

**RAFAEL RAMOS MARANGONI & RAPHAEL BARON**

**Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações**

São Paulo  
(2013)

**RAFAEL RAMOS MARANGONI & RAPHAEL BARON**

**Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

Orientador:  
Prof. Dr. Ettore Apolônio de Barros

São Paulo  
(2013)

**RAFAEL RAMOS MARANGONI & RAPHAEL BARON**

**Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

Área de Concentração:  
Engenharia Mecatrônica

Orientador:  
Prof. Dr. Ettore Apolônio de Barros

São Paulo  
(2013)

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Marangoni, Rafael Ramos**  
**Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações /**  
**R.R. Marangoni, R. Baron. -- São Paulo, 2013.**  
**83 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de  
Sistemas Mecânicos.**

**1.Robôs 2.Cabos umbilicais 3.Eletrônica embarcada 4.Soft-  
wares (Controle) I.Baron, Raphael II.Universidade de São Paulo.  
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e  
de Sistemas Mecânicos III.t.**

## RESUMO

Nesse projeto são abordadas a concepção e a construção de um robô para inspeção de tubulações. São muitas as variáveis presentes em um projeto dessa natureza. Como é notado na literatura, há uma enorme variedade quanto aos tipos de sistemas empregados em robôs de inspeção, como, por exemplo, o emprego de cabos – neste caso, com fios metálicos ou fibra óptica - ou comunicação sem fio, o uso de bateria embarcada ou alimentação externa, o tipo de sistema de movimentação, o tipo previsto de tubulação – diâmetro, comprimento - etc. Dadas essas variáveis, foram estipulados os parâmetros para o projeto: serão atendidas tubulações secas (com potenciais ocorrências de sujeira) com até 25 m de comprimento, com diâmetro mínimo de 400 mm e qualquer tipo de material. Após uma etapa de análise de viabilidade e emprego de matrizes de decisão, foram também estipuladas as características do veículo a ser desenvolvido: sistema de movimentação por rodas, fornecimento de energia embarcado e comunicação por um cabo ethernet categoria 5. O controlador empregado é uma placa Raspberry Pi (processador ARM 32 bits), acoplada a um Arduino e um circuito de drivers de potência, que alimenta os motores. As imagens são enviadas ao operador digitalmente, sendo encapsuladas em pacotes TCP/IP, tornando possível o aproveitamento da confiabilidade e eficiência dos protocolos e infraestrutura existentes. O controle do veículo e a visualização das imagens capturadas pela câmera ocorrem através de um software desenvolvido especialmente para esta aplicação.

**Palavras-chaves:** Robô para inspeção de tubulação. Raspberry Pi. Arduino. PIG.

## ABSTRACT

The conception and construction of a robot for pipe inspection are addressed in this project. In such projects there are various variables to be considered. In the literature, there is a great variety of systems used in pipe-inspecting robots, for instance, the use of cables - whether copper or fiber optics - or wireless communication, the use of embedded or remote power sources, the movement type, the type and material of the pipe - diameter and length - etc. Given the aforementioned variables, the parameters for the project were stipulated: the treated pipes will be dry (with occasional dirt) with up to 25m of length, with a minimal diameter of 400 mm, made of any material. After a viability analysis phase and use of decision matrices, the characteristics of the vehicle were also stipulated: the movement is wheel-based, the energy is embedded and the communication is done through a category 5 ethernet cable. The controller is a Raspberry Pi board (32 bit ARM processor), coupled with an Arduino and a driver circuit to power the motors. The images are digitally sent to the operator, and are encapsulated in IP-packets, in such a way that it is possible to take advantage of the reliability and efficiency of the pre-existing protocols and infrastructure. The control of the vehicle and the visualization of the images captured by the camera are possible through a specific software designed and implemented for this application.

**Key-words:** Robot for pipe inspection. Raspberry Pi. Arduino. PIG.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mecanismo magnético de movimentação . . . . .	11
Figura 2 – Mecanismo de movimentação para desviar de obstáculos . . . . .	11
Figura 3 – Sistema de desvio de obstáculos . . . . .	12
Figura 4 – Interface 3D de inspeção . . . . .	13
Figura 5 – Robô com quatro rodas horizontais . . . . .	14
Figura 6 – Modelo do sistema de movimentação “nSIR” . . . . .	14
Figura 7 – Conceito de “whole stem drive” . . . . .	15
Figura 8 – <i>Multifunctional Mobile Unit 1</i> . . . . .	16
Figura 9 – Classes de robôs para inspeção interna de tubulações . . . . .	17
Figura 10 – Sistema eletroeletrônico do robô. . . . .	22
Figura 11 – Sete camadas do modelo de referência OSI . . . . .	24
Figura 12 – Chassis utilizado no projeto . . . . .	26
Figura 13 – Sistema de tração . . . . .	26
Figura 14 – Projeto do veículo em CAD . . . . .	27
Figura 15 – Baterias de polímero de lítio. . . . .	28
Figura 16 – Esquemático do <i>shield</i> do Arduino . . . . .	30
Figura 17 – <i>Shield</i> do Arduino . . . . .	31
Figura 18 – Detalhe frontal do protótipo do robô . . . . .	32
Figura 19 – Detalhe traseiro do protótipo do robô . . . . .	32
Figura 20 – Máquina de estados do servidor . . . . .	34
Figura 21 – Máquina de estados do cliente . . . . .	35
Figura 22 – Visão geral da arquitetura do software, conforme descrita nas seções anteriores . . . . .	36
Figura 23 – Comunicação entre as tarefas de controle . . . . .	38
Figura 24 – Comunicação entre as tarefas de imagem . . . . .	39
Figura 25 – Interface de usuário inicial . . . . .	40
Figura 26 – Robô e interface de controle em operação de teste . . . . .	43
Figura 27 – Desenho do <i>shield</i> do Arduino . . . . .	79
Figura 28 – Interface entre a comunicação por fibra óptica e a comunicação por cabo <i>Twisted Pair</i> . . . . .	81
Figura 29 – Teste da interface ethernet . . . . .	82

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Notas atribuídas a cada formato de robô. . . . .	21
Tabela 2 – Estimativa do consumo energético dos componentes do robô. . . . .	25
Tabela 3 – Protocolo de comunicação para as tarefas de controle . . . . .	37
Tabela 4 – Resposta do servidor a uma requisição de imagem feita pelo cliente . .	37
Tabela 5 – Características do veículo . . . . .	42
Tabela 6 – Custo dos componentes . . . . .	44
Tabela 7 – Descrição dos componentes do <i>shield</i> do Arduino. . . . .	80

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>	<b>10</b>
2.1	INTERNAL PIPE INSPECTION ROBOT . . . . .	10
2.2	MECHANISMS OF AUTONOMOUS PIPE-SURFACE INSPECTION ROBOT WITH MAGNETIC ELEMENTS . . . . .	11
2.3	ROBOTIC SYSTEMS FOR CLEANING AND INSPECTION OF LARGE CONCRETE PIPES . . . . .	12
2.4	A NEW APPROACH TO THE SEWER PIPE INSPECTION: FULLY AUTONOMOUS MOBILE ROBOT “KANTARO” . . . . .	12
2.5	DESIGN OF IN-PIPE INSPECTION VEHICLES FOR $\phi 25$ , $\phi 50$ , $\phi 150$ PIPES	15
2.6	MULTIFUNCTIONAL MOBILE UNITS WITH A SAME PLATFORM FOR INPIPE INSPECTION ROBOTS . . . . .	16
2.7	DEVELOPMENT OF IN-PIPE INSPECTION ROBOT: A REVIEW . .	17
<b>3</b>	<b>PARÂMETROS E RESTRIÇÕES DO PROJETO . . . . .</b>	<b>18</b>
3.1	DIMENSÕES DAS TUBULAÇÕES E DUTOS . . . . .	18
3.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO ROBÔ . . . . .	18
3.3	CONDIÇÕES DE TRABALHO . . . . .	19
3.4	ALCANCE OPERACIONAL DO ROBÔ . . . . .	19
3.5	AUTONOMIA . . . . .	19
<b>4</b>	<b>DEFINIÇÃO DA FORMA DO ROBÔ . . . . .</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>SISTEMA ELETROELETRÔNICO . . . . .</b>	<b>22</b>
5.1	SELEÇÃO E DESCRIÇÃO DA TÉCNICA DE COMUNICAÇÃO . . . .	22
5.1.1	Modelo OSI . . . . .	23
5.1.2	Camada física 100BASE-X . . . . .	24
5.2	ESTIMATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO . . . . .	25
<b>6</b>	<b>PROJETO DOS COMPONENTES MECÂNICOS . . . . .</b>	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>PROJETO DA ELETRÔNICA . . . . .</b>	<b>28</b>
7.1	SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO . . . . .	28
7.2	<i>SHIELD</i> DO ARDUINO . . . . .	28
<b>8</b>	<b>FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO . . . . .</b>	<b>31</b>
8.1	HARDWARE ELETROELETRÔNICO . . . . .	31
8.2	COMPONENTES MECÂNICOS . . . . .	32
<b>9</b>	<b>PROJETO DO SOFTWARE DE CONTROLE . . . . .</b>	<b>33</b>
9.1	SERVIDOR . . . . .	33

9.2	CLIENTE . . . . .	34
9.3	VISÃO GERAL . . . . .	35
9.4	PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO . . . . .	37
9.4.1	Comunicação entre as tarefas de controle . . . . .	38
9.4.2	Comunicação entre as tarefas de imagem . . . . .	38
9.5	INTERFACE DE USUÁRIO . . . . .	39
10	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>42</b>
11	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>44</b>
	 <b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	 45
	<b>APÊNDICE A – DESENHOS DOS COMPONENTES MECÂNICOS DO ROBÔ</b> . . . . .	<b>46</b>
	<b>APÊNDICE B – DESENHOS DOS COMPONENTES MECÂNICOS DO MECANISMO DA CÂMERA</b> . . . . .	<b>66</b>
	<b>APÊNDICE C – DESENHO DO SHIELD DO ARDUINO</b> . . . . .	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE D – INTERFACE DE FIBRA ÓPTICA</b> . . . . .	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho é proposta uma solução para o problema de inspeção de tubulações. Para cumprir este objetivo foi realizada inicialmente uma revisão bibliográfica, na qual diferentes soluções existentes foram abordadas. Todos os trabalhos reunidos tratam de robôs, autônomos ou tele-operados, que são utilizados para realizar as tarefas de inspeção. Durante esta revisão foi possível estudar as diversas características dos robôs semelhantes, como técnicas de comunicação e formas de locomoção. Paralelamente à revisão bibliográfica, foram definidas as restrições do projeto, especificando-se, por exemplo, o diâmetro dos tubos a serem inspecionados e a autonomia de trabalho do robô.

Em posse das informações reunidas durante a revisão bibliográfica, foi definida uma solução para o problema de inspeção de tubulações que atende às restrições do projeto. Esta solução foi basicamente dividida entre a definição da forma do robô e a definição do sistema eletroeletrônico. A forma do robô foi escolhida através de uma matriz de decisão envolvendo os diferentes tipos de robôs encontrados durante a revisão bibliográfica, e a escolha dos componentes da eletrônicos acorreu também com base nas informações adquiridas durante a análise dos trabalhos existentes.

Em função da solução definida para o problema, foi realizado o projeto do robô inspecionador de tubulações. O projeto dos componentes mecânicos teve como ponto de partida um chassis pré-fabricado adquirido pela equipe, o qual conta com sistemas de tração nas quatro rodas, suspensão e esterço. A este chassis foram adicionados novos componentes eletrônicos e uma câmera dotada de um sistema de movimentação e iluminação. Os suportes destes componentes eletrônicos e este sistema de movimentação foram projetados e seus desenhos de fabricação estão apresentados neste trabalho. O projeto dos componentes eletrônicos envolveu basicamente a definição dos microcontroladores utilizados, a definição da técnica de comunicação entre o robô e a estação de controle, a concepção dos drivers dos atuadores e a seleção das baterias para alimentação do sistema. Os microcontroladores utilizados estão instalados em placas pré-fabricadas (Raspberry Pi e Arduino).

Através do projeto realizado foi possível construir o protótipo do robô para inspecionar tubulações. Após a construção do protótipo, foi executado o projeto e a implementação do software de controle, o qual é responsável por receber comandos de controle do utilizador e apresentar as imagens geradas pela câmera do veículo. Por fim, a operacionalidade do robô foi avaliada em uma tubulação que atende às restrições de projeto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com a finalidade de estudar soluções existentes para o problema de inspeção de tubulações, foi realizada uma busca bibliográfica. Durante as pesquisas foi constatado que este é um problema comum de engenharia, e diferentes soluções estão disponíveis na literatura. A forma mais comum de solução deste problema é a utilização de um veículo inspecionador dotado de uma ou mais câmeras, cuja forma e componentes dependem das características da tubulação. Este robô é geralmente conectado a uma estação remota por um cabo umbilical, e pode ser autônomo, parcialmente autônomo ou completamente manual. Esta característica depende do grau de sofisticação de operação demandado.

Uma solução comum a tubulações metálicas é a utilização de rodas magnéticas para fixar o robô à superfície do duto, tornando-o assim mais versátil para realizar manobras durante a tarefa de inspeção. Para identificar falhas relativamente pequenas na superfície dos dutos, da ordem de 0,1 mm a 0,5 mm, sensores adicionais à câmera são utilizados. O desvio de obstáculos é um problema que apresenta diversas soluções, sendo essas geralmente específicas para os tipos irregularidades enfrentadas pelo robô. Com o intuito de diminuir o arrasto gerado pelo cabo umbilical, uma solução existente é a utilização de múltiplos robôs enfileirados ao longo do duto. Os robôs mantêm o cabo tensionado de forma a reduzir seu contato com as paredes.

### 2.1 INTERNAL PIPE INSPECTION ROBOT

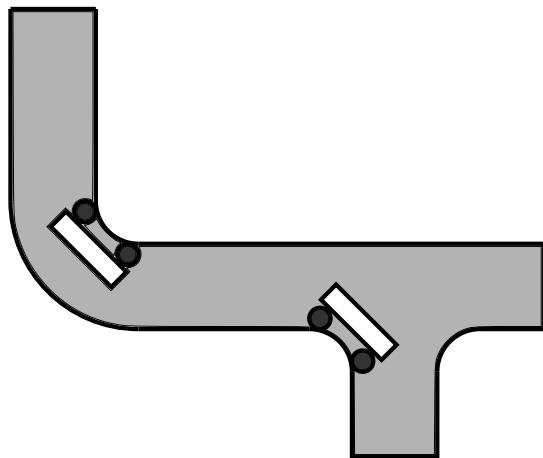
O artigo descreve um veículo para inspeção de tubulações de 150 mm a 600 mm de diâmetro com mecanismos de movimentação, comunicação e visão específicos. As rodas do robô são conectadas por um eixo magnético, o que possibilita o dispositivo andar em superfícies inclinadas e realizar curvas de pequeno raio dentro das tubulações, conforme o representado pela Figura 1.

Para desviar de obstáculos, o sistema de movimentação do veículo possui duas rodas, uma interna e outra externa. De forma intuitiva, este dispositivo esta representado na Figura 2.

O sistema de comunicação utilizado neste trabalho é constituído por um cabo de fibra óptica com 0,25 mm de diâmetro e 500 m de comprimento, enrolado em um carretel presente no veículo. Este cabo é utilizado para transmitir sinais de vídeo e controle entre o veículo e a estação de controle.

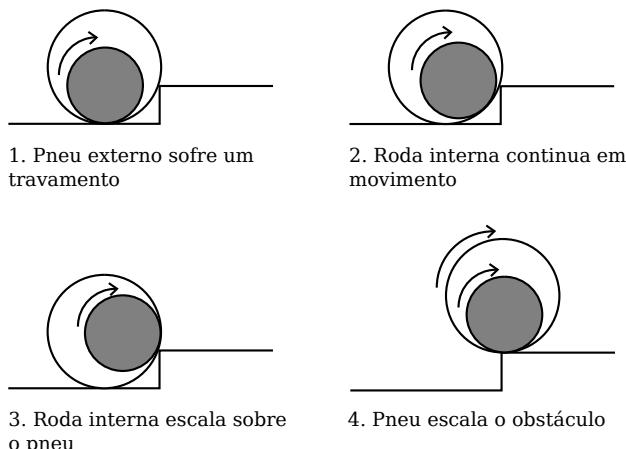
O sistema de filmagem é constituído por um prisma que sobrepõe duas imagens. Uma capturada pela parte frontal do veículo, utilizada para seu controle, e outra capturada pelo parte inferior, utilizada para a inspeção da tubulação.

Figura 1 – Mecanismo magnético de movimentação



Fonte: Kawaguchi et al. (1995)

Figura 2 – Mecanismo de movimentação para desviar de obstáculos

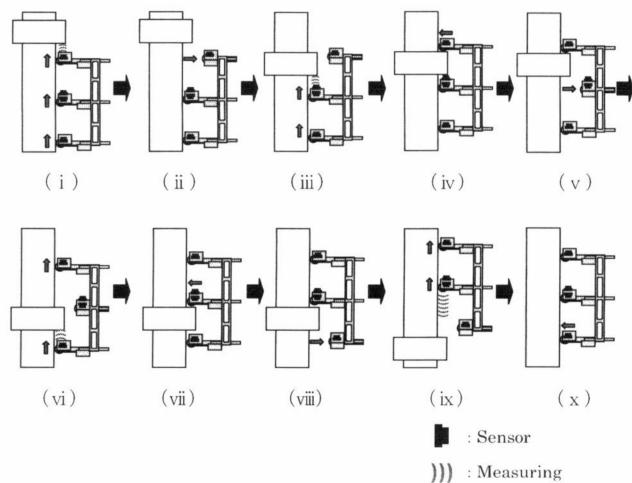


Fonte: Kawaguchi et al. (1995)

## 2.2 MECHANISMS OF AUTONOMOUS PIPE-SURFACE INSPECTION ROBOT WITH MAGNETIC ELEMENTS

Este artigo descreve um veículo para inspeção da superfície externa de tubulações. O robô é dividido em três partes que podem se mover uma em relação às outras, permitindo assim o desvio de obstáculos (Figura 3). Além disso, o sistema de movimentação é dotado de rodas magnéticas que mantêm o robô preso à superfície do tubo de aço carbono. O robô se comunica com a estação remota através de um cabo, pela interface RS-232C.

Figura 3 – Sistema de desvio de obstáculos



Fonte: Suzuki et al. (2006) © 2006, IEEE

### 2.3 ROBOTIC SYSTEMS FOR CLEANING AND INSPECTION OF LARGE CONCRETE PIPES

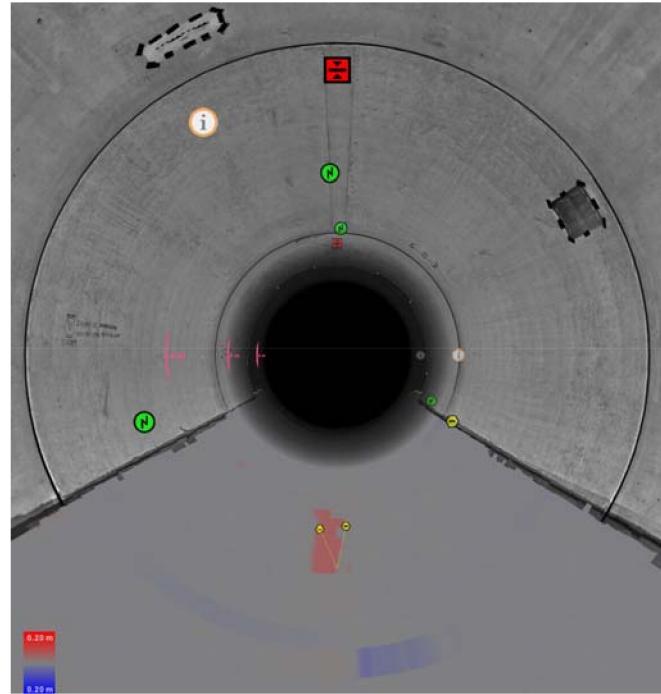
Este trabalho envolve um veículo para inspeção de dutos de concreto com diâmetro entre 1600 mm e 2600 mm. O robô é dotado de um sistema de visualização e inspeção composto por nove câmeras, um escâner ultrassônico, um sensor de detecção de infiltrações patenteado e sete sensores “light-section”. Este sistema é altamente sofisticado, envolvendo uma interface 3D que permite a identificação e visualização de falhas na superfície do duto de até 0,1 mm (Figura 4). Um cabo umbilical, contendo fios metálicos para a alimentação e cabos de fibra óptica para a comunicação, conecta o veículo à estação remota. Este cabo é reforçado e permite o arrasto manual do robô em caso de falha. O veículo tem uma massa igual a duas toneladas e opera normalmente durante o funcionamento do duto.

O controle de posição do veículo ocorre através de câmeras e inclinômetros. O robô possui ainda um sistema de limpeza para a superfície dos dutos, o qual é também sofisticado e robusto. Este sistema representa contudo pouca importância para o presente trabalho, o qual não envolve técnicas de limpeza.

### 2.4 A NEW APPROACH TO THE SEWER PIPE INSPECTION: FULLY AUTONOMOUS MOBILE ROBOT “KANTARO”

Este artigo promove inicialmente uma discussão acerca da dificuldade na mobilidade de robôs para inspeção de tubulação. Especificamente, trata-se da análise geral de robôs para a inspeção de tubulações de esgoto no Japão. Os principais pontos críticos citados no texto são: devido à necessidade de um cabo de alimentação e controle, os robôs comerciais de inspeção têm a mobilidade comprometida, principalmente em curvas. Estima-se que seja

Figura 4 – Interface 3D de inspeção



Fonte: Saenz et al. (2010) © 2010, IEEE

possível, com um robô de inspeção de rede de esgoto comercial, inspecionar apenas cerca de 300 metros por dia, com o custo estimado de 20 dólares por metro.

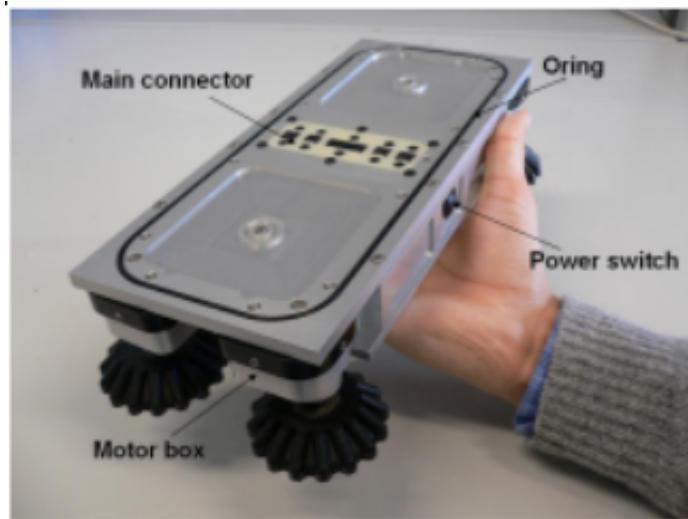
A proposição principal do artigo é introduzir um tipo de robô que seja autônomo e, portanto, não dependa da utilização de cabos, o que aumenta a eficiência e diminui o custo da inspeção. É feita uma análise dos diferentes níveis de autonomia possíveis em robôs de inspeção (não-autônomo, parcialmente autônomo e totalmente autônomo). É proposto um novo conceito de robô que, apesar de totalmente autônomo, seja robusto e confiável, baseado em um sistema com múltiplos sensores. O diâmetro das tubulações consideradas é entre 200 e 300 mm.

O robô proposto é constituído por 4 motores, alimentado por uma bateria de lítio-polímero e tem *uptime* de uma hora. A movimentação é feita por quatro rodas dispostas na horizontal (sistema “nSIR”, patenteado), conforme as Figuras 5 e 6.

São utilizados diversos sensores: laser, câmera *fisheye* e sensores infravermelhos. Os dados são coletados pelo robô durante a inspeção e armazenados em um disco rígido. Quando o robô é recuperado, esses dados são transferidos para um computador. O processamento é, portanto, feito *offline*.

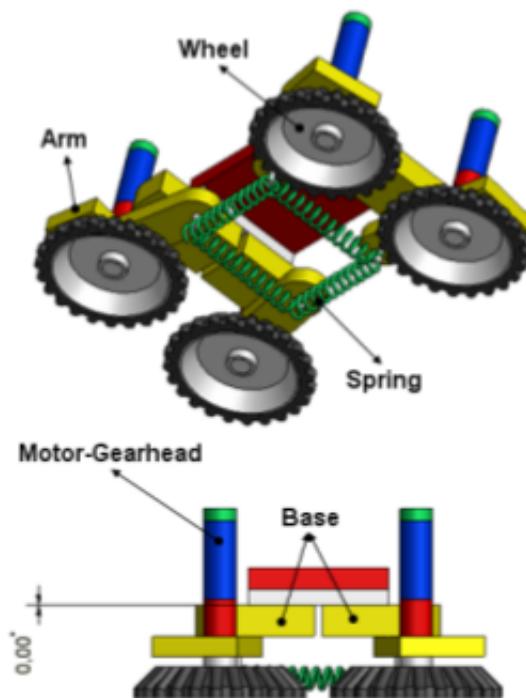
Outra característica interessante é que o robô possui um conjunto de LEDs através dos quais também é possível a comunicação em tempo real através de um cabo de fibra óptica (caso esse em que o robô deixa de ser totalmente e se torna parcialmente autônomo). Este

Figura 5 – Robô com quatro rodas horizontais



Fonte: Nassiraei et al. (2006) © 2006, IEEE

Figura 6 – Modelo do sistema de movimentação “nSIR”



Fonte: Nassiraei et al. (2007) © 2007, IEEE

cabo também é utilizado nos testes para resgatar o robô em situações de erro.

