



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ricardo Filipe Vilaça Miranda

**Projeto de suporte de carga para robôs móveis autónomos de
transporte cooperativo**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob orientação de

Professor Doutor Sérgio Paulo Carvalho Monteiro

Professor Doutor João Paulo Flores Fernandes

Dezembro de 2019

Direitos de autor e condições de utilização do trabalho por terceiros

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada. Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostava de agradecer ao meu orientador Professor Sérgio Monteiro pela orientação e pela oportunidade de trabalhar neste projeto e ao meu coorientador Professor Paulo Flores pelo conhecimento técnico fornecido e pela orientação no decorrer deste projeto.

Gostava também de agradecer ao Técnico Filipe Marques pela disponibilidade que demonstrou para apoiar na escolha dos materiais e planeamento da construção do protótipo.

Obrigado ao meu amigo João Barbosa pela ajuda que me deu no que tocou à seleção dos componentes eletrónicos e planeamento da sua montagem; por ser alguém com quem eu posso sempre contar desde que nos conhecemos e por demonstrar paciência comigo quando muitos outros a teriam perdido.

Por fim, gostava de deixar a minha gratidão aos meus pais que sempre me apoiaram ao longo desta jornada e que nunca deixaram de acreditar em mim mesmo quando eu duvidava de mim mesmo, sem eles isto não teria sido possível.

Declaração de integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

O transporte coletivo por equipas de robôs móveis autônomos é uma configuração vantajosa quando os objetos a transportar são de elevadas dimensões e quando o ambiente de trabalho apresenta obstáculos a contornar.

Tendo este princípio como base do projeto que se apresenta, desenvolveu-se na Universidade do Minho, numa parceria entre o Departamento de Engenharia Mecânica e o Departamento de Eletrónica Industrial, um sistema de suporte de carga com a finalidade de ser implementado numa equipa de robôs móveis autônomos desenvolvida no *Mobile and Anthropomorphic Robotics Lab* do Departamento de Eletrónica Industrial.

Este sistema de suporte de carga permite à equipa de robôs transportarem uma carga, mantendo a estabilidade da posição da carga, através da compensação de quaisquer desvios que possam surgir devido a manobras efetuadas pela equipa de robôs.

Pretende-se com o presente trabalho criar um conceito capaz de ser verificável a nível de protótipo que posteriormente possa ser escalado de modo a suportar cargas superiores às que atualmente terá de suportar.

Palavras-chave: Transporte de carga, robôs cooperativos, mecanismo de suporte de carga.

Abstract

The cooperative load transportation by a team of mobile robots is an advantageous configuration when the loads to transport have big dimensions, have complex shapes and when the workspace presents obstacles that the robots or team of robots must be able to avoid.

Having this concept as a basis of the current project, it was developed in Universidade do Minho, in a partnership between the departments of Mechanical and Electrical Engineering, a system for load support with the goal of being implemented on a team of autonomous mobile robots developed in the Mobile and Anthropomorphic Robotics Lab of the Department of Electrical Engineering.

This load support system allows the robot team to transport a load, assuring the stability of the said load, this is achieved by counteracting any deviations by the load from a central point, caused by the robot team's maneuvers.

Keywords: Load transportation, cooperative robots, load support mechanism.

Índice

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Direitos de autor e condições de utilização do trabalho por terceiros | 1 |
| Agradecimentos | 2 |
| Declaração de integridade | 3 |
| Resumo | 4 |
| Abstract | 5 |
| Índice de Figuras..... | 4 |
| Índice de Tabelas | 8 |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1. Motivação e pertinência do tema | 1 |
| 1.2. Objetivos do trabalho | 3 |
| 1.3. Estrutura da Dissertação | 4 |
| 2. Estado da Arte..... | 5 |
| 2.1. Controlo cooperativo de vários robôs móveis para o transporte de um objeto com manipulação folgada 5 | |
| 2.2. Conformidade: Informação codificada e comportamento numa equipa de robôs cooperativos para a manipulação de objetos..... | 6 |
| 2.3. Transporte cooperative realizado por vários robôs móveis num ambiente estático desconhecido associado a atribuição de tarefas em tempo real..... | 8 |
| 2.4. Seguimento de orientação humana para o transporte cooperativo de um objeto de alta dimensão | 11 |
| 2.5. Estudo de um caso de transporte colaborativo háptico de um objeto efetuado por um conjunto humano-humanóide | 12 |
| 2.6. Transporte cooperativo de uma carga recorrendo a robôs móveis não-holonómicos | 13 |
| 2.7. Discussão e Conclusões..... | 15 |
| 3. Breve resumo sobre as metodologias de projeto..... | 16 |
| 3.1. Árvore de objetivos..... | 16 |

| | | |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.1. | Segurança..... | 17 |
| 3.1.2. | Eficiência de custo | 17 |
| 3.1.3. | Boas Caraterísticas Operacionais..... | 18 |
| 3.2. | Método dos Objetivos Ponderados..... | 18 |
| 4. | Conceção e Desenvolvimento do Sistema | 20 |
| 4.1. | Descrição do Problema | 20 |
| 4.2. | Definição de Requisitos e Especificações | 20 |
| 4.3. | Possíveis Soluções..... | 21 |
| 4.4. | Análise | 23 |
| 4.5. | Sumário e Conclusões | 24 |
| 5. | Implementação e Validação da Solução Adotada | 25 |
| 5.1. | Descrição e Modelação da Solução | 25 |
| 5.2. | Análise | 44 |
| 5.2.1. | Atrito..... | 44 |
| 5.2.2. | Esforços Normais..... | 46 |
| 5.3. | Orçamento | 48 |
| 5.3.1. | Impressão 3D | 48 |
| 5.3.2. | Placas de Acrílico | 48 |
| 5.3.3. | Microprocessadores, reguladores de tensão, adaptadores para pilha, módulos de <i>Bluetooth</i> 48 | |
| 5.3.4. | Encoders..... | 49 |
| 5.3.5. | Custo Total | 49 |
| 5.4. | Plano de Construção de Protótipo | 50 |
| 5.5. | Discussão Final..... | 59 |
| 6. | Conclusões e Trabalhos Futuros | 60 |
| 6.1. | Conclusões..... | 60 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 6.2. Desenvolvimentos Futuros | 60 |
| 7. Referências Bibliográficas | 61 |
| Anexo 1 | 63 |
| Fichas Técnicas..... | 63 |
| Encoder | 63 |
| Módulo de Bluetooth..... | 69 |

Índice de figuras

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Robô usado nos armazéns da Amazon a transportar uma estante de produtos para a estação de trabalho correspondente [4]..... | 2 |
| Figura 2 – Robôs utilizados no projeto “Multi-constrained joint transportation tasks by teams of autonomous mobile robots using a dynamical systems approach” [5]..... | 2 |
| Figura 3 – Representação esquemática do sistema de dois robôs a contornar um obstáculo [5] | 3 |
| Figura 4 – Robô construído para o projeto (à esquerda) e objeto transportado (à direita) [6] | 5 |
| Figura 5 – Equipa de Robôs em funcionamento [6]..... | 6 |
| Figura 6 – Representação esquemática do braço e extremidade dos robôs [7] | 7 |
| Figura 7 – Braço do robô [7] | 7 |
| Figura 8 – Um dos robôs utilizado no sistema concebido [7]..... | 8 |
| Figura 9 – Representação esquemática do comportamento do sistema desenvolvido [8] | 9 |
| Figura 10 – Execução experimental de uma tarefa atribuída ao sistema desenvolvido [8] | 10 |
| Figura 11 – Cosero a pegar numa colher (esquerda) e a fazer uma omelete (direita) [9] | 11 |
| Figura 12 –Cosero a transportar uma mesa em cooperação com um humano. O humano guia o robô ao longo de um apartamento na final da RoboCup@Home na RoboCup 2011, Istanbul, Turquia [9].. | 12 |
| Figura 13 – Configuração usada na recolha de dados [10] | 12 |
| Figura 14 – HRP-2 a realizar a tarefa de transporte em cooperação com um humano, com o humano a fazer o papel de líder e o robô de seguidor [10] | 13 |
| Figura 15 – Da esquerda para a direita: dimensões do Bebop; Bebop com a plataforma acoplada; representação dos dados medidos pelos sensores da plataforma acoplada [11]..... | 14 |
| Figura 16 – Configuração usada para a validação experimental do sistema de controlo desenvolvido [11] | 14 |
| Figura 17 – Instantâneos da experiência, usando três robôs Bebop para o transporte cooperativo de um objeto [11] | 15 |
| Figura 18 – Árvore de objetivos do projeto | 17 |
| Figura 19 – Ilustração do plano cartesiano usado e das áreas de curso (círculo vermelho) e dimensões máximas (círculo preto) para o problema em estudo..... | 21 |
| Figura 20 – Desenho CAD da primeira solução proposta..... | 21 |
| Figura 21 – Desenho representativo de um mecanismo do tipo delta [11]..... | 22 |
| Figura 22 – Esboço da segunda solução proposta | 22 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23 – Desenho CAD da terceira solução proposta..... | 23 |
| Figura 24 – Mecanismo após a implementação do sistema de 4 molas | 25 |
| Figura 25 – Aro acrescentado ao sistema de cilindros..... | 26 |
| Figura 26 – Vista explodida do sistema de 2 cilindros com o aro..... | 26 |
| Figura 27 – Esquema representativo da solução adotada para a acomodação das molas no mecanismo em desenvolvimento | 27 |
| Figura 28 – À esquerda, peça para apoiar os fios, à direita batente após alterações..... | 27 |
| Figura 29 – Assembly do mecanismo após alterações ao batente e adição dos apoios para os fios ... | 28 |
| Figura 30 – Apoio para o braço superior, com vista em perspetiva à esquerda e vista em corte à direita | 28 |
| Figura 31 – Assembly após a introdução do apoio para a haste superior..... | 29 |
| Figura 32 – Braço com um furo numa extremidade e dois pinos na extremidade oposta | 29 |
| Figura 33 – Haste oca, com batentes em cada uma das extremidades e sulcos ao longo do seu comprimento | 29 |
| Figura 34 – Sistema haste-braço | 30 |
| Figura 35 – Montagem da haste superior e cilindro superior | 30 |
| Figura 36 – Braço inferior após alteração de modo a acomodar a porca | 31 |
| Figura 37 – Peça para o apoio da carga a suportar pelo sistema..... | 31 |
| Figura 38 – Assembly após a introdução do apoio de carga..... | 32 |
| Figura 39 – Encoder absoluto Bourns ® EMS22A30-C28-MS6-ND [13] | 33 |
| Figura 40 – Esquema representativo do modo de obtenção da posição do ponto de apoio da carga, recorrendo aos dados fornecidos através de cada um dos encoders (ângulo 1 e ângulo 2) | 33 |
| Figura 41 – Placa compatível com Arduino ® Nano 3.0 [15] | 34 |
| Figura 42 – Esquema representativo do circuito contido no cilindro superior; RT – Regulador de tensão [16] | 35 |
| Figura 43 – Cilindro superior após alterações estruturais..... | 36 |
| Figura 44 – Peça responsável pela fixação do encoder na sua posição..... | 37 |
| Figura 45 – Identificação dos componentes que cada uma das câmaras do cilindro superior irá alojar | 37 |
| Figura 46 – Pormenor do mecanismo com os eixos onde irão estar inseridos os parafusos realçados | 38 |
| Figura 47 – Peça criada para transmissão do movimento entre parafuso e encoder, vista em perspetiva à esquerda e centro e vista em corte à direita..... | 38 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 48 – Recipientes para a eletrônica da parte inferior, com as duas primeiras imagens representando o recipiente onde está inserido a maior parte dos componentes do circuito elétrico e as duas imagens da direita representam o recipiente que irá conter apenas um dos encoders..... | 39 |
| Figura 49 – Peças às quais vão ser acoplados os recipientes..... | 39 |
| Figura 50 – Representação da montagem do recipiente para os componentes eletrônicos da parte inferior menor..... | 40 |
| Figura 51 – Representação da montagem do recipiente para os componentes eletrônicos da parte inferior maior..... | 41 |
| Figura 52 – Esquema representativo do modo de como irá ser feita a transmissão de movimento entre os braços e os respectivos encoders | 42 |
| Figura 53 – À esquerda, o robô em estudo e à direita destaque no encaixe do mecanismo atual ao corpo do robô..... | 42 |
| Figura 54 – Conjunto base..... | 43 |
| Figura 55 – Caixa para as molas à esquerda e encaixe para as caixas das molas à direita | 43 |
| Figura 56 – Peças em PLA usadas para o teste do atrito de uma matriz PLA-PLA..... | 45 |
| Figura 57 – Peças usadas para o teste do atrito de uma matriz PLA-Acrílico..... | 46 |
| Figura 58 – Simulação com carga normal de 100N aplicada nos cilindros quando este estão numa posição central..... | 47 |
| Figura 59 – Simulação com uma carga normal de 100N aplicada nos cilindros quando este estão numa posição extrema..... | 47 |
| Figura 60 – haste oca superior antes da sua alteração à esquerda e à direita a haste oca superior encaixada no cilindro superior | 50 |
| Figura 61 – Haste superior após a sua divisão em duas peças | 50 |
| Figura 62 – Sequência de montagem do cilindro superior com a haste e braço superior | 51 |
| Figura 63 - Encaixe | 52 |
| Figura 64 – Peça cilíndrica..... | 52 |
| Figura 65 – Base | 53 |
| Figura 66 – Conjunto base..... | 53 |
| Figura 67 – Fixação do apoio para o braço superior na base..... | 54 |
| Figura 68 – Conjunto após a fixação do batente e das peças para apoiar os fios | 54 |
| Figura 69 – Conjunto após a fixação do braço inferior..... | 55 |
| Figura 70 – Conjunto após a fixação da haste inferior | 55 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 71 – Conjunto após a fixação do cilindro inferior | 56 |
| Figura 72 – Conjunto após a fixação do cilindro superior, haste superior, braço inferior e do aro | 56 |
| Figura 73 – Conjunto após a fixação do suporte de carga | 57 |
| Figura 74 – Conjunto após a montagem dos recipientes para os componentes eletrónicos..... | 57 |
| Figura 75 e 76 – Montagem de uma das caixas para as molas..... | 58 |

Índice de tabelas

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Exemplo de uma tabela de objetivos ponderados [12] | 19 |
| Tabela 2 – Tabela com o peso relativo de cada objetivo | 19 |
| Tabela 3 – Tabela de objetivos ponderados | 24 |
| Tabela 4 – Propriedades relevantes do encoder Bourns ® EMS22A30-C28-MS6-ND [14]..... | 33 |
| Tabela 5 – Tabela com o significado dos pinos do encoder representado na figura anterior | 35 |
| Tabela 6 – Orçamento do projeto | 49 |

1. Introdução

Neste capítulo será feita uma breve apresentação sobre a evolução da robótica, abordando a sua implementação em ambiente industrial. Posteriormente, irá ser apresentado o projeto sobre o qual o trabalho realizado se irá inserir. De seguida ir-se-ão definir os objetivos propostos e, por fim será indicada a organização dos capítulos da dissertação.

1.1. Motivação e pertinência do tema

Desde o início dos anos 70 a robótica tem tido uma penetração cada vez maior em ambiente industrial [1][2]. Isto veio como consequência do facto de robôs serem bastante úteis no que diz respeito a tarefas monótonas, repetitivas e/ou que requeiram alta precisão. Tarefas deste tipo são uma consequência inevitável numa linha de produção, o que faz com que o campo industrial seja um ambiente no qual a implementação de robôs faça todo o sentido.

Com o advento da intitulada 4^a revolução industrial há uma incorporação crescente da robótica no ambiente de trabalho fabril, havendo uma sobreposição dos locais de trabalho de trabalhadores e robôs. Tal feito foi possível devido ao desenvolvimento de componentes eletrónicos, mais especificamente de sensores que permitem aos robôs trabalhar em conjunto e até colaboração com operadores fabris evitando danos físicos aos operadores que partilham o ambiente de trabalho com os ditos robôs. Também com a evolução da tecnologia, assim como do campo da robótica no geral expandiram-se o tipo de tarefas que um robô consegue realizar sendo estas cada vez mais complexas na sua natureza. Hoje em dia vê-se esta cooperação na indústria no que toca ao transporte de cargas num ambiente de chão de fábrica, em que uma tarefa simples que iria consumir muito tempo a um operário é realizada por um robô de modo a aumentar o tempo efetivo de produção de um determinado posto de trabalho. Este tipo de colaboração é visível nos armazéns da Amazon, no qual parcelas a ser enviadas são transportadas entre diferentes estações de trabalho por robôs [3][4]. Um dos robôs utilizados nos armazéns da Amazon apresenta-se na Figura 1.



Figura 1 – Robô usado nos armazéns da Amazon a transportar uma estante de produtos para a estação de trabalho correspondente [4]

Apesar de bastante úteis, robôs deste gênero apresentam limitações no tipo de carga que são capazes de transportar.



Figura 2 – Robôs utilizados no projeto “Multi-constrained joint transportation tasks by teams of autonomous mobile robots using a dynamical systems approach” [5]

O projeto “Multi-constrained joint transportation tasks by teams of autonomous mobile robots using a dynamical systems approach” [5] apresenta uma solução muito interessante a esta limitação que passa pela utilização de uma equipa de robôs de modo a possibilitar o transporte de cargas com geometrias mais complexas e com o auxílio de uma rede de sensores e visão. O sistema é capaz de criar uma trajetória entre dois locais distintos num chão de fábrica, evitando obstáculos fixos ou móveis, tendo também a capacidade de compensar pelas dimensões da carga que transporta na trajetória que efetua. Isto de modo a evitar que a carga seja desviada dos seus

apoios e possivelmente derrubada, este aspeto é especialmente crítico quando a equipa de robôs contorna uma aresta, tal como se pode observar na Figura 3.

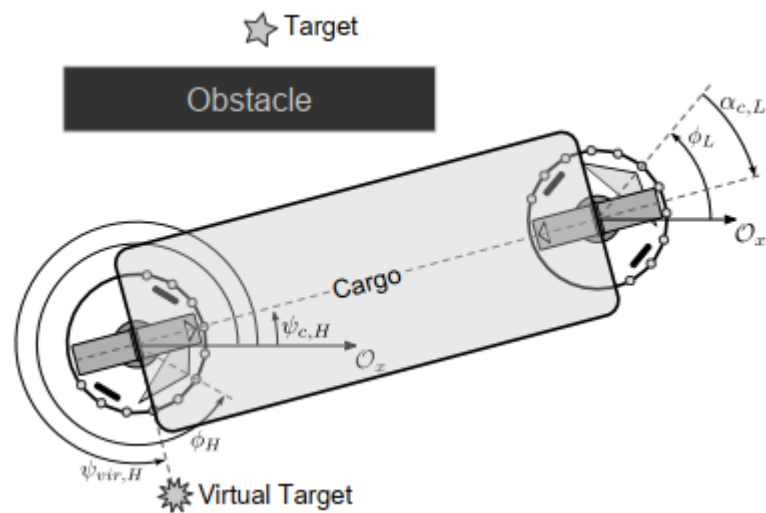


Figura 3 – Representação esquemática do sistema de dois robôs a contornar um obstáculo[5]

1.2. Objetivos do trabalho

De modo a melhorar o sistema mencionado acima decidiu-se refazer o sistema de apoio. Este sistema de apoio é responsável por compensar desvios na posição relativa entre os robôs de modo a garantir o funcionamento da equipa de robôs sem que a carga a transportar sofra deformações ou que seja derrubada. Decidiu-se refazer este sistema pelo facto de o sistema existente ser bastante rudimentar e deixa a desejar em termos de robustez. Pretende-se assim conseguir um sistema robusto, fiável e cujo princípio seja capaz de ser aplicado para o transporte de objetos mais pesados.

Definiu-se então como objetivos deste trabalho a conceção, desenvolvimento e prototipagem de um suporte de carga para ser implementado em robôs móveis autónomos que efetuam o transporte de carga em cooperação com outros robôs. Este suporte deverá ser suficientemente solidário quando a carga é transportada em, pelo menos, dois robôs móveis e deverá ser instrumentado de forma a medir os desvios (de posição e orientação) da carga relativamente ao centro do robô. Para isso é necessário desenhar, construir e testar a solução adotada.

1.3. Estrutura da dissertação

O presente documento é composto por 5 capítulos, no capítulo 2 fez-se um sumário da pesquisa efetuada no decorrer da dissertação. No capítulo 3 abordam-se as metodologias de projeto relevantes e aplica-as ao mecanismo a desenvolver.

No capítulo 4 é definido o problema a resolver, são apresentadas diferentes soluções para resolver o problema em causa, o mérito destas soluções é avaliado e, por fim, define-se qual a melhor solução para o problema e conseqüentemente, a melhor solução a adotar.

No capítulo 5 a solução adotada é desenvolvida e é realizada a modelação em desenho CAD 3D desta mesma, são também feitos estudos em relação a atritos e esforços normais no mecanismo e conforme estes dados são escolhidos os materiais mais apropriados a adotar. Também é analisado o custo da construção do mecanismo e também é apresentado o plano de construção do protótipo.

Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões e possíveis trabalhos futuros.

2. Estado da arte

O transporte de carga colaborativo por parte de uma equipa de robôs ainda é uma área recente no campo da robótica, por esta razão, o trabalho efetuado nesta área ainda se encontra exclusivamente contido num ambiente académico e uma grande parte destes foi apenas realizado em ambiente virtual, tal como se irá observar nesta secção do relatório.

2.1. Controlo cooperativo de vários robôs móveis para o transporte de um objeto com manipulação folgada

Neste projeto, com o título original de *Cooperative Control of Multiple Mobile Robots Transporting a Single Object with Loose Handling*, foi dimensionada uma equipa de dois robôs que trabalham em conjunto para transportar uma carga suspensa por ganchos, usando um sistema líder-seguidor no seu controlo.

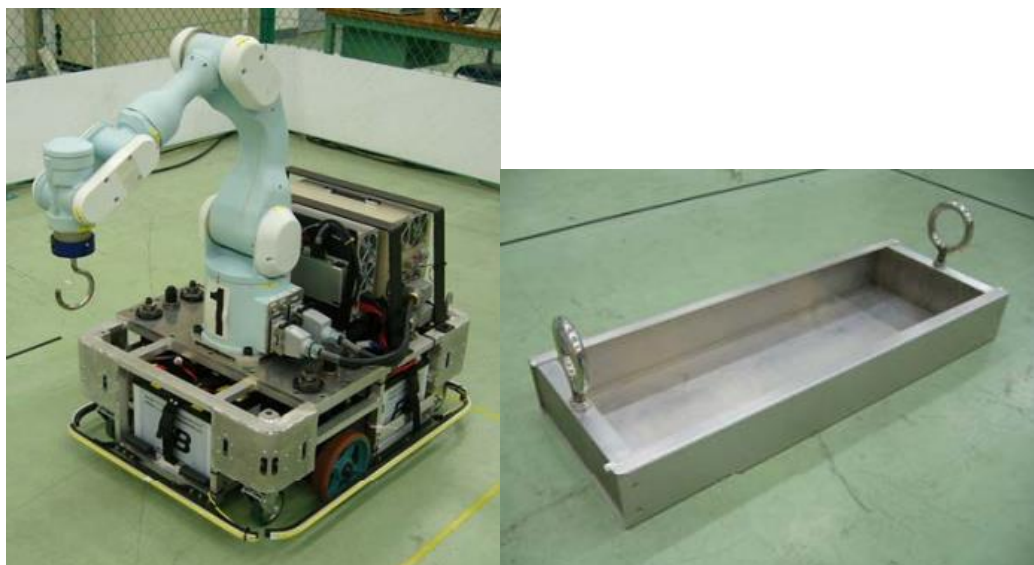


Figura 4 – Robô construído para o projeto (à esquerda) e objeto transportado (à direita) [6]

A trajetória a seguir é dada apenas ao líder e o seguidor estima a trajetória do líder usando a força que o objeto efetua sobre o braço do robô seguidor durante o transporte do braço. Se o objeto a ser transportado fosse suportado pelos robôs rigidamente as forças exercidas pelo robô líder seriam imediatamente transmitidas ao robô seguidor, mas pelo facto de o objeto ser transportado por ganchos irá fazer com que a força que o líder exercer sobre o objeto ira ser

transmitida com atraso para o seguidor, portanto transporte cooperativo irá falhar se for usado um algoritmo tradicional.



Figura 5 – Equipe de Robôs em funcionamento [6]

Cada um dos robôs é composto por um manipulador com 6 graus de liberdade fixado no topo de um veículo, manipuladores que irão ter como extremidade um gancho [6].

2.2. Conformidade: Informação codificada e comportamento numa equipa de robôs cooperativos para a manipulação de objetos

Neste artigo, com o título original de *Compliance: encoded information and behavior in a team of cooperative object-handling robots*, concebeu-se um sistema de transporte cooperativo constituído por dois robôs, cada um deles composto por uma base móvel, um braço e uma extremidade para o apoio da carga a transportar. Uma junta rotacional liga o braço à base móvel, a primeira junta prismática move-se na direção do comprimento do braço, e a segunda junta prismática move-se na direção vertical. A extremidade do braço é composta por três juntas rotacionais com eixos de rotação perpendiculares que se interseçam.

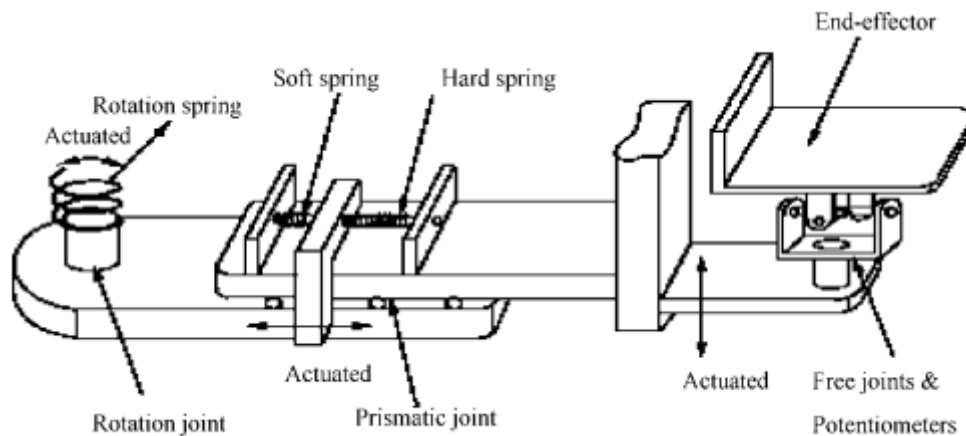


Figura 6 – Representação esquemática do braço e extremidade dos robôs [7]

Em algumas situações cada um dos robôs deste sistema terá de exercer forças elevadas sobre objeto, isto não se pode concretizar de maneira prática se o braço não tiver rigidez suficiente, contudo é necessário que os braços sejam rígidos de forma a estes não bloquearem durante funcionamento do sistema. Para resolver este problema usaram-se duas molas de compressão, uma de alta rigidez e outra de baixa rigidez de modo a que o braço seja facilmente estendido e dificilmente comprimido.

