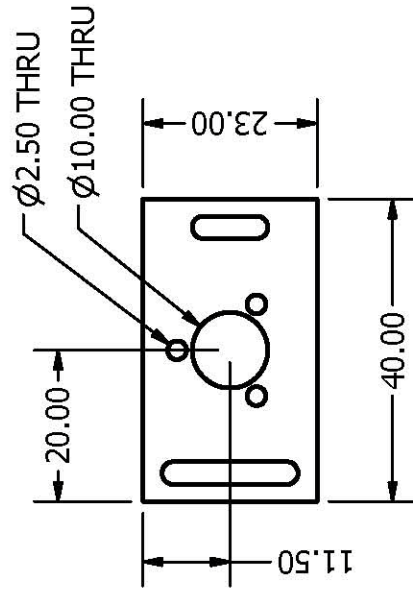
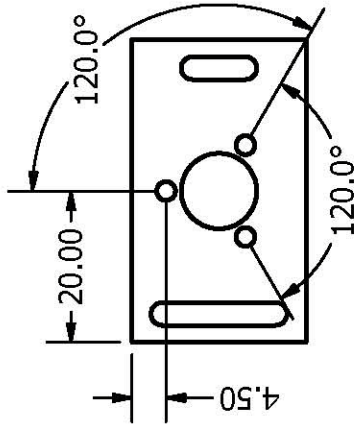
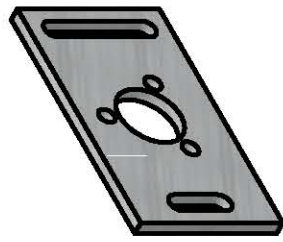
Título
Base Support

Material
Aluminio

Escala
1:1

Página
1/1

Unidade
mm



Autor
Douglas W. Bertol

Título
Motor Support

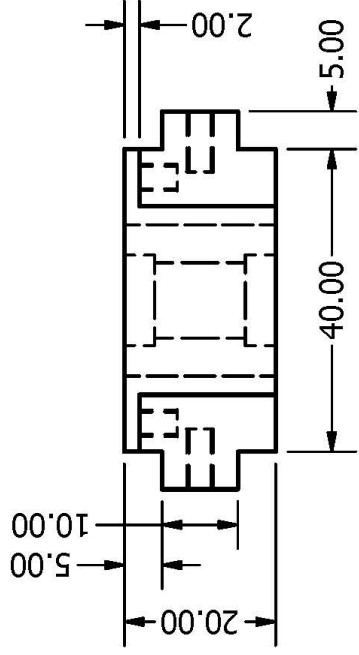
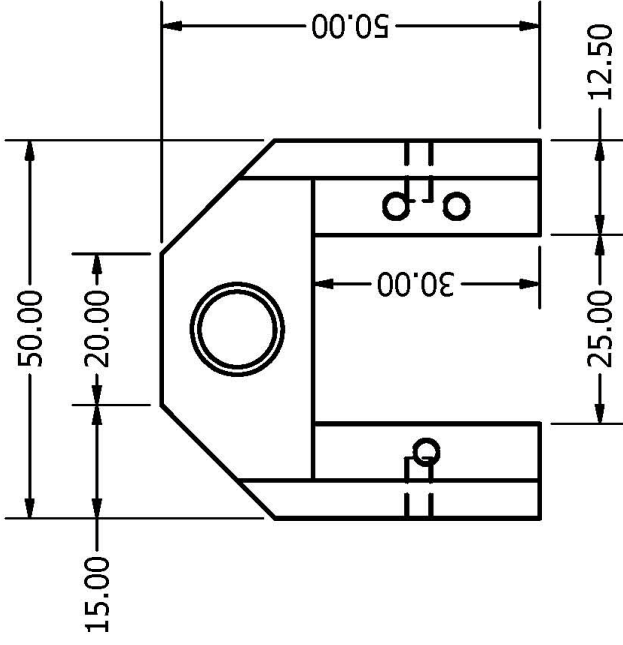
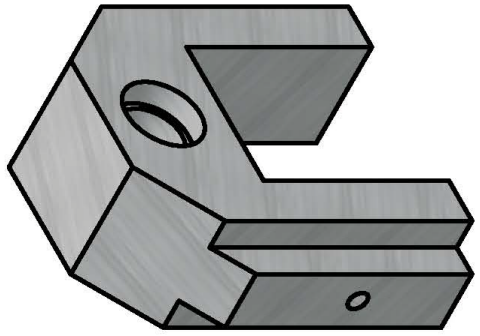
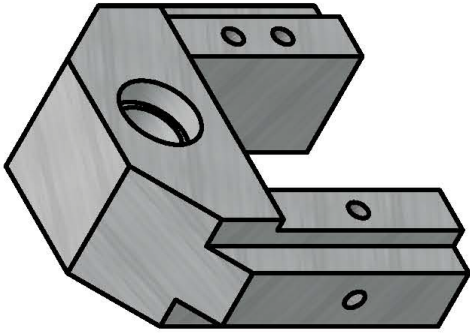
Material
Chapa Al. 2mm

Escala
1:1

Página
1/1

Unidade
mm





Autor
Douglas W. Bertol

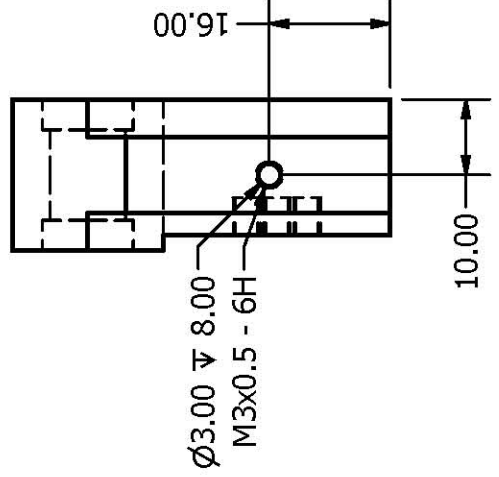
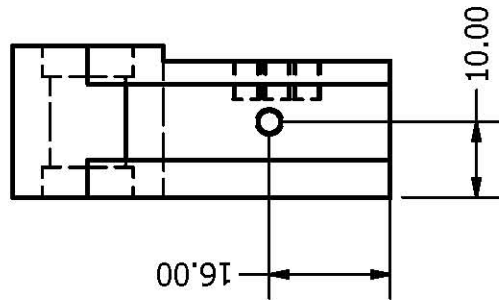
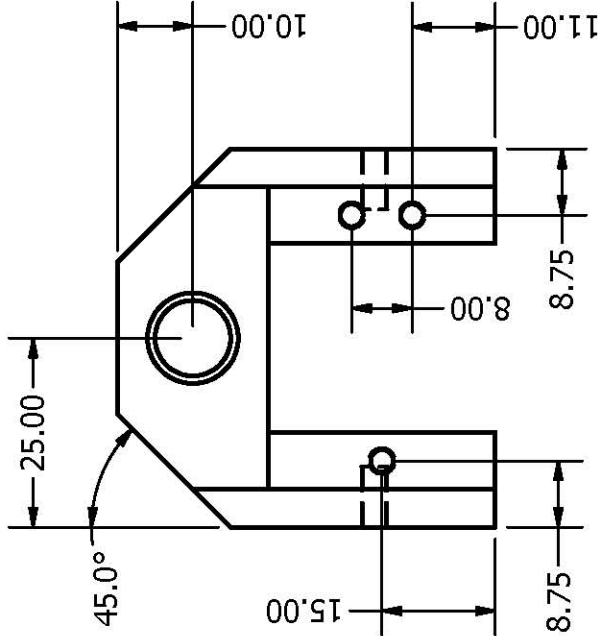
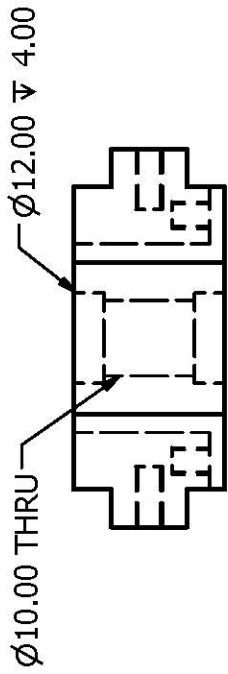
Título
Support

Material
Alumínio

Escala
1:1

Página
1/2

Unidade
mm



Autor
Douglas W. Bertol

Título
Support

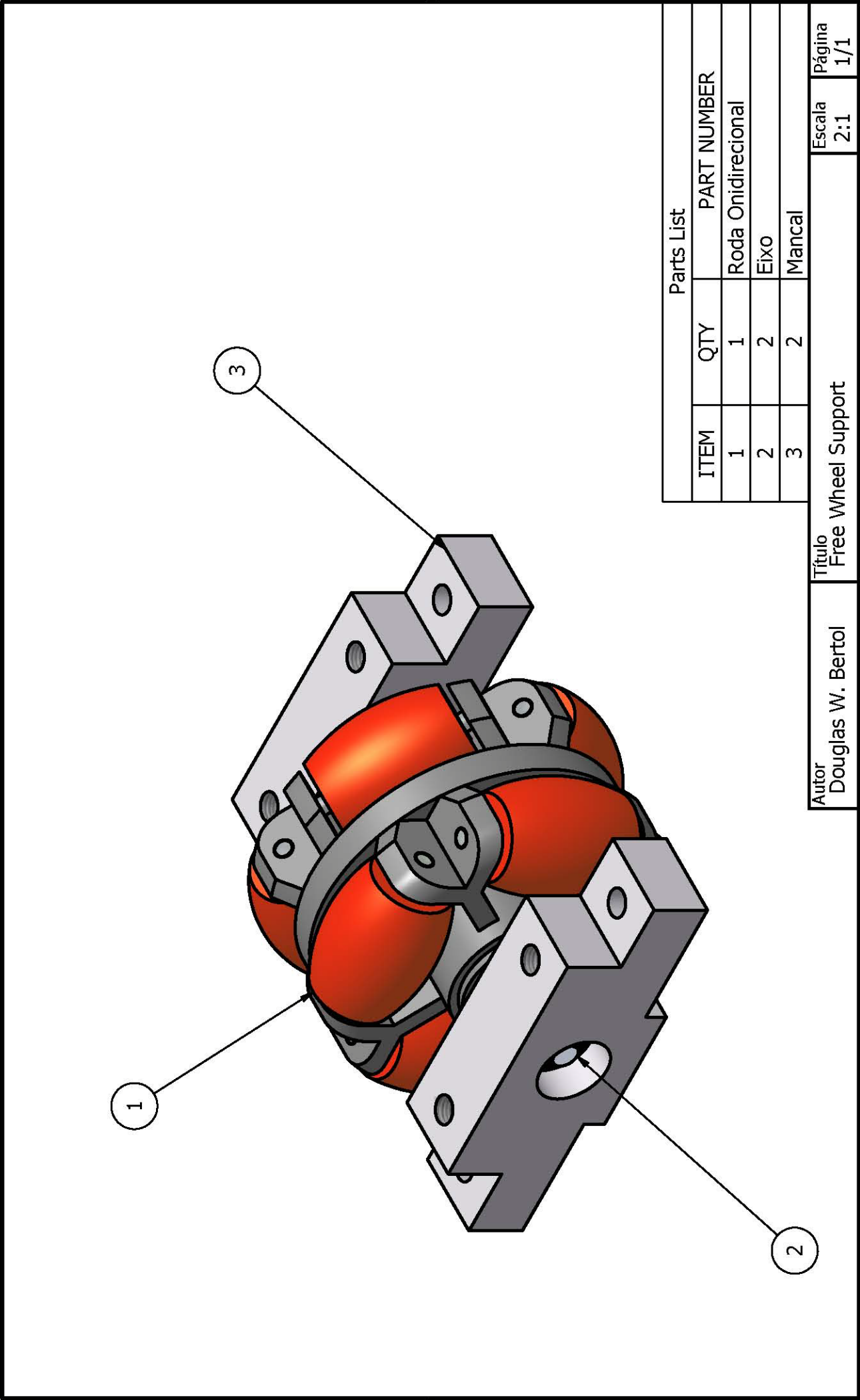
Material
Aluminio

Escala
1:1

Página
2/2

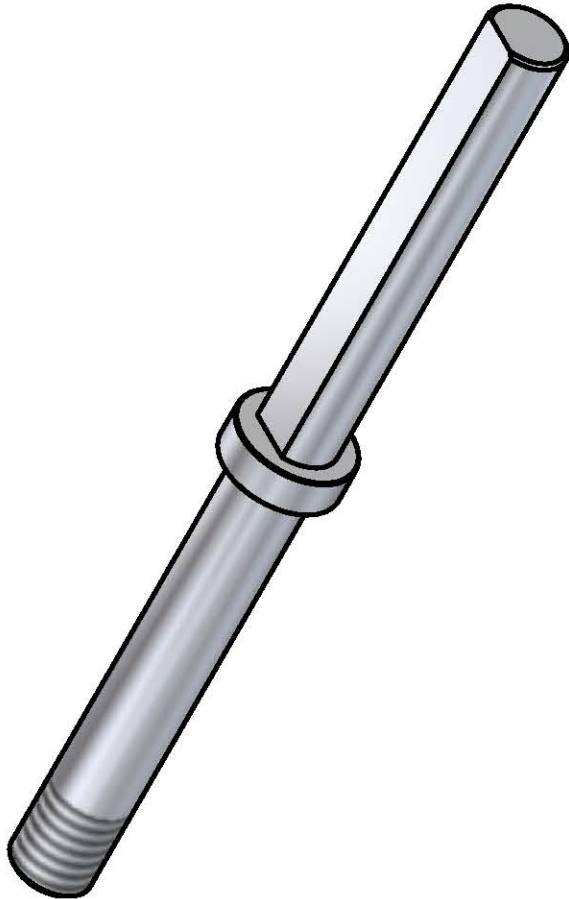
Unidade
mm



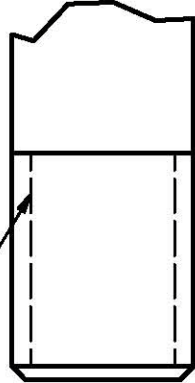


Parts List	
ITEM	QTY
1	1
2	2
3	2

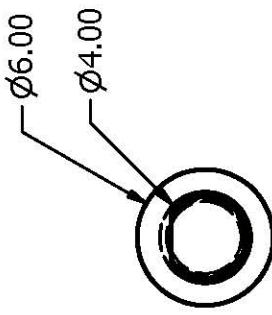
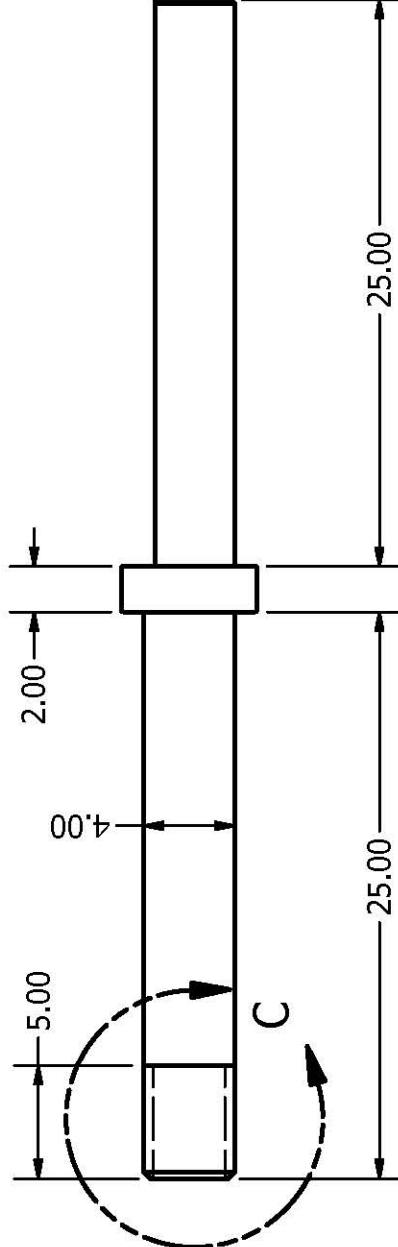
Autor Douglas W. Bertol		Titulo Free Wheel Support		Escala 2:1		Página 1/1	
----------------------------	--	------------------------------	--	---------------	--	---------------	--



M4x0.7 - 6g

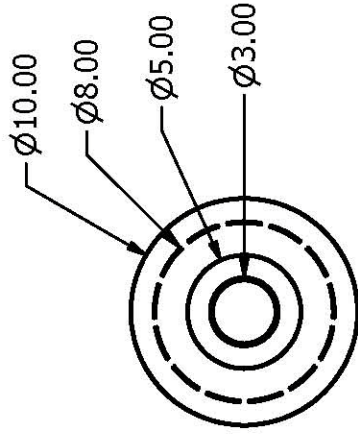
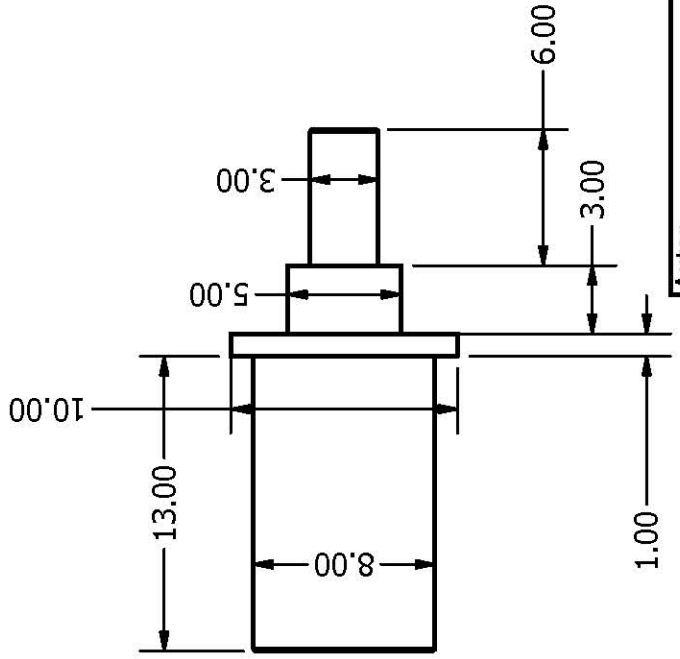


DETAIL C
SCALE 6 : 1



Autor Douglas W. Bertol	Título Axle	Material Inox	Escala 3:1	Página 1/1	Unidade mm
----------------------------	----------------	------------------	---------------	---------------	---------------





Autor
Douglas W. Bertol

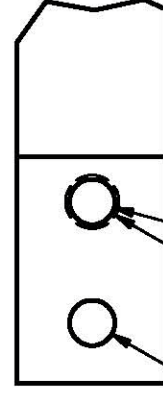
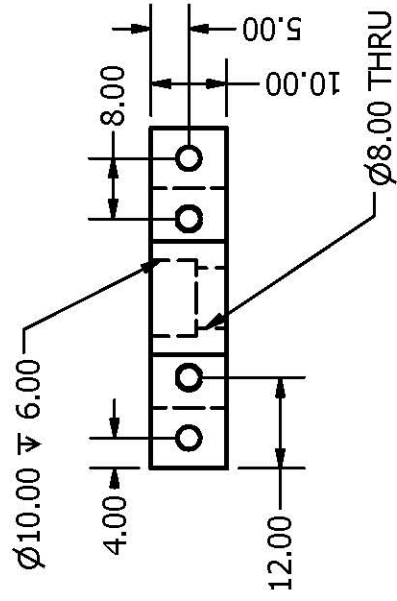
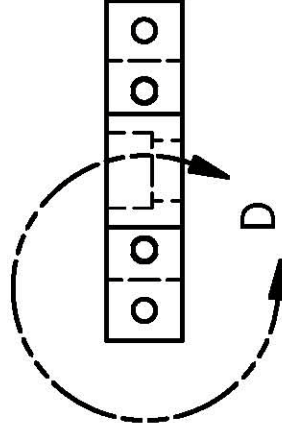
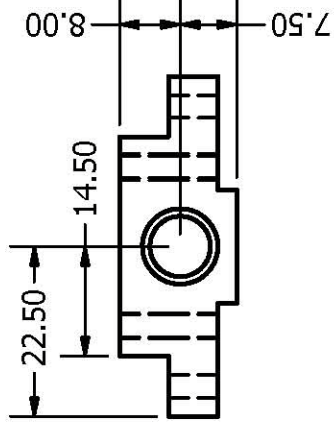
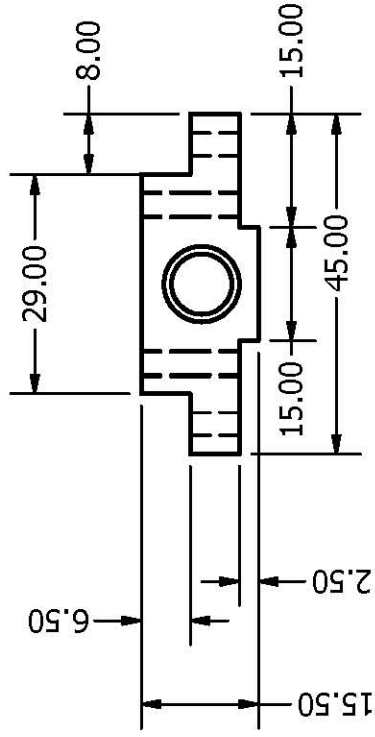
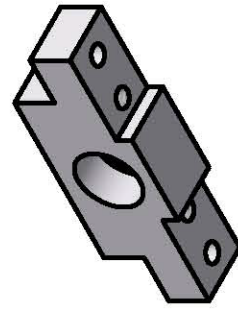
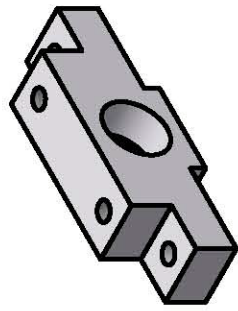
Título
Free Wheel Axle

