



PROJETO DE GRADUAÇÃO

SISTEMA DE CONEXÃO DE ROBÔ MODULAR

Por,
Francis Cosme de Farias
Jéssica Gouget Sérgio Miranda

Brasília, 31 de Março de 2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

SISTEMA DE CONEXÃO DE ROBÔ MODULAR

POR,

Francis Cosme de Farias
Jéssica Gouget Sérgio Miranda

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Dianne Magalhães Viana (Orientador)

Prof. Carla Koike, UnB/ CIC

Prof. Guilherme Caribe de Carvalho, UnB/ ENM

Brasília, 31 de Março de 2011

Agradecimentos

Agradeço aos coleguinhas, à minha família, ao Grupo Ereko e aos técnicos do SG-9 por todo suporte no desenvolvimento do projeto.

Francis Cosme de Farias

Agradeço à minha família por confiar em mim até o final. A UnB, por todos os momentos ali vividos e especialmente pelos amigos feitos durante o curso, que diretamente ou indiretamente fizeram parte da conclusão dessa etapa, me dando ânimo quando tudo parecia sem solução.

Ao Noé e Miguel que sempre se dispunham a nos ajudar. Ao Francis, por ainda permanecermos amigos depois de tanto tempo juntos. A quem surgiu na metade do curso e mudou tudo pra melhor. E a quem surgiu no início do curso e inesperadamente ainda permanece presente, pelo amor e carinho essenciais.

Jéssica Gouget Sérgio Miranda

RESUMO

Este projeto trata do desenvolvimento e construção de um mecanismo de conexão e desconexão mecânica para o robô modular autorreconfigurável ErekoBot. O sistema pretende apresentar robustez, baixo custo e simplicidade. Seu grande diferencial em relação aos demais concorrentes é o fato de não ser hermafrodita ou baseado na lógica macho-fêmea, mas ser um sistema “transgênero”, não necessitando de uma orientação de posicionamento entre as faces a serem conectadas. Devido a isso, os módulos devem apenas preencher os requisitos de distância e angulação entre eles para possibilitar a conexão. O modelo proposto foi validado por meio da construção e análise de dois protótipos diferentes.

ABSTRACT

The project deals with the development and construction of a mechanism for mechanically connecting and disconnecting for the self-reconfigurable modular robot ErekoBot. The system aims to provide robustness, low cost and simplicity. Its great advantage over the other competitors is the fact that is not hermaphrodite or based on logic male and female, being a transgendered system, not requiring an orientation for positioning between the faces to be connected. Because of this, modules must only meet the requirements of distance and angle between them to enable the connection. The proposed model was validated by the construction and analysis of two different prototypes.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	2
2 ROBÔS MODULARES	3
2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS ROBÔS MODULARES	4
2.2 ELEMENTOS CONSTITUINTES	6
2.2.1 Motores de Passo	6
2.2.2 Servomotores	7
2.3 MODELOS MOTIVADORES E SUAS CONEXÕES	8
2.3.1 M-Tran (1998)	9
2.3.2 PolyBot (1998)	11
2.3.3 CKBot (2005)	13
2.3.4 SuperBot (2005)	15
2.3.5 YaMoR (2005)	17
2.3.6 ErekoBot (2009)	18
2.4 ANÁLISE DAS CONEXÕES EXISTENTES	19
3 SISTEMA DE CONEXÃO PROPOSTO	22
3.1 MECANISMO 1	22
3.2 MECANISMO 2	23
3.2.1 Face	25
3.2.2 Abas	25
3.2.3 Mecanismo de haste	26
3.2.4 Cruzeta	27
3.3 MECANISMO 3	27
3.3.1 Face	28
3.3.2 Abas	28
3.3.3 Mecanismo de haste	28
3.3.4 Cruzeta	29
3.4 ANÁLISE DO MECANISMO 3	30
3.4.2 Estimativa de folgas	35
3.4.3 Cálculo dos esforços em cada componente	36
3.5 MOTOR	37
4 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	39
4.1 PLÁSTICO ABS	39
4.2 AJUSTES NA CONSTRUÇÃO	40
4.3 MONTAGEM	41
4.4 TESTES E ANÁLISE DE RESULTADOS	43
4.4.1 Ensaio de funcionamento	43
4.4.2 Ensaio de erro de posicionamento inicial	44
4.4.3 Ensaio de resistência mecânica dos componentes	45
5 CONSTRUÇÃO DO SEGUNDO PROTÓTIPO	49
5.1 CONSTRUÇÃO	49
5.2 AJUSTES NA CONSTRUÇÃO	51
5.3 MONTAGEM	51
5.4 MOTOR	53
5.5 ENSAIO DE FUNCIONAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS	54
6 PROPOSTA DO PRODUTO FINAL	56
6.1 GEOMETRIA DAS PEÇAS	56
6.2 TOLERÂNCIA DAS PEÇAS	57
6.3 MOTOR	58
6.4 MATERIAIS POSSÍVEIS	58
6.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE FABRICAÇÃO	58
7 CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXOS	63

LISTA DE FIGURAS

2.1	Um servo desmontado	7
2.2	Esquema de funcionamento do servomotor	8
2.3	Nova conexão M-Tran III	9
2.4	Gancho de conexão M-Tran III	10
2.5	Esquema do Módulo M-TRAN III	10
2.6	Algumas das formas possíveis para o M-Tran III.....	11
2.7	Robô PolyBot, destaque para seus grandes motores.....	12
2.8	Detalhe do sistema de conexão do PolyBot	13
2.9	Placas magnéticas	14
2.10	Módulo CKBot e montagem de 15 módulos que formam um robô autorreconfigurável.....	14
2.11	Módulo do Superbot	15
2.12	Diversas Morfologias do Superbot	16
2.13	Sistema de conexão SuperBot	16
2.14	Módulo YaMoR.....	17
2.15	Configuração quadrúpede YaMoR	17
2.16	Módulos ErekoBot β -5 (a) conectados em série; (b) detalhe de um módulo.....	18
3.1	Vista isométrica do primeiro mecanismo proposto.....	23
3.2	Processo completo de movimentação das abas e hastes	23
3.3	Vista isométrica do sistema proposto, com face transparente	24
3.4	Posição inicial da face (estendida), com vistas externa e interna	24
3.5	Posição 2 da conexão com vistas externa e interna	25
3.6	Posição 4 da conexão	25
3.7	Aba.....	26
3.8	Haste	26
3.9	Suporte da aba.....	27
3.10	Cruzeta	27
3.11	Vista isométrica do novo sistema proposto com face transparente	27
3.12	Vista isométrica da face redimensionada	28
3.13	Vista isométrica da nova haste	29
3.14	Vista isométrica do novo suporte da aba.....	29
3.15	Vista isométrica da nova cruzeta	29
3.16	Esquemático do mecanismo biela-manivela.....	30
3.17	Representação do ângulo μ	31
3.18	Mecanismo proposto com sistema biela-manivela em destaque	31
3.19	Mecanismo expandido	32
3.20	Mecanismo completo em posição de rotação máxima dos componentes.....	32
3.21	Diagrama de corpo livre do bloco deslizante.....	33
3.22	Diagrama de corpo livre do bloco.....	35
3.23	Diagrama de corpo livre da aba	36
3.24	Diagrama de corpo livre do suporte da aba	36
3.25	Diagrama de corpo livre da haste	36
3.26	Diagrama de corpo livre da cruzeta.....	37
3.27	Ilustração para o cálculo da requisição do torque do motor	37
3.28	Motor	38
4.1	Máquina "Cupcake CNC" utilizada na fabricação do protótipo.....	39
4.2	Peças fabricadas em plástico ABS	41
4.3	Primeiro passo da montagem	41
4.4	Segundo passo da montagem	42
4.5	Terceiro passo da montagem	42
4.6	Último passo da montagem.....	43
4.7	Vista isométrica e esquerda das faces	44

4.8	Vista lateral e frontal das faces transladadas	45
4.9	Foto e desenho do ensaio vertical de resistência	46
4.10	Vista isométrica e esquerda de dois módulos conectados	46
4.11	Fotos ilustrativas do ensaio de balanço	46
4.12	Diagrama de corpo livre, conexão suportando dois módulos em balanço	47
4.13	Diagrama de momento fletor, conexão suportando dois módulos em balanço	47
4.14	Diagrama de corpo livre, situação de teste	47
4.15	Diagrama de momento fletor, situação de teste	47
5.1	Fresadora Universal WMW FUW 315 x 800/1	49
5.2	Furadeira de Coluna Motomil FC-250	49
5.3	Guias fabricadas em blocos de alumínio	50
5.4	Foto da face com rasgos e guias posicionadas	50
5.5	Blocos antes e depois de fresados	50
5.6	Cruzeta, hastes e abas construídas em plástico ABS	51
5.7	Primeiro passo da montagem – Vistas isométrica, superior e inferior	52
5.8	Segundo passo da montagem – Detalhe da montagem com a face suprimida	52
5.9	Último passo da montagem - Vistas isométrica, superior e inferior	52
5.10	Mecanismo montado, sem o motor	53
5.11	Motor selecionado	53
5.12	Motor acoplado à cruzeta	54
5.13	Motor fixado à face	54
5.14	Faces em posição de conexão com motor ligado à fonte de energia	54
6.1	Proposta final de face, cruzeta e haste	56
6.2	Proposta final de aba	56
6.3	Proposta final de suporte da aba	57
6.4	Qualidades de Trabalho	57

LISTA DE TABELAS

2.1	Especificações do M-Tran III	11
2.2	Especificações do PolyBot	13
2.3	Especificações do CKBot	15
2.4	Especificações do SuperBot.....	16
2.5	Especificações do YaMoR	18
2.6	Especificações do ErekoBot β -5	19
5.1	Distanciamento máximo entre faces para conexão em milímetros.....	44
5.2	Translação do alinhamentos das faces em milímetros.....	45

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

f	Folgas	[mm]
L	Comprimentos	[mm]
F	Força	[N]
m	Massa	[kg]
g	Gravidade	[m/s ²]
r	Raio	[mm]

Símbolos Gregos

ρ	Razão entre comprimento da biela e comprimento da manivela	
θ	Ângulo de operação do sistema biela-manivela	[°]
μ	Ângulo de transmissão	[°]
α	Ângulo de inclinação do plano	[°]

Subscritos

<i>máx</i>	máximo
<i>mín</i>	mínimo
<i>est</i>	estático
<i>at</i>	atrito

1 INTRODUÇÃO

Um robô modular pode ser definido como um sistema robótico construído a partir de um conjunto de componentes padronizados (ou de montagem por módulos). Robôs modulares são interessantes porque permitem a construção de uma grande variedade de robôs especializados a partir de conjuntos de componentes padronizados.

Na década de 90, trabalhos mostram que os esforços de investigação no campo da robótica modular eram mais direcionados para obtenção de versatilidade e adaptabilidade dos sistemas. Nos últimos anos, as pesquisas tem sido direcionadas no sentido de possibilitar a “autorreconfiguração” destes sistemas.

Robôs modulares “autorreconfiguráveis” podem, de forma autônoma, alterar sua configuração e, deste modo, ter a capacidade de executar uma ampla gama de tarefas em ambiente desconhecido. Em situações como em uma construção que tenha sido danificada por um desmoronamento ou terremoto, há dificuldade de acesso por parte das equipes de resgate e a preocupação com a segurança. Diversos obstáculos podem impedir a ação de equipamentos e até mesmo de robôs de resgate de configuração fixa. Já um robô reconfigurável, com a capacidade de se locomover sobre uma variedade de terrenos, através de aberturas e outros obstáculos, pode executar bem uma tarefa nesta situação.

A adaptabilidade, possível em um robô modular, permite que este atravesse passagens estreitas numa configuração na forma de cobra, altere a sua forma e passe a uma configuração com pernas que permite andar sobre escombros ou mesmo subir escadas. Robôs modulares podem também ser úteis na manutenção de estruturas de difícil acesso como em pontes. Outra aplicação possível é a exploração espacial, onde terrenos imprevisíveis podem ser explorados.

A robótica modular é uma área da tecnologia ainda com pouco desenvolvimento e grande perspectiva de evolução. Depende de diversas soluções nas áreas de computação, elétrica e mecânica para possibilitar melhor nível de operação, confiabilidade, e baixo custo. Um dos desafios de desenvolvimento na área da robótica modular consiste na concepção e projeto de sistemas de conexão e desconexão entre os módulos, além do custo e tamanho do sistema.

Observa-se que no estágio atual de desenvolvimento dos sistemas de robôs modulares há alguns sistemas complexos, com materiais de alta tecnologia, que permitem a reconfiguração autônoma. No entanto, muitos modelos utilizam conexões que não permitem a “autorreconfiguração” dos módulos, como parafusos ou velcro, enquanto outros, apesar de “autorreconfiguráveis”, limitam as possibilidades de encaixe ou necessitam de uma orientação específica para que tal ação se verifique.

O presente trabalho vem contribuir com as pesquisas em robótica modular por meio do estudo e concepção de um sistema de conexão e desconexão apropriado para o protótipo Erekobot, sistema robótico ainda em fase de desenvolvimento pelo grupo EREKO, da Universidade de Brasília.

Características como dimensões reduzidas, robustez, simplicidade e baixo custo foram levadas em consideração. No entanto, o que diferencia o sistema proposto neste trabalho dos demais sistemas existentes é fato deste ser do tipo “transgênero”, que reúne as características favoráveis dos sistemas hermafrodita e macho-fêmea. O sistema possibilitará a “autorreconfiguração” dos módulos, os quais possuirão todas as faces de conexão idênticas, além de permitir a conexão com erro de posicionamento inicial.

O presente trabalho também se insere em uma nova linha de pesquisa, robótica modular, que envolve várias áreas de conhecimento, engenharia mecânica, elétrica, redes e sistemas de comunicação, computação e se inicia com um projeto de pesquisa junto ao Corpo de Bombeiros do Distrito Federal tendo em vista o desenvolvimento de um protótipo de robô de resgate “reconfigurável”.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar e conceber um sistema de conexão e desconexão apropriado para o modelo de robô modular Erekebot tendo em vista a futura reconfiguração deste modelo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar as principais formas de conexão entre robôs modulares reconfiguráveis e suas características.
- Conceber um sistema de conexão e desconexão “transgênero”.
- Desenvolver um protótipo do sistema.
- Testar e avaliar a aplicabilidade e desempenho do sistema.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este relatório está organizado da seguinte forma: no capítulo 2, são descritas as características e classificações de robôs modulares, acionadores elétricos, modelos motivadores e suas conexões e, em particular, o modelo a ser utilizado como base para o desenvolvimento do sistema, o ErekeBot. Além disso é também apresentada uma breve análise desses modelos. No capítulo 3 é descrito o sistema proposto e realizada a análise dos elementos. No capítulo 4 são apresentadas e descritas as fases de construção, os testes realizados e a análise dos resultados do primeiro protótipo. Os mesmos tópicos são apresentados para o segundo protótipo no capítulo 5. O capítulo 6 apresenta a proposta de modelo final do mecanismo e por fim são apresentadas as conclusões no capítulo 7.

2 ROBÔS MODULARES

Um robô pode ser um sistema muito eficiente, mas difícil de ser construído. É necessário construir uma parte mecânica, outra eletrônica, prover energia elétrica, mas, principalmente, dotá-lo de um software que o leve a desempenhar a tarefa esperada. Isso faz com que os robôs em geral sejam projetados para operações específicas.

A sua limitação de operação é tamanha que eles geralmente são desenvolvidos para a realização de uma tarefa única, simples e em ambientes selecionados. Esta claramente não é a melhor situação de solução, uma vez que a maior parte dos trabalhos a serem realizados requer um grande número de atividades distintas, o que demandaria um grande número de robôs ou um robô extremamente complexo.

A robótica modular possibilita uma solução para o problema de especificidade dos robôs de configuração fixa. De uma forma geral, um robô modular pode ser definido como um sistema robótico constituído por componentes básicos e independentes – módulos idênticos ou não, que se conectam por meio manual ou automático visando compor sistemas com configurações e funções diversas.

Segundo Yim (Yim, M. et al., 2007) as três motivações decisivas para o desenvolvimento de sistemas de robôs modulares autorreconfiguráveis são:

Versatilidade

A habilidade de reconfiguração possibilita a reorganização do robô para as morfologias mais adequadas para cada ambiente ou tarefa específica solicitada, tornando-os sistemas muito mais adaptáveis do que os robôs convencionais.

Robustez

Uma vez que o sistema modular pode ser composto por vários módulos idênticos, a substituição de peças danificadas ou realocação de partes do robô, no mesmo robô ou até entre robôs, torna-se mais fácil. Esse fato leva à condição de autorreparação do sistema modular, tendo a capacidade de substituição de peças automaticamente, diminuindo a dependência do sistema à intervenção humana.

Baixo custo

Sistemas modulares podem ter o custo de produção reduzido, uma vez que é composto por peças (módulos) idênticas, que podem ser produzidas em massa, o que tende a favorecer o projeto economicamente.

Ainda, segundo Yim (Yim, M. et al., 2007), essas três vantagens ainda não foram plenamente realizadas pois a adição de graus de liberdade em função dos módulos conectados fazem robôs modulares mais versáteis em suas capacidades potenciais, mas também incorrem em um aumento das complexidades mecânicas e computacionais. Por conseguinte, um robô modular é susceptível de ser

inferior em desempenho a qualquer robô construído para executar uma tarefa específica. A vantagem da robótica modular, como já indicado, passa a ser evidente quando se consideram várias tarefas que requerem normalmente um conjunto de diferentes robôs de morfologia fixa, ou quando a natureza das tarefas não pode ser completamente determinada antes dos robôs serem implantados.

Um sistema modular seria, portanto, melhor indicado para missões no qual o robô precisa adaptar-se morfológicamente a um ambiente suscetível a mudanças não previstas, com múltiplas funcionalidades para completar diferentes tarefas e independente de intervenção humana (Souza et al., 2010).

O módulo, como já mencionado, é o componente básico do sistema. Em geral é constituído de carenagem, atuadores, mecanismos especializados como ganchos, ímãs, rodas, câmeras, carga paga e módulos energéticos ou processadores. Cada módulo possui interfaces de conexão que permitem transmitir forças mecânicas, momentos, dados e energia elétrica para outros módulos.

A conexão dos módulos é um dos desafios nos sistemas autorreconfiguráveis, pois, além das limitações de tamanho e de energia, deve também permitir associações em várias posições. Na maior parte das aplicações, sistemas de conexão baseados em componentes mecânicos são mais robustos que os baseados em ímãs, porém, estes apresentam a desvantagem, entre todos os modelos já construídos, de necessitarem de posicionamento específico entre as faces.

