
Desenvolvimento de um manipulador robótico como ferramenta educacional no ensino tecnológico

Development of a robotic manipulator as an educational tool in technological education

Cynthia Beatriz Scheffer-Dutra

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
cynthia@ifsc.edu.br

.....

Maurício Edgar Stivanello

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
mauricio.stivanello@ifsc.edu.br

.....

Ana Maria Navarro Barbosa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
amnb96@googlemail.com

.....

Wayne Pereira Albuquerque Cavalcanti Pinto

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
waynealbuquerque17@gmail.com

Resumo

No presente trabalho é apresentado o desenvolvimento de um braço articulado ou antropomórfico de cadeia cinemática aberta com juntas do tipo rotativas possuindo três graus de liberdade para seu posicionamento e orientação no espaço. O desenvolvimento do manipulador aborda as três áreas da mecatrônica: mecânica, elétrica e computação. Para a concepção do projeto foi utilizada a metodologia de Projeto de Desenvolvimento Integrado de Produtos que contém as etapas de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado, utilizada na graduação em engenharia e no mestrado profissional. Todo o desenvolvimento de criação, elaboração e avaliação do protótipo foi possível em função do processo ensino-aprendizagem voltado a projetos, onde a formação dos estudantes é realizada de forma prática e interdisciplinar, resultando em algo palpável dentro do contexto tecnológico. O manipulador será acoplado em um robô móvel desenvolvido também em ambiente acadêmico, com o intuito de servir como plataforma de testes para situações de risco e de resgate de seres humanos.

Palavras-chave: Educação tecnológica. Automação. Mecânica. Produto. Robótica pedagógica.

Abstract

In the present work the development of an articulated or anthropomorphic arm of open kinematic chain with rotary joints having three degrees of freedom for its positioning and orientation in space is presented. The development of the manipulator involves the three areas of mechatronics: mechanics, electrical and computation. For the design of the project was used the methodology of Integrated Product Development Project which contains the steps of informational, conceptual, preliminary and detailed design, used in engineering and professional master's degree. All the development of creation, elaboration and evaluation of the prototype was possible due to the teaching-learning process focused on projects, where the students' training is carried out in a practical and interdisciplinary way, resulting in something palpable within the technological context. The manipulator will be coupled in a mobile robot developed also in an academic environment, with the intention of serving as a test platform for situations of risk and rescue of human beings.

Key words: Technologic education. Automation. Mechanics. Product. Robotics.

Introdução

Diante das diversas situações de perigo e desastres naturais em que as equipes de busca e resgate se submetem, o desenvolvimento de robôs urbanos de busca e resgate, *Urban Search and Rescue* (USAR) se tornam cada vez mais necessárias. Eles são robôs teleoperados equipados com sensores, atuadores e controladores que buscam auxiliar no resgate inspecionando o ambiente, retirando destroços do meio do caminho e, em alguns casos, levando suprimentos básicos como água.

Há diversas empresas que se dedicam a desenvolver tais robôs, dentre elas há a *Telerob*, empresa alemã (TELEROB, 2017) e a *Cobham*, empresa britânica (COBRAM, 2017). Há também o centro de pesquisa *Center for Robot-Assisted Search and Rescue* (CRASAR) da Universidade do Texas A&M (CRASAR, 2017) que, segundo ele mesmo “se esforça para direcionar e explorar o desenvolvimento de novas tecnologias em sistemas robotizados e não tripulados a fins humanitários”.

Seguindo por esta linha de pesquisa, com intuito de contribuir para o desenvolvimento de robôs teleoperados, o desenvolvimento de um manipulador robótico a ser acoplado em um robô móvel foi proposto como desafio à alunos de engenharia.

Este robô móvel corresponde a um protótipo experimental equipado com sensores, controladores e atuadores que permitem que o mesmo desempenhe

tarefas de maneira autônoma além de poder ser controlado remotamente por um operador humano. Ele serviu como uma plataforma de testes e aprendizado para o desenvolvimento do braço robótico em questão. Assim como o robô móvel, ele deve ser controlado remotamente e, futuramente, de forma autônoma. O conjunto robô móvel com braço acoplado deve ser capaz de se locomover em superfícies irregulares e subir elevações além de possuir sensores, controladores e atuadores que o auxiliam durante sua movimentação, na detecção do ambiente ao seu redor e nas demais situações em que o mesmo se encontrar. O manipulador robótico desenvolvido deve ser capaz de carregar e movimentar suprimentos, carregar kit de primeiros socorros, abrir portas e retirar escombros que se encontram em seu caminho além de portar sensores que contribuam para seu funcionamento e operação.