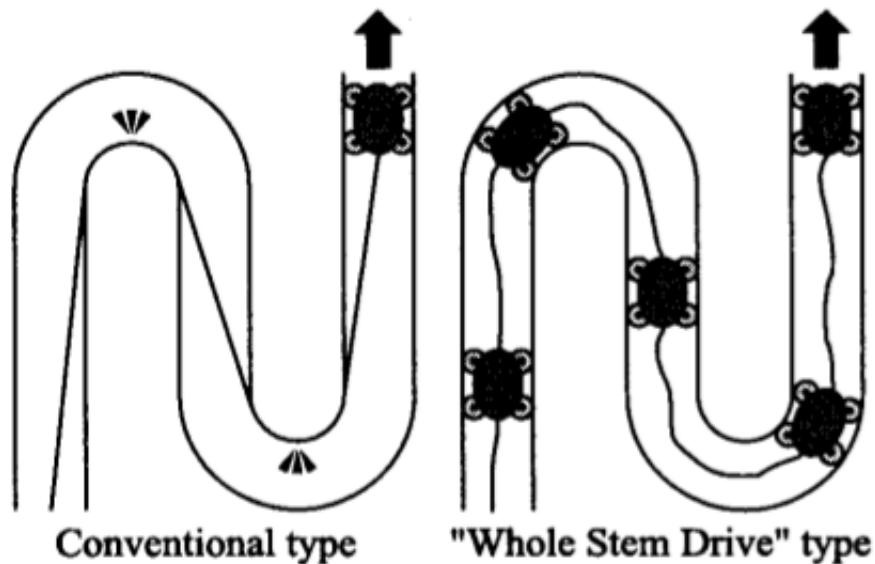
Nos testes em laboratório, os autores obtiveram sucesso em tubulações com 200-300 mm de diâmetro e até 400 m de comprimento.

## 2.5 DESIGN OF IN-PIPE INSPECTION VEHICLES FOR $\phi 25$ , $\phi 50$ , $\phi 150$ PIPES

A principal proposta do artigo é desenvolver um robô para inspeção que seja capaz de se locomover com eficiência em tubulações com um número relativamente grande de curvas. Inicialmente é feita uma categorização dos tipos de mecanismos de movimentação dos robôs existentes:

- Formas que utilizam a pressão do fluido na tubulação para movimentação;  
Problemas: a pressão do fluido pode variar, diferentes fluidos exibem diferentes características.
- Formas que utilizam varetas elásticas para movimentação;  
Exemplo: endoscópio industrial. Problemas: não se comportam bem quando há curvas ou a distância é muito longa.
- Formas que utilizam propulsão embarcada para movimentação.  
São os mais comuns. Podem ainda ser subcategorizados em: Com rodas, tipo *crawlers*, com “pernas” ou tipo “larva”.

Figura 7 – Conceito de “whole stem drive”



Fonte: Hirose et al. (1999) © 1999, IEEE

Segundo os autores, o tipo mais apropriado é o robô de inspeção com rodas com a adição de elementos elásticos que tensionem as rodas contra as paredes da tubulação. A fim de abordar o problema da mobilidade em curvas, o artigo propõe o conceito de "whole stem drive", que é ilustrado na Figura 7. A grande vantagem do uso deste conceito é que o arraste do cabo, que é crítico em longas distâncias, é diminuído de forma que cada robô

fique sujeito apenas ao arraste do comprimento de cabo até o robô anterior. A desvantagem dessa abordagem é que são necessários mais robôs do que a abordagem convencional de apenas uma unidade.

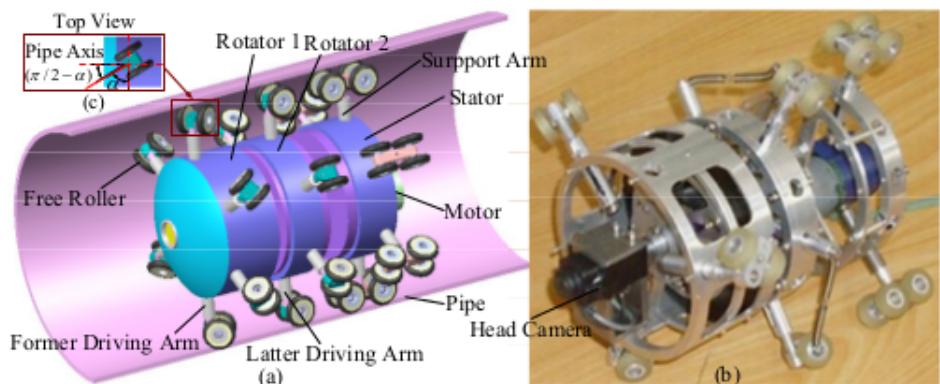
Os autores desenvolveram três robôs utilizando o conceito descrito acima, para tubulações de 25, 50 e 150 mm de diâmetro.

## 2.6 MULTIFUNCTIONAL MOBILE UNITS WITH A SAME PLATFORM FOR IN-PIPE INSPECTION ROBOTS

Uma abordagem mais generalista é proposta nesse artigo. A principal proposição do artigo é o desenvolvimento de uma plataforma multifuncional que possa ser usada em diferentes situações (*MMU - Multifunctional Mobile Units*). Segundo os autores, alguns dos problemas mais comuns no projeto de robôs para inspeção de tubulações são:

- Robôs são desenvolvidos para fins específicos. Mudanças nos requerimentos ou propósito dos robôs não são levadas em conta nos projetos;
- Em geral robôs possuem um número de motores proporcional ao número de graus de liberdade na movimentação, o que leva a uma massa e a um consumo de energia maiores bem como um aumento no custo.

Figura 8 – *Multifunctional Mobile Unit 1*



Fonte: Li et al. (2008) © 2008, IEEE

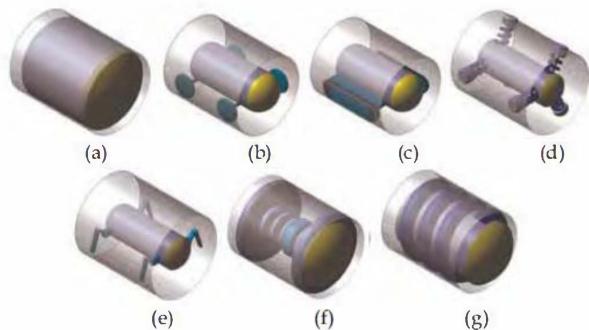
Para superar os problemas citados, os autores desenvolveram uma plataforma base (Figura 8) e construíram três protótipos (*MMU1-3*) utilizando essa mesma plataforma. O robô conta com apenas um motor e dois rotores. Chaveando-se os rotores, é possível alterar as características de propulsão do robô. O movimento é em espiral ao redor de um eixo no centro da tubulação.

Os três protótipos desenvolvidos são apropriados para a inspeção de tubulações com aproximadamente 200 mm de diâmetros e pesam por volta de 2 kg. Os protótipos desenvolvidos foram sujeitos a testes de laboratório, inclusive, com sucesso, em situação de mudança de diâmetro (200 - 190 mm). Apenas o protótipo 2 (*MMU2*) é dotado de uma câmera para detecção de imperfeições no interior da tubulação.

## 2.7 DEVELOPMENT OF IN-PIPE INSPECTION ROBOT: A REVIEW

Este trabalho foi publicado em 2012 e reúne soluções para inspeção interna de tubulações desenvolvidas nos últimos 20 anos. Estas soluções são divididas em classes, conforme a Figura 9, e suas vantagens e desvantagens são expostas.

Figura 9 – Classes de robôs para inspeção interna de tubulações



Fonte: Ismail et al. (2012) © 2012, IEEE

A necessidade de inspeção de tubulações é um problema recorrente na indústria. O desenvolvimento de robôs para essa tarefa constitui um amplo campo de pesquisa. Nesse trabalho foram analisadas algumas das soluções existentes, bem como identificados os problemas frequentemente encontrados nas diferentes abordagens.

Foram discutidos diferentes tipos de robôs: autônomos e tele-operados, com diferentes mecanismos de movimentação e técnicas de inspeção. O desenvolvimento de robôs para inspeção de tubulações concatena os avanços em diferentes áreas do conhecimento, como técnicas de comunicação, *computer vision* e inteligência artificial.

Com base nos trabalhos abordados, foram definidas as seguintes classes, que estão apresentadas na Figura 9, durante a definição da forma do robô: Com rodas (b), com lagarta (c), Wall-press (d), Caminhador (com pernas) (e), *Inchworm* (f) e Helicoidal/Parafuso (g).

### 3 PARÂMETROS E RESTRIÇÕES DO PROJETO

Durante a etapa de revisão bibliográfica, foi possível analisar as soluções existentes e os problemas comumente encontrados em projetos de robôs para inspeção de tubulações. A inspeção de tubulações é um problema recorrente na indústria e em muitas situações é imprescindível o uso de robôs, seja devido a condições de risco ou inacessibilidade. O comprimento, a forma, o diâmetro e o material da tubulação influenciam significativamente o projeto dos robôs, e por consequência, existe uma grande diversidade nos projetos revisados.

Devido a essa grande gama de possibilidades, faz-se necessário adotar alguns parâmetros para o projeto, a fim de propor uma solução adequada que atenda a essas restrições. Nas seguintes seções, serão discutidos pontos chave na execução do projeto, bem como propostos parâmetros para a realização deste trabalho.

#### 3.1 DIMENSÕES DAS TUBULAÇÕES E DUTOS

A geometria e comprimento da tubulação influencia diretamente nas dimensões e forma do robô, bem como no tipo de comunicação empregado. O material da tubulação também pode influenciar em outros parâmetros do projeto, como por exemplo, o sistema de movimentação.

Nesse projeto, serão consideradas tubulações horizontais, de qualquer material, com diâmetro superior a 400 mm. Os testes serão a princípio executados em tubulações retas ou com curvas de raio superior a um metro.

#### 3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO ROBÔ

As dimensões do robô devem ser compatíveis com as da tubulação a ser inspecionada. Para tanto, será utilizado um robô com dimensões máximas de 190x250x200 mm (LxCxA). A massa do robô está sujeita à escolha dos componentes embarcados. Uma das maiores influências é o tipo de fonte de energia empregado: caso opte-se pela energia embarcada, deve-se considerar o peso da bateria. Outro fator a ser considerado é que a massa do robô deve ser apropriada para gerar tração suficiente para vencer o atrito de arrasto do cabo umbilical, o que, por sua vez, depende da escolha do tipo do cabo (por exemplo, de cobre ou fibra ótica). O robô deve ter uma massa entre dois e três quilogramas.

### 3.3 CONDIÇÕES DE TRABALHO

As condições de trabalho estão relacionadas à presença de resíduos no interior dos dutos que possam interferir no funcionamento do veículo. Nesse projeto, serão consideradas tubulações secas, porém com 100% de umidade, bem como pequenos obstáculos (sujeiras, elementos de fixação etc).

### 3.4 ALCANCE OPERACIONAL DO ROBÔ

A definição do alcance do robô influencia o tipo de alimentação empregado, bem como o método de comunicação utilizado. Será considerado um alcance de 25 m.

### 3.5 AUTONOMIA

A determinação da autonomia do robô influencia na escolha, caso esteja presente, do sistema de baterias. Uma estimativa inicial é que para as tarefas de inspeção sejam necessárias aproximadamente 4 horas.

## 4 DEFINIÇÃO DA FORMA DO ROBÔ

Para o formato do robô, foram abordadas na revisão bibliográfica basicamente seis possibilidades:

1. *Helicoidal/Parafuso*: Este tipo de robô possui um movimento bastante flexível ao mesmo tempo em que não danifica a superfície devido à forma de movimentação. Seu mecanismo complexo torna o custo do projeto relativamente alto.
2. *Inchworm*: Possui uma excelente aderência à superfície dos dutos, podendo inspecionar tubos verticais. A alta força de arrasto pode danificar a superfície do tubo e este tipo de robô apresenta dificuldades para se movimentar em curvas. Além disso, possui um projeto não trivial que pode apresentar custos elevados.
3. *Wall-press*: Possui um mecanismo mecânico de dificuldade média. A força gerada sobre as paredes dos dutos pode danificá-lo. Em situações onde o diâmetro do tubo aumenta, o robô pode sofrer uma diminuição nas forças de atrito com o tubo e escorregar.
4. Com rodas: Sistema mais simples de movimentação, com projeto de complexidade inferior e custo, em geral, relativamente baixo. É a técnica mais utilizada nos projetos encontrados durante a revisão bibliográfica.
5. Com lagarta: Quando comparado ao sistema de movimentação com rodas, possui maior aderência a superfície do tubo, porém, o projeto se torna mais complexo com custos mais elevados.
6. Caminhador (com pernas): Apresenta um mecanismo bastante complexo com elementos de custo relativamente alto. Suas vantagens são a capacidade de escalar tubos verticais e a possibilidade de gerar poucos danos na superfície dos tubos.

Com a finalidade de selecionar um destes tipos de robô para ser aplicado ao projeto, foi utilizada uma matriz de decisão envolvendo os seguintes parâmetros:

1. Custo do projeto (Peso 5)
2. Complexidade do projeto (Peso 4)
3. Possibilidade de danificar superfícies (Peso 1)
4. Flexibilidade para realizar curvas (Peso 3)
5. Aderência à superfície dos tubos (Peso 3)

Para cada parâmetro foi estabelecido um peso que pode variar de um a cinco. Quanto maior o peso, maior a importância do parâmetro ao projeto. Tomando em conta cada parâmetro, foram definidas notas, também variando de um a cinco, para cada tipo de robô. Estas notas foram atribuídas com base no trabalho desenvolvido por Ismail et al. (2012). Através das médias ponderadas das notas de cada robô, foi selecionado o modelo a ser adotado no projeto. Estes resultados estão apresentados na Tabela 1, justificando assim, com nota igual a 3.875, a escolha do sistema de movimentação por rodas.

Tabela 1 – Notas atribuídas a cada formato de robô.

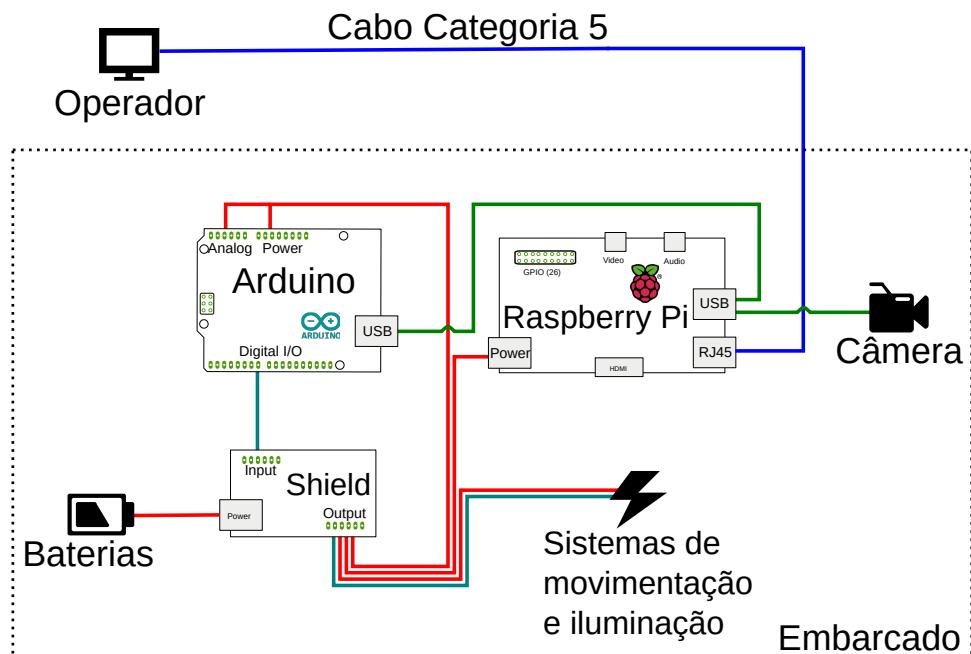
Parâmetros\Formato	1	2	3	4	5	6
1	1	2	2	5	4	1
2	1	2	3	5	4	2
3	5	1	2	2	3	4
4	5	1	3	3	2	4
5	5	5	3	2	4	4
Média ponderada:	2.75	2.3125	2.625	3.875	3.5625	2.5625

## 5 SISTEMA ELETROELETRÔNICO

Como microcontrolador principal será utilizada a placa Raspberry Pi modelo B, com 512 MB de memória RAM. Esta placa é dotada de um *System-on-a-chip* Broadcom BCM2835, com um processador ARM1176JZFS, cujo clock é igual a 700 Mhz. Além disso, este processador conta também com uma unidade de processamento gráfico Videocore 4 e 8 portas de entrada/saída digitais disponíveis para uso.

A placa Raspberry Pi permite a utilização do sistema operacional GNU/Linux, possibilitando assim o emprego de grande parte dos softwares desenvolvidos para este sistema. Conforme o descrito na próxima seção, através desta placa será realizada a comunicação com a estação remota. Nesta placa também será conectada uma câmera USB e uma placa Arduino Duemilanove, cuja função será interpretar sinais seriais gerados pela placa Raspberry Pi. Estes sinais contêm comandos de ativação dos atuadores do robô. A Figura 10 ilustra o sistema eletroeletrônico do projeto.

Figura 10 – Sistema eletroeletrônico do robô.



Fonte: Produção própria

### 5.1 SELEÇÃO E DESCRIÇÃO DA TÉCNICA DE COMUNICAÇÃO

A troca de comandos de controle e de sinais de video entre o veículo inspecionador e a estação remota ocorre através de uma técnica de comunicação. A princípio duas alternativas são levadas em conta, a comunicação sem fio, por meio de ondas de rádio, e a comunicação através de um cabo umbilical, com fios de cobre ou fibra óptica. Conforme o observado na

literatura, devido às demandas do projeto de robustez e alcance do robô, o cabo umbilical é a solução padrão para cumprir essa tarefa.

O cabo de cobre é em geral a solução mais barata quando comparado com a utilização de fios de fibra óptica. Além disso, esses cabos possuem uma resistência mecânica relativamente maior que a dos fios de fibra, tolerando assim piores condições de operação. Em contrapartida, os fios de fibra permitem maiores amplitudes de operação: forças de arrasto menores são geradas pela massa inferior dos fios, e os sinais transmitidos pela fibra possuem uma menor atenuação por metro quando comparados com os sinais transmitidos pelos cabos de cobre.

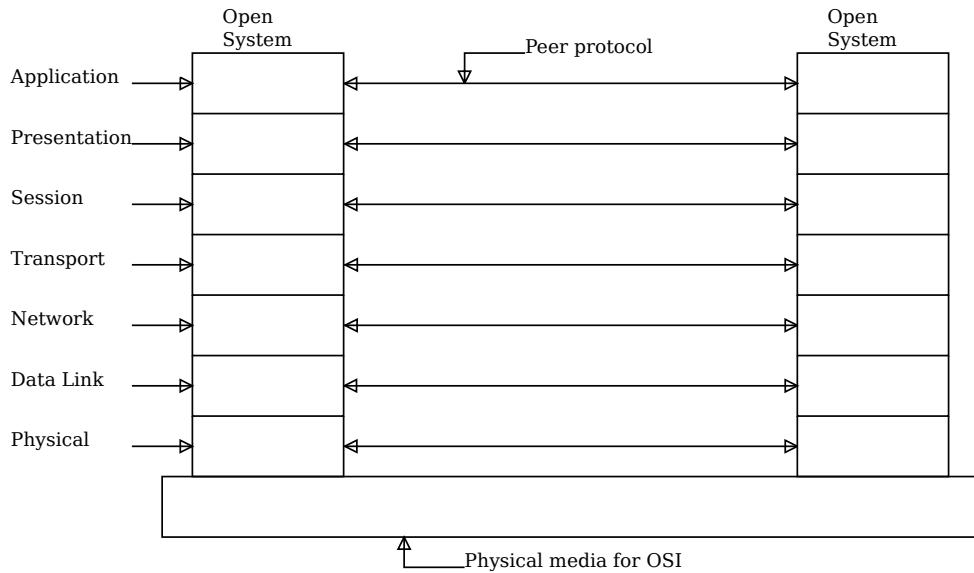
Independentemente do meio de comunicação, foi definido o modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) ISO (1994) como técnica de comunicação. Através desse modelo é possível garantir uma comunicação suficientemente robusta entre a estação de controle e o veículo de inspeção. Devido à sua popularidade, componentes eletrônicos que satisfazem às normas estabelecidas por este modelo são facilmente encontrados. Rotinas de software de código aberto que implementam estas normas também são facilmente acessíveis, facilitando assim a implementação da interface de controle. Como modelo de camada física do padrão OSI, será adotada o tipo 100BASE-X definido em IEEE (2008). Esta norma estabelece padrões tanto para comunicação através de fibra óptica quanto para comunicação através de fios de cobre. Por meio do cabo de cobre, é possível estabelecer uma taxa de transmissão de dados de 100 Mb/s em uma distância de até 100 m. Este padrão também possui uma aplicação extremamente popular, facilitando a obtenção de elementos de hardware para o projeto. A grande maioria dos notebooks produzidos nos últimos cinco anos possui uma interface compilando com este padrão.

Por meio dos padrões apresentados acima se torna possível a implementação de um sistema de comunicação que funcione tanto através da fibra óptica quanto através do cabo de cobre. Contudo, foi constatado durante o trabalho que o projeto de um hardware eletrônico para comunicação através de fibra-óptica é bastante complexo e demanda de conhecimentos específicos na área de sistemas eletrônicos. Os autores realizaram uma tentativa de implementação de tal hardware, porém não obtiveram sucesso. Os esforços dedicados ao projeto deste hardware estão documentados no Apêndice D.

### 5.1.1 Modelo OSI

O modelo OSI normaliza as funções de comunicação entre sistemas através de suas abstrações em sete camadas básicas. As camadas de aplicação, apresentação, sessão, transporte, rede, enlace e física (Figura 11) possuem uma série de elementos implementados em hardware e software. Estes elementos se encontram disponíveis no mercado e na internet, viabilizando assim seu emprego a sistemas de comunicação.

Figura 11 – Sete camadas do modelo de referência OSI



Fonte: ISO (1994)

Como camada física foi adotado o tipo 100BASE-X, pertencente à família 100BASE-T.

### 5.1.2 Camada física 100BASE-X

O tipo de camada física 100BASE-X é extremamente popular, permitindo um fluxo de dados de 100 Mb/s com uma boa robustez. As subvariantes 100BASE-TX e 100BASE-FX definem normas para comunicação respectivamente sobre fios de cobre e fios de fibra óptica. A arquitetura desta camada é representada pela família 100BASE-T (IEEE, 2008).

Neste trabalho pretende-se utilizar a placa Raspberry-Pi como controlador dos dispositivos eletromecânicos. Esta placa já possui, através do componente LAN9512 (SMSC, 2012), suporte á camada física 100BASE-TX.

Interessante notar que, para o tipo 100BASE-TX, são utilizados dois pares de fios de cobre como meio de comunicação. Um destes pares é dedicado á transmissão de dados, enquanto o outro é dedicado à recepção. A subcamada PMD (*Physical Medium Dependent*) converte os sinais a serem transmitidos, codificados em NRZI (*Non-Return-to-Zero Inverted*), para o tipo MLT-3. Neste tipo de sinal são utilizados três níveis de tensão (positivo, negativo e zero), que variam entre  $-V_{out}$  e  $V_{out}$ , sendo

$$950 \text{ mV} \leq V_{out} \leq 1050 \text{ mV}$$

Os sinais recebidos, codificados em MLT-3, são decodificados para NRZI.

A comunicação entre a estação de controle e o veículo será realizada através da camada física 100BASE-TX. Para isto, ambas as partes serão conectadas por um cabo de cobre do tipo categoria 5.

## 5.2 ESTIMATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO

Com o objetivo de analisar a aplicabilidade de baterias ao projeto, foi realizada uma breve estimativa do consumo energético. A potência demandada por cada componente está apresentada na Tabela 2. Interessante notar que o consumo energético da câmera está incluído no consumo da placa Raspberry Pi.

Tabela 2 – Estimativa do consumo energético dos componentes do robô.

Componente	Tensão	Corrente	Consumo estimado
Placa Raspberry Pi	5 V	775 mA	3,50 W
Sistema de movimentação			4,50 W
Sistema de iluminação	5 V	190 mA	0,95 W

Para suprir o consumo total de 9,33 W durante 4 horas, são necessários 134,4 kJ. De uma fonte de 5 V seria necessário um total de energia igual a 7464 mAh. Esta quantidade de energia torna viável o emprego de baterias do tipo lítio-polímero ao projeto.