Material
Inox

Escala
3:1

Página
1/1

Unidade
mm



Ø3.00 THRU
M3x0.5 - 6H
Ø3.00 THRU

DETAIL D
SCALE 2 : 1

Autor
Douglas W. Bertol

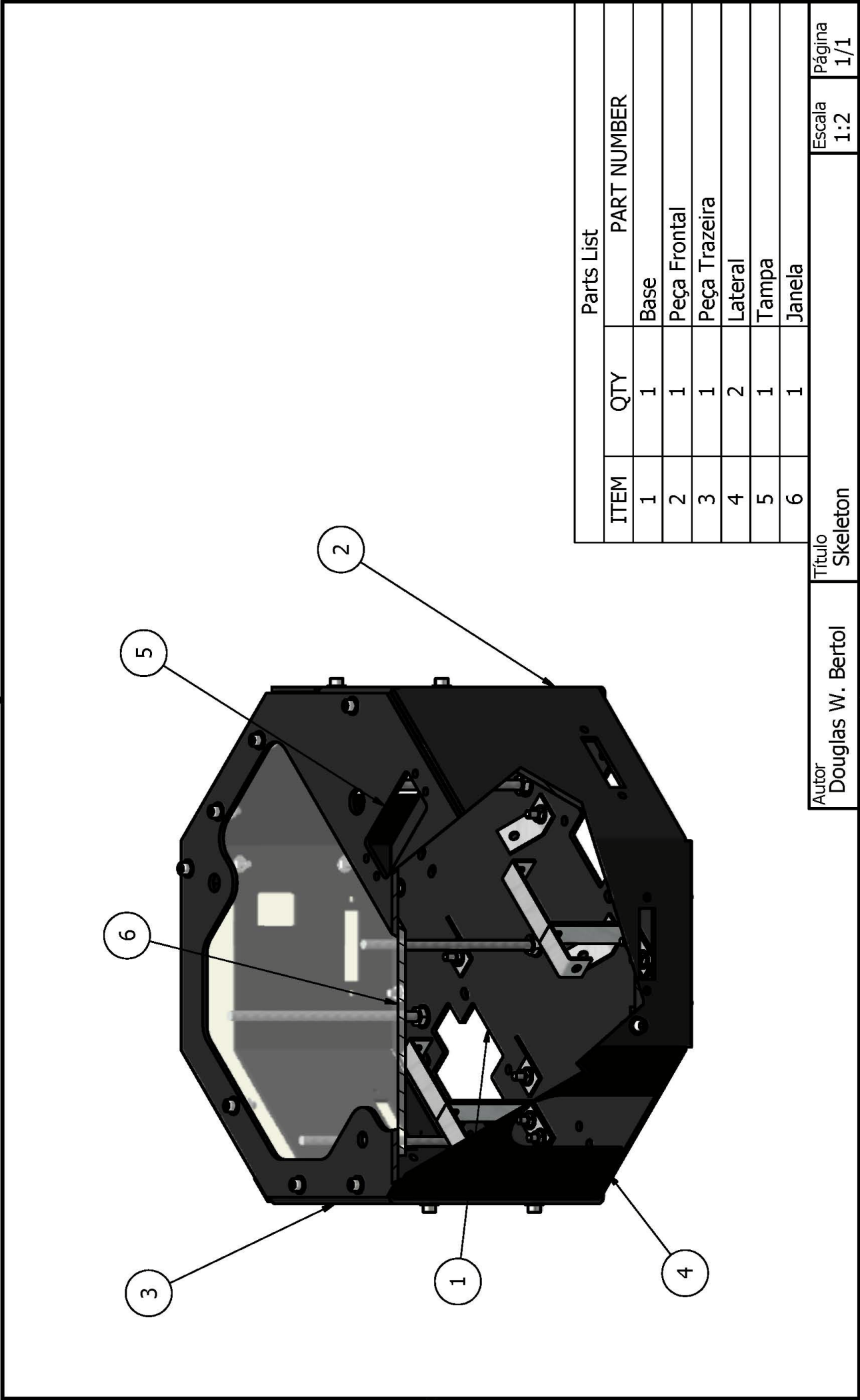
Título
Free Wheel Support

Material
Aluminio

Escala
1:1

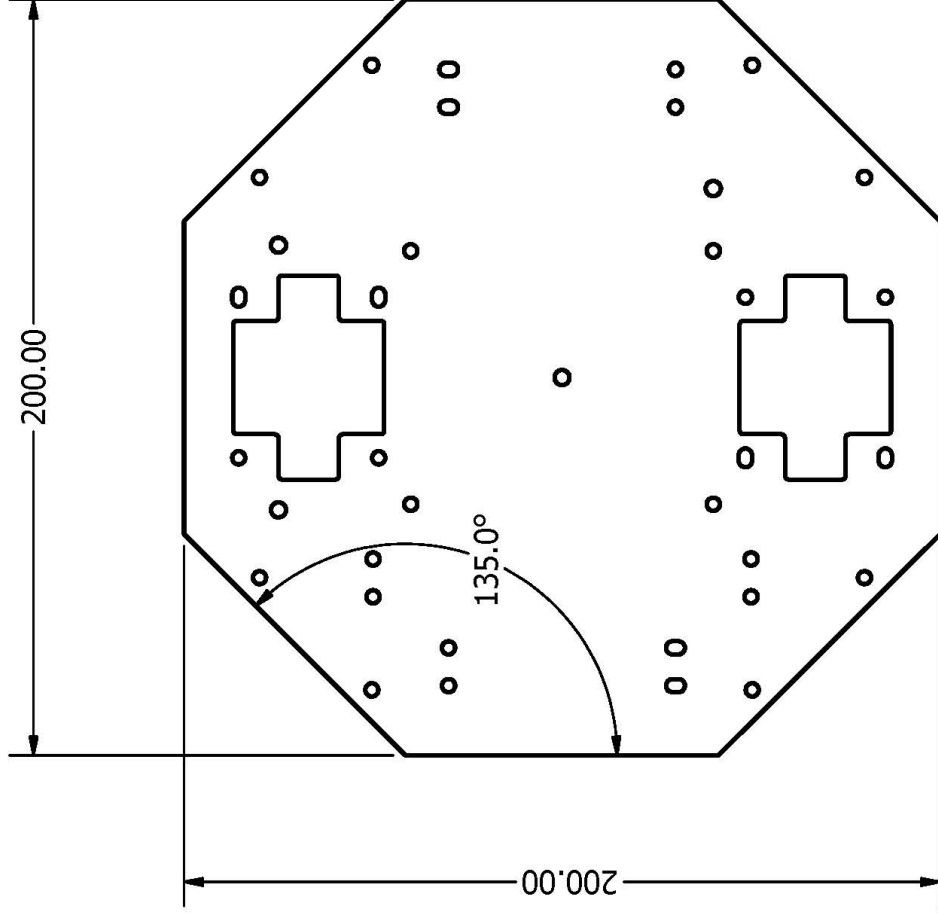
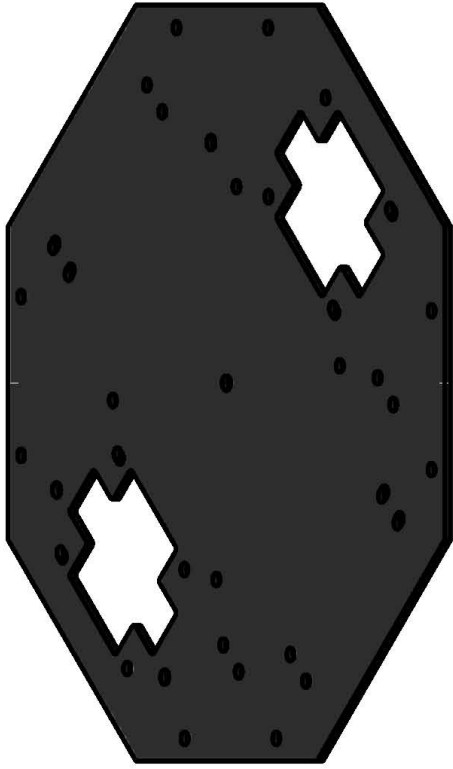
Página
1/1

Unidade
mm



Parts List		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	Base
2	1	Peça Frontal
3	1	Peça Trazeira
4	2	Lateral
5	1	Tampa
6	1	Janela

Autor Douglas W. Bertol	Título Skeleton	Escala 1:2	Página 1/1
----------------------------	--------------------	---------------	---------------



Autor
Douglas W. Bertol

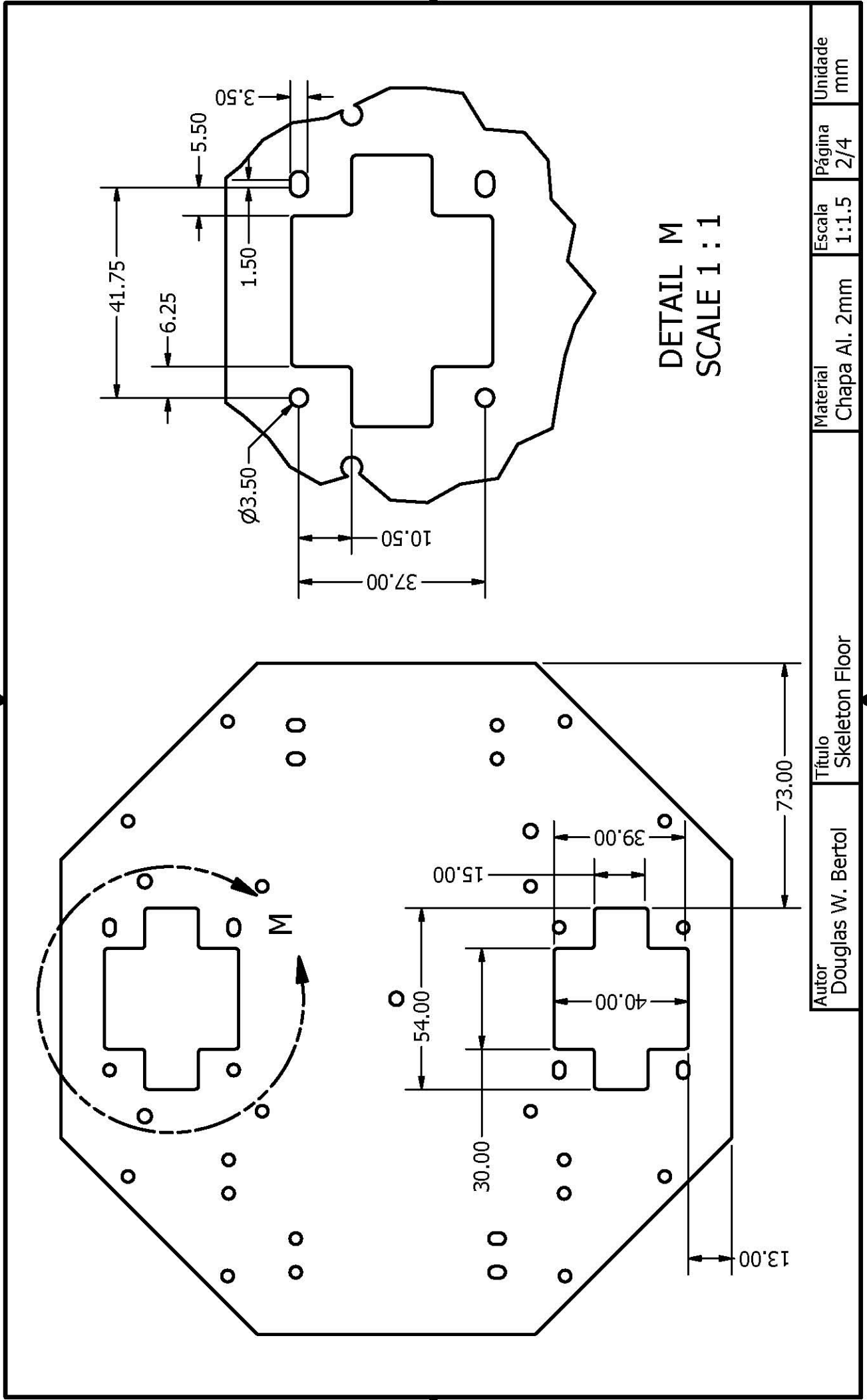
Título
Skeleton Floor

Material
Chapa Al. 2mm

Escala
1:2

Página
1/4

Unidade
mm



DETAIL M
SCALE 1 : 1

Autor
Douglas W. Bertol

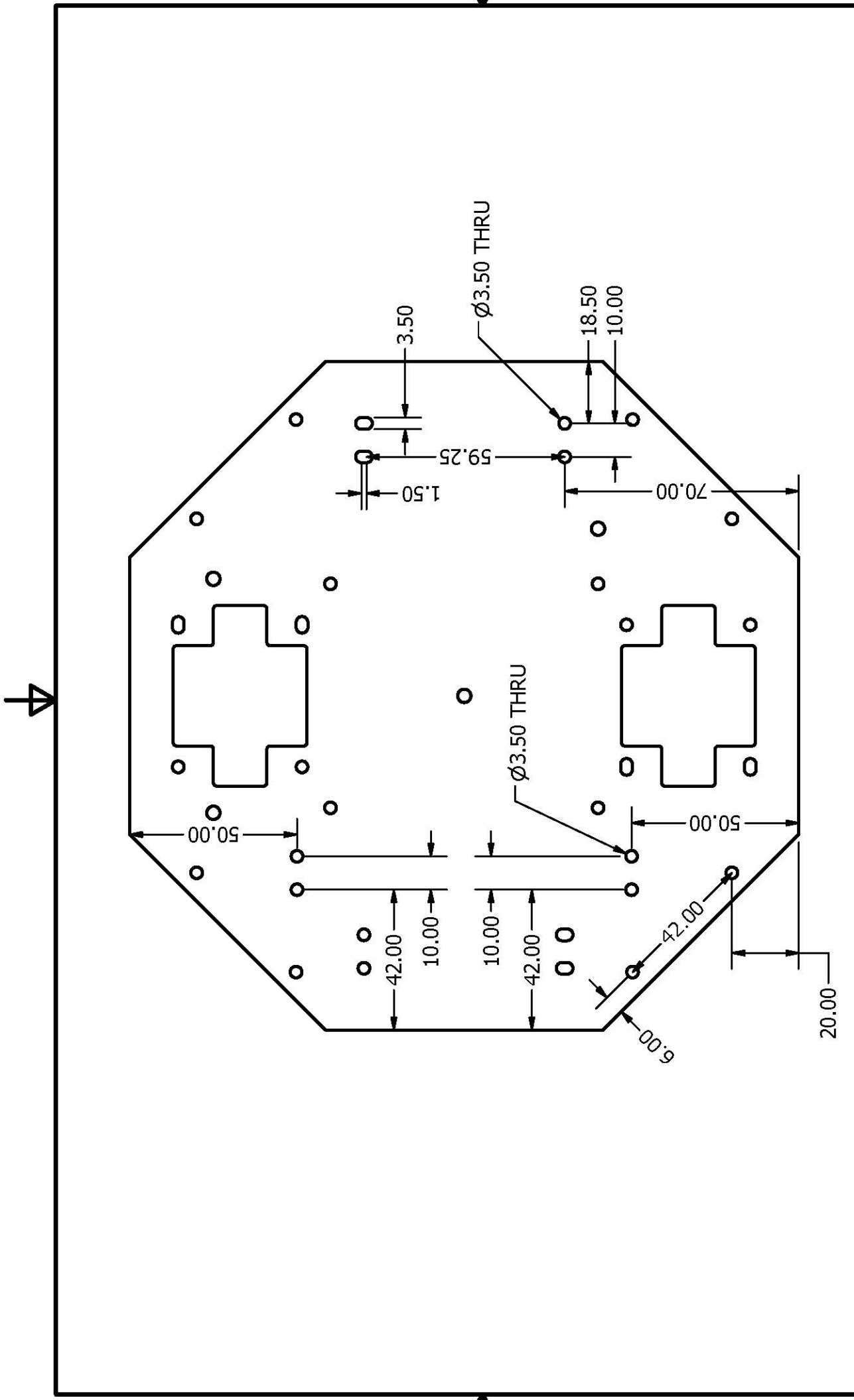
Título
Skeleton Floor

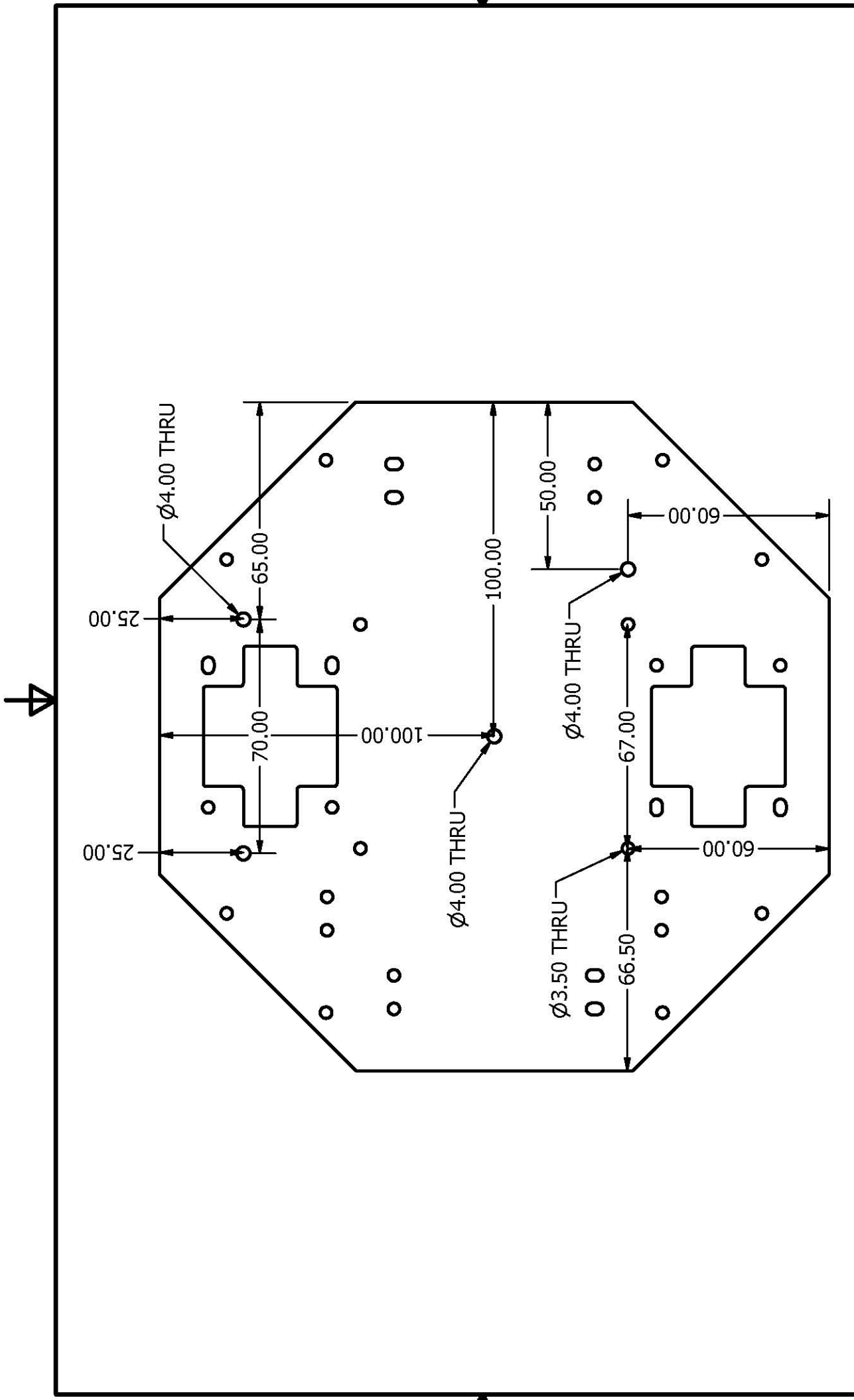
Material
Chapa Al. 2mm

Escala
1:1.5

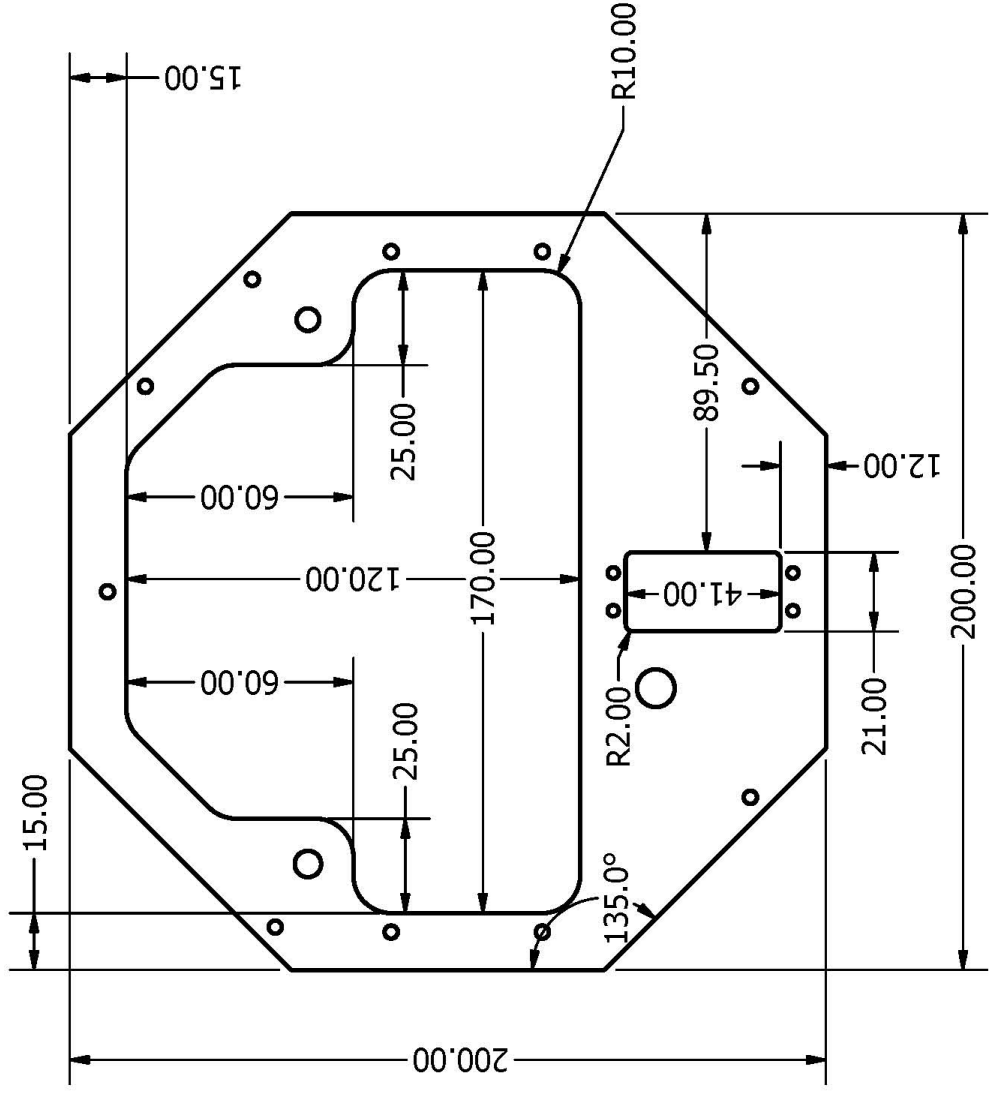
Página
2/4

Unidade
mm





Autor Douglas W. Bertol	Título Skeleton Floor	Material Chapa Al. 2mm	Escala 1:1.5	Página 4/4	Unidade mm
----------------------------	--------------------------	---------------------------	-----------------	---------------	---------------