Em função dos requisitos que orientam seu desenvolvimento, o conjunto robô móvel com manipulador robótico pode ser considerado um protótipo de um robô de busca e resgate. O seu desenvolvimento foi proposto como prática educativa, interdisciplinar em conformidade com a perspectiva do que deve ser a formação de um engenheiro/mestre preparado para o mundo do trabalho. No presente trabalho é descrito o desenvolvimento específico do manipulador deste robô.

Na seção 2 é descrita a metodologia empregada no desenvolvimento. Na seção 3 é realizada uma descrição geral do manipulador e do estágio atual de desenvolvimento. Na seção 4 são realizadas as considerações finais do trabalho.

Metodologia

O desenvolvimento do manipulador foi realizado seguindo a metodologia de Projeto Integrado de Produto (PRODIP) (BACK et al., 2008) utilizada no ensino de graduação em engenharia e do mestrado profissional como base para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos. Esta metodologia apresenta as etapas de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado. Recorreu-se também a utilização das diretrizes exploradas no livro de “Introdução de projeto de produtos” (CARPES, 2014).

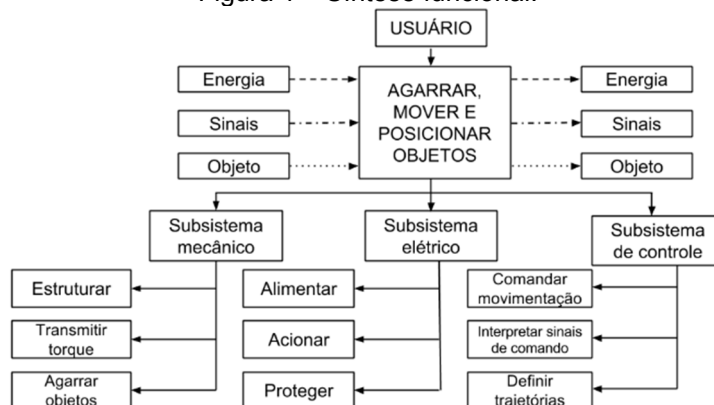
Durante a primeira fase de desenvolvimento (projeto informacional), é dada liberdade aos alunos de pesquisar sobre o tema a fim de avaliar concorrentes e produtos similares, o que permite uma compreensão melhor do problema proposta dando autonomia para propostas de solução. Nesta fase foi abordada a definição do problema, o benchmark e, ao final, os requisitos e as características do manipulador. Foram avaliadas pesquisas relacionadas à área de busca e resgate e outros robôs já existentes desenvolvidos por empresas e instituições de ensino para obter os requisitos de projeto. A partir desta análise, chegou-se aos seguintes parâmetros para o manipulador robótico:

- a) Suportar uma carga máxima de 2,5 kg;
- b) Possuir um comprimento final de ~1,1m;
- c) Possuir, no mínimo, 3 graus de liberdade;
- d) Portar sensores, atuadores e controladores;

- e) Ser controlado remotamente;
- f) Transmitir vídeo em tempo real.

No desenvolvimento do projeto conceitual, são avaliadas funções que o projeto deve desempenhar. Com base nestas funções, elaborou-se a síntese funcional ilustrada na Figura 1. Estipula-se como função global do manipulador: agarrar, mover e posicionar objetos. A partir da função global, tem-se diversas subfunções do manipulador, relacionados aos subsistemas mecânico, elétrico e de controle. A partir das subfunções definidas, desenvolveu-se uma matriz morfológica que aborda as soluções viáveis para a conclusão do projeto. Em seguida, foram elaborados 3 conceitos de manipuladores analisados a partir de requisitos como preço, segurança e precisão com a finalidade de obter qual se adequa melhor ao projeto.

Figura 1 – Síntese funcional.



Fonte: Próprios autores (2017).

Na etapa de projeto preliminar, tem-se o painel do produto e as configurações do manipulador representada a partir do projeto *Computer-aided design* (CAD) desenvolvido. As configurações citadas acima referem-se aos módulos estruturais e de movimentação do manipulador, sendo eles as três juntas rotativas, os elos e a garra.