Neste capítulo está apresentada a descrição de cinco modelos motivadores e suas conexões, bem como a análise destas. Porém, antes, para melhor compreensão dos sistemas de robôs modulares, serão levantados aspectos da classificação destes e de seus elementos constituintes.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS ROBÔS MODULARES

A classificação dos robôs modulares é feita de acordo com três principais características: o arranjo geométrico de seus módulos, os tipos de módulos e o processo de controle da sua morfologia.

Quanto ao arranjo geométrico de seus módulos, os robôs podem ser das seguintes categorias (Yim et al, 2007):

Arquitetura Chain

É caracterizada como sistemas de unidades modulares conectadas em série, como uma corda ou corrente, que podem eventualmente dobrar-se para diminuir de tamanho.

Como vantagem, um robô dessa arquitetura pode atingir qualquer ponto no espaço, através das articulações dos módulos, sendo limitado somente pelo tamanho do módulo. Possui maior versatilidade e menor complexidade de construção, porém a parte computacional e o controle da estrutura são mais complexos, uma vez que esses módulos são comumente alocados em um ponto arbitrário do espaço, tornando o processo de coordenação da reconfiguração mais difícil.

Arquitetura Lattice

Em contraste com a Arquitetura Chain, onde os módulos são livres para se mover no espaço contínuo, a estrutura Lattice é baseada no arranjo regular dos módulos em matrizes bi ou tridimensionais, tendo como vantagem a simplificação no processo de reconfiguração, uma vez que os módulos se deslocam apenas para posições vizinhas e esse deslocamento pode ser feito com a malha aberta.

Modelo Híbrido

No modelo híbrido os módulos quando conectados podem assumir a configuração *lattice* ou *chain*.

Quanto à maneira pela qual os módulos se movimentam para alterar a morfologia do robô, os sistemas modulares são classificados como:

Robôs de Reconfiguração Determinística

Os robôs de reconfiguração determinística são manipulados durante a reconfiguração para uma posição alvo conhecida no sistema, ainda que a trajetória não seja pré-determinada. A posição de cada unidade é conhecida durante qualquer momento da reconfiguração e pode ser descoberta e calculada durante o processo. O tempo de reconfiguração do sistema é determinado. Para esse tipo de reconfiguração, é essencial o controle em malha fechada.

Robôs de Reconfiguração Estocástica

Os robôs de reconfiguração estocástica são sistemas nos quais os módulos se locomovem de maneira estocástica, como no movimento browniano. A posição dos módulos é desconhecida durante o processo de reconfiguração e só passa a ser conhecida quando o módulo é conectado a estrutura principal da nova morfologia. O tempo de reconfiguração só pode ser determinado estatisticamente. Esse tipo de reconfiguração favorece sistemas de menor escala. O ambiente normalmente fornece a energia necessária para transportar os módulos pelo sistema, fazendo com que o módulo apenas necessite do atuador de ligação.

Quanto aos tipos de módulos, os robôs são classificados como:

Tipo Homogêneo

Possuem módulos idênticos em geometria, eletrônica, comunicação e funcionalidade.

Tipo Heterogêneo.

Possuem mais de um tipo de módulo. Cada módulo pode ser caracterizado como módulo específico, e possuem uma funcionalidade que poderá beneficiar o sistema completo durante a execução de uma tarefa.

2.2 ELEMENTOS CONSTITUINTES

Como citado anteriormente, cada módulo do sistema de um robô modular possui um atuador elétrico embarcado em seu interior. Geralmente, robôs de tamanho pequeno a médio utilizam acionadores elétricos. Os acionadores elétricos mais comuns em uso nos robôs são: motor de corrente contínua ou DC, servo-motor e motor de passo. Esses tipos de acionadores não propiciam muita velocidade ou potência, quando comparados com acionadores hidráulicos, porém atingem maior precisão. Em geral são dotados de redutores para reduzir a velocidade e aumentar o torque.

Motores elétricos lineares não são utilizados, pois produzem forças de pequena intensidade. O custo do acionamento elétrico cresce com o torque necessário para acionar o braço mecânico, já o tamanho do motor é praticamente proporcional ao conjugado produzido. O custo de acionadores hidráulicos cresce também com a demanda de torque, porém de forma mais lenta, já que tais motores tendem a ser mais compactos. Adicionalmente o custo dos equipamentos de condicionamento e controle do fluido hidráulico é alto e pouco influenciado pela escala. Isto indica que o acionamento elétrico é mais vantajoso economicamente em braços de pequeno e médio porte, ao passo que o acionamento hidráulico é melhor quando se trata de gerar grandes potências e cargas.

A seguir é realizada a descrição dos acionadores elétricos.

2.2.1 Motores de Passo

Os motores de passo são dispositivos eletro-mecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos que geram variações angulares discretas. O rotor ou eixo de um motor de passo é rotacionado em pequenos incrementos angulares, denominados “passos”, quando pulsos elétricos são aplicados em uma determinada seqüência nos terminais deste.

A rotação de tais motores é diretamente relacionada aos impulsos elétricos que são recebidos, bem como a seqüência a qual tais pulsos são aplicados reflete diretamente na direção a qual o motor gira. A velocidade que o rotor gira é dada pela freqüência de pulsos recebidos e o tamanho do ângulo rotacionado é diretamente relacionado com o número de pulsos aplicados.

Motores de passo são uma boa escolha quando movimentos precisos são necessários. Seu ponto forte não é a sua força (torque), nem sua capacidade de desenvolver altas velocidades, mas sim a possibilidade de controlar fatores como: ângulo de rotação, velocidade, posição e sincronismo.

Seu funcionamento é dado pelo uso de solenóides alinhados dois a dois que quando energizados atraem o rotor fazendo-o se alinhar com o eixo determinado pelos solenóides, causando assim uma pequena variação de ângulo chamado de passo.

A velocidade e o sentido do movimento são determinados pela forma como cada solenóide é ativado – sua ordem e a velocidade entre cada ativação.

O número de passos é dado pelo número de alinhamentos possíveis entre o rotor e as bobinas. Ou seja, para aumentar o número de passos de um motor usa-se um maior número de bobinas, maior número de pólos no rotor (para isso usa-se uma roda dentada).

2.2.2 Servomotores

O servomotor é uma máquina síncrona composta por uma parte fixa (estator) e outra móvel (rotor). O estator é bobinado como no motor elétrico convencional, porém, apesar de utilizar alimentação trifásica, não pode ser ligado diretamente à rede, pois utiliza uma bobinagem especialmente confeccionada para proporcionar alta dinâmica ao sistema. O rotor é composto por ímãs permanentes dispostos linearmente e um gerador de sinais (resolver) instalado para fornecer sinais de velocidade e posição.

Utilizando a tecnologia de ímãs permanentes, os servomotores podem proporcionar precisão e controle de velocidade e posição, sem contar na grande vantagem de ser possível controlar o torque no eixo, de forma constante e em larga faixa de rotação, além de possuir alta capacidade de sobrecarga.

O Servo é um pequeno dispositivo que possui um eixo de saída. Esse eixo pode ser posicionado numa posição angular específica, enviando um sinal codificado ao servo. Enquanto existir um sinal na linha de entrada, o servo irá manter a posição angular do eixo. Quando o sinal mudar, a posição angular do eixo também mudará.

Motores servos são extremamente úteis na robótica por serem pequenos, como visto na figura, terem o circuito de controle embarcado e extremamente poderosos para o seu tamanho. Eles desenvolvem uma potência mecânica proporcional ao carregamento mecânico da operação. Um servo de carga leve, portanto, não consome muita energia.

A Figura (2.1) mostra um motor servo desmontado.



Figura 2.1 - Um servo desmontado (Carrara, 2007)

Um servo normal é usado para controlar um movimento angular entre 0 e 180 graus. Além disso, é mecanicamente incapaz de se movimentar além desses limites devido a uma parada mecânica construída sobre a engrenagem de saída principal.

A quantidade de energia aplicada ao motor é proporcional à distância que esse precisa percorrer. Logo, se o eixo precisa se movimentar por uma longa distância, o motor funciona em sua velocidade máxima. Se o mesmo precisa deslocar apenas uma distância pequena, o motor funcionará com uma velocidade menor. Isso é chamado de controle proporcional.

O ângulo que o servo deve mover-se é determinado pela duração do pulso aplicado ao fio de controle. Se o motor espera receber um pulso a cada 20 milissegundos (0.02 segundos), um pulso de 1.5 milissegundos, por exemplo, fará o motor girar até a posição de 90° (geralmente chamada de posição neutra). Se o pulso for mais curto que 1.5 milissegundos, o motor irá girar o eixo até uma posição perto de 0°. Se o pulso for mais longo que 1.5ms, o eixo ficará perto da posição de 180° (Fig. 2.2).

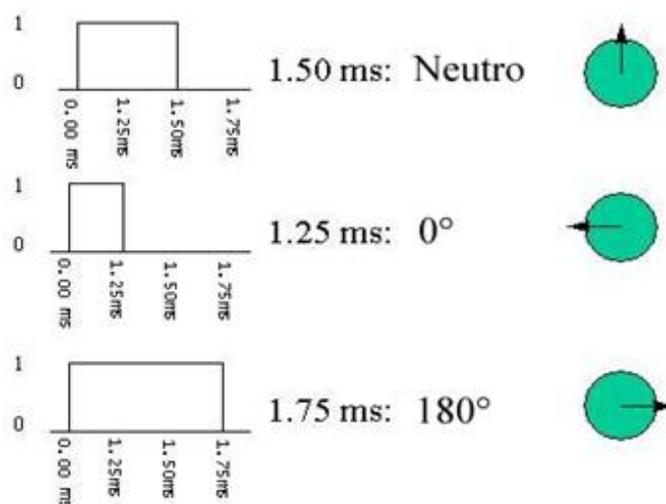


Figura 2.2 – Esquema de funcionamento do servomotor (Carrara, 2007)

Os tempos aqui usados são apenas ilustrativos, e os tempos atuais dependem do fabricante do motor. O princípio, porém, é o mesmo.

2.3 MODELOS MOTIVADORES E SUAS CONEXÕES

As próximas subseções apresentam uma análise detalhada dos cinco modelos que serviram como base e motivação para o desenvolvimento do sistema em estudo, com ênfase à mecânica e estrutura dos modelos, e posterior análise de suas conexões. Além destes modelos, será apresentado o modelo ErekoBot, para o qual está sendo proposto o sistema de conexão do presente trabalho.

2.3.1 M-Tran (1998)

Desenvolvido pela AIST e Tokyo-Tech desde 1998, este é um dos modelos com maior sucesso já desenvolvidos, e já está na sua 3ª versão, o M-Tran III. Cada módulo consiste em dois blocos, sendo um deles fêmea e o outro macho, com o formato de um meio cubo tendo um corte em meio cilindro no lado onde ele possui contato com o outro bloco. Estes blocos possuem um braço de ligação e são híbridos, podendo assumir configuração *chain* ou *lattice*.

O último modelo foi desenvolvido visando um aprimoramento do sistema de conexão, tornando-o mais confiável, rápido e simples, além do desenvolvimento de um design de CPU multi-integrado de controle, sensores e algoritmos para controle distribuído. O maior desafio dessa repaginação foi o novo sistema de conexão. Porém, assim como maior desafio, esse também foi o maior avanço, pois agora o sistema é capaz de realizar a conexão em um tempo em torno de 5 segundos, enquanto nos modelos anteriores demorava alguns minutos. Além disso, a nova conexão ocupa menos espaço interno, permitindo o uso de novos, ou mais robustos, componentes internos (Kurokawa et al, 2008).

A nova forma de ligação entre os módulos saiu da linha das séries anteriores que se baseavam em ímãs permanentes. Este sistema é baseado em dois ganchos com pivôs, tendo cada módulo três faces fêmea e outras três faces macho. As Fig. (2.3) e Fig. (2.4) mostram o sistema de ganchos.

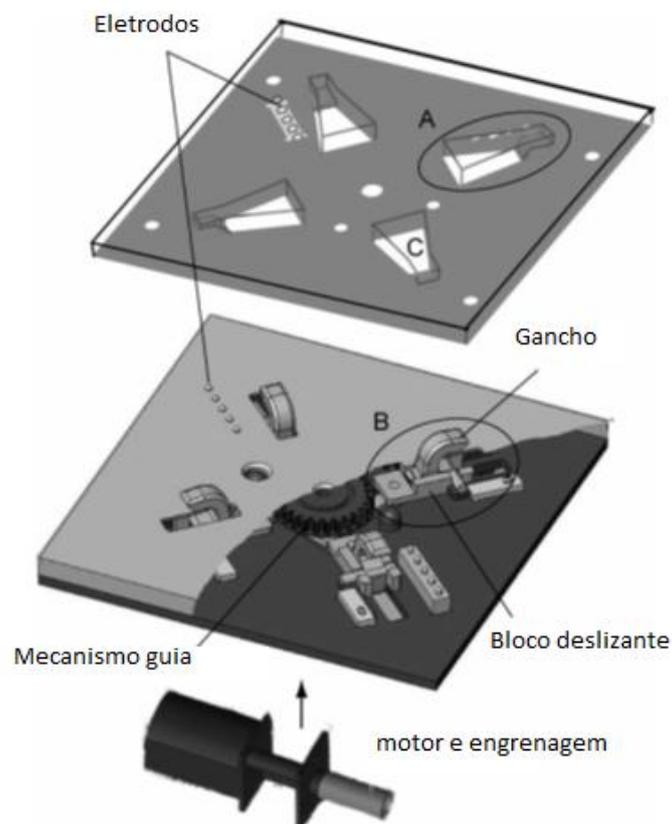


Figura 2.3 - Nova conexão (Kurokawa et al, 2008)

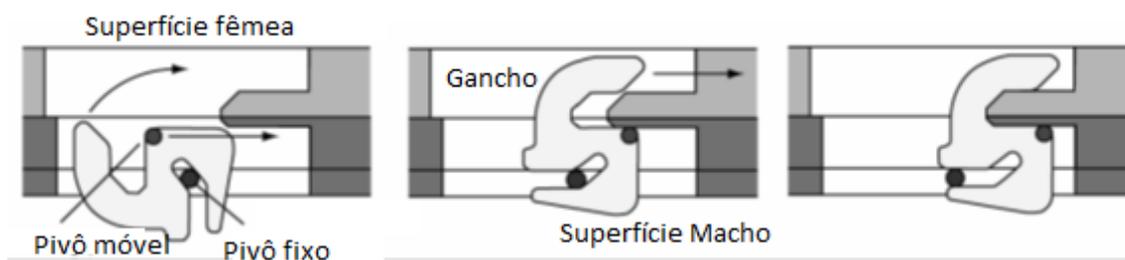


Figura 2.4 - Gancho de conexão M-Tran III (Kurokawa et al, 2008)

Na Figura (2.4) é fácil perceber a presença dos dois pivôs, sendo um fixo e outro com possibilidade de movimento. O sistema se prende quando o pivô se movimenta, fazendo uma espécie de tranca. Quando há atuação de forças para desconectar os módulos, este sistema de tranca não permite o desencaixe, pois o movimento do pivô para desconexão passa por uma trajetória diferente daquela a qual o esforço atua.

O sistema de conexão permite um erro de posicionamento relativamente grande, no momento que antecede o encaixe, graças ao formato do gancho e à cavidade da parte fêmea. Segundo os criadores, ele permite um desalinhamento de até 10°, espaço entre os módulos de 2 milímetros e que uma face esteja trasladada em até 5 mm da outra. Sistemas mecânicos como o de gancho têm as vantagens de serem mais rápidos, utilizarem pouca energia e serem sistemas que compensam a falta de precisão com a utilização de força.

Uma analogia que pode ser feita com esse travamento é um sistema em duas dimensões com coordenadas x e y, onde o sistema apenas é destravado quando é deslocado na direção x, porém as forças externas que atuam nele fazem sempre força na direção y, ou seja, o sistema não é destravado pelas forças externas.

A Tabela (2.1) resume algumas características do M-Tran III.

A Figura (2.5) apresenta o módulo do M-Tran III.

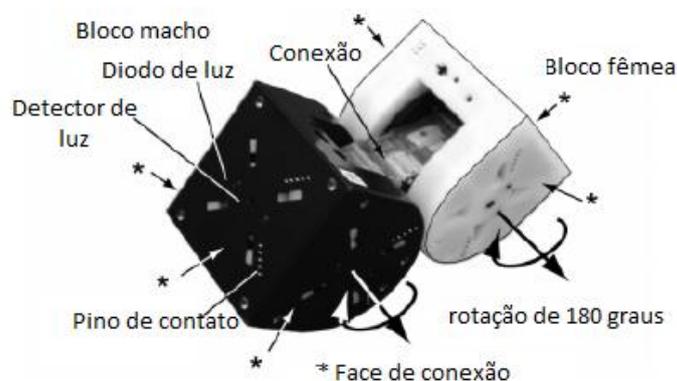


Figura 2.5 – Esquema do Módulo M-TRAN III (Kurokawa et al, 2008)

Na Figura (2.6) são apresentadas as formas de configurações possíveis do M-Tran III.

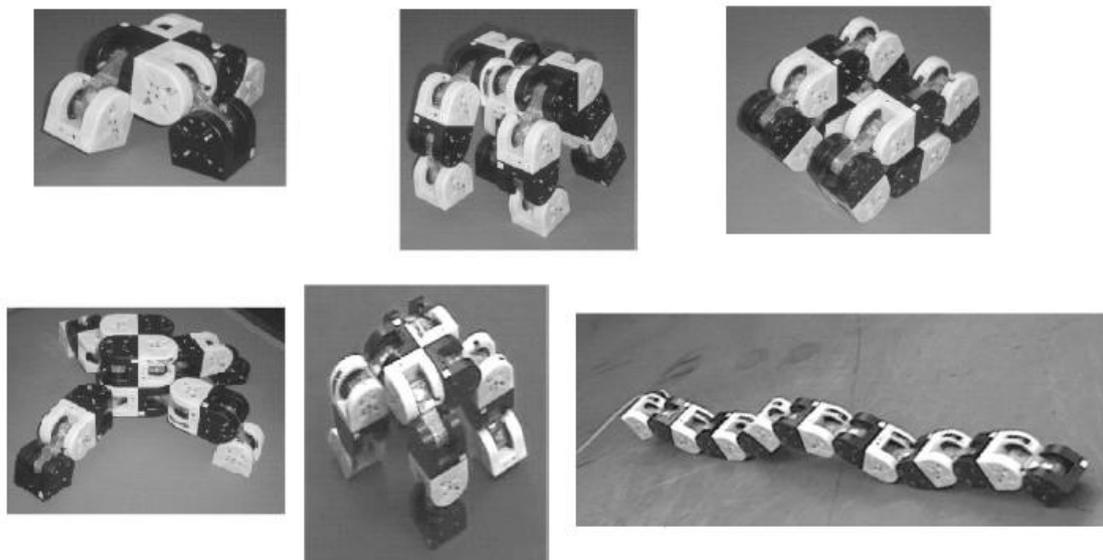


Figura 2.6 - Algumas das formas possíveis para o M-Tran III (Kurokawa et al, 2008)

Tabela 2.1 – Especificações do M-Tran III

Especificações	M-Tran III
Tipo	Homogêneo
Arquitetura	Híbrido
Reconfiguração	Determinística
Reconfigurável	Sim / Auto
Faces de Conexão	6
Graus de Liberdade (DOF)	2
Locomoção própria do módulo	Sim (2D)

2.3.2 PolyBot (1998)

O projeto PolyBot é um sistema modular desenvolvido pelo Palo Alto Research Center (PARC). De acordo com Garcia (2008), o projeto se caracteriza pela versatilidade demonstrada em suas configurações, sendo o sistema com o maior número de módulos ativos (total 56 módulos). Ensaio realizados com o PolyBot demonstraram as diversas possibilidades de controle de espaço e locomoção do sistema robótico de arquitetura *chain*. Cada módulo cabe em um cubo de 5 cm de lado, sendo suas dimensões 50mm x 50mm x 45 mm.