Autor
Douglas W. Bertol

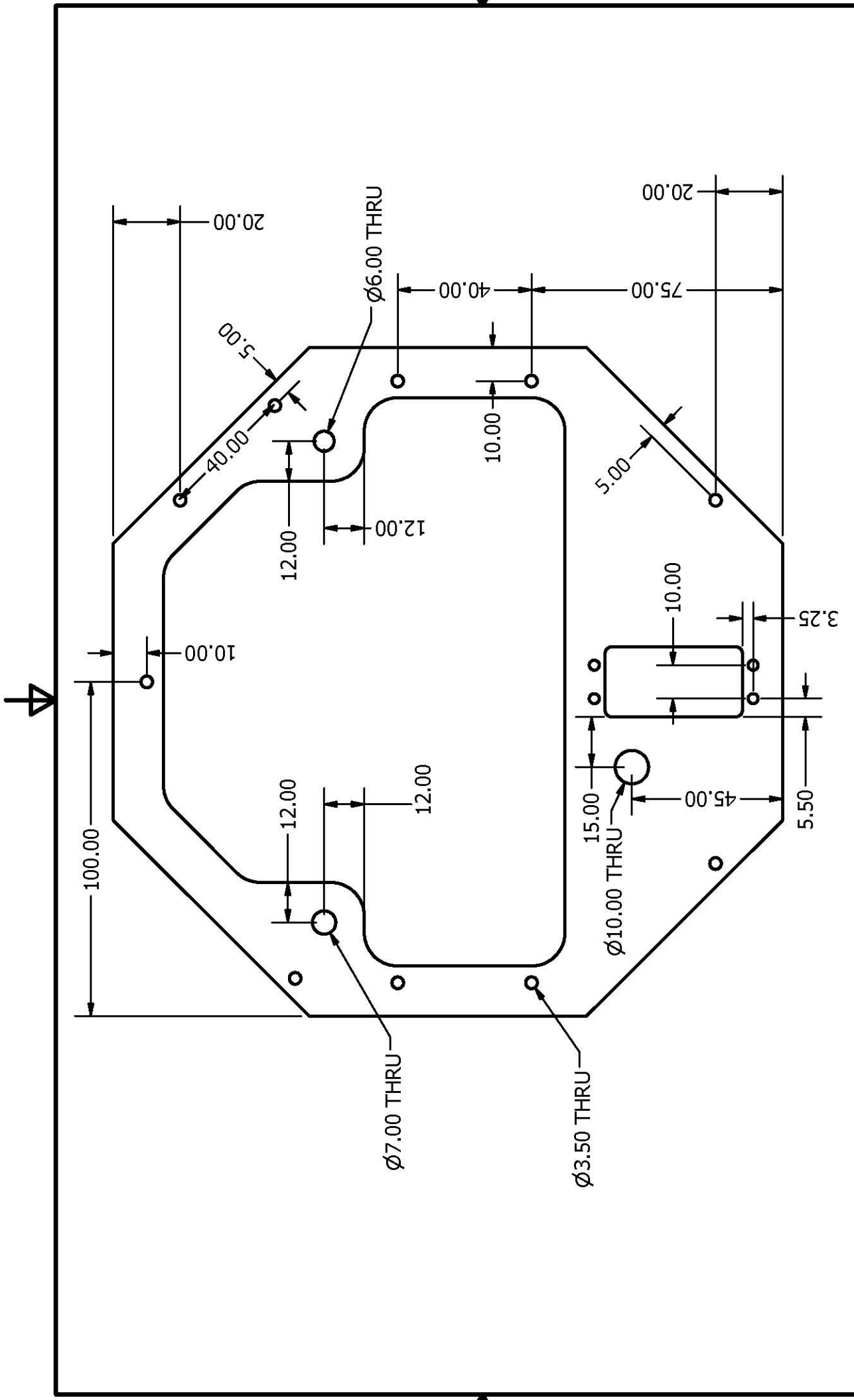
Título
Cover

Material
Chapa Al. 2mm

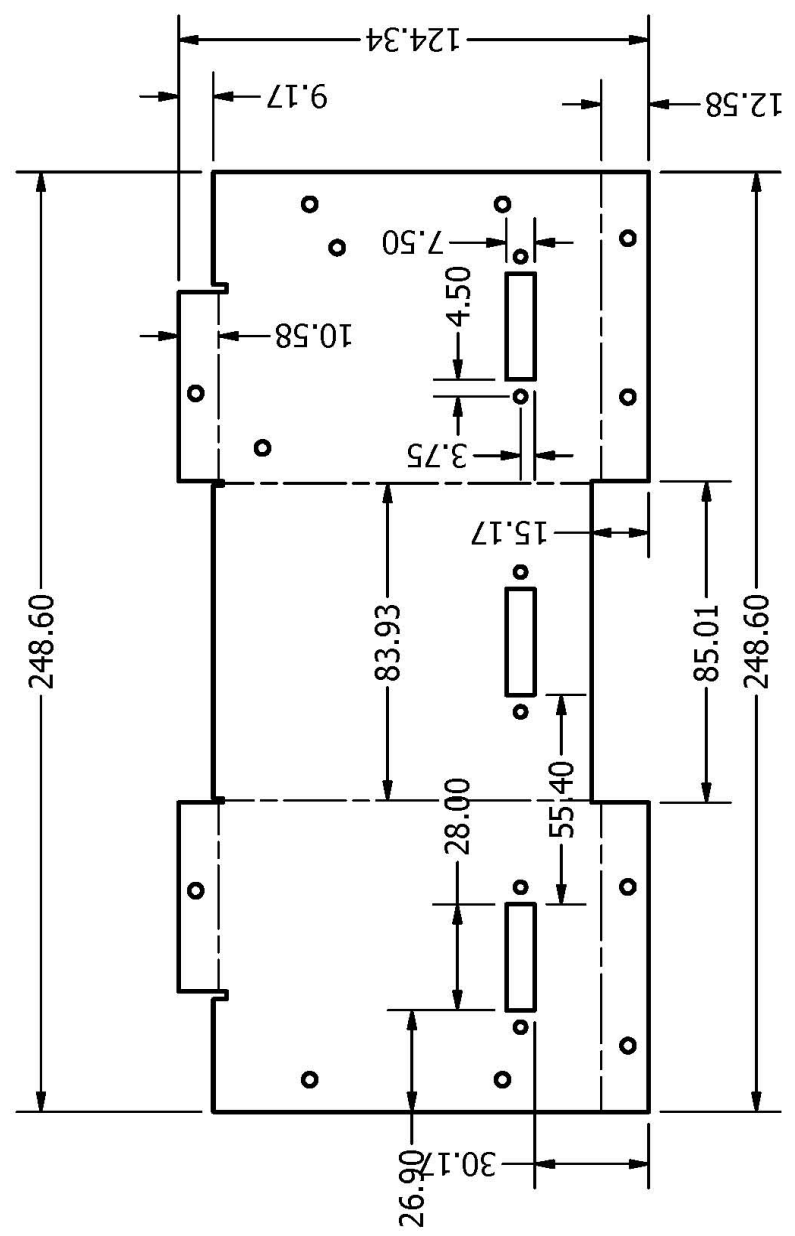
Escala
1:2

Página
1/2

Unidade
mm



Autor Douglas W. Bertol	Título Cover	Material Chapa Al. 2mm	Escala 1:1.5	Página 2/2	Unidade mm
----------------------------	-----------------	---------------------------	-----------------	---------------	---------------



Autor
Douglas W. Bertol

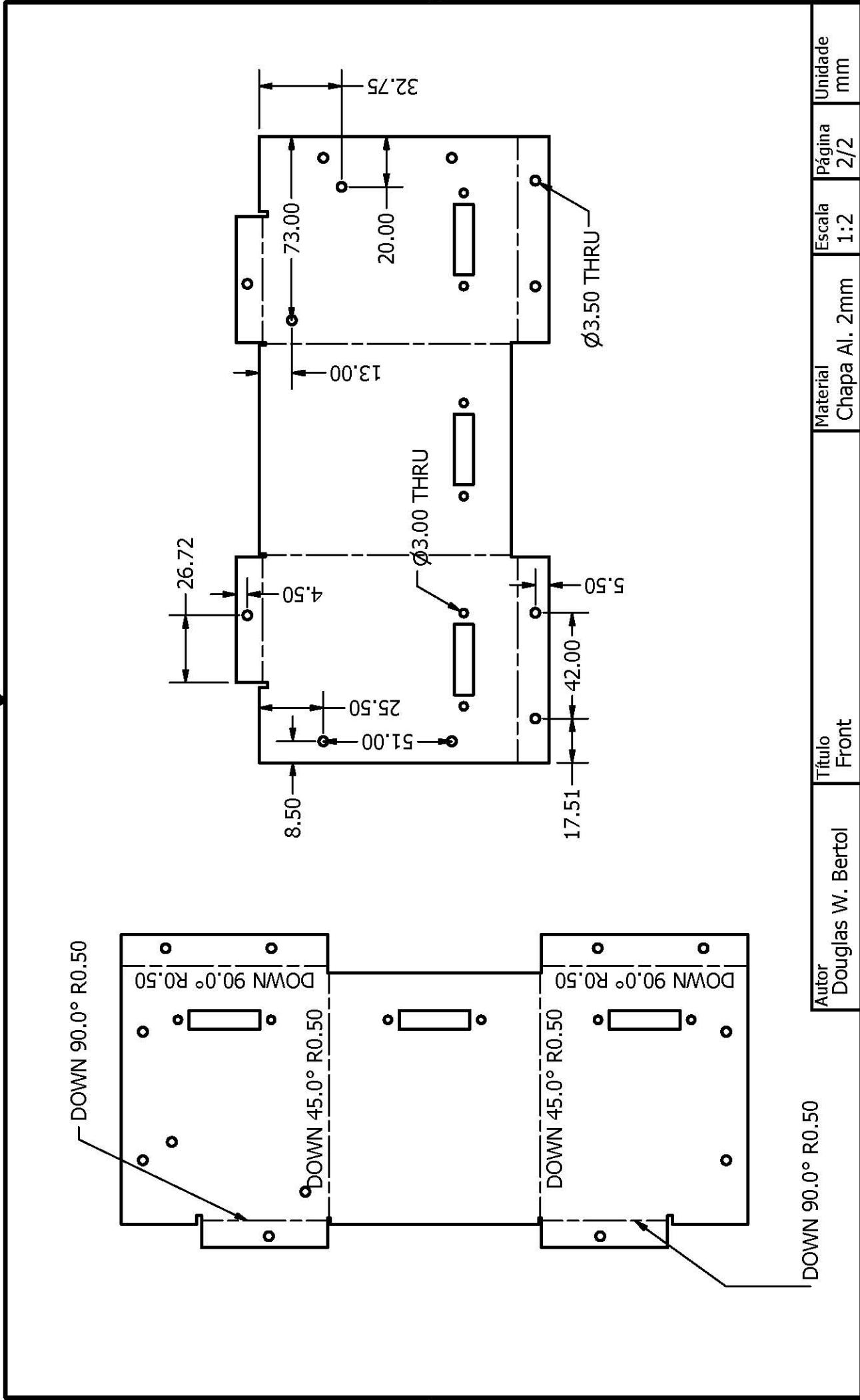
Título
Front

Material
Chapa Al. 2mm

Escala
1:2

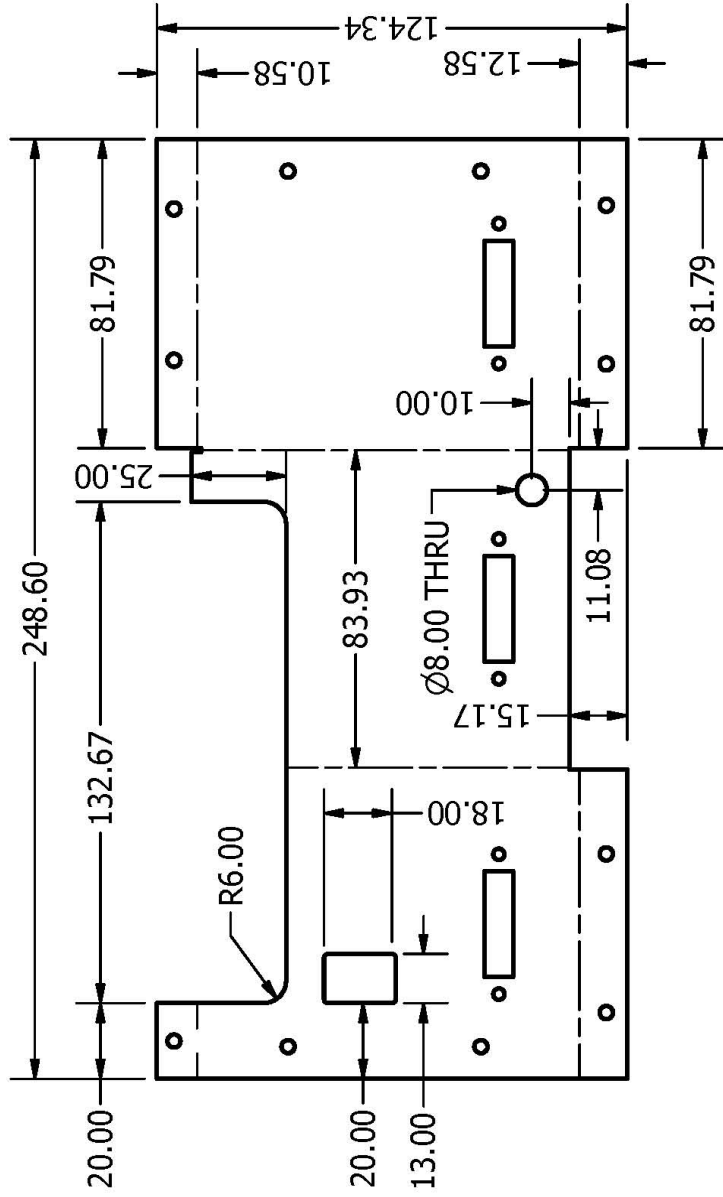
Página
1/2

Unidade
mm



Autor Douglas W. Bertol	Título Front	Material Chapa Al. 2mm	Escala 1:2	Página 2/2	Unidade mm
----------------------------	-----------------	---------------------------	---------------	---------------	---------------





Autor
Douglas W. Bertol

Título
Rear

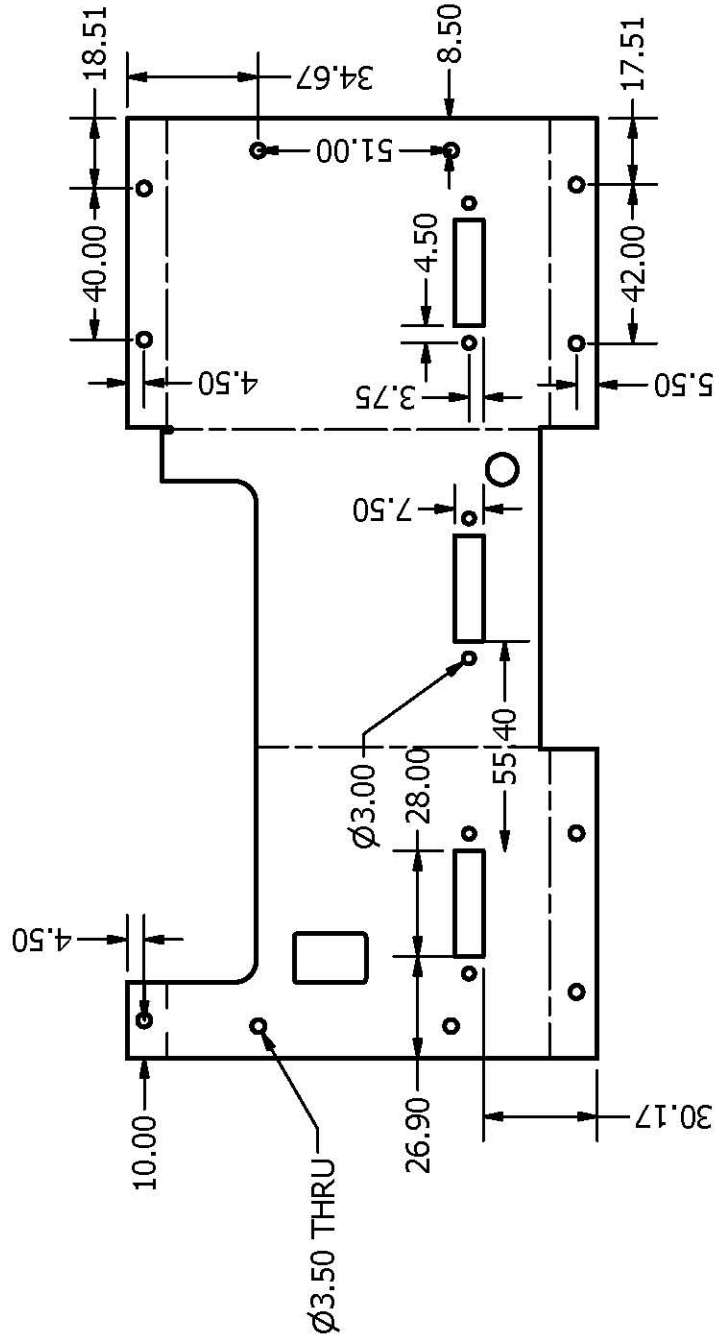
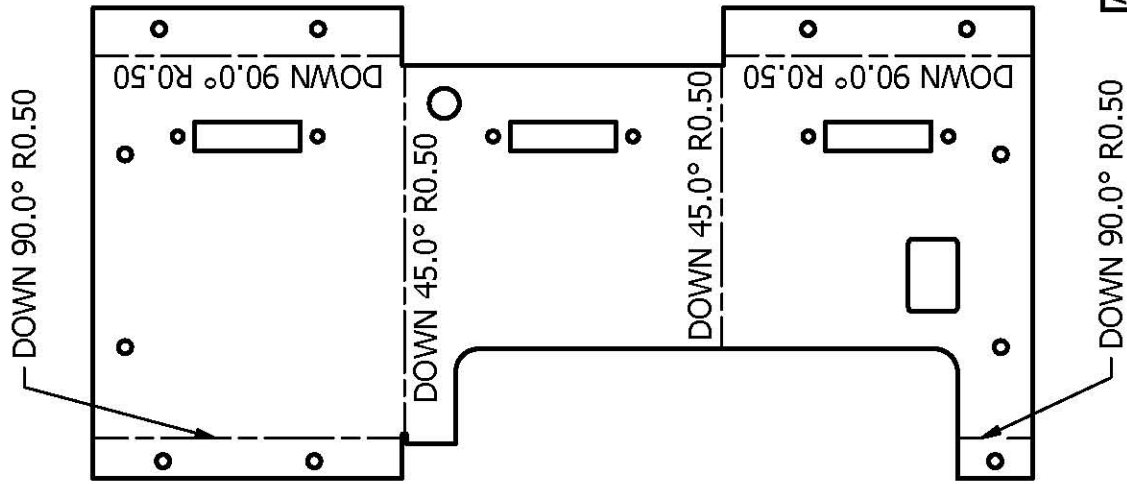
Material
Chapa Al. 2mm