## 6 PROJETO DOS COMPONENTES MECÂNICOS

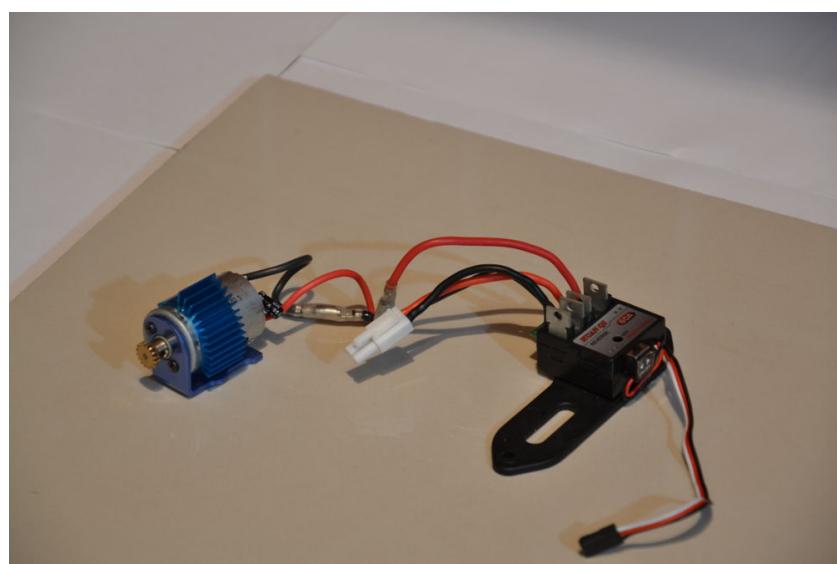
O projeto dos componentes mecânicos foi baseado em um chassis adquirido pela equipe (Figura 12) juntamente com o sistema de tração. Este chassis possui dimensões iguais a 240x185x95 mm (CxLxA) e massa igual a 770 g, contando com sistemas de tração nas quatro rodas, suspensão e esterço. A interface dos sistemas de movimentação com a eletrônica embarcada ocorre através de drivers também já presentes, os quais recebem sinais do tipo PWM.

Figura 12 – Chassis utilizado no projeto



Fonte: Produção própria

Figura 13 – Sistema de tração

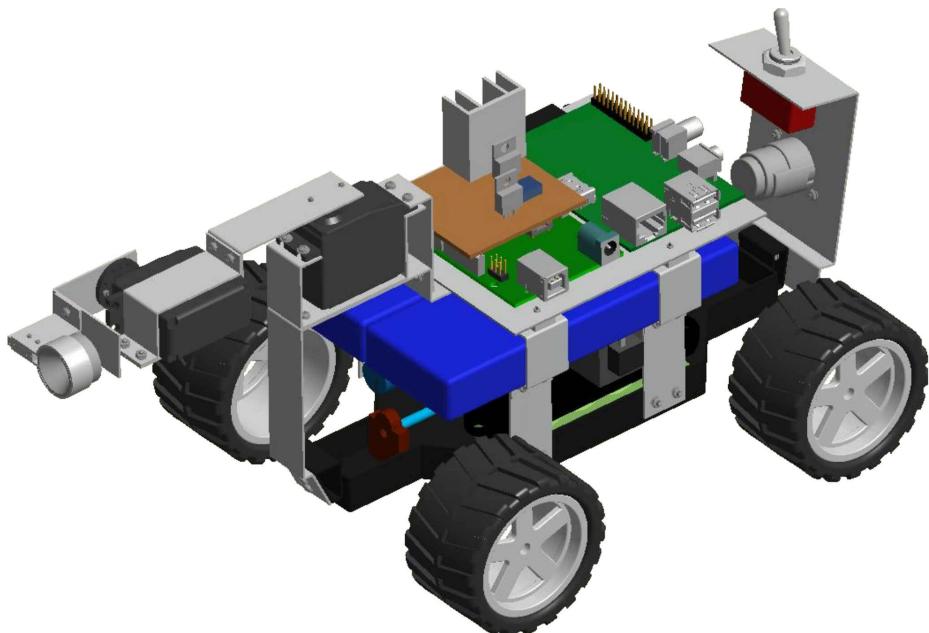


Fonte: Produção própria

Os componentes adicionados a este chassis com a finalidade de construir o robô estão apresentados na Figura 14. Nesta figura é apresentado o projeto do veículo em um software de CAD. No Apêndice A estão apresentados os desenhos individuais de cada peça fabricada ou adquirida.

A funcionalidade do chassis com estes componentes foi verificada através da adição de uma carga igual a um quilograma ao mecanismo. O chassis foi capaz de subir um plano com inclinação igual a vinte graus, utilizando apenas seu motor elétrico, sem apresentar problemas. Além disso, foi também realizado um teste com um cabo categoria 5 com comprimento de 25 m. O veículo foi capaz de arrastar o cabo.

Figura 14 – Projeto do veículo em CAD



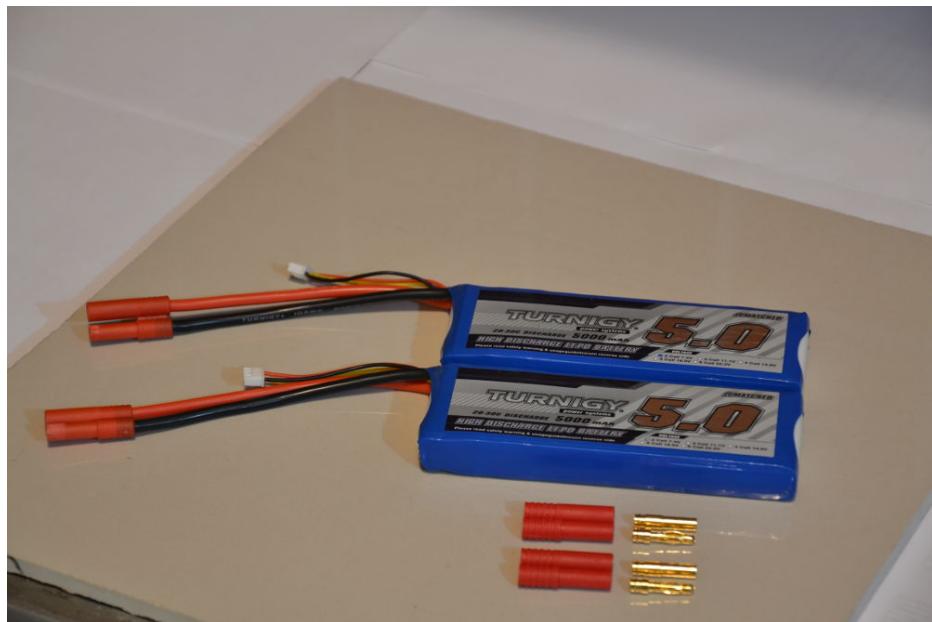
Fonte: Produção própria

## 7 PROJETO DA ELETRÔNICA

### 7.1 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O veículo será alimentado por duas baterias Turnigy de polímero de lítio associadas em paralelo, constituindo uma fonte de 7.4 V com capacidade de 10 Ah. Estas baterias estão apresentadas na Figura 15, ao lado dos conectores adquiridos separadamente.

Figura 15 – Baterias de polímero de lítio.



Fonte: Produção própria

### 7.2 SHIELD DO ARDUINO

Com a finalidade de conectar componentes eletrônicos apresentados na Figura 10, foi desenvolvido um *shield* para o Arduino que é responsável pelas seguintes funções:

1. Garantir uma fonte de tensão de 5V e 1.5A para a placa Raspberry Pi.
2. Garantir uma fonte de tensão de 5V e 3A para os três servo motores.
3. Realizar a conexão dos três servo motores e do driver do motor principal com quatro portas PWM do Arduino.
4. Disponibilizar uma chave de acionamento para ligar e desligar o veículo.
5. Disponibilizar um sistema de acionamento controlado dos servo motores, para garantir sua alimentação apenas quanto existe uma entrada PWM válida.

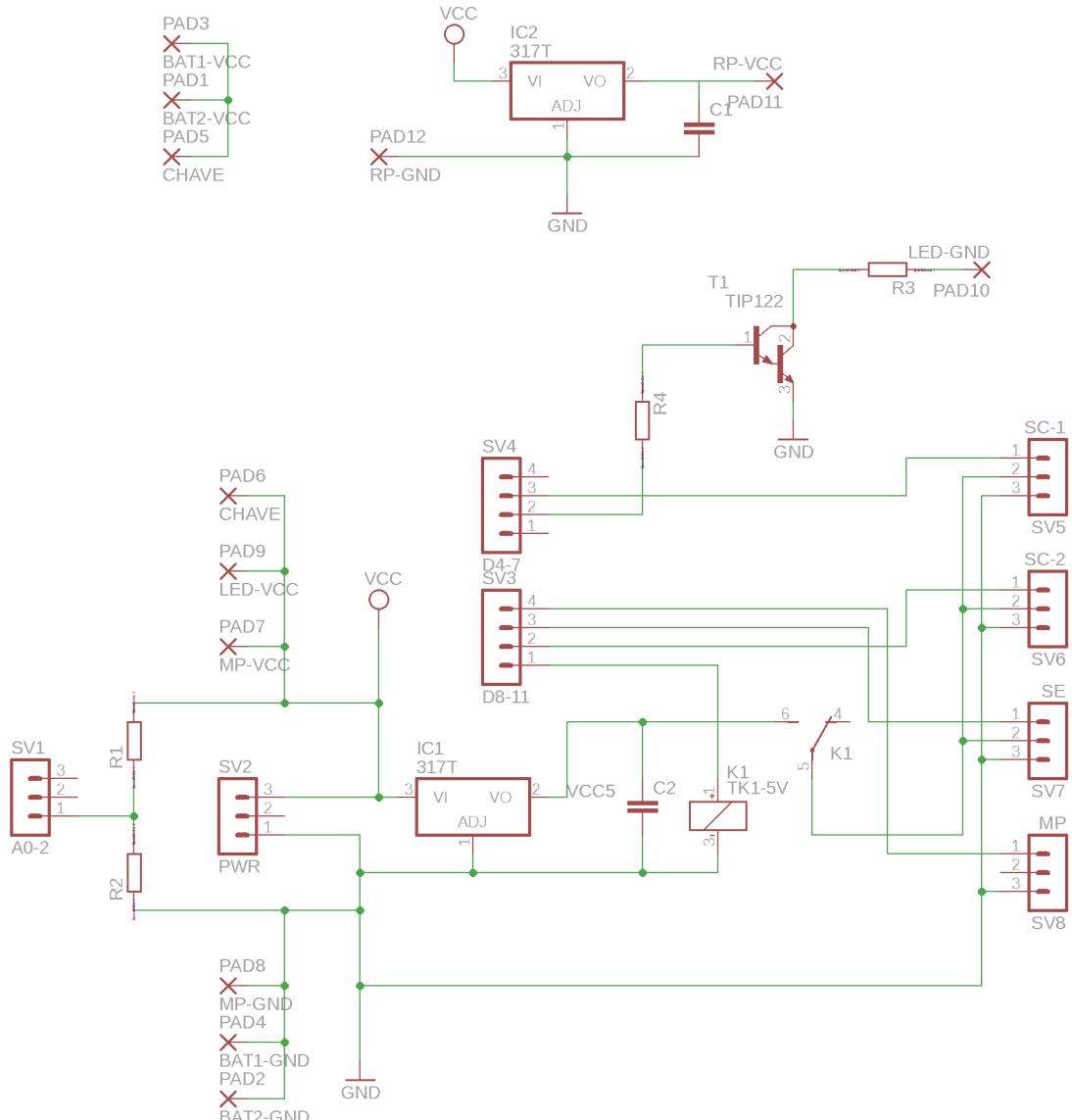
6. Realizar a conexão do driver do motor principal e do Arduino com as baterias.
7. Disponibilizar o controle do sistema de iluminação.
8. Disponibilizar um sistema de amostragem da tensão nas baterias.

O esquemático da placa responsável por executar estas funções está apresentado na Figura 16. A partir desse esquemático foi realizado o desenho da placa de circuito impresso descrito no Apêndice C. A este circuito foram adicionados dois reguladores de tensão LM1085<sup>1</sup> de 5V, um relê de estado sólido TK1-5V, um transistor darlington TIP102<sup>2</sup>, um resistor de  $220\Omega$ , dois resistores de  $470\Omega$ , um resistor de  $1k\Omega$  e dois capacitores de  $10nF$ . O relê é utilizado para controlar a alimentação dos servo motores e o transistor darlington é utilizado para o controle do sistema de iluminação. Os resistores de  $470\Omega$  são utilizados no sistema de amostragem da tensão nas baterias, e os outros resistores são associados ao transistor darlington. Os capacitores são posicionados nas saídas dos reguladores.

---

<sup>1</sup> Apresentado no esquemático como 317T

<sup>2</sup> Apresentado no esquemático como TIP122

Figura 16 – Esquemático do *shield* do Arduino

Fonte: Produção própria

## 8 FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO

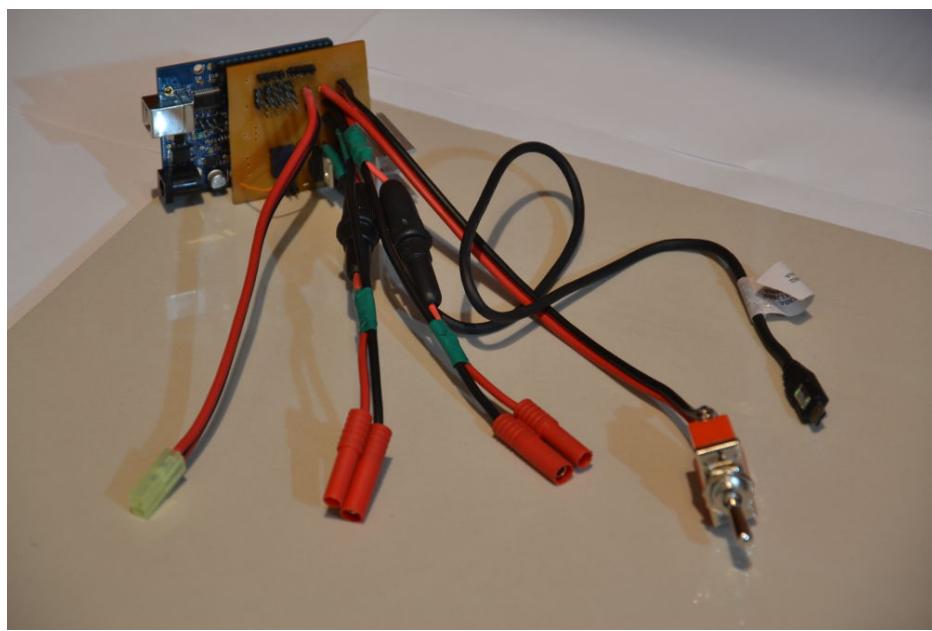
### 8.1 HARDWARE ELETRÔNICO

O *shield* fabricado está apresentado na Figura 17. Conforme observado, esta placa é conectada diretamente ao Arduino. Da esquerda para a direita, é possível visualizar os cabos com as seguintes funções:

1. Cabo para alimentação do driver do motor principal.
- 2 e 3. Cabos para conexão das baterias.
4. Chave de acionamento.
5. Cabo para alimentação do Raspberry Pi.

Aos cabos para conexão das baterias foram adicionados fusíveis de 10A para proteção contra sobrecarga. Na placa foram ainda instalados pinos para conexão dos servo-motores, do driver do motor principal (sinal PWM) e do Arduino.

Figura 17 – *Shield* do Arduino

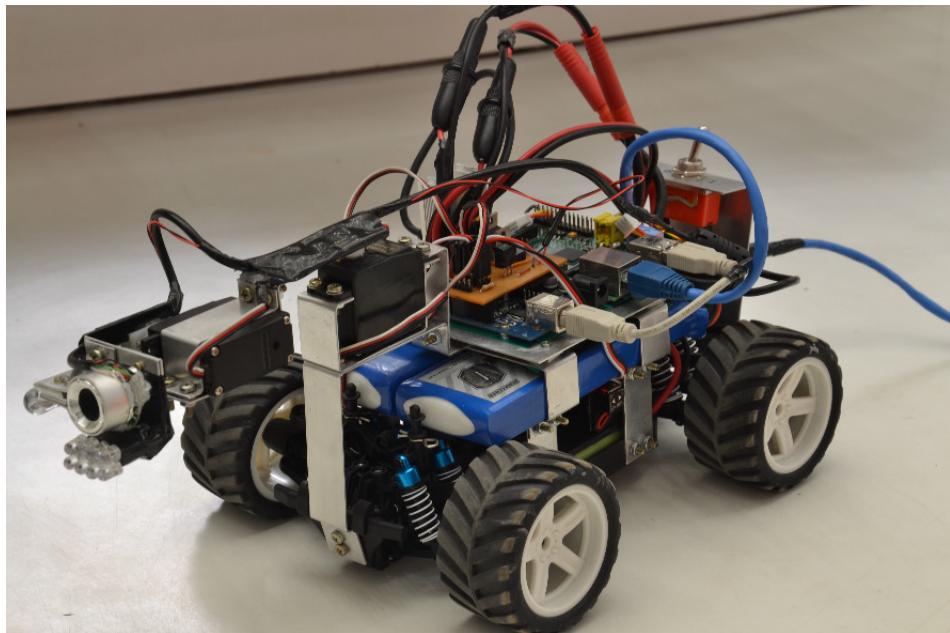


Fonte: Produção própria

## 8.2 COMPONENTES MECÂNICOS

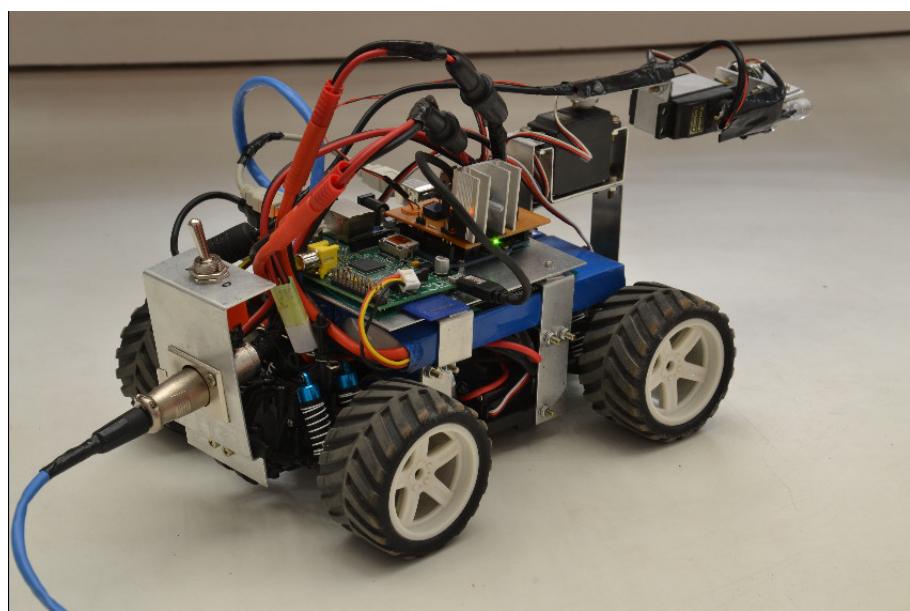
Os componentes mecânicos foram fabricados conforme as especificações de projeto estabelecidas. O protótipo finalizado do robô pode ser visto nas Figuras 18 e 19. É interessante comparar o resultado obtido com o desenho em CAD da Figura 14.

Figura 18 – Detalhe frontal do protótipo do robô



Fonte: Produção própria

Figura 19 – Detalhe traseiro do protótipo do robô



Fonte: Produção própria

## 9 PROJETO DO SOFTWARE DE CONTROLE

Dadas as características de operação do robô, o software de controle foi projetado baseando-se em uma arquitetura do tipo cliente-servidor. A seguir serão discutidas as escolhas feitas a respeito do projeto do cliente e do servidor. A seção 9.3 oferece uma visão geral sobre a arquitetura projetada.

### 9.1 SERVIDOR

Uma das vantagens em empregar um controlador que ofereça suporte a um sistema operacional completo é a possibilidade de escrever programas em linguagens de programação de mais alto nível. Esse fato permite que o desenvolvimento seja significantemente agilizado. Como boa parte das decisões de projeto de software, essa abordagem também possui um lado negativo: perde-se a possibilidade de um controle mais refinado da operação do hardware, pois entende-se que há mais abstrações da camada física quanto maior o nível da linguagem empregada.

Especificamente para o caso do hardware e da linguagem empregada, a decisão por uma linguagem interpretada mostrou-se bastante vantajosa, uma vez que a plataforma utilizada é bastante consolidada, tanto academicamente quanto na indústria. O servidor, que será executado pelo hardware embarcado no robô, é escrito em Python, que, conforme citado, é uma linguagem madura e empregada atualmente nas mais diversas tarefas. Além de oferecer rotinas de sincronização de *threads*, existem bibliotecas igualmente consolidadas que oferecem funções para captura de imagens e envio de dados seriais para os drivers dos atuadores.

O servidor pode ser dividido em duas tarefas que funcionam paralelamente:

- Tarefa de captura de imagens

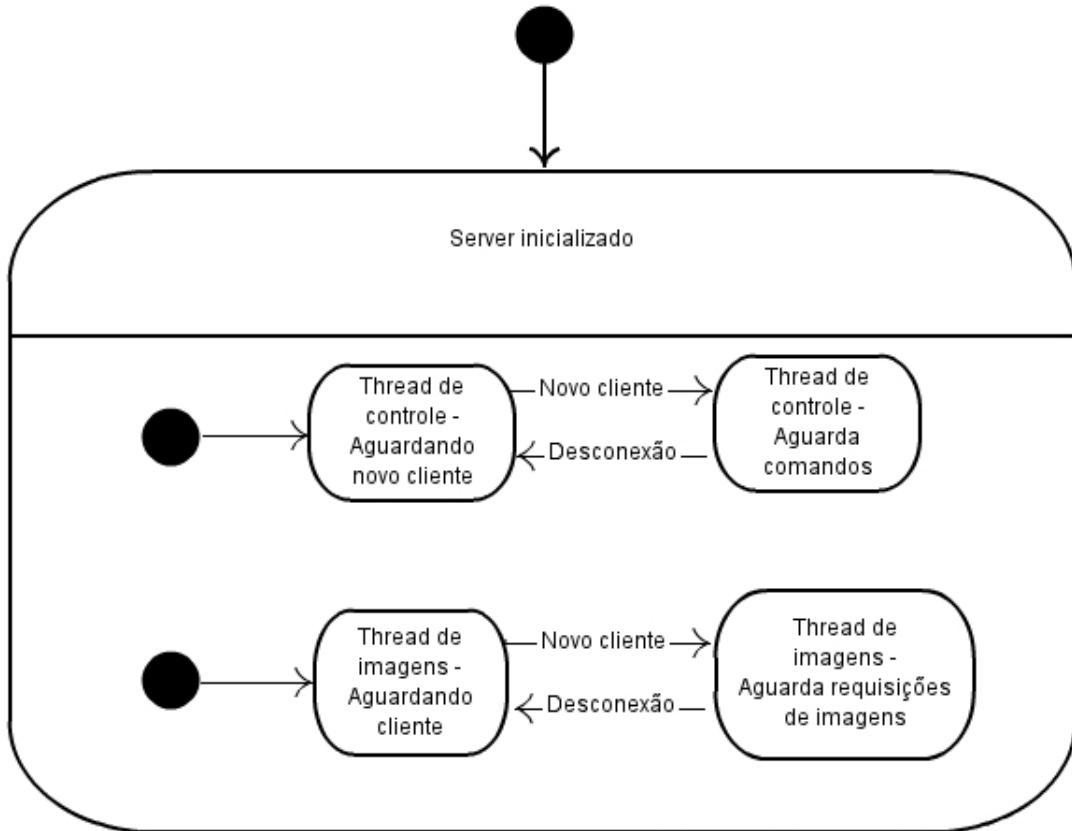
É responsável por aguardar requisições do cliente, capturar *frames* da câmera e enviar as imagens ao cliente.

- Tarefa de controle

É responsável por aguardar comandos de controle do cliente, como comandos de movimentação, controle de iluminação e requisições de status de bateria, e responder apropriadamente.

A Figura 20 representa o comportamento das duas tarefas descritas em um diagrama de estados do servidor.