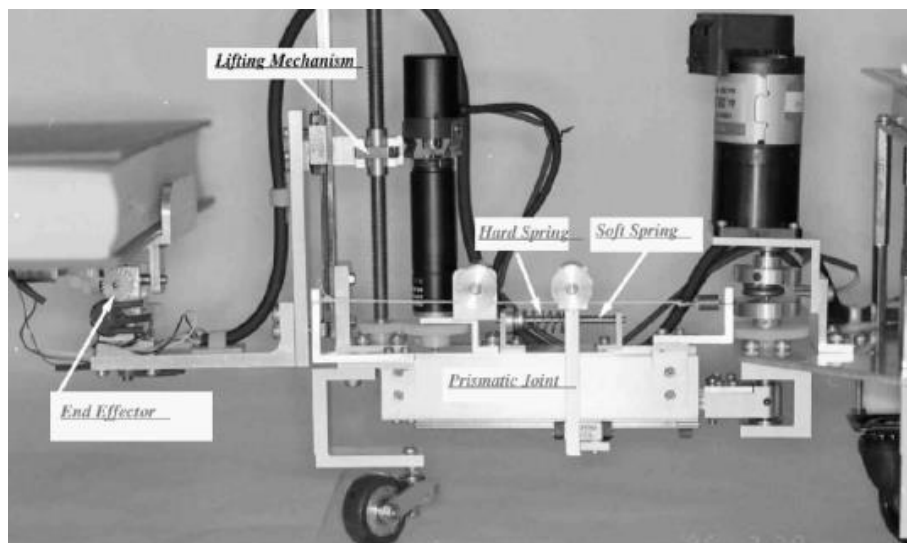


Figura 7 – Braço do robô [7]

De modo a conferir ao apoio alguma solidariedade na direção do plano perpendicular ao braço, o motor da junta rotacional do braço está ligado ao braço por uma mola de torção. A junta prismática que confere o movimento de translação do braço na direção deste mesmo é composta por duas guias de baixo atrito localizadas debaixo do braço e as duas molas acima mencionadas

e um motor de passo engrenado num fuso sem fim, o mesmo tipo de motor é usado na junta prismática vertical. [7]

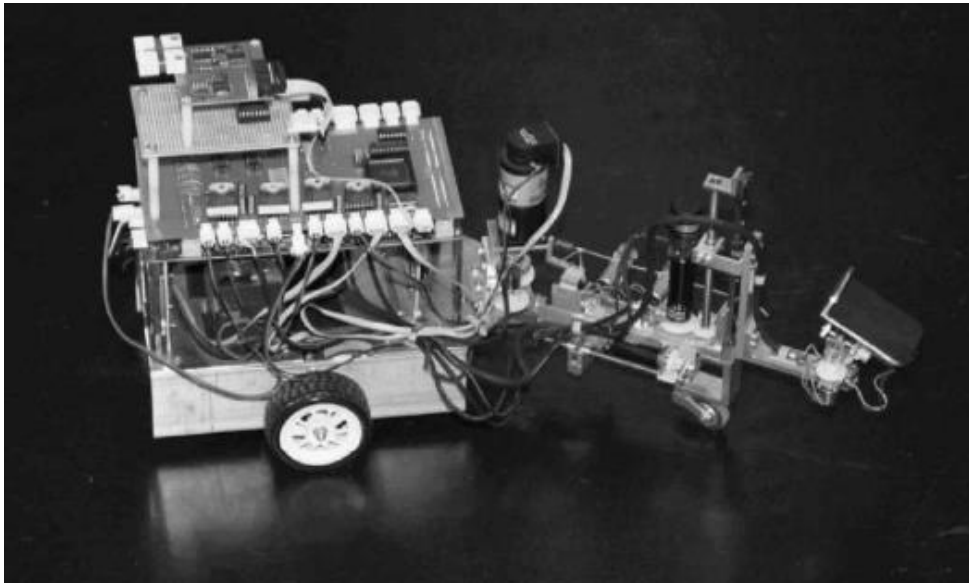


Figura 8 – Um dos robôs utilizado no sistema concebido [7]

2.3. Transporte cooperativo realizado por vários robôs móveis num ambiente estático desconhecido associado a atribuição de tarefas em tempo real

Este projeto, com o título original de *Cooperative Transport by Multiple Mobile Robots in Unknown Static Environments Associated with Real-Time Task Assignment*, consistiu no desenvolvimento de um sistema composto por uma equipa de robôs cooperativos que em conjunto irão recolher informação sobre o local de trabalho, de seguida irão proceder à remoção de obstáculos e, por fim, irão transportar um determinado objeto cooperativamente até ao seu destino.

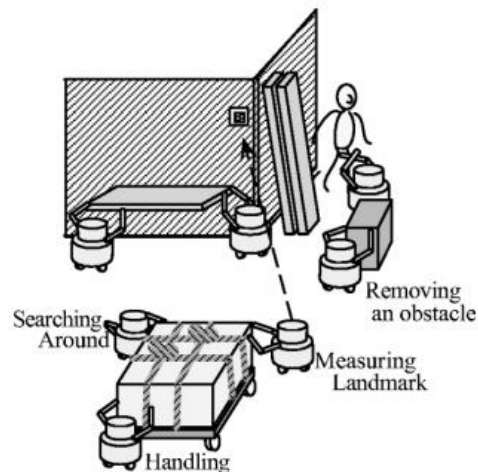


Figura 9 – Representação esquemática do comportamento do sistema desenvolvido [8]

Como este sistema engloba várias tarefas, é necessário haver uma hierarquização em sub-tarefas a realizar de modo ao sistema funcionar de uma maneira fluida e cumprir a tarefa atribuída ao sistema. Foi definida a seguinte sequência de passos a seguir para garantir uma execução correta das tarefas atribuídas ao sistema, esta sequência de passos irá ser repetida em intervalos de tempo constantes:

1. Verificação do número de robôs disponíveis para a execução da tarefa atribuída.
2. Recolha de informação sobre o local de trabalho recebida dos robôs.
3. Geração de sub-tarefas a realizar através da introdução dos dados recolhidos sobre o local de trabalho no *template* de tarefas.
4. Atribuição de tarefas baseada na sua prioridade.
5. Planeamento da sequência de movimentos a seguir de modo a realizar cada sub-tarefa.
6. Descarte das tarefas que não foram atribuídas.
7. Execução das tarefas. [8]

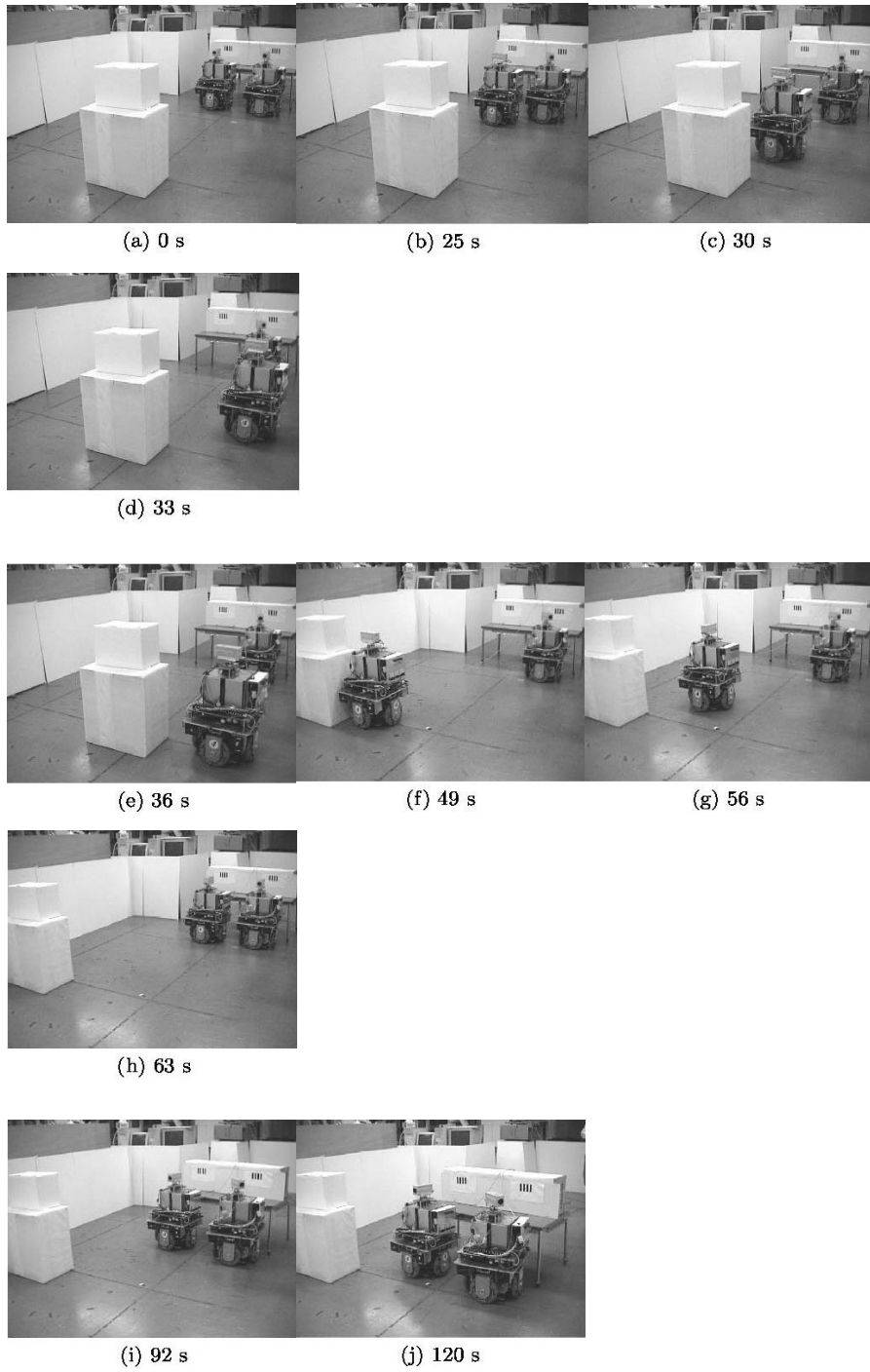


Figura 10 – Execução experimental de uma tarefa atribuída ao sistema desenvolvido [8]

2.4. Seguimento de orientação humana para o transporte cooperativo de um objeto de alta dimensão

No trabalho realizado neste projeto, com o título original de *Following Human Guidance to Cooperatively Carry a Large Object*, foi desenhado um robô capaz de colaborar com um humano, agindo como um seguidor, em tarefas domésticas. Ao robô, apelidado de *Cosero*, foi dada uma forma antropomórfica com uma base omnidirecional. Este é antropomórfico de maneira aos seus movimentos serem facilmente interpretados por humanos que interajam e partilhem o ambiente com este e a base omnidirecional tem como objetivo permitir que o robô se consiga movimentar em espaços apertados, característicos de ambientes domésticos.

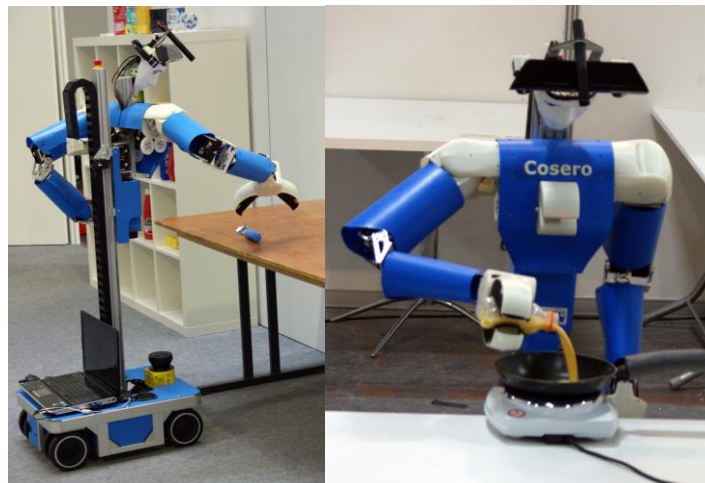


Figura 11 – Cosero a pegar numa colher (esquerda) e a fazer uma omelete (direita) [9]

Para além de um sistema de visão e audição, o robô foi equipado com uma junta que permite a rotação do torso, de modo a aumentar o seu espaço de trabalho, este também é capaz de deslocar o torso verticalmente numa amplitude de 0,9 m, fazendo com que este seja capaz de pegar em objetos que estejam ao nível do chão e manipular objetos a uma altura semelhante àquela a que humanos manipulam objetos. [9]

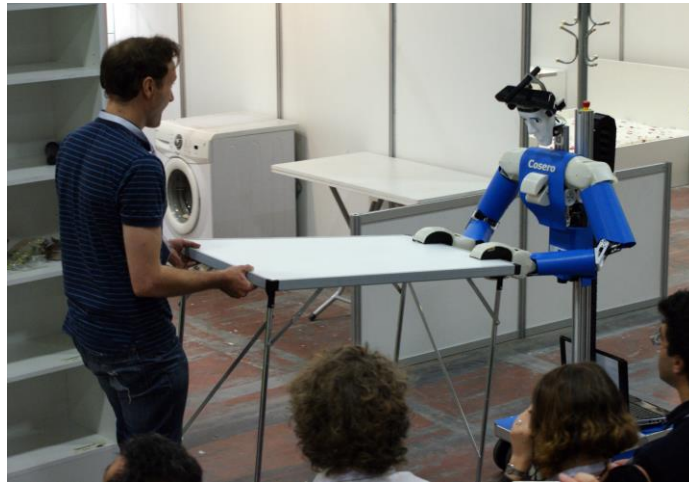


Figura 12 –Cosero a transportar uma mesa em cooperação com um humano. O humano guia o robô ao longo de um apartamento na final da RoboCup@Home na RoboCup 2011, Istanbul, Turquia [9]

2.5. Estudo de um caso de transporte colaborativo háptico de um objeto efetuado por um conjunto humano-humanóide

Neste projeto, com o título original de *Human-Humanoid Haptic Joint Object Transportation Case Study*, foi utilizado um robô humanóide, HRP-2, para o transporte háptico colaborativo com um humano, agindo como seguidor.

Para conseguir isto primeiro foi feita uma recolha de dados da posição e trajetória de pares de humanos a transportar uma mesa, criada para o efeito, tal como se encontra apresentado na Figura 13.

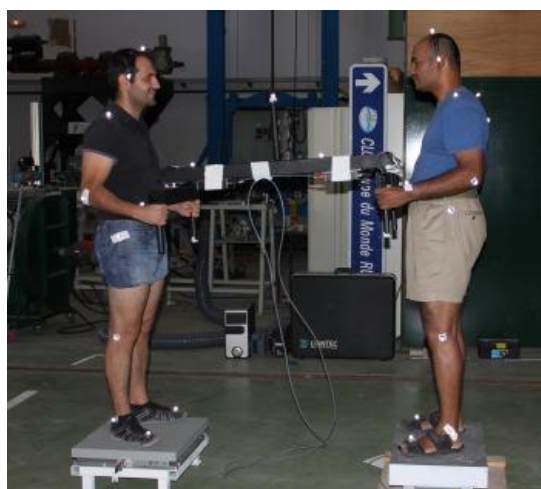


Figura 13 – Configuração usada na recolha de dados [10]

Após feito um algoritmo para planear as trajetórias do modo de seguidor com base nos dados recolhidos prosseguiu-se para a sua implementação e experimentação do par humano-robô numa tarefa de transporte de uma mesa desenhada para o efeito, esta tarefa pode ser observada na Figura 14.

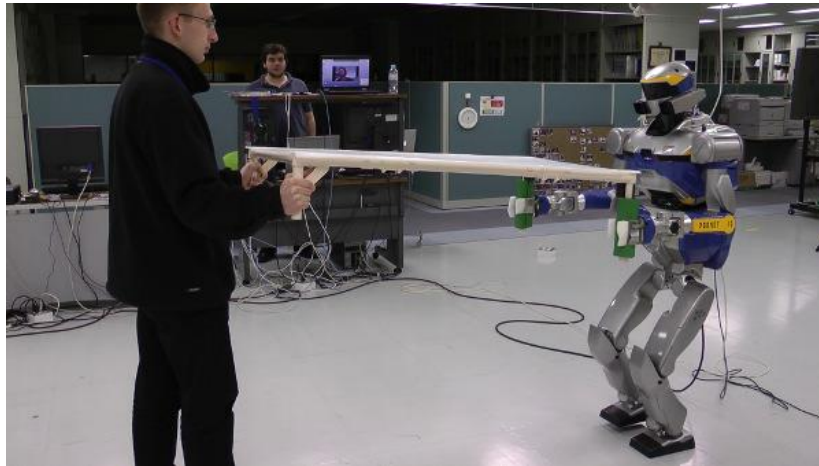


Figura 14 – HRP-2 a realizar a tarefa de transporte em cooperação com um humano, com o humano a fazer o papel de líder e o robô de seguidor [10]

A tarefa foi realizada com sucesso, mas com alguns aspetos a melhorar. Houveram desvios entre a trajetória ideal e a real, na ordem de 0,3 m, o que indica uma necessidade de revisão dos valores de fronteira. Também se observaram oscilações na velocidade do robô, o que se conjecturou originar da marcha do robô. [10]

2.6. Transporte cooperativo de uma carga recorrendo a robôs móveis não-holonómicos

Neste projeto, com o título original de *Cooperative transportation of a load using nonholonomic mobile robots*, lidou-se com a cooperação de robôs no transporte de um objeto. O robô móvel usado intitulado de *Bebot* foi utilizado como plataforma de teste noutros projetos de investigação. Este robô é pequeno e compacto, tendo uma massa de cerca de 400g. O *Bebot* é um robô móvel com duas variáveis controláveis, nomeadamente velocidade linear e velocidade angular sendo, portanto, capaz de se mover numa superfície plana com três graus de liberdade. Esta restrição não-holonómica, isto quer dizer que o robô não se pode movimentar em qualquer direção porque apenas dois graus de liberdade são controláveis, significa que nem todas as trajetórias na configuração do robô serão exequíveis.

Num projeto anterior foi desenhada uma plataforma mecânica de forma a permitir o transporte colaborativo do *Bebop* com outros robôs. Esta plataforma, apresentada na Figura 15, foi feita em poliamida através de sinterização a laser. A plataforma tem elementos solidários que permitem que peça, à qual o objeto a transportar está acoplado, se mova alguns milímetros em qualquer direção do seu plano bidimensional, esta funcionalidade é necessária para a absorção de movimentos bruscos que possam ocorrer durante o transporte e, ao mesmo tempo, irá reduzir a possibilidade do escorregamento da carga. Para além disso, o facto de a peça que suporta a carga ser rotativa, irá fazer com que o a ação de transporte não esteja restrita a movimentos lineares. A interação física entre a carga e o robô irá induzir deslocamentos na plataforma que irão ser medidos por sensores. Os dados medidos por esses sensores encontram-se indicados na Figura 15. Estes dados irão ser usados para o *feedback* do sistema de controlo do robô, estas medições locais eliminam a necessidade de comunicação direta entre robôs e permitem que o sistema de controlo seja implementado de um modo não centralizado.

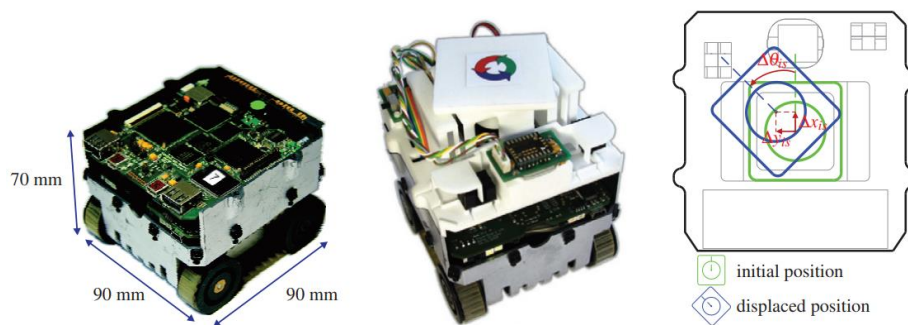


Figura 15 – Da esquerda para a direita: dimensões do Bebop; Bebop com a plataforma acoplada; representação dos dados medidos pelos sensores da plataforma acoplada [11]

Para testar o sistema de controlo desenvolvido foram realizados ensaios com os três robôs *Bebop* dispostos na configuração apresentada na Figura 16, transportando uma carga de 3kg.

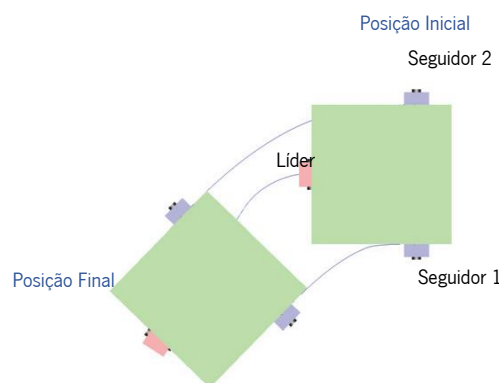


Figura 16 – Configuração usada para a validação experimental do sistema de controlo desenvolvido [11]

A trajetória do robô líder foi predefinida e, utilizando apenas os sensores locais, os robôs seguidores foram capazes de transportar a carga em cooperação com o robô líder. [11]

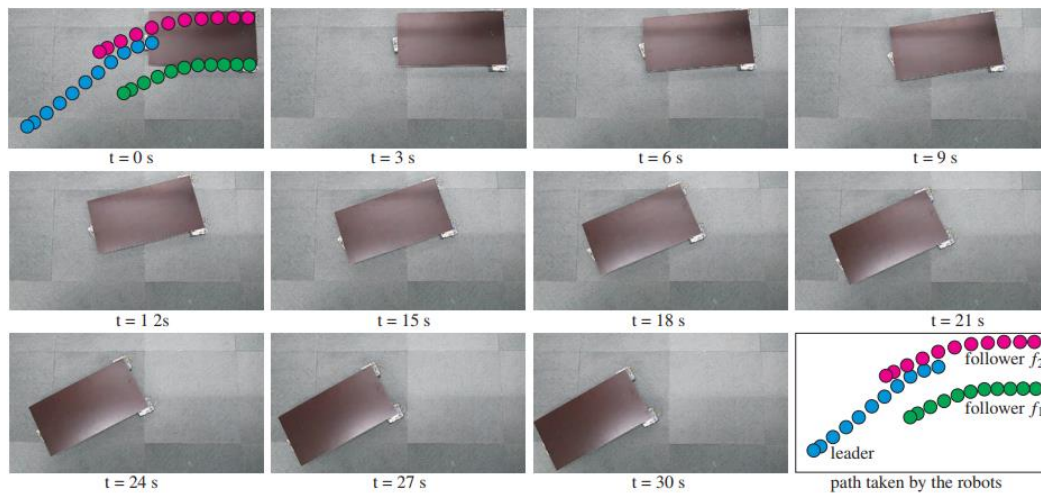


Figura 17 – Instantâneos da experiência, usando três robôs Bebop para o transporte cooperativo de um objeto [11]

2.7. Discussão e conclusões

De um modo geral, podemos observar que parte da investigação sobre o transporte cooperativos de cargas, foca-se mais sobre o aspeto de programação dos mesmos e sobre algoritmos a adotar para a execução da tarefa, auxiliando-se de robôs humanóides existentes para a execução das tarefas propostas. Isto por um lado permite uma melhor interpretação por parte do elemento humano das ações do robô, mas por outro lado também significa que os robôs não terão capacidade de transporte de cargas elevadas e a sua rapidez também será limitada.

Por outro lado, também temos estudos efetuados com robôs não-humanóides. Estes estudos têm um foco na coordenação dos diferentes robôs que fazem parte da equipa e, em alguns casos, mecanismos de compensação de desvios na posição da carga que estes transportam. Esta será a área de foco desta dissertação, pois ainda há bastante espaço para estudar mecanismos deste tipo, dado que os existentes apenas suportam pequenas cargas e deixam a desejar em termos de robustez. Estas são características importantes a considerar se considerarmos que o objetivo final do desenvolvimento destes sistemas é a sua implementação em ambiente industrial.

3. Breve resumo sobre as metodologias de projeto

A implementação de metodologias de projeto é bastante relevante para qualquer projeto que implique o desenvolvimento de um produto. Isto verifica-se, pois a aplicação destas metodologias permite identificar de forma mais clara o problema a resolver e quais os parâmetros a cumprir e a sua importância para o objetivo do projeto.

Nesta secção abordam-se 3 metodologias de projeto que foram consideradas pertinentes para o mecanismo a desenvolver. É de chamar à atenção que, pelo facto de se tratar de um projeto que tem em vista um desenvolvimento de um protótipo a ser implementado num projeto que está numa fase de prova de conceito, aspetos que devem ser considerados na maior parte dos projetos irão passar para segundo plano ou serão completamente ignorados. Estes consistem em aspetos ligados principalmente à construção e desgaste do mecanismo, dado que a construção deste mecanismo será feita em pequena escala, 1 ou talvez 2 unidades, e o seu uso será reduzido, por isso, o desgaste não será um fator de muita relevância.

3.1. Árvore de objetivos

De modo a clarificar os objetivos do projeto em desenvolvimento, aplicou-se o método da árvore de objetivos. Este método consiste na definição dos objetivos que o projetista deve ter atenção de modo a criar uma solução que satisfaça os requerimentos do projeto.

De seguida os objetivos definidos são expostos num organigrama de modo a apresentar os objetivos de modo sucinto, assim como a relação entre estes. Aplicando este método ao projeto em desenvolvimento resultou no organigrama apresentado na Figura 18.