Escala
1:2

Página
1/2

Unidade
mm





Autor
Douglas W. Bertol

Título
Rear

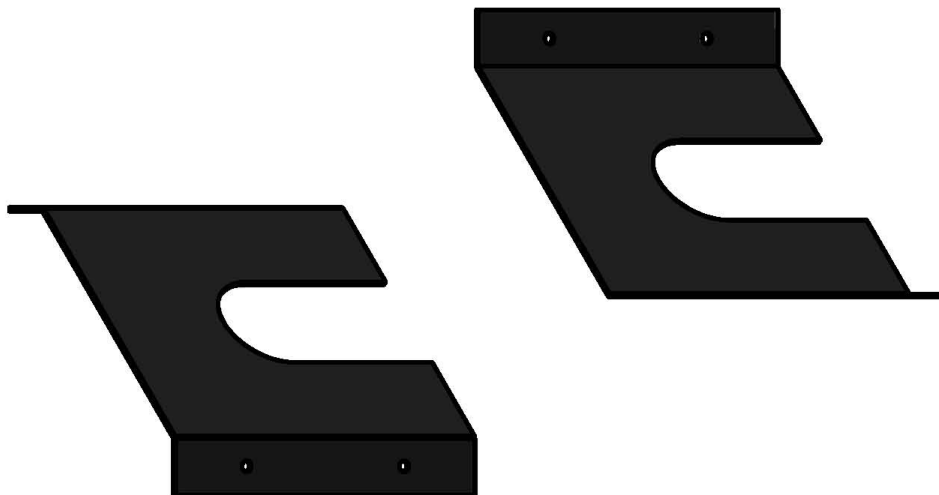
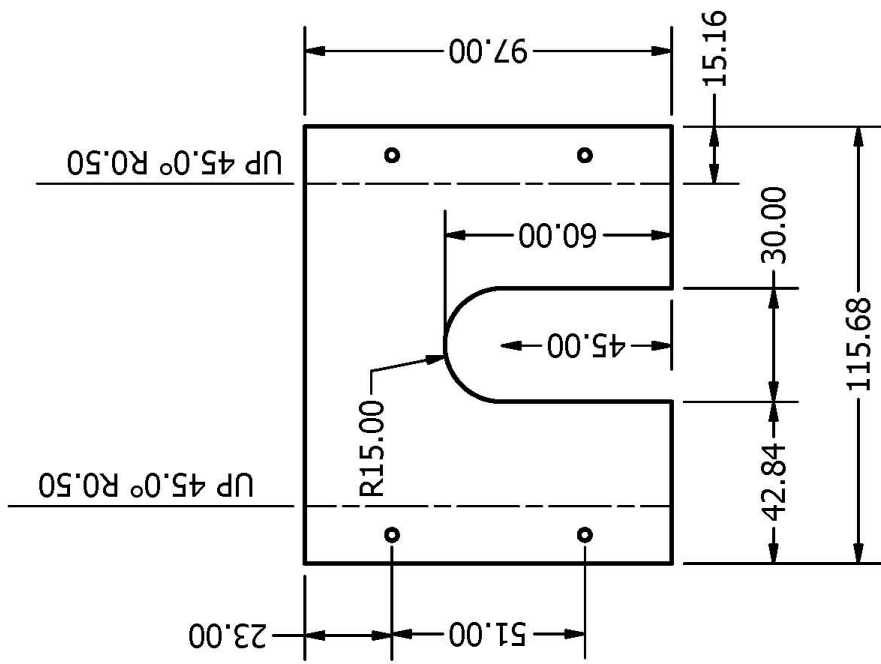
Material
Chapa Al. 2mm

Escala
1:2

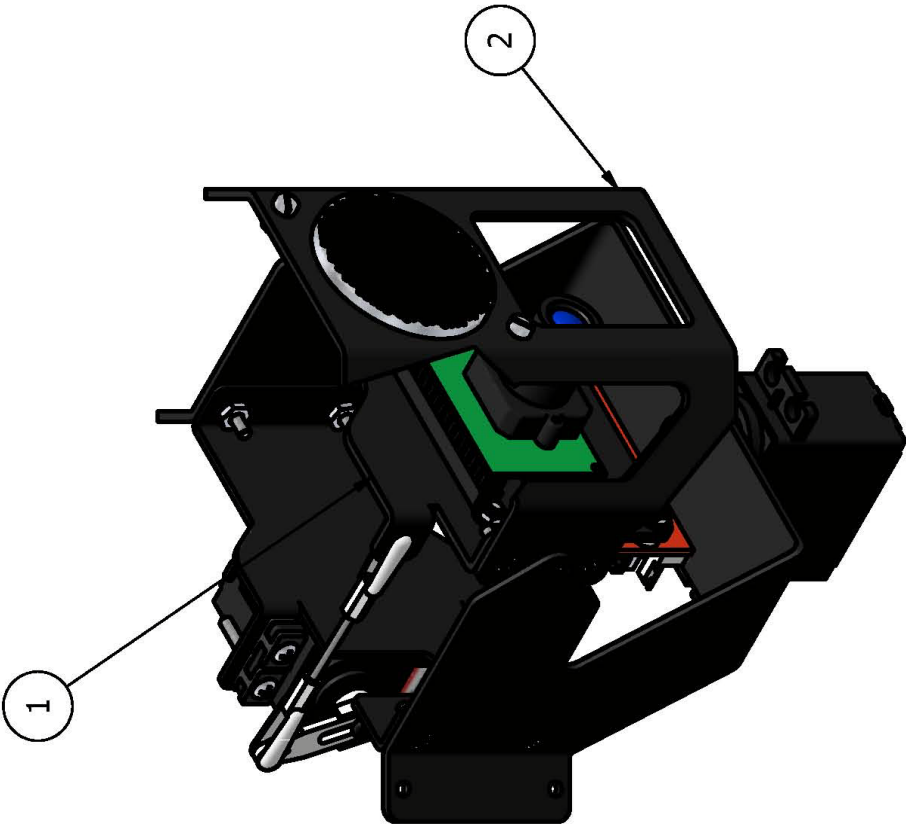
Página
2/2

Unidade
mm



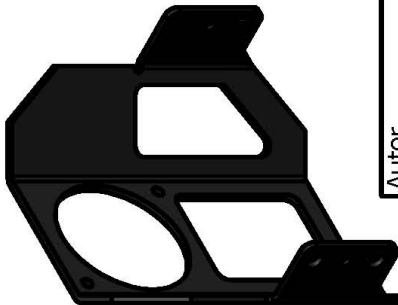
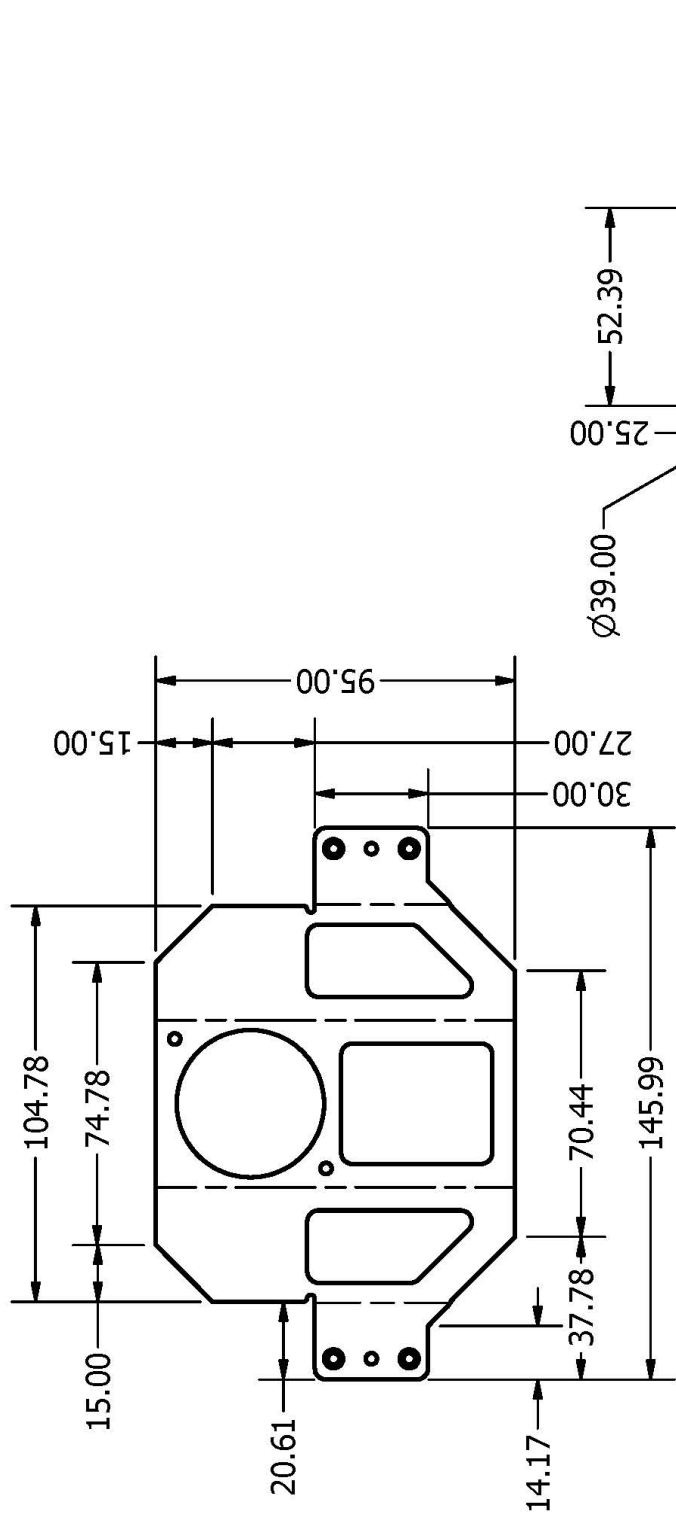


Autor Douglas W. Bertol	Título Side	Material Chapa Al. 2mm	Escala 1:2	Página 1/1	Unidade mm
----------------------------	----------------	---------------------------	---------------	---------------	---------------



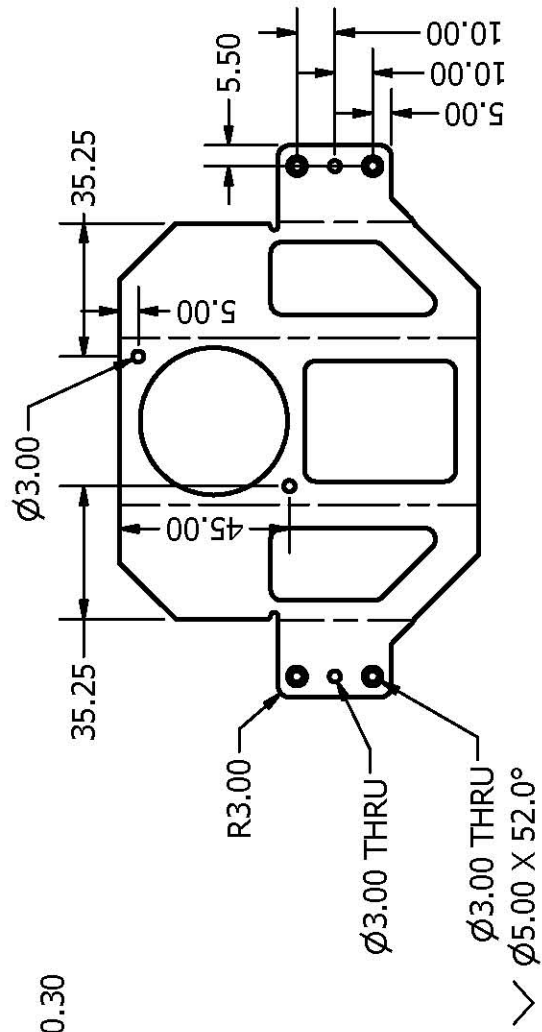
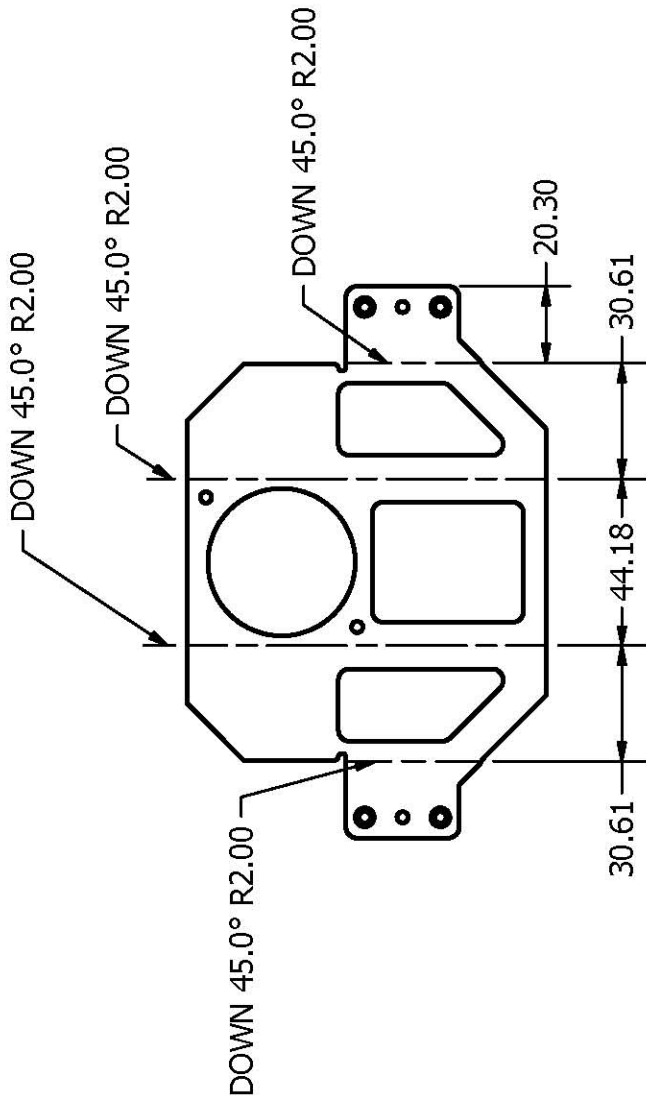
Parts List		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	back
2	1	turrent-front

Autor	Título	Escala	Página
Douglas W. Bertol	Turrent	1:1	1/1



Autor Douglas W. Bertol	Título Sensor Shell	Material Chapa Al. 2mm	Escala 1:2	Página 1/2	Unidade mm
----------------------------	------------------------	---------------------------	---------------	---------------	---------------





Autor
Douglas W. Bertol

Título
Sensor Shell

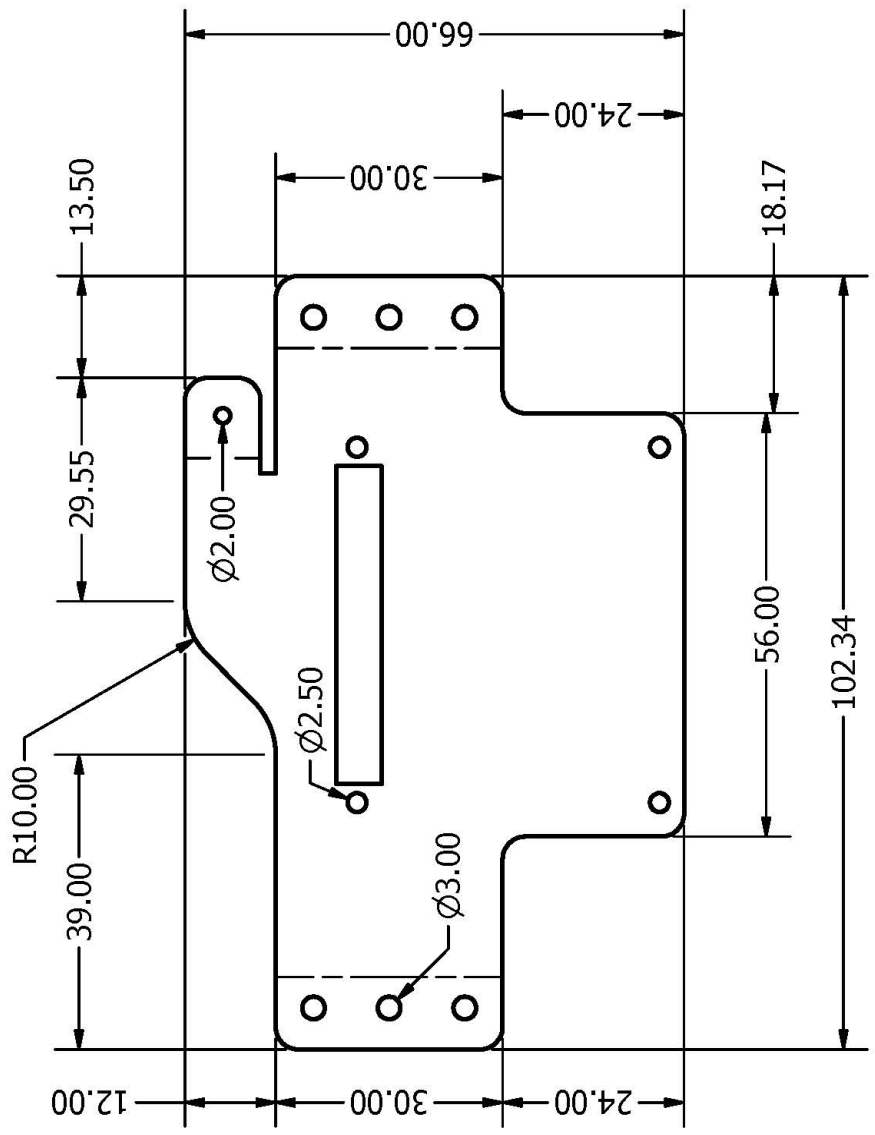
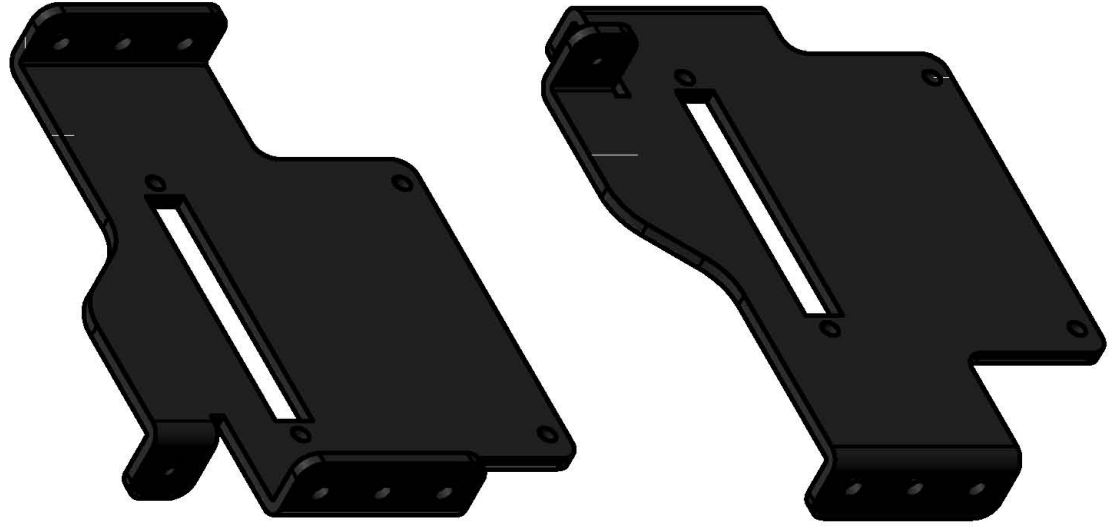
Material
Chapa Al. 2mm