Figura 20 – Máquina de estados do servidor



Fonte: Produção própria

## 9.2 CLIENTE

A escolha da arquitetura do cliente foi baseada em algumas variáveis de projeto. Especificamente, foram determinados os seguintes requisitos:

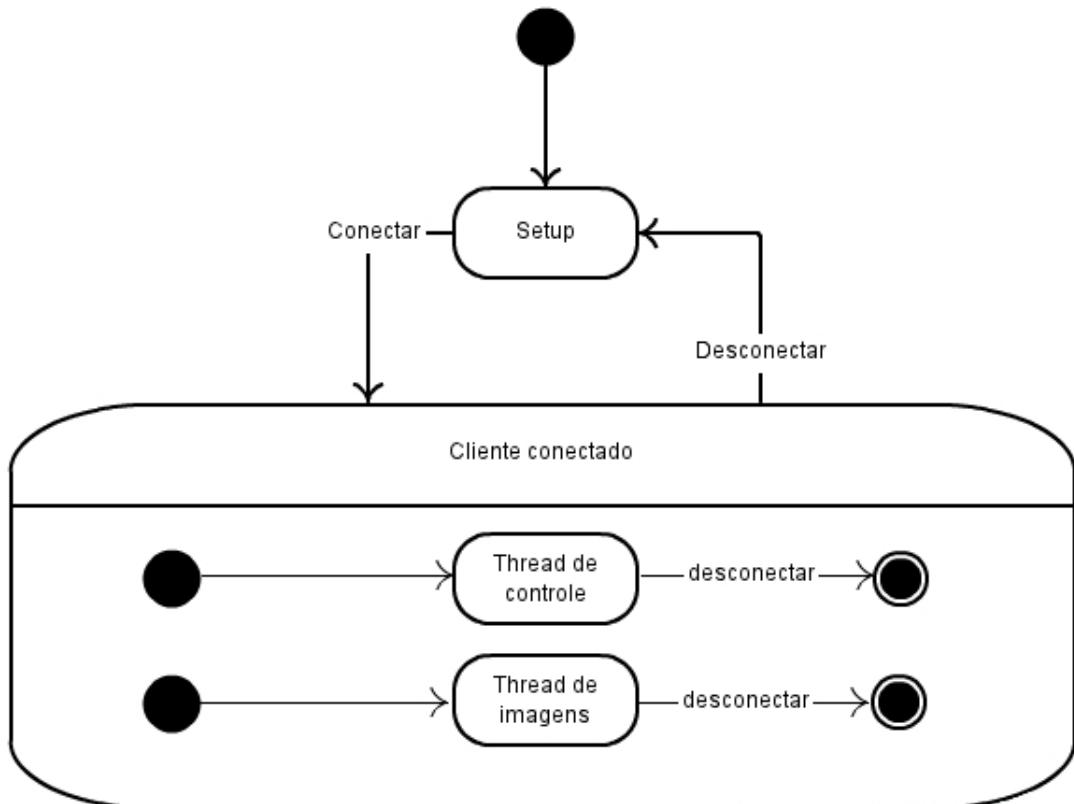
- Portabilidade entre diferentes sistemas operacionais;
- Presença de uma interface gráfica para operação do robô;
- Presença de mecanismos para programação com *threads*.

A plataforma Java se mostrou adequada aos requisitos propostos. A presença da máquina virtual (JVM) possibilita uma abstração do sistema operacional, o que faz o programa desenvolvido ser instantaneamente portável entre diferentes sistemas. Além disso, há suporte para a criação de interfaces gráficas e funções para sincronização de tarefas. Finalmente, essa plataforma é também consolidada na indústria, o que demonstra a confiabilidade da escolha.

A arquitetura do cliente é semelhante a do servidor, porém com uma tarefa adicional, responsável pela apresentação gráfica (representada na Figura 22 pela sigla “UI”) e pela captura do *inputs* do operador, como eventos de teclado e mouse.

A Figura 21 representa o comportamento das duas tarefas descritas em um diagrama de estados do servidor.

Figura 21 – Máquina de estados do cliente



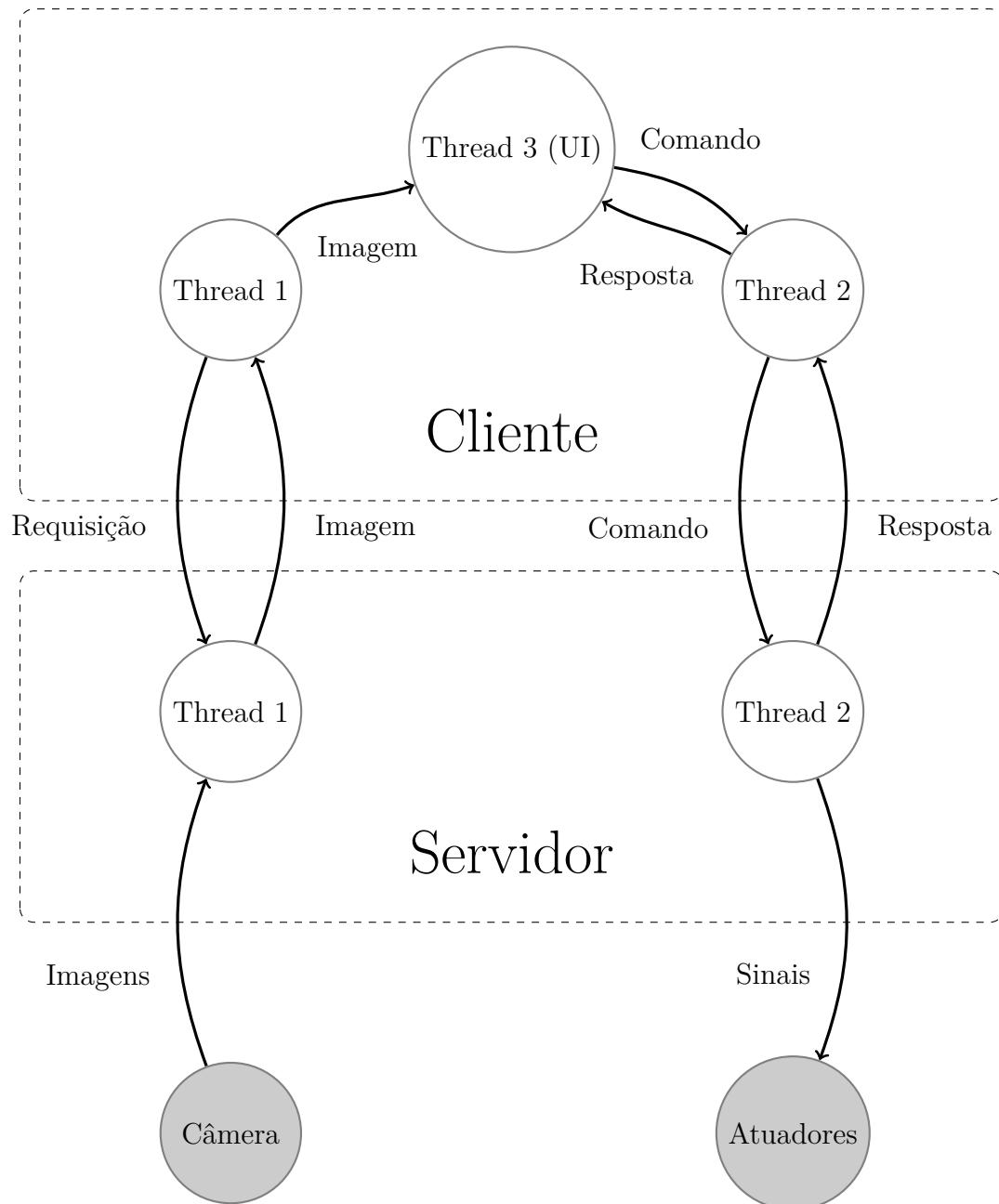
Fonte: Produção própria

### 9.3 VISÃO GERAL

Os comportamentos individuais das tarefas de controle e imagem do cliente e do servidor foram descritos nas seções 9.1 e 9.2. É interessante representar em um diagrama o comportamento dessas tarefas uma vez que a conexão é estabelecida com sucesso. A Figura 22 oferece uma visão geral da interação entre os componentes descritos.

Usando como referência a visão superficial oferecida pela Figura 22, serão descritos na seção 9.4 os protocolos de fato usados na comunicação entre as tarefas, bem como serão ilustradas em diagramas sequenciais nas Figuras 23 e 24 as interações entre os diferentes elementos de software do robô.

Figura 22 – Visão geral da arquitetura do software, conforme descrita nas seções anteriores



Fonte: Produção própria

## 9.4 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO

Para coordenar as diferentes tarefas do robô ilustradas no diagrama da Figura 22 foi desenvolvido um simples protocolo de comunicação entre o cliente e o servidor. Esse protocolo define como serão as mensagens trocadas entre esses dois componentes e como o robô deve responder às diferentes requisições do operador.

Os comandos enviados pela tarefa de controle do cliente à tarefa de controle do servidor (*Threads 2* da Figura 22) possuem todos 3 bytes. Esses comandos são responsáveis pela movimentação do robô, controle da câmera, controle de iluminação e monitoramento da bateria. A Tabela 3 demonstra o protocolo de controle.

Tabela 3 – Protocolo de comunicação para as tarefas de controle

Byte 1	Byte 2	Byte 3	Descrição
0x00	ANG	VEL	Controle de velocidade. ANG é um valor entre 0x00 e 0xFF que representa o ângulo das rodas da esquerda para a direita em relação à direção frontal do robô. 0x00 representa a maior inclinação das rodas para a esquerda e 0xFF, para a direita. Analogamente, VEL é a velocidade do robô na direção frontal. VEL = 0x00 significa a velocidade mínima e VEL = 0xFF, máxima.
0x01	PAN	TILT	Controle da posição da câmera. PAN e TILT definem respectivamente a posição horizontal e vertical.
0x02	0x00	0x00	Requisição do status das baterias. A resposta do servidor possui o valor percentual de carga atual das baterias.
0x03	VAL	0x00	Controle da iluminação. VAL = 0xFF representa a iluminação com o brilho máximo.

Todas as respostas do servidor são “ecos” das mensagens enviadas, exceto para o caso de monitoramento das baterias, no qual o segundo byte da resposta contém o atual percentual de carga.

A comunicação entre as tarefas de captura de imagem é igualmente simples. Porém, há uma diferença substancial na resposta do servidor à requisição de uma nova imagem. Essa resposta inclui a imagem capturada codificada em JPEG e possui, portanto, tamanho variável. A mensagem enviada do cliente ao servidor para a requisição de imagem possui apenas um byte, com o valor de 0x04. A resposta, conforme mencionado, possui um comprimento variável e apresenta o formato descrito na Tabela 4.

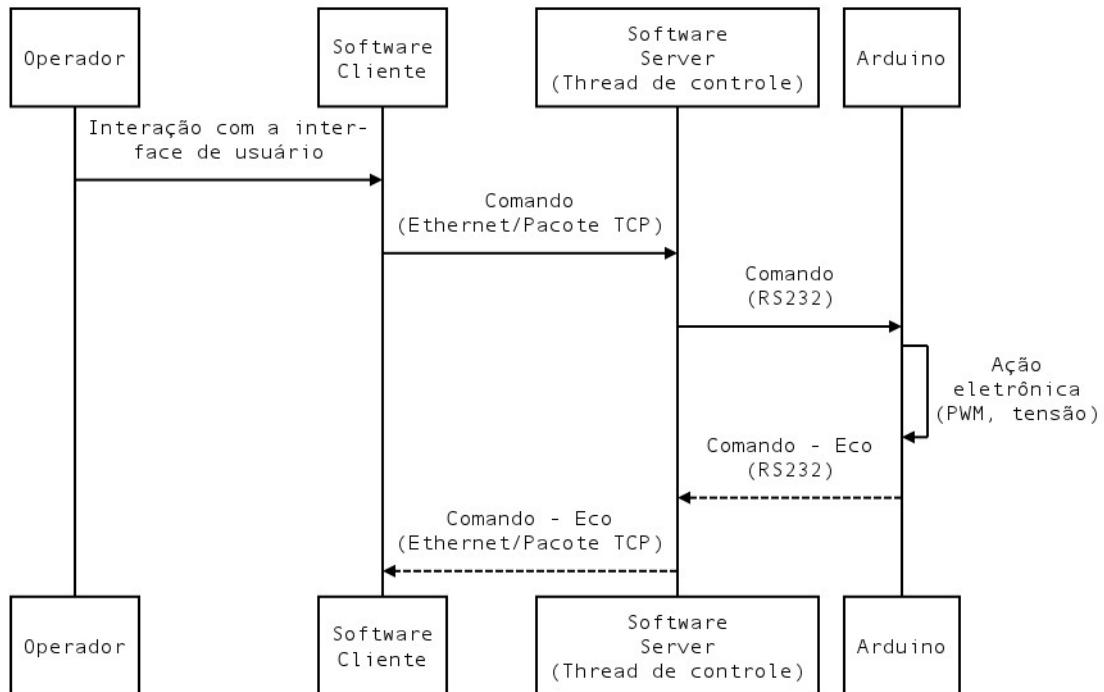
Tabela 4 – Resposta do servidor a uma requisição de imagem feita pelo cliente

Bytes 1:8	Bytes 9:n
Inteiro de 64 bits (sem sinal) representando o tamanho da imagem em bytes	Imagen (em formato JPEG) com tamanho em bytes definido pelos bytes 1:8

### 9.4.1 Comunicação entre as tarefas de controle

A comunicação entre as tarefas de controle acontece de acordo com o protocolo especificado na Tabela 3. A Figura 23 ilustra em um diagrama sequencial a interação entre o operador, as tarefas de controle e o acionamento feito pelo eletrônica embarcada.

Figura 23 – Comunicação entre as tarefas de controle

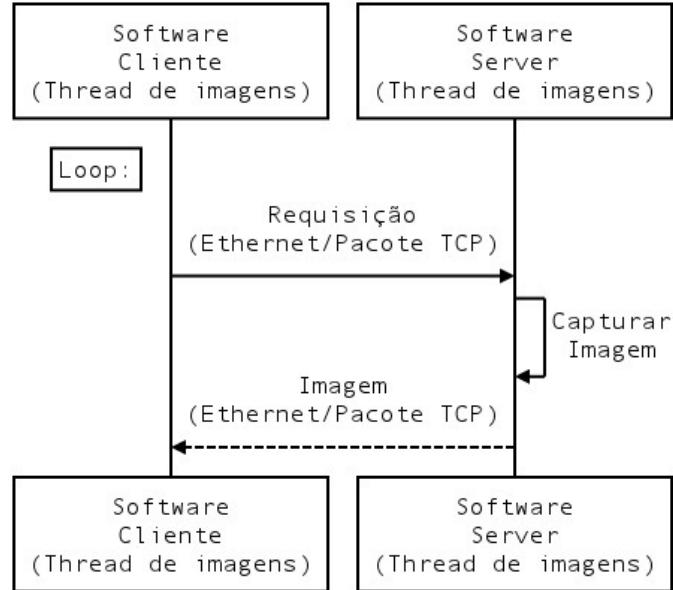


Fonte: Produção própria

### 9.4.2 Comunicação entre as tarefas de imagem

As tarefas de imagem se comunicam a partir de uma requisição do cliente e uma resposta do servidor contendo a imagem recém capturada. Essa tarefa se repete em um intervalo constante, sem a intervenção do operador. A Figura 24 exibe o comportamento descrito:

Figura 24 – Comunicação entre as tarefas de imagem



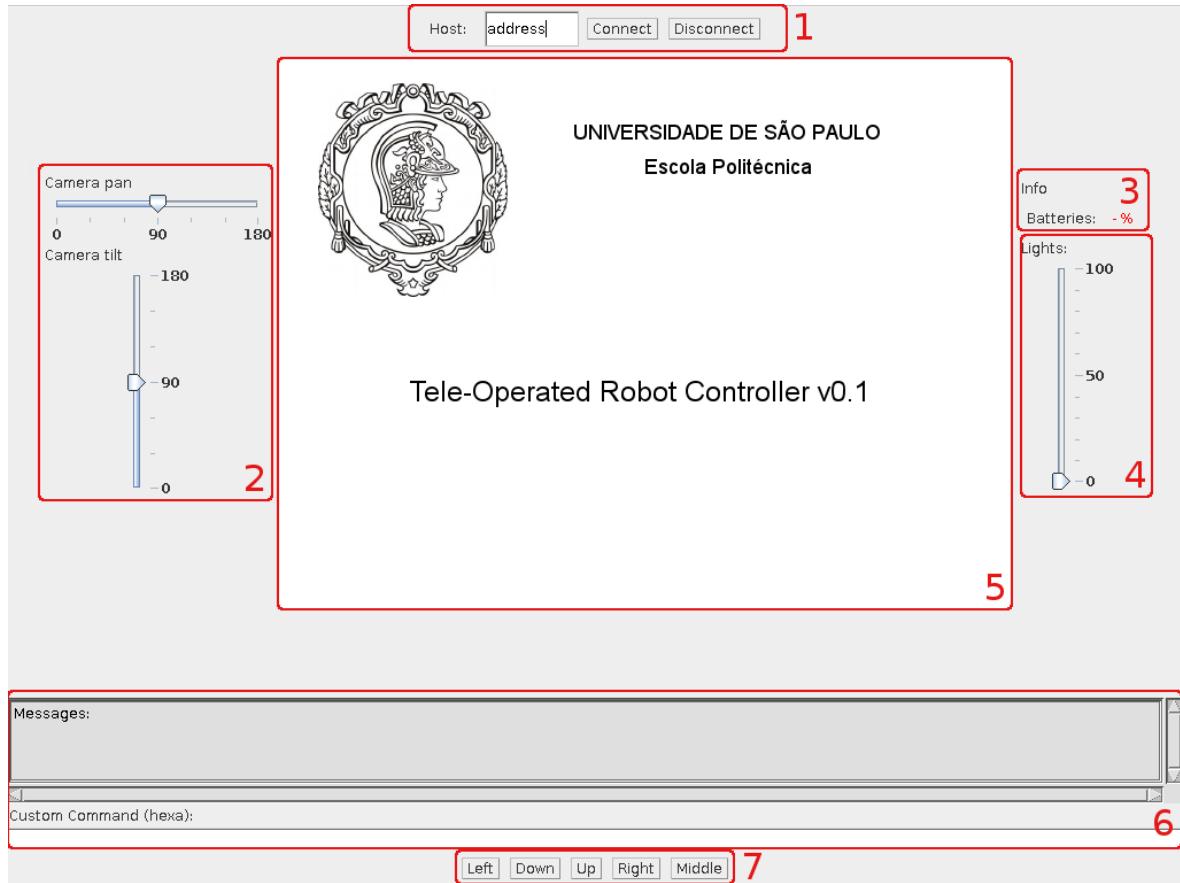
Fonte: Produção própria

## 9.5 INTERFACE DE USUÁRIO

A interface de usuário (representada pela *Thread 3* no diagrama da Figura 22) é, como já mencionado, responsável pela captura de *inputs* do operador e pela apresentação da imagem capturada pelo robô, bem como do status das baterias e iluminação.

Quando inicializado, o cliente do software de controle apresenta uma interface como na Figura 25. Para fins explicativos, os componentes da interface foram destacados em vermelho e enumerados de 1 a 7. Esses componentes serão detalhados a seguir.

Figura 25 – Interface de usuário inicial



Fonte: Produção própria

Os ítems enumerados de 1 a 7 correspondem a:

1. Campo de endereço e botões para conexão e desconexão

Esse campo deve ser preenchido com o endereço de rede do robô. São aceitos endereços IPv4 ou *hostnames*, como por exemplo: `robo.poli.usp.br`. Assim que o endereço do robô for determinado, o botão *Connect* inicia a conexão e o botão *Disconnect* a finaliza.

2. Controle da posição da câmera (*pan* e *tilt*)

São os *sliders* que controlam a posição da câmera, com valores de 0 a 180 graus, tanto para na direção horizontal (*pan*), quanto para a vertical (*tilt*).

3. Status das baterias

Exibem o percentual atual de carga nas baterias. Esses valores são atualizados automaticamente durante a execução do programa a cada um segundo.

4. Controle de iluminação

Controlam a iluminação do robô, com valores entre 0 e 100% do brilho máximo.

### 5. Área de exibição das imagens capturadas pelo robô

Nessa área são exibidas os *frames* capturados pelo servidor. O intervalo de tempo entre cada captura é configurável no servidor.

### 6. Campo de mensagens diretas

Aqui podem ser enviados comandos customizados para o robô. Conforme descrito na Tabela 3, os comandos entendidos pelo robô contém 3 bytes cada. É importante notar que os comandos enviados por esse campo são interpretados literalmente como um conjunto de bytes. Por exemplo, para enviarmos os bytes 0x03 0x80 0xFF (cujo significado é, segundo especificado no protolo na seção 9.4: “Ande com as rodas em posição reta com velocidade máxima”), podemos simplesmente digitar 0380FF no campo texto. Essa funcionalidade se mostrou bastante interessante, tanto em situações de teste quanto em situações que requerem um controle mais refinado de velocidade ou posição. Esse modo de operação pode ser entendido como um modo “especialista”, embora não seja estritamente necessário para a operação do robô.

### 7. Botões de rápida movimentação da câmera

Esse botões orientam a câmera rapidamente em uma das cinco posições disponíveis (esquerda, direira, centro, cima, baixo). São úteis para uma rápida orientação da câmera sem o uso dos *sliders*.

Além dos controles visíveis listados acima, o software responde a eventos do teclado. As teclas direcionais (setas nas quatro direções) causam o envio de mensagens para a movimentação do robô.

Um exemplo da interface de usuário durante a operação do robô pode ser visto na Figura 26.

## 10 RESULTADOS

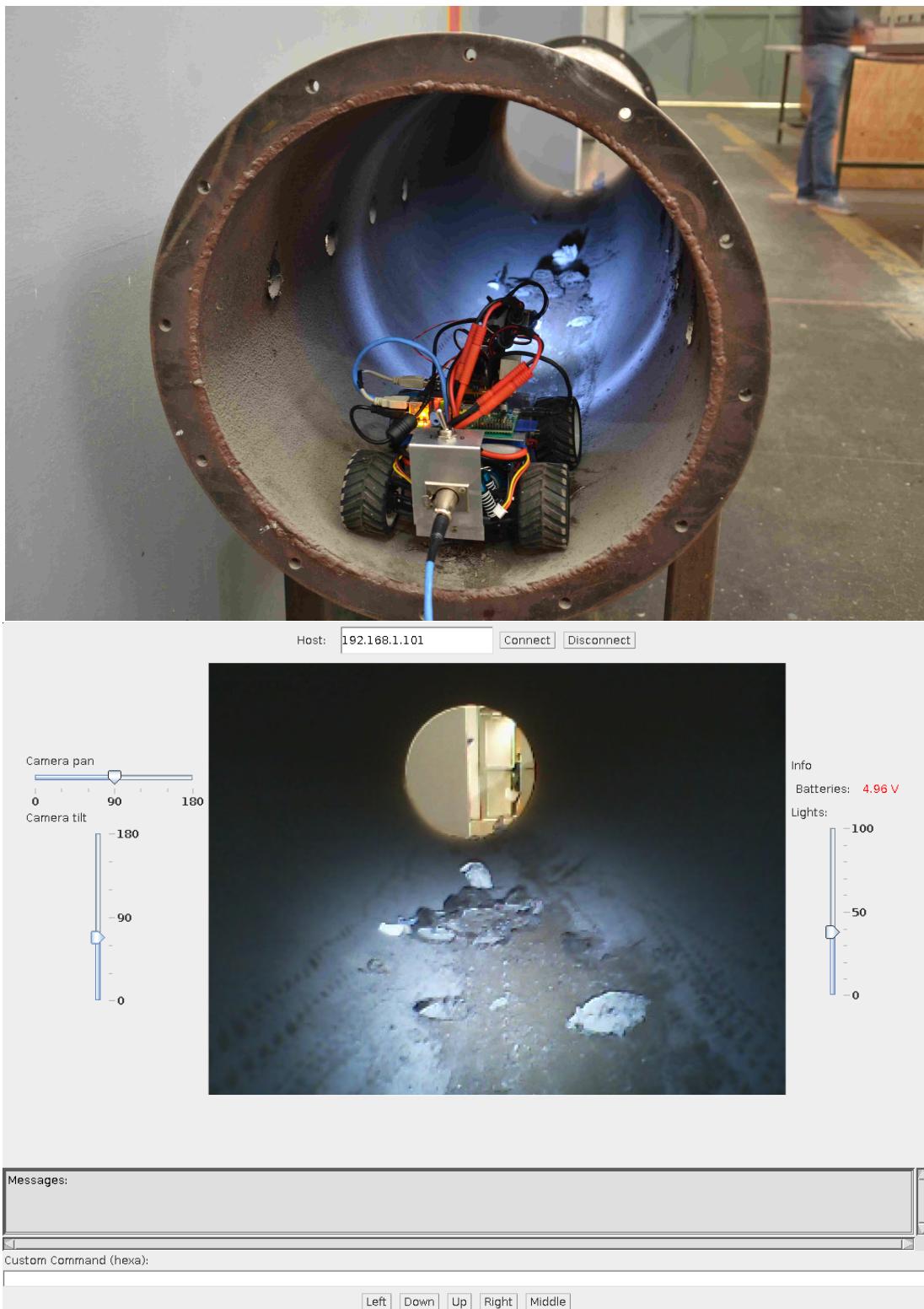
Uma vez que os protótipos do robô e do software de controle foram finalizados, foram conduzidos testes em tubulações reais. A Figura 26 mostra o robô em operação dentro de uma tubulação metálica de aproximadamente 400 mm de diâmetro e a interface de controle correspondente. O veículo foi capaz de se movimentar no interior da tubulação e executar a tarefa de inspeção sem problemas. Todos os parâmetros e restrições de projeto foram satisfeitos e as características do protótipo fabricado estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características do veículo

Característica	Atributo
Tempo de operação máximo	4 horas
Dimensões do veículo <sup>1</sup> (C x A x L)	372 x 170 x 190 mm
Diâmetro mínimo do tubo a ser inspecionado	400 mm
Material do tubo a ser inspecionado	indiferente
Amplitude de operação	25 m
Tensão nas baterias	7.4 V
Amplitude de movimento PAN da câmera	180°
Amplitude de movimento TILT da câmera	180°
Resolução máxima da câmera	1.3 MP

<sup>1</sup> Dimensões do veículo com a câmera na mesma posição da Figura 14

Figura 26 – Robô e interface de controle em operação de teste



Fonte: Produção própria

## 11 CONCLUSÃO

Com base nas atividades descritas neste documento, foram analisadas as soluções comumente empregadas em problemas de inspeção de tubulações. Conforme pode ser notado, há um grande número de variáveis de projeto presente na concepção e construção de um robô para inspeção de tubulações, o que faz com que os projetos analisados apresentem sistemas bastante distintos entre si.