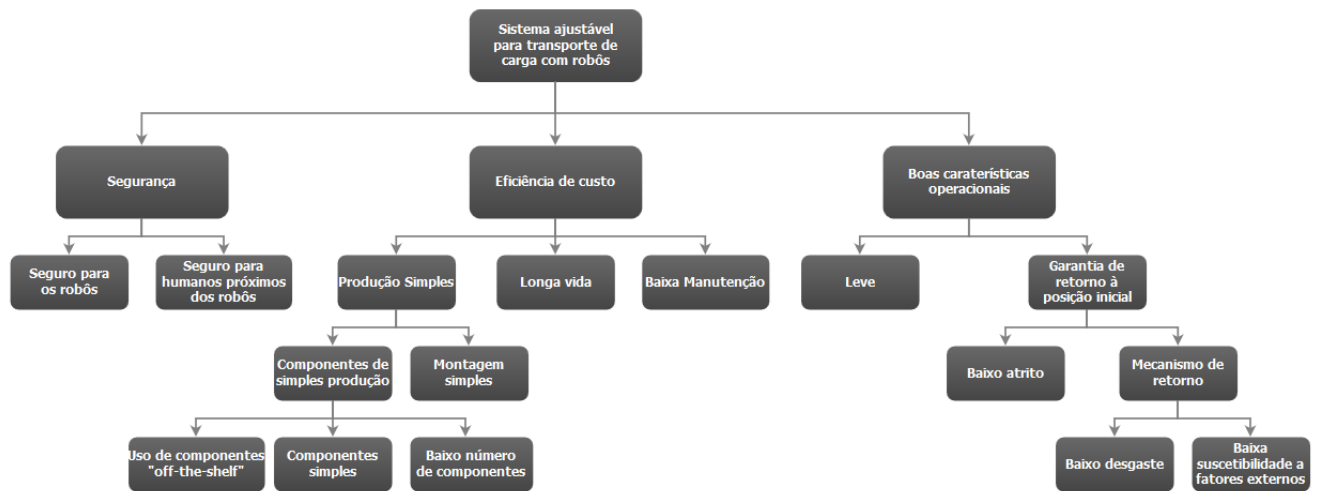


Figura 18 – Árvore de objetivos do projeto

Para a elaboração desta árvore de objetivos partiu-se de 3 objetivos principais: “Segurança”, “Eficiência de Custo” e “Boas Características Operacionais”.

3.1.1. Segurança

Segurança é um aspeto fundamental de se ter em consideração neste projeto devido ao facto de o suporte de carga que irá ser desenhado vai ser acoplado a robôs que têm o objetivo de trabalhar em ambiente cooperativos, quer com humanos ou robôs. Portanto é necessário garantir que o suporte de carga desenhado não irá pôr em causa a integridade física quer dos robôs, quer dos humanos que partilhem o ambiente de trabalho com o robô onde o novo suporte de carga irá ser implementado.

3.1.2. Eficiência de custo

Devido ao facto de se pretender que os robôs numa fase futura do projeto, nos quais o sistema de suporte de carga irá ser implementado, sejam vendidos à indústria e também pelo facto de haver um limite no orçamento disponível para a construção do suporte desenhado tem de haver uma atenção à eficiência de custo do suporte. Isto irá passar por garantir uma vida longa do produto; uma baixa manutenção, que irá fazer com que o produto desenhado seja mais

eficiente em termos de produtividade e também irá manter os custos de manutenção ao mínimo e, por fim, uma produção simples vai fazer com que os custos de produção se mantenham baixos, isto é conseguido através de uma montagem simples do suporte e a utilização de componentes simples, que passa pelo uso de um baixo número de componentes, simples na sua natureza e preferencialmente “*off-the-shelf*”.

3.1.3. Boas características operacionais

Devido ao sistema de suporte a ser desenhado ter de ser um mecanismo a ser implementado numa unidade móvel, temos de garantir que este tenha um bom comportamento operacional. Isto vai passar por garantir que o suporte desenhado vai ser leve de modo a não sobrecarregar o robô, que o mecanismo desenhado tenha um desgaste baixo e que o seu funcionamento não seja visivelmente afetado por fatores externos.

3.2. Método dos objetivos ponderados

Este método é útil no que toca à avaliação de qual a solução mais viável a adotar de um conjunto de soluções propostas. Consiste na sintetização dos objetivos que o projeto deve atingir e na atribuição de pesos relativos de cada um dos objetivos considerados, consoante a importância de cada um deles. De seguida é dada uma pontuação a cada uma das soluções em relação a cada um dos objetivos consoante o quão bem cumpre esse objetivo, resultando numa tabela de valores, tal como se apresenta na Tabela 1.

Tabela 1 – Exemplo de uma tabela de objetivos ponderados [12]

| | weight | concept 1 | concept 2 | concept 3 |
|----------------------------------------|--------|-----------|-----------|-----------|
| controllable on velocity and direction | 2 | 5 | 2 | 2 |
| safe | 3 | 6 | 3 | 3 |
| gain enough speed | 4 | 3 | 4 | 4 |
| basic construction simple | 1 | 7 | 5 | 1 |
| well accesible parts | 2 | 8 | 5 | 2 |
| distinct | 4 | 4 | 7 | 4 |
| stable | 3 | 3 | 8 | 3 |
| compact | 1 | 6 | 3 | 1 |
| springs | 1 | 8 | 2 | 1 |
| price | 3 | 7 | 5 | 3 |
| total score | | 125 | 130 | 89 |

Nesta tabela podemos observar os diferentes objetivos do projeto, o peso de cada um dos objetivos e a pontuação que cada solução teve nos diferentes objetivos, numa escala entre 1 e 10. E, no fim da tabela, está indicada a pontuação final de cada uma das soluções propostas, que é resultado do somatório da multiplicação do peso e da pontuação de cada solução nos diferentes objetivos. No final pode-se concluir que a solução 2, que em a pontuação final maior, é a melhor solução para o projeto.

Aplicando este método ao projeto que se está a desenvolver e recorrendo aos objetivos delineados na árvore de objetivos chegou-se à Tabela 2, onde estão indicados os objetivos a considerar e o peso relativo de cada um dos objetivos.

Tabela 2 – Tabela com o peso relativo de cada objetivo

| | Peso Relativo |
|------------------|---------------|
| Leve | 0,6 |
| Compacto | 0,8 |
| Produção Simples | 0,7 |
| Robusto | 0,6 |
| Segurança | 0,4 |
| Simples | 0,5 |

4. Conceção e desenvolvimento do sistema

4.1. Descrição do problema

O projeto que se apresenta foi delineado de modo a acomodar a possibilidade de redução e aumento do número de robôs presente na equipa e também admitindo a possibilidade de introdução e colaboração com intervenientes humanos.

Tendo esta premissa em atenção os robôs foram programados de modo a funcionarem independentemente, não havendo, portanto, nenhuma comunicação direta entre eles. Daí resulta que quando um robô mudar de direção ou velocidade irá haver um atraso na resposta dos restantes robôs inseridos na equipa. Com este fator em conta e admitindo a possibilidade de interação com intervenientes humanos surge a necessidade de desenhar um sistema de apoio de carga capaz de compensar desvios da posição da carga relativamente aos robôs que resultam da ação de transporte de carga do sistema descrito.

4.2. Definição de requisitos e especificações

De modo a haver dados concretos a partir dos quais seja possível guiar o projeto, definiram-se requisitos e especificações. Alguns destes fatores (peso e capacidade) foram ditados tendo em conta que com este projeto pretende-se criar uma prova de conceito. Outros fatores (dimensões e área de trabalho) foram ditados segundo as dimensões do robô existente e comportamento medido em fases anteriores do projeto.

- Dimensões
 - Altura desde a base ≤ 200 mm
 - Diâmetro da área de trabalho ≤ 460 mm
- Área de curso $\geq 300\text{mm} \times 300\text{mm}$
- Peso ≤ 5 kg
- Custo de produção $\leq 1,000\text{€}$
- Capacidade ≥ 10 kg
- Tempo de manutenção ≤ 1 h
- Garantia de retorno do apoio à posição inicial em tempo útil
- Boa resposta a excitações externas
- Liberdade de movimento angular em torno de z (360°), segundo o plano cartesiano representado na Figura 19.

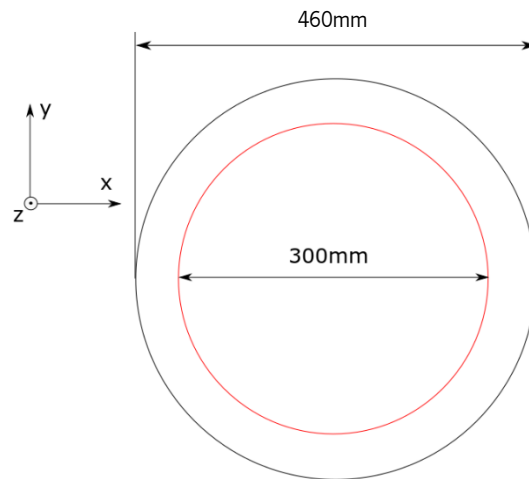


Figura 19 – Ilustração do plano cartesiano usado e das áreas de curso (círculo vermelho) e dimensões máximas (círculo preto) para o problema em estudo

4.3. Possíveis soluções

A primeira solução idealizada consistiu na utilização de 3 pares de juntas prismáticas fixadas numa das suas extremidades a uma base de apoio ao sistema por uma junta rotativa. Na extremidade oposta estas estarão acopladas à peça por uma junta rotativa, peça na qual a carga irá ser acoplada.

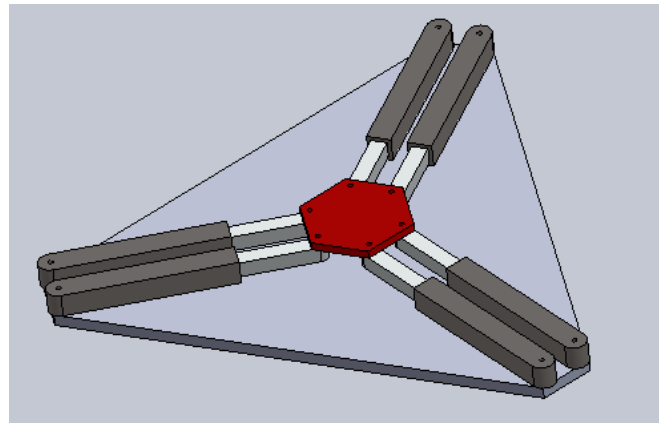


Figura 20 – Desenho CAD da primeira solução proposta

A segunda solução idealizada consistiu na adaptação de um mecanismo tipo delta, representado na Figura 21.

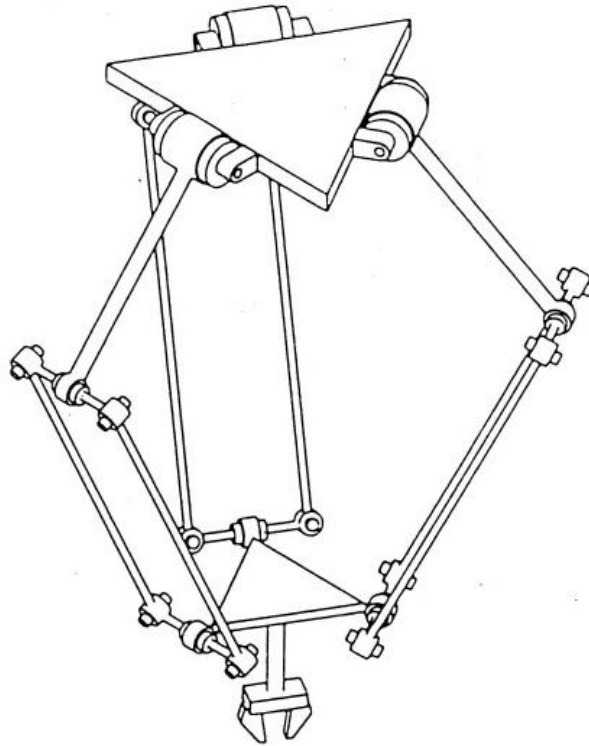


Figura 21 – Desenho representativo de um mecanismo do tipo delta [11]

O que resultou na solução esboçada na Figura 22, que consiste numa base na qual estão acopladas 3 guias na vertical viradas para o centro da base e angularmente equidistantes entre si.

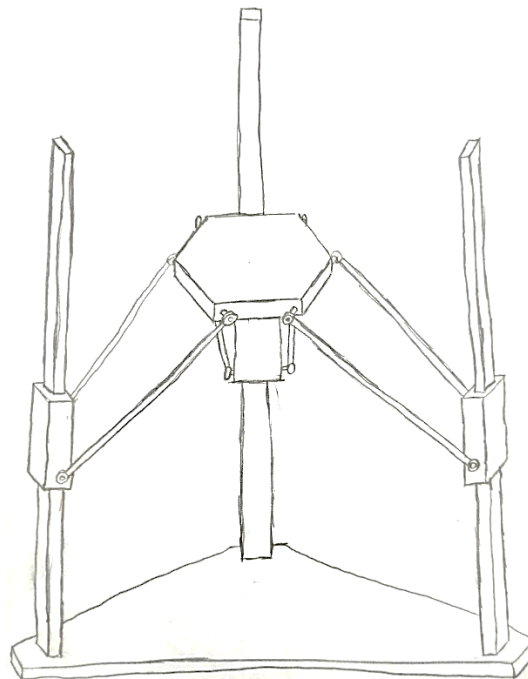


Figura 22 – Esboço da segunda solução proposta

Em cada uma dessas guias está acoplado um patim que se irá movimentar numa guia na vertical. A cada um desses carrinhos estão acopladas duas barras por juntas rotóides que por sua vez irão encaixar no apoio da carga por juntas rotóides também. Este sistema transfere o movimento vertical dos carrinhos para movimento horizontal e vertical no apoio, para tal, auxiliando-se de um sistema de controlo apropriado.

A terceira solução idealizada, ilustrada na Figura 23, consiste em dois cilindros acoplados verticalmente, que irão suportar a carga. Estes cilindros, contidos na área de trabalho da ilustrada, irão ser perfurados por duas barras fixas, cada uma delas fixadas por uma junta rotativa localizada em pontos diferentes, permitindo assim a movimentação livre da carga dentro da área de trabalho, limitada por uma parede exterior.

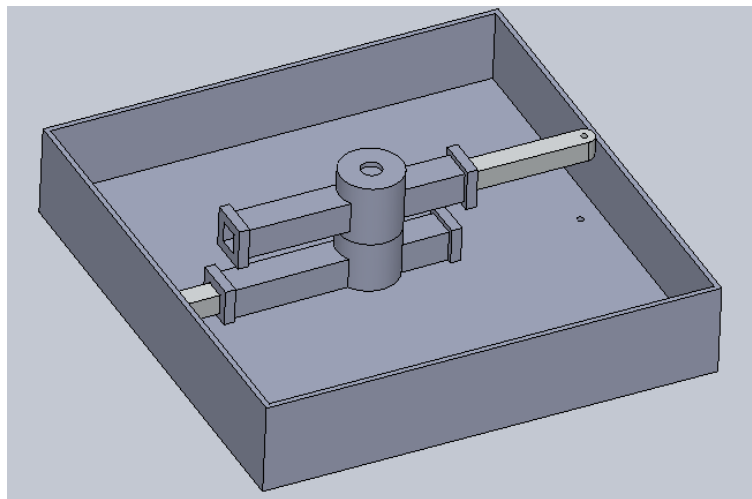


Figura 23 – Desenho CAD da terceira solução proposta

4.4. Análise

Após a conceção de diferentes soluções o passo seguinte é avaliar e compará-las entre si, de modo a escolher a solução mais apropriada para o projeto em desenvolvimento. Para se conseguir isso decidiu-se fazer uso do trabalho realizado na secção 3.2 e construir uma tabela de objetivos ponderados de modo a comparar as diferentes soluções. O resultado está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Tabela de objetivos ponderados

| | | Solução 1 | | Solução 2 | | Solução 3 | |
|--------------------------|---------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| | Peso Relativo | Pontuação | Valor | Pontuação | Valor | Pontuação | Valor |
| Leve | 0,6 | 8 | 4,8 | 5 | 3,0 | 7 | 4,2 |
| Compacto | 0,8 | 8 | 6,4 | 2 | 1,6 | 8 | 6,4 |
| Produção Simples | 0,7 | 6 | 4,2 | 2 | 1,4 | 8 | 5,6 |
| Robusto | 0,6 | 9 | 5,4 | 2 | 1,2 | 8 | 4,8 |
| Segurança | 0,4 | 8 | 3,2 | 4 | 1,6 | 9 | 3,6 |
| Simples | 0,5 | 7 | 3,5 | 2 | 1,0 | 8 | 4,0 |
| Valor de utilidade total | | | 27,5 | | 9,8 | | 28,6 |

Como se pode verificar a solução 3 obteve o maior valor de utilidade total, portanto a solução 3 será a solução que se irá adotar.

4.5. Sumário e conclusões

Nesta secção definiram-se os requisitos do sistema e avaliou-se o mérito de cada uma das 3 soluções propostas, recorrendo ao método dos objetivos ponderado. Após a elaboração de uma tabela de objetivos ponderados escolheu-se a solução com o maior valor de utilidade total, a 3ª solução, como a solução a adotar para o mecanismo a desenvolver. É também de salientar que um fator decisivo na escolha desta solução foi o cumprimento dos requisitos dimensionais, que seguindo a área de trabalho para o dimensionamento das soluções, apenas a solução 3 cumpriu.

5. Implementação e validação da solução adotada

5.1. Descrição e modelação da solução

A solução adotada consiste na adaptação da solução 3 da secção 4.3. As alterações efetuadas à solução original consistem na alteração de dimensões e adição de pormenores de modo a permitir a construção, montagem e funcionamento do protótipo tendo em conta as restrições resultantes da utilização de componentes normalizados e a implementação de componente eletrónicos.

Um ponto que não foi abordado na apresentação das soluções foi o mecanismo através do qual se irá garantir o retorno dos cilindros à posição central depois de este sofrerem um desvio para outra posição. Este mecanismo também terá de funcionar de modo a que não impeça os cilindros de se moverem da posição central quando sofrerem uma solicitação por uma força externa.

De modo a conseguir cumprir estes requisitos operacionais idealizou-se um sistema de 4 molas a serem acopladas aos cilindros em pontos angularmente equidistantes entre si de modo a manter o equilíbrio de forças. Por sua vez estas molas também seriam fixadas na barreira do sistema em 4 pontos angularmente equidistantes, de modo a garantir o retorno à posição central dos cilindros quando não ocorre nenhuma solicitação no sistema. O resultado destas alterações apresenta-se na Figura 24.

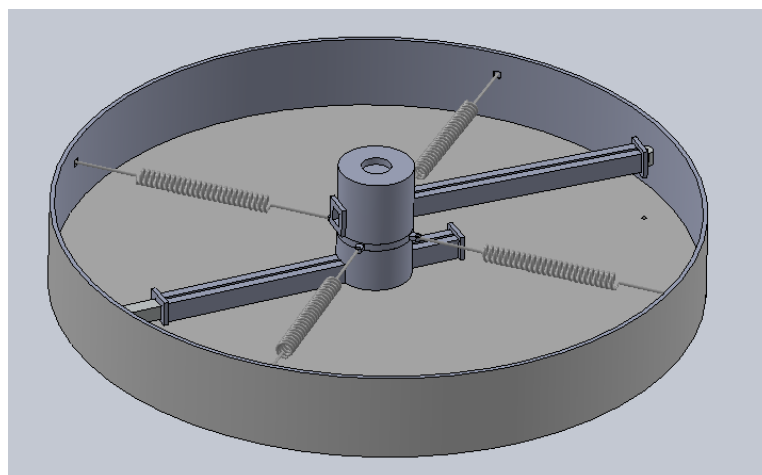


Figura 24 – Mecanismo após a implementação do sistema de 4 molas

Também se pode verificar que a forma da parede da área de trabalho e, conseqüentemente, a área de trabalho foram alterados de modo a ter um perfil circular, isto foi feito de modo a se conseguir uma forma semelhante à do robô, que tem uma forma cilíndrica, conseguindo-se assim um uso mais eficiente da área de trabalho e, ao mesmo tempo, evitando que sejam necessários ajustes à programação do robô de modo a compensar pela forma diferente da base.

Outra peça que se teve de acrescentar foi um aro, apresentado na Figura 25, entre os dois cilindros existentes, que se move independentemente dos dois cilindros, isto de modo a garantir que a solicitação efetuada nos cilindros pelas molas seja sempre efetuada na mesma direção.

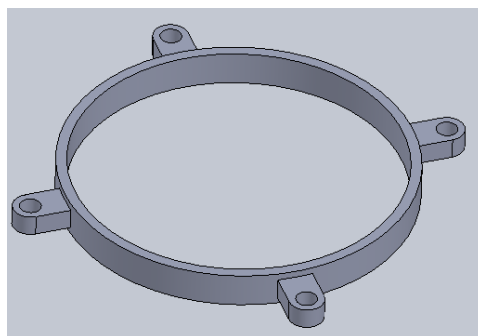


Figura 25 – Aro acrescentado ao sistema de cilindros

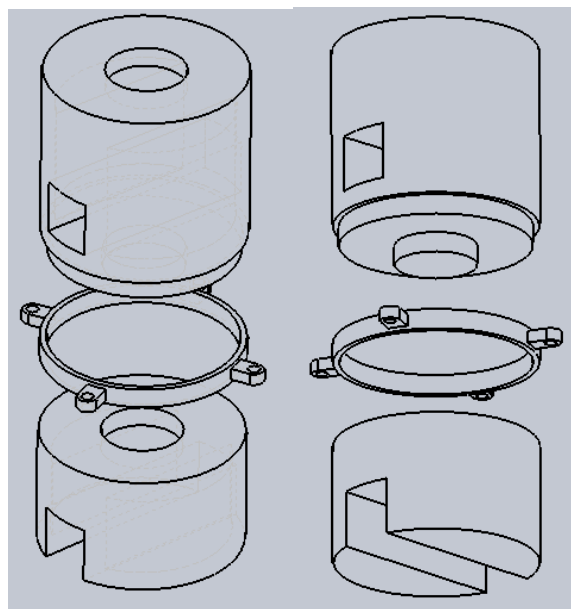


Figura 26 – Vista explodida do sistema de 2 cilindros com o aro

Após uma análise aprofundada da configuração do sistema sugerido tornou-se óbvio que as molas iriam interferir na área de trabalho e não haveria maneira de conseguir a área de trabalho

desejada sem exceder o atravancamento imposto sobre o sistema. Para se conseguir contornar este problema decidiu-se colocar as molas sob a base, e ligar molas ao sistema de cilindros através de fios que irão contornar a base, tal como ilustrado na Figura 27.

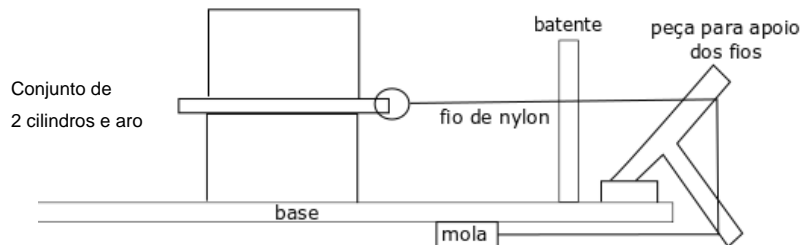


Figura 27 – Esquema representativo da solução adotada para a acomodação das molas no mecanismo em desenvolvimento

Para se conseguir isto teriam de se fazer 2 alterações, uma através do acréscimo de aberturas no batente de forma a permitir a passagem dos fios que irão transmitir o movimento ao sistema de cilindros e outra através do acréscimo de 4 peças, cada uma alinhada angularmente com as molas de modo a transmitir as solicitações efetuadas pelas molas de maneira suave, a que iremos designar de apoios para os fios. Resultando assim nos componentes que se vêem na Figura 28.

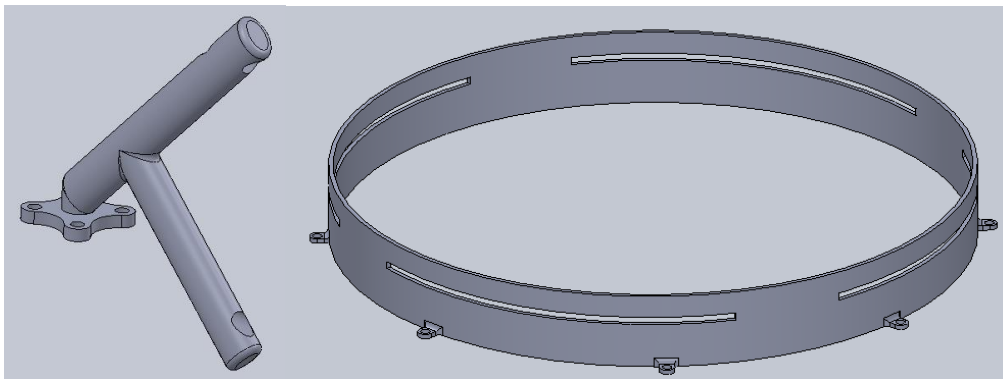


Figura 28 – À esquerda, peça para apoiar os fios, à direita batente após alterações

Tal como se pode ver na figura anterior para além dos batentes também foram adicionados pormenores de modo a permitir que o batente seja aparafusado à base, garantindo assim a sua fixação.

Implementado estes componentes no sistema, resulta o que se vê na Figura 29.

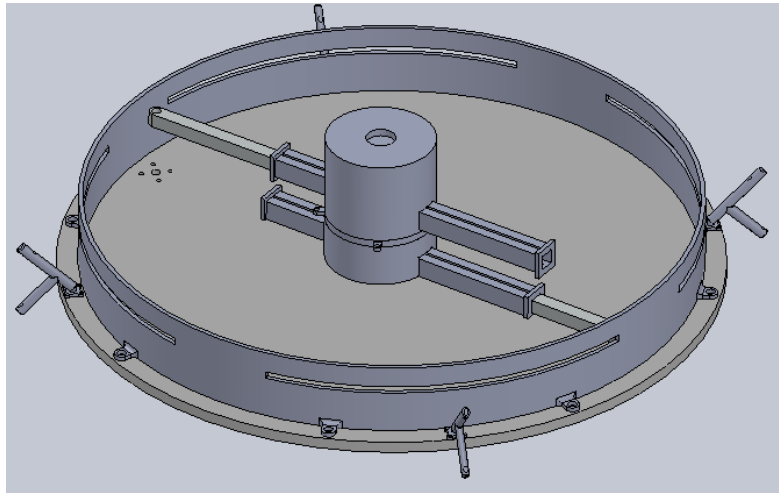


Figura 29 – Assembly do mecanismo após alterações ao batente e adição dos apoios para os fios

O próximo componente que se terá de adicionar ao sistema é o apoio para a barra superior que até agora tem estado suspensa nos desenhos efetuados de modo a simplificar o desenho, mas que terá de ser adicionada ao sistema de modo a ser possível a construção do mesmo, resultando na peça que se apresenta na Figura 30.