O PolyBot é um robô modular que se diferencia dos demais por três características principais. A primeira é o uso de um motor principal com grande capacidade de torque, e também de grande tamanho. A segunda é sua estrutura base composta apenas por vigas e colunas. E por fim, seu sistema

de conexão hermafrodita que permite, além da conexão física, também conexão elétrica e comunicação.

O motor grande foi instalado com base em testes protótipos anteriores onde foram utilizados motores com menor força e estes quebravam com grande frequência. Na Figura (2.7) é possível observar o tamanho sobressalente do motor.

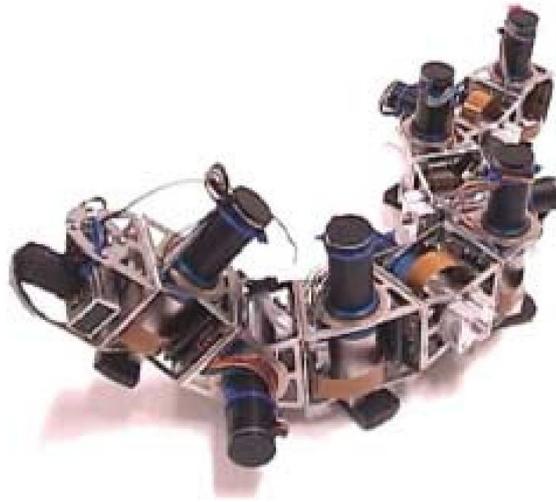


Figura 2.7 - Robô PolyBot, destaque para seus grandes motores (Yim et al, 2000)

O uso de motores desse porte, apesar de nada usual em robótica modular, trouxe benefícios ao sistema maiores que a simples não ruptura. A robustez proporcionada pelo conjunto é tamanha que foram efetuados testes bem sucedidos do PolyBot carregando carga externa, feito notável para a robótica modular.

A sua estrutura de vigas e colunas e o não uso de faces físicas, a não ser nas faces de conexão, tem dois motivos principais. Um é que essa escolha acaba diminuindo o peso do módulo e o outro motivo é o uso de um braço de ligação entre as duas partes da carenagem diferenciado. Enquanto na maior parte dos modelos este braço serve apenas como ligação entre as duas partes, no PolyBot o próprio braço já faz parte da estrutura externa do módulo. A desvantagem dessa solução é a maior suscetibilidade a agentes externos.

O PolyBot possui um avançado sistema de conexão, onde suas faces são hermafroditas e há utilização de dois fotodiodos e quatro LEDs para orientação da face que está se conectando. A Figura (2.8) ilustra em detalhe um módulo PolyBot.

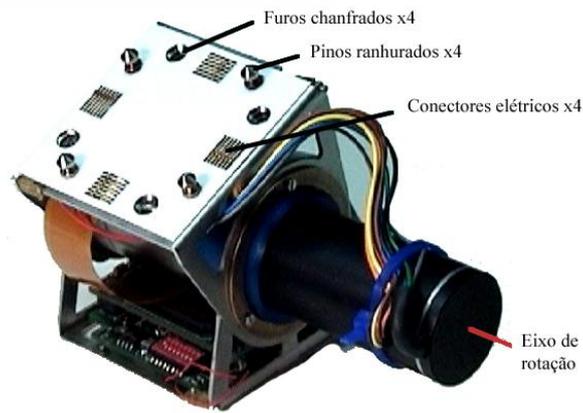


Figura 2.8 - Detalhe do sistema de conexão do PolyBot (Yim et al, 2000)

Sua composição é de 4 pinos e 4 furos, além dos componentes de orientação já descritos, e um prato inferior que tem a função de travar os pinos de uma face dentro dos furos da outra. Basicamente, os pinos de uma face são introduzidos nos furos de outra e então o prato interno da segunda é rotacionado, travando os pinos dentro dos furos. O mesmo acontece com a outra face.

A Tabela (2.2) resume algumas características do PolyBot.

Tabela 2.2 – Especificações do PolyBot

Especificações	PolyBot
Tipo	Heterogêneo
Arquitetura	Chain
Reconfiguração	Determinística
Reconfigurável	Sim / Manual
Faces de Conexão	2
Graus de Liberdade (DOF)	1
Locomoção própria do módulo	Não

2.3.3 CKBot (2005)

Desenvolvido pelo Laboratório de Robótica Modular da Universidade da Pensilvânia (ModLab), o módulo CKBot é essencialmente um cubo com quatro faces e conectores hermafroditas, com servomotores independentes ligados a um eixo de rotação que passa através de duas faces opostas do cubo e permite um alcance de 180° de movimento. O design escolhido foi selecionado devido à sua simplicidade e aplicação generalizada para vários tipos de locomoção, como rastejar, rolar, etc. Cada módulo do CKBot tem dimensões de 6 cm x 6 cm x 6 cm e pesa 143 gramas (Park, 2009).

O CKBot pode ser conectado nas configurações *lattice* ou *chain*. Geralmente possui uma reconfiguração manual, porém também é capaz de se autorreconfigurar com a ajuda de faces magnéticas adicionais e comunicadores infravermelhos.

Na configuração manual, a conexão elétrica é feita por pinos que se conectam em faces adjacentes e os módulos são mantidos unidos por meio de parafusos.

Quando com a capacidade de autorreconfiguração, podem ser conectados magneticamente uns aos outros com o auxílio de placas especiais ligadas às faces (Fig. 2.9), que possuem ímãs permanentes incorporados por trás das faces. As placas possuem também saliências e reentrâncias de acasalamento para orientar as conexões, bem como as aberturas correspondentes para a comunicação inter-módulo, feita por infravermelho.



Figura 2.9 - Placas magnéticas (Park, 2009)

A idéia por trás do modelo é a de construir um sistema que se reagrupe após ter sido “explodido em vários pedaços”, termo que nesse contexto é definido como um desacoplamento rápido e randômico do sistema.

A Figura (2.10) ilustra um módulo CKBot e uma das formas de configuração dos módulos.



Figura 2.10 - Módulo CKBot e montagem de 15 módulos que formam um robô autorreconfigurável (Park, 2009)

A Tabela (2.3) apresenta um resumo das características do CKBot.

Tabela 2.3 – Especificações do CKBot

Especificações	CKBot
Tipo	Heterogêneo
Arquitetura	Híbrido
Reconfiguração	Determinística
Reconfigurável	Sim / Manual
Faces de Conexão	4
Graus de Liberdade (DOF)	1
Locomoção própria do módulo	Sim

2.3.4 SuperBot (2005)

Desenvolvido pelo Professor Wei-Min (Weimin) Shen na Universidade da Califórnia do Sul, este modelo, assim como todos os outros, tem a intenção de ser flexível, potente e robusto, para conseguir operar em ambientes não controlados e eventualmente realizar missões espaciais. Os módulos possuem três graus de liberdade, são feitos de metal e possuem um modelo híbrido, podendo conectar-se na forma *chain* ou *lattice*.

O módulo do SuperBot é constituído de dois cubos ligados de dimensões 84 mm X 84 mm X 84 mm e 6 faces de conexão idênticas.

Na Figura (2.11) evidenciam-se os três graus de liberdade que o módulo possui e na Fig. (2.12) mostra-se diferentes formatos possíveis para configuração do Superbot.



Figura 2.11 – Módulo do Superbot (Salemi et al, 2006)



Figura 2.12 - Diversas Morfologias do Superbot (Salemi et al, 2006)

Na Tabela (2.4) é apresentado um resumo das principais características do SuperBot.

Tabela 2.4 – Especificações do SuperBot

Especificações	SuperBot
Tipo	Homogêneo
Arquitetura	Híbrido
Reconfiguração	Determinística
Reconfigurável	Sim / Manual
Faces de Conexão	6
Graus de Liberdade (DOF)	3
Locomoção própria do módulo	Sim (2D)

Os conectores são operados manualmente por um operador externo, são hermafroditas, possuem uma orientação de intervalos de 90° entre cada um deles e permitem comunicação e troca de energia entre os módulos. O alinhamento dos módulos é rígido, devido à presença de pinos para ligar os módulos, fazendo com que o sistema não possa ser devidamente conectado se as conexões não estiverem corretamente posicionadas.

A comunicação entre os módulos é útil para permitir um melhor controle das ações tomadas, sejam elas decididas por um controlador remoto ou por uma matriz decisão impostas nos robôs.

A Figura (2.13) mostra o sistema de conexão do SuperBot.

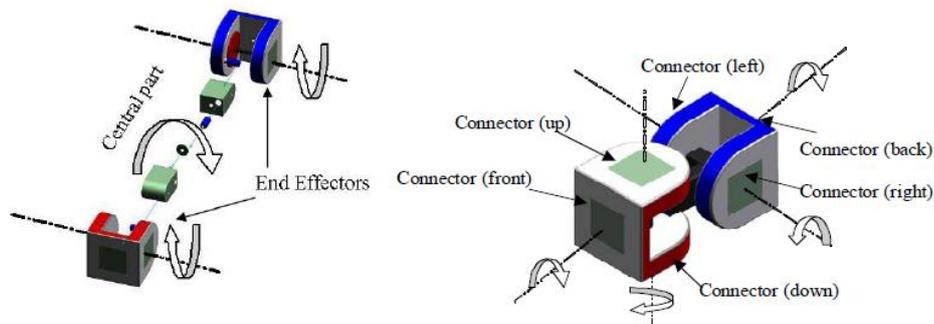


Figura 2.13 – Sistema de conexão SuperBot (Salemi et al, 2006)

2.3.5 YaMoR (2005)

Desenvolvido a partir de 2005 pelo grupo BIRG, laboratório do Instituto Federal Suíço de Tecnologia (EPFL), é um projeto que possui como característica principal sua simplicidade e design mecânico de baixo custo, além de trazer grandes avanços no controle de robótica modular.

Os módulos são blocos com as laterais arredondadas, autônomos, com dimensões 90mm x 50mm x 45mm. Para transmissão de torque, um perfil de alumínio em forma de U é conectado no atuador – um servo motor RC padrão, com controlador de posição integrado. As unidades são equipadas com baterias de Lítio recarregáveis, que teoricamente permitem que o módulo trabalhe até 45 minutos, dependendo do carregamento, e cada uma possui um FPGA (dispositivo semicondutor largamente utilizado para o processamento de informações digitais).

As unidades YaMoR são simples e robustas, e não têm que ser ligadas eletricamente para se comunicar, uma vez que pode ser usado o protocolo Bluetooth para fazer isso. O grupo BIRG conseguiu desenvolver um software de controle simultâneo chamado Bluemove, que possibilita ao usuário controlar o movimento característico de cada módulo do sistema instantaneamente. Isto facilita a análise da dinâmica de todos os módulos em uma determinada configuração (Moeckel et al, 2005).

A Figura (2.14) ilustra um módulo YaMoR e a Figura (2.15) apresenta uma das configurações possíveis dos módulos.



Figura 2.14 - Módulo YaMoR (Yerly et al, 2007)



Figura 2.15 - Configuração quadrúpede YaMoR (Yerly et al, 2007)

O módulo YaMoR tem um sistema de conexão com faixas de velcro que resiste a forças de até 200N (Yerly et al, 2007), força essa muito maior do que as típicas atuadas nos robôs. Sendo assim suas variações de formato devem ser operadas por um agente externo, fazendo com que o modelo não tenha capacidade de auto conexão e desconexão.

A Tabela (2.5) apresenta um resumo das informações do módulo YaMoR.

Tabela 2.5 – Especificações do YaMoR

Especificações	YaMoR
Tipo	Homogêneo
Arquitetura	Híbrido
Reconfiguração	Determinística
Reconfigurável	Sim / Manual
Faces de Conexão	4
Graus de Liberdade (DOF)	01-02
Locomoção própria do módulo	Sim

2.3.6 ErekoBot (2009)

O grupo de pesquisa em robótica modular da Universidade de Brasília (Grupo Ereko) desenvolveu alguns protótipos de robôs modulares durante suas pesquisas. O ErekoBot β -5 é o primeiro protótipo funcional do grupo Ereko, construído em 2009 com base na análise dos resultados de um modelo preliminar, o ErekoBot α -5.

O ErekoBot β -5 possui um desenho bastante similar ao MTRAN, YaMoR e PolyBot. Seus módulos são híbridos, com quatro faces de conexão idênticas com controle simples de movimento. Sua geometria é similar a um cubo com corte semicilíndrico e uma face móvel (Fig. 2.16). Esta face é soldada ao braço que, por sua vez, é conectado ao servomotor localizado no interior da gaiola. Todos os módulos foram confeccionados com chapas de alumínio de 2 mm de espessura, dobradas.



Figura 2.16 - Módulos ErekoBot β -5 (a) conectados em série; (b) detalhe de um módulo

No projeto ErekoBot β -5, foi escolhido o modelo servomotor Hxt 12K Metal Gear, de 55 gramas de peso, com capacidade de torque de 10-12 kg-cm. Este motor possibilitou o uso de um módulo com peso médio de 160 gramas, em uma estrutura com dimensões 70 mm x 70 mm x 70 mm, com a capacidade de torque suficiente para levantar 2 outros módulos adjacentes.

No ErekoBot β -5 a fixação entre módulos é realizada por meio de uniões aparafusadas – não autorreconfiguráveis. Na Tabela (2.6) é apresentado um resumo das principais características do ErekoBot β -5. O sistema ErekoBot β -5 é um robô modular bem rústico, não apresentando circuito embarcado, sensores e um sistema de comunicação.

Tabela 2.6 – Especificações do ErekoBot β -5

Especificações	ErekoBot β -5
Tipo	Homogêneo
Arquitetura	Híbrido
Reconfiguração	Determinística
Reconfigurável	Sim / Manual
Faces de Conexão	4
Graus de Liberdade (DOF)	1
Locomoção própria do módulo	Sim (1D)

O ErekoBot β -4 é o próximo protótipo do Grupo Ereko a ter seu término de desenvolvimento ainda no ano de 2011. Ele é baseado no projeto anterior (ErekoBot β -5) e possui um desenho bastante similar ao ErekoBot β -5, mudando apenas de dimensões, peso e material de construção.

O novo módulo para o ErekoBot β -4 terá dimensões de 89mm x 89mm x 89mm e pesará em torno de 250 gramas cada um. O material de construção dos módulos ainda está sob estudo e será definido durante a próxima fase do projeto.

O sistema de conexão entre os módulos é o objeto de estudo desse projeto e será proposto em um capítulo mais a frente.

2.4 ANÁLISE DAS CONEXÕES EXISTENTES

A maior parte da pesquisa em robôs reconfiguráveis é baseada em um design homogêneo e tem como objetivo uma operação em 3D. O número de graus de liberdade por módulo varia de um a três dentre os modelos analisados. A ênfase no desenvolvimento dos mecanismos de ligação não se concentrou no projeto de um mecanismo de conexão sem gênero, sendo os existentes geralmente separados por categorias masculino e feminino (Jantapremjit et al, 2001).

De uma forma geral, os sistemas de conexão estudados possuem gêneros nas faces, são hermafroditas ou se conectam por meio de parafusos. Sistemas hermafroditas possuem conectores macho e fêmea na mesma face do módulo, caso do PolyBot que possui faces com pinos e furos.

Sistemas com gêneros nas faces, como o M-Tran, possuem faces fêmea e faces macho diferenciadas. Ambos, porém, possuem o inconveniente de necessitarem de seleção da face a ser conectada, ou seja, é necessário que as partes macho se alinhem com partes fêmeas do sistema para garantir a conexão.

O sistema de conexão do M-Tran III possui o ponto positivo de poder efetuar conexão por seis faces diferentes por módulo (três de cada gênero), permitindo diferentes configurações e, conseqüentemente, várias aplicações e utilidades. Além disso, segundo os criadores, o sistema de ganchos pivotados admite um erro de desalinhamento de até 10°, espaço entre os módulos de 2 milímetros e que uma face esteja trasladada em até 5 mm da outra. Este também é mais rápido e compensa a falta de precisão com a utilização de uma geometria com auto-ajuste, ou seja, os ganchos uma vez ligeiramente encaixados nas partes fêmea da face fêmea conseguem finalizar o processo de conexão facilmente.

No entanto, o sistema possui também pontos desfavoráveis como o inconveniente de possuir gênero nas faces, limitando as possibilidades de conexão. Faces de mesmo gênero não podem se conectar, requerendo um reposicionamento destas, dificultando a reconfiguração e aumentando o gasto de energia. Há também a possibilidade de algum detrito encontrado em ambiente não controlado obstruir a abertura que existe na parte fêmea do acoplamento, impossibilitando a conexão. Além disso, o sistema é formado por diversos pequenos componentes de geometrias complexas de difícil fabricação.

O sistema PolyBot de conexão tem a vantagem de ser hermafrodita, tendo faces idênticas, ao contrário do que ocorre com o M-Tran, mencionado anteriormente, onde há faces de conexão macho e fêmea diferenciadas. No entanto, este sistema também necessita de seleção da posição da face a ser conectada para que furos de uma face estejam alinhados com os pinos da outra face, pois no caso de ficarem alinhados furos com furos e pinos com pinos o sistema não conseguirá se conectar. Além disso, é necessária precisão no posicionamento entre as faces.

No CKBot, os módulos são conectados por parafusos. Contudo, quando com a capacidade de autorreconfiguração, placas de ímãs permanentes são incorporadas às faces. Nesse caso, o sistema possui a vantagem de não apresentar gasto extra de energia, já que os conectores são formados por ímãs permanentes e não eletroímãs. Porém, sistemas desse tipo, em geral, demoram muito para executar a conexão, fato que impossibilita a utilização desses módulos para tarefas que demandem uma resposta rápida do sistema.