A partir da consideração das diferentes possibilidades para cada sistema do robô, foram propostas soluções com base em suas viabilidades. Foram definidas as restrições de projeto, como, por exemplo, o diâmetro mínimo e o comprimento máximo da tubulação a ser inspecionada, o meio físico de comunicação, o protocolo e as características dos sinais utilizados, os componentes eletrônicos que serão empregados, bem como a interação entre eles e a forma física do robô, juntamente com o seu sistema motor.

Concluída a etapa de projeto, foi fabricado o protótipo do robô para inspeção de tubulações. Posteriormente, foi desenvolvido o software para visualização do *feedback* de imagens da câmera e controle do movimento do veículo, da posição da câmera e do sistema de iluminação. O protótipo teve sua operacionalidade avaliada em um tubo que atende às restrições de projeto. O custo dos componentes utilizados está apresentado na Tabela 6, totalizando um investimento de R\$ 946,50 no veículo.

Tabela 6 – Custo dos componentes

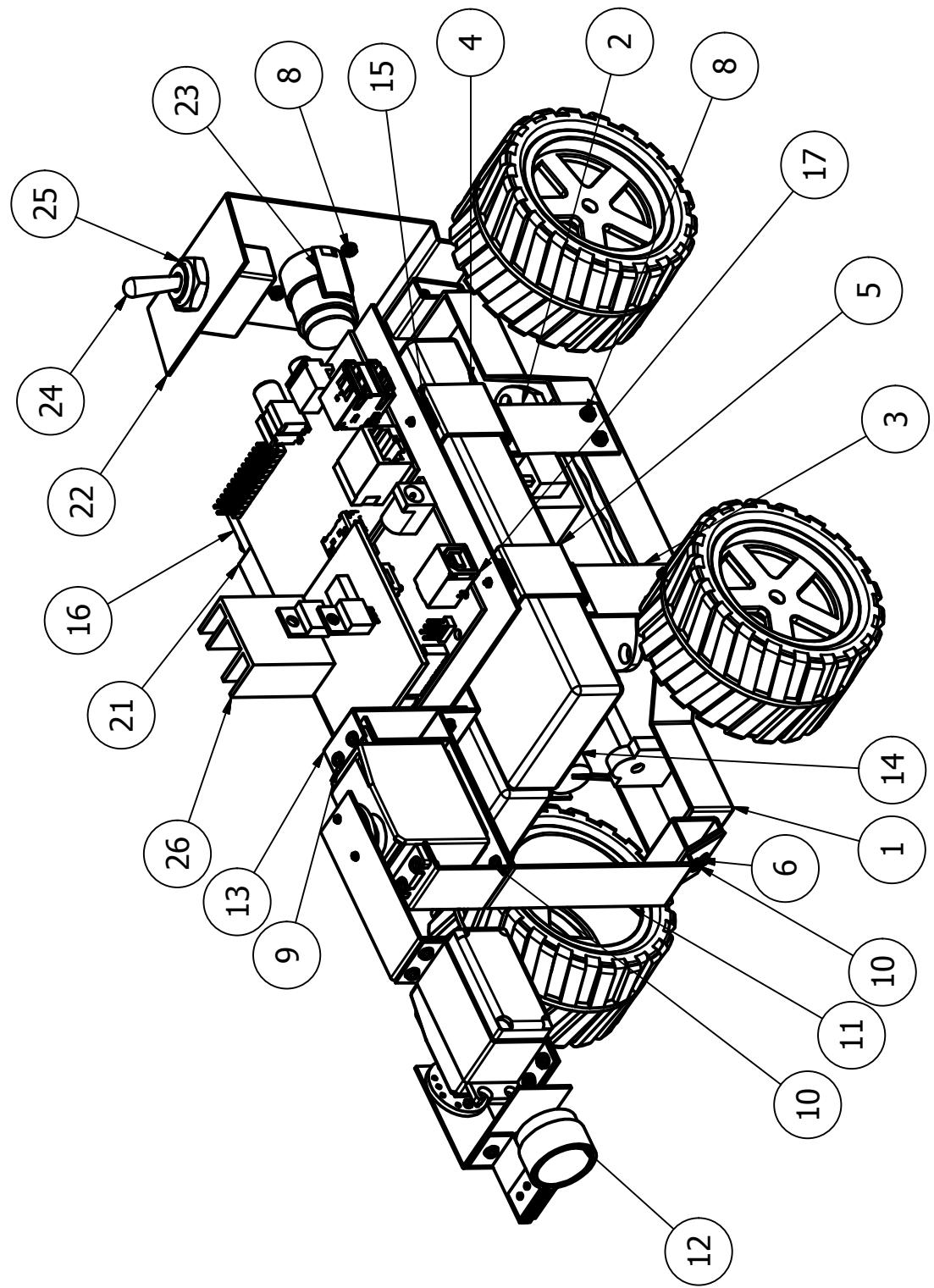
Componente	Valor (R\$)
Placa Raspberry Pi	181,25
Placa Arduino	28,68
Baterias e carregador	212,65
Parafusos e brocas	28,98
Componentes eletrônicos	41,58
Chassis	299,00
Câmera	15,26
Cabo umbilical	29,00
Conector do cabo umbilical	15,00
Chave de açãoamento	11,00
Conectores das baterias	21,30
Servos	47,80
LEDs	15,00
<b>TOTAL</b>	<b>946,50</b>

## REFERÊNCIAS

- Agilent Technologies. *Small Form Factor MT-RJ Fiber Optic Transceivers for Gigabit Ethernet: Technical Data*. 2000. Citado na página 81.
- HIROSE, S. et al. Design of in-pipe inspection vehicles for phi;25, phi;50, phi;150 pipes. In: *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 3, p. 2309–2314 vol.3. ISSN 1050-4729. Citado na página 15.
- IEEE. *IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 3, Section 2. Reference number: IEEE Std. 802.3-2008*. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- ISMAIL, I. et al. Development of in-pipe inspection robot: A review. In: *Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (STUDENT), 2012 IEEE Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 310–315. ISSN 1985-5753. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 21.
- ISO. *Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The Basic Model. Reference number: ISO/IEC 7498-1:1994(E)*. 1994. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- KAWAGUCHI, Y. et al. Internal pipe inspection robot. In: *Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 1, p. 857–862 vol.1. ISSN 1050-4729. Citado na página 11.
- LI, P. et al. Multifunctional mobile units with a same platform for in-pipe inspection robots. In: *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2643–2648. Citado na página 16.
- NASSIRAEI, A. A. F. et al. A new approach to the sewer pipe inspection: Fully autonomous mobile robot "kantaro". In: *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 4088–4093. ISSN 1553-572X. Citado na página 14.
- NASSIRAEI, A. A. F. et al. Concept and design of a fully autonomous sewer pipe inspection mobile robot "kantaro". In: *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 136–143. ISSN 1050-4729. Citado na página 14.
- National Semiconductor. *DP83223 TWISTER High Speed Networking Transceiver Device*. 1997. Citado na página 81.
- SAENZ, J. et al. Robotic systems for cleaning and inspection of large concrete pipes. In: *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2010 1st International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–7. Citado na página 13.
- SMSC. *USB 2.0 Hub and 10/100 Ethernet Controller: Technical Data*. 2012. Citado na página 24.
- SUZUKI, M. et al. Mechanisms of autonomous pipe-surface inspection robot with magnetic elements. In: *Systems, Man and Cybernetics, 2006. SMC '06. IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 4, p. 3286–3291. Citado na página 12.

## APÊNDICE A – DESENHOS DOS COMPONENTES MECÂNICOS DO ROBÔ

Neste apêndice estão apresentados os desenhos dos componentes mecânicos do robô. Estes desenhos foram realizados com auxílio do software Autodesk Inventor Professional 2014. O material das peças fabricadas é o alumínio. O *assembly* do chassis foi desenhado de forma simplificada, sem o sistema de suspensão do veículo. A escala de cada desenho está apresentada no quadro de informações localizado no canto inferior direito de cada página.



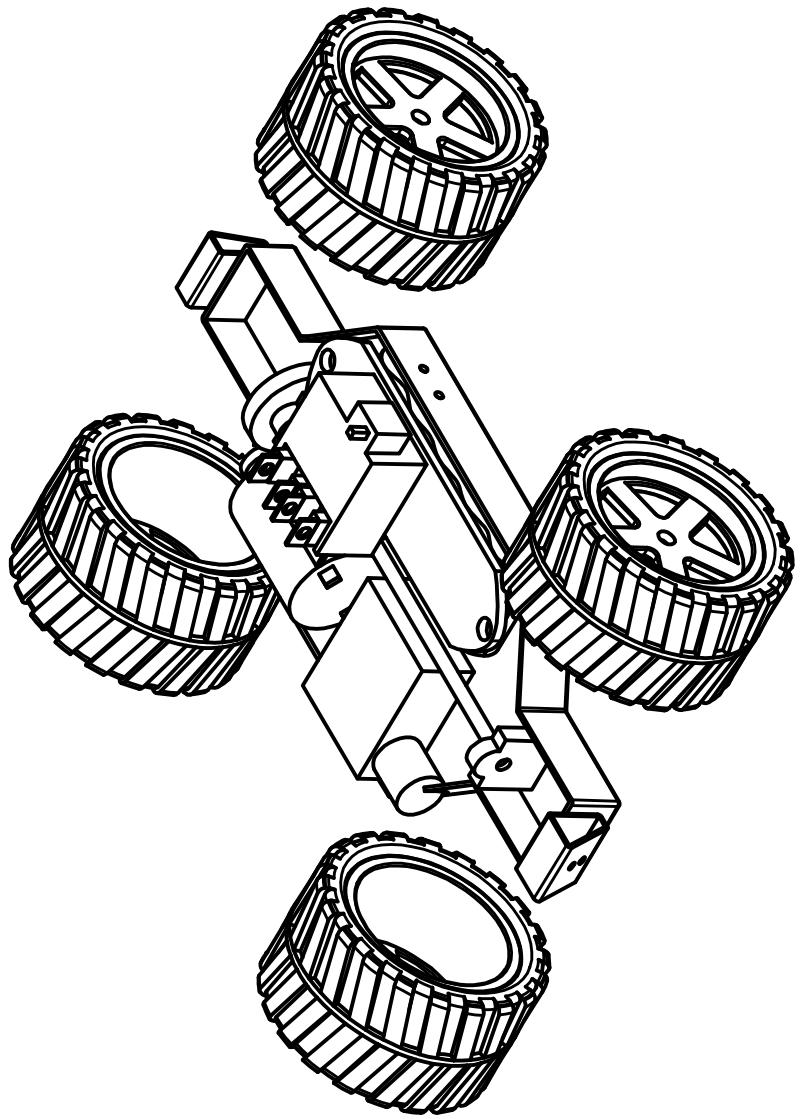
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date	1:2	Date	05/11/2013
<b>Desenho de conjunto</b>						
Edition 2	Sheet 1 / 1					

Robô terrestre tele-operado para  
inspeção de tubulações

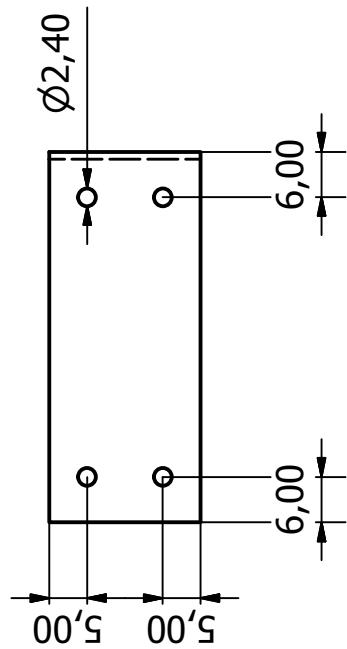
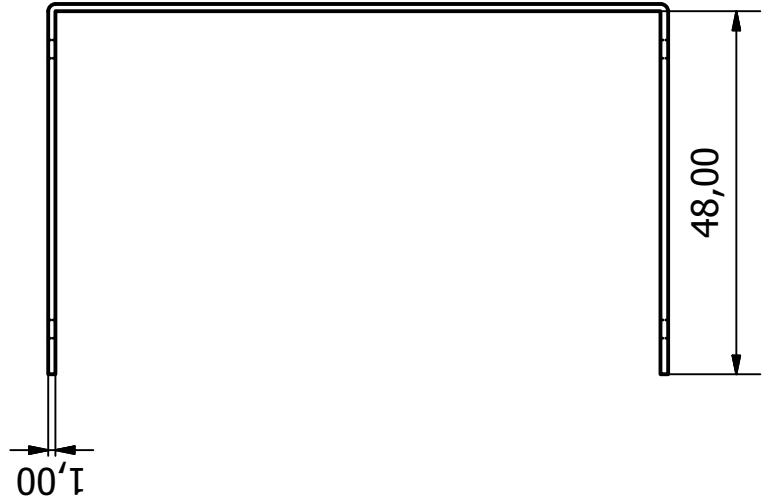
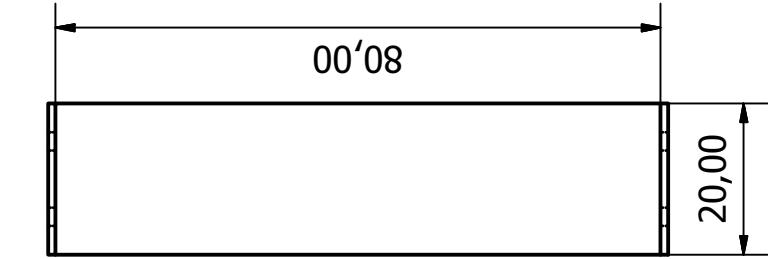
PARTS LIST				PARTS LIST				PARTS LIST			
ITEM	QTY	DESCRIPTION	ITEM	QTY	DESCRIPTION	ITEM	QTY	DESCRIPTION	ITEM	QTY	DESCRIPTION
1	1	Chassis	11	1	Suporte do Mecanismo da Câmera	21	1	Raspberry Pi			
2	1	Suporte Inferior Traseiro				22	1	Suporte do Cabo Umbilical			
3	1	Suporte Inferior Dianteiro	12	1	Mecanismo da Câmera	23	1	Conector do Cabo Umbilical			
4	1	Suporte Superior Traseiro	13	1	Suporte Adicional do Mec. da Cam.	24	1	Chave de Açãoamento			
5	1	Suporte Superior Dianteiro	14	2	Bateria	25	1	ISO 8675 - M10 x 1			
6	58	ISO 7092 - ST 2 - 140 HV	15	16	Suporte Adicional da Eletrônica	26	1	Shield do Arduino			
7	6	ISO 7045 - M2 x 6 - 4.8 - H	16	1	Suporte da Eletrônica	27	2	ISO 7045 - M2 x 4 - 4.8 - H			
8	29	ISO 4032 - M2	17	1	Arduino						
9	3	ISO 7045 - M2 x 8 - 4.8 - H	18	4	DIN 84 - M1 x 8						
10	18	ISO 7045 - M2 x 5 - 4.8 - H	19	3	DIN 934 - M1						
			20	1	DIN 433 - 1,1						

Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date	Date
			05/11/2013	05/11/2013
Lista de partes				
Edition 2		Sheet 1 / 1		

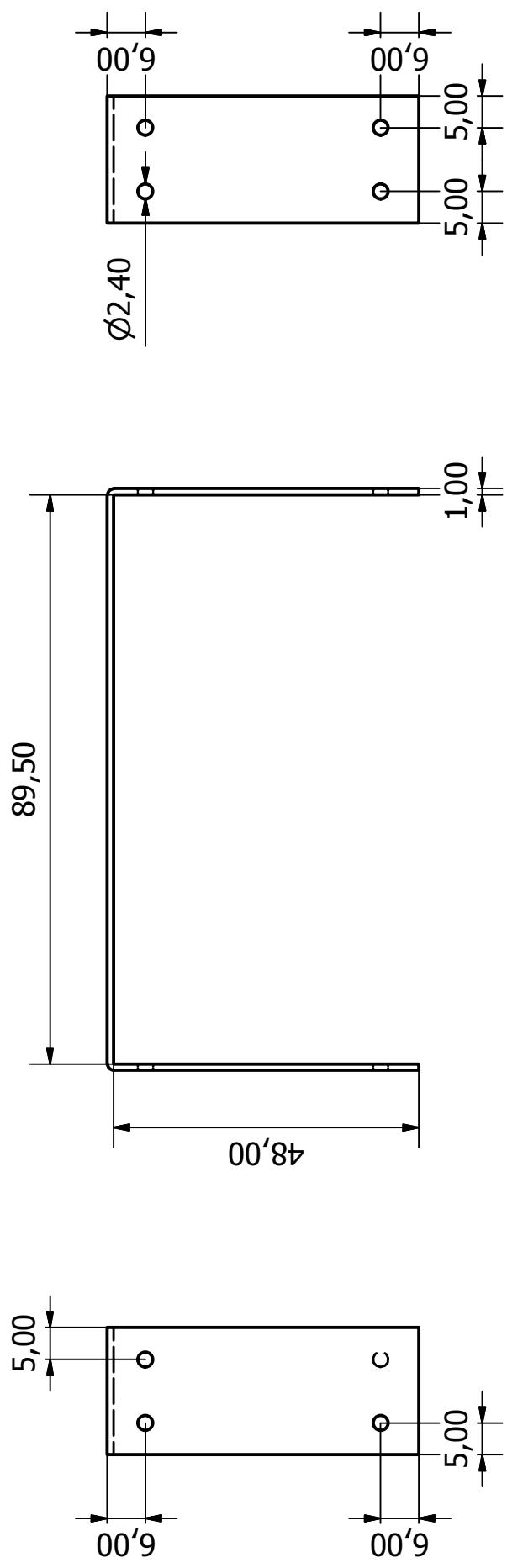
Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações



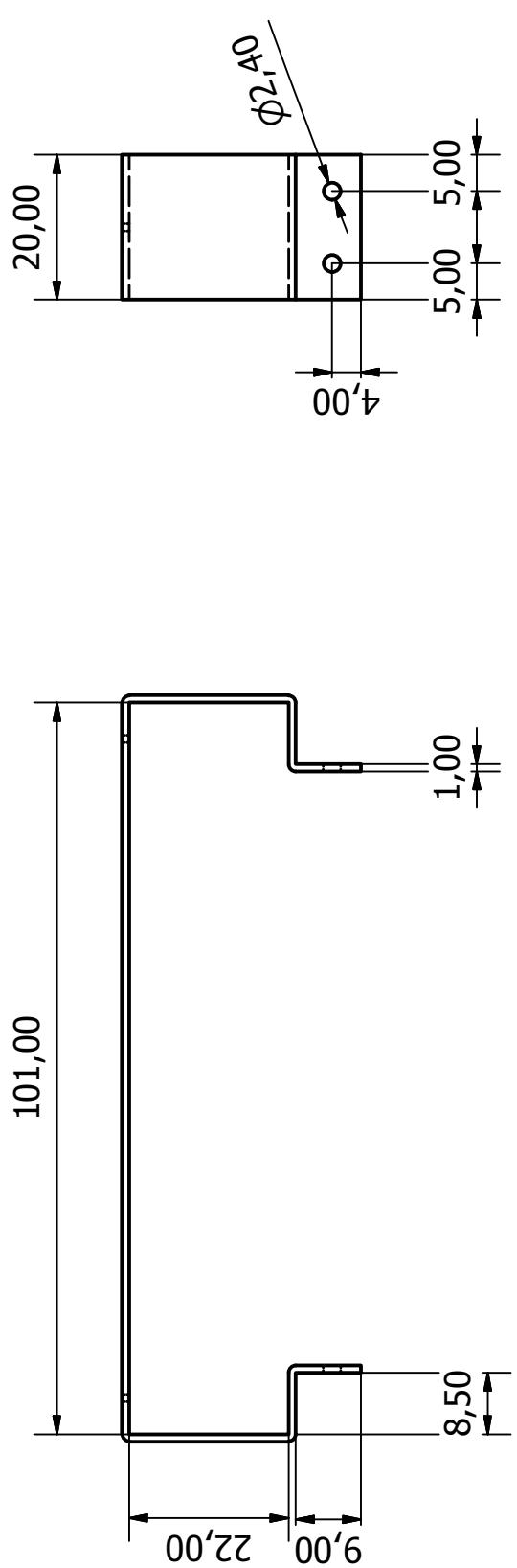
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date 1:2	Date 05/11/2013
<b>Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações</b>				<b>Chassis</b>
Item 1	Edition 2	Edition 1	Sheet 1 / 1	



Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date 1:1	Date 05/11/2013
<b>Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações</b>				<b>Supporte Inferior Traseiro</b>
Item 2		Edition 2	Sheet 1 / 1	



Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date	1:1	Date
				05/11/2013	
<b>Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações</b>					<b>Supporte Inferior Dianteiro</b>
Item 3					Item 2
Edition 2					Sheet 1 / 1



4

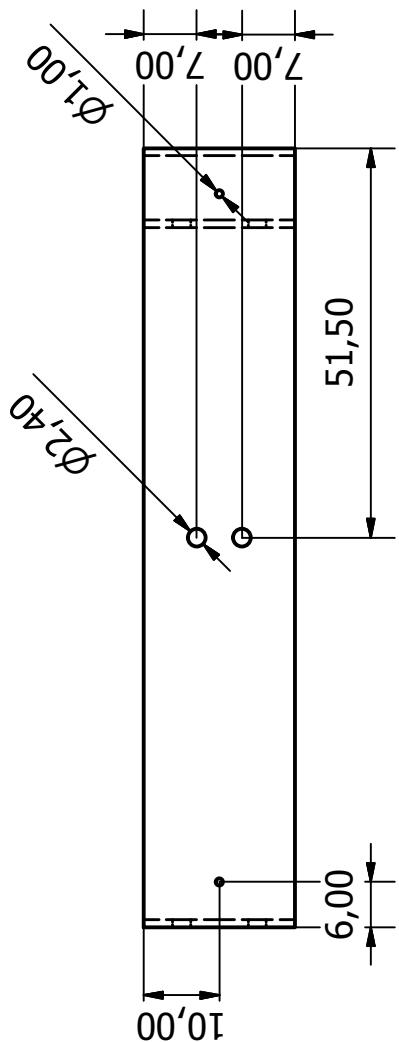
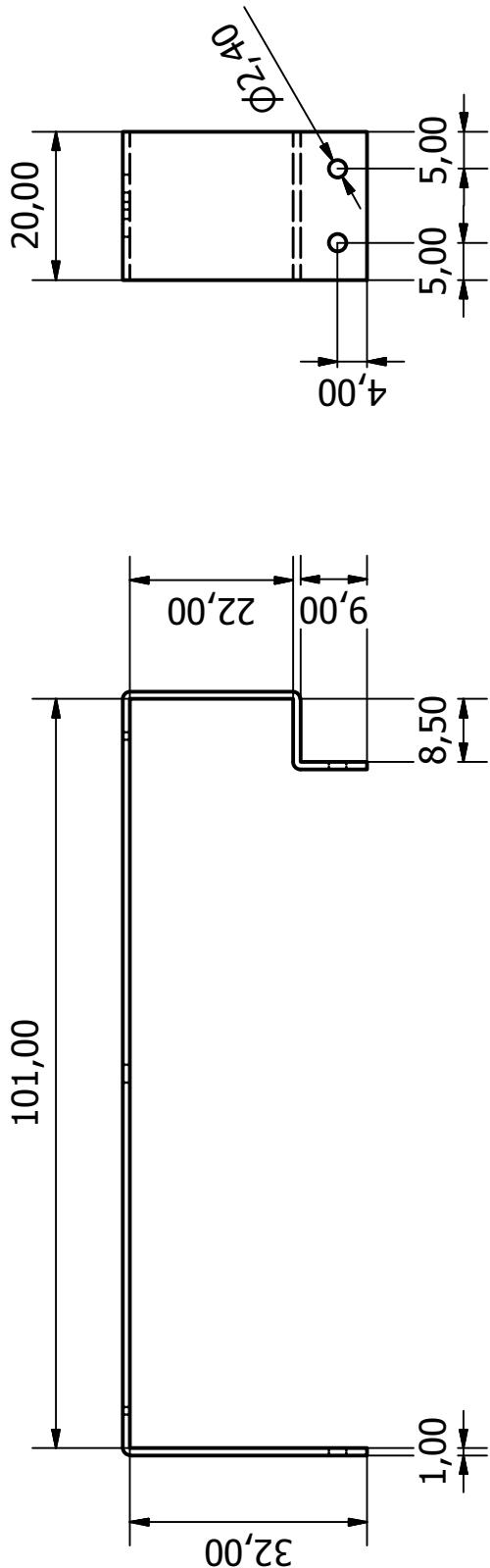
Robô terrestre tele-operado para  
inspeção de tubulações