Por fim, o projeto detalhado contém o memorial de cálculo, o projeto mecânico e seu detalhamento, o projeto elétrico e o sistema de controle. Há também o projeto CAD, os desenhos técnicos, as listas de componentes utilizados e os processos de fabricação realizados.

Para validar o projeto mecânico e o memorial de cálculo, os estudantes fizeram uso de 3 referências principais: “Elementos de máquina de Shigley” (NISBETT; BUDYNAS, 2011), “Projeto de máquinas: uma abordagem integrada” (NORTON, 2013) e “Robótica Industrial” (SANTOS, 2001).

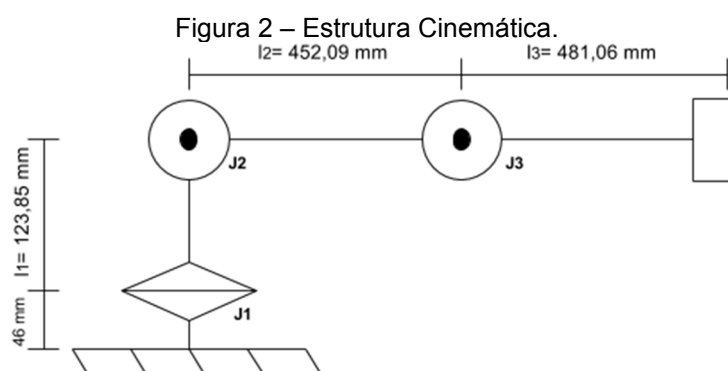
Descrição Geral do Manipulador

Na presente seção são descritas as características gerais do manipulador, o detalhamento do projeto mecânico e o estágio atual de desenvolvimento.

Características Gerais

O manipulador possui um comprimento final de aproximadamente 1,1 metros e suporta uma carga máxima de 2,2 quilos em sua situação mais crítica além de possuir uma massa em torno de 23 quilos. As juntas e a garra são acionadas indiretamente por um atuador e um sistema de transmissão onde os atuadores são motores de passo e o sistema de transmissão são formados por polias sincronizadoras e engrenagens. Seu efetuador final (garra) é do tipo *gripper* com 4 pontos de contato proporcionando assim maior aderência aos objetos apanhados.

A estrutura cinemática e as características gerais e dimensionais do manipulador são ilustradas pela Figura 2.



A primeira junta rotativa é responsável por realizar o movimento de 360° da base giratória do manipulador além de suportar toda a carga gerada pela estrutura mecânica e pelo objeto a ser manipulado. Por conta disso, ela possui o maior torque quando comparado com as demais. Seu acionamento é realizado de forma indireta através de um motor de passo com caixa de redução e seu sistema de transmissão é formado por polias sincronizadoras e engrenagens cônicas.

A segunda junta é capaz de realizar um movimento de aproximadamente 150° devido a sua construção mecânica. Ela é encarregada de movimentar o conjunto de hastes paralelas (representadas pelo elo 2) que distribuem a força resultante do carregamento em dois pontos de apoio não sobrecarregando a estrutura e o sistema de transmissão. Seu acionamento também é realizado de forma indireta através de um motor de passo com caixa de redução. No entanto, seu sistema de transmissão é formado por polias sincronizadoras e um sistema de sem fim e coroa.

Por fim, a terceira junta também realiza um movimento em torno de 150°, no entanto, ela suporta menos carga que as anteriores. É importante ressaltar que o acionamento da junta é realizado de maneira indireta, ou seja, o motor de passo com caixa de redução responsável por realizar seu movimento está localizado na base do manipulador para que essa junta não fique sobrecarregada e também para que o centro de massa fique próximo da base. O sistema de transmissão desta junta é formado por polias sincronizadoras e um conjunto de engrenagens cônicas e de dentes retos sendo que as polias foram acopladas de

maneira diferenciada na lateral do segundo elo para que o atuador ficasse localizado na base ao invés de ficar na extremidade superior do segundo elo.

O efetuator final (garra) está conectado ao manipulador através do último elo. Ela é uma garra mecânica do tipo *gripper* com 4 pontos de apoio proporcionando a carga maior área de contato. Por se tratar de uma garra modular, há a possibilidade da mesma ser trocada facilmente por outra.

A Tabela 1 ilustra de maneira simplificada as características gerais do manipulador.

Tabela 1 – Características gerais do manipulador.