O sistema SuperBot possui seis faces idênticas e hermafroditas, sendo os conectores (parafusos) operados manualmente, ou seja, o sistema apenas pode se reconfigurar com a ajuda de um operador externo. Outra característica básica da conexão do SuperBot é a facilidade de desconexão. Parece uma questão simples e que se resolve naturalmente, mas, na verdade é um grande desafio, visto que a conexão deve ser o mais firme possível para impossibilitar desvios, condição que acaba dificultando a desconexão.

A conexão de velcro entre os módulos YaMoR apresenta vantagens em relação a um sistema de parafusos, como o ErekoBot, CKBot e SuperBot, operados por agente externo, pois o velcro apresenta operação mais simples e rápida. Porém suas ligações não são tão confiáveis, podendo permitir pequenos desvios na conexão e, além disso, não se pode garantir que a conexão foi feita com alinhamento adequado, já que é realizada, em geral, por encaixe manual sem auxílio de nenhum aparelho que garanta esse alinhamento.

O único modelo estudado com total capacidade de autorreconfiguração é o M-Tran III. Todos os demais modelos, PolyBot, SuperBot, ErekoBot e YaMoR, possuem sistemas de conexão que não possibilitam uma reconfiguração automática do robô modular, sendo operados manualmente. O CKBot consegue apenas retornar à sua forma original após uma explosão de seus módulos, não sendo considerado um robô totalmente autorreconfigurável.

A condição de não haver gênero nos módulos possibilita a conexão de qualquer face de um módulo com qualquer face de outro módulo das adjacências, permitindo, além da capacidade do módulo assumir um maior número de formas, uma economia de movimentos necessários para o posicionamento destes para que ocorra o encaixe. Esse efeito é muito desejado, já que a limitação de energia é restrição em qualquer projeto.

3 SISTEMA DE CONEXÃO PROPOSTO

A análise dos principais sistemas de conexão, apresentada no capítulo anterior, realçou características boas e ruins comuns entre eles. Foi observado que o sistema de conexão macho-fêmea é recorrente em quase todos os modelos, ainda que não seja a opção mais vantajosa em termos de economia de energia e tempo de configuração do robô, e que os principais robôs possuem sistemas de alinhamento muito mais desenvolvidos que os que estão disponíveis para trabalhos em estágio de iniciação.

Com base nisso, a idéia inicial do projeto de um novo sistema de conexão baseou-se em um sistema que possuísse faces transgêneras, ou seja, faces que pudessem assumir a configuração de macho ou fêmea dependendo da necessidade, e que o alinhamento fosse auxiliado pelo próprio mecanismo de conexão.

Além disso, o ErekoBot, em sua fase atual de desenvolvimento, necessita apenas que as faces se liguem em série, ou seja, a conexão ocorre apenas entre as faces frontais dos módulos.

A diferença dos mecanismos propostos nesse capítulo para os outros modelos já existentes é que foram inicialmente baseados em um atuador centrífugo de embreagem, tendo assim uma geometria mais simples e de fabricação mais fácil que um sistema de engrenagens tão pequenas como as do M-Tran ou necessitando de um alinhamento inicial tão preciso quanto o PolyBot.

Resumindo, o sistema teria como requisitos:

- Simplicidade e robustez;
- Ser transgênero;
- Permitir a conexão apenas das faces frontais dos módulos;
- Ter dimensões adequadas às limitações de tamanho do módulo e
- Ser uma idéia inovadora.

Assim, foram propostas três diferentes soluções para a conexão dos módulos.

3.1 MECANISMO 1

O primeiro mecanismo proposto consiste no uso de abas em formato de arco de circunferência, formando, quando na posição recolhida, um aro (Fig. 3.1). A conexão seria efetivada da seguinte maneira: um módulo teria suas abas na posição estendida e outro teria suas abas recolhidas; quando estas ocupassem o mesmo plano, as abas inicialmente recolhidas se estenderiam até se chocarem com as já estendidas, o que conectaria os dois módulos. Este formato de aro teria a vantagem de possibilitar o encaixe dos módulos em qualquer angulação requerida. Esta característica, porém, não é tão

necessária, pois para as aplicações atuais é importante apenas que os módulos se conectem nas posições de paralelismo das arestas das faces.

Além disso, um modelo quadrado permitiria uma autocorreção do alinhamento, pois, para conexão, as abas se forçam ao paralelismo em relação à aba a qual estão se ligando.

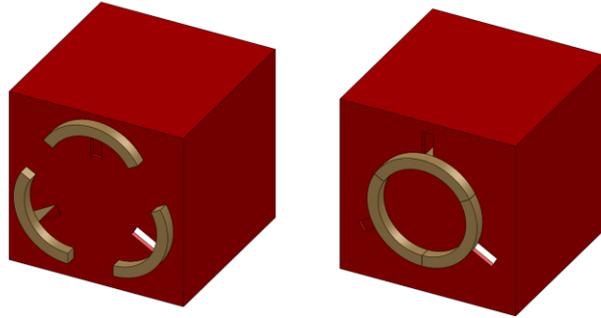


Figura 3.1 – Vistas isométricas do primeiro mecanismo 1 proposto

3.2 MECANISMO 2

Após percebidas as limitações do primeiro sistema projetado, iniciou-se o desenvolvimento de uma segunda proposta de mecanismo de conexão. Este se caracteriza por ser sistema de conexão simples, sendo diferente do primeiro principalmente por causa do formato e número de abas. Seu funcionamento está esquematizado na Fig. (3.2).

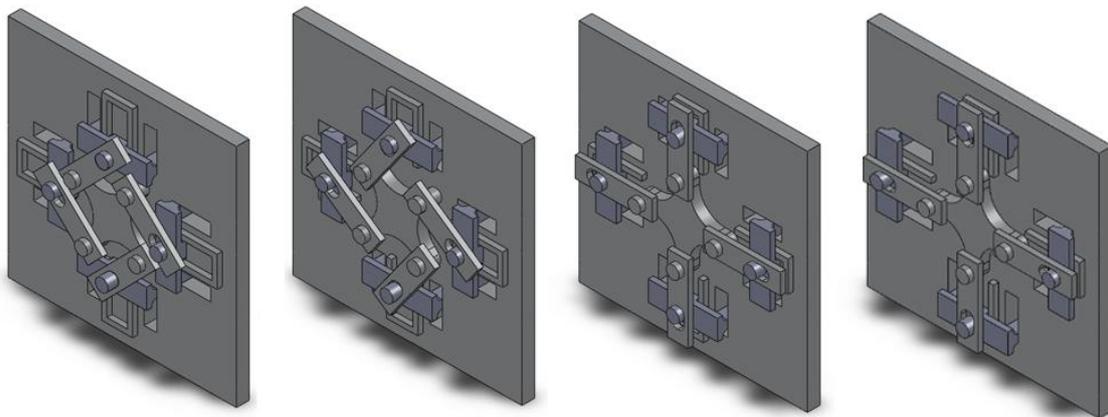


Figura 3.2 – Processo completo de movimentação das abas e hastes

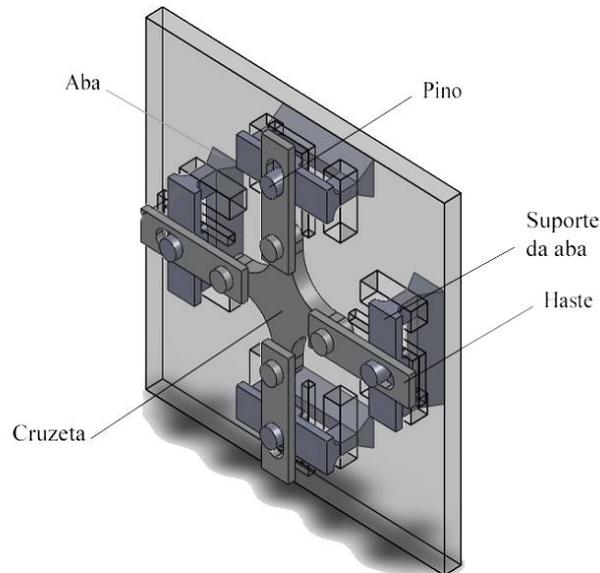


Figura 3.3 - Vista isométrica do sistema proposto, com face transparente

Seu funcionamento segue as seguintes fases:

1. Primeiramente, as abas das duas faces que irão se conectar assumem a posição mais afastada do centro (Fig. 3.4), permanecendo nessa posição devido à resistência do motor ao giro e também a pinos que travam a cruzeta interna nesta posição;
2. Quando há a decisão de se conectar, uma das faces toma a posição de macho, acionando o motor interno para recolher suas abas para a posição mais próxima ao centro (Fig. 3.5);
3. As faces se aproximam ao máximo possível;
4. A face que está atuando como macho gira seu motor interno, fazendo com que suas abas desloquem-se no sentido centrífugo. Graças ao fato da haste conseguir variar seu comprimento, o motor consegue efetuar todo o giro para o qual foi programado e mesmo assim as abas de uma face ficam sob as da outra (Fig. 3.6).

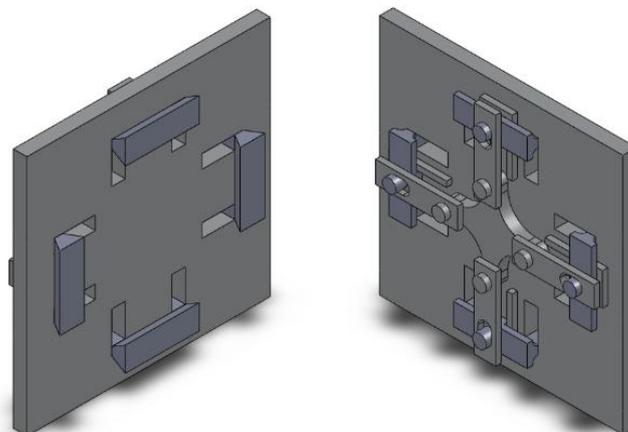


Figura 3.4 - Posição inicial da face (estendida), com vistas externa e interna

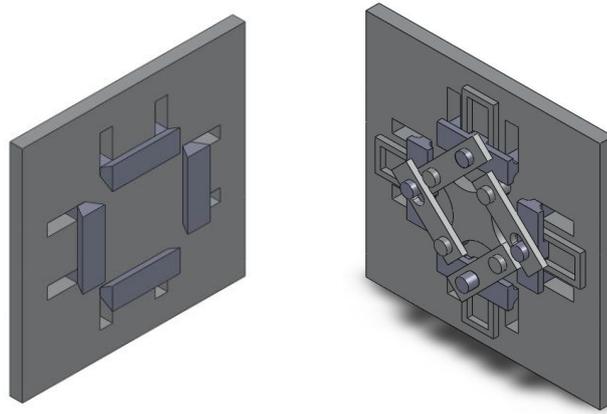


Figura 3.5 - Posição 2 da conexão com vistas externa e interna

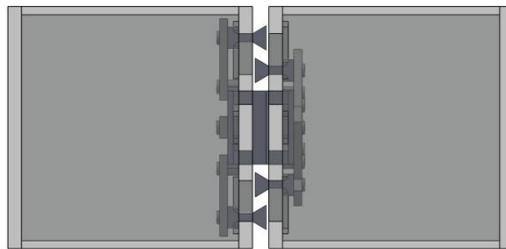


Figura 3.6 – Posição 4 da conexão

Esse mecanismo pode ser dividido em duas partes principais, a parte externa composta por abas e rasgos para translação dessas, e a parte interna composta por hastes, cruzeta e motor. Nos próximos parágrafos serão descritos cada um desses componentes e suas funções.

3.2.1 Face

A face é quadrada com lados de 89 mm. Possui rasgos para o deslizamento dos suportes das abas e trilhos que servem como guias na movimentação do mecanismo.

3.2.2 Abas

As abas são em número de quatro e possuem um ângulo de 90° entre as vizinhas. São paralelas à aba oposta e às arestas da face. Elas podem se movimentar na direção radial em ambos os sentidos, por meio dos dois rasgos presentes na estrutura. Suas posições mais importantes são nas extremidades dos rasgos.

O perfil das abas é trapezoidal para apresentar robustez suficiente e permitir o deslizamento das abas de uma face pela outra, essa característica permite um auto ajuste da conexão e ainda permite erros de posicionamento entre os módulos da ordem de 5mm de distância entre os módulos, 3mm de translação entre as faces ou angulação de $11,5^\circ$.

Esses valores são obtidos graças à geometria das abas e dos rasgos. A distância de 5mm é possível devido à espessura das abas e sua angulação, ou seja, quando as abas estão a essa distância, pode-se fazer com que uma deslize sobre a outra ajustando o encaixe. A translação de 3mm é dada pela distância entre as abas quando uma está totalmente estendida e a outra totalmente recolhida (todos estes valores são teóricos, necessitando de comprovação prática).

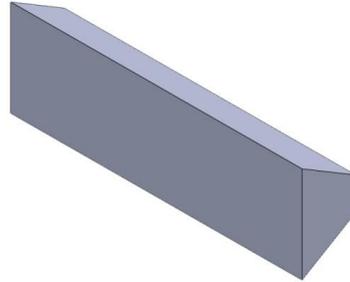


Figura 3.7 – Aba

3.2.3 Mecanismo de haste

O componente que está conectado à aba é o mecanismo de haste. Este item é o de geometria mais complexa do sistema, pois é ele quem faz a transmissão de força do motor para as abas, permitindo seu deslocamento.

O mecanismo é composto pela haste propriamente dita e pelo suporte da aba, unidas por um pino de 5mm de diâmetro. A haste é uma placa retangular com um furo de seção circular, para conexão com o pino da cruzeta e outro furo para conexão com o suporte da aba (Fig. 3.8). O segundo furo é na verdade um rasgo para que o pino do suporte da aba consiga se movimentar por ele, reduzindo o tamanho do mecanismo de haste. Este detalhe permite que a cruzeta fique ortogonal às arestas da face tanto na posição 1 quanto na posição 3. Essa característica é útil para reduzir o momento de giro da cruzeta, e portanto a solicitação do motor, quando houver esforço nas abas (sempre que conectadas), fato justificado pela diminuição do “braço” na aplicação da força, resultando em um momento menor.

A segunda parte, o suporte da aba (Fig. 3.9), tem geometria mais complexa, possuindo um pino para ligação à haste, uma base que serve para direcionamento por um trilho e para suporte de dois braços que farão a ligação com as abas.

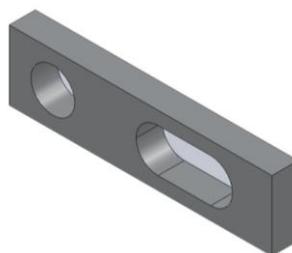


Figura 3.8 - Haste

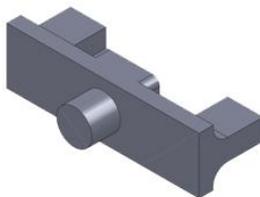


Figura 3.9 – Suporte da aba

3.2.4 Cruzeta

A cruzeta (Fig. 3.10) é fixada na extremidade do motor. Este componente tem a função de transmitir forças às hastes. Foi concebido inicialmente na forma de um disco, mas seus quadrantes foram recortados para reduzir material e evitar possível interferência com outros elementos constituintes do módulo.

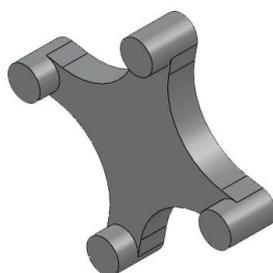


Figura 3.10 – Cruzeta

3.3 MECANISMO 3

O último sistema de conexão proposto (Fig. 3.11) é na verdade apenas uma evolução de seu antecessor. Como a fabricação desta peça para construção do protótipo será em plástico ABS, utilizando uma máquina de prototipagem rápida com limitações de dimensões das impressões e precisão, o mecanismo sofreu diversas modificações para permitir sua execução.

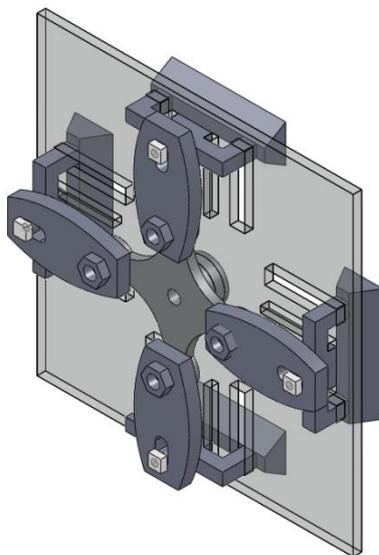


Figura 3.11 – Vista isométrica do novo sistema proposto com face transparente

Os desenhos dos componentes serão apresentados aqui em sua vista isométrica e terão suas dimensões detalhadas no Anexo I ao fim do projeto.

3.3.1 Face

O tamanho das arestas da face foi diminuído de 89 mm para 75 mm. Apesar da máquina apresentar uma superfície de trabalho na forma de uma placa quadrada de 100 mm x 100 mm, seu tamanho é reduzido pela presença de parafusos nas laterais, impossibilitando a construção de uma face maior. Esta modificação implicou em um redimensionamento do giro da cruzeta e do tamanho da haste.

Além disso, foi implementado um furo central para permitir o encaixe da cruzeta, cuja geometria foi alterada, conforme será mostrado no item 3.3.4. As guias passam a ser apenas dois ressaltos paralelos, sem a ligação entre eles no final do curso da aba. Os rasgos da face foram reposicionados e levemente aumentados devido às novas dimensões do mecanismo (Fig. 3.12).

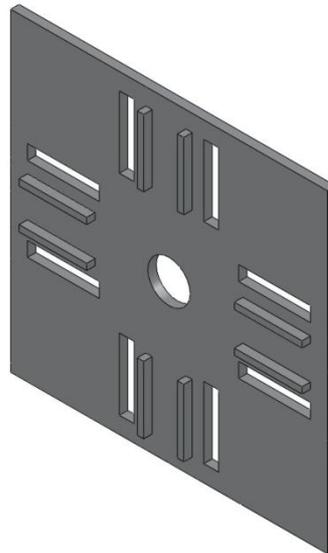


Figura 3.12 – Vista isométrica da face redimensionada com dimensões de 75 x 75 mm

3.3.2 Abas

As dimensões utilizadas no segundo mecanismo foram mantidas para as abas do terceiro mecanismo (vide Fig. 3.7).

3.3.3 Mecanismo de haste

A haste foi levemente abaulada para resistir melhor aos esforços (Fig. 3.13). Esta medida foi realizada uma simulação de esforços e verificou-se que este era o componente mais exigido.