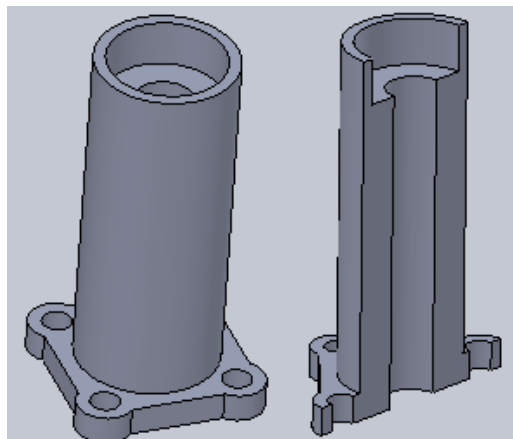


Figura 30 – Apoio para o braço superior, com vista em perspectiva à esquerda e vista em corte à direita

Esta peça será fixada à base por 4 parafusos M3 de cabeça redonda. O furo interno menor terá a função de alojar a rosca do parafuso que irá funcionar como eixo de rotação do braço e o furo maior irá alojar a porca que irá fixar o parafuso do ao próprio braço, garantindo que o braço e o parafuso se irão mover solidariamente, adicionando esta peça ao conjunto obtemos o *assembly* que se apresenta na Figura 31.

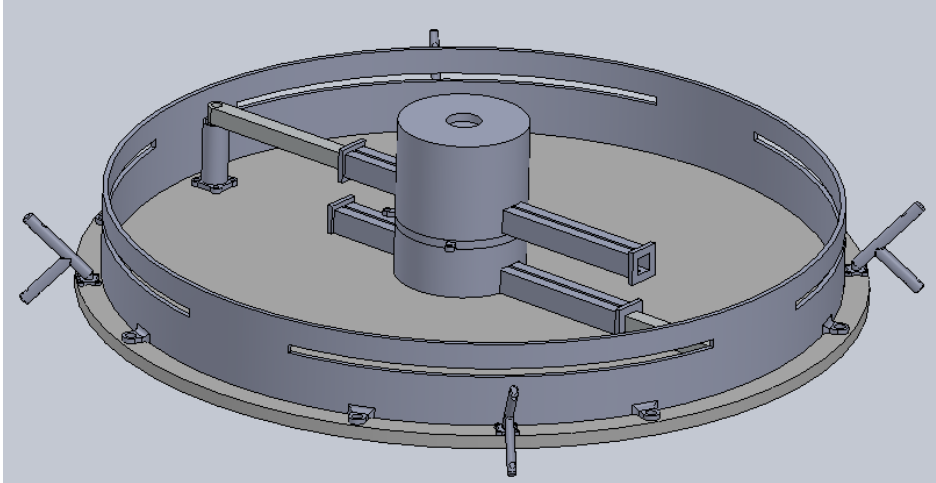


Figura 31 – Assembly após a introdução do apoio para a haste superior

Outro aspeto que ainda não foi explicado a fundo é o funcionamento do sistema de haste-braço. Este sistema consiste no encaixe de um braço, Figura 32, numa haste oca, Figura 33, de modo a deslizarem um sobre o outro. É de chamar atenção o propósito dos pinos no braço e dos rasgos na haste, os pinos irão funcionar como limitadores de curso, garantindo que o sistema braço-haste nunca se desmonte, resultando na configuração que se vê na Figura 34.

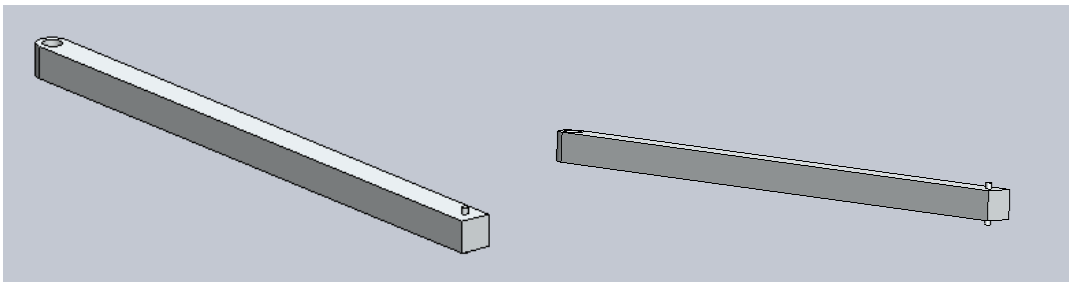


Figura 32 – Braço com um furo numa extremidade e dois pinos na extremidade oposta

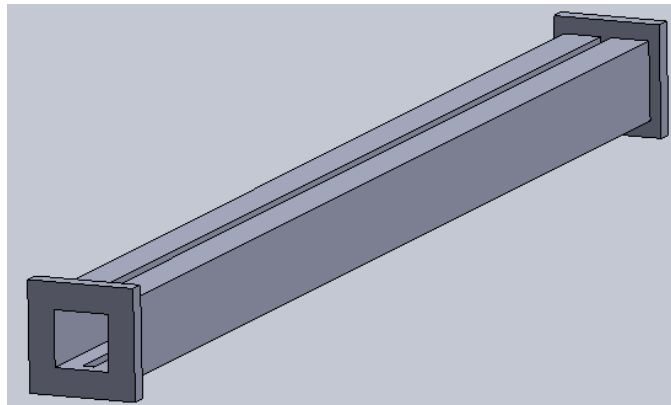


Figura 33 – Haste oca, com batentes em cada uma das extremidades e sulcos ao longo do seu comprimento

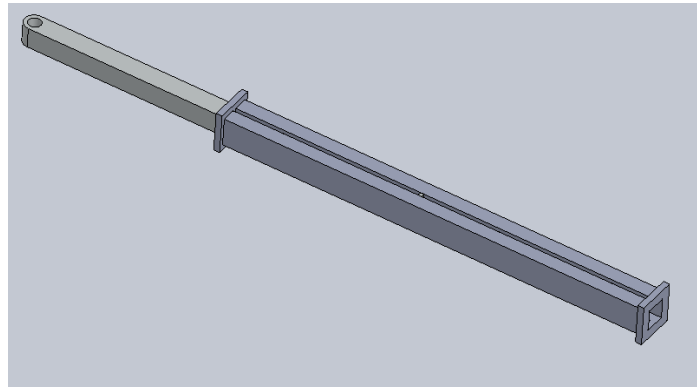


Figura 34 – Sistema haste-braço

Um último pormenor a clarificar é a função dos batentes que se encontram em ambas as extremidades da haste. Os batentes em questão têm uma função dupla, funcionar como fim de curso para os pinos do braço e também funcionam como batente para o par cinemático haste e cilindro, tal como se pode verificar através da Figura 35.

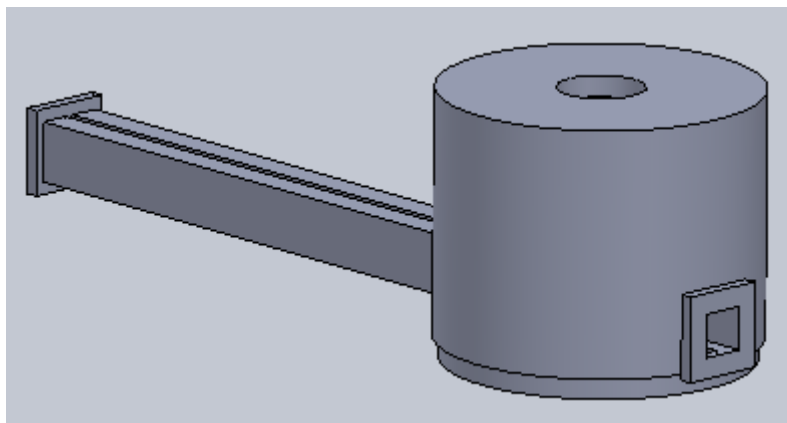


Figura 35 – Montagem da haste superior e cilindro superior

Também foi necessário fazer um ajuste ao braço inferior de modo a este conseguir acomodar a porca que irá garantir que o parafuso que transmite o movimento ao respetivo *encoder* tenha um movimento solidário com o movimento do braço, mantendo o braço à mesma altura. O resultado desta adaptação está apresentado na Figura 36.

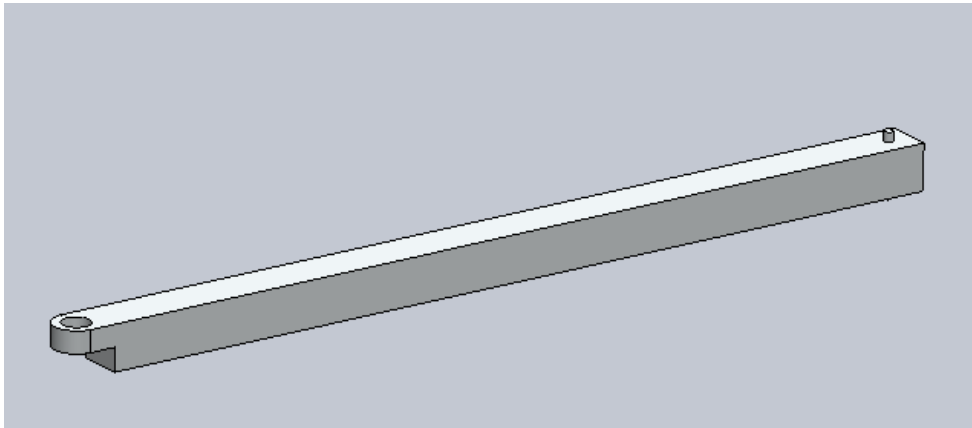


Figura 36 – Braço inferior após alteração de modo a acomodar a porca

Resta-nos desenhar o sistema de apoio para a carga a acoplar no topo do cilindro superior, este deve-se encaixar no cilindro superior, que já está preparado para acomodar a nova peça, que deve ter rotação concêntrica ao sistema de cilindros, resultando assim na peça que se vê na Figura 37.

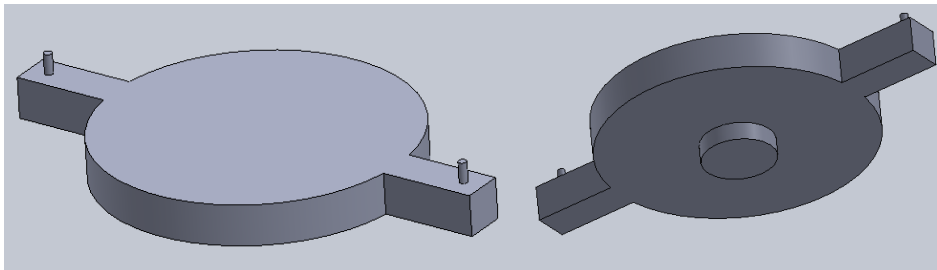


Figura 37 – Peça para o apoio da carga a suportar pelo sistema

Nesta peça também vemos a implementação de pinos de modo a fixar a carga, este sistema é rudimentar, mas alinha-se com a aplicação que se pretende dar ao sistema. Como faz parte de um projeto ainda em fases de projeto conceptual e como as cargas de prova têm sido caixas de cartão e o sistema atual de apoio baseia-se num conceito similar, por simplicidade decidiu-se imitar este sistema de fixação de carga. Com a adição deste elemento ao sistema temos a configuração que se vê na Figura 38.

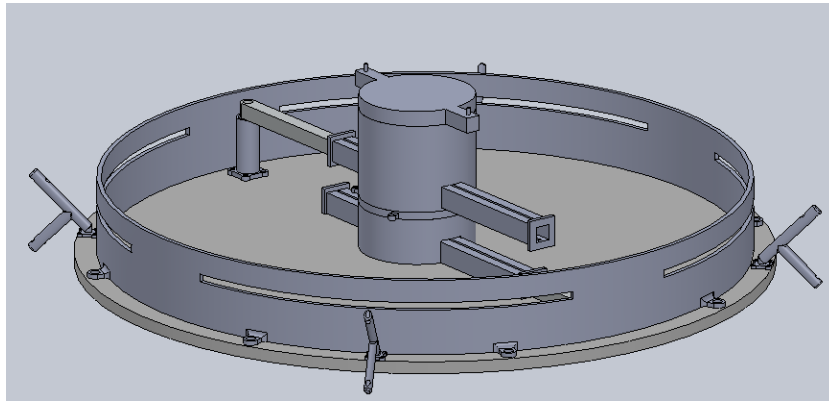


Figura 38 – Assembly após a introdução do apoio de carga

O próximo ponto a considerar é a instrumentação do sistema, isto é, a implementação de sensores no mecanismo de modo a se conseguir determinar a posição do sistema de cilindros e a orientação do apoio de carga. Para se conseguir isto decidiu-se usar *encoders* nos eixos de rotação dos braços e no eixo de rotação do apoio de carga. Com um *encoder* em cada eixo de rotação do braço consegue-se triangular a posição dos cilindros na área de trabalho e com um terceiro *encoder* consegue-se determinar a orientação do apoio de carga.

O primeiro passo a tomar será a escolha do modelo de *encoder* a implementar no mecanismo. O *encoder* a implementar terá de ser compacto e também terá de ter uma resolução elevada, e deverá ter preferencialmente um sinal de saída absoluto, de modo a facilitar o trabalho futuro de programação das unidades de processamento responsáveis pelo tratamento dos dados recolhidos.

O *encoder* escolhido foi o Bourns ® EMS22A30-C28-MS6-ND, que se apresenta na Figura 39.



Figura 39 – Encoder absoluto Bourns @ EMS22A30-C28-MS6-ND [13]

É possível calcular a posição do ponto de apoio da carga através ao uso de *encoders*, isto é conseguido usando a posição angular de cada um dos *encoders* e calculando o ponto de intersecção das duas retas resultantes, tal como ilustrado na Figura 40.



Figura 40 – Esquema representativo do modo de obtenção da posição do ponto de apoio da carga, recorrendo aos dados fornecidos através de cada um dos *encoders* (ângulo 1 e ângulo 2)

As características mais relevantes do *encoder* escolhido apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades relevantes do *encoder* Bourns @ EMS22A30-C28-MS6-ND [14]

| Tipo de Sinal de Saída | Resolução | Precisão Nominal | Tensão de alimentação | Custo | Dimensões (mm) |
|------------------------|---------------|---------------------------|-----------------------|--------|----------------------------------|
| Absoluto | 1024 posições | $\pm 0,7^\circ$ ou melhor | 3,3 VDC $\pm 10\%$ | 38,46€ | $\approx 21 \times 16 \times 36$ |

De seguida ter-se-á de escolher os restantes componentes necessários para tratar os dados provenientes do *encoder* e fornecer a alimentação ao circuito. Para o tratamento de dados do *encoder* será necessário um controlador, para a alimentação do circuito uma pilha, uma unidade de *Bluetooth* de modo a permitir a comunicação entre diferentes controladores. Usou-se *Bluetooth* por ser um standard de comunicação sem fios de fácil configuração e pelo alcance das frequências que usa para este standard ser apropriado para a distância entre os dois elementos que irão ser emparelhados.

O microcontrolador escolhido foi uma imitação do Arduino Nano®, apresentado na Figura 41, de características operacionais exatamente iguais à do original, mas a um custo mais reduzido.



Figura 41 – Placa compatível com Arduino ® Nano 3.0 [15]

Escolheu-se este microprocessador devido às suas dimensões reduzidas, capacidade de tratamento de dados provenientes do *encoder* e também devido à vasta informação *online* de como configurar este modelo em cenários diversos.

O componente eletrónico seguinte a escolher é o módulo de *Bluetooth*, para este componente o principal critério a tensão de alimentação, escolheu-se, portanto, o módulo de *Bluetooth* HC-05, pois tem uma tensão de alimentação de 5V e pode fazer as funções de *slave* e *master*.

De seguida ir-se-á fazer apresentar um esquema representativo do circuito que irá ser inserido no interior do cilindro superior. O significado das entradas do módulo de *Bluetooth* e do *encoder* representadas no esquema são explicitados nas fichas técnicas dos componentes, contidas no Anexo 1.

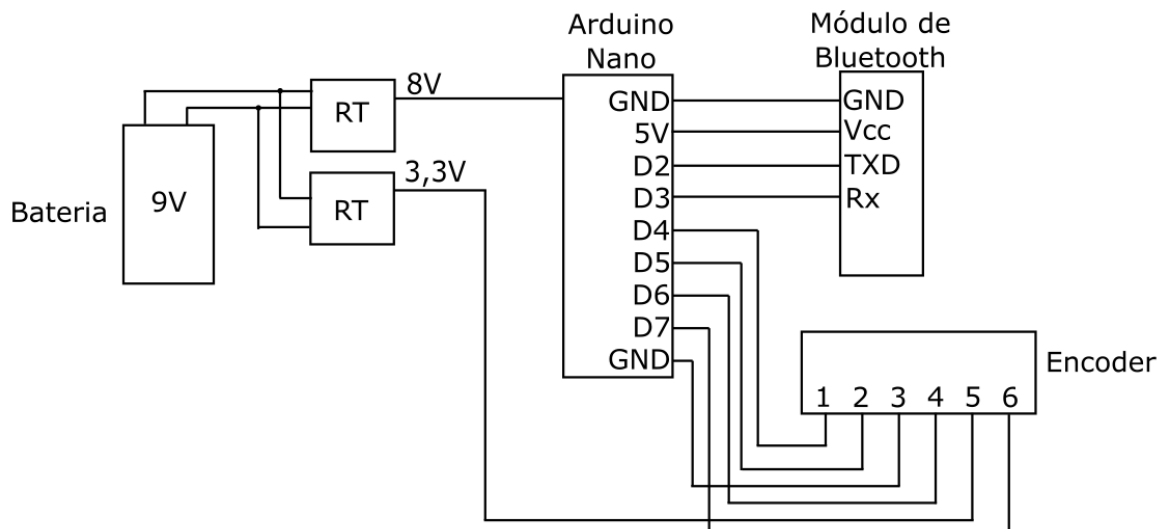


Figura 42 – Esquema representativo do circuito contido no cilindro superior; RT – Regulador de tensão [16]

Tabela 5 – Tabela com o significado dos pinos do encoder representado na figura anterior

| Pino 1 | Pino 2 | Pino 3 | Pino 4 | Pino 5 | Pino 6 |
|---------------|---------|--------|----------------|-------------|------------------------------------------|
| Input Digital | Relógio | Massa | Output Digital | Alimentação | Interruptor para ativar/desativar sensor |

O circuito instalado sob a base do mecanismo terá a mesma configuração do circuito representado na Figura 42, tendo apenas a adição de um *encoder* que será alimentado pelo terminal de 3,3V e estará ligado ao Arduino Nano®.

Para a bateria escolheu-se uma pilha de 9V por ter um custo baixo, ser de dimensão reduzida e por permitir alimentar o Arduino, que tem uma tensão de alimentação entre 7 e 12V. Também se utilizou um regulador de tensão para reduzir a tensão de alimentação do Arduino para 8V, porque ao longo da vida da pilha, a tensão que esta conseguirá fornecer ao sistema, 9V, irá reduzir, e de modo a manter a tensão de alimentação do Arduino constante decidiu-se reduzir a tensão de alimentação para 8V. [17]

Um aspeto de chamar à atenção é que, apesar de o Arduino ter uma saída de 3,3V, não é possível utilizá-la para alimentar o *encoder* porque quando o Arduino é alimentado por uma fonte

externa (não USB), a entrada de 3,3V não está ativa, daí a necessidade de o *encoder* ser alimentado pela pilha de 9V, auxiliando-se de um regulador de tensão para se ter a tensão apropriada para alimentar o *encoder*.

De modo a conseguir-se acomodar a eletrônica no interior do cilindro superior, como seria de esperar, tiveram-se de fazer alterações extensivas à estrutura do cilindro superior. O resultado pode ver-se na Figura 43.

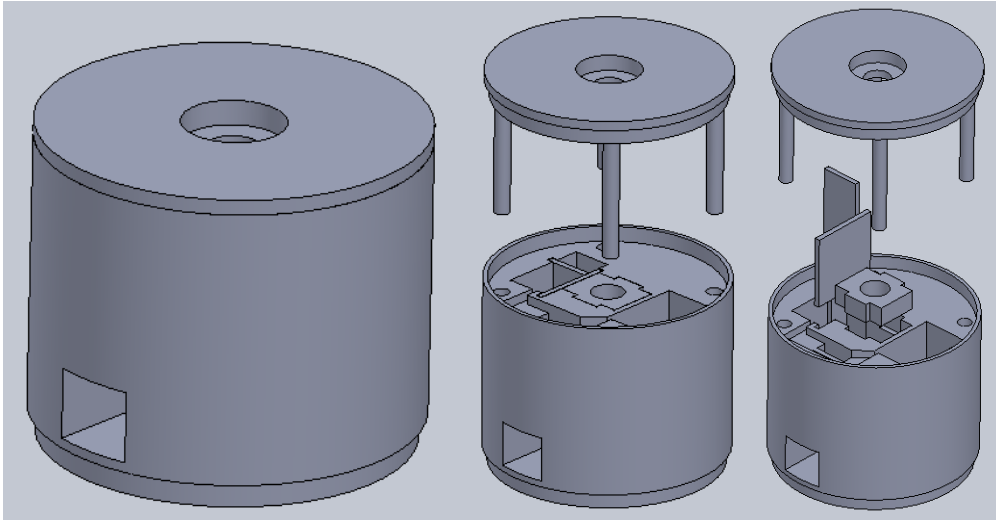


Figura 43 – Cilindro superior após alterações estruturais

Como se pode ver na figura acima, foi necessário dividir o cilindro original em secções, de modo a ser possível abri-lo de maneira a aceder o seu interior, possibilitando assim a introdução dos componentes eletrônicos no seu interior e sua futura manutenção.

Também se pode verificar a existência de duas barreiras, estas têm o propósito de dividir diferentes câmaras adjacentes. A peça que se apresenta na Figura 44 tem a função de garantir que o *encoder* seja acomodado na sua câmara com a menor folga possível, desta maneira garantindo que o *encoder* não se mova durante o funcionamento do mecanismo, garantindo assim uma leitura fiável.

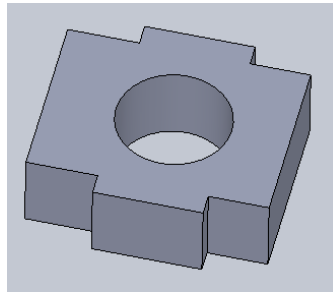


Figura 44 – Peça responsável pela fixação do encoder na sua posição

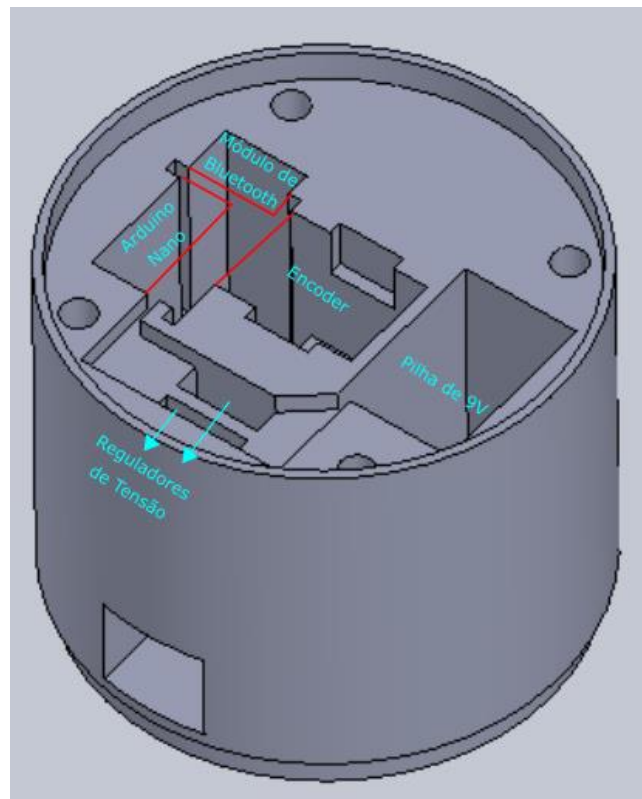


Figura 45 – Identificação dos componentes que cada uma das câmaras do cilindro superior irá alojar

De seguida irá explorar-se a implementação dos *encoders* que irão ser instalados sob a base do mecanismo.

O primeiro fator a ter em atenção é que o deslocamento angular de cada um dos sistemas haste-braço será transmitido ao *encoder* respetivo por meio de um parafuso localizado em cada um dos eixos dos dois sistemas, realçados na Figura 46.

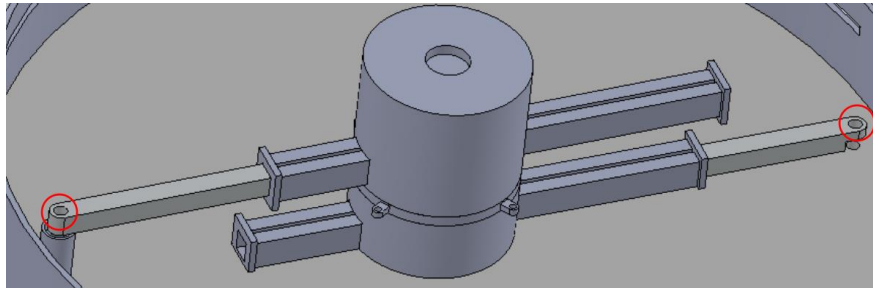


Figura 46 – Pormenor do mecanismo com os eixos onde irão estar inseridos os parafusos realçados

De modo a se conseguir que o movimento seja transmitido ao *encoder* terá de se criar uma peça que faça a ligação entre a rosca do parafuso e o pino de cada um dos *encoders*, resultando na peça que se vê na Figura 47.