	Junta 1 (J1)	Junta 2 (J2)	Junta 3 (J3)	Garra
Tipo de junta	Rotativa	Rotativa	Rotativa	---
Ângulo de alcance	360º	~150º	~150º	---
Velocidade	3 rpm	3rpm	5,2rpm	15rpm
Massa carregada	~21 kg	~18,5kg	~15,5kg	~5,5kg

Fonte: Próprios autores (2017).

A partir dos dados informados na tabela 1 tem-se que as juntas possuem uma velocidade reduzida devido ao fato da grande quantidade de reduções introduzidas em seu sistema de transmissão para que fosse possível suportar toda a massa do próprio manipulador e do objeto recolhido.

Projeto Mecânico

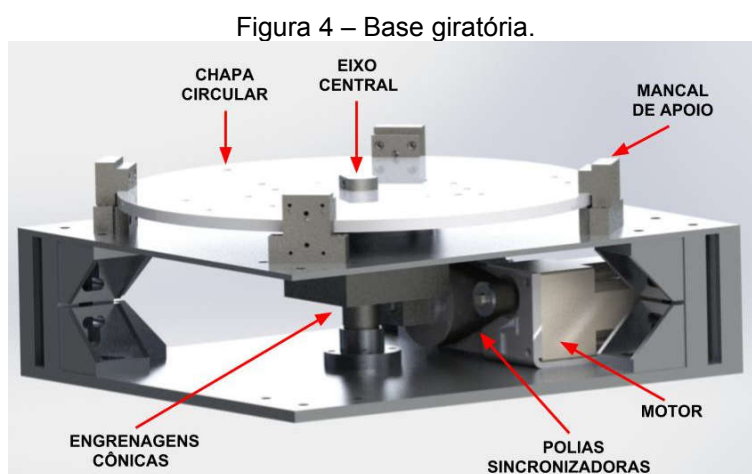
O projeto mecânico foi desenvolvido utilizando o software *SolidWorks* disponível na instituição. A Figura 3 ilustra o projeto mecânico realizado por computador CAD. A partir da Figura 3 pode-se observar a construção mecânica das juntas, dos elos e da garra.

Figura 3 – Projeto CAD finalizado do manipulador.



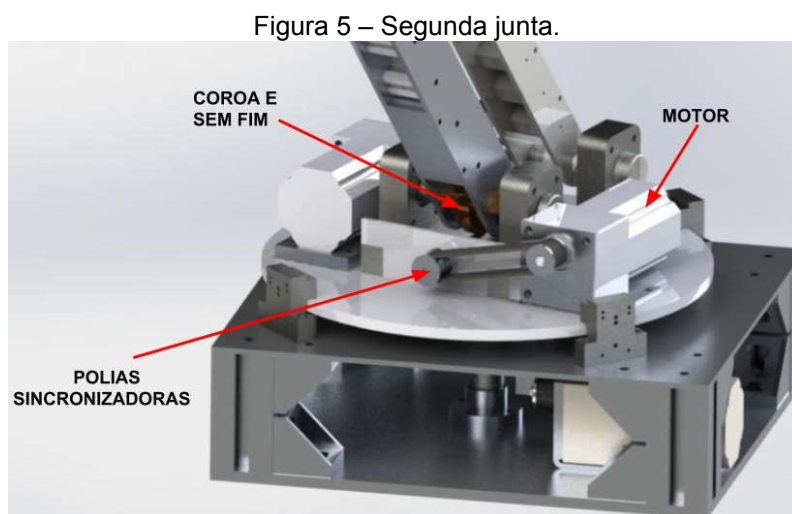
Fonte: Próprios autores (2017).

A base giratória (primeira junta rotativa) é formada por uma mesa na qual é apoiada por perfis de alumínio e cantoneiras nas extremidades. Ao centro, há um eixo central que transmite o movimento para a chapa circular (localizada acima da mesa) que possui 4 mancais que servem como pontos de apoio para sustentar a estrutura durante o movimento circular da base. No interior da mesa encontram-se o motor e o sistema de transmissão. Além disso há 3 flanges que possuem rolamentos para suportar as cargas e ajudar na movimentação, sendo que dois são rolamentos axiais (um localizado na base do eixo central e outro localizado abaixo da chapa circular) e um rolamento radial localizado abaixo da chapa superior da mesa. A Figura 4 ilustra a base giratória e seus principais componentes.



Fonte: Próprios autores (2017).