O suporte da aba foi modificado para uma geometria de construção mais simples, tendo agora a peça uma única espessura de 3mm (Fig. 3.14). Além disso, as dimensões dos suportes das abas e das hastes foram reduzidas, devido ao novo tamanho da face.

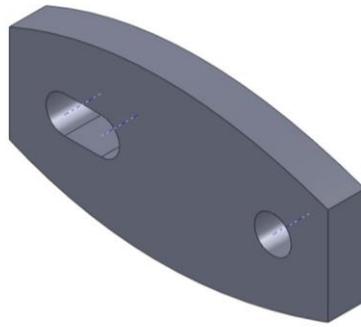


Figura 3.13 – Vista isométrica da nova haste

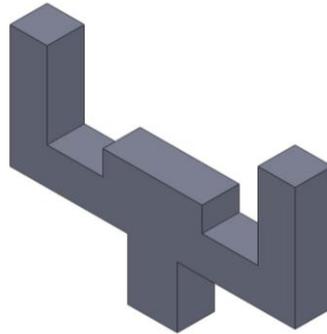


Figura 3.14 – Vista isométrica do novo suporte da aba

3.3.4 Cruzeta

A máquina não gera bons resultados em ressaltos cilíndricos de raio pequeno, por isso os ressaltos da cruzeta que consistiam em pinos de ligação à haste, conforme Fig. 3.10, foram substituídos por furos e a conexão passou a ser realizada por parafusos.

A cruzeta possui agora um ressalto cilíndrico que se encaixa no furo central da face do mecanismo. Além disso, as extremidades dos braços, onde são feitas as conexões com as hastes por meio de parafusos, tiveram suas dimensões aumentadas para facilitar a execução dos furos (Fig. 3.15).



Figura 3.15 – Vista isométrica da nova cruzeta

Após o redimensionamento dos componentes do mecanismo anterior, iniciou-se a construção do protótipo, baseado neste último mecanismo proposto, a ser detalhada no próximo capítulo.

3.4 ANÁLISE DO MECANISMO 3

O mecanismo proposto necessita de transformação de movimento circular (cruzeta) em movimento retilíneo (abas) e por isso foi baseado na operação do famoso mecanismo “Crank-Slider”, conhecido como biela-manivela, representado esquematicamente na Fig. (3.16). É um mecanismo simples, com apenas um grau de liberdade e grande funcionalidade, encontrado em diversas aplicações. Seu uso mais comum é em motores de combustão interna de automóveis, operando pistões.

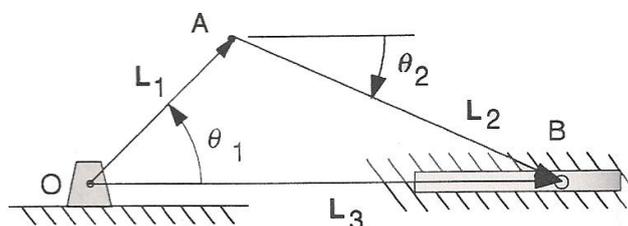


Figura 3.16 – Esquemático do mecanismo biela-manivela

O mecanismo é composto por uma manivela (L_1) que está conectada a uma biela (L_2) por meio de pino (A). O outro extremo da manivela é unido a um ponto fixo (O), o centro de giro, e o extremo restante da biela é conectado ao bloco deslizante (B) que se move em linha reta.

O eixo x-y tem sua origem posicionada no ponto O. A análise geral de posição do mecanismo é baseada nas seguintes equações (Eckhardt, 1998):

$$x_B = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 \quad (1)$$

$$y_B = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 = 0 \quad (2)$$

$$\sin \theta_2 = -\frac{L_1}{L_2} \sin \theta_1 = -\frac{\sin \theta_1}{\rho}, \text{ onde } \rho = \frac{L_2}{L_1} \quad (3)$$

O ângulo de transmissão (μ) é definido como o ângulo entre a biela e a direção de constrição (direção y, onde a força não é aproveitada) na posição final do bloco deslizante ($\theta_{1_{\max}}, x_{B_{\min}}$) e o seu cosseno representa a parcela de força desperdiçada (F_c) em relação à força total aplicada (F) (Fig. 3.17). Assim, valores altos de $\cos \mu$ serão associados a valores pequenos do ângulo de transmissão. Uma regra comumente utilizada é que não se deve permitir que o ângulo de transmissão se torne menor que 40° (Eckhardt, 1998).

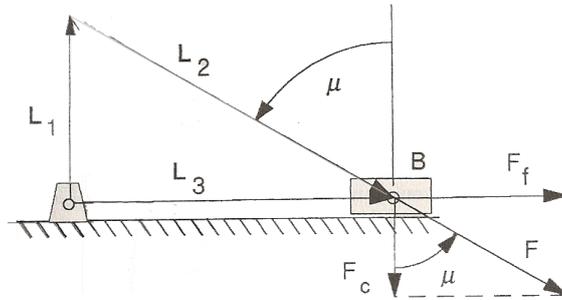


Figura 3.17 – Representação do ângulo μ

No caso particular do mecanismo proposto no projeto, o centro do ressalto inferior da cruzeta faz o papel de centro de giro do sistema, os braços da cruzeta fazem o papel de manivelas, as hastes, o papel de bielas e os ressalto inferiores do suporte da aba, o papel de bloco deslizante. Na Figura (3.18) é representado o mecanismo proposto com sistema biela-manivela em destaque para uma das hastes. No sistema estarão presentes quatro mecanismos biela-manivela idênticos e com mesmo centro de giro.

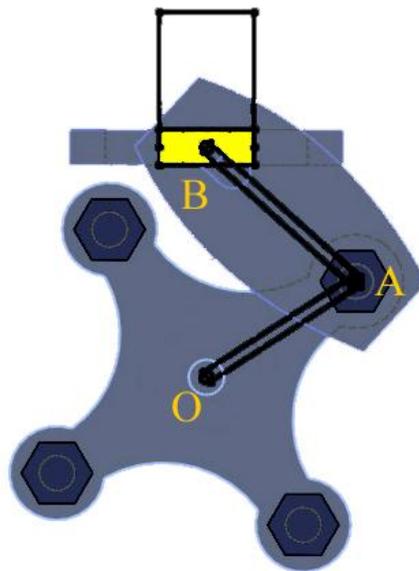


Figura 3.18 – Mecanismo proposto com sistema biela-manivela em destaque

Para o mecanismo proposto, duas posições especiais são de particular interesse: a posição $\theta_{1_{\min}} = 0$ e a posição $\theta_{1_{\max}} = 57^\circ$. Para cada uma dessas posições o cursor B está nos extremos da guia de deslizamento, ou seja, o mecanismo está retraído ou totalmente expandido. O ângulo mínimo θ_1 corresponde à posição onde o mecanismo está totalmente expandido, com as hastes paralelas às guias e rasgos (Fig. 3.19). O ângulo máximo θ_1 corresponde à máxima rotação da cruzeta em que as hastes não estão impossibilitadas geometricamente de girarem (Fig. 3.20).

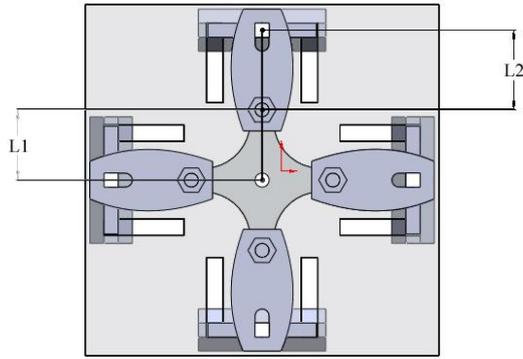


Figura 3.19 – Mecanismo expandido com representação das dimensões L_1 correspondente a manivela e L_2 a biela

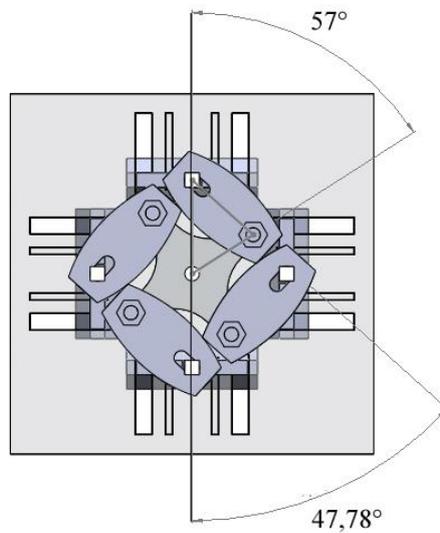


Figura 3.20 – Mecanismo completo em posição correspondente à rotação máxima dos componentes

As dimensões utilizadas para cálculo e análise do mecanismo serão:

$$L_1 = 15 \text{ mm}$$

$$L_2 = 17 \text{ mm}$$

$$0 \leq \theta_1 \leq 57,00^\circ$$

$$0 \leq \theta_2 \leq 47,78^\circ$$

$$\rho = \frac{17}{15} = 1,133$$

$$\mu = 90^\circ - \theta_2 = 42,22^\circ \geq 40,00^\circ$$

$$x_{B_{\min}} = 15 * \cos 57^\circ + 17 * \cos 47,78 = 19,60 \text{ mm}$$

$$x_{B_{\max}} = 15 * \cos 0 + 17 * \cos 0 = 32,00 \text{ mm}$$

Tendo isso em mente, é possível analisar a operação do sistema de modo que se encontre o valor máximo do coeficiente de atrito, em função do ângulo θ_1 , que garante o deslizamento do bloco na guia, ou seja, do ressalto inferior do suporte da aba nas guias da face.

No sistema proposto, a força F é proveniente do torque do motor ligado ao centro de giro O . Assim, ela é sempre perpendicular a L_1 e tem sentido igual ao do giro do motor. Com isso, as suas projeções F_f (projeção na direção x , na qual o ponto B é livre para se movimentar) e F_c (parcela de F desperdiçada, projetada na direção y , na qual o ponto B não é livre para se movimentar) podem ser definidas como

$$F_f = F \sin \theta_1 \quad (4)$$

$$F_c = F \cos \theta_1 \quad (5)$$

Observando-se o diagrama de corpo livre do bloco deslizante (Fig. 3.21), pode-se concluir que o bloco só entra em movimento quando o somatório de forças horizontais (direção x) é diferente de zero ou quando L_2 possua um momento no sentido de giro pretendido.

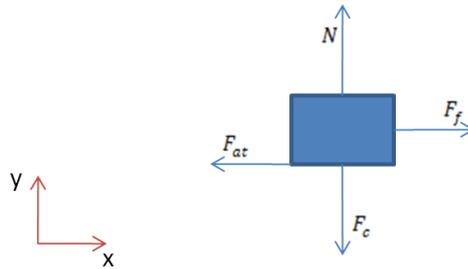


Figura 3.21 – Diagrama de corpo livre do bloco deslizante

Ou seja, para a primeira situação, o cálculo do coeficiente de atrito máximo pode ser feito conforme mostrado nas Eq. (6) e (7).

$$\sum F_y = N - F_c = 0 \rightarrow N = F_c \quad (6)$$

$$\sum F_x = F_f - F_{at} > 0 \rightarrow F_f > F_{at} \quad (7)$$

$$F_{at} = N \mu_{est}$$

$$F_f = F \sin \theta_1$$

$$F \text{sen} \theta_1 > N \mu_{est}$$

$$F \text{sen} \theta_1 > F_c \mu_{est}$$

$$F \text{sen} \theta_1 > F \text{cos} \theta_1 \mu_{est}$$

$$\mu_{est} < \text{tg} \theta_1$$

Aplicando as equações aos valores limite de θ_1 do mecanismo de conexão proposto:

$$0 \leq \theta_1 \leq 57,00^\circ$$

$$0 \leq \mu_{est} \leq 1,54$$

Para a segunda situação de giro, quando L_2 possui um momento no sentido do giro pretendido, o cálculo do coeficiente de atrito pode ser feito como demonstrado a seguir.

Sendo:

$$\text{Braço}_y = \frac{L_2}{2} \text{cos} \theta_2$$

$$\text{Braço}_x = \frac{L_2}{2} \text{sen} \theta_2$$

Para a situação de giro, precisamos que:

$$(F_c + N) \text{Braço}_x > (F_f + F_{at}) \text{Braço}_y$$

Assim:

$$(N + F_c) \frac{L_2}{2} \text{sen} \theta_2 > (F_f + F_{at}) \frac{L_2}{2} \text{cos} \theta_2$$

$$(F_c + F_c) \text{sen} \theta_2 > (F \text{sen} \theta_1 + N \mu_{est}) \text{cos} \theta_2$$

$$(2F \text{cos} \theta_1) \text{sen} \theta_2 > (F \text{sen} \theta_1 + F \text{cos} \theta_1 \mu_{est}) \text{cos} \theta_2$$

$$2 \text{cos} \theta_1 \text{sen} \theta_2 > \text{sen} \theta_1 \text{cos} \theta_2 + \text{cos} \theta_1 \text{cos} \theta_2 \mu_{est}$$

$$2 \text{tg} \theta_2 > \text{tg} \theta_1 + \mu_{est}$$

$$\mu_{est} < 2 \text{tg} \theta_2 - \text{tg} \theta_1$$

3.4.1 Estimativa do coeficiente de atrito

O teste para cálculo do coeficiente de atrito pode ser feito criando-se um plano inclinado com uma placa de ABS e posicionando um bloco também de ABS sobre essa superfície inclinada. O ângulo de inclinação da placa deve ser gradualmente aumentado até o momento imediatamente antes que o bloco

comece a deslizar. Com base no diagrama de corpo livre do bloco (Fig. 3.22) é possível determinar o coeficiente de atrito μ_{din} .

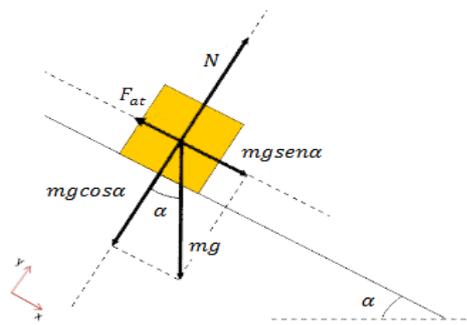


Figura 3.22 – Diagrama de corpo livre do bloco

$$\sum F_x = F_{at} - F_x = \mu N - mgsen\alpha = 0 \rightarrow \mu_{est} = \frac{mgsen\alpha}{N} \quad (8)$$

$$\sum F_y = N - mgcos\alpha = 0 \rightarrow N = mgcos\alpha \quad (9)$$

$$\text{Logo, } \mu_{est} = \frac{mgsen\alpha}{mgcos\alpha} = tg\alpha$$

3.4.2 Estimativa de folgas

Em sistemas biela-manivela o bloco deslizando deve apresentar a menor resistência possível ao deslocamento. Para suprir essa condição deve-se fazer um sistema com coeficiente de atrito baixo e com folga pequena o suficiente para não permitir sua inclinação no interior das guias, já que este efeito pode acabar causando travamento do sistema. No caso do mecanismo proposto, não só o bloco deslizando deve atender a esses requisitos como também as ligações entre o suporte da aba e a aba. O modo mais fácil de garantir o não travamento na ligação é impor que a espessura do rasgo da face por onde ela irá se deslocar seja maior do que o deslocamento que ela teria com o giro máximo do suporte da aba.

Pode-se encontrar uma razão entre a folga do ressalto inferior do suporte da aba em relação às guias e a folga dos pinos de ligação (aba-suporte da aba) nos rasgos da face. Essa relação é alcançada por trigonometria básica e proporcionalidade.

Sendo:

f_1 = folga da parte do ressalto inferior do suporte da aba em relação às guias;

f_2 = folga entre os pinos de ligação às abas e os rasgos da face;

r_1 = distância entre o centro de rotação e a extremidade do ressalto = 6,403 mm

$r_2 = \text{dist\~ancia entre o centro de giro e os pinos do suporte} = 10,012 \text{ mm}$

temos que:

$$f_1 = f_2 \cdot r_1 / r_2 \quad (10)$$

Assim é possível dimensionar o rasgo da face de modo que os pinos de ligação não entrem em contato com estes, em função da folga entre as guias e o ressalto inferior do suporte da aba.

3.4.3 Cálculo dos esforços em cada componente

Os diagramas de corpo livre foram feitos para o mecanismo que assume a posição interna na conexão, totalmente estendido. Como condições de contorno, foram desprezados o atrito e as folgas entre os componentes. As setas ilustradas na cor verde representam carregamentos distribuídos.

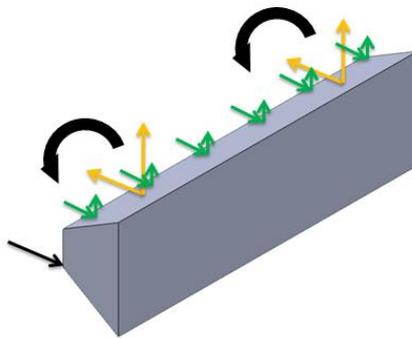


Figura 3.23 – Diagrama de corpo livre da aba

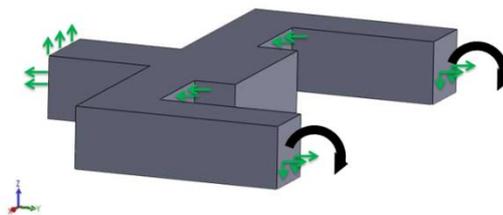


Figura 3.24 – Diagrama de corpo livre do suporte da aba

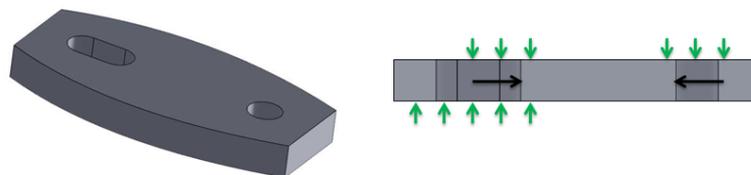


Figura 3.25 – Diagrama de corpo livre da haste

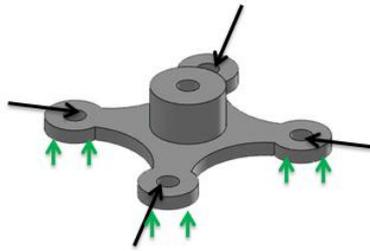


Figura 3.26 – Diagrama de corpo livre da cruzeta

3.5 MOTOR

Foi tomada a decisão de se adotar servomotores para a conexão dos módulos do protótipo ErekoBot β-4. A escolha traz duas principais vantagens em relação aos motores de passo. A primeira é que servomotores funcionam com uma rotação contínua suave, ao invés de passos discretos como no caso do motor de passo – motivo das vibrações. A segunda vantagem é que servomotores têm torques altos – garantindo o torque necessário para o ajuste da conexão dos módulos, quando desalinhados.