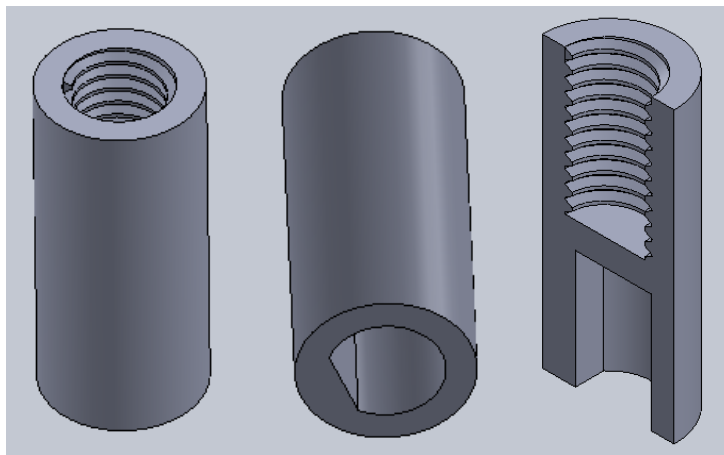


Figura 47 – Peça criada para transmissão do movimento entre parafuso e encoder, vista em perspectiva à esquerda e centro e vista em corte à direita

De seguida é necessário desenhar uma peça que servirá de recipiente para alojar o circuito eletrónico associado a cada um dos *encoders* a ser acoplados a cada um dos eixos de rotação dos dois sistemas haste-braço. Como o circuito associado ao *encoder* é idêntico ao do circuito elétrico do cilindro superior e cada uma destas peças será semelhante à parte inferior do cilindro superior, tal como se pode ver na Figura 48.

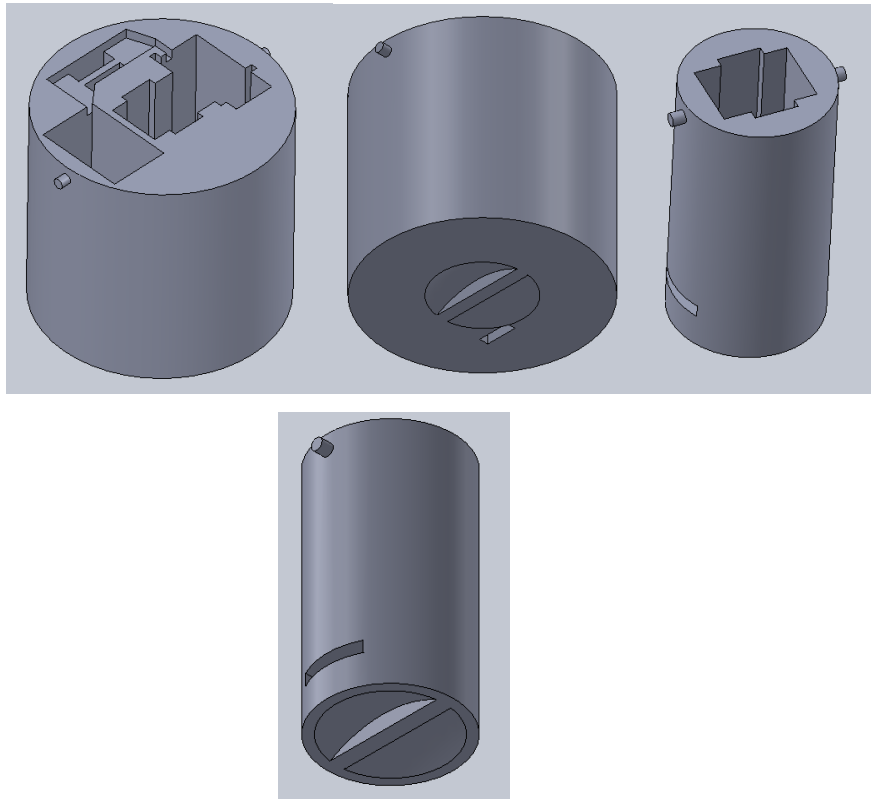


Figura 48 – Recipientes para a eletrônica da parte inferior, com as duas primeiras imagens representando o recipiente onde está inserido a maior parte dos componentes do circuito elétrico e as duas imagens da direita representam o recipiente que irá conter apenas um dos encoders

Os rasgos nas peças têm a função de permitir que fios saiam do recipiente (no inferior do recipiente maior e na lateral do recipiente menor), isto é necessário porque os circuitos inseridos nos cubículos têm de estar ligados entre si.

Outro pormenor ao qual se terá de chamar à atenção são os pinos laterais de cada um dos cubículos, estes pinos têm a função de permitirem o encaixe às peças representadas na Figura 49.

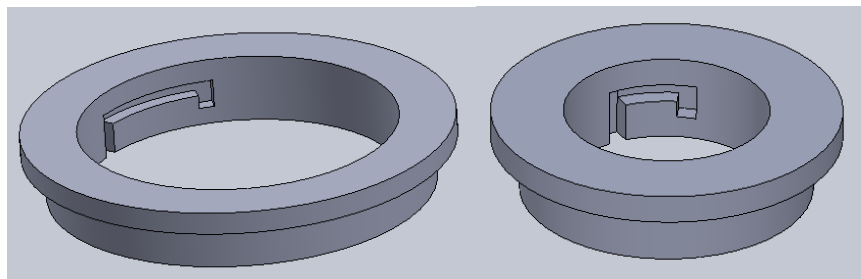


Figura 49 – Peças às quais vão ser acoplados os recipientes

As peças que se apresentam na Figura 49 irão ser coladas à base, permitindo assim que os recipientes sejam fixados de maneira não-permanente à base. De modo a facilitar a operação de introdução e remoção dos recipientes dos seus pontos de acoplamento introduziu-se os manipululos que se vêem no inferior dos recipientes na Figura 48.

Nas Figura 50 e Figura 51 estão representados os recipientes para a eletrônica da parte inferior com uma divisória entre os componentes eletrônicos, assim como duas peças iguais à apresentada na Figura 44, responsáveis por garantir que o *encoder* se mantêm na posição correta durante o funcionamento do mecanismo.

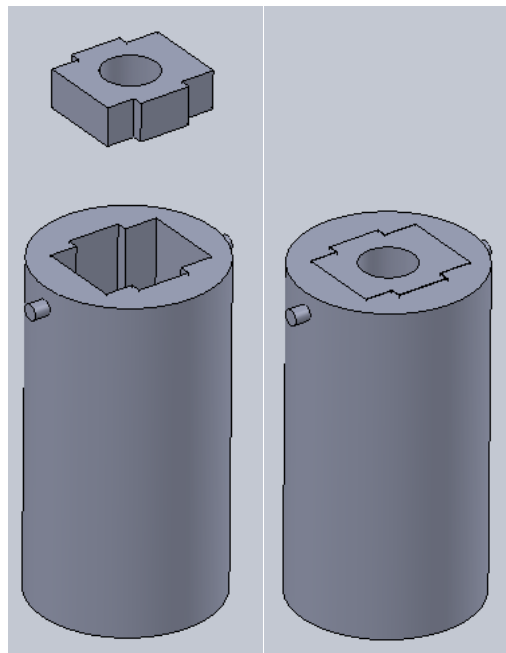


Figura 50 – Representação da montagem do recipiente para os componentes eletrônicos da parte inferior menor

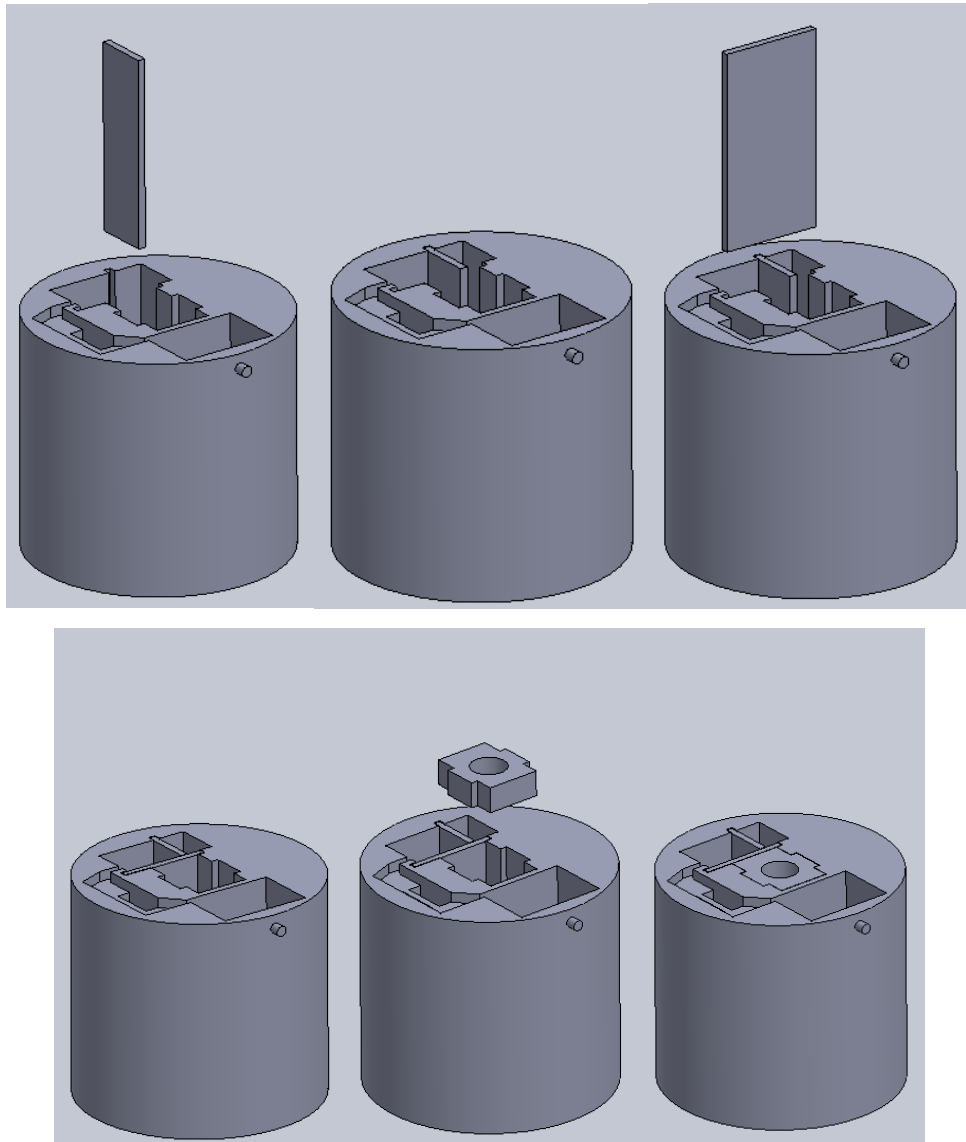


Figura 51 – Representação da montagem do recipiente para os componentes eletrônicos da parte inferior maior

No final iremos ter um sistema em que dois parafusos são mantidos solidários a cada um dos braços e cujo movimento irá ser transmitido a cada um dos *encoders* respetivos, uma representação deste sistema pode ser vista na Figura 52.

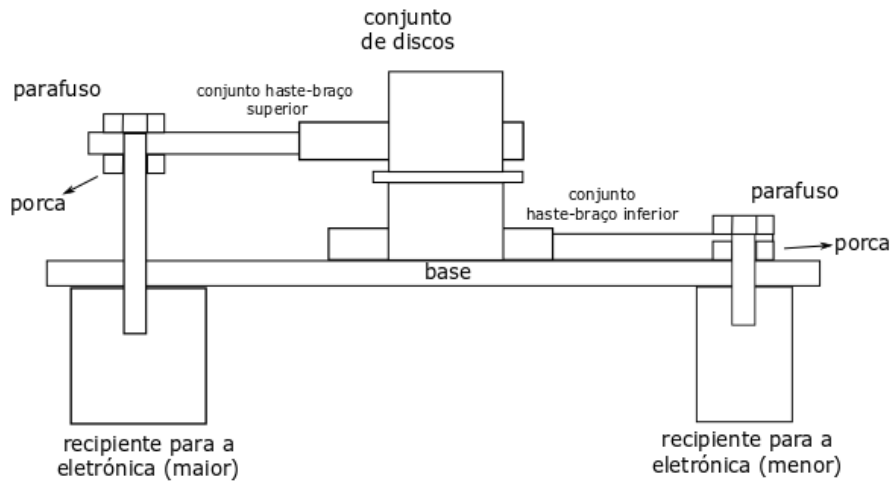


Figura 52 – Esquema representativo do modo de como irá ser feita a transmissão de movimento entre os braços e os respectivos encoders

De seguida iremos abordar de como se pretende que a base seja implementada no robô atual. Para tal temos de perceber de como a base atual está fixada ao robô, o que se pode observar na Figura 53.

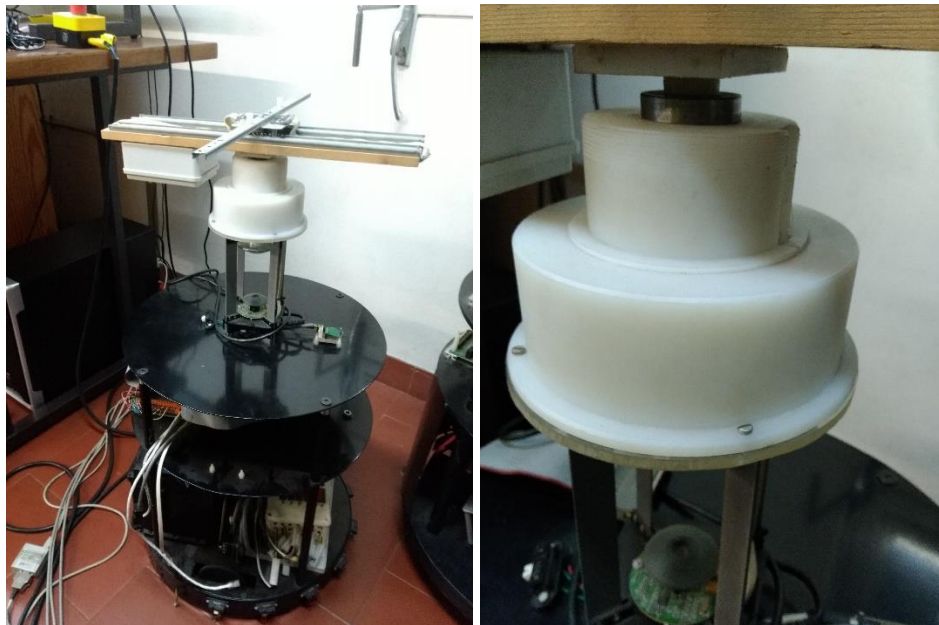


Figura 53 – À esquerda, o robô em estudo e à direita destaque no encaixe do mecanismo atual ao corpo do robô

Para se conseguir que o mecanismo criado assente no robô ter-se-á de acrescentar um encaixe com a forma apropriada. Isto vai resultar na necessidade do acréscimo de uma peça

cilíndrica oca, de modo a separar o encaixe e a base, o que irá resultar na peça que se vê na Figura 54.

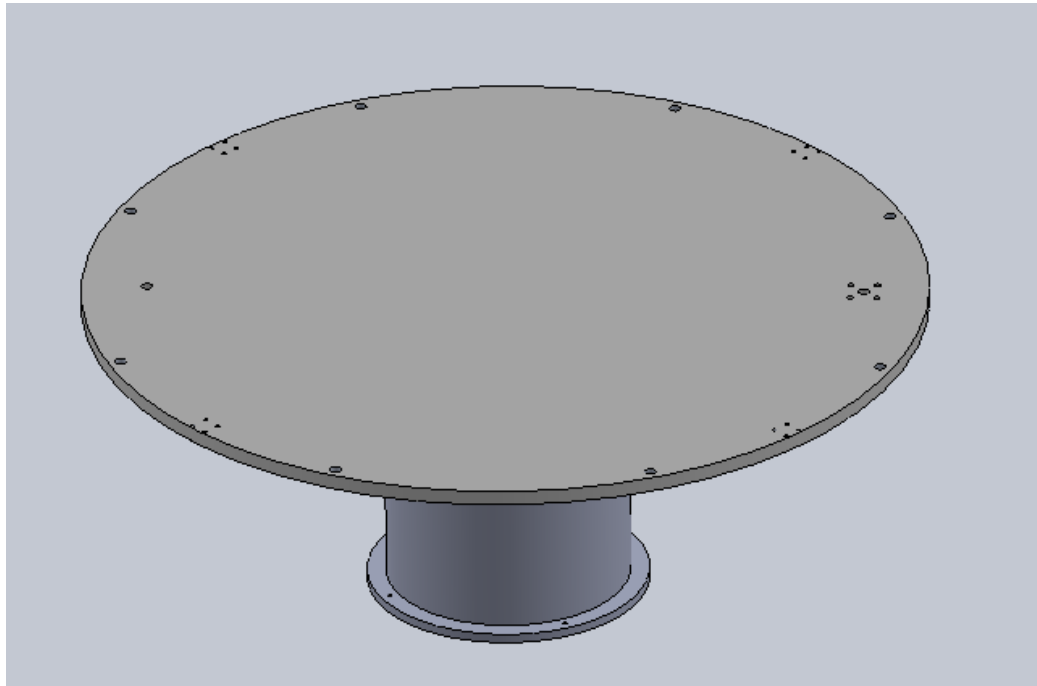


Figura 54 – Conjunto base

A peça apresentada, resultará da fusão entre a base, peça cilíndrica e encaixe, que iremos chamar conjunto da base.

Com a introdução destes elementos na base as molas não terão maneira de efetuar a extensão necessária de modo linear, portanto criaram-se caixas com um curso em espiral de modo a se conseguir que as molas efetuem a extensão requerida no espaço disponível.

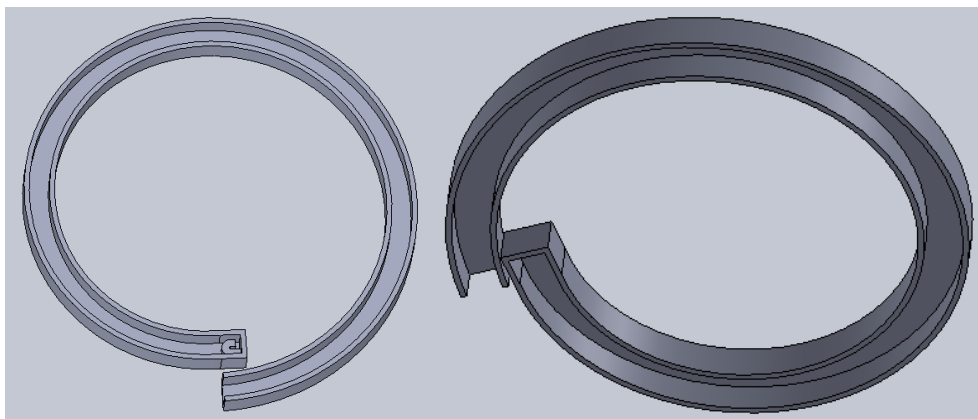


Figura 55 – Caixa para as molas à esquerda e encaixe para as caixas das molas à direita

Também foi necessário criar um encaixe para as caixas das molas de modo a fixar as caixas à base, representadas na Figura 55.

5.2. Análise

Antes de se efetuarem estudos acerca do mecanismo ter-se-á de decidir primeiro que materiais se irão usar para a construção dos componentes do mecanismo, assim como o método de construção dos componentes em questão. Devido à geometria complexa de alguns componentes é atrativo considerar manufatura aditiva, mais coloquialmente conhecido por impressão 3D, que também tem a vantagem de ser barato quando comparado a métodos alternativos de construção. Este processo permite a utilização de diferentes materiais, sendo o mais comum o PLA, ou poliláctico, que é um termoplástico.

Quando comparado com diferentes tipos de materiais usados em manufatura aditiva, este material apresenta a melhor combinação desejáveis para a aplicação desejada, sendo estes um acabamento superficial aceitável, tem de se ter em conta que peças construídas por manufatura aditiva têm por norma um acabamento superficial fraco; apresenta uma resistência apropriada para a aplicação em questão; é fácil de imprimir, chama-se atenção a este fator pois alguns materiais tais como o ABS precisam de camas de impressão aquecidas para poderem ser usados para manufatura aditiva e deve ser arrefecido de maneira lenta e, por fim, tem um baixo custo.[18][19][20] Por estes motivos decidiu-se explorar a viabilidade do PLA como matéria prima do mecanismo em questão.

5.2.1. Atrito

O fator mais relevante a considerar é o atrito entre duas peças de PLA. Após pesquisa do coeficiente de atrito de uma matriz PLA-PLA, não se conseguiu chegar a dados conclusivos, isto muito possivelmente é pelo facto que o par de contacto em estudo não deve ser usado em aplicações deste género para longo prazo. Para se conseguir obter os dados pretendidos, optou-se por uma aproximação mais empírica, que passou por adquirir duas peças (impresas em PLA)

do sistema que tenham um contacto mecânico. Após se polirem as superfícies que irão estar em contacto, testou-se o funcionamento do par cinemático e verificou-se que este par cinemático funcionava sem interferência considerável por forças de atrito, concluiu-se, portanto, que a impressão das peças em PLA é apropriada a aplicação pretendida.

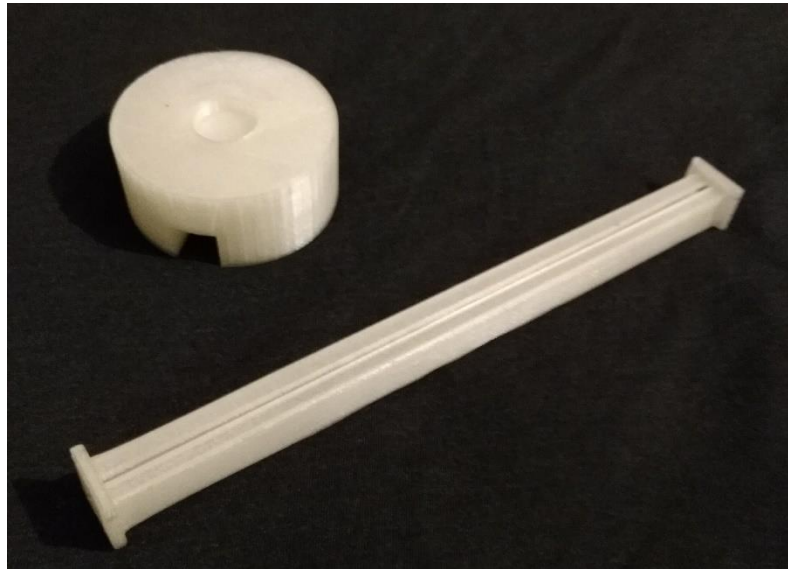


Figura 56 – Peças em PLA usadas para o teste do atrito de uma matriz PLA-PLA

Outro aspeto a ter em conta é que o conjunto de peças apresentados na Figura 54 devido à sua elevada dimensão e geometria simples são passíveis de ser construídas de outro material que pode ser adquirido em bruto e trabalhado de maneira a obter a forma pretendida. Esta possibilidade é bastante útil para a funcionalidade final do mecanismo, pois parte da peça em questão irá funcionar como base do mecanismo, podendo-se assim optar por um material que tenha bom comportamento no que toca à garantia de baixos coeficientes de atrito com diferentes materiais, mais uma vez não se conseguiu encontrar dados para coeficientes de atrito de uma matriz PLA-Acrílico por isso teve-se de analisar o comportamento geral do material em relação a coeficiente de atrito de modo a ter uma ideia do que esperar de uma matriz PLA-Acrílico. Decidiu-se, portanto, testar o comportamento tribológico desta matriz do mesmo modo que se testou a matriz PLA-PLA e verificou-se que este par de materiais deslizavam um sobre o outro sem interferência de relevo por parte de forças de atrito. Por este motivo foi escolhido o acrílico para o conjunto da base, o baixo coeficiente de atrito com PLA, aliada a uma resistência mecânica adequada e a um baixo custo, tornam este material ideal para esta aplicação.



Figura 57 – Peças usadas para o teste do atrito de uma matriz PLA-Acrílico

5.2.2. Esforços normais

De modo a se constatar que os materiais e as dimensões dos mesmos são adequados para a aplicação em questão, decidiu-se fazer-se simulações dos esforços normais a que o sistema está sujeito, recorrendo ao *software* de modelação *Solidworks®*.

Tomou-se como uma carga de prova 100N.

Usando estes dados, e um modelo simplificado do mecanismo desenhado (sem molas) obteve-se as simulações que se apresentam nas Figura 58 e Figura 59.