Escala
1:2

Página
2/2

Unidade
mm





Autor
Douglas W. Bertol

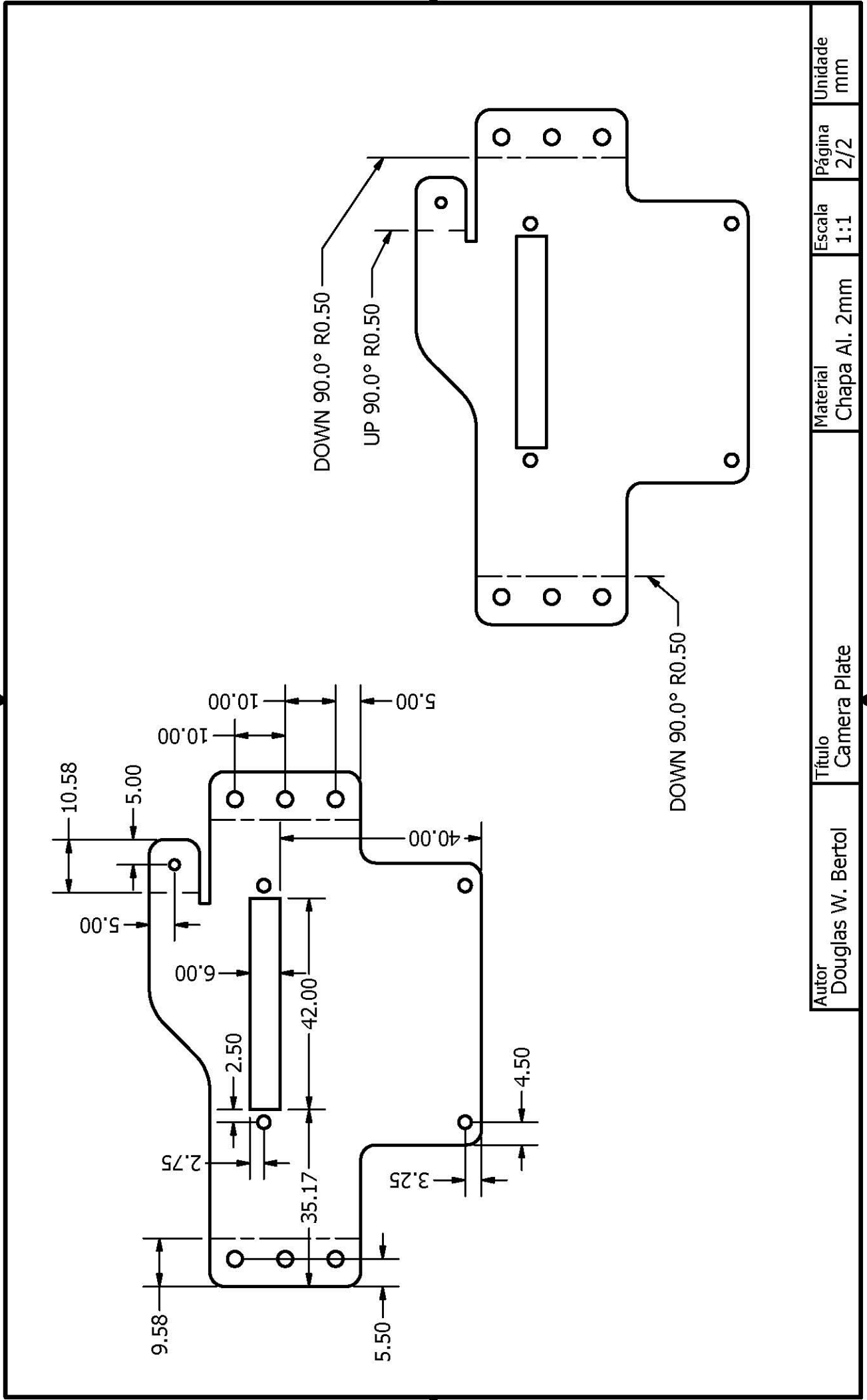
Título
Camera Plate

Material
Chapa Al. 2mm

Escala
1:1

Página
1/2

Unidade
mm



ANEXO 5 DADOS DO PROJETO ELETRÔNICO

Tabela A5.1

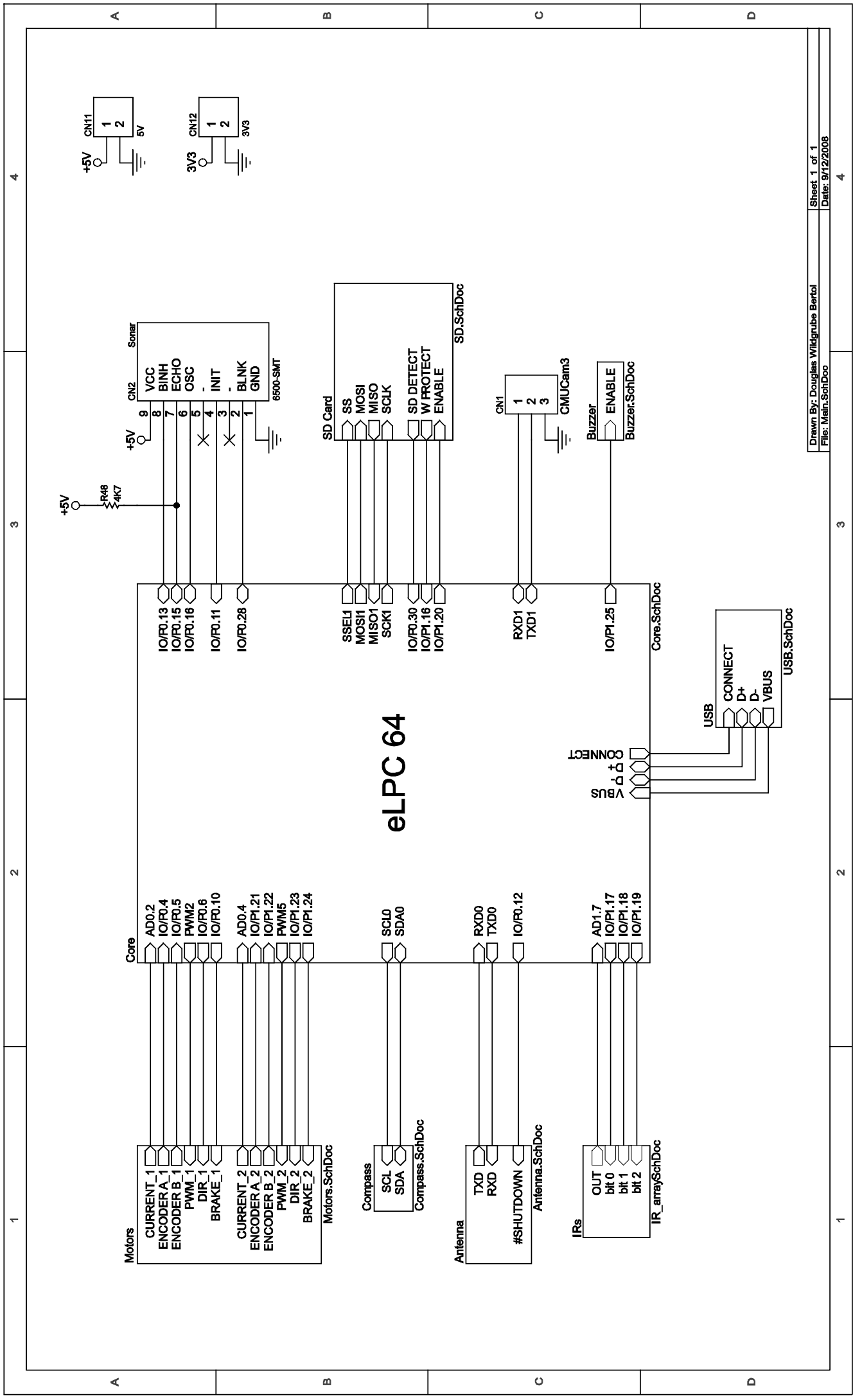
Relação de componentes eletrônicos - Parte 1/2

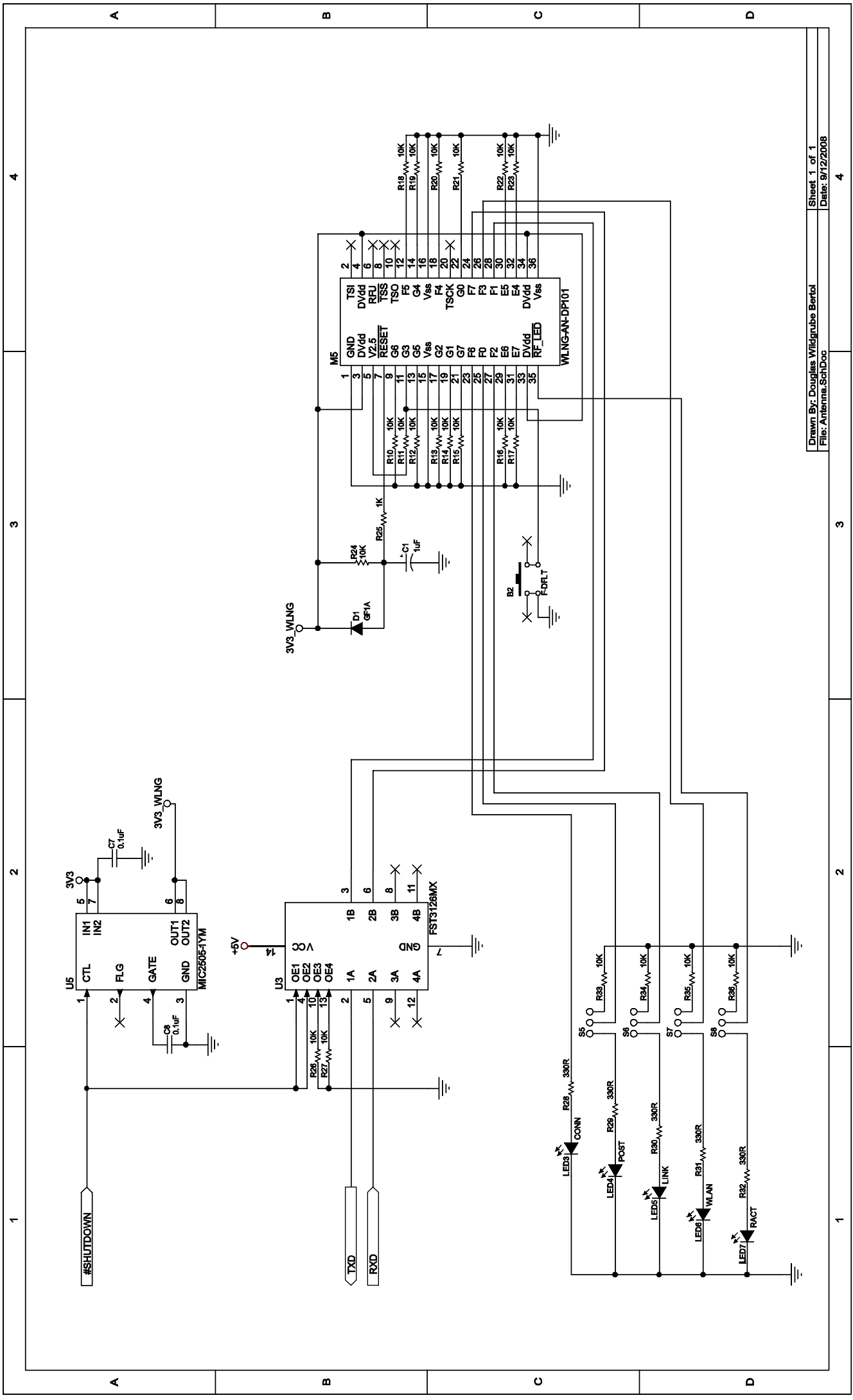
Designador	Componente	Descrição	Quantidade
B1, B2	B3W-4000S	Botão	2
BT1	THM103	Conector de bateria moeda de 20 mm	1
BZ1	EFM-250D	Piezo <i>buzzer</i>	1
C1	ECEV1HA010SR	Capacitor eletrolítico de 1 μ F	1
C2, C4, C7, C8	Cap. cerâmico SMD 1206	0,1 μ F	4
C5	Cap. cerâmico SMD 1206	1 nF	1
C6	Cap. cerâmico SMD 1206	10 nF	1
CN1	JST B3P-VH	Conector	1
CN2	JST 09FE-BT-VK-N	Conector	1
CN3, CN11, CN12	JST B2P-VH	Conector	3
CN4	Barra de 20 pinos	Conector	1
CN5	SDCMF-10715W110	Conector	1
CN6	Barra de 4 pinos	Conector	1
CN7, CN8	61729-0010BLF	Conector	2
CN9, CN10	Barra de 2x5 pinos	Conector	2
D1	GF1A	Diodo	1
LED1, LED2, LED3, LED4, LED5, LED6, LED7, LED8, LED9	HSMG-C170	LED SMD	9
M4	Barra de 9 pinos	Conector	1
M5	DF12-36DP-0.5 V(80)	Conector	1
MIC1	Barra de 2x30 pinos	Conector	1
Q1	BSH203	MOSFET-P	1
R1, R2, R3, R25, R43	Resistor SMD 1206	1K	5
R4, R5, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21, R22, R23, R24, R26, R27, R33, R34, R35, R36, R37, R38, R39, R40, R41, R44, R47	Resistor SMD 1206	10K	30
R42	Resistor SMD 1206	150K	1
R45, R46	Resistor SMD 1206	33R	2
R48	Resistor SMD 1206	4K7	1
R49	Resistor SMD 1206	1K5	1
R6, R7, R8, R9, R28, R29, R30, R31, R32	Resistor SMD 1206	330R	9
S1, S2, S3, S4	Barra de 3 pinos	Chave seletora	4
S5, S6, S7, S8,S9	Barra de 2 pinos	Chave seletora	5

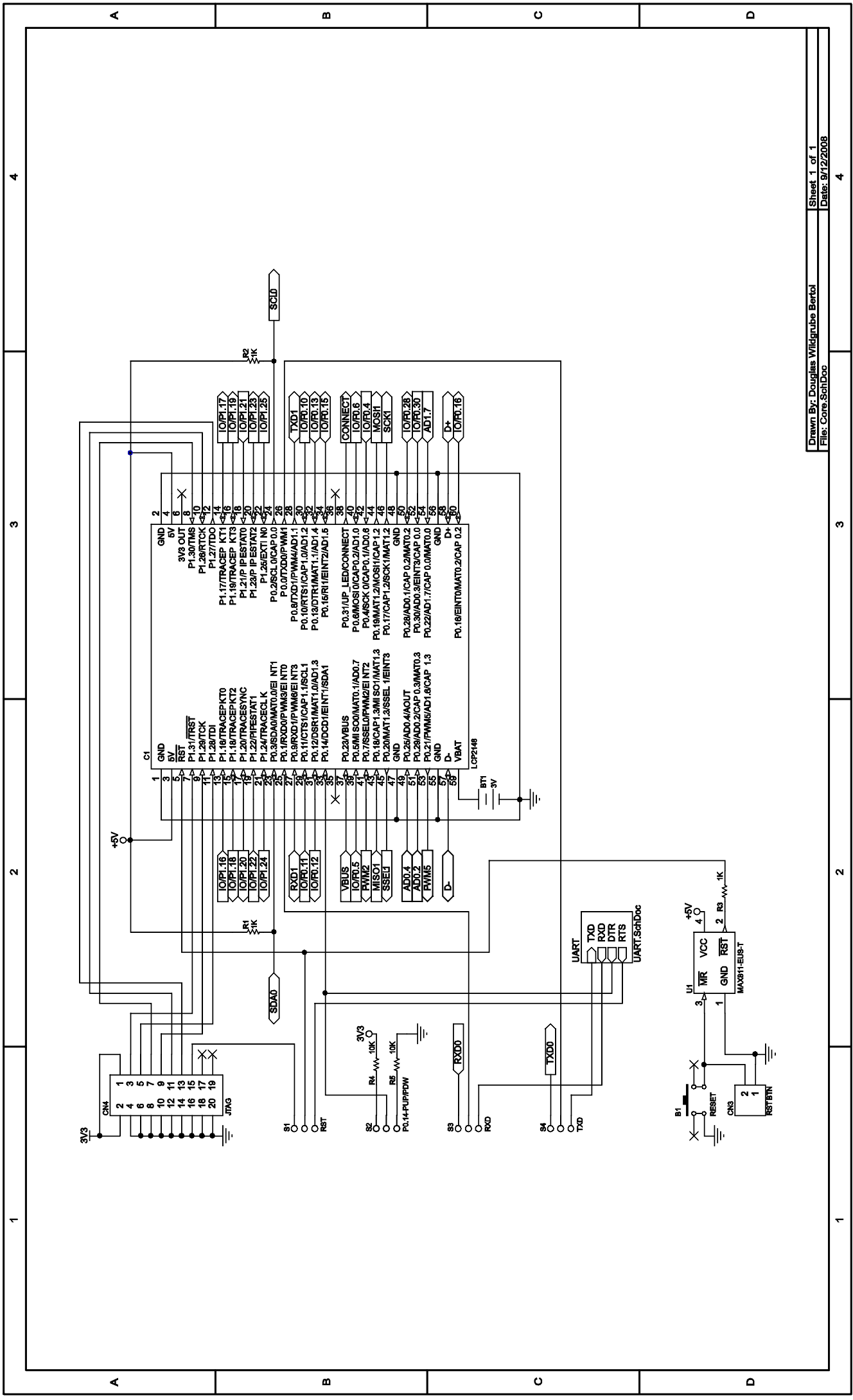
Tabela A5.2

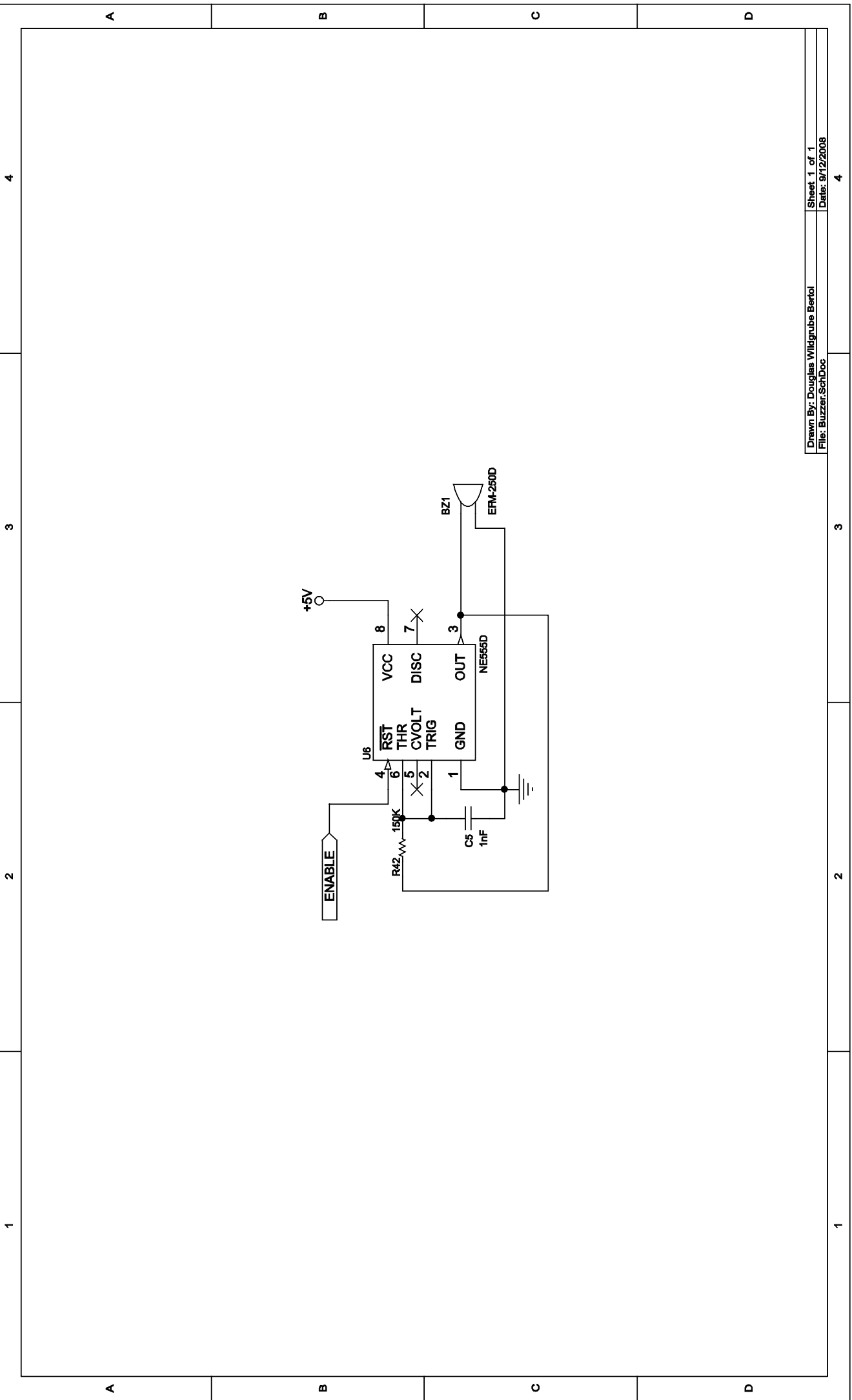
Relação de componentes eletrônicos - Parte 2/2

Designador	Componente	Descrição	Quantidade
SS1, SS2, SS3, SS4, SS5, SS6, SS7, SS8	JST S3B-PH-SM3-TB	Conector	8
U1	MAX811-EUS-T	Monitor de voltagem	1
U2	FT232RL	CI USB UART	1
U3	FST3126MX	<i>Bus Switch</i>	1
U5, U7	MIC2505-1YM	<i>High Side Switch</i>	2
U6	NE555D	<i>Timer</i>	1
U8	CD4051BCM	Multiplexador Analógico	1