Para o projeto do protótipo de conexão do ErekoBot β-4, baseado na experiência obtida no uso de motores nos protótipos anteriores, foi selecionado o modelo Micro-servo Turnigy TG9 (Fig. 3.28), com 9g de peso, capacidade de torque de 1,6 kg-cm e dimensões de 23 mm x 11mm x 29 mm. Este motor operará rotacionando um ângulo de 57° em apenas um sentido e retornando à posição inicial, sob uma temperatura entre -30°C e 60°C.

Este motor selecionado é capaz de transmitir força para as abas de modo a permitir que estas consigam mover o outro módulo a elas conectadas, permitindo um auto ajuste da conexão. Esta afirmativa é válida para o caso do coeficiente de atrito (μ) seja menor que 0,3. O equacionamento a seguir demonstra a capacidade do motor.

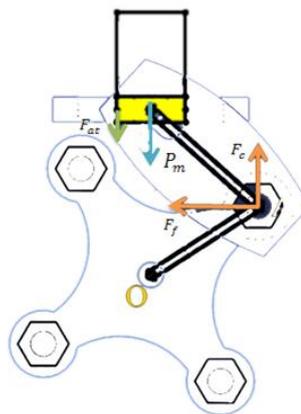


Figura 3.27 – Ilustração para o cálculo da requisição do torque do motor

$$F = F_y + F_x \quad (11)$$

$$F = F \cdot \cos 57^\circ + F \cdot \sin 57^\circ \quad (12)$$

A força F_y deve ser capaz de suportar um módulo (250g \rightarrow 2,45N) e ainda sobrepujar a força de atrito (F_{at}), sendo estas da ordem de

$$F_{at} = F_x \cdot \mu \quad (13)$$

Assim

$$F_y \geq 2,45 + F_{at} \quad (14)$$

Com μ menor que 0,3 temos a necessidade de $F \geq 8N$, o que no caso do braço utilizado significa um torque $\geq 1,5\text{kgf.cm}$.

Inicialmente o motor será colocado diretamente ligado à cruzeta.



Figura 3.28 – Motor

4 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Os componentes do mecanismo foram construídos em plástico ABS por uma máquina de prototipagem rápida da MakerBot Industries, modelo “Cupcake CNC”, disponibilizada pelo grupo Ereko (Fig. 4.1).

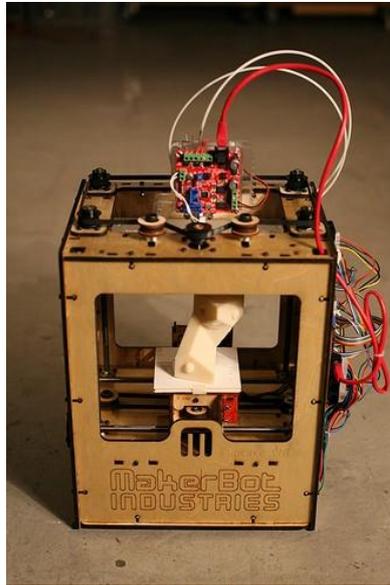


Figura 4.1 – Máquina “Cupcake CNC” utilizada na fabricação do protótipo

Para a impressão de peças na máquina, é necessário que todos os desenhos feitos inicialmente no software SolidWorks 2010, com formato “.sldprt”, sejam convertidos para a linguagem de código-G, extensão reconhecida pela máquina de prototipagem rápida. O código-G é o nome comum da linguagem de programação de máquinas CNC. É uma linguagem de controle de movimento simples, construída no sistema coordenado cartesiano.

A conversão é feita passando necessariamente pela etapa de conversão para o formato “.stl”, que pode ser feita diretamente no SolidWorks. Após essa primeira conversão, pode-se alterar o formato do arquivo para código-G, através do programa ReplicatorG.

A construção do protótipo em plástico ABS foi a alternativa escolhida uma vez que não há máquinas-ferramenta disponíveis para as dimensões requeridas para o modelo.

4.1 PLÁSTICO ABS

O plástico ABS é um copolímero composto pela combinação de acrilonitrila, butadieno e estireno. O resultado físico deste copolímero é um material termoplástico rígido e leve, com alguma flexibilidade e resistência na absorção de impacto, muito comum na fabricação de produtos moldados para usos diversos. Esta resina sintética termoplástica pode assumir qualquer forma, por moldagem

térmica a altas temperaturas. Outra vantagem do ABS é a excelente relação de preço qualidade, o que o torna um produto desejável: econômico e eficaz.

Como os termoplásticos em geral ele possui elevada resistência ao impacto, mas fácil processamento e maior capacidade de adaptação a projetos de natureza complexa do que os termofixos. O ABS, embora muito tenaz, duro e rígido, possui boa resistência química, baixo índice de absorção de água e, portanto, bastante estabilidade dimensional. Oferece ainda um bom equilíbrio entre resistência à tração, ao impacto e à abrasão, dureza superficial, rigidez, resistência ao calor, resistência química e características elétricas, além de manter suas propriedades em baixas temperaturas.

Os polímeros de ABS são resistentes a alcalinos, ácidos aquosos, ácidos hidrocloreto e fosfórico concentrados, alcoóis e óleos animais, vegetais e minerais, mas são inchados por ácido acético glacial, que é o componente ácido do vinagre, tetracloreto de carbono e hidrocarbonetos aromáticos; são atacados pelos ácidos sulfúrico e nítrico concentrados; e são ainda solúveis em ésteres, cetonas, de que a acetona é um exemplo, e organoclorado de etileno.

O ABS é inflamável quando exposto a altas temperaturas, como as da combustão de madeiras numa fogueira; começa por atingir a fervura e depois rebenta em intensas e espetaculares chamas quentes.

As características de impacto das resinas ABS são excepcionais à temperatura ambiente, e em determinados tipos de resinas chegam a resistir às temperaturas baixas de -40°C .

Sua faixa de utilização recomendável é em temperaturas entre 25°C negativos e 60 positivos, mesmo considerando que suas características mecânicas são alteradas em função da temperatura, devido ao fato de que a resistência ao impacto não decresce rapidamente em baixas temperaturas e a estabilidade sobre carga é excelente com cargas limitadas.

4.2 AJUSTES NA CONSTRUÇÃO

Após a impressão 3D de todos os componentes do protótipo pela máquina de prototipagem rápida, alguns ajustes foram realizados com a finalidade de facilitar a montagem e o funcionamento do mecanismo como um todo (Fig. 4.2).

A face teve o furo central e os rasgos lixados para melhor encaixe da cruzeta e dos suportes das abas, assim como as guias também foram lixadas para um melhor acabamento e melhor encaixe dos ressaltos inferiores do suporte da aba.

O suporte da aba possuía pinos de encaixe que deveriam necessariamente ser cilíndricos para se encaixarem nos furos de 3mm de diâmetro da haste. Como a máquina de prototipagem rápida não foi

capaz de reproduzir com precisão componentes cilíndricos de pequenas dimensões, os pinos do suporte da aba foram impressos quadrados e arredondados manualmente através de lixamento.

As abas tiveram suas superfícies superiores cobertas com um pedaço de espumas de copolímero etileno-acetato de vinila (EVA), material que garante permite maior superfície de contato entre as abas, durante a conexão, necessário devido à presença das folgas entre os componentes que inclinam o suporte da aba e conseqüentemente a aba.

Os furos da cruzeta e das hastes foram feitos com furadeira e broca de 3mm de diâmetro.

O acabamento de todas as peças fabricadas foi feito com lixas. Algumas peças tiveram sua superfície pintada com esmalte incolor, a fim de proporcionar um melhor acabamento superficial.

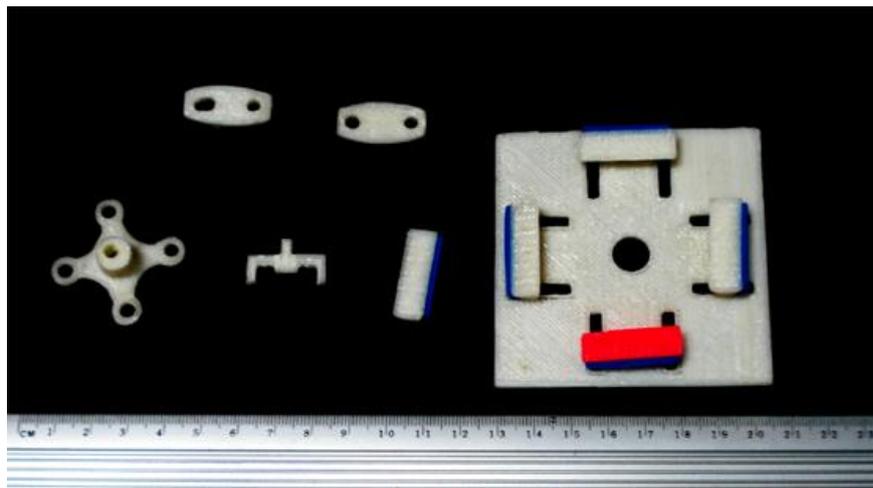


Figura 4.2 – Peças fabricadas em plástico ABS

4.3 MONTAGEM

Primeiramente, foram conectadas as hastes à cruzeta por meio de parafusos e porcas. Os parafusos funcionam como pinos. As porcas são coladas em uma posição adequada a fim de impedir o afrouxamento das ligações (Fig. 4.3).

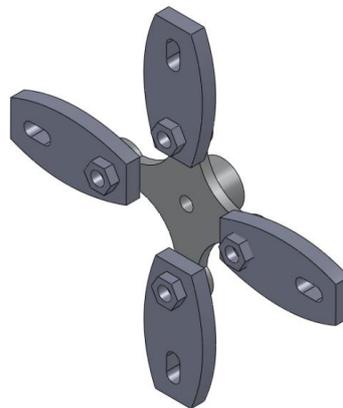


Figura 4.3 – Primeiro passo da montagem

Em seguida, os suportes das abas foram posicionados na face e colados às abas com o uso de éster de cianoacrilato (SuperBonder®) (Fig. 4.4).

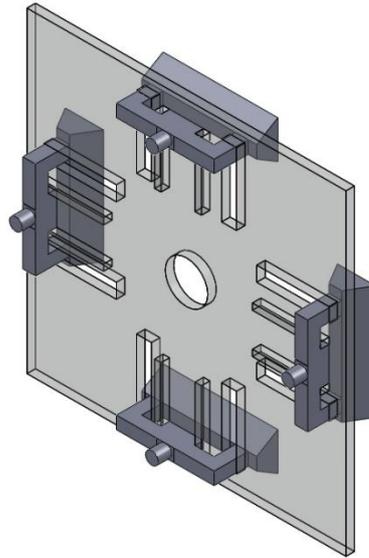


Figura 4.4 – Segundo passo da montagem

O ressaltado cilíndrico da cruzeta foi posicionado no furo central da face e afixado colando-se uma placa plana de plástico no ressaltado do outro lado da face (Fig. 4.5).

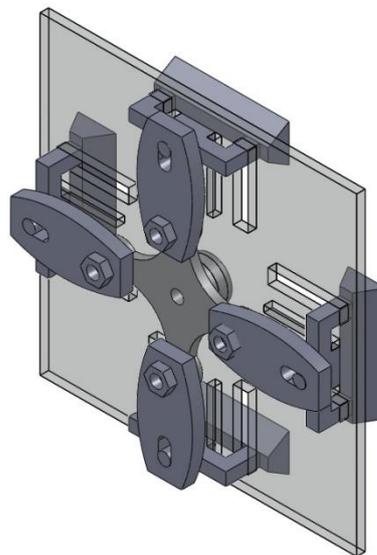


Figura 4.5 – Terceiro passo da montagem

Os pinos dos suportes das abas foram encaixados nos furos das hastes e a conexão entre eles garantida colando-se um pequeno pedaço de plástico ABS na parte superior do pino de cada suporte, para prender o pino à haste e ao mesmo tempo permitir a sua rotação (Fig. 4.6).

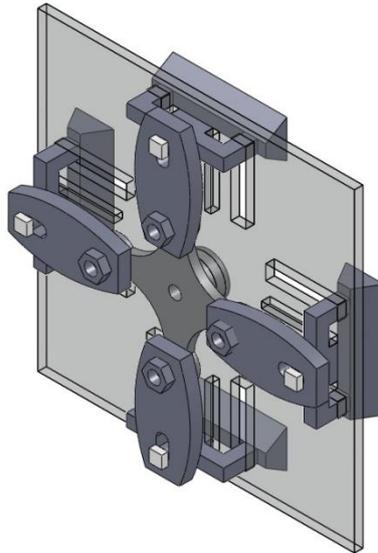


Figura 4.6 – Último passo da montagem

4.4 TESTES E ANÁLISE DE RESULTADOS

Dois mecanismos iguais foram construídos para testar as características teóricas propostas no desenvolvimento do projeto.

4.4.1 Ensaio de funcionamento

O ensaio consiste em acoplar o servomotor selecionado à cruzeta de uma das faces e ligá-lo à fonte de energia. O ângulo de movimentação máximo do motor ($\theta_{1_{máx}}$) esperado é de 57° .

Verificou-se que o motor girava sem atuar continuamente no mecanismo, resultando em um ângulo de rotação muito maior que o esperado para abrir completamente o sistema.

Ainda que um acabamento tenha sido feito em todas as peças, estas possuíam uma superfície irregular e rugosa. As rugosidades presentes nas guias e no ressalto inferior do suporte da aba dificultaram o deslizamento adequado destas peças entre si. Além disso, em alguns casos, a folga resultante entre esses dois componentes foi excessiva, causando uma pequena rotação do suporte da aba dentro dos rasgos e travando o movimento.

Outras folgas que afetam o funcionamento do mecanismo são as dos encaixes entre parafusos, cruzetas e hastes, e entre os pinos dos suportes das abas e o rasgo das hastes. Estas folgas permitem um movimento angular do suporte da aba no eixo da conexão com a haste.

Foi percebida uma ligeira folga entre haste e a extremidade colada, que garante a fixação do pino da parte superior do suporte da aba à haste, mencionada no último passo da montagem (Seção 4.3). Essa folga também altera a angulação do suporte da aba em relação à face, fazendo com que as abas

que irão se conectar não estejam em posição de paralelismo, dificultando a movimentação do mecanismo e impossibilitando a aplicação da função de auto-ajuste das abas.

Todos esses fatores, agrupados, foram responsáveis pela atuação não-contínua do motor, conforme mencionado inicialmente.

4.4.2 Ensaio de erro de posicionamento inicial

Os ensaios descritos nesse tópico têm a função de obter resultados qualitativos para haver uma comparação com outros sistemas. Não foi possível realizar um teste quantitativo, pois o motor do mecanismo não atua de forma adequada, sendo este acionado manualmente. Assim, os resultados aqui obtidos com a utilização de um paquímetro digital vislumbram apenas dar uma noção dos valores que poderiam ser obtidos em uma situação real.

O primeiro ensaio de posicionamento mediu a distância máxima entre as faces que ainda permite a conexão (Fig. 4.7). Foram feitas cinco medições, posicionando as faces paralelas frente a frente, simulando o comando de conexão entre faces. As medições foram feitas utilizando as duas faces construídas e um paquímetro digital. Os resultados foram resumidos na Tabela (4.1).

Tabela 4.1 – Distanciamento máximo entre faces para conexão em milímetros

	Distanciamento
Medida 1	4,8
Medida 2	3,9
Medida 3	4,5
Medida 4	3,7
Medida 5	4,0
Média	4,2
Desvio padrão	0,4

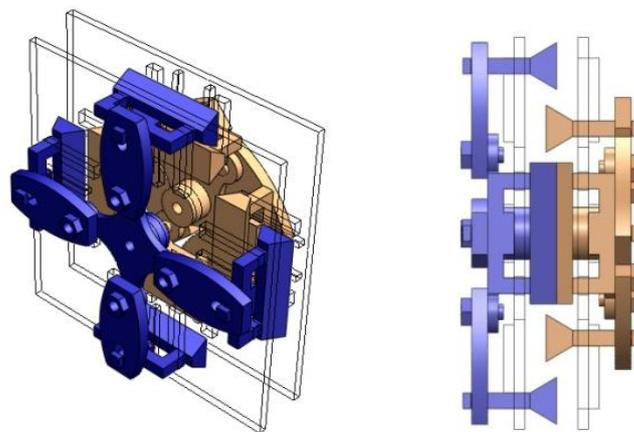


Figura 4.7 – Vista isométrica e esquerda das faces

O segundo ensaio de posicionamento mediu o erro tolerável de translação do alinhamento das faces (Fig. 4.8) em todas as quatro direções possíveis, obtendo os resultados mostrados na Tabela (4.2).

Tabela 4.2 – Translação do alinhamentos das faces em milímetros

	Direção 1		Direção 2	
	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2
Medida 1	2,8	3,9	3,2	4,0
Medida 2	3,0	3,7	3,0	3,3
Medida 3	3,6	3,0	2,8	3,5
Medida 4	3,1	3,5	3,0	3,0
Medida 5	3,1	2,8	3,4	3,9
Média	3,1	3,4	3,1	3,5
Desvio padrão	0,2	0,4	0,2	0,4

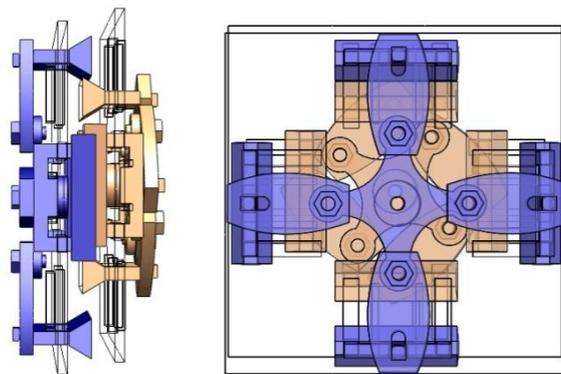


Figura 4.8 – Vista lateral e frontal das faces transladadas

A distância média de translação entre as faces obtida com os ensaios foi de 3,32 mm e o espaço médio entre as faces dos módulos foi de 4,24 mm, medidas satisfatórias quando comparadas aos erros admissíveis pelo mecanismo considerado como mais avançado atualmente, o M-Tran III, que é de até 5 mm de translação entre uma face e outra e 2 mm de distância entre as faces.

4.4.3 Ensaio de resistência mecânica dos componentes

Para realizar os testes de esforços mecânicos foi colado um suporte de madeira em um dos mecanismos para que fosse possível colocar um peso de 250 gramas, em um ponto afastado das faces, a ser suportado pelo mecanismo. O suporte de madeira tem massa total de 120 gramas e comprimento de 180 mm.