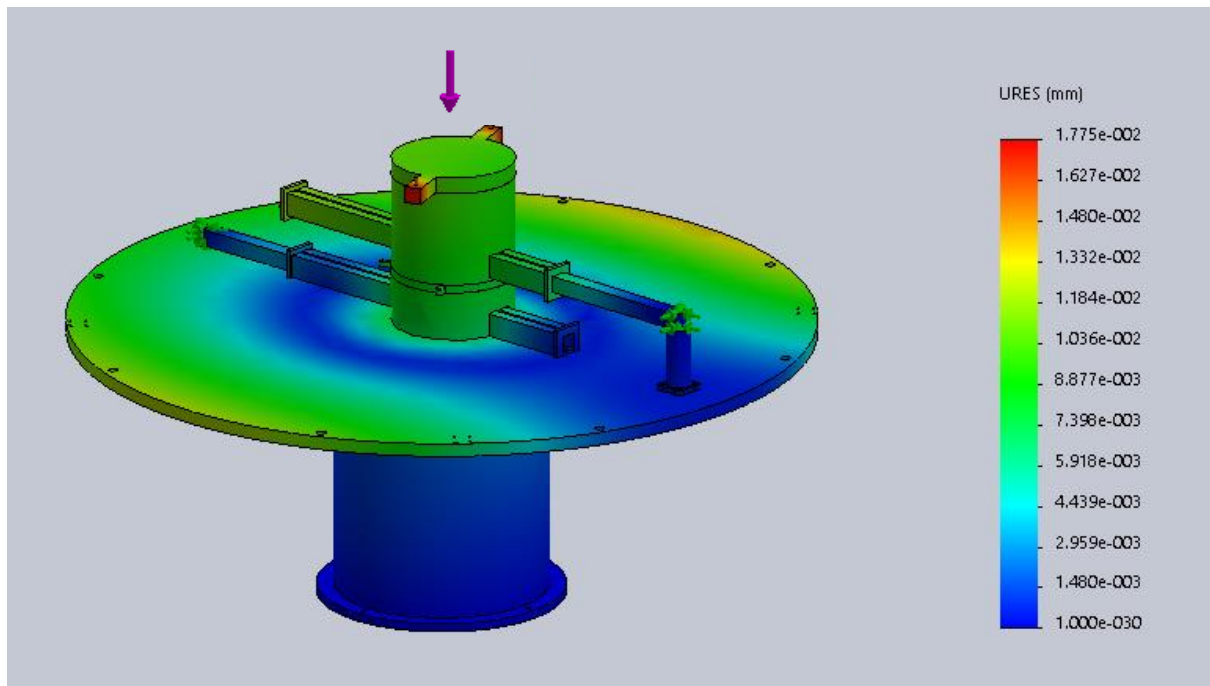


Figura 58 – Simulação com carga normal de 100N aplicada nos cilindros quando este estão numa posição central

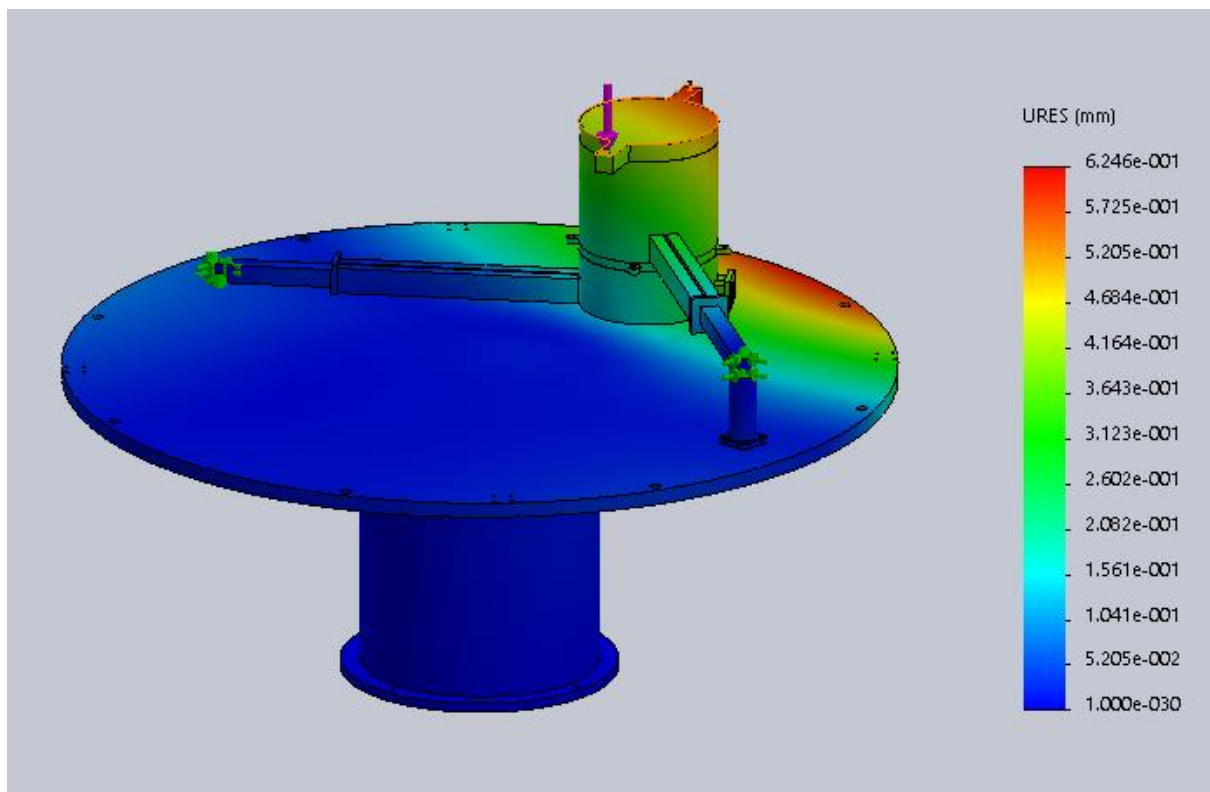


Figura 59 – Simulação com uma carga normal de 100N aplicada nos cilindros quando este estão numa posição extrema

Verifica-se assim que o sistema desenhado está bem dimensionado para as cargas que terá de suportar, dado que a deformação máxima verificada foi de cerca de 0,62 mm, o que é bastante aceitável para a nossa aplicação.

5.3. Orçamento

De modo a constatar se o projeto tem um custo adequado para os fundos disponíveis será necessário fazer o estudo dos custos dos constituintes do mecanismo desenvolvido e consequentemente, do mecanismo por inteiro.

5.3.1. Impressão 3D

Para a impressão 3D foi selecionada a empresa XPIM que nos informou que o custo da impressão das peças em PLA seria de 322,55€

5.3.2. Placas de acrílico

A PAKRIL foi selecionada para o fornecimento das placas de acrílico necessárias para o mecanismo. A placa maior (460x460x8 mm) terá um custo de 17,68€ e a placa menor (160x160x8mm) terá um custo de 2,14€ resultando num custo total de 19,82€. A peça cilíndrica de acrílico foi-nos fornecida a custo zero, por isso não está incluída neste orçamento.

5.3.3. Microprocessadores, reguladores de tensão, adaptadores para pilha, módulos de *Bluetooth*

A maioria dos componentes eletrónicos irão ser adquiridos na botnroll, cada microprocessador terá o custo de 9,30€ cada um dos adaptadores para a pilha de 9V custará 0,40€ cada regulador de tensão 8,60€ e cada módulo de *Bluetooth* 8,68€. Isto resultará num custo total de 71,76€.

5.3.4. Encoders

Os encoders serão adquiridos na Digi-Key, cada um tem um custo de 38,46€ que multiplicando pelos 3 *encoders* necessários resultará num custo total dos encoders 115,38€

5.3.5. Custo Total

Compilando os diferentes os custos de cada um dos componentes obteve-se a Tabela 6.

Tabela 6 – Orçamento do projeto

| Quantidade | Componente | Preço por Unidade | Total |
|--------------|-----------------------------------------------------|-------------------|----------------|
| 2 | Microcontrolador | 9,60€ | 19,20€ |
| 4 | Regulador de Tensão | 8,60€ | 34,40€ |
| 3 | Encoder | 38,48€ | 115,38€ |
| 2 | Módulo de <i>Bluetooth</i> em circuito integrado | 8,68€ | 17,36€ |
| 2 | Conector à bateria de 9V | 0,40€ | 0,80€ |
| 1 | Placas de Acrílico | 19,82€ | 19,82€ |
| 1 | Impressão 3D | 390,29€ | 390,29€ |
| Total | | | 556,53€ |

Neste orçamento não foram incluídos elementos mecânicos necessários à montagem, sendo eles molas, anilhas, porcas e parafusos, assim como o fio de nylon por estes terem um impacto desprezável no orçamento final.

5.4. Plano de Construção de Protótipo

Antes de se prosseguir ao planeamento da montagem, ter-se-á de fazer uma alteração ao sistema de modo permitir a montagem do mesmo.

Em relação a este ponto apenas tem-se apenas que alterar ambas as hastes ocas, a haste oca superior está ilustrada na Figura 60.

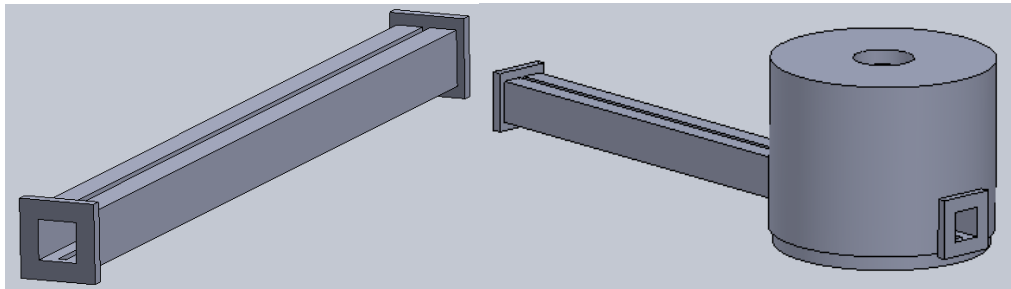


Figura 60 – haste oca superior antes da sua alteração à esquerda e à direita a haste oca superior encaixada no cilindro superior

Esta alteração é necessária, pois de maneira a se conseguir inserir a hastes ocas nos seus respetivos cilindros terá de se tirar um dos batentes das hastes, o batente em falta irá ser uma peça separada que irá ser fixada à haste oca correspondente após a inserção da haste no cilindro respetivo. As duas peças resultantes apresentam-se na Figura 61 que irão ser coladas uma à outra na sua montagem.

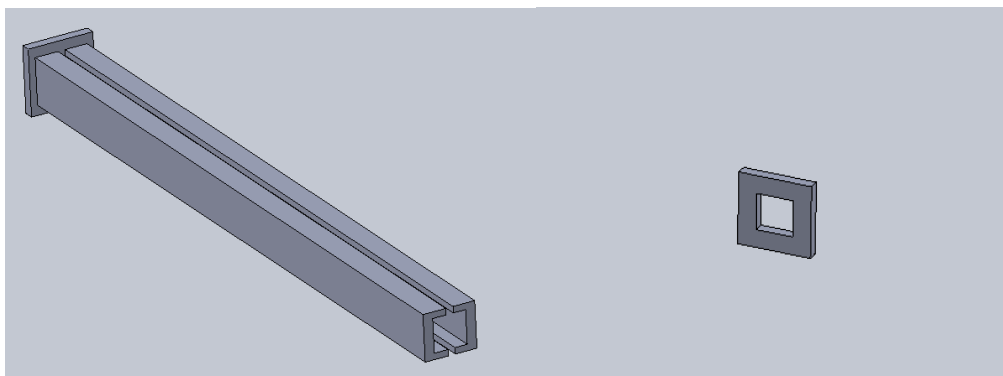


Figura 61 – Haste superior após a sua divisão em duas peças

E pode-se ver a sequência de montagem destas peças na Figura 62.

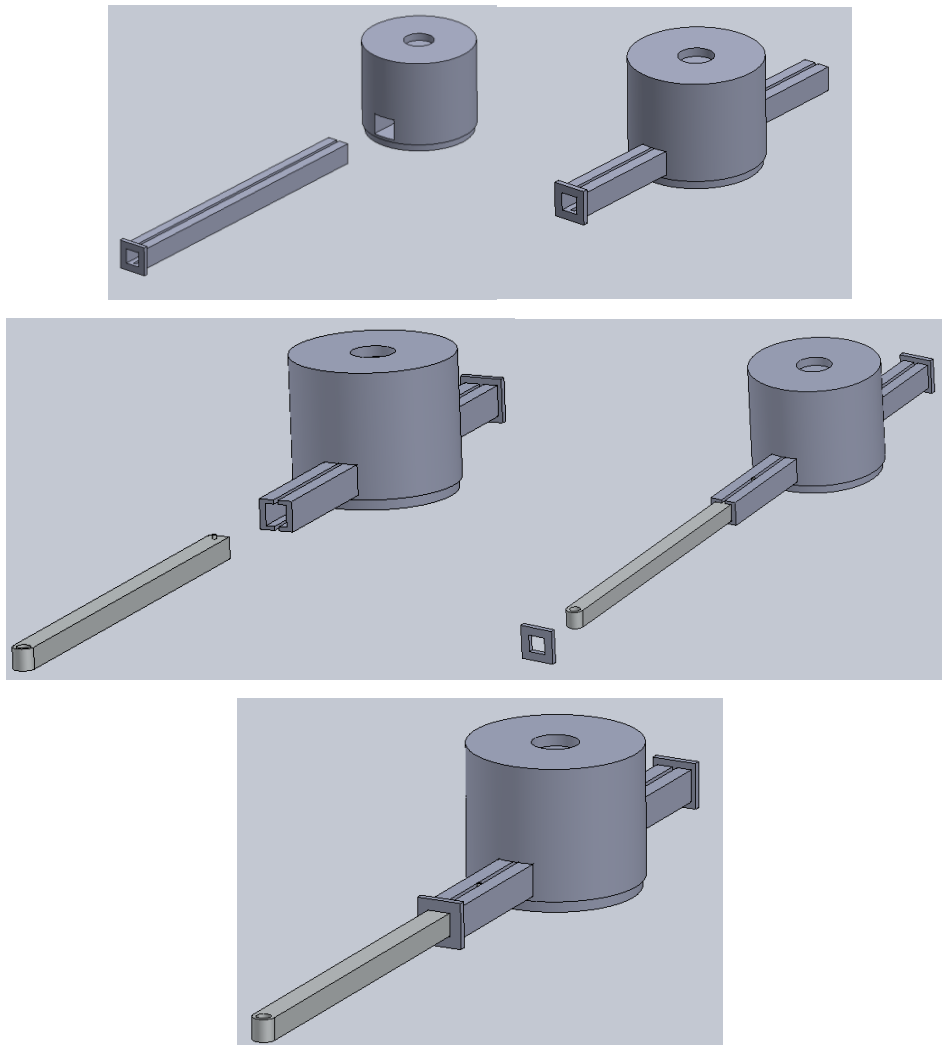


Figura 62 – Sequência de montagem do cilindro superior com a haste e braço superior

O primeiro passo a tomar será a montagem do conjunto base que é constituída pela base, peça cilíndrica e encaixe.

O encaixe será obtido de uma placa de acrílico com um perfil retangular que irá ser cortada de modo a ter o perfil circular pretendido, e esta placa também será furada, resultando na peça apresentada na Figura 63.

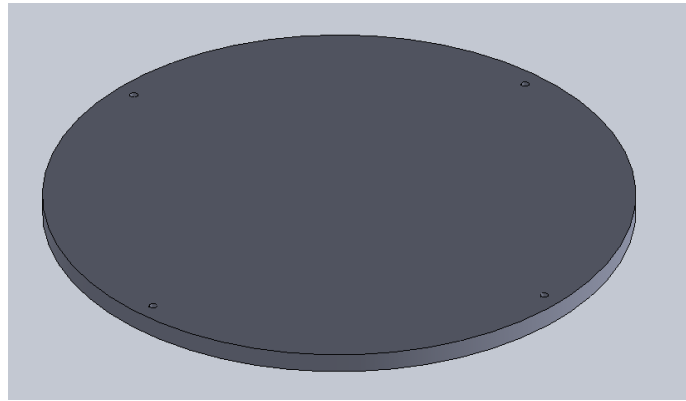


Figura 63 - Encaixe

A peça cilíndrica será obtida através do corte de uma peça cilíndrica já existente, resultando na peça que se vê na Figura 64.

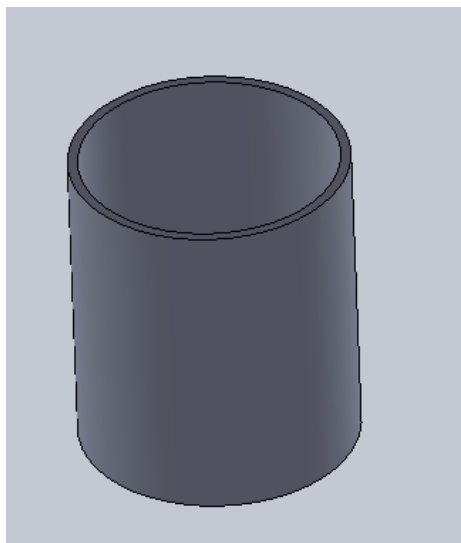


Figura 64 – Peça cilíndrica

A base irá ser obtida através de uma placa com perfil retangular que irá ser cortada num perfil circular e, de seguida irá ser furada de modo a obter a peça representada na Figura 65.

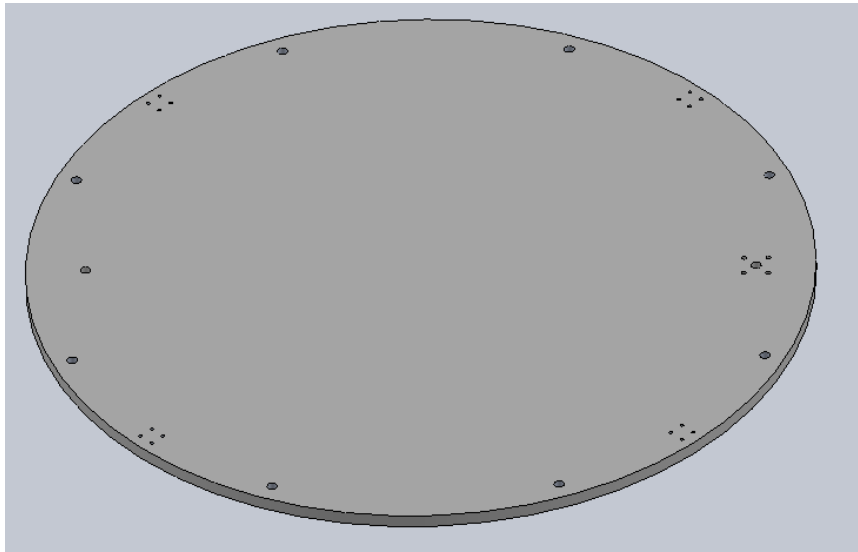


Figura 65 – Base

Esta 3 peças irão ser afixadas umas às outras de modo a obter o conjunto base, ilustrado na Figura 66.

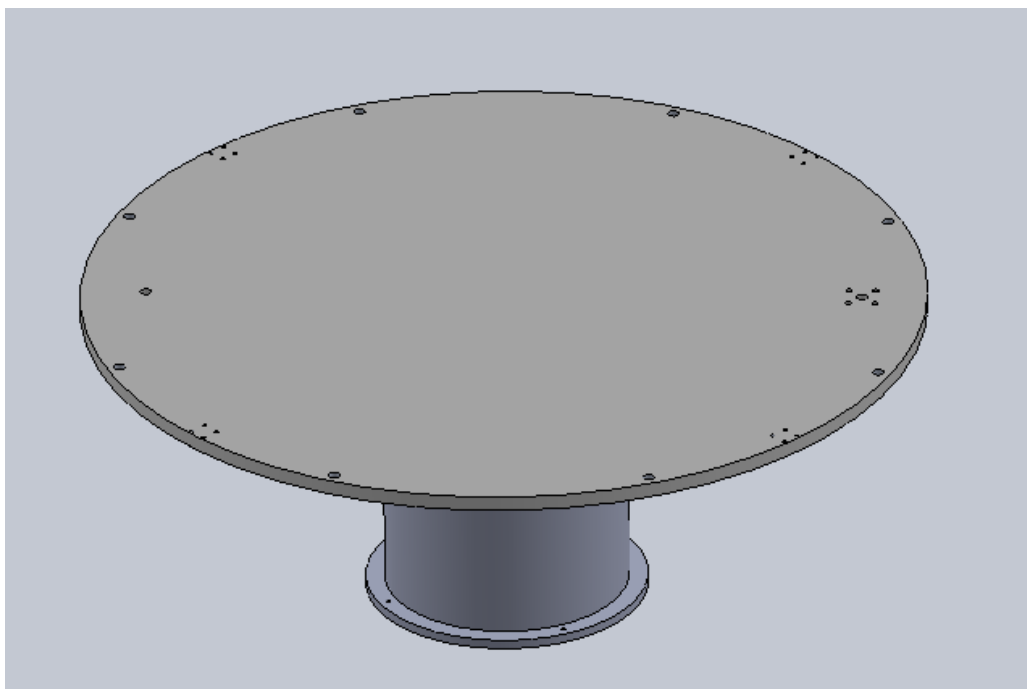


Figura 66 – Conjunto base

De seguida começou-se por fixar o apoio para o braço superior, tal como ilustrado na Figura 67.

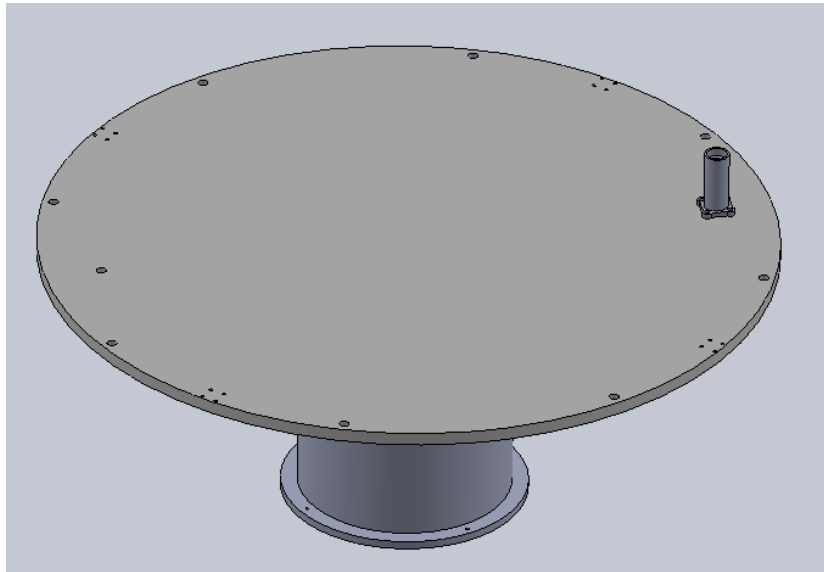


Figura 67 – Fixação do apoio para o braço superior na base

De seguida irá fixar-se o batente e peças para apoiar os fios, ilustrado na Figura 68.

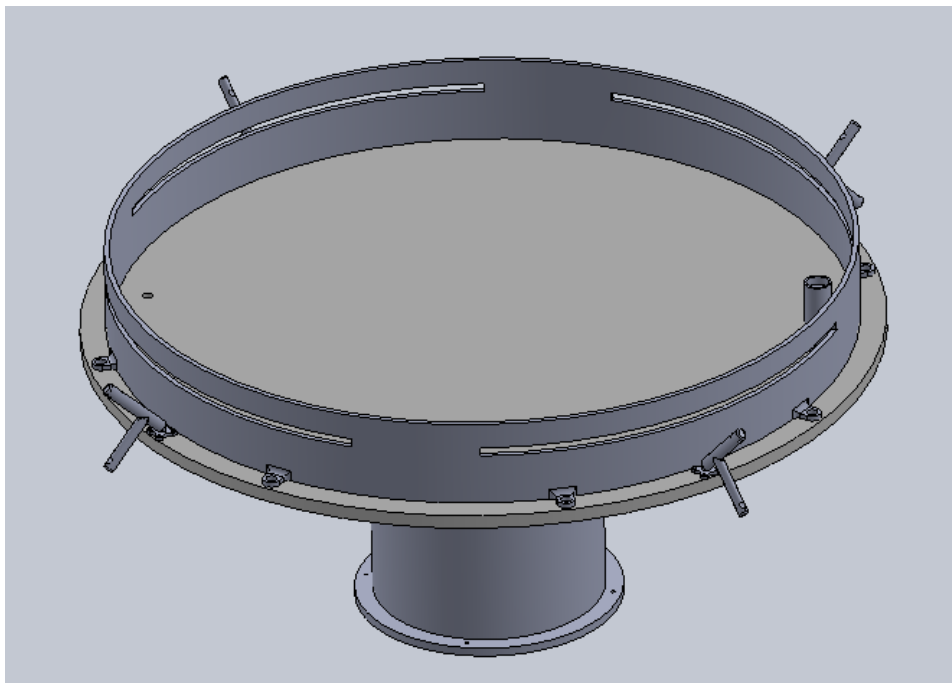


Figura 68 – Conjunto após a fixação do batente e das peças para apoiar os fios

De seguida temos a fixação do braço inferior, ilustrado na Figura 69.

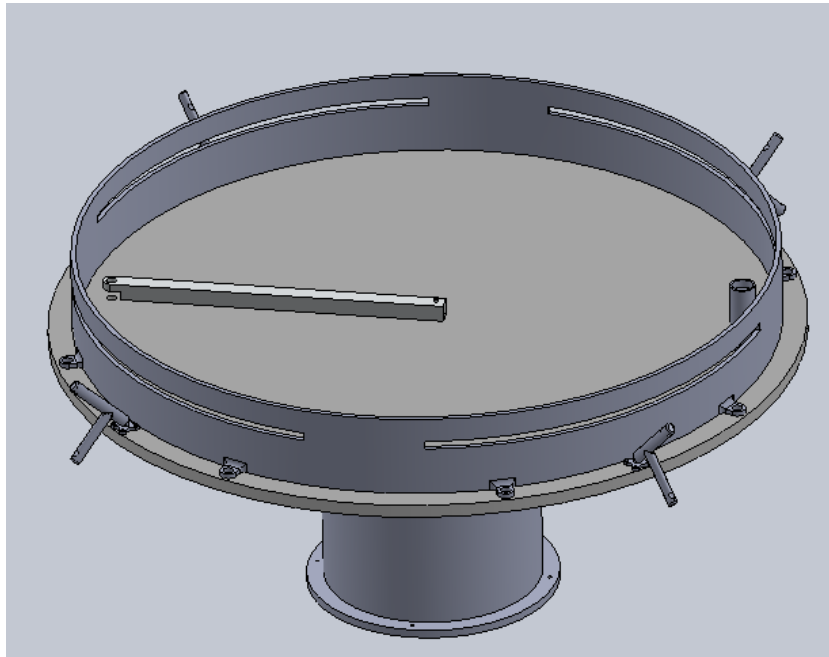


Figura 69 – Conjunto após a fixação do braço inferior

Após a fixação do braço inferior, proceder-se-á ao acoplamento da haste inferior, ilustrado na Figura 70.

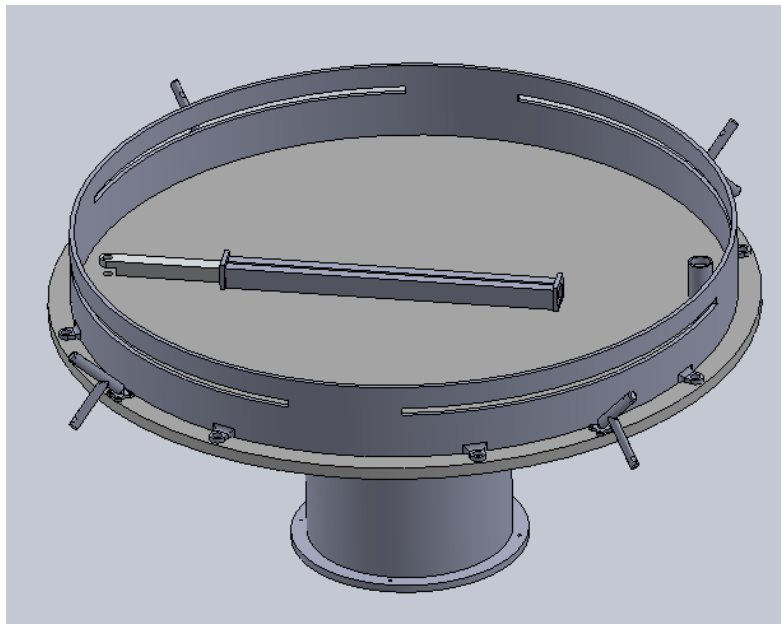


Figura 70 – Conjunto após a fixação da haste inferior

Posteriormente fixou-se o cilindro inferior ao sistema, ilustrado na Figura 71.