4

3

2

1

A

B

C

D

A

B

C

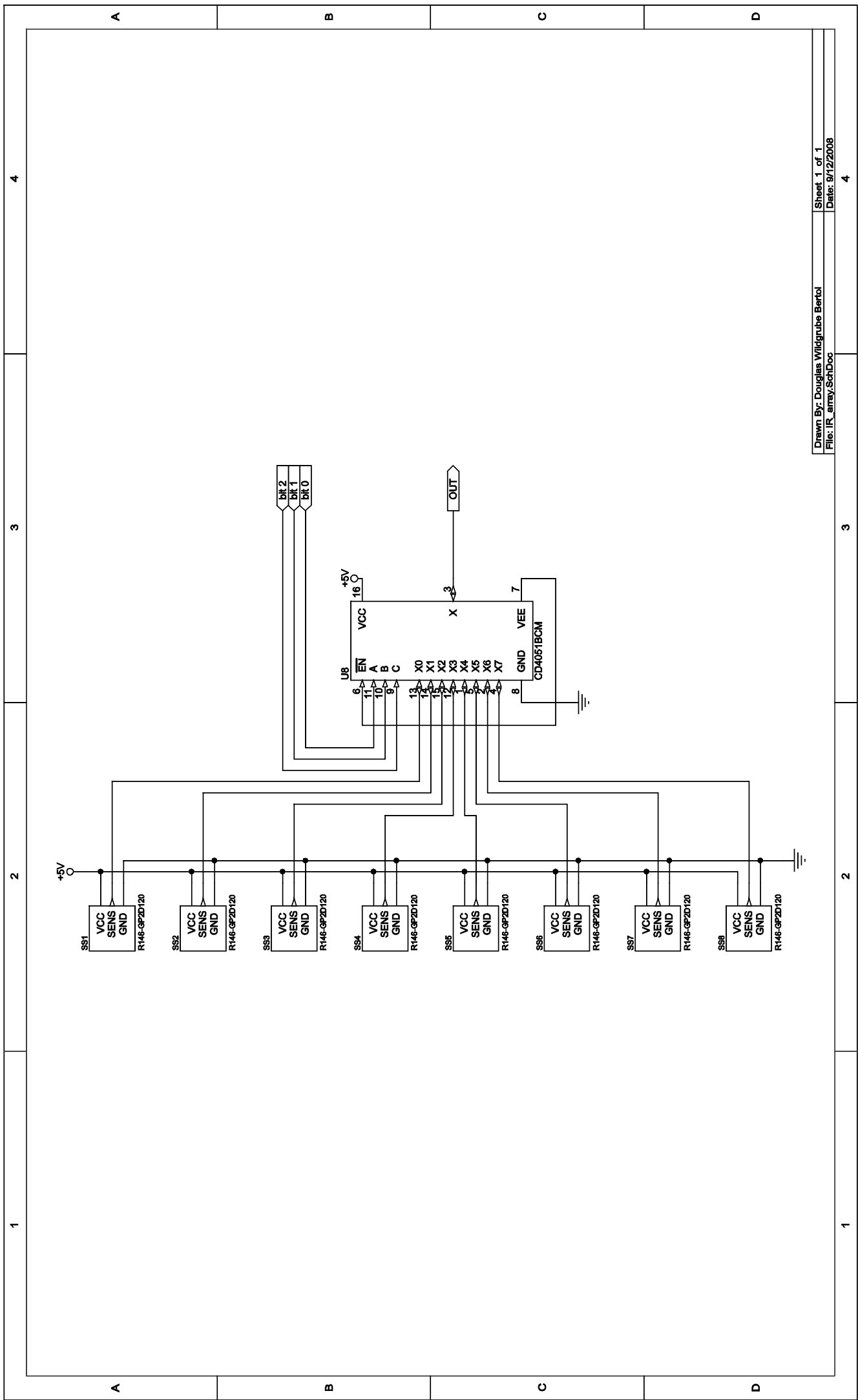
D

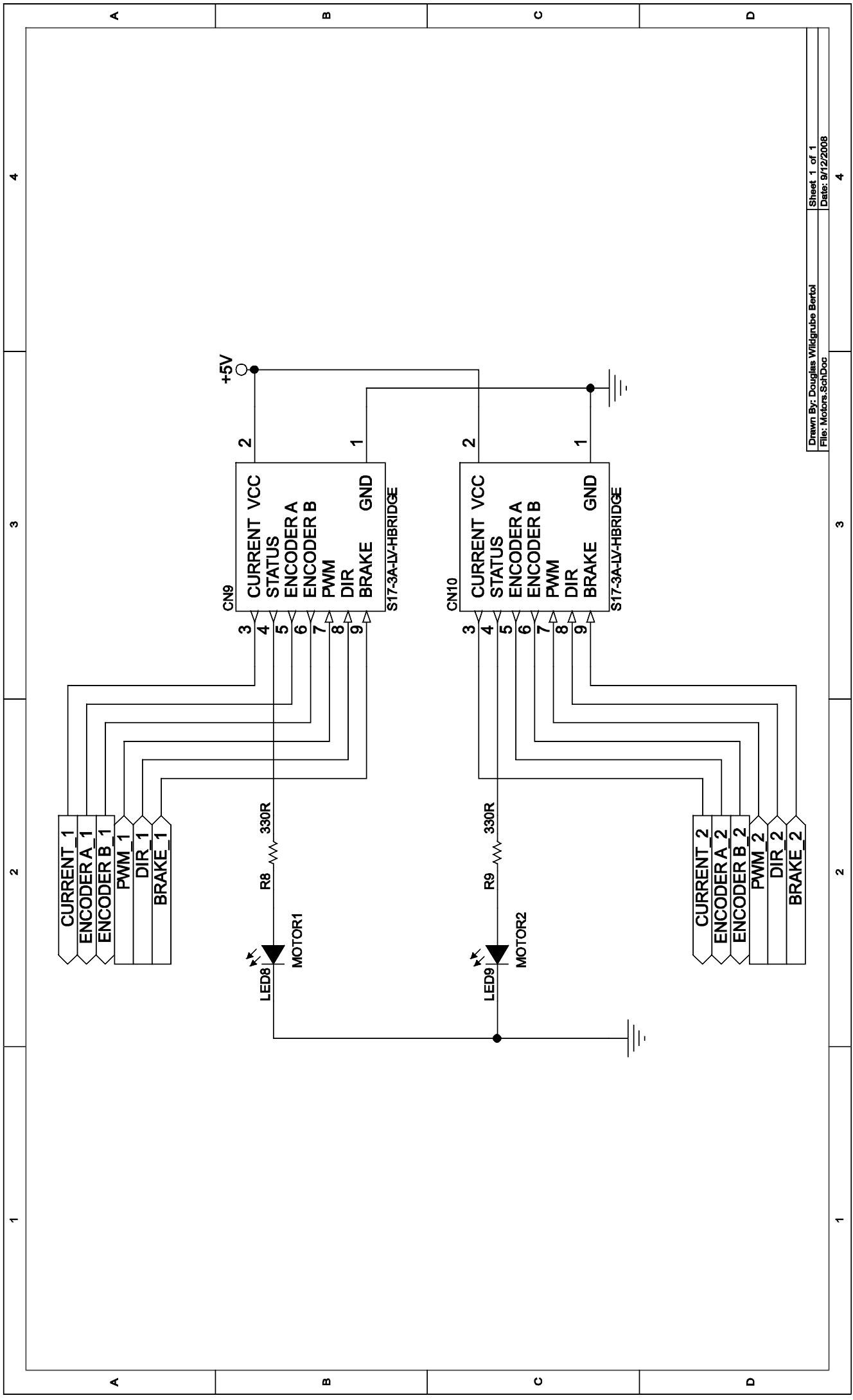
4

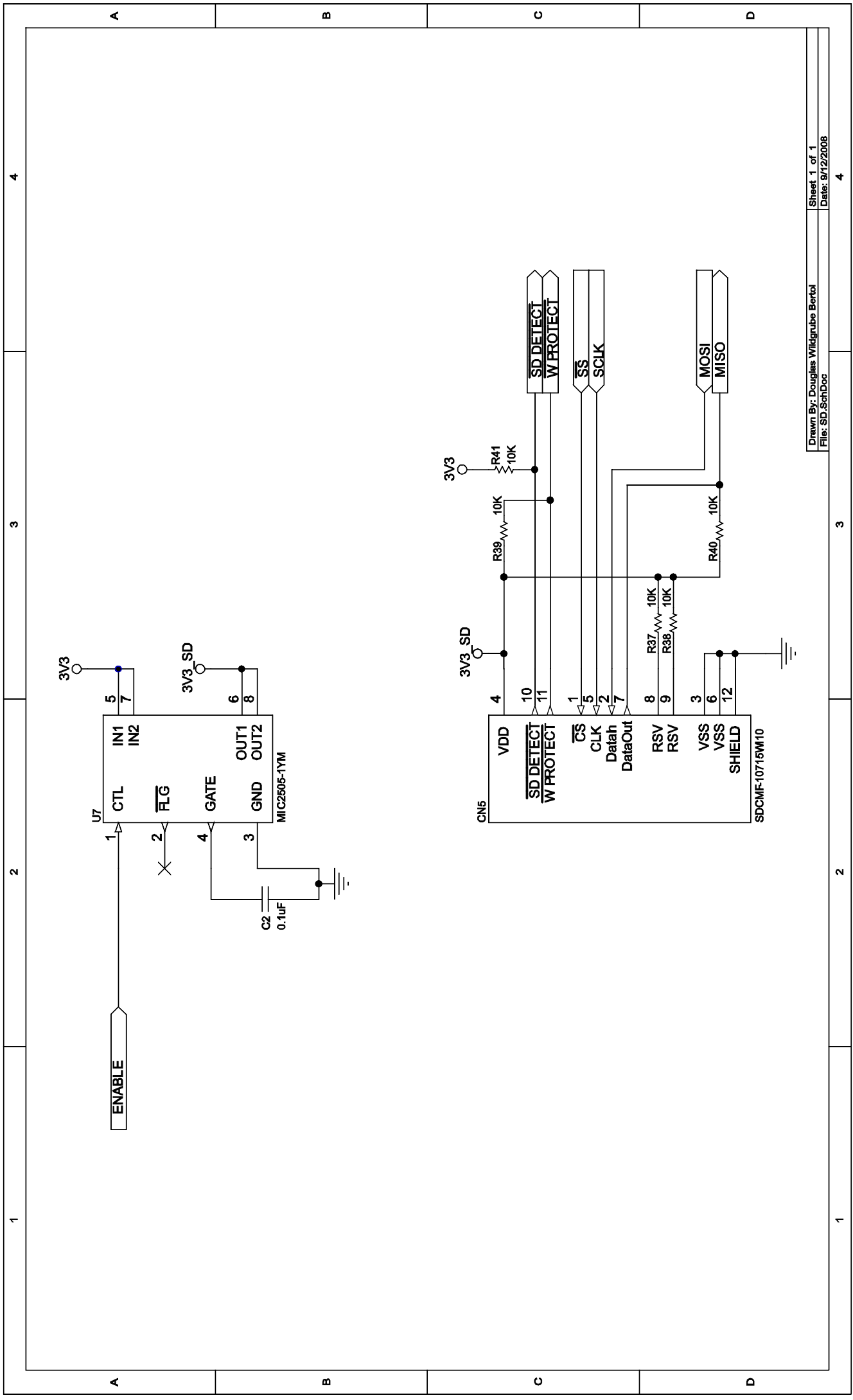
3

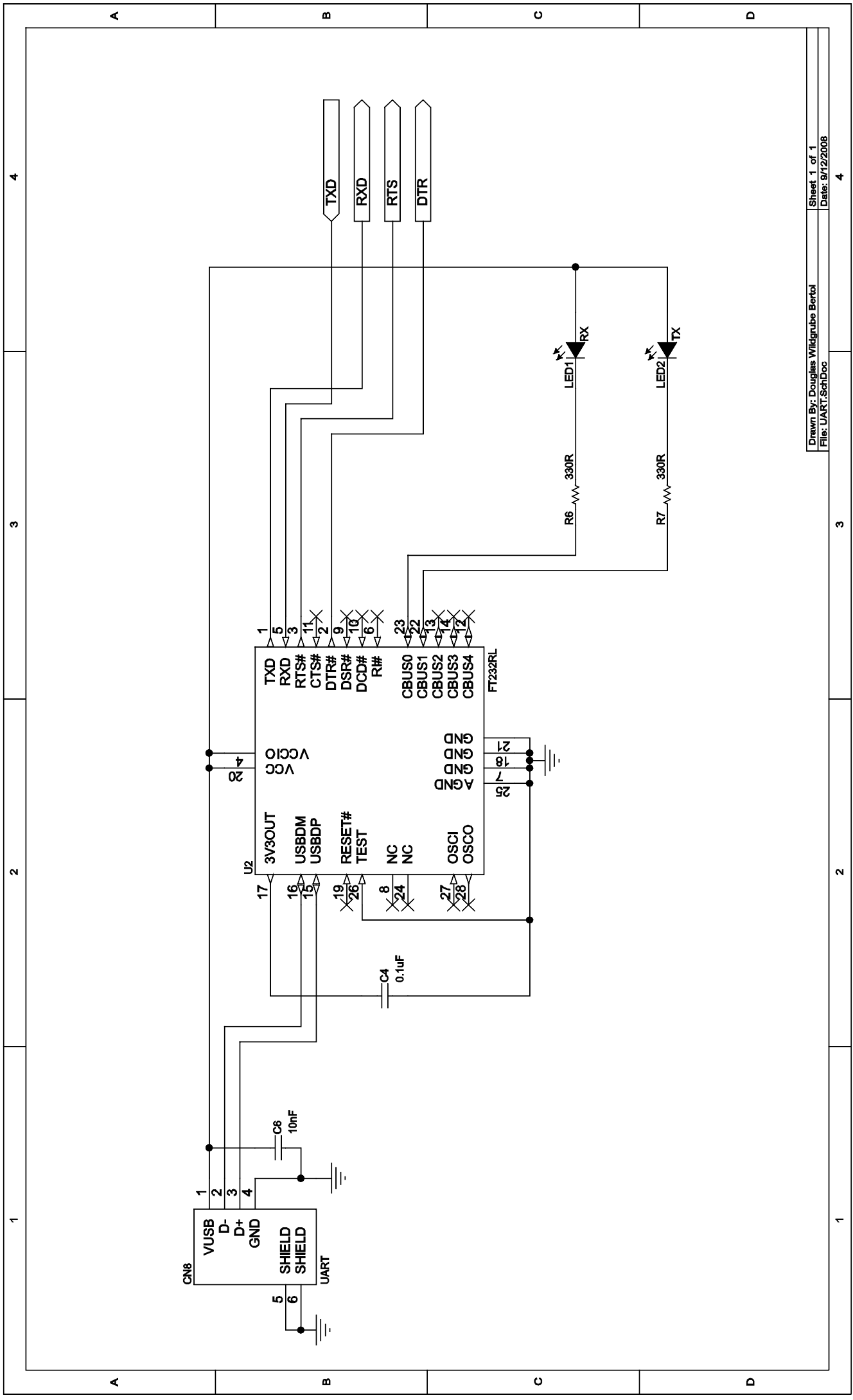
2

1









4

3

2

1

4

3

2

1

A

B

C

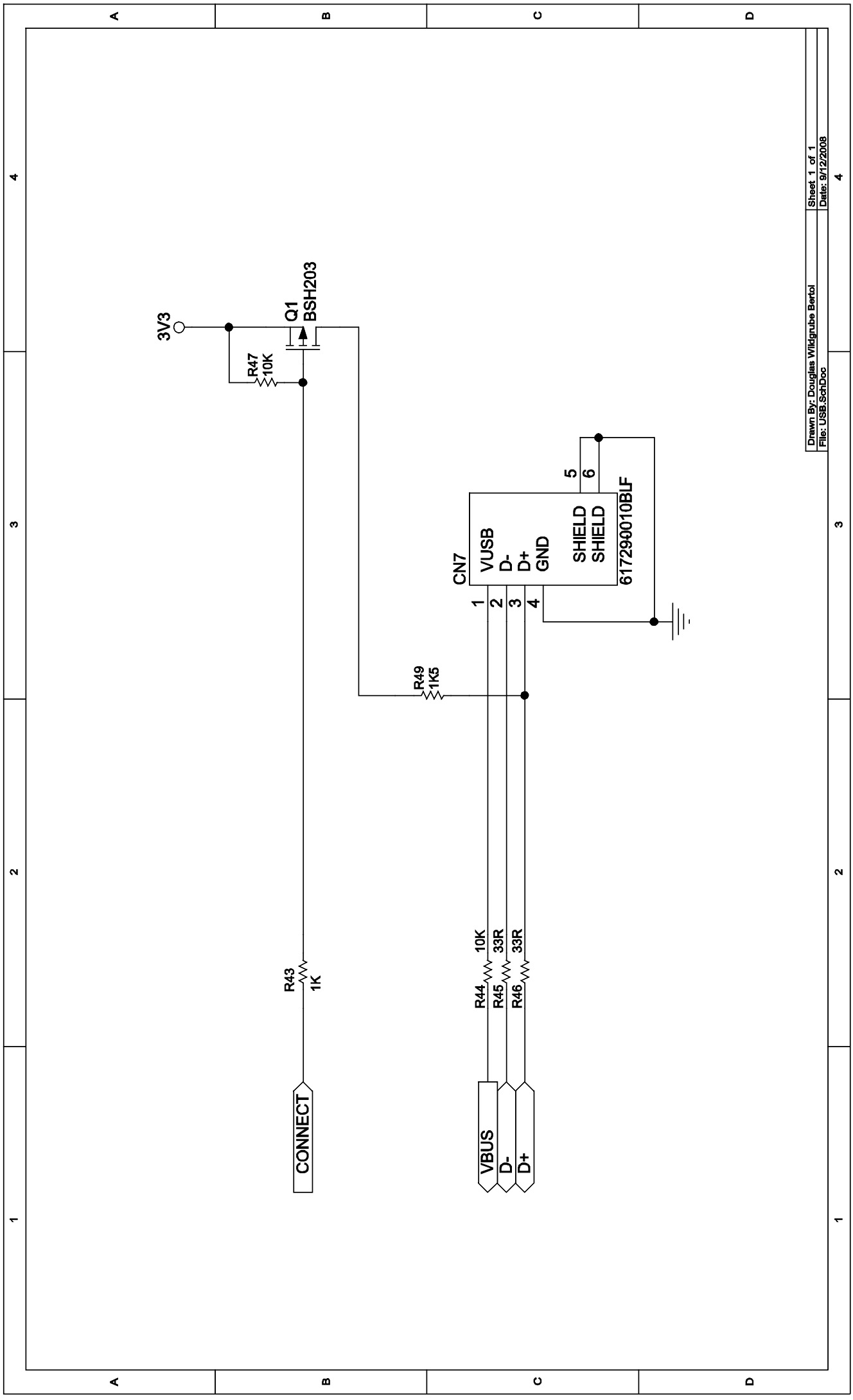
D

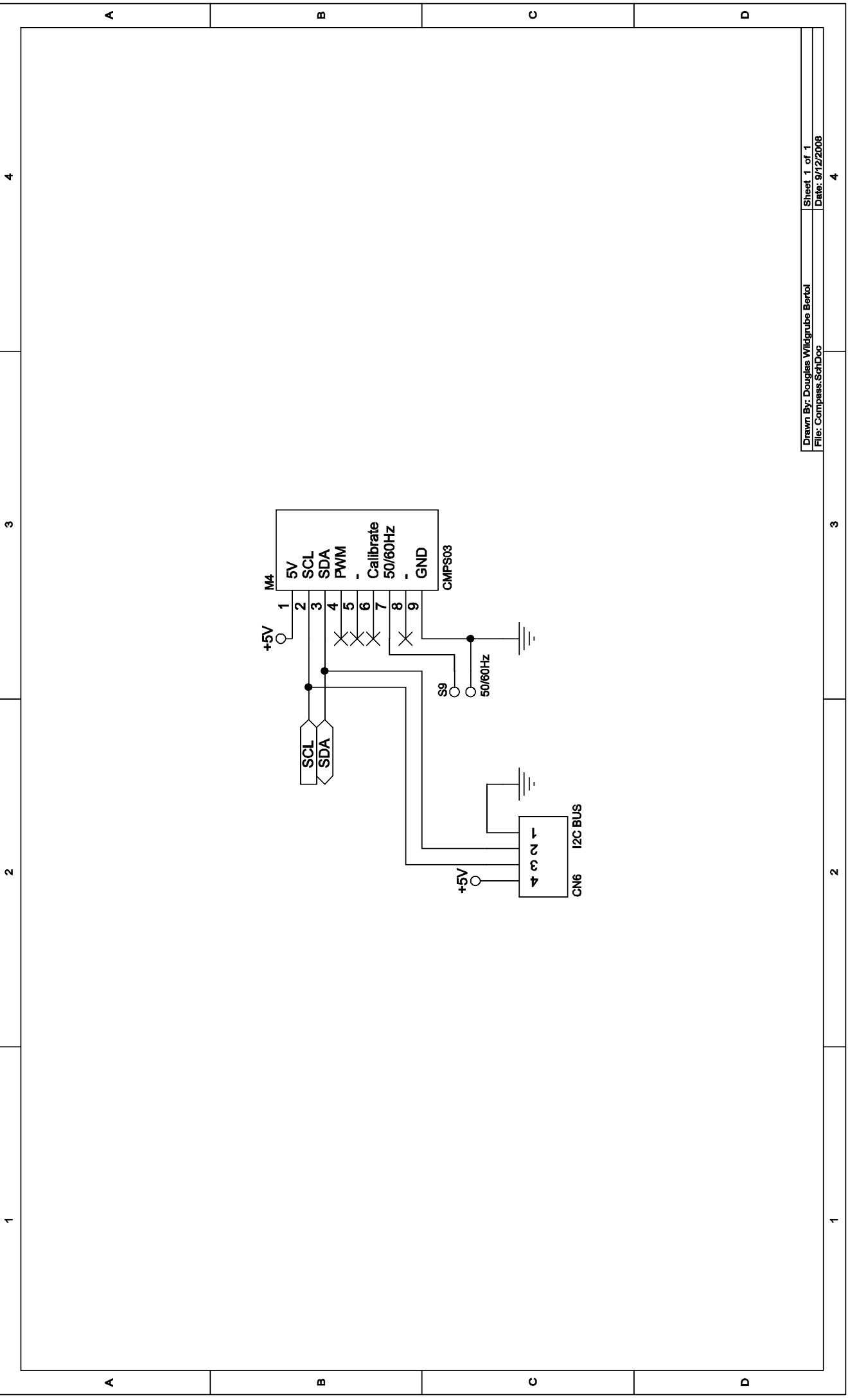
A

B

C

D





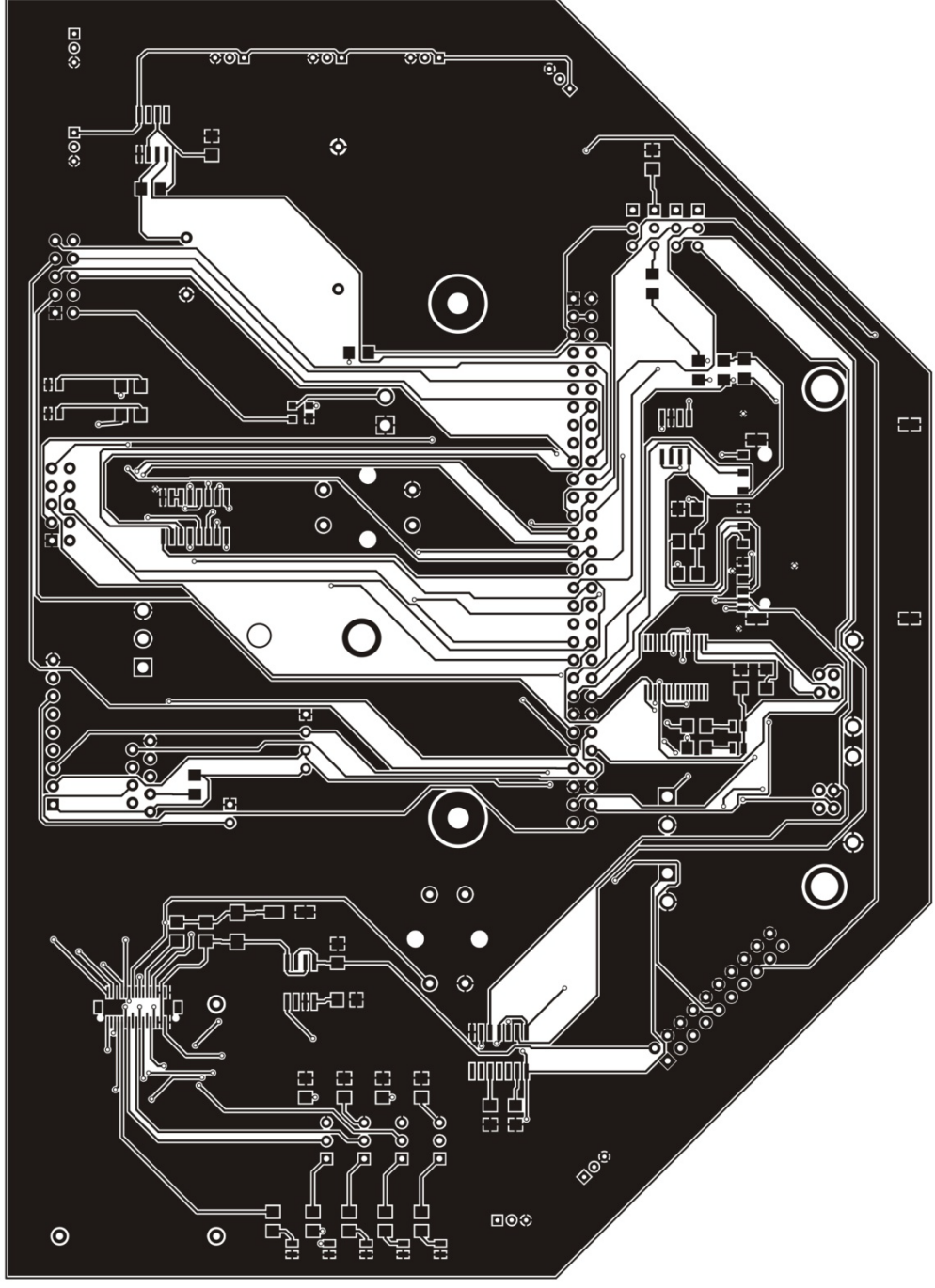
1 2 3 4

A A

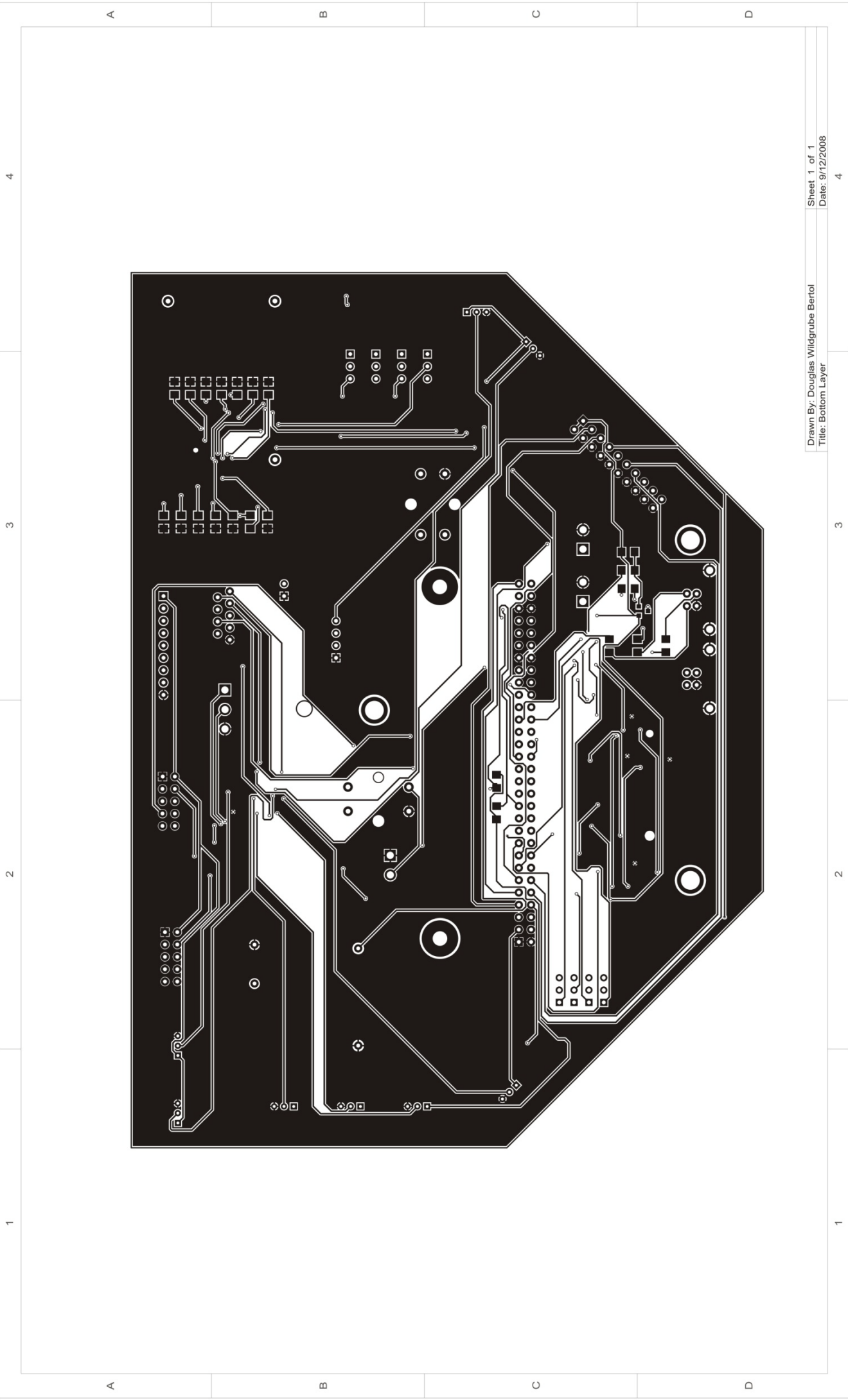
B B