Supporto Superior Traseiro

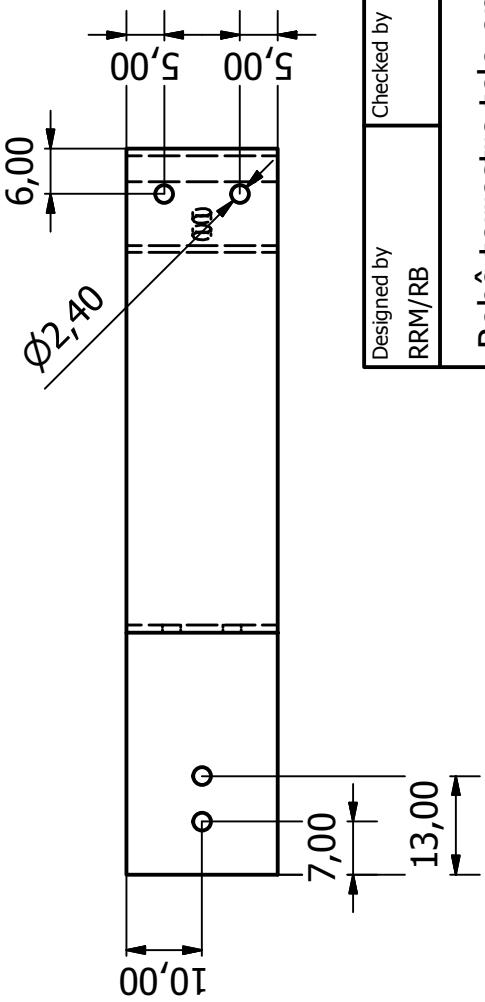
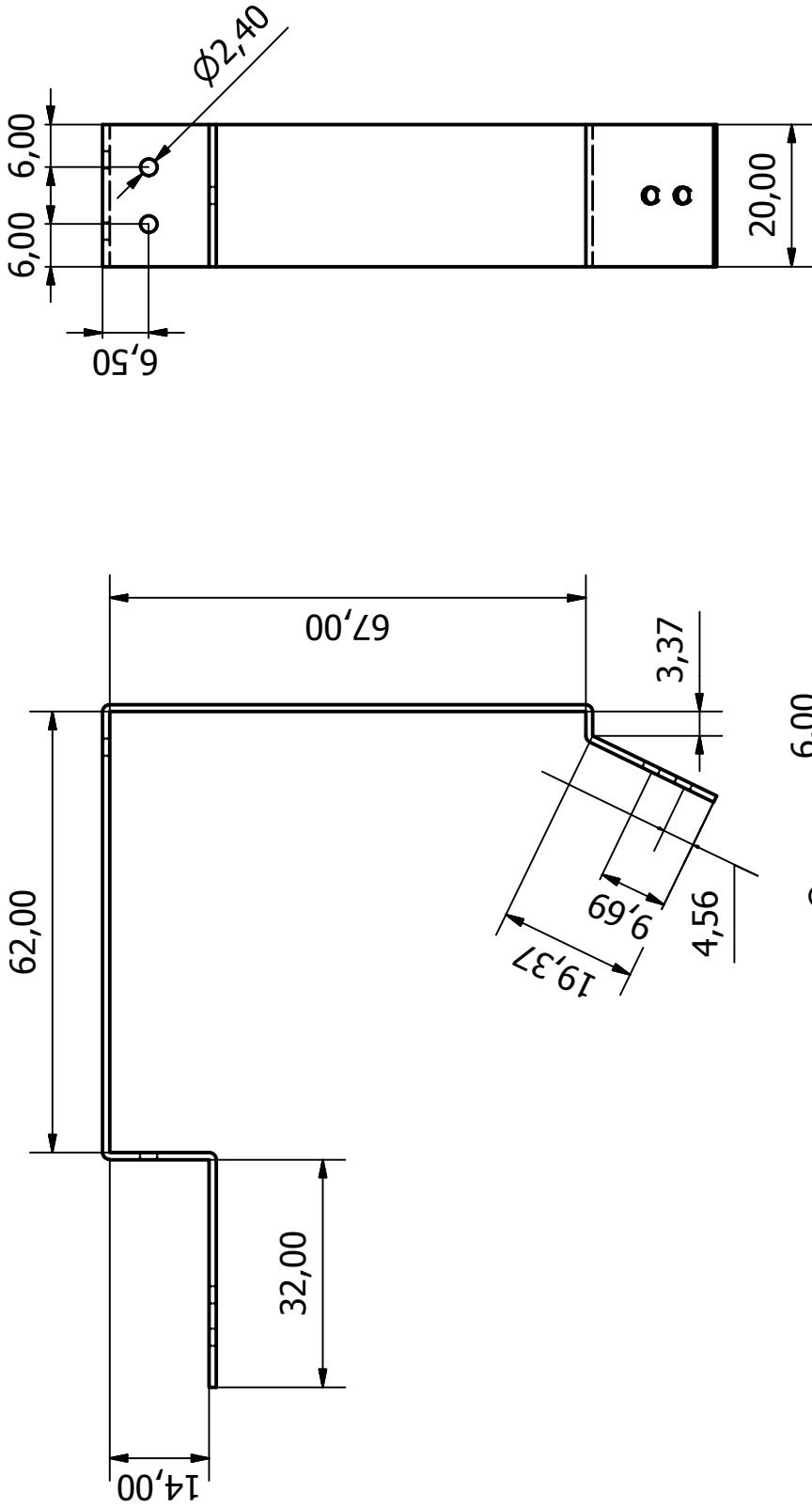
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date	1:1	Date
			05/11/2013		

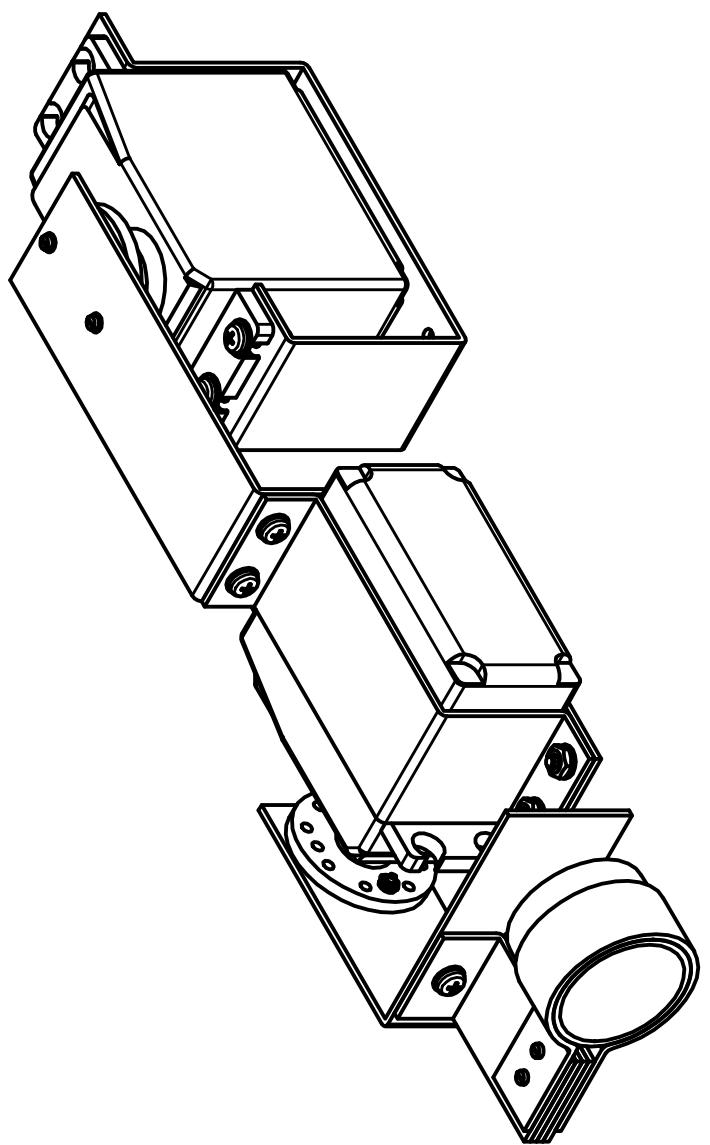
Item 4

Edition 2	Sheet 1 / 1
--------------	----------------

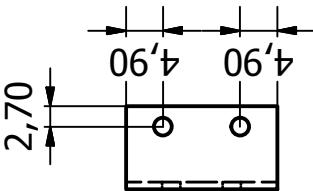
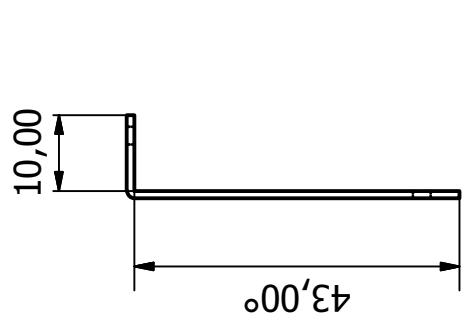
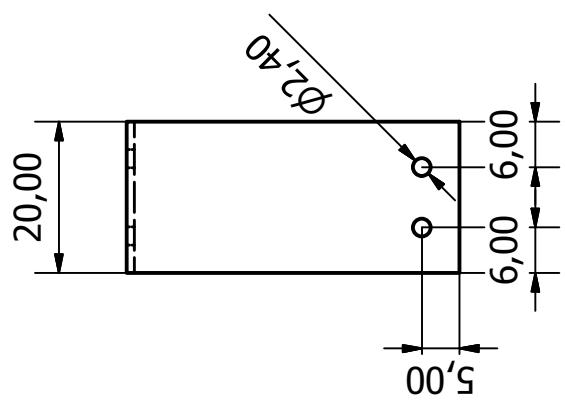


Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date	1:1	Date	05/11/2013
<b>Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações</b>						<b>Suporte Superior Dianteiro</b>
Item 5	Edition 2	Sheet 1 / 1				

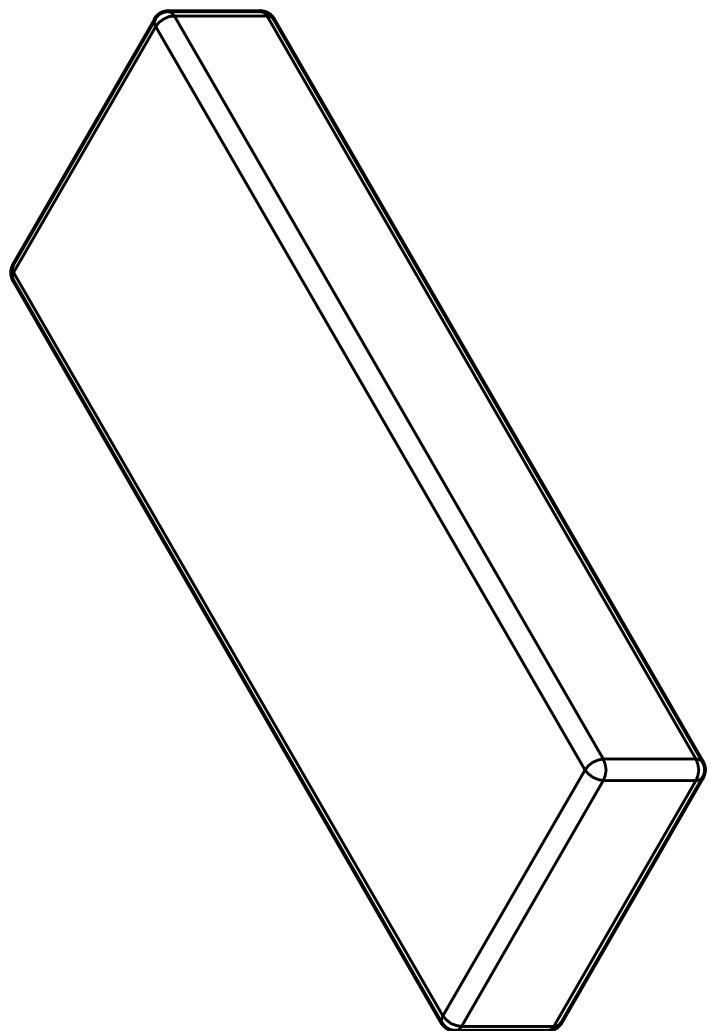




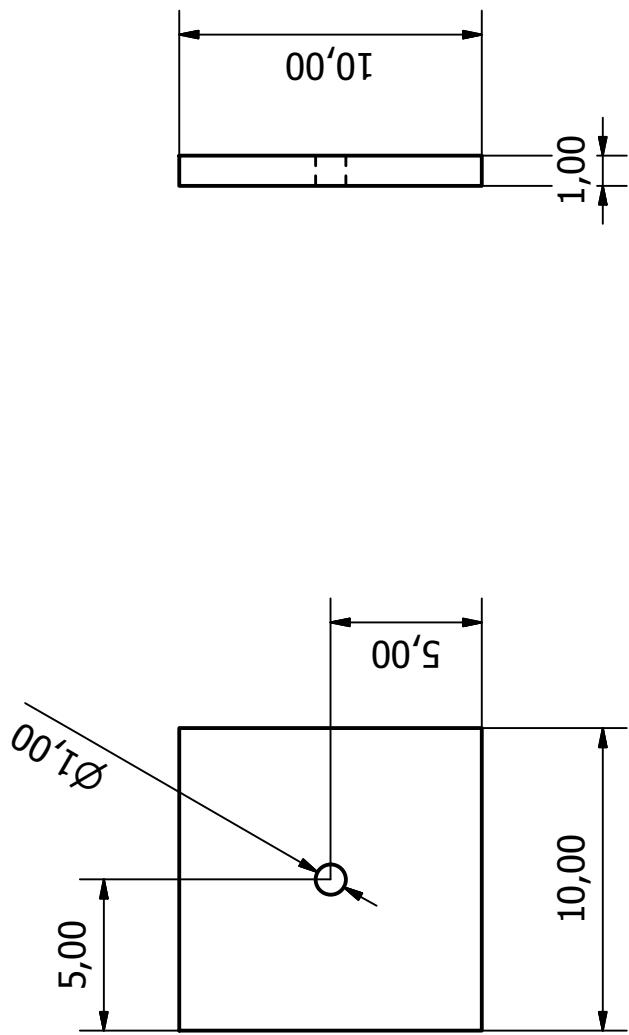
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date 1:1	Date 05/11/2013
<b>Mecanismo da Câmera</b>				
Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações	Item 12	Edition 2	Sheet 1 / 1	



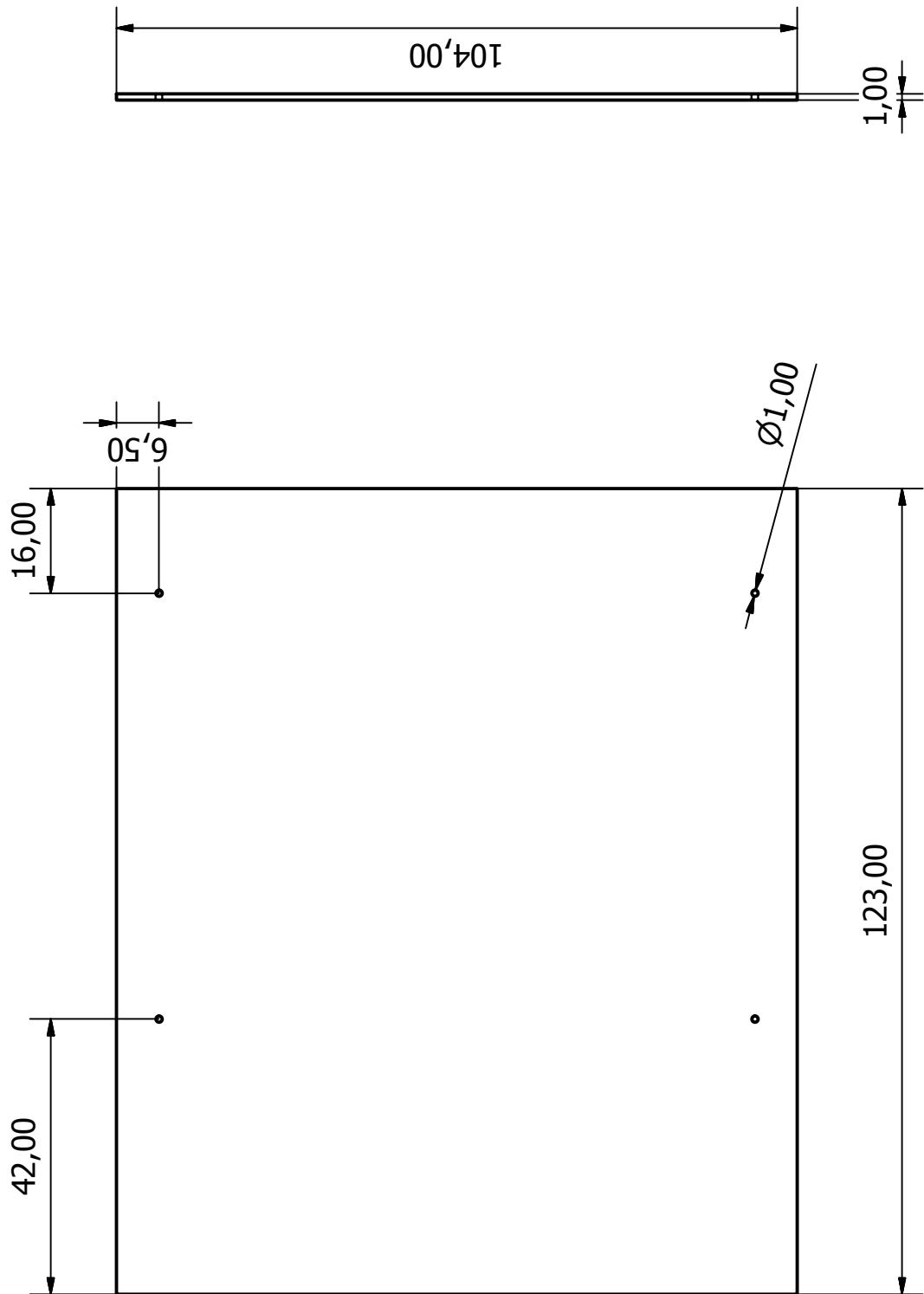
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date	1:1	Date
				05/11/2013	
<b>Suporte Adicional do Mecanismo da Câmera</b>					
Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações					Sheet 1 / 1
Item 13	Edition 2				



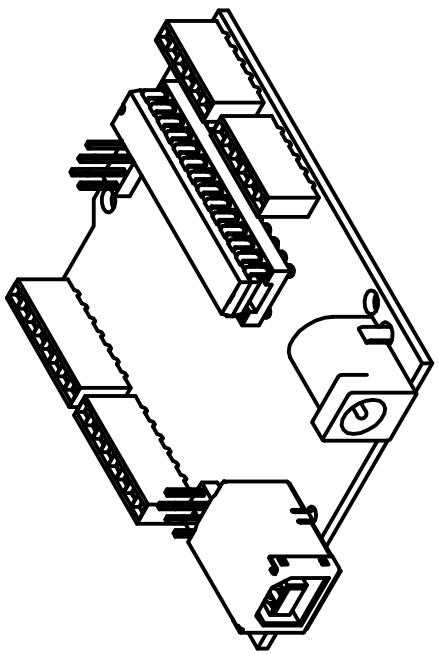
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date 1:1	Date 05/11/2013
Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações	Item 14		Bateria	
			Edition 2	Sheet 1 / 1



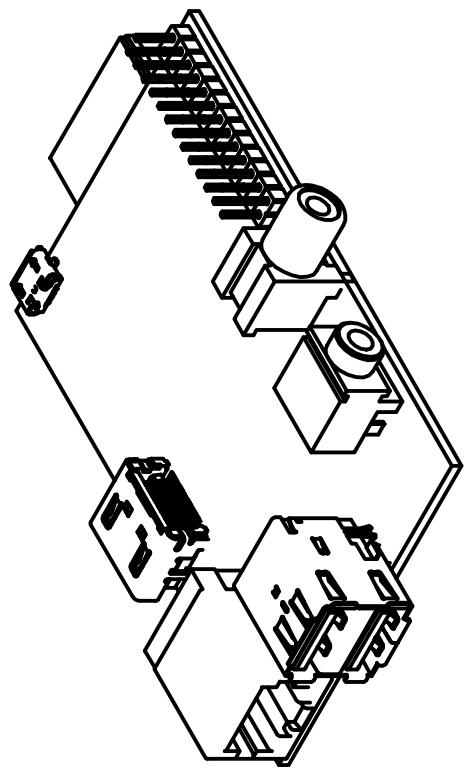
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date 4:1	Date 05/11/2013
<b>Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações</b>				<b>Supporte Adicional da Eletrônica</b>
Item 15	Edition 2	Sheet 1 / 1		



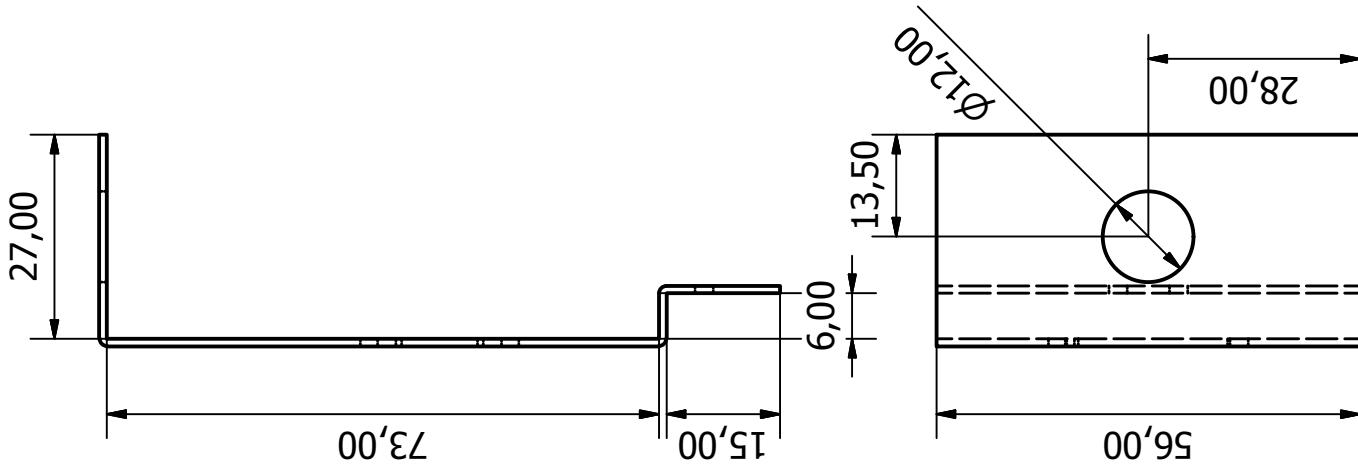
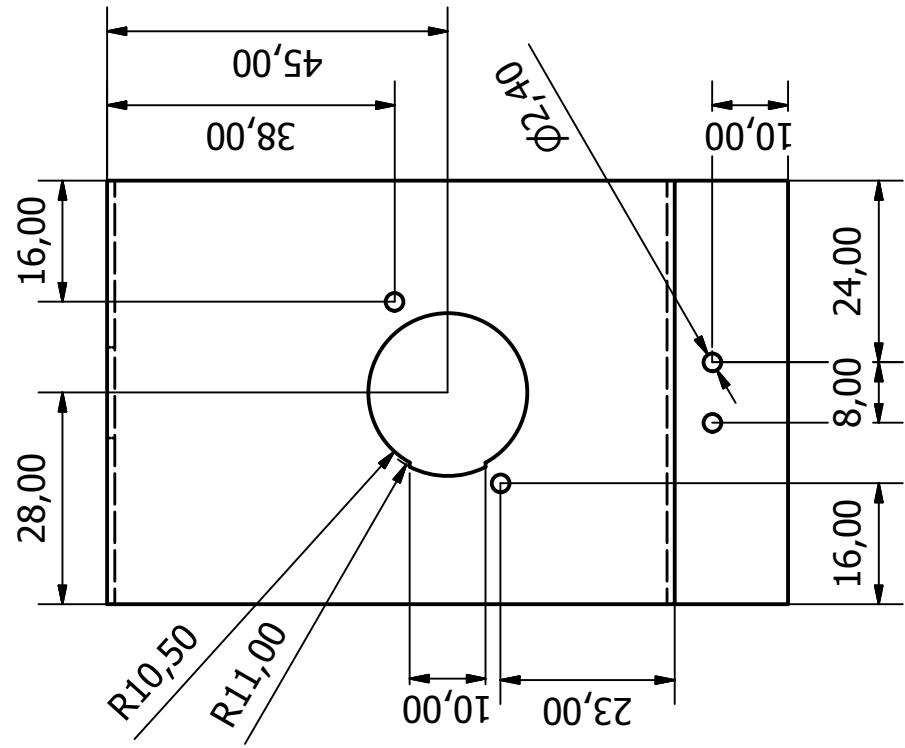
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date	1:1	Date
				05/11/2013	
<b>Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações</b>					<b>Supporte da Eletrônica</b>
Item 16					Edition 2 Sheet 1 / 1