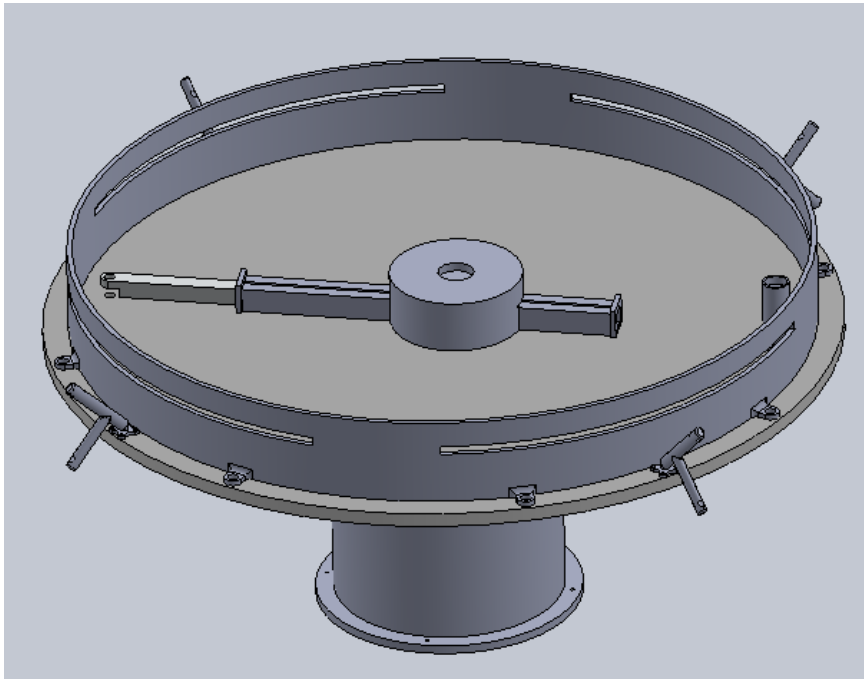


Figura 71 – Conjunto após a fixação do cilindro inferior

De seguida acoplou-se o conjunto de peças haste e braço superiores, cilindro superior e aro, ilustrado na Figura 72.

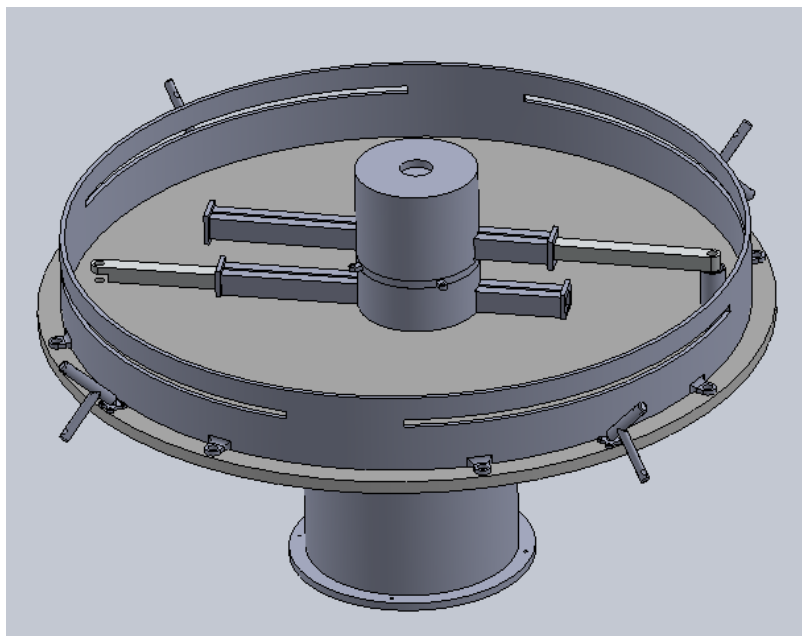


Figura 72 – Conjunto após a fixação do cilindro superior, haste superior, braço inferior e do aro

E, completando a parte superior do sistema, temos o acoplamento do suporte de carga, ilustrado na Figura 73.

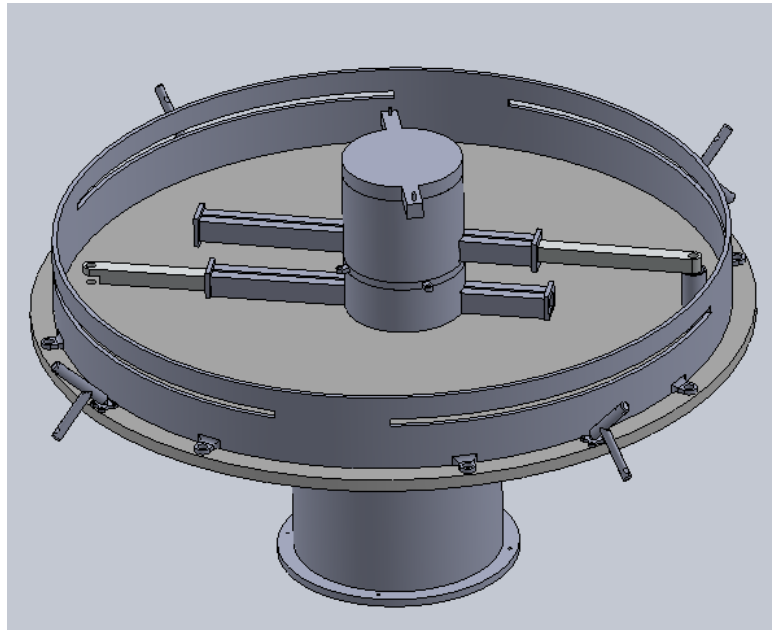


Figura 73 – Conjunto após a fixação do suporte de carga

Passando à parte inferior do mecanismo, primeiro iremos proceder à montagem dos recipientes para os componentes eletrônicos na parte inferior, representados na Figura 74.

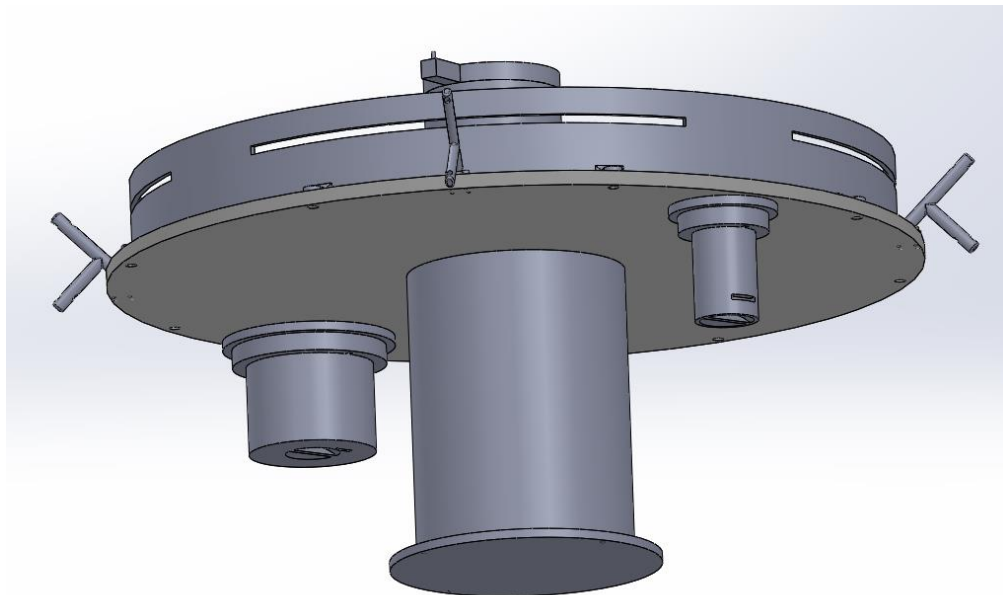


Figura 74 – Conjunto após a montagem dos recipientes para os componentes eletrônicos

De seguida procedeu-se à montagem das caixas para as molas, tal como visto nas Figura 75 e 76 .

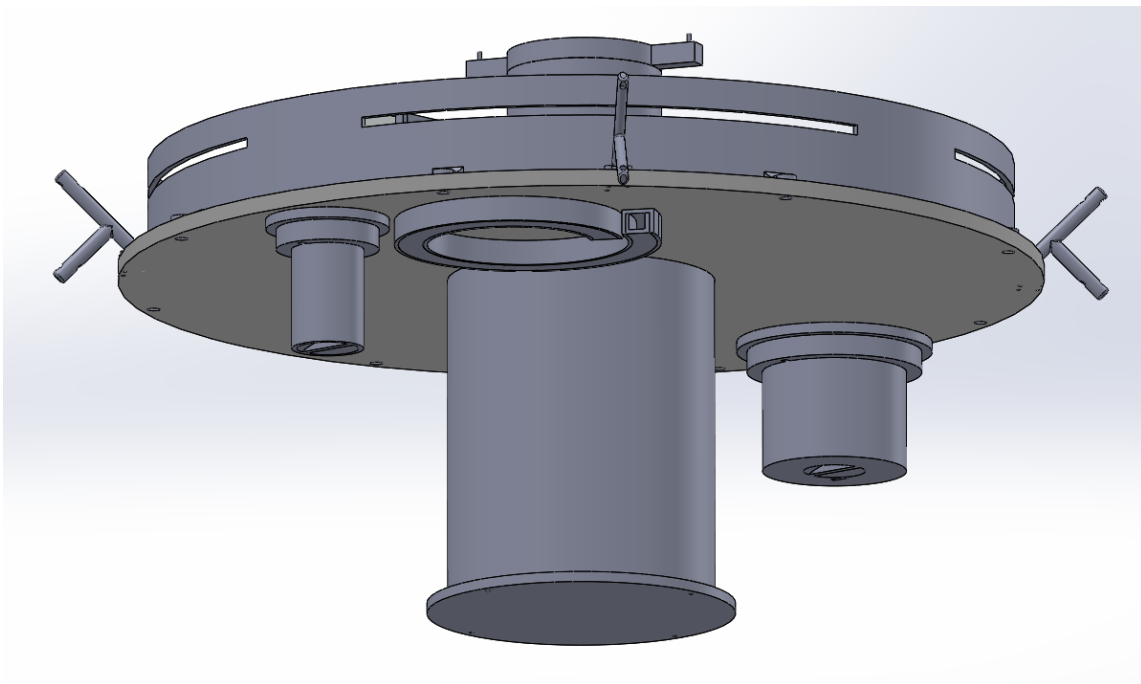
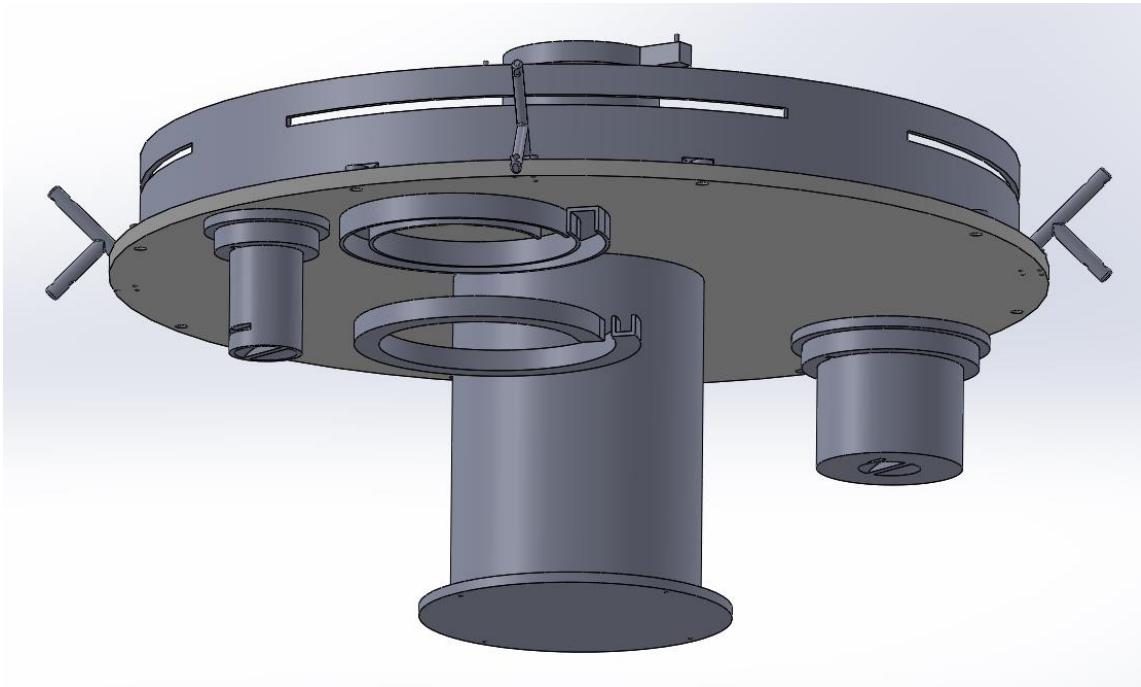


Figura 75 e 76 – Montagem de uma das caixas para as molas

5.5. Discussão Final

Apesar de não ter sido possível a verificação da solução através da construção do protótipo prevê-se que a solução final tenha o comportamento desejado devido resultados provenientes dos estudos realizados.

Sendo este o caso, com a utilização de materiais apropriados para uma solução futura com vista a um funcionamento a longo prazo, também será possível criar um sistema que seja capaz de suportar cargas mais elevadas, utilizando o princípio de funcionamento do mecanismo desenvolvido na presente dissertação.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

No decorrer deste trabalho sentiram-se dificuldades a nível de conceção do mecanismo especialmente no que tocava às medidas de atravancamento, o que fez com que o mecanismo tivesse de ser bastante compacto, o que em iterações futuras deste projeto poderá ser um problema, quando forem implementadas cargas superiores ao sistema.

Outro ponto que poderá ser dificuldade no futuro será a geometria das peças que foram criadas para este sistema, embora tenham um custo aceitável quando construídas através de impressão 3D, quando forem executadas em materiais que nos possam usar esse método de construção irão ter um custo elevado, o que será um fator a ter em conta no seguimento deste projeto.

Neste projeto também estava prevista a validação através da construção de um protótipo, mas tal não foi possível devido a uma falha do fornecedor das peças impressas em 3D e, portanto, não foi possível construir o protótipo a tempo da apresentação do projeto.

6.2. Desenvolvimentos Futuros

A sequência lógica do presente trabalho será a construção e validação do protótipo desenhado e a sua implementação no sistema de robôs para o qual foi construído. Caso se verifique que o mecanismo desenhado é viável o passo seguinte será expandir o projeto de modo a conseguir que o suporte consiga suportar cargas bastante elevadas. Com o decorrer do desenvolvimento dos robôs, estes também irão sofrer alterações estruturais, de modo a suportar cargas elevadas, com estes novos robôs, que poderão ter uma geometria diferente da atual, terá também de se alterar o suporte de modo a se adaptar ao nova geometria dos robôs, mas o conceito do mecanismo, se este for validado, poderá mesmo assim ser aproveitado para esta nova gama de robôs.

7. Referências Bibliográficas

- [1] “A História Da KUKA.” KUKA AG, www.kuka.com/pt-pt/sobre-a-kuka/história. [acedido em maio de 2019]
- [2] “History of Industrial Robots.” International Federation of Robotics, 2012, web.archive.org/web/20121224213437/http://www.ifr.org/uploads/media/History_of_Industrial_Robots_online_brochure_by_IFR_2012.pdf. [acedido a maio de 2019]
- [3] Knight, Will. “At Amazon Warehouses, Humans and Machines Work in Frenetic Harmony.” MIT Technology Review, MIT Technology Review, 21 Mar. 2016, www.technologyreview.com/s/538601/inside-amazons-warehouse-human-robot-symbiosis. [acedido em maio de 2019]
- [4] Tam, Donna. “Meet Amazon's Busiest Employee – the Kiva Robot.” CNET, CNET, 1 Dec. 2014, www.cnet.com/news/meet-amazons-busiest-employee-the-kiva-robot. [acedido em maio de 2019]
- [5] Machado, Toni, et al. “Multi-Constrained Joint Transportation Tasks by Teams of Autonomous Mobile Robots Using a Dynamical Systems Approach.” 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016, doi:10.1109/icra.2016.7487477.
- [6] Fujii, Masakazu, et al. “Cooperative Control of Multiple Mobile Robots Transporting a Single Object with Loose Handling.” 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2007, doi:10.1109/robio.2007.4522268.
- [7] Ahmadabadi, Majid Nili, et al. “Compliance: Encoded Information and Behavior in a Team of Cooperative Object-Handling Robots.” *Advanced Robotics*, vol. 17, no. 5, 2003, pp. 427–446., doi:10.1163/15685530360663427.
- [8] Miyata, N., et al. “Cooperative Transport by Multiple Mobile Robots in Unknown Static Environments Associated with Real-Time Task Assignment.” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, 2002, pp. 769–780., doi:10.1109/tra.2002.803464.
- [9] Stuckler, Jorg, and Sven Behnke. “Following Human Guidance to Cooperatively Carry a Large Object.” 2011 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2011, doi:10.1109/humanoids.2011.6100917.

- [10] Bussy, Antoine, et al. "Human-Humanoid Haptic Joint Object Transportation Case Study." 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012, doi:10.1109/iros.2012.6385921.
- [11] "Inverse Kinematics of Parallel Manipulator (Delta Robot)." Robotics Stack Exchange, robotics.stackexchange.com/questions/3144/inverse-kinematics-of-parallel-manipulator-delta-robot. [acedido em janeiro de 2019]
- [12] "Weighted Objectives Method." Weighted Objectives Method - WikID, the Industrial Design Engineering Wiki, wikid.io.tudelft.nl/WikID/index.php/Weighted_objectives_method. [acedido em maio de 2019]
- [13] Magnetic Encoders, www.bourns.com/products/encoders/magnetic-encoders/product/EMS22A. [acedido em março de 2019]
- [14] Data Sheet em Magnetic Encoders, www.bourns.com/products/encoders/magnetic-encoders/product/EMS22A. [acedido em março de 2019]
- [15] "Arduino Nano 3.0 (COMPATIBLE)." Botnroll.com, www.botnroll.com/en/arduino-boards/934-arduino-nano-30-compativel.html. [acedido em maio de 2019]
- [16] Instructables. "Tutorial - Using HC06 Bluetooth to Serial Wireless UART Adaptors with Arduino." Instructables, Instructables, 8 July 2019, www.instructables.com/id/Tutorial-Using-HC06-Bluetooth-to-Serial-Wireless-U-1/?fbclid=IwAR1RqkuiBMGMvHY9eb3Aaj1iI71ZFUCpnhKuhGoy2Cuf3Ve-7E5P3gpXhIY. [acedido em junho de 2019]
- [17] Arduino Nano, store.arduino.cc/arduino-nano. [acedido em maio de 2019]
- [18] Baldwin, Stan. "Different Types of 3D-Printer Filaments." 3D Printer Chat, 9 Dec. 2017, 3dprinterchat.com/different-types-of-3d-printer-filaments/. [acedido em maio de 2019]
- [19] Hoffman, Tony. "3D Printer Filaments Explained." PCMAG, 24 May 2018, www.pcmag.com/article/360773/3d-printer-filaments-explained. [acedido em junho de 2019]
- [20] "Most Common Types of 3D Printing Filaments." MANUFACTUR3D, 15 Mar. 2018, manufactur3dmag.com/common-fff-3d-printing-filaments/. [acedido em junho de 2019]

Anexo 1

Fichas Técnicas

Encoder



Features

- 3.3 and 5 VDC voltage supply option
- Absolute
- Bushing or servo mount
- Non-contacting magnetic technology
- Small size
- CMOS and TTL compatible
- Resolution: 1024 positions
- Long life
- High operating speed
- Highly repeatable
- Sealed option
- Magnetic technology

EMS22A - Non-Contacting Absolute Encoder

Electrical Characteristics

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Resolution | 1024 positions |
| Insulation Resistance (500 VDC) | 1,000 megohms |
| Electrical Travel | Continuous |
| Supply Voltage | 5.0 VDC $\pm 10\%$, 3.3 VDC $\pm 10\%$ |
| Supply Current | .20 mA maximum |
| Output Voltage | |
| Low Output Level | V _{ss} +0.4 V maximum |
| High Output Level | V _{dd} -0.5 V minimum |
| Output Current | |
| With 4.5 VDC Supply Voltage | .4 mA maximum |
| With 3.0 VDC Supply Voltage | .2 mA maximum |
| Rise/Fall Time (Incremental Output) | 500 ns maximum |
| Shaft RPM (Ball Bearing) | 10,000 rpm maximum |
| Linearity | 0.5 % |
| Accuracy | |
| Nominal | $\pm 0.7^\circ$ or better |
| Worst Case | $\pm 1.4^\circ$ |
| Output Transition Noise | 0.12 ° RMS max. |

Environmental Characteristics

| | |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Operating Temperature Range | -40 °C to +125 °C (-40 °F to +257 °F) |
| Storage Temperature Range | -55 °C to +125 °C (-67 °F to +257 °F) |
| Humidity | MIL-STD-202, Method 103B, Condition B |
| Vibration | 15 G |
| Shock | 50 G |
| Rotational Life | |
| S Bushing (@ 1,000 rpm) | 100,000,000 revolutions |
| T & W Bushings (@ 1,000 rpm with 250 g side load) | 50,000,000 revolutions |
| IP Rating | IP 65 |

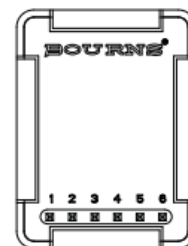
Mechanical Characteristics

| | |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mechanical Angle | 360 ° Continuous |
| Torque | |
| Starting | 43 ± 21 g-cm (0.6 ± 0.3 oz-in.) |
| Running | 29 ± 14 g-cm (0.4 ± 0.2 oz-in.) |
| Mounting Torque | 203 N-cm (18 lb.-in.) |
| Shaft End Play | 0.30 mm (0.012 ") T.I.R. maximum |
| Shaft Radial Play | 0.12 mm (0.005 ") T.I.R. maximum |
| Weight | 11 gms. (0.4 oz.) |
| Terminals | Axial, radial or ribbon cable |
| Soldering Condition | |
| Manual Soldering | 96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu solid wire or no-clean rosin cored wire 370 °C (700 °F) max. for 3 seconds |
| Wave Soldering | 96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu solder with no-clean flux 260 °C (500 °F) max. for 10 seconds |
| Wash processes | Not recommended |
| Marking | Manufacturer's trademark, name, part number, and date code. |
| Hardware | One lockwasher and one mounting nut supplied with each encoder, except on servo mount versions. |

Pin Configuration

| Output Type | Pin 1 (DI) | Pin 2 (CLK) | Pin 3 | Pin 4 (DO) | Pin 5 | Pin 6 |
|-------------|---------------|-------------|-------|----------------|-------|-------|
| Absolute | Digital Input | Clock | GND | Digital Output | VCC* | CS |

* Can be 5 or 3.3 VDC depending on the version.



*RoHS Directive 2002/95/EC Jan. 27, 2003 including annex and RoHS Recast 2011/65/EU June 8, 2011. Specifications are subject to change without notice. The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time. Users should verify actual device performance in their specific applications.

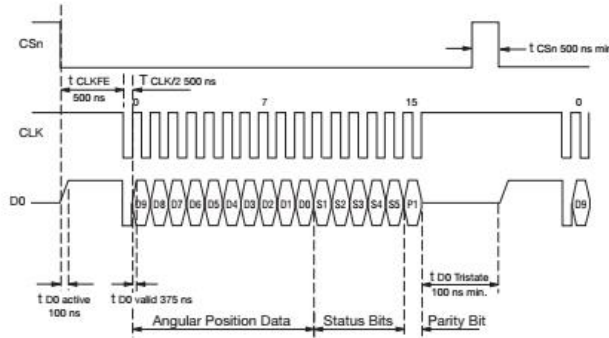
Applications

- Material handling equipment
- Brushless DC motor commutation
- Robotics
- Automotive
- Industrial automation
- Petroleum refinery
- Medical
- Office equipment
- Audio and broadcast equipment

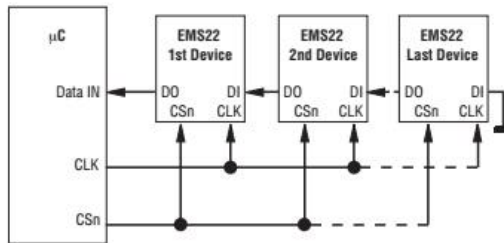
EMS22A - Non-Contacting Absolute Encoder **BOURNS®**

Output Type Waveform and Variant Table

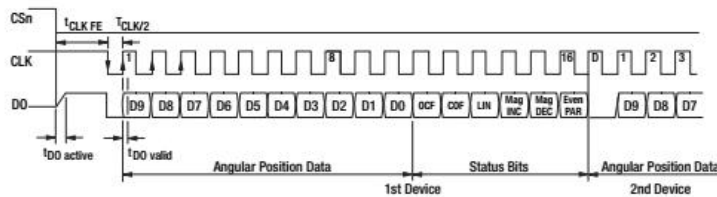
Absolute Output



| Data Content | Description |
|--------------|--------------------------------------------------------|
| D9:D0 | Absolute angular position data |
| S1 | End of offset compensation algorithm |
| S2 | Cordic overflow indicating an error in cordic part |
| S3 | Linearity alarm |
| S4 | Increase in magnitude |
| S5 | Decrease in magnitude |
| P1 | Even parity for detecting bits 1-15 transmission error |



Daisy Chain Hardware Configuration



Daisy Chain Mode Data Transfer

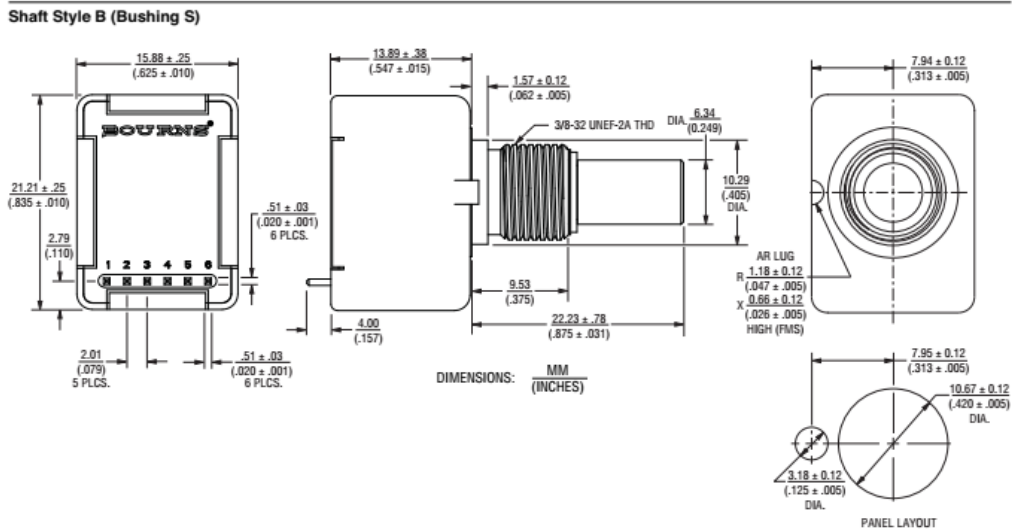
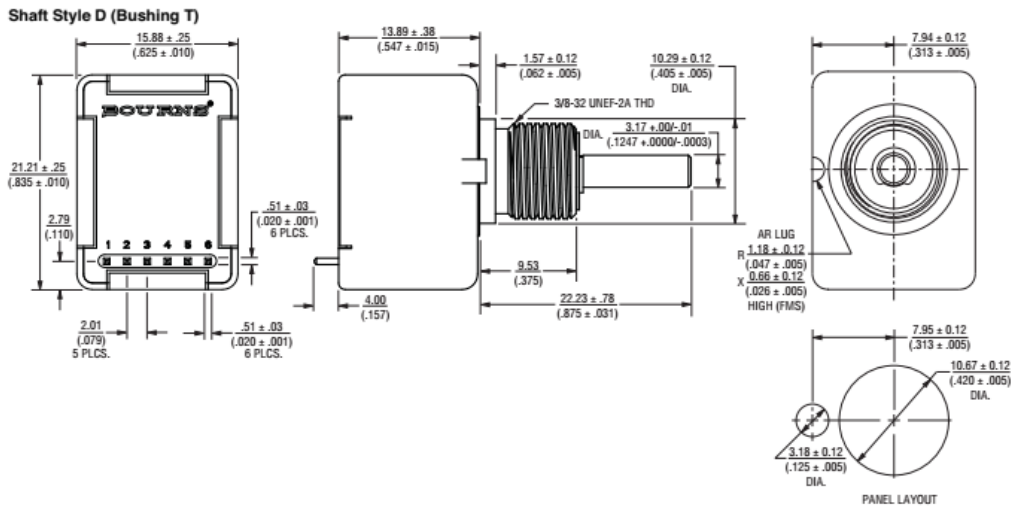
Specifications are subject to change without notice.