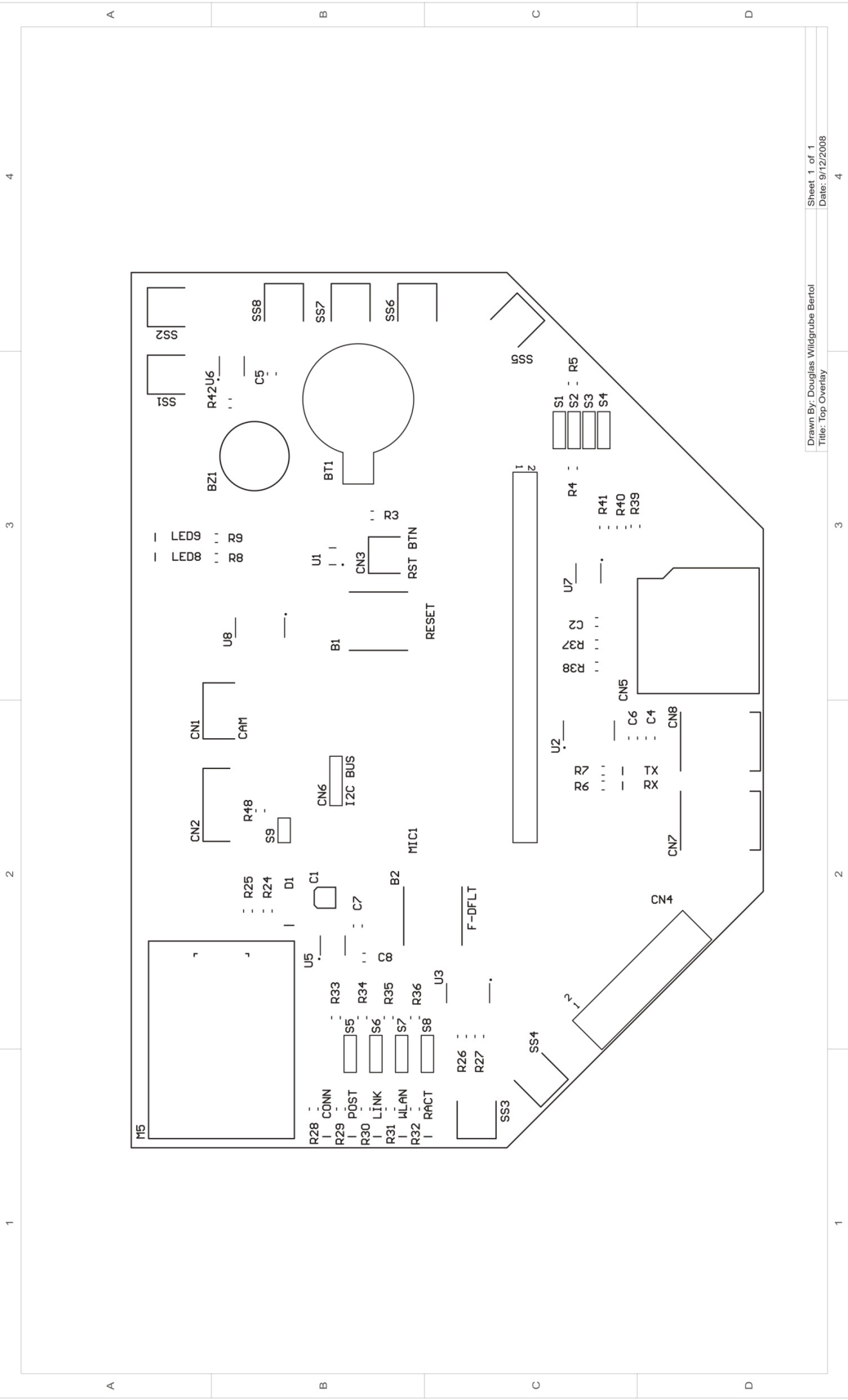
C C

D D



1 2 3 4





4

3

2

1

A

B

C

D

A

B

C

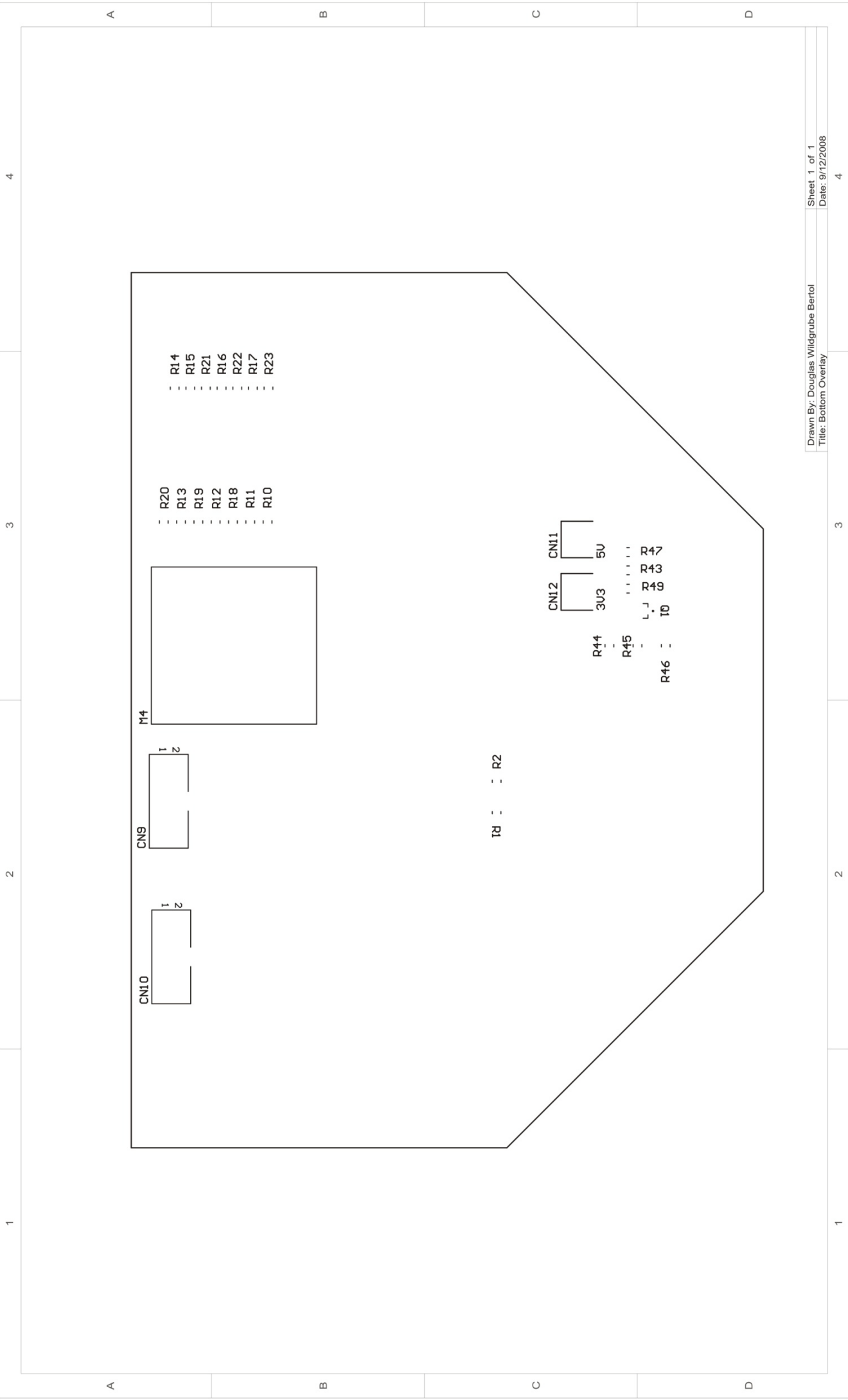
D

4

3

2

1



ANEXO 6 FOTOS DA PLATAFORMA



Figura A6.1 Foto traseira-lateral esquerda.

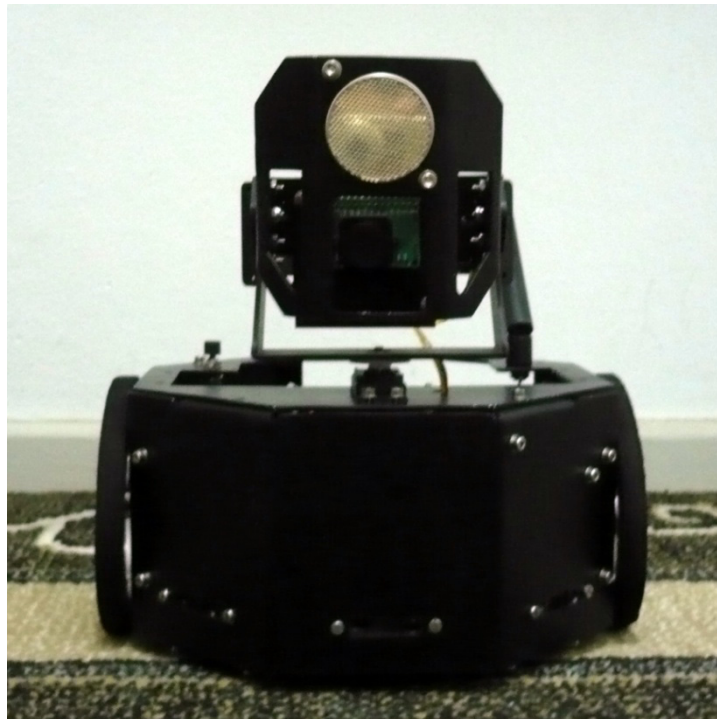


Figura A6.2 Foto frontal.

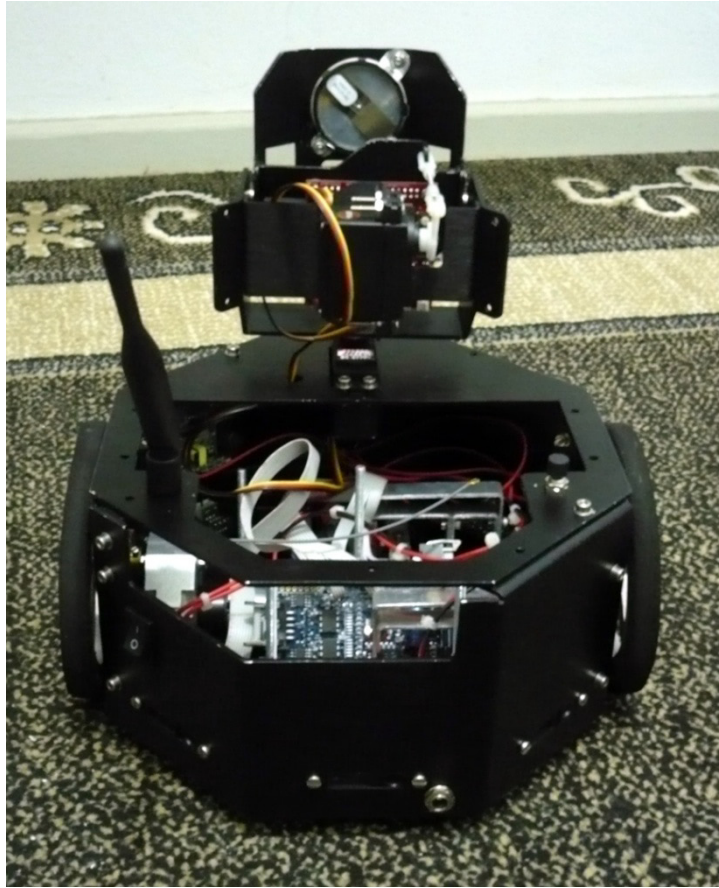


Figura A6.3 Foto traseira.

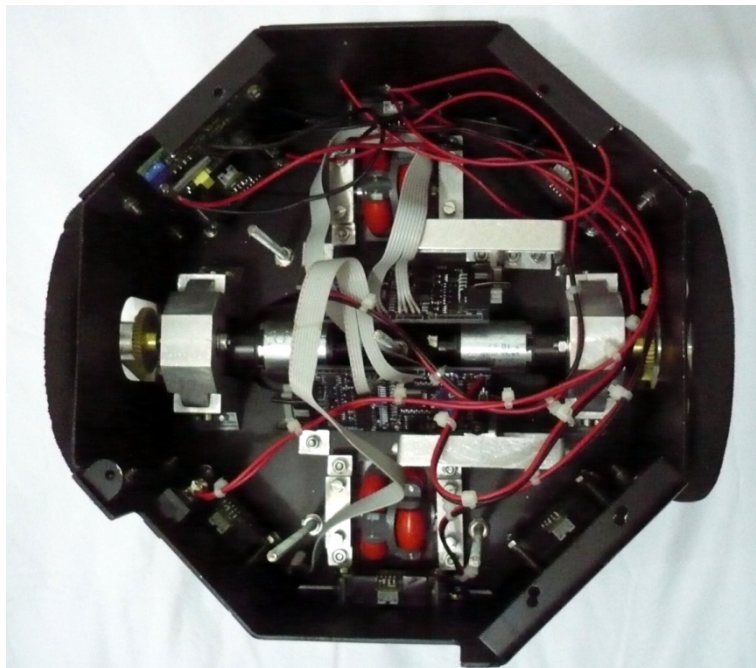


Figura A6.4 Foto dos componentes internos.