O teste de resistência mecânica foi feito na posição vertical, para simular uma tentativa de desacoplamento entre os módulos, e na horizontal, simulando um módulo segurando outros dois em

balanço. A Figura (4.9) ilustra o ensaio vertical de resistência. As Figuras (4.10) e (4.11) ilustram o ensaio horizontal de resistência.

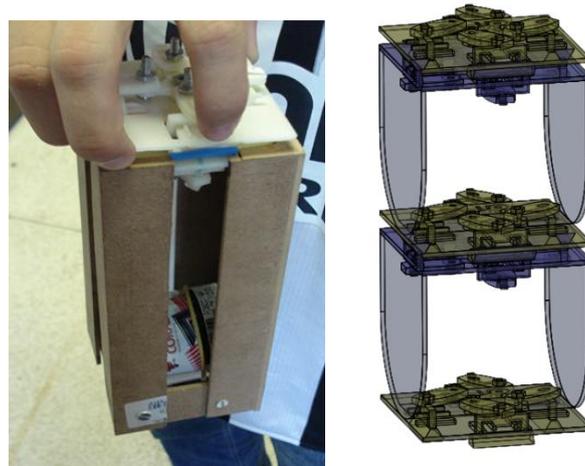


Figura 4.9 – Foto e desenho do ensaio vertical de resistência

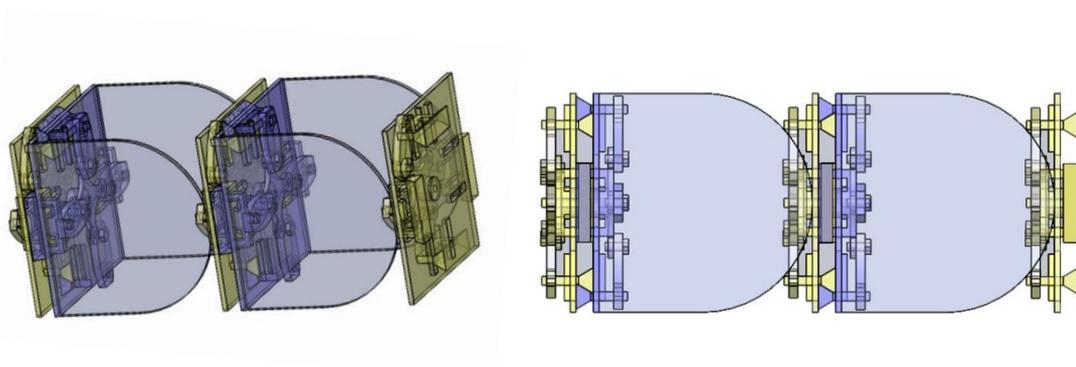


Figura 4.10 – Vista isométrica e esquerda de dois módulos conectados

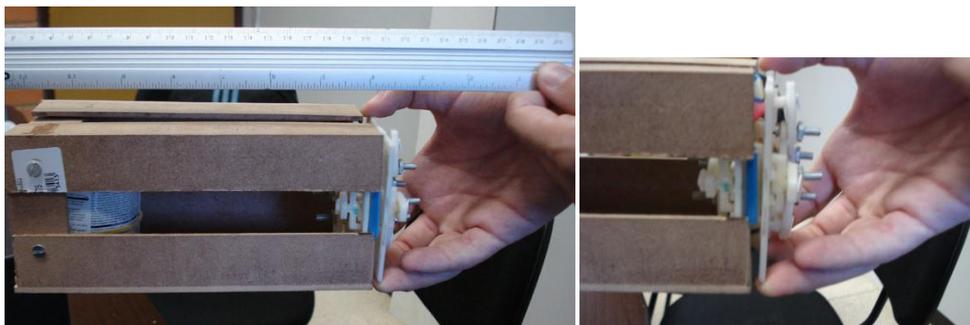


Figura 4.11 – Fotos ilustrativas do ensaio de balanço

Cada módulo do ErekoBot β -5 pesa em torno de 250 gramas e 15 cm de comprimento. Assim, foi posicionada uma pequena lata de 250 gramas a 15 cm de distância da conexão entre faces, a fim de simular o carregamento de um segundo módulo acoplado. Cargas equivalentes a dois módulos

conectados são suficientes para a validação do teste, uma vez que é o requisito máximo do motor principal dos módulos do ErekoBot β -5.

As Figuras (4.12) e (4.13) representam o diagrama de corpo livre e diagrama de momento fletor de um módulo suportando dois outros, considerando sua carga como centrada e pontual. As Figuras (4.14) e (4.15) representam os diagramas da situação utilizada nos testes horizontais.

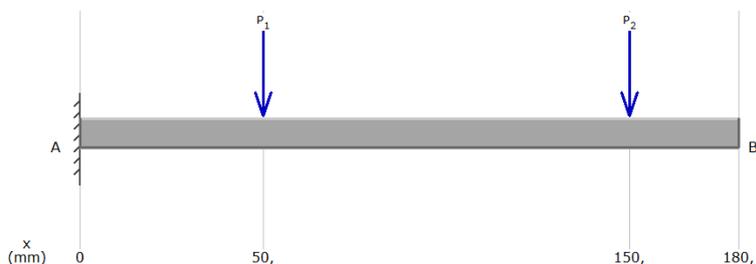


Figura 4.12 – Diagrama de corpo livre, conexão suportando dois módulos em balanço

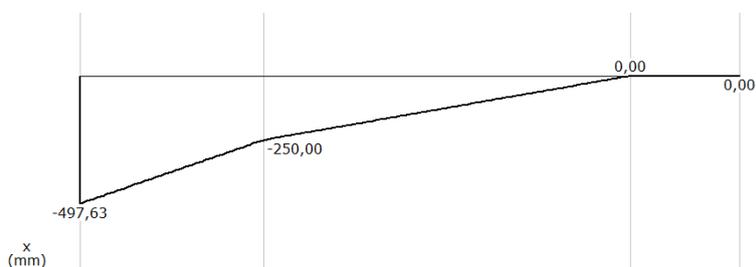


Figura 4.13 – Diagrama de momento fletor, conexão suportando dois módulos em balanço

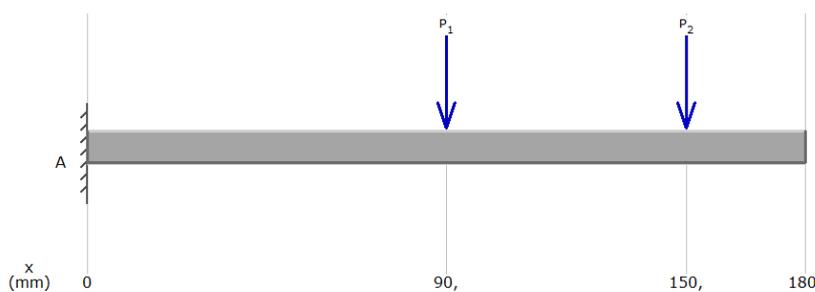


Figura 4.14 – Diagrama de corpo livre, situação de teste

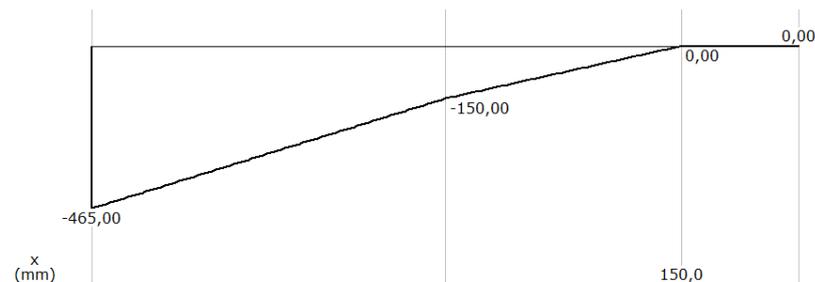


Figura 4.15 – Diagrama de momento fletor, situação de teste

Entre os resultados positivos comprovados com o teste do protótipo do mecanismo está a aplicabilidade do sistema baseado em biela-manivela, onde um mecanismo é rotacionado, fazendo com que corpos conectados a ele executem uma trajetória retilínea. A aplicabilidade de um mecanismo transgênero também foi validada. Além disso, nos testes de resistência mecânica, vertical e horizontal, o mecanismo suportou os esforços, valendo ressaltar que no teste horizontal pode-se ver um pequeno deslocamento entre as abas, devido às folgas indesejadas.

5 CONSTRUÇÃO DO SEGUNDO PROTÓTIPO

Com base na análise dos resultados obtidos com o primeiro protótipo construído, e detalhada no capítulo 4, um segundo protótipo foi elaborado em maior escala para validar o funcionamento do mecanismo proposto. Um mecanismo maior tem uma tolerância dimensional maior aos erros de fabricação, uma vez que a razão entre suas dimensões e os erros será maior e sua fabricação passa a ser viável em material metálico utilizando os recursos da oficina do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília.

Em função destas condições é possível obter o acabamento superficial dos componentes melhorado.

Os desenhos técnicos de cada componente referidos no presente capítulo estão no Anexo II, ao final do projeto.

5.1 CONSTRUÇÃO

Os equipamentos utilizados durante a construção foram a Fresadora Universal WMW, modelo FUW 315 x 800/1 (Fig. 5.1), a furadeira de coluna Motomil, modelo FC-250 (Fig. 5.2), e novamente a Máquina “Cupcake CNC” de prototipagem rápida em plástico ABS.



Figura 5.1 – Fresadora Universal WMW FUW 315 x 800/1



Figura 5.2 - Furadeira de Coluna Motomil FC-250

Duas faces foram construídas em chapas de alumínio de 200 mm x 200 mm x 2 mm e, após marcação, furadas com a fresadora, criando os rasgos onde deslizam os suportes das abas. As guias foram fabricadas com blocos de alumínio de 20 mm x 10 mm x 4 mm (Fig. 5.3), posicionadas e coladas sobre a face inicialmente com Araudite (Fig. 5.4). O furo central da face foi feito com o auxílio da furadeira de coluna.



Figura 5.3 – Guias fabricadas em blocos de alumínio

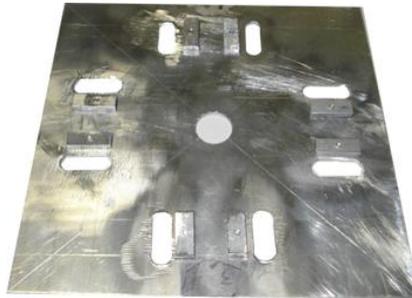


Figura 5.4 – Foto da face com rasgos e guias posicionadas

Os suportes das abas foram construídos também em alumínio, partindo de blocos retangulares de 10 mm x 10 mm x 80 mm. Estes foram fresados em seus cantos inferiores a fim de adquirir o formato desejado para os componentes (Fig. 5.5). Os chanfros dos ressaltos inferiores foram feitos com o auxílio de uma lima.



Figura 5.5 – Blocos antes e depois de fresados

Os furos nos suportes da aba devem ter posicionamento idêntico aos das abas, uma vez que são interligados por um pino que deve ser ortogonal a ambos os componentes. Devido a isto, os furos foram realizados posicionando uma aba sobre seu respectivo suporte, coincidindo suas arestas laterais inferiores, sendo esta situação garantida por parafusos de pressão. As abas, construídas em ABS, já possuíam os furos em suas faces, facilitando e guiando o processo de realização dos furos nos suportes das abas.

O material da cruzeta, das hastes e das abas foi mantido o mesmo do protótipo anterior, ou seja, plástico ABS, visando a diminuição do tempo de fabricação do sistema (Fig. 5.6). Além disso, devido às propriedades mecânicas do material e análise anterior do mecanismo, a utilização de plástico ABS nesses componentes não compromete a resistência do mecanismo.



Figura 5.6 – Cruzeta, hastes e abas construídas em plástico ABS

5.2 AJUSTES NA CONSTRUÇÃO

A colagem com Araidite das guias de metal na face não foi eficaz. Por falta de precisão nos posicionamentos das guias, houve a necessidade de auxílio de limas e lixas para conseguir espaço suficiente para o deslizamento correto dos suportes das abas. A execução desses tratamentos acabou por descolar as guias da face.

Assim, como solução, optou-se por furos passantes na face e roscas nos blocos de metal que formam as guias. Para que as cabeças dos parafusos não atrapalhassem o deslocamento das abas, os furos na face foram chanfrados, permitindo que estes ficassem embutidos. Como complemento à fixação, os blocos das guias também foram colados à face com éster de cianoacrilato (SuperBonder®). Deste modo, as guias são firmemente posicionadas e podem receber os tratamentos devidos.

Além disso, todos os furos dos componentes construídos em plástico ABS foram melhorados com o auxílio da furadeira de coluna. O acabamento superficial das peças foi aperfeiçoado com o uso da fresadora.

5.3 MONTAGEM

O primeiro passo foi conectar as hastes à cruzeta (Fig. 5.7).

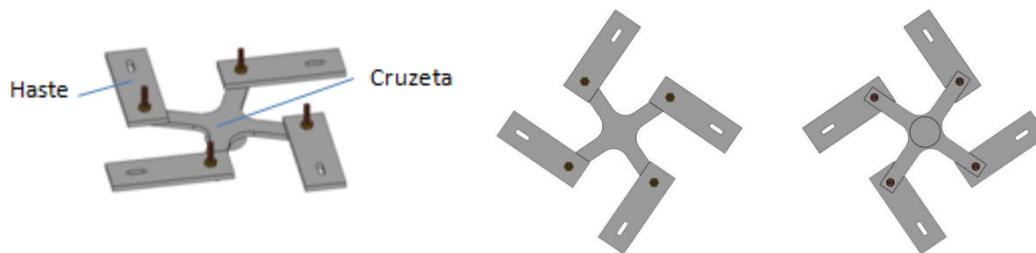


Figura 5.7 – Primeiro passo da montagem – Vistas isométrica, superior e inferior

Em seguida, os suportes das abas foram posicionados na face e fixados às abas. Foram posicionadas duas porcas, uma acima e outra abaixo do suporte da aba para garantir melhor posicionamento dos componentes (Fig. 5.8). Nesse momento, aproveitou-se para posicionar os parafusos centrais dos suportes das abas, para posterior conexão com as hastes.

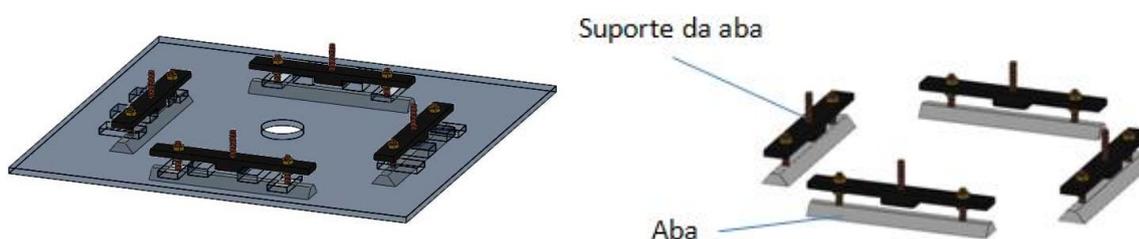


Figura 5.8 – Segundo passo da montagem – Detalhe da montagem com a face suprimida

O ressalto cilíndrico da cruzeta foi posicionado no furo central da face e os parafusos dos suportes das abas, posicionados na etapa anterior da montagem, foram encaixados nos furos das hastes. A conexão entre eles foi garantida por porcas, com o mínimo de folga possível em relação à superfície da haste, garantindo que o parafuso ainda gire (Fig. 5.9).

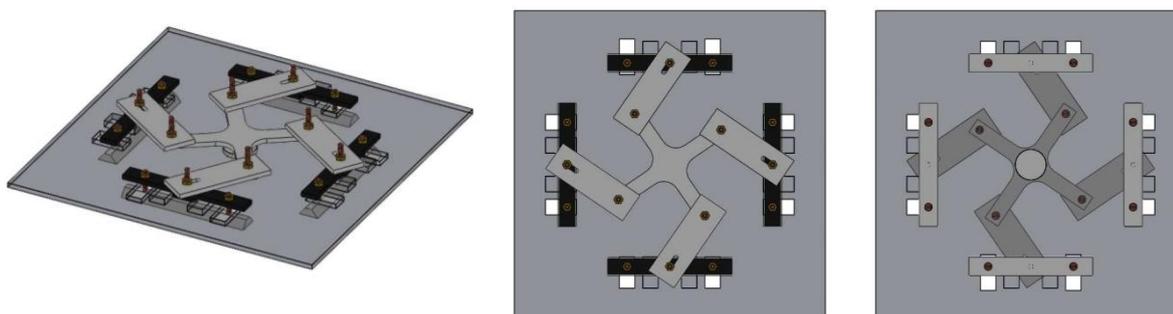


Figura 5.9 – Último passo da montagem - Vistas isométrica, superior e inferior



Figura 5.10 – Mecanismo montado, sem o motor

Todas as uniões de componentes foram feitas com o auxílio de parafusos, porcas e arruelas. Como realizado no primeiro protótipo, as porcas foram coladas em uma posição adequada a fim de impedir o afrouxamento das ligações. Além disso, o mecanismo do segundo protótipo teve suas partes móveis e regiões de deslizamento lubrificadas com vaselina, para facilitar a movimentação dos componentes, diminuindo o atrito entre eles.

5.4 MOTOR

O motor proposto durante o desenvolvimento do mecanismo 3 não foi capaz de movimentar o segundo protótipo de maneira eficiente como esperado. O novo protótipo possui o dobro do peso do protótipo anterior, demandando maior torque para seu funcionamento. Desta forma, este foi substituído por um motor de maior capacidade de torque. O novo modelo é o Servo Hextronik - HX12K que precisa de uma fonte de alimentação de 5~7 volts, pesa 55 gramas e possui um torque de 10 kg-cm, mais de seis vezes maior que o anterior (Fig. 5.11).



Figura 5.11 – Motor selecionado

O motor foi acoplado à cruzeta do mecanismo com éster de cianoacrilato (SuperBonder®) (Fig. 5.12). Além disso, é necessária a fixação deste a uma parte não móvel do mecanismo para que o motor não gire junto com o sistema de conexão quando em funcionamento. Desse modo, foi fixada uma haste de metal ao motor, sendo esta posteriormente conectada á face por parafusos em posições que não interferem a movimentação do mecanismo, como ilustrado na Figura (5.13).