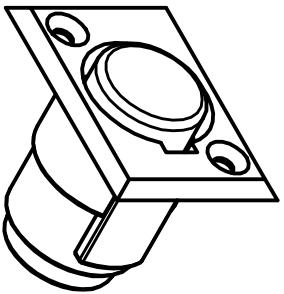
Designed by clwillingham	Checked by	Approved by	Date	1:1	Date
				05/11/2013	
<b>Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações</b>					<b>Arduino</b>
Item 17					Edition 2



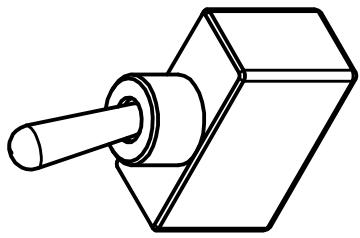
Designed by John Gittins	Checked by	Approved by	Date 1:1	Date 05/11/2013
<b>Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações</b>				<b>Raspberry Pi</b>
Item 2.1				Edition 2



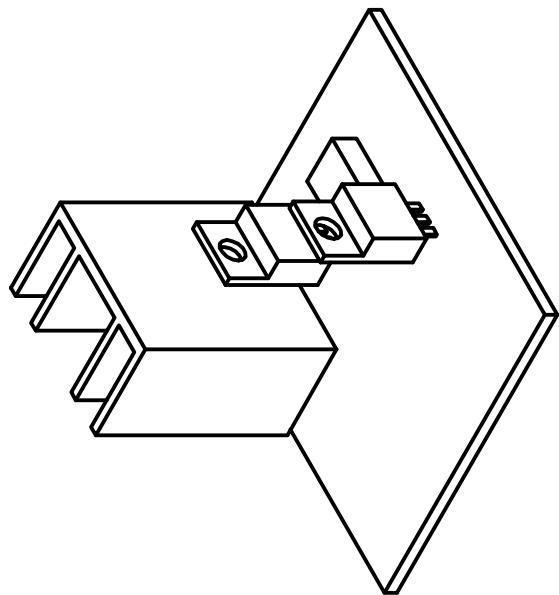
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date	1:1	Date
				05/11/2013	
<b>Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações</b>					<b>Supporte do Cabo Umbilical</b>
Item 22					Sheet 1 / 1
Edition 2					



Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date 1:1	Date 05/11/2013
<b>Conector do Cabo Umbilical</b>				
Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações	Item 23	Edition 2	Sheet 1 / 1	



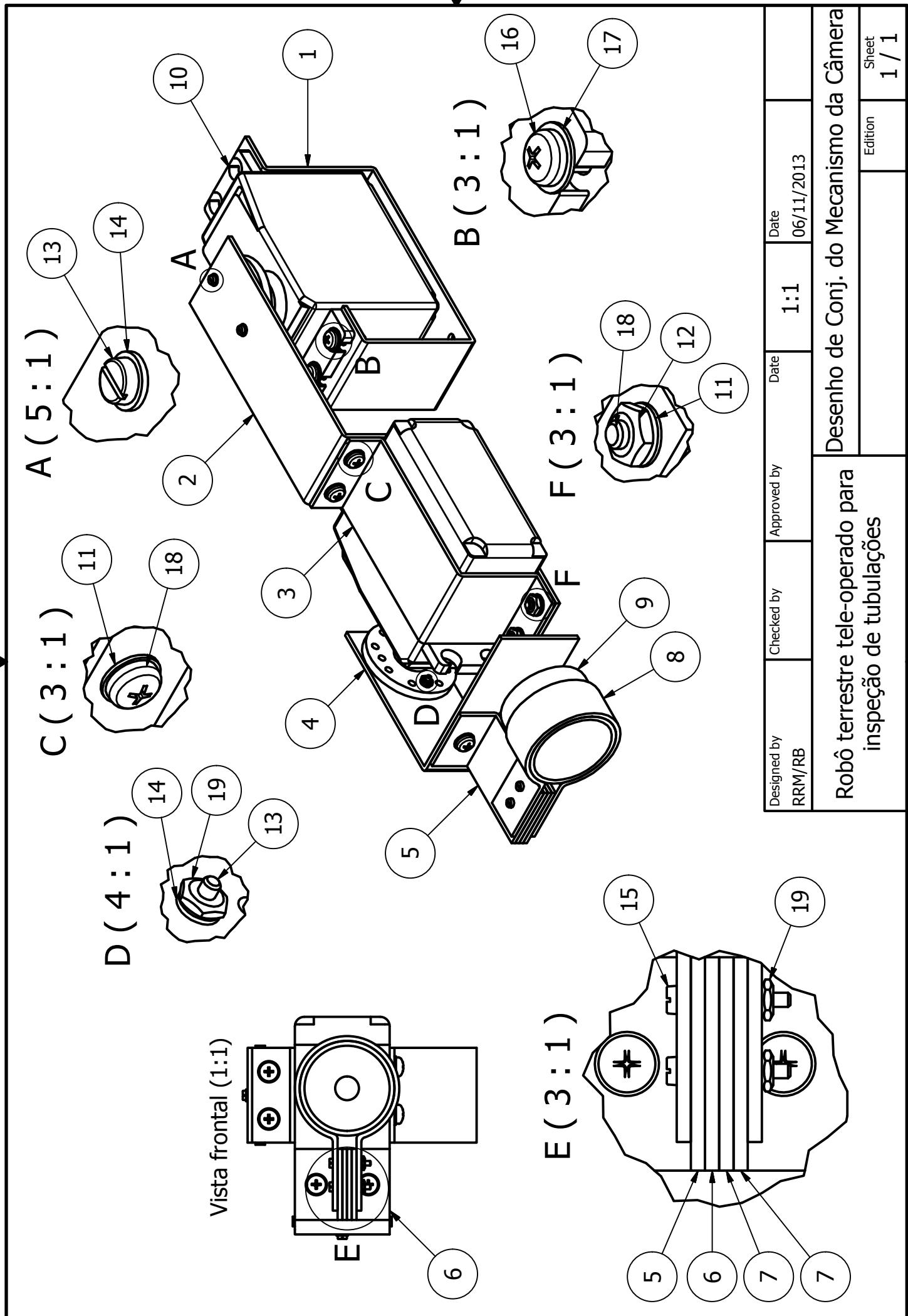
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date 1:1	Date 05/11/2013
<b>Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações</b>				<b>Chave de Acionamento</b>
Item 24	Item 24	Item 24	Edition 2	Sheet 1 / 1



Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date 1:1	Date 05/11/2013
<b>Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações</b>				<b>Shield do Arduino</b>
Item 26	Edition 2	Sheet 1 / 1		

## **APÊNDICE B – DESENHOS DOS COMPONENTES MECÂNICOS DO MECANISMO DA CÂMERA**

Neste Apêndice estão apresentados os desenhos dos componentes mecânicos do mecanismo de movimentação da câmera. Estes desenhos foram realizados com auxílio do software Autodesk Inventor Professional 2014. O material das peças fabricadas é o alumínio. A escala de cada desenho está apresentada no quadro de informações localizado no canto inferior direito de cada página.



Designed by	Checked by	Approved by	Date	1:1	Date
RRM/RB				06/11/2013	

Robô terrestre tele-operado para  
inspeção de tubulações

Desenho de Conj. do Mecanismo da Câmera

Edition  
1 / 1

Sheet  
1 / 1

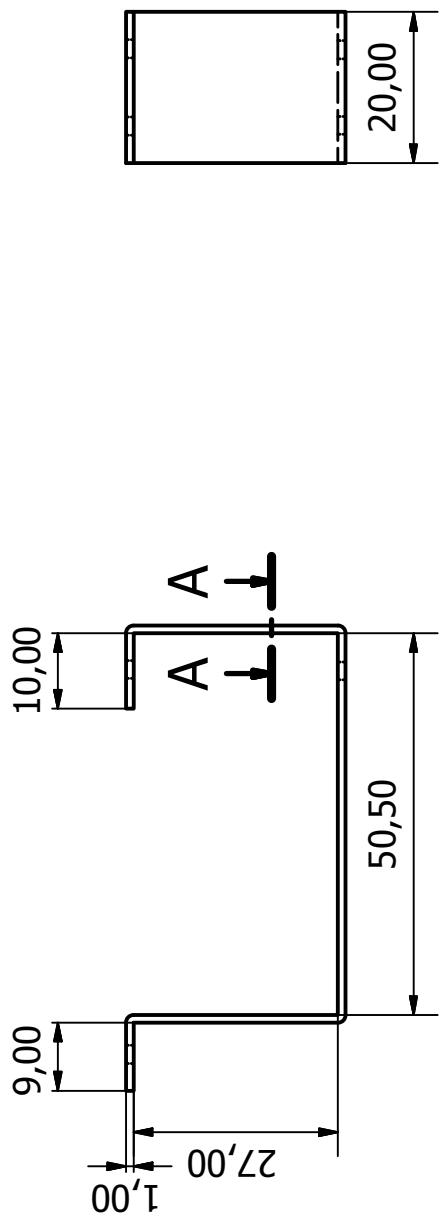
PARTS LIST			
ITEM	QTY	DESCRIPTION	ITEM
1	1	Suporte do Servo Fixo	11
2	1	Suporte do Servo Móvel	14
3	1	Bracadeira do Servo Móvel	8
4	1	Suporte da Câmera	12
5	1	Sup. Superior da Braçadeira da Câmera	13
6	1	Sup. Inferior da Braçadeira da Câmera	14
7	2	Sup. Adicional da Braçadeira da Câmera	15
8	1	Braçadeira da Câmera	16
9	1	Câmera	17
10	2	Servo	18

PARTS LIST			
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	DESCRIPTION
Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações			ISO 7092 - ST 2 - 140 HV
			ISO 4032 - M2
			DIN 84 - M1 x 6
			DIN 433 - 1,1
			DIN 84 - M1 x 8
			ISO 7045 - M2 x 8 - 4.8 - H
			ISO 7089 - 2 - 140 HV
			ISO 7045 - M2 x 5 - 4.8 - H
			DIN 934 - M1

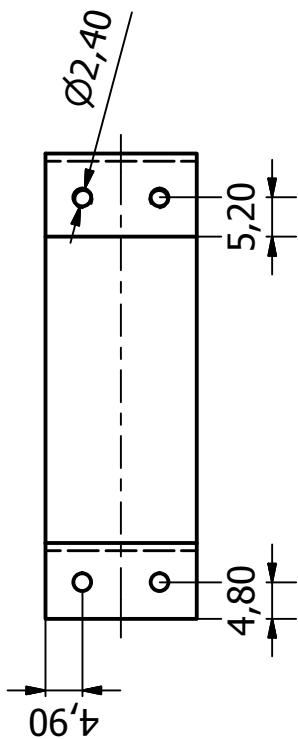
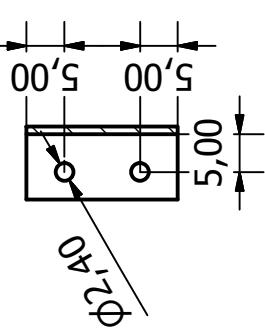
Lista de Partes

Edition

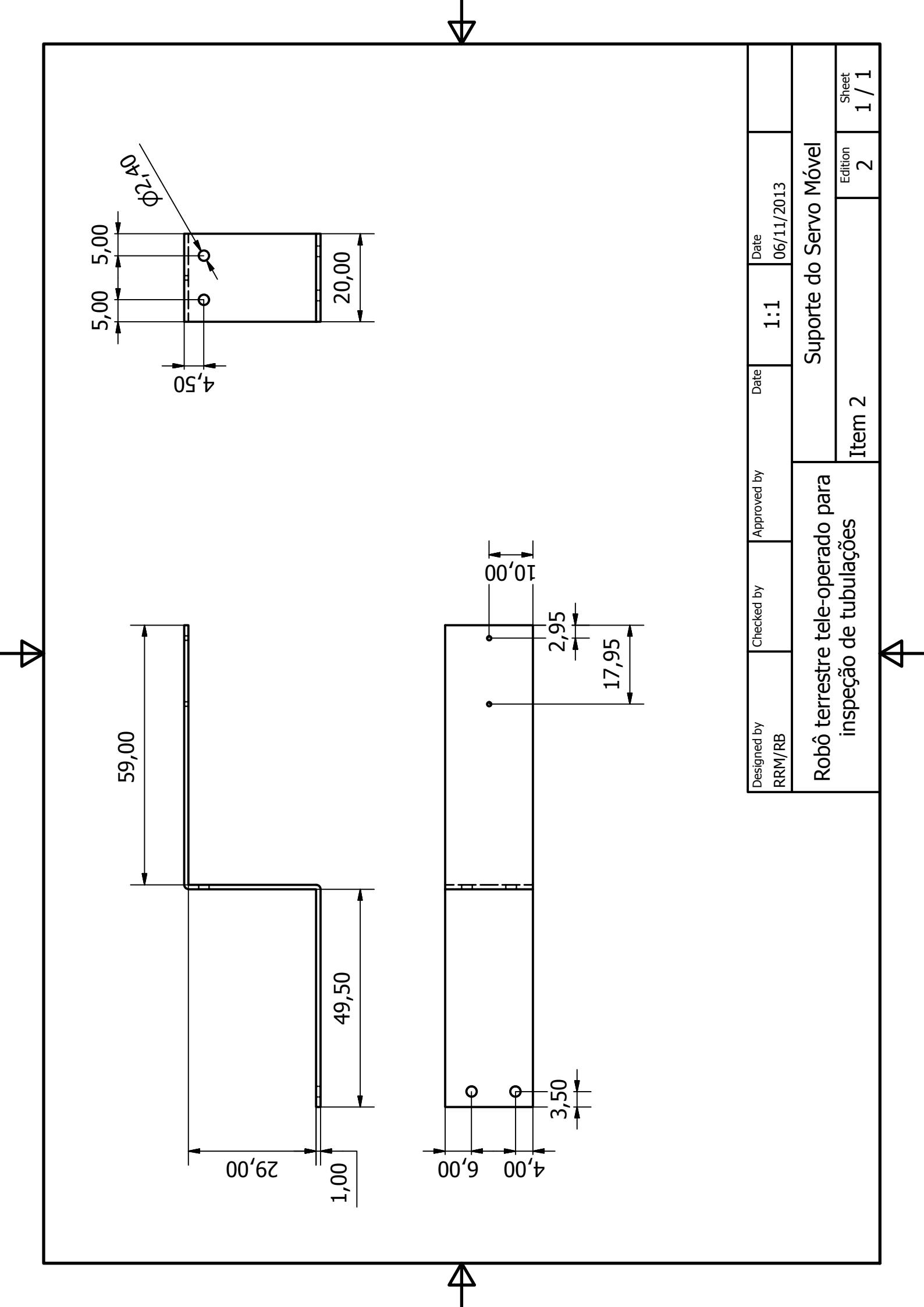
Sheet  
1 / 1

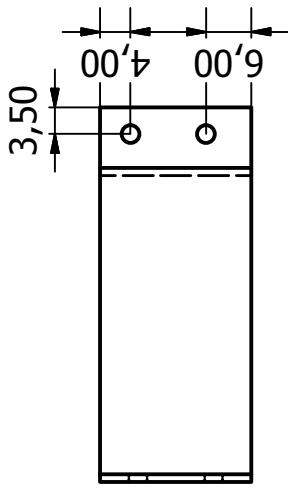
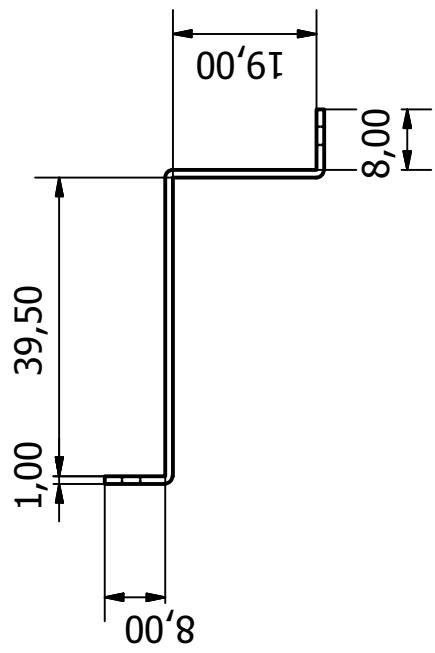
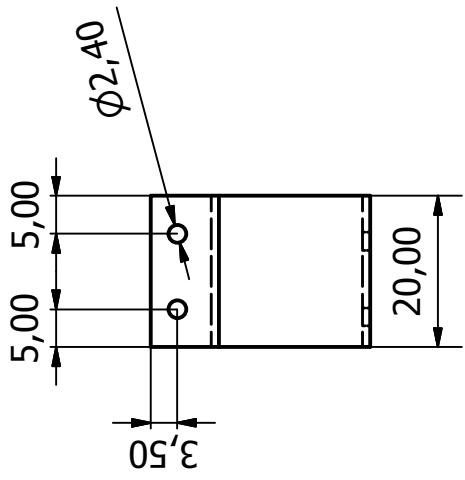


A-A ( 1 : 1 )

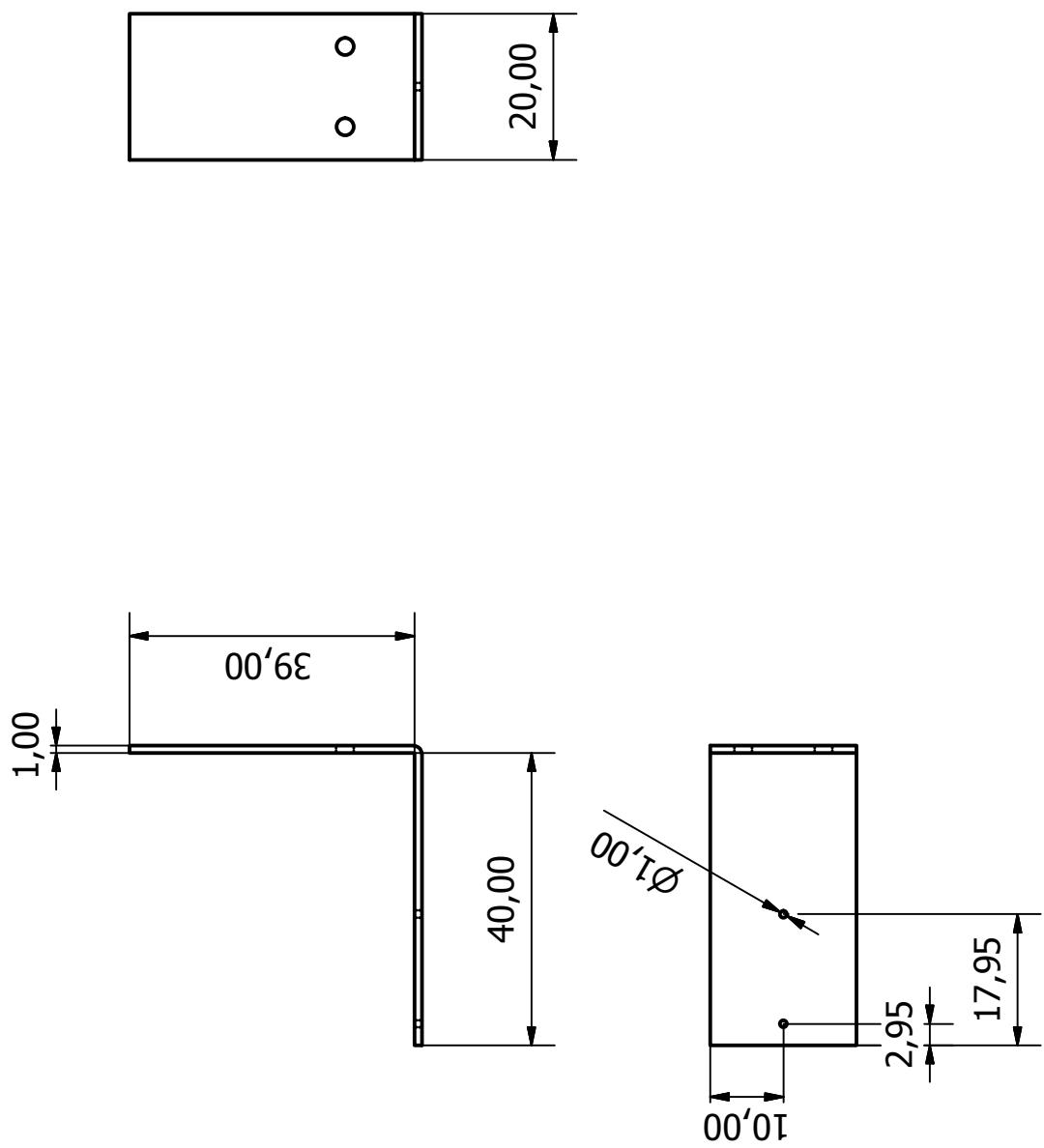


Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date	1:1	Date
				16/06/2013	
<b>Supor te do Servo Fixo</b>					
Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações					Item 1
					Edition 2
					Sheet 1 / 1

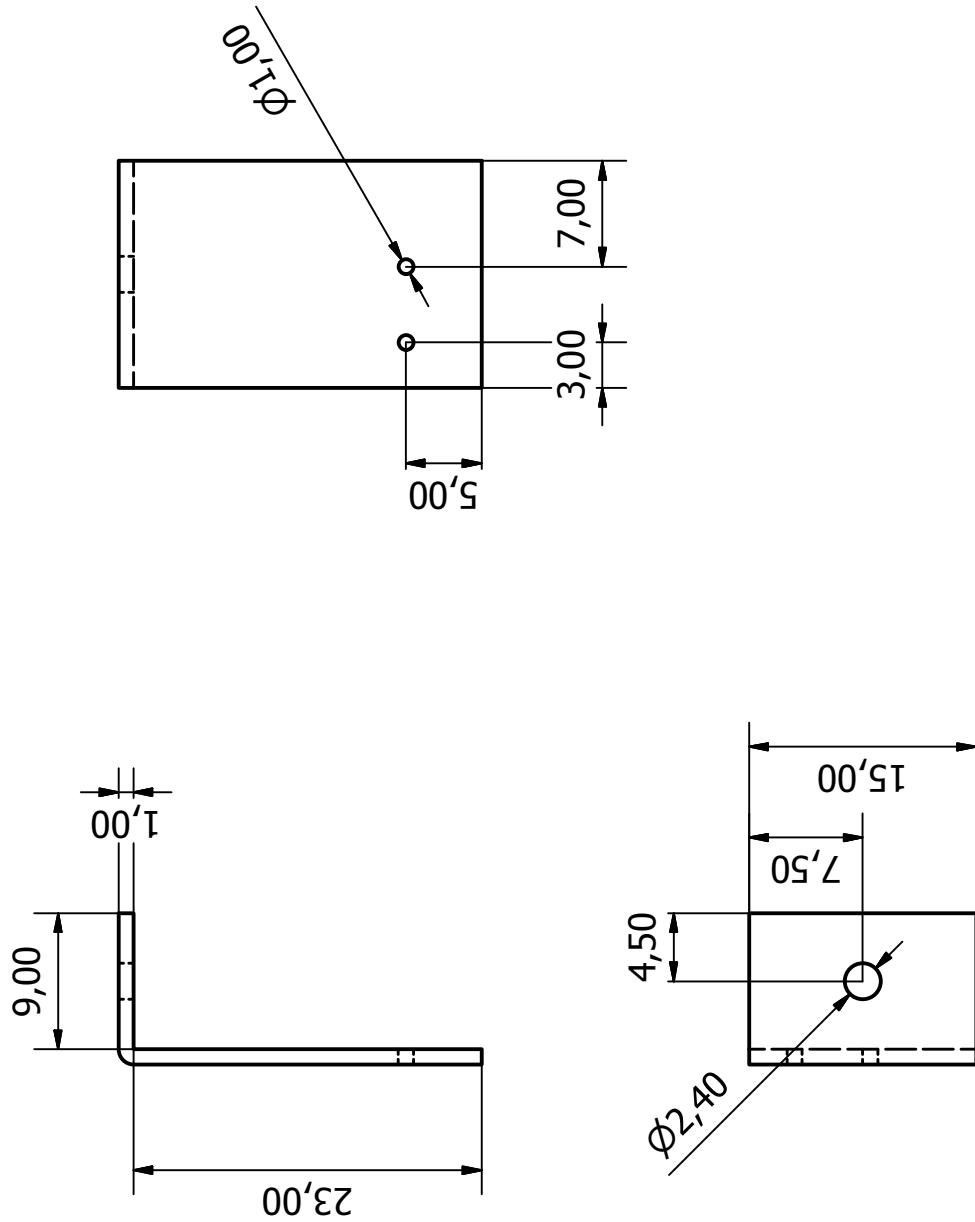




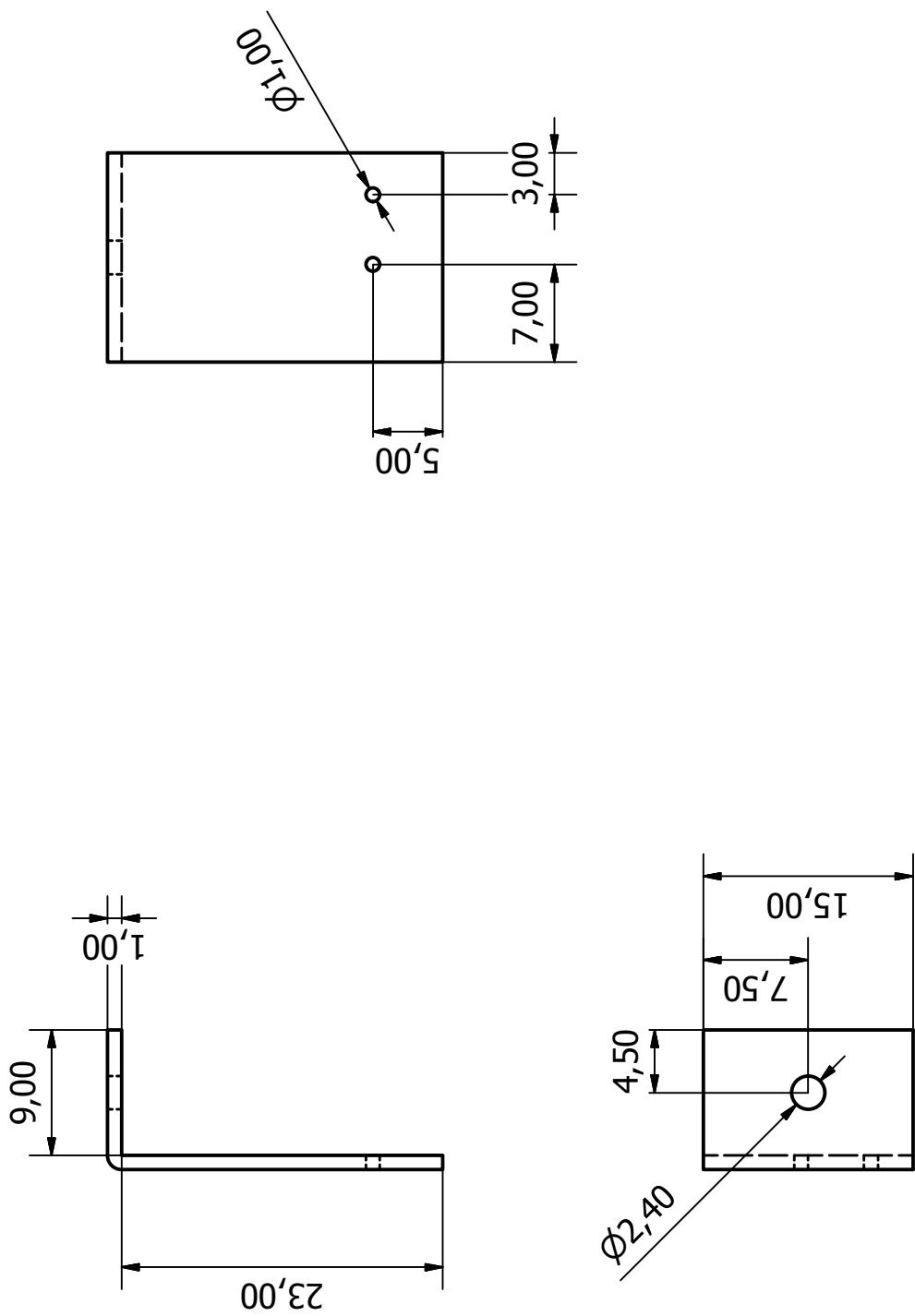
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date	1:1	Date
				06/11/2013	
<b>Braçadeira do Servo Móvel</b>					
Item 3					
Edition 2					Sheet 1 / 1