The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time. Users should verify actual device performance in their specific applications.

- Consult factory for options not shown, including:
- Wire lead or cable options
 - Connectors
 - Non-standard resolutions
 - Special shaft/bushing sizes and features
 - Special performance characteristics
 - PCB mounting bracket

EMS22A - Non-Contacting Absolute Encoder **BOURNS®**

Product Dimensions

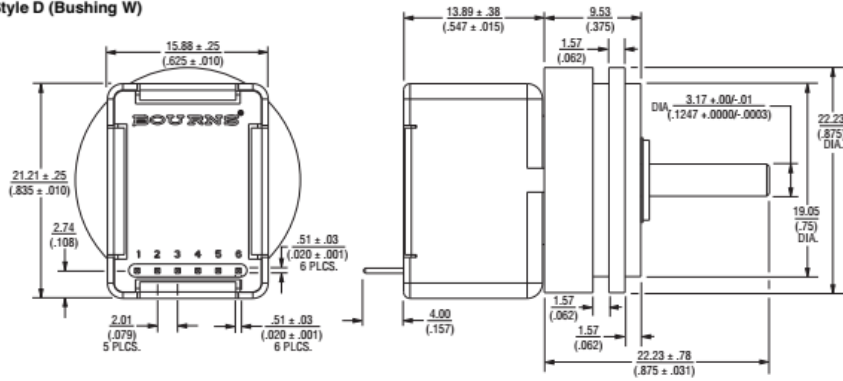


Specifications are subject to change without notice.
 The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time.
 Users should verify actual device performance in their specific applications.

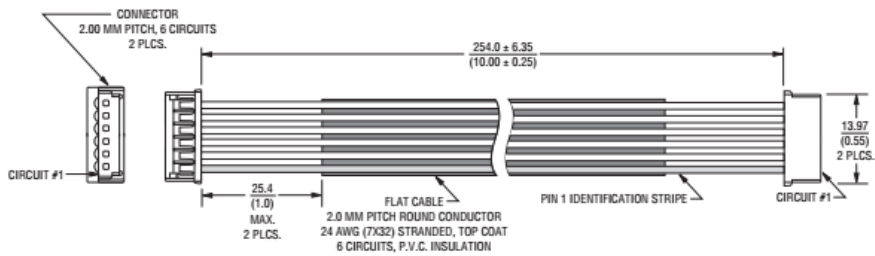
EMS22A - Non-Contacting Absolute Encoder **BOURNS®**

Product Dimensions

Shaft Style D (Bushing W)



Cable Assembly



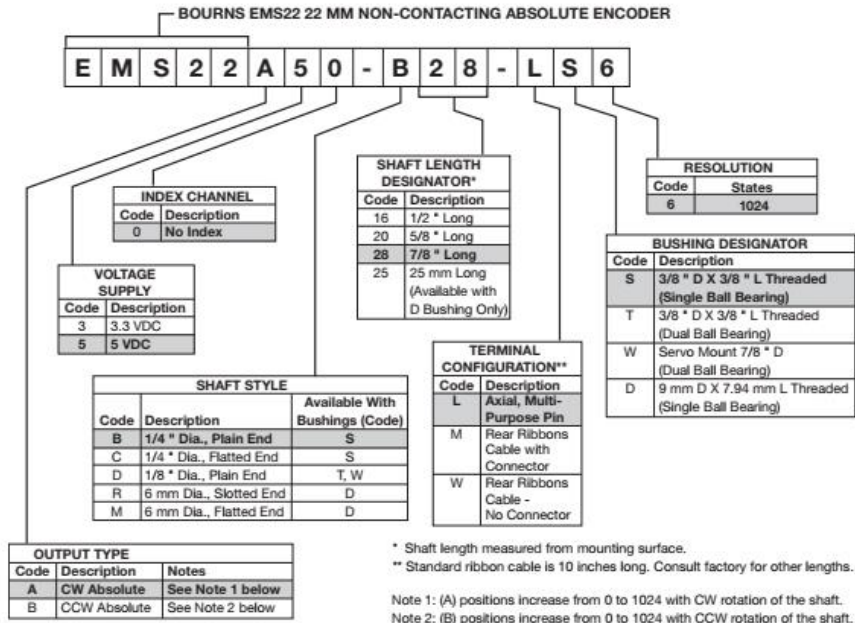
DIMENSIONS: $\frac{\text{MM}}{\text{(INCHES)}}$

Specifications are subject to change without notice.
 The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time.
 Users should verify actual device performance in their specific applications.

EMS22A - Non-Contacting Absolute Encoder



How To Order



REV. 05/14

Specifications are subject to change without notice. The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time. Users should verify actual device performance in their specific applications.

Módulo de Bluetooth

HC-05

-Bluetooth to Serial Port Module

Overview



HC-05 module is an easy to use Bluetooth SPP (Serial Port Protocol) module, designed for transparent wireless serial connection setup.

Serial port Bluetooth module is fully qualified Bluetooth V2.0+EDR (Enhanced Data Rate) 3Mbps Modulation with complete 2.4GHz radio transceiver and baseband. It uses CSR Bluecore 04-External single chip Bluetooth system with CMOS technology and with AFH(Adaptive Frequency Hopping Feature). It has the footprint as small as 12.7mmx27mm. Hope it will simplify your overall design/development cycle.

Specifications

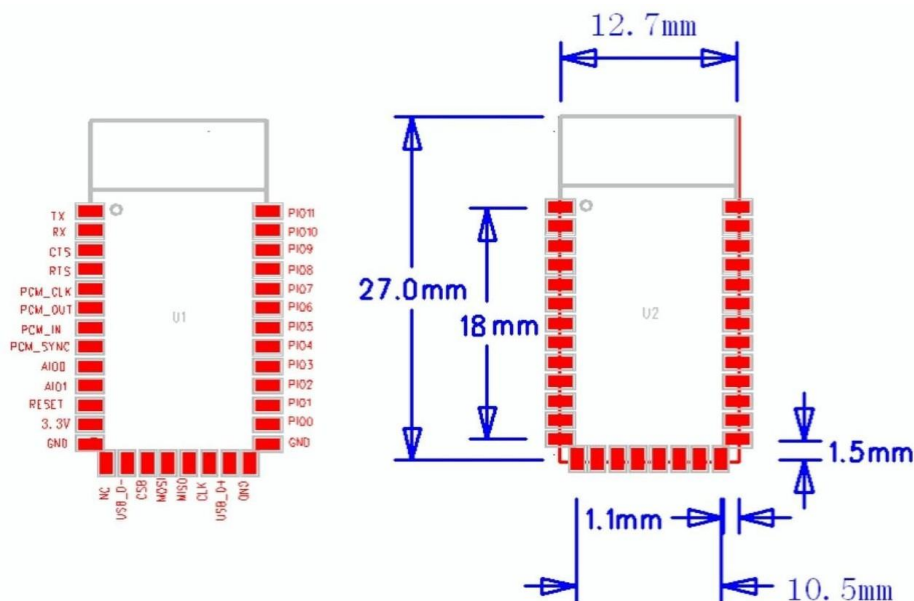
Hardware features

- Typical -80dBm sensitivity
- Up to +4dBm RF transmit power
- Low Power 1.8V Operation ,1.8 to 3.6V I/O
- PIO control
- UART interface with programmable baud rate
- With integrated antenna
- With edge connector

Software features

- Default Baud rate: 38400, Data bits:8, Stop bit:1,Parity:No parity, Data control: has.
Supported baud rate: 9600,19200,38400,57600,115200,230400,460800.
- Given a rising pulse in PIO0, device will be disconnected.
- Status instruction port PIO1: low-disconnected, high-connected;
- PIO10 and PIO11 can be connected to red and blue led separately. When master and slave are paired, red and blue led blinks 1time/2s in interval, while disconnected only blue led blinks 2times/s.
- Auto-connect to the last device on power as default.
- Permit pairing device to connect as default.
- Auto-pairing PINCODE:"0000" as default
- Auto-reconnect in 30 min when disconnected as a result of beyond the range of connection.

Hardware



| PIN Name | PIN # | Pad type | Description | Note |
|-----------------|----------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| GND | 13 21 22 | VSS | Ground pot | |
| 3.3 VCC | 12 | 3.3V | Integrated 3.3V (+) supply with On-chip linear regulator output within 3.15-3.3V | |
| AIO0 | 9 | Bi-Directional | Programmable input/output line | |
| AIO1 | 10 | Bi-Directional | Programmable input/output line | |
| PIO0 | 23 | Bi-Directional RX EN | Programmable input/output line, control output for LNA(if fitted) | |
| PIO1 | 24 | Bi-Directional TX EN | Programmable input/output line, control output for PA(if fitted) | |

| | | | | |
|--------------|----|----------------|--------------------------------|--|
| PIO2 | 25 | Bi-Directional | Programmable input/output line | |
| PIO3 | 26 | Bi-Directional | Programmable input/output line | |
| PIO4 | 27 | Bi-Directional | Programmable input/output line | |
| PIO5 | 28 | Bi-Directional | Programmable input/output line | |
| PIO6 | 29 | Bi-Directional | Programmable input/output line | |
| PIO7 | 30 | Bi-Directional | Programmable input/output line | |
| PIO8 | 31 | Bi-Directional | Programmable input/output line | |
| PIO9 | 32 | Bi-Directional | Programmable input/output line | |
| PIO10 | 33 | Bi-Directional | Programmable input/output line | |
| PIO11 | 34 | Bi-Directional | Programmable input/output line | |

| | | | | |
|-----------------|-----------|-----------------------|------------------------------------|--|
| USB_+ | 20 | Bi-Directional | | |
| NC | 14 | | | |
| PCM_CLK | 5 | Bi-Directional | Synchronous PCM data clock | |
| PCM_OUT | 6 | CMOS output | Synchronous PCM data output | |
| PCM_IN | 7 | CMOS Input | Synchronous PCM data input | |
| PCM_SYNC | 8 | Bi-Directional | Synchronous PCM data strobe | |

AT command Default:

How to set the mode to server (master):

1. Connect PIO11 to high level.
2. Power on, module into command state.
3. Using baud rate 38400, sent the "AT+ROLE=1\r\n" to module, with "OK\r\n" means setting successes.
4. Connect the PIO11 to low level, repower the module, the module work as server (master).

AT commands: (all end with \r\n)

1. Test command:

| Command | Respond | Parameter |
|---------|---------|-----------|
| AT | OK | - |

2. Reset

| Command | Respond | Parameter |
|----------|---------|-----------|
| AT+RESET | OK | - |

3. Get firmware version

| Command | Respond | Parameter |
|-------------|------------------------|--------------------------|
| AT+VERSION? | +VERSION:<Param> OK | Param : firmware version |

Example:

```
AT+VERSION?\r\n
```

```
+VERSION:2.0-20100601
```

```
OK
```

| | | | | |
|-----------------|-----------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--|
| RESETB | 11 | CMOS input with weak internal pull-up | Reset if low.input debouncde so must be low for >5MS to cause a reset | |
| UART_RTS | 4 | CMOS output, tri-stable with weak internal pull-up | UART request to send, active low | |
| UART_CTS | 3 | CMOS input with weak internal pull-down | UART clear to send, active low | |
| UART_RX | 2 | CMOS input with weak internal pull-down | UART Data input | |
| UART_TX | 1 | CMOS output, Tri-stable with weak internal pull-up | UART Data output | |
| SPI_MOSI | 17 | CMOS input with weak internal pull-down | Serial peripheral interface data input | |

| | | | | |
|-----------------|-----------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|--|
| SPI_CSB | 16 | CMOS input with weak internal pull-up | Chip select for serial peripheral interface, active low | |
| SPI_CLK | 19 | CMOS input with weak internal pull-down | Serial peripheral interface clock | |
| SPI_MISO | 18 | CMOS input with weak internal pull-down | Serial peripheral interface data Output | |
| USB_- | 15 | Bi-Directional | | |

| | | | | |
|----------|----|----------------|-----------------------------|--|
| USB_+ | 20 | Bi-Directional | | |
| NC | 14 | | | |
| PCM_CLK | 5 | Bi-Directional | Synchronous PCM data clock | |
| PCM_OUT | 6 | CMOS output | Synchronous PCM data output | |
| PCM_IN | 7 | CMOS Input | Synchronous PCM data input | |
| PCM_SYNC | 8 | Bi-Directional | Synchronous PCM data strobe | |

AT command Default:

How to set the mode to server (master):

1. Connect PIO11 to high level.
2. Power on, module into command state.
3. Using baud rate 38400, sent the "AT+ROLE=1\r\n" to module, with "OK\r\n" means setting successes.
4. Connect the PIO11 to low level, repower the module, the module work as server (master).

AT commands: (all end with \r\n)

1. Test command:

| Command | Respond | Parameter |
|---------|---------|-----------|
| AT | OK | - |

2. Reset

| Command | Respond | Parameter |
|----------|---------|-----------|
| AT+RESET | OK | - |

3. Get firmware version

| Command | Respond | Parameter |
|-------------|------------------------|--------------------------|
| AT+VERSION? | +VERSION:<Param> OK | Param : firmware version |

Example:

```
AT+VERSION?\r\n
```

```
+VERSION:2.0-20100601
```

```
OK
```

1. Restore default

| Command | Respond | Parameter |
|---------|---------|-----------|
| AT+ORGL | OK | - |

Default state:

Slave mode, pin code :1234, device name: H-C-2010-06-01 ,Baud 38400bits/s.

2. Get module address

| Command | Respond | Parameter |
|----------|---------------------|------------------------------------|
| AT+ADDR? | +ADDR:<Param> OK | Param: address of Bluetooth module |

Bluetooth address: NAP: UAP : LAP

Example:

AT+ADDR?\r\n

+ADDR:1234:56:abcdef

OK

3. Set/Check module name:

| Command | Respond | Parameter |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|
| AT+NAME=<Param> | OK | Param: Bluetooth module name (Default :HC-05) |
| AT+NAME? | +NAME:<Param> OK (/FAIL) | |

Example:

AT+NAME=HC-05\r\n setthetmodule nameto "HC-05"

OK

AT+NAME=ITeadStudio\r\n

OK

AT+NAME?\r\n

+NAME: ITeadStudio

OK

4. Get the Bluetooth device name:

| Command | Respond | Parameter |
|-------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------|
| AT+RNAME?<Param1> | 1. +NAME:<Param2> OK 2. FAIL | Param1,Param 2 : the address of Bluetooth device |

Example: (Device address 00:02:72:od:22:24, name : ITead)

AT+RNAME? 0002, 72, od2224\r\n

+RNAME:ITead

OK

5. Set/Check module mode:

| Command | Respond | Parameter |
|-----------------|---------------|--------------------|
| AT+ROLE=<Param> | OK | Param: 0- Slave |
| AT+ROLE? | +ROLE:<Param> | |

| | | |
|--|----|----------------------------|
| | OK | 1- Master 2- Slave-Loop |
|--|----|----------------------------|

1. Set/Check device class

| Command | Respond | Parameter |
|------------------|------------------------------------|---------------------|
| AT+CLASS=<Param> | OK | Param: Device Class |
| AT+ CLASS? | 1. +CLASS:<Param> OK 2. FAIL | |

2. Set/Check GIAC (General Inquire Access Code)

| Command | Respond | Parameter |
|----------------|--------------------|-----------------------------------|
| AT+IAC=<Param> | 1.OK 2. FAIL | Param: GIAC (Default : 9e8b33) |
| AT+IAC | +IAC:<Param> OK | |

Example:

```
AT+IAC=9e8b3f\r\n
OK
AT+IAC?\r\n
+IAC: 9e8b3f
OK
```

3. Set/Check -- Query access patterns

| Command | Respond | Parameter |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AT+INQM=<Param>,<Param2>,<Param3> | 1.OK 2. FAIL | Param: 0——inquiry_mode_standard 1——inquiry_mode_rssi Param2: Maximum number of Bluetooth devices to respond to Param3: Timeout (1-48 : 1.28s to 61.44s) |
| AT+ INQM? | +INQM : <Param>,<Param2>,<Param3> OK | |

Example:

```
AT+INQM=1,9,48\r\n
OK
AT+INQM\r\n
+INQM:1, 9, 48
OK
```

1. Set/Check PIN code:

| Command | Respond | Parameter |
|-----------------|-----------------------|-----------------------------------|
| AT+PSWD=<Param> | OK | Param: PIN code (Default 1234) |
| AT+ PSWD? | +PSWD : <Param> OK | |

2. Set/Check serial parameter:

| Command | Respond | Parameter |
|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|
| AT+UART=<Param>,<Param2>,<Param3> | OK | Param1: Baud Param2: Stop bit Param3: Parity |
| AT+ UART? | +UART=<Param>,<Param2>,<Param3> OK | |

Example:

```
AT+UART=115200, 1,2,\r\n
OK
AT+UART?
+UART:115200,1,2
OK
```

3. Set/Check connect mode:

| Command | Respond | Parameter |
|------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| AT+CMODE=<Param> | OK | Param: 0 - connect fixed address 1 - connect any address 2 - slave-Loop |
| AT+ CMODE? | +CMODE:<Param> OK | |

4. Set/Check fixed address:

| Command | Respond | Parameter |
|-----------------|----------------------|--------------------------------------------------------|
| AT+BIND=<Param> | OK | Param: Fixed address (Default 00:00:00:00:00:00) |
| AT+ BIND? | + BIND:<Param> OK | |

```
Example: AT+BIND=1234,
56, abcdef\r\n OK
AT+BIND?\r\n
+BIND:1234:56:abcdef
OK
```

5. Set/Check LED I/O

| Command | Respond | Parameter |
|----------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------|
| AT+POLAR=<Param1>,<Param2> | OK | Param1: 0- PIO8 low drive LED 1- PIO8 high drive LED |
| AT+ POLAR? | + POLAR=<Param1>,<Param2> OK | |

| | | |
|--|--|------------------------------------------------------------|
| | | Param2: 0- PIO9 low drive LED 1- PIO9 high drive LED |
|--|--|------------------------------------------------------------|

1. Set PIO output

| Command | Respond | Parameter |
|--------------------------|---------|--------------------------------------------------------------|
| AT+PIO=<Param1>,<Param2> | OK | Param1: PIO number Param2: PIO level 0- low 1- high |

Example:

```
1. PIO10 output high level
AT+PIO=10, 1\r\n
OK
```

18. Set/Check – scanparameter

| Command | Respond | Parameter |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| AT+IPSCAN=<Param1>,<Param2>,<Param3>,<Param4> | OK | Param1: Query time interval |
| AT+IPSCAN? | +IPSCAN:<Param1>,<Param2>,<Param3>,<Param4> OK | Param2 : Query duration Param3 : Paging interval Param4 : Call duration |

Example:

```
AT+IPSCAN =1234,500,1200,250\r\n
OK
AT+IPSCAN?
+IPSCAN:1234,500,1200,250
```

19. Set/Check – SHIFF parameter

| Command | Respond | Parameter |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------|
| AT+SNIFF=<Param1>,<Param2>,<Param3>,<Param4> | OK | Param1: Max time Param2: Min time |
| AT+ SNIFF? | +SNIFF:<Param1>,<Param2>,<Param3>,<Param4> OK | Param3: Retry time Param4: Time out |

20. Set/Check security mode

| Command | Respond | Parameter |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| AT+SENM=<Param1>,<Param2> | 1. OK 2. FAIL | Param1: 0— sec_mode0+off |
| AT+ SENM? | + SENM:<Param1>,<Param2> | 1—sec_mode1+non_se |

| | | |
|--|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | OK | cure 2— sec_mode2_service 3— —sec_mode3_link 4— —sec_mode_unknow n Param2: 0— hci_enc_mode_off 1— hci_enc_mode_pt_t o_pt 2—hci_enc_mode_pt_t o_pt_and_bcast |
|--|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

18. Delete Authenticated Device

| Command | Respond | Parameter |
|------------------|---------|-------------------------------------------|
| AT+PMSAD=<Param> | OK | Param: Authenticated Device Address |

Example:

AT+PMSAD =1234,56,abcdef\r\n

OK

19. Delete All Authenticated Device

| Command | Respond | Parameter |
|-----------|---------|-----------|
| AT+ RMAAD | OK | - |

20. Search Authenticated Device

| Command | Respond | Parameter |
|-----------------|------------------|-----------------------|
| AT+FSAD=<Param> | 1. OK 2. FAIL | Param: Device address |

21. Get Authenticated Device Count

| Command | Respond | Parameter |
|----------|-----------------------|---------------------|
| AT+ADCN? | +ADCN : <Param> OK | Param: Device Count |

22. Most Recently Used Authenticated Device

| Command | Respond | Parameter |
|----------|------------------------|----------------------------------------------------|
| AT+MRAD? | + MRAD : <Param> OK | Param: Recently Authenticated Device Address |

23. Get the module working state

| Command | Respond | Parameter |
|---------|---------|-----------|
|---------|---------|-----------|

| | | |
|------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AT+ STATE? | + STATE : <Param> OK | Param: "INITIALIZED" "READY" "PAIRABLE" "PAIRED" "INQUIRING" "CONNECTING" "CONNECTED" "DISCONNECTED" "NUKNOW" |
|------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

18. Initialize the SPP profile lib

| Command | Respond | Parameter |
|---------|------------------|-----------|
| AT+INIT | 1. OK 2. FAIL | - |

19. Inquiry Bluetooth Device

| Command | Respond | Parameter |
|---------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| AT+INQ | +INQ: <Param1>, <Param2>, <Param3> ... OK | Param1 : Address Param2 : Device Class Param3 : RSSI Signal strength |

Example:

```
AT+INIT\r\n
OK
AT+IAC=9e8b33\r\n
OK
AT+CLASS=0\r\n
AT+INQM=1,9,48\r\n
At+INQ\r\n
+INQ:2:72:D2224,3E0104,FFBC
+INQ:1234:56:0,1F1F,FFC1
+INQ:1234:56:0,1F1F,FFC0
+INQ:1234:56:0,1F1F,FFC1
+INQ:2:72:D2224,3F0104,FFAD
+INQ:1234:56:0,1F1F,FFBE
+INQ:1234:56:0,1F1F,FFC2
+INQ:1234:56:0,1F1F,FFBE
+INQ:2:72:D2224,3F0104,FFBC
OK
```

28. Cancel Inquiring Bluetooth Device

| Command | Respond | Parameter |
|----------|---------|-----------|
| AT+ INQC | OK | - |

28. Equipment Matching

| Command | Respond | Parameter |
|---------------------------|------------------|----------------------------------------------|
| AT+PAIR=<Param1>,<Param2> | 1. OK 2. FAIL | Param1 : Device Address Param2 : Time out |

29. Connect Device

| Command | Respond | Parameter |
|-----------------|------------------|------------------------|
| AT+LINK=<Param> | 1. OK 2. FAIL | Param : Device Address |

Example:

AT+FSAD=1234,56,abcdef\r\n

OK

AT+LINK=1234,56,abcdef\r\n

OK

30. Disconnect

| Command | Respond | Parameter |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| AT+DISC | 1. +DISC:SUCCESS OK 2. +DISC:LINK_LOSS OK 3. +DISC:NO_SLC OK 4. +DISC:TIMEOUT OK 5. +DISC:ERROR OK | Param : Device Address |

31. Energy-saving mode

| Command | Respond | Parameter |
|--------------------|---------|------------------------|
| AT+ENSNIFF=<Param> | OK | Param : Device Address |

32. Exerts Energy-saving mode

| Command | Respond | Parameter |
|----------------------|---------|------------------------|
| AT+ EXSNIFF =<Param> | OK | Param : Device Address |

Revision History

| Rev. | Description | Release date |
|------|-----------------|--------------|
| v1.0 | Initial version | 7/18/2010 |
| | | |
| | | |