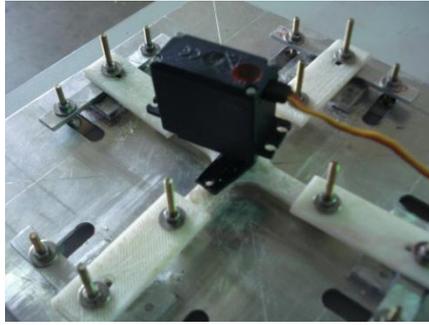


Figura 5.12 – Motor acoplado à cruzeta



Figura 5.13 – Motor fixado à face

Concluída essa etapa construtiva, passa-se ao ensaio de funcionamento do mecanismo.

5.5 ENSAIO DE FUNCIONAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Após a construção das duas faces de conexão, foi realizado um primeiro ensaio de funcionamento dos mecanismos. A cada uma das cruzetas foi fixado um servomotor do modelo selecionado, e estes foram ligados à fonte de energia com operação entre 4,6~6,0 volts (Fig. 5.14).

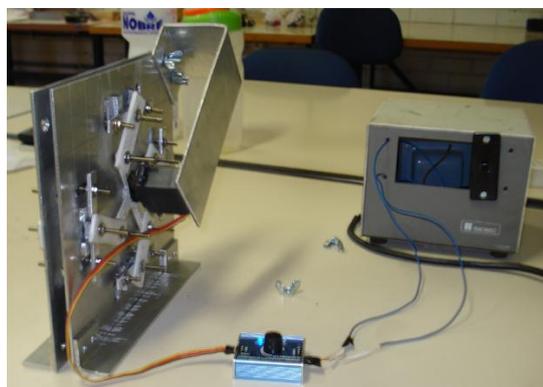


Figura 5.14 – Faces em posição de conexão com motor ligado à fonte de energia

O motor foi capaz de realizar o movimento do sistema de conexão com facilidade, fato que não havia acontecido durante o teste do primeiro protótipo.

Devido às maiores dimensões deste protótipo, e tendo a fabricação um acabamento feito com a fresadora nas peças, juntamente com o auxílio da vaselina como lubrificante, foi possível a movimentação e deslizamento de todos os componentes. As folgas antes existentes entre as partes foram minimizadas em relação ao primeiro protótipo, ficando dentro do limite admissível para um correto funcionamento do mecanismo.

Após o primeiro teste de funcionamento, as faces foram posicionadas frente a frente e uma simulação de conexão foi feita com os motores encarregados da movimentação do mecanismo.

Os resultados deste teste foram bastante satisfatórios. As faces se conectaram e assim permaneceram, passivamente, sem a necessidade da atuação do motor após efetuada a conexão.

O sucesso dos ensaios realizados é devido principalmente à diminuição do giro do suporte da aba. Esta diminuição é devida não apenas a uma folga menor, mas também ao fato do ressalto inferior do suporte possuir maior comprimento. O giro máximo é inversamente proporcional ao comprimento do ressalto inferior do suporte da aba, para uma folga constante. Essa relação é obtida através da equação de comprimento de arco de circunferência.

$$c = \theta . r \tag{14}$$

onde o comprimento de arco (c) é a folga presente, θ é o giro máximo do suporte da aba entre as guias, em graus, e r o comprimento do ressalto inferior.

Os ensaios de erro de posicionamento inicial e de resistência mecânica dos componentes não foram necessários nesta fase do projeto por já terem sido previamente realizados e validados durante o estudo do primeiro protótipo. Cabe observar que a construção de um segundo protótipo visou validar apenas o funcionamento do mecanismo, objetivo que havia sido comprometido pelo método de fabricação do primeiro protótipo.

6 PROPOSTA DO PRODUTO FINAL

Após a construção e teste de funcionamento do segundo protótipo, percebeu-se a necessidade de algumas alterações nas geometrias e dimensões de alguns componentes, a fim de garantir o funcionamento adequado e esperado do mecanismo.

A proposta final do mecanismo desenvolvido é apresentada a seguir.

6.1 GEOMETRIA DAS PEÇAS

A maioria das peças dos mecanismos mantém a geometria proposta na construção do primeiro protótipo, caso da face, da cruzeta e das hastes. Os suportes das abas e as abas foram modificados para um melhor deslizamento das peças e melhor funcionamento do mecanismo.

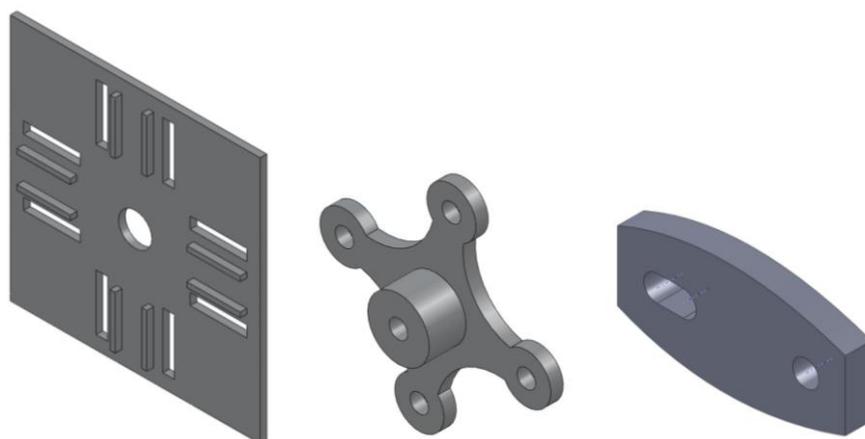


Figura 6.1 – Proposta final de face, cruzeta e haste

As ligações entre o suporte da aba e a aba devem ser feitas por parafusos e porcas para garantir melhor fixação e não rompimento do mecanismo. As abas têm furos para o encaixe dos parafusos conectados ao suporte da aba, que agora correriam pelos rasgos. Os parafusos têm a cabeça posicionada nas abas, chanfradas, e porcas fixadas na parte superior do suporte da aba.

A Figura (6.2) ilustra a aba, agora furada, e o suporte da aba, sem suas hastes, substituídas pelo corpo do parafuso. A Figura (6.3) ilustra o suporte da aba modificado.

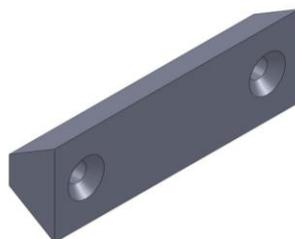


Figura 6.2 – Proposta final de aba

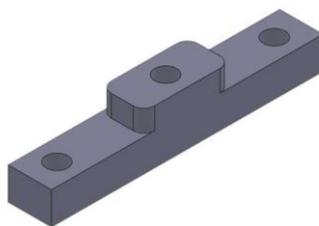


Figura 6.3 – Proposta final de suporte da aba

Os desenhos técnicos de todos os componentes propostos nesse capítulo estão no Anexo III, ao final do trabalho.

6.2 TOLERÂNCIA DAS PEÇAS

As tolerâncias foram escolhidas com base no sistema de tolerâncias e ajustes ABNT/ISO (NBR 6158). O sistema ISO consiste num conjunto de princípios, regras e tabelas que possibilita a escolha racional de tolerâncias e ajustes de modo a tornar mais econômica a produção de peças mecânicas intercambiáveis.

Os ajustes utilizados foram ajustes com folga. Portanto, as dimensões máximas dos eixos deveriam ser menores que as dimensões mínimas dos furos.

A norma brasileira prevê 16 qualidades de trabalho. Essas qualidades são identificadas pelas letras IT seguidas de numerais. A cada uma delas corresponde um valor de tolerância. A Figura (6.4) representa as qualidades de trabalho para eixos e furos.

		Qualidade de Trabalho																	
		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16
Eixos		mecânica extra-precisa					mecânica corrente						mecânica grosseira						
Furos		mecânica extra-precisa					mecânica corrente						mecânica grosseira						

Figura 6.4 – Qualidades de Trabalho

Para o mecanismo proposto, a qualidade de trabalho escolhida foi a de mecânica corrente, que se adéqua aos ajustes preferenciais. A qualidade de trabalho escolhida foi a IT9. Assim, é possível discriminar a folga entre as partes do mecanismo.

Utilizando um ajuste do tipo correção livre, tem-se uma requisição de desvios fundamentais da classe H9/d9 (Shigley, 2006). Na parte de deslizamento do suporte da aba entre as guias, esses parâmetros foram adaptados como situação de furo-eixo.

Os valores obtidos são apresentados nos desenhos técnicos anexados ao trabalho.

6.3 MOTOR

O motor sugerido para o modelo final é o mesmo apresentado na seção 3.5 deste projeto. Ele é fabricado peça Turnigy, modelo TG9e, com capacidade de torque de 1,6 kg-cm. Se encaixa nos requisitos por possuir dimensões pequenas, 23 x 12,2 x 29 mm, e por pesar apenas 9g, ocupando pouco espaço dentro do módulo e diminuindo o peso total do sistema.

Para garantir um funcionamento correto, este deve ser acoplado à cruzeta e fixado a uma superfície não móvel do módulo, como uma das três faces disponíveis, incluindo a face conectora.

6.4 MATERIAIS POSSÍVEIS

O material adequado para a fabricação do mecanismo deve ser leve, de fácil usinagem e possuir uma boa resistência mecânica. Além disso, a movimentação dos componentes metálicos causa um desgaste natural nas peças em contato, sob ação do atrito. No caso do mecanismo proposto, o deslizamento dos ressaltos dos suportes das abas nas guias é o fator gerador de maior desgaste de peças. Para um cálculo de como esse efeito altera as características do mecanismo seriam necessários ensaios de funcionamento repetitivos para assegurar-se como a remoção periódica de material alteraria a geometria dos componentes do mecanismo e seu bom funcionamento.

Por isso, é apropriado que o material escolhido também não se desgaste muito rapidamente durante a utilização repetitiva do mecanismo. A utilização de materiais auto lubrificantes, como o bronze, permitiria a melhora do deslizamento das partes, dando mais suavidade ao movimento e acarretando um menor desgaste. Porém, a utilização desse tipo de material aumentaria os custos do produto.

Assim, o alumínio é uma boa opção de material para fabricação, uma vez que possui boas características de resistência ao desgaste de contato entre peças de mesmo material. Além disso, atende a todos os requisitos previamente citados, é um material leve, de fácil usinagem e com boa resistência mecânica.

Nesse caso, a lubrificação dos componentes pode ser feita com vaselina em pasta, como realizado na construção do segundo protótipo.

6.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Para a construção de um produto final que se adéque às propostas do projeto, a fabricação dos componentes do mecanismo deve ser feita utilizando equipamentos de usinagem de melhor qualidade e precisão que os disponibilizados para o desenvolvimento de um projeto acadêmico.

A solução atual mais indicada para isso seria o uso de uma máquina de usinagem CNC. CNC (“Computer Numeric Control”) é um controlador numérico que permite o controle de máquinas, utilizado principalmente em centros de usinagem. Permite o controle simultâneo de vários eixos, através de uma lista de movimentos escrita num código específico (código G), como utilizado na máquina de prototipagem rápida responsável pela criação do primeiro protótipo.

Um pré-orçamento de fabricação foi feito com a empresa Veloztech – Engenharia de Competição, primeira empresa do DF a disponibilizar serviços de usinagem CNC, totalmente voltada ao público externo. O equipamento disponibilizado para a usinagem é a máquina Feeler-Cosmos FV-1600, que garante a execução de trabalhos com a precisão da ordem de centésimos de milímetros.

O pré-orçamento apontou a necessidade de seis horas de trabalho da máquina de usinagem CNC para a fabricação de todos os componentes do mecanismo. Como a hora de trabalho da máquina custa R\$168,00, o projeto resultaria em um custo total de R\$1008,00. Este valor poderia ser reduzido caso as peças fossem produzidas em série.

Caso o custo total para a fabricação de todos os componentes por uma máquina CNC seja considerado muito alto, para diminuir o custo do produto final, alguns componentes podem ser construídos através de métodos mais baratos.

A cruzeta e as hastes poderiam ser feitas uma fresadora de bancada manual, tendo seus furos e rasgos feitos em uma furadeira de bancada. Mesmo a face e os suportes das abas que necessitam de maior precisão, principalmente na parte de deslizamento, poderiam começar sua usinagem na fresadora manual e ter apenas seu acabamento fino realizado na CNC.

7 CONCLUSÕES

Sistemas de conexão autorreconfiguráveis para robôs modulares ainda são mecanismos que requerem um esforço de pesquisa no sentido de encontrar soluções eficientes, eficazes e de baixo custo.

O presente trabalho propõe um modelo novo de mecanismo de conexão de robôs modulares no qual se introduzem características inexistentes na maior parte dos modelos atuais. O modelo desenvolvido conecta uma face do módulo a qualquer outra face com o mecanismo, independente de orientação macho-fêmea ou posicionamento específico de arestas, sendo caracterizado como transgênero, característica inovadora para sistemas de conexão.

Para a construção do primeiro protótipo foi utilizada a máquina de prototipagem rápida MakerBot. Esta foi considerada uma boa opção para a construção de protótipos, por permitir a concepção, em curto período de tempo, de peças com geometria de difícil usinagem em metal. Todavia, foi verificado que ela apresenta imprecisão de maior ordem que a permitida para o mecanismo, provocando problemas de giro indesejado nos suportes da aba, altos valores de coeficiente de atrito e necessidade de melhor acabamento.

Como consequência da imprecisão das peças obtidas, a aplicabilidade de alguns componentes foi comprometida. O motor selecionado não foi capaz de efetuar a conexão e desconexão devido ao travamento de algumas partes que deveriam deslizar com facilidade, dificultando a aplicabilidade do auto-ajuste proposto entre as peças. Os testes de erro de posicionamento inicial resultaram em valores da ordem dos obtidos por outros modelos existentes e os testes de funcionamento comprovaram a capacidade de conexão do mecanismo proposto.

Foi construído um segundo protótipo, em maior escala, a fim de validar totalmente a aplicabilidade do mecanismo. Este foi fabricado em alumínio, com algumas partes de plástico ABS, e auxílio de equipamentos disponíveis na oficina mecânica da Universidade de Brasília. Os componentes que deslizam sobre outros foram lubrificados com vaselina em pasta.

Para esse segundo protótipo foram feitos apenas ensaios de funcionamento e testes de encaixe entre duas faces, com os motores acoplados. O objetivo era comprovar a capacidade de conexão e operação do sistema quando construído com folgas menores e melhor acabamento. Os resultados mostraram que a nova construção possibilitou a conexão entre as faces com os motores acoplados, como esperado.

Ao final do projeto, um modelo final do mecanismo foi proposto, sugerindo e especificando as dimensões, tratamentos e processos de fabricação necessários para que ocorra um correto funcionamento do mecanismo, com as dimensões adequadas ao módulo do ErekoBot β -4.

É importante ressaltar que o projeto possui alguns pontos fracos. O mecanismo é composto por vários componentes, de dimensões reduzidas, dificultando sua construção. Cada componente necessita de um processo de fabricação de maior precisão, como máquinas CNC, devido às tolerâncias demandadas para seu correto funcionamento. Os furos e rasgos presentes no sistema podem se tornar acumuladores de resíduos indesejados, comprometendo o funcionamento do mecanismo.

Além disso, é necessário um motor para cada face de conexão. Caso fosse desejado mais de uma face conectora por módulo, o espaço interno deste para embarcar os outros componentes ficaria comprometido.

Assim, o mecanismo é uma solução válida para o problema de conexão e desconexão dos módulos, mantendo-os conectados passivamente. Porém possui muitas exigências na fabricação e construção, sendo considerado um sistema de conexão complexo.

Foi possível chegar a um conceito novo na robótica modular abrindo uma nova linha de pesquisa em sistemas mecânicos transgêneros, tornando este trabalho uma base para desenvolvimento de uma solução definitiva na conexão de robôs modulares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carrara, Valdemir, 2007, Apostila de Robótica, Universidade Braz Cubas. Disponível em "<http://www.youblisher.com/files/publications/5/25473/pdf.pdf>". Acessado dia 11/07/2010.
- Eckhardt, Homer D., 1998, "Kinematic design of machines and mechanisms".
- Garcia,R., Stoy,K., 2008,"The Odin Modular Robot: Eletronics and Communication",The Maersk Mc-Kinney Moller Institute, University of Southern Denmark, Odense, Denmark. Disponível em: "<http://www.mip.sdu.dk/~rimen05/Files/GarciaMasterScienceThesis.pdf>". Acessado dia 11/07/2010.
- Kurokawa, H., Tomita, K., Kamimura, A., Kokaji, S., Hasuo, T., Murata, S., 2008, "Distributed Self-reconfiguration of M-TRAN III Modular Robotic System", Intl. J. Robotics Research, 27-3-4:373-386.
- Moeckel, R., Jaquier, C., Drapel, K., Dittrich, E., Upegui, A., Ijspeert, A., 2005, "YaMoR and Bluemove – an autonomous modular robot with Bluetooth interface for exploring adaptive locomotion". Disponível em <http://birg.epfl.ch/page57460-en.html>. Acessado dia 11/07/2010.
- Jantapremjit, P. Austin, D., 2001, "Design of a Modular Self-Reconfigurable Robot", Robotic Systems Laboratory, Department of Systems Engineering, The Australian National University, Canberra, Australia.
- Park, Michael G., 2009, "Configuration Recognition, Communication Fault Tolerance and Self-reassembly for the CKBot", Publicly accessible Penn Dissertations, University of Pennsylvania.
- Salemi, B., Moll, M. and Shen, W., 2006, "SUPERBOT: A Deployable, Multi-Functional, and Modular Self-Reconfigurable Robotic System", Information Sciences Institute, University of Southern California, Marina del Rey, USA.
- Souza, N., Dutra, R., Brito, L., 2010, "Projeto e construção de um robô multiforme", CONEM 2010.
- Yerly, Michael, 2007, "YaMoR Lifelong Learning", University of Fribourg.
- Yim, M., Duff, D. and Roufas, K., 2000, "PolyBot: A modular reconfigurable robot", Proc. Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 514 – 520.
- Yim, M., Duff, D. and Roufas, K., 2003, "Connecting and disconnecting for chain self-reconfiguration with PolyBot", IEEE/ASME Transactions on mechatronics, special issue on Information Technology in Mechatronics.
- Yim, M., White, P., Park, M., Sastra, J., 2007, "Modular Self-Reconfigurable Robots", School of Engineering and Applied Science, University of Pennsylvania, Philadelphia, USA.

ANEXOS

	Pág.
Anexo I	Desenhos técnicos dos componentes do primeiro protótipo
Face	1
Cruzeta	2
Aba	3
Suporte da aba	4
Haste	5
Anexo II	Desenhos técnicos dos componentes do segundo protótipo
Face	6
Cruzeta	7
Aba	8
Suporte da aba	9
Haste	10
Anexo III	Desenhos técnicos dos componentes do modelo final proposto
Face	11
Cruzeta	12
Aba	13
Suporte da aba	14
Haste	15