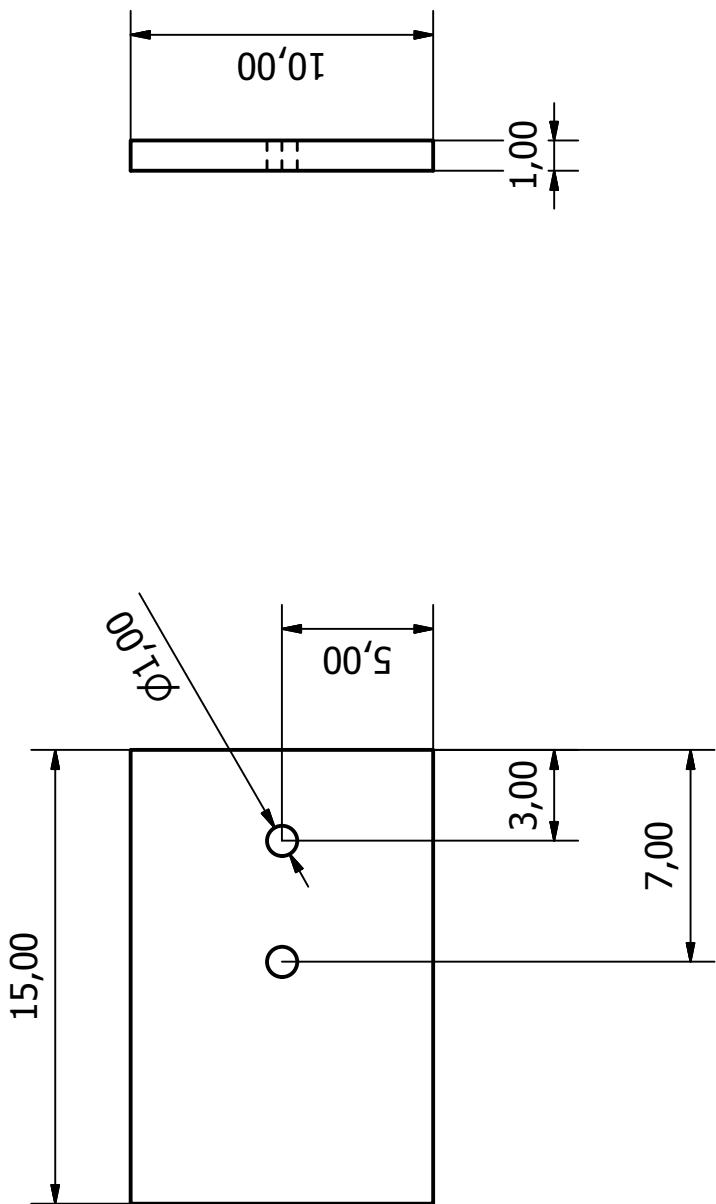
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date	1:1	Date
			06/11/2013		
<b>Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações</b>					<b>Supporto da Câmera</b>
Item 4					Item 4
					Edition 2
					Sheet 1 / 1



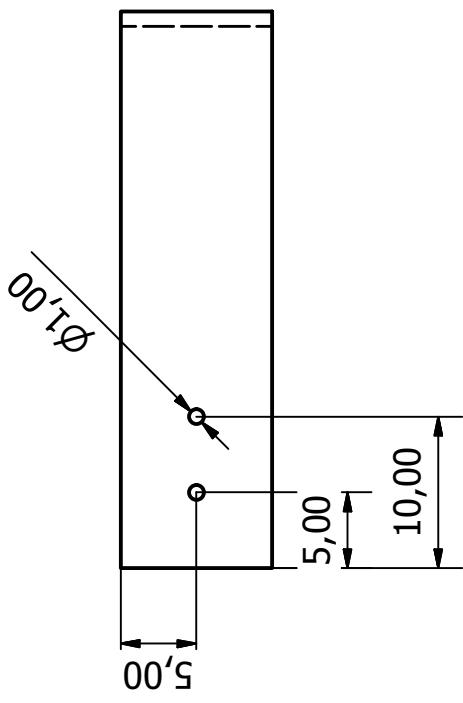
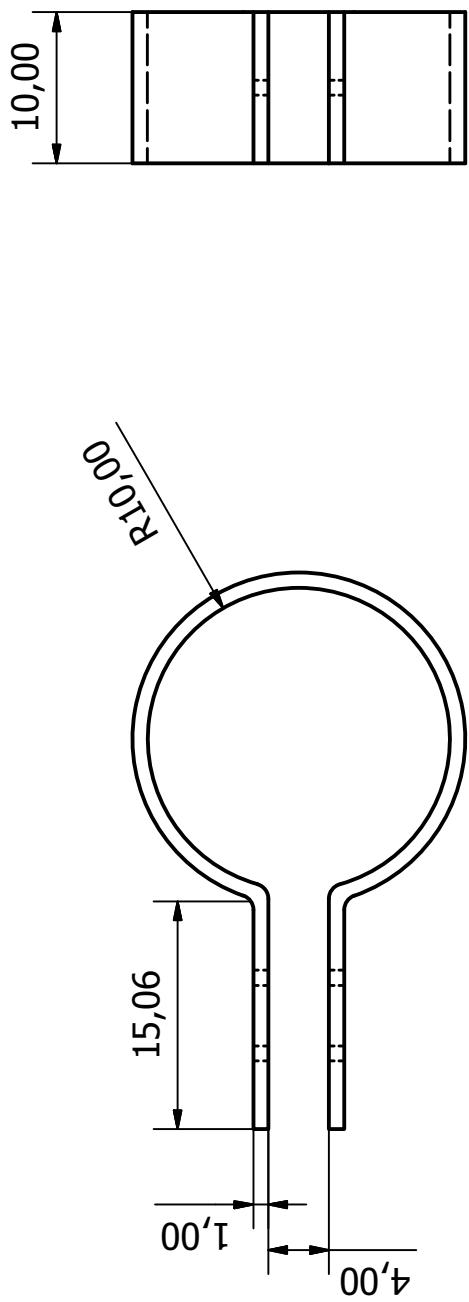
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date 2:1	Date 05/11/2013
<b>Sup. Superior da Braçadeira da Câmera</b>				
Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações	Item 5	Edition 2	Sheet 1 / 1	4



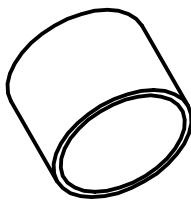
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date 2:1	Date 05/11/2013
<b>Sup. Inferior da Braçadeira da Câmera</b>				
Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações	Item 6	Edition 2	Sheet 1 / 1	4



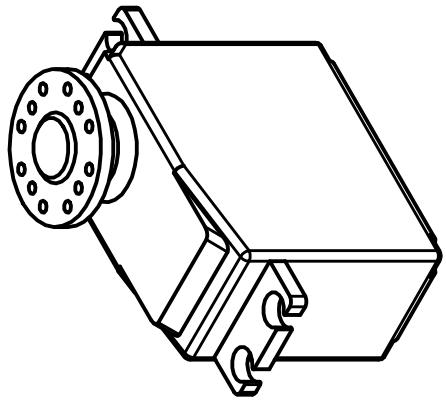
Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date	4:1	Date	05/11/2013
Sup. Adicional da Braçadeira da Câmera						
Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações	Item 7	Edition 2	Sheet 1 / 1			



Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date 2:1	Date 05/11/2013
<b>Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações</b>				<b>Braçadeira da Câmera</b>
Item 8	Edition 2	Sheet 1 / 1		



Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date 1:1	Date 05/11/2013
Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações	Item 9	Câmera	Edition 2	Sheet 1 / 1

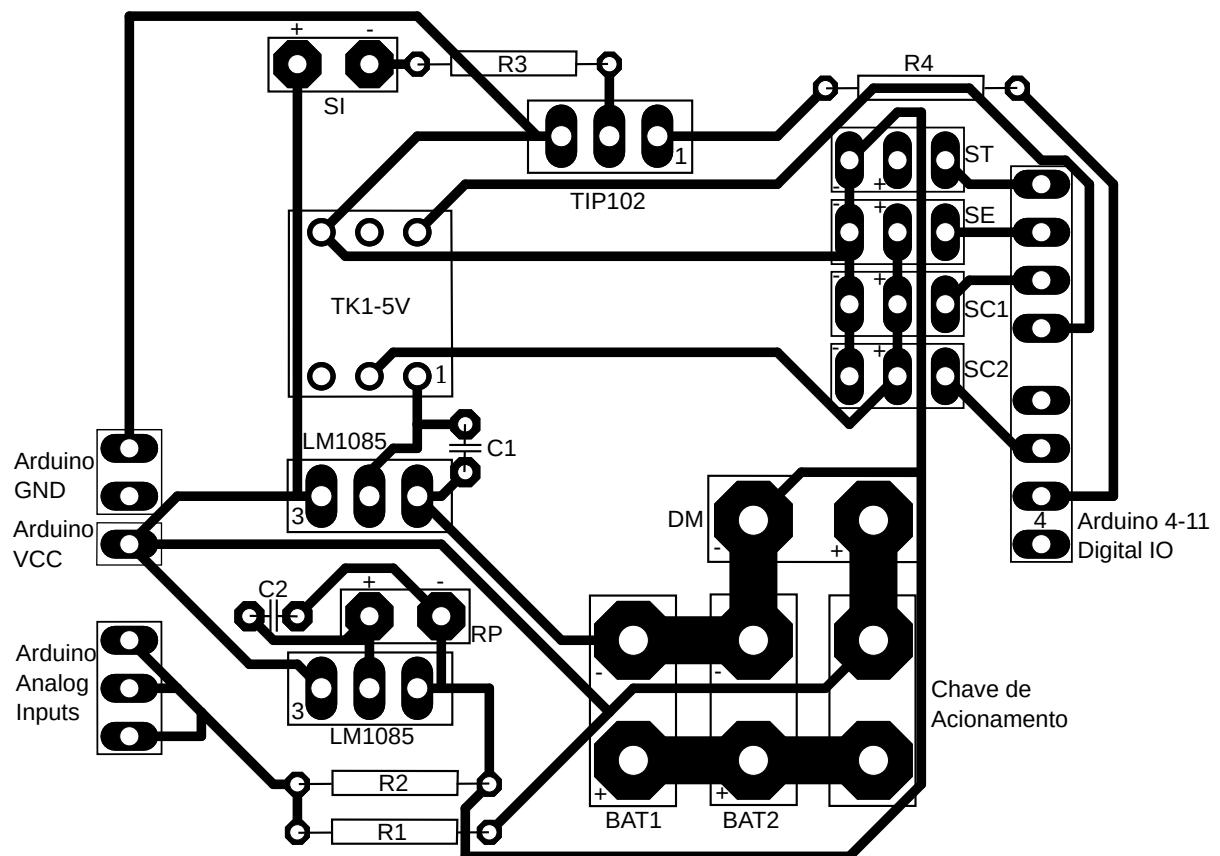


Designed by RRM/RB	Checked by	Approved by	Date 1:1	Date 05/11/2013
Robô terrestre tele-operado para inspeção de tubulações		Item 10	Servo	Edition 2
				Sheet 1 / 1

## APÊNDICE C – DESENHO DO SHIELD DO ARDUINO

O desenho da placa de circuito impresso do *shield* do Arduino está apresentado na Figura 27 em uma escala de 5 : 2. Nesta figura também estão indicados os componentes adicionados à placa com seus respectivos posicionamentos. Os servo motores e o Arduino são conectados a esta placa através de pinos soldados nas posições indicadas. A Tabela 7 apresenta a descrição dos componentes utilizados.

Figura 27 – Desenho do *shield* do Arduino



Fonte: Produção própria

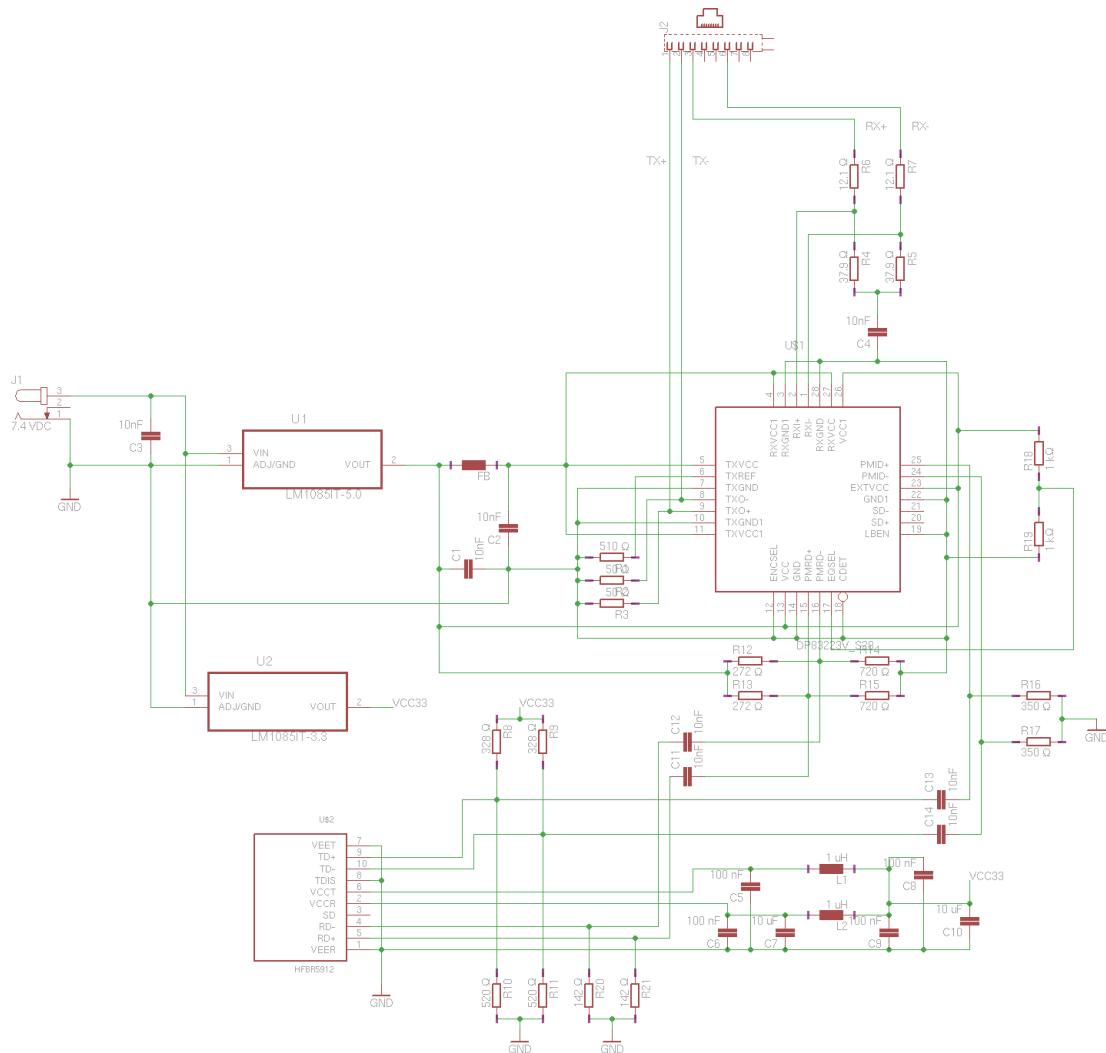
Tabela 7 – Descrição dos componentes do *shield* do Arduino.

Componente	Descrição
R1	Resistor de 470 $\Omega$
R2	Resistor de 470 $\Omega$
R3	Resistor de 220 $\Omega$
R4	Resistor de 1 k $\Omega$
C1	Capacitor de 10 nF
C2	Capacitor de 10 nF
TIP102	Transistor Darlington
LM1085	Regulador de tensão de 5V
BAT1	Bateria embarcada
BAT2	Bateria embarcada
TK1-5V	Relê de estado sólido
ST	Conexão do sistema de tração
SE	Conexão do servo de esterço
SC1	Conexão do servo de <i>pan</i> da câmera
SC2	Conexão do servo de <i>tilt</i> da câmera
RP	Alimentação do Raspberry Pi (Cabo micro USB)
DM	Conexão do driver do motor do sistema de tração
SI	Conexão dos LEDs do sistema de iluminação

## APÊNDICE D – INTERFACE DE FIBRA ÓPTICA

Durante a etapa de projeto, foi abordada uma interface que possibilita a utilização de cabos de fibra óptica para a comunicação do veículo com a estação de controle. Foi realizado o projeto<sup>1</sup> desta interface no software Eagle (Figura 28) e os componentes necessários para sua montagem foram adquiridos.

Figura 28 – Interface entre a comunicação por fibra óptica e a comunicação por cabo Twisted Pair.



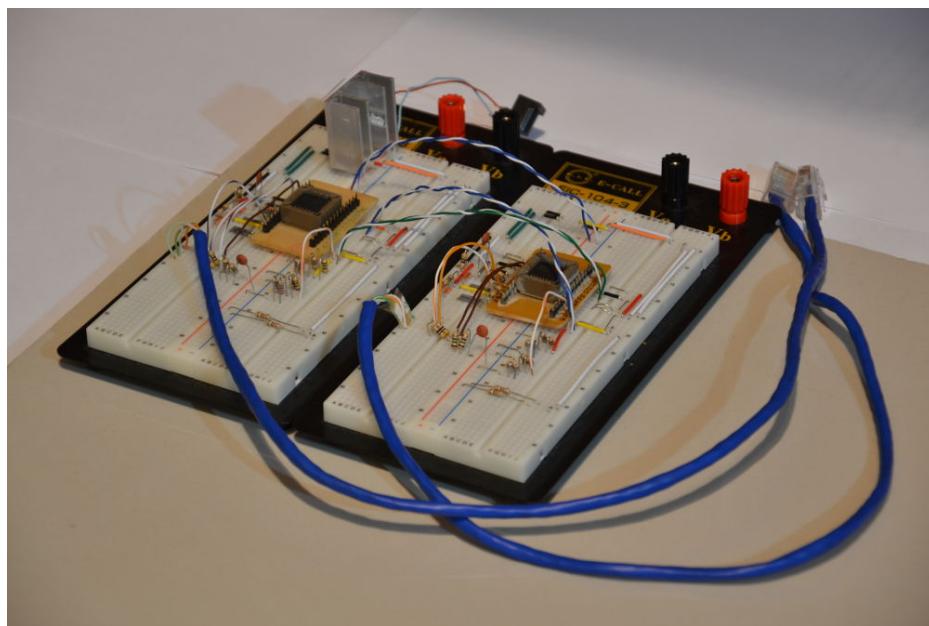
Fonte: Produção própria

A Figura 29 exibe a montagem em protoboard da interface ethernet a ser utilizada para a fabricação da interface de fibra óptica. Esta interface é responsável pela conversão dos sinais do tipo MLT-3 em NRZI. Esta conversão é necessária porque os transceptores de fibra óptica adquiridos recebem e enviam sinais PECL (Positive emitter-coupled logic) de

<sup>1</sup> O projeto da interface de fibra óptica foi realizado com base nos *datasheets* Agilent Technologies (2000) e National Semiconductor (1997).

codificação NRZI. Esta interface foi montada em protoboard com o objetivo de verificar seu funcionamento, contudo o circuito infelizmente não exibiu o comportamento desejado.

Figura 29 – Teste da interface ethernet



Fonte: Produção própria

Um trabalho futuro seria a revisão do projeto desta interface para a identificação dos motivos de falha no funcionamento. Como este circuito envolve sinais de frequência relativamente alta, da ordem de 100 MHz, seu projeto não é elementar e demanda de conhecimentos específicos na área de sistemas eletrônicos.

Abaixa está apresentada uma lista contendo todos os componentes eletrônicos da interface de fibra óptica.

```

1 Partlist
2
3 Exported from interface_100BASE-TX_1000BASE-SX.brd at 6/16/13 2:06 PM
4
5 EAGLE Version 6.4.0 Copyright (c) 1988–2013 CadSoft
6
7 Assembly variant:
8
9 Part      Value          Package
10
11 C1       10nF          C2.5-3
12 C2       10nF          C2.5-3
13 C3       10nF          C2.5-3
14 C4       10nF          C2.5-3
15 C5      100 nF         C2.5-3
16 C6      100 nF         C2.5-3

```

---

17	C7	10 uF	C2.5-3
18	C8	100 nF	C2.5-3
19	C9	100 nF	C2.5-3
20	C10	10 uF	C2.5-3
21	C11	10nF	C2.5-3
22	C12	10nF	C2.5-3
23	C13	10nF	C2.5-3
24	C14	10nF	C2.5-3
25	FB		0204/7
26	J1	7.4 VDC	SPC4077
27	J2		558310-1
28	L1	1 uH	0204/7
29	L2	1 uH	0204/7
30	R1	510 Ohm	0204/7
31	R2	50 Ohm	0204/7
32	R3	50 Ohm	0204/7
33	R4	37.9 Ohm	0204/7
34	R5	37.9 Ohm	0204/7
35	R6	12.1 Ohm	0204/7
36	R7	12.1 Ohm	0204/7
37	R8	328 Ohm	0204/7
38	R9	328 Ohm	0204/7
39	R10	520 Ohm	0204/7
40	R11	520 Ohm	0204/7
41	R12	272 Ohm	0204/7
42	R13	272 Ohm	0204/7
43	R14	720 Ohm	0204/7
44	R15	720 Ohm	0204/7
45	R16	350 Ohm	0204/7
46	R17	350 Ohm	0204/7
47	R18	1 kOhm	0204/7
48	R19	1 kOhm	0204/7
49	R20	142 Ohm	0204/7
50	R21	142 Ohm	0204/7
51	U\$1	DP83223V_S28	S28
52	U\$2	HFBR5912	HFBR5912
53	U1	LM1085IT-5.0	TO254P470X1016X2222-3P
54	U2	LM1085IT-3.3	TO254P470X1016X2222-3P