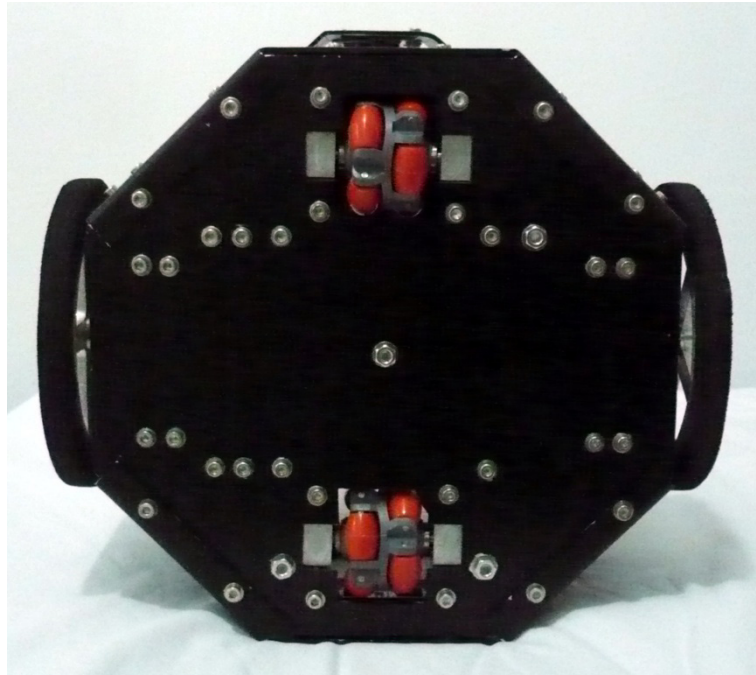


Figura A6.5 Foto inferior.

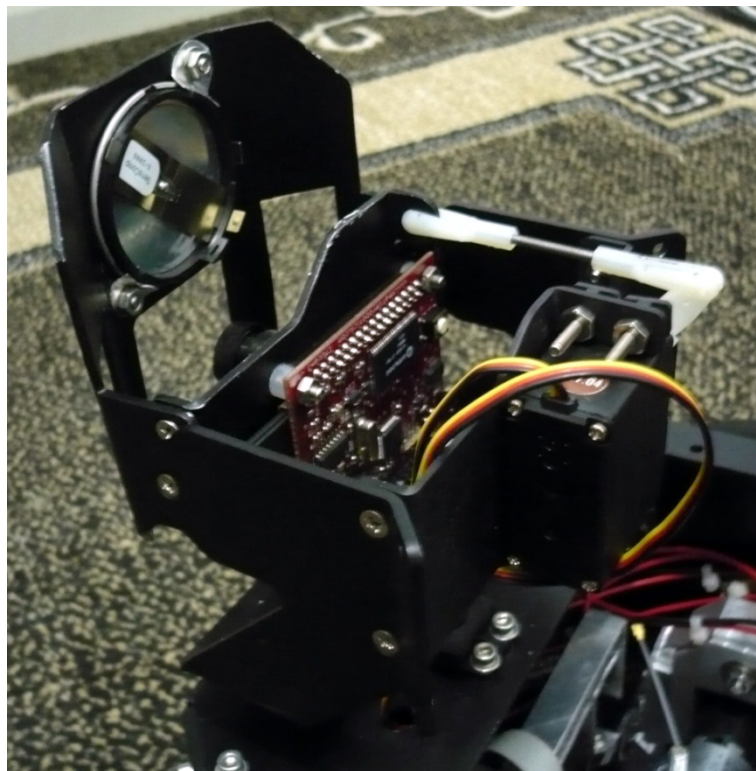


Figura A6.6 Foto da torre da câmera.

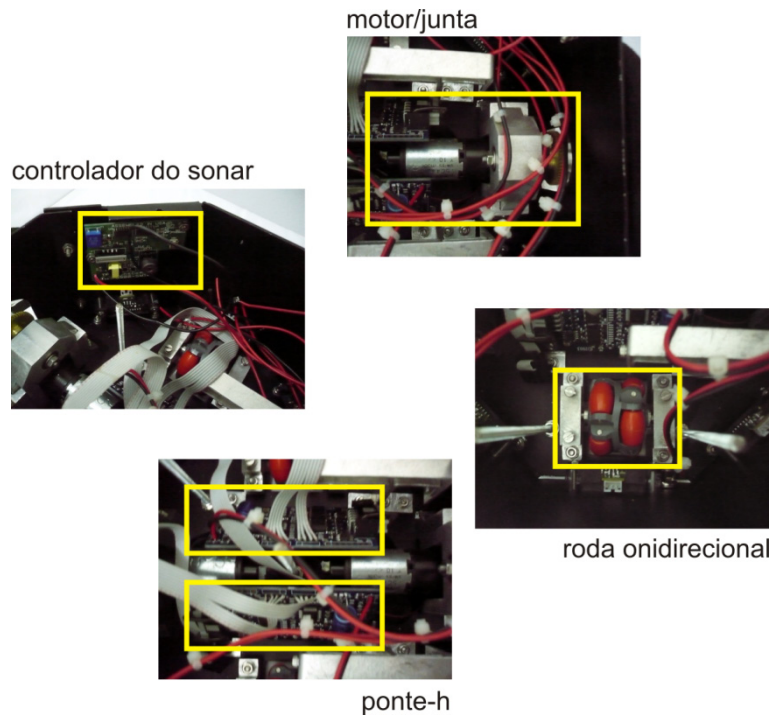


Figura A6.7 Fotos individuais dos componentes internos.

Referências Bibliográficas

- [1] SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R., *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. 1th ed. Massachusetts : The MIT Press, 2004. ISSN-ISBN: 0-262-19502-X.
- [2] LEAL, R. DG., *Impactos Sociais e Econômicos da Robotização: Estudo de Caso do Projeto Roboturb*. Florianópolis, 2005. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [3] ANTONELLO, E. A.; BAERVELDT, AJ.; RÖGNVALDSSON, T.; et al. Modular Neural Network and Classical Reinforcement Learning for Autonomous Robot Navigation: Inhibiting Undesirable Behaviors. In: **INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS SHERATON VANCOUVER WALL CENTRE HOTEL** (July 2006: Vancouver, BC). *Proceedings*. Canada, 2006. p.498-505. ISSN-ISBN: 0-7803-9490-9/06.
- [4] D'ANDRÉA-NOVEL, B.; BASTIN, G.; CAMPION, G. Dynamic Feedback Linearization of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION** (May 1992: Nice). *Proceedings*. France, 1992. p.2527-2532. ISSN-ISBN: 0-8186-2720-4/92.
- [5] FIERRO, R.; LEWIS, F. L., Control of a Nonholonomic Mobile Robot Using Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, v.9, p.589-600, 1998. ISSN-ISBN: 1045-9227/98.
- [6] MUIR, P. F.; NEUMAN, C. P., *Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots*. Pittsburgh-Pennsylvania, 1986. Relatório Técnico - The Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
- [7] CAMPION, G.; BASTIN, G.; D'ANDRÉA-NOVEL, B., Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v.12, p.47-62, 1996. ISSN-ISBN: 1042-

296X/96.

- [8] KANAYAMA, Y.; KIMURA, Y.; MIYAZAKI, F.; et al. A Stable Tracking Control Method for a Non-Holonomic Mobile Robot. In: **IEEE/RSJ INTERNATIONAL WORKSHOP ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS** (November 1991: Osaka, Japan). *Proceedings*. p.1236-1241. ISSN-ISBN: 91TH0375-6.
- [9] MUIR, P. F., *Modeling and Control of Wheeled Mobile Robots*. Pittsburgh-PA, 1988. Tese (Ph.D) - The Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
- [10] SICILIANO, B.; KHATIB, O., *Handbook of Robotics*. 1th ed. Berlin : Springer, 2008.
- [11] THANJAVUR, K.; RAJAGOPALAN, R. Ease of Dynamic Modelling of Wheeled Mobile Robots (WMRs) using Kane's Approach. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION** (April 1997: Albuquerque, New Mexico). *Proceedings*. p.2926-2931. ISSN-ISBN: 0-7803-3612-7-4/97.
- [12] COELHO, P.; NUNES, U., Path-Following Control of Mobile Robots in Presence of Uncertainties. *IEEE Transactions on Robotics*, v.21, p.252-261, 2005. ISSN-ISBN: 1552-3098.
- [13] KOZLOWSKI, K.; MAJCHRZAK, J. A Backstepping Approach to Control a Nonholonomic Mobile Robot. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION** (May 2002: Washington, DC). *Proceedings*. p.3972-3977. ISSN-ISBN: 0-7803-7272-7/02.
- [14] FUKU, Y.; KROTKOV, E. Dead Reckoning for a Lunar Rover on Uneven Terrain. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION** (April 1996: Minneapolis, Minnesota). *Proceedings*. p.411-416. ISSN-ISBN: 0-7803-2988-4/96.
- [15] WENG, J.; COHEN, P.; REBIBO, N., Motion and Structure Estimation from Stereo Image Sequences. v.8. 1992.
- [16] YAGI, Y.; KAWATO, S.; TSUJI, S., Real-Time Omnidirectional Image Sensor (COPIS) for Vision-Guided Navigation. v.10. 1994.

- [17] KUC, R.; SIEGEL, M. W., Physically Based Simulation Model for Acoustic Sensor Robot Navigation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v.9, p.766-778, 1987.
- [18] BOZMA, Ö.; KUC, R., A Physical Model-Based Analysis of Heterogeneous Environments Using Sonar - Endura Method. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v.16, p.497-506, 1994.
- [19] LAGES, W. F., *Controle e Estimação de Posição e Orientação de Robôs Móveis*.-São José dos Campos, 1998. Tese (Doutorado) - Pós Graduação em Engenharia Eletrônica e Computação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
- [20] MARTINS, N. A.; BERTOL, D. W.; LOMBARDI, W. C.; et al., Trajectory Tracking of a Nonholonomic Mobile Robot With Parametric and Nonparametric Uncertainties: A Proposed Neural Control. *International Journal of Factory Automation, Robotics and Soft Computing*, v.2, p.103-110, 2008. ISSN-ISBN: 1828-6984.
- [21] LOMBARDI, W. C.; MARTINS, N. A.; BERTOL, D. W.; et al. Image-based Camera-robot Target-tracking Satisfying Multicriteria Constraints. In: **WORLD CONGRESS OF THE INTERNATIONAL FEDERATION OF AUTOMATIC CONTROL** (17th.: July 2008: Seoul,Korea). *Proceedings*. p.5939-5944. ISSN-ISBN: 978-1-1234-7890-2/08.
- [22] D'ANDRÉA-NOVEL,.; BASTIN, G.; CAMPION, G. Modeling and Control of Non Holonomic Wheeled Mobile Robots. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION** (April 1991: Sacramento). *Proceedings*. California, 1991. p.1130-1135. ISSN-ISBN: CH2969-4/91/0000/1130.
- [23] K-TEAM S.A.; March, 2002. *Khepera 2 User Manual*.
- [24] BLACKWELL; 1990. *The Uranus Mobile Robot*, CMU-RI-TR-91-06. Pittsburgh, PA.
- [25] BERGBREITER, S., *CotsBots: An Off-the-Shelf Platform for Distributed Robotics*. Berkeley-California, 2004. Thesis (Master of Science) - Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley.
- [26] FALCONE, E.; GOCKLEY, R.; PORTER, E.; et al., The Personal Rover Project: The comprehensive design of a domestic personal robot. *Robotics and Autonomous Systems*,

v.42, p.245–258, 2003. ISSN-ISBN: 0921-8890.

- [27] LAUWERS, T. B.; KANTOR, G. A.; HOLLIS, R. L. A Dynamically Stable Single-Wheeled Mobile Robot with Inverse Mouse-Ball Drive. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION** (May 2006: Orlando). *Proceedings*. Orlando, 2006. p.15-19. ISSN-ISBN: 0-7803-9505-0.
- [28] BORENSTEIN, J., Control and Kinematic Design of Multi-Degree-of-Freedom Mobile Robots with Compliant Linkage. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v.11, p.21-35, 1995. ISSN-ISBN: 1042-296X/95.
- [29] LAURIA, M.; NADEAU, I.; LEPAGE, P.; et al. Design and Control of a Four Steered Wheeled Mobile Robot. In: **IEEE ANNUAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS** (32nd.: November 2006: Paris). *Proceedings*. France, 2006. p.4020 - 4025. ISSN-ISBN: 1-4244-0390-1.
- [30] HE, S. Feedback Control Design of Differential-Drive Wheeled Mobile Robots. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED ROBOTICS** (12th.: July 2005: Seattle, WA). *Proceedings*. USA, 2005. p.135 - 140. ISSN-ISBN: 0-7803-9178-0.
- [31] HOPPENOT, P.; COLLE, E., Localization and Control of a Rehabilitation Mobile Robot by Close Human–Machine Cooperation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, v.9, p.181-190, 2001. ISSN-ISBN: 1534-4320.
- [32] PRASSLER, E.; RITTER, A.; SCHAEFFER, C.; et al., A Short History of Cleaning Robots. *Autonomous Robots*, Hingham, v.9, n.3, p.211-226, 2000. ISSN-ISBN: 0929-5593.
- [33] MAXON MOTOR AG; May, 2008. *A-max 22 Ø22mm, Precious Metal Brushes CLL, 5Watt*.
- [34] MAXON MOTOR AG; May, 2008. *Planetary Gearhead GP 22 A Ø22mm, 0,5 – 1.0Nm*.
- [35] MAXON MOTOR AG; May, 2008. *Encoder MEnc13*.
- [36] HITEC RCD KOREA INC.; June, 2002. *Announced Specification of HS-322HD Standard Deluxe Servo*.
- [37] BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; CLAUSEN, W. E.; et al., *Vector Mechanics for Engineers:*

- Dynamics*. 7th ed. New York : McGraw-Hill, 2004. ISSN-ISBN: 0-07-230492-8.
- [38] BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; EISENBERG, E. R.; et al., *Vector Mechanics for Engineers: Statics*. 7th ed. New York : McGraw-Hill, 2004. ISSN-ISBN: 0-07-230493-6.
- [39] ACRONAME EASIER ROBOTICS; August, 2003. *Low Voltage H-Bridge – S17-3A-LV-HBRIDGE*.
- [40] SENSCOMP INC.; September, 2004. *600 Series Environmental Transducer*.
- [41] SENSCOMP INC.; September, 2004. *6500 Series Ranging Modules*.
- [42] TEXAS INSTRUMENTS INC.; March, 1998. *TL851 - Sonar Ranging Control*.
- [43] TEXAS INSTRUMENTS INC.; March, 1988. *TL852 - Sonar Ranging Receiver*.
- [44] MARQUES, L.; NUNES, U.; ALMEIDA, A. Td. A New 3D Optical Triangulation Sensor for Robotics. In: **INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED MOTION CONTROL** (5th.: June 1998: Coimbra). *Proceedings*. p.512-517. ISSN-ISBN: 0-7803-4484-7.
- [45] SHARP; August, 1999. *Distance Measuring Sensor – GP2D120*.
- [46] PHILIPS SEMICONDUCTORS; June, 2000. *KMZ51 - Magnetic Field Sensor*.
- [47] STMICROELECTRONICS; February, 1999. *ST24C04 – 4 Kbit Serial I²C Bus EEPROM*.
- [48] CARNEGIE MELLON UNIVERSITY; September, 2007. *CMUcam4 Datasheet*.
- [49] OMNIVISION; May, 2000. *OV6620 Single-Chip CMOS CIF Color Digital Camera*.
- [50] PHILIPS; June, 2008. *UM10275 - LPC2104/2105/2106 User Manual - Rev.01*.
- [51] AVERLOGIC; February, 2003. *AL440B Data Sheets Version 1.4*.
- [52] SANDISK; December, 2003. *SanDisk Secure Digital Card – Product Manual – Version 1.9*.
- [53] 1995. *ECMA107 - Volume and File Structure of Disk Cartridges for Information Interchange*,

- [54] IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.; 2003. *IEEE Std 802.11g-2003*, 0-7381-3701-4. New York.
- [55] IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.; 1999. *IEEE Std 802.11b-1999*, 0-7381-1812-5. New York.
- [56] IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.; 2001. *IEEE Std 802.11b-1999/Cor.1-2001*, 0-7381-3002-8. New York.
- [57] IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.; 1999. *ANSI/IEEE Std 802.11-1999 Edition*, 0-7381-1658-0. New York.
- [58] CHUAH, M. C.; ZHANG, Q., *Design and Performance of 3G Wireless Networks and Wireless LANs*. 1th ed. New York : Springer, 2006.
- [59] PHAM, P. P., *Comprehensive Analysis of the IEEE 802.11*. v.5. Springer Netherlands; 2005.
- [60] QUATECH INC.; October, 2006. *Airborne™ Embedded Wireless Device Server Module Serial to 802.11b/g wireless LAN*.
- [61] QUATECH INC.; 2006-2007. *Airborne™ Wireless 802.11 b/g LAN Node Module Data Book*.
- [62] QUATECH INC.; 2006-2007. *Airborne™ Product Family Command Line Interface (CLI) Reference Guide*.
- [63] COMPAQ; INTEL; MICROSOFT; et al.; 1998. *Universal Serial Bus Specification - Revision 1.1*,
- [64] COMPAQ; HEWLETT-PACKARD; INTEL; et al.; 2000. *Universal Serial Bus Specification Revision 2.0*,
- [65] HEWLETT-PACKARD; INTEL; MICROSOFT; et al.; 2008. *Universal Serial Bus 3.0 Specification*,
- [66] FTDI; August, 2008. *August, 2008. FT232R USB UART IC Datasheet Version 2.01*.
- [67] FTDI; September, 2008. *AN_104 - FTDI Drivers Installation Guide for Windows XP*.

- [68] FTDI; 2007. *Mac OS X Installation Guide*.
- [69] FTDI; 2006. *D2XX Programmer's Guide*.
- [70] FTDI; 2006. *MProg 3.0 Manual*.
- [71] FTDI; 2006. *AN232R-01 Bit Bang Modes for the FT232R and FT245R*.
- [72] ESYSTECH; Junho, 2007. *eLPC64 - ARM System on Module - Manual do Usuário*.
- [73] NXP; November, 2008. *LPC2141/42/44/46/48 - Product Data Sheet*.
- [74] NXP; August, 2005. *UM10139 - Volume 1: LPC214X User Manual*.
- [75] D'ANDRÉA-NOVEL, B.; CAMPION, G.; BASTIN, G., Control of Wheeled Mobile Robots Not Satisfying Ideal Velocity Constraints: A Singular Perturbation Approach. *Int. J. Robust Nonlin. Control*, v.5, p.243-267, 1995.
- [76] LEROQUAIS, W.; D'ANDRÉA-NOVEL, B. Modeling and Control of Wheeled Mobile Robots Not Satisfying Ideal Velocity Constraints: The Unicycle Case. In: **CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL** (35th.: December 1996: Kobe, Japan). *Proceedings*. p.1437-1442. ISSN-ISBN: 0-7803-3590-2/96.
- [77] MUIR, P. F.; NEUMAN, C. P., Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots. *Journal of Robotic Systems*, v.4, p.281-340, 1987.
- [78] ALEXANDER, J. C.; MADDOCKS, J. H., On the Kinematics of Wheeled Mobile Robots. *International Journal of Robotics Research*, v.8, p.15-27, 1989.
- [79] CANUDAS DE WIT, C.; SICILIANO, B.; BASTIN, G., *Theory of Robot Control*. London, Great Britain : Springer-Verlag, 1996.
- [80] COSTA, C. H.; OLIVEIRA, A. S.; DE PIERI, E. R.; et al. Métodos para a Determinação do Modelo Dinâmico de Robôs Móveis. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO** (XVII.: Setembro 2008: Juiz de Fora, Minas Gerais). *Anais*.
- [81] YUN, X.; YAMAMOTO, Y. Internal Dynamics of a Wheeled Mobile Robot. In: **IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND**

SYSTEMS (July 1993: Yokohama, Japan). *Proceedings*. p.1288-1294. ISSN-ISBN: 0-7803-0823-9/93.

[82] CHUNG, J. H.; YI, B.J.; KIM, W. K.; et al. The Dynamic Modeling and Analysis for an Omnidirectional Mobile Robot with Three Caster Wheels. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION** (September 2003: Taipei, Taiwan). *Proceedings*. p.521-527. ISSN-ISBN: 0-7803-7736-2/03.

[83] TAKAHASHI, H.; MORISAWA, M.; OHNISHI, K. Mobility of a Mobile Robot. In: **IEE INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCED MOTION CONTROL** (8th.: March 2004: Kawasaki, Japan). *Proceedings*. p.253-257. ISSN-ISBN: 0-7803-8300-1/04.

[84] FIERRO, R.; LEWIS, F. L. Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics Into Dynamics. In: **CONFERENCE ON DECISION & CONTROL** (34th.: December 1995: New Orleans). *Proceedings*. p.3805-3810. ISSN-ISBN: 0-7803-2685-7/95.

[85] JAGANNATHAN, S.; LEWIS, F. L.; LIU, K. Modeling, Control and Obstacle Avoidance of A Mobile Robot With an Onboard Manipulator. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT CONTROL** (August 1993: Chicago, Illinois). *Proceedings*. p.196-201. ISSN-ISBN: 0-7803-1206-6/93.

[86] KANAYAMA, Y.; KIMURA, Y.; MIYAZAKI, F.; et al. A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION** (May 1990: Cincinnati). *Proceedings*. OH, USA, 1990. p.384-389. ISSN-ISBN: 0-8186-9061-5.

[87] KHALIL, H. K., *Nonlinear Systems*. 3th ed. ISSN-ISBN: 0-13-067389-7.