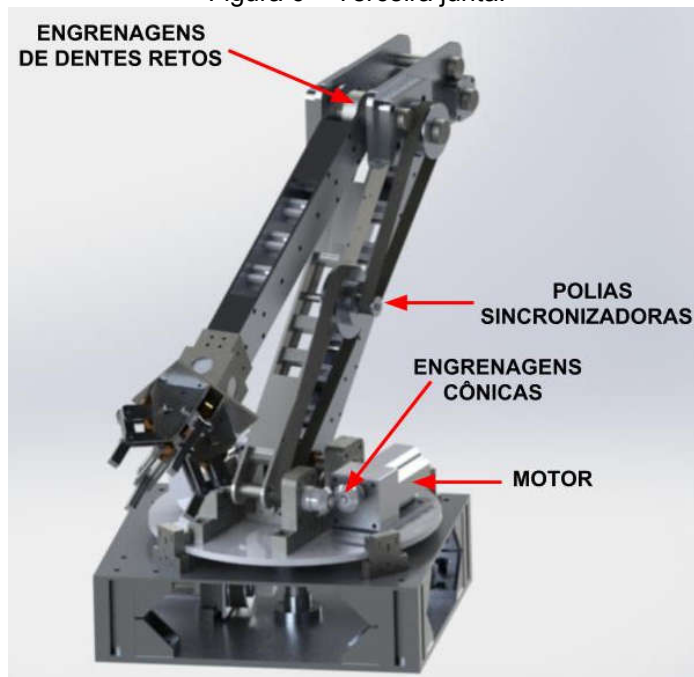
Acima da chapa circular, há os atuadores responsáveis pelo acionamento da segunda e da terceira junta. A Figura 5 ilustra a segunda junta e seus elementos principais.



Fonte: Próprios autores (2017).

A partir da Figura 5 tem-se que o torque do motor é transmitido através das polias até a coroa do sem fim proporcionando assim o movimento do segundo elo formado pelas hastes paralelas e elas, por sua vez, são suportadas por um conjunto de dois mancais duplos. A Figura 6 demonstra o acionamento da terceira junta.

Figura 6 – Terceira junta.

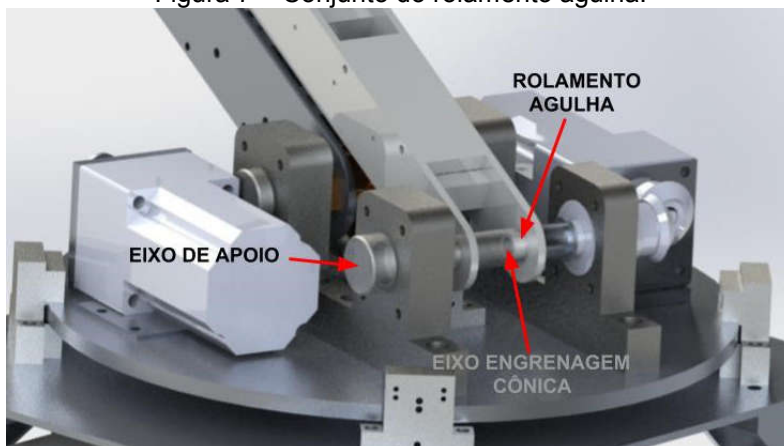


Fonte: Próprios autores (2017).

Como já citado anteriormente, o sistema de transmissão da terceira junta foi acoplado a estrutura pela lateral do segundo elo para que fosse possível posicionar seu atuador sobre a chapa circular. Tal escolha foi feita para que o centro de massa ficasse localizado o mais próximo possível da base já que o motor possui cerca de 1 quilo e também para não sobrecarregar a região entre o segundo e o terceiro elo. Além disso, com o motor na base a segunda junta possui menos torque já que ela não necessita movimentar o motor e o sistema de transmissão do terceiro elo, com isso apenas a base giratória se encarrega de suportar essa carga.

Como há dois mancais duplos para suportarem as hastes, é importante que o movimento do segundo e do terceiro elo não se prejudiquem ou se conflitem. Para que isso não ocorra há um rasgo no eixo da engrenagem cônica que possui um rolamento agulha acoplado. Com isso, no momento em que a segunda junta é acionada somente as hastes paralelas se movimentam e, no momento em que a terceira junta é acionada somente o terceiro elo é movimentado. Isto acontece porque o rolamento agulha impede que as hastes paralelas se movam no momento em que o terceiro elo está se movimentando e vice e versa. A Figura 7 ilustra o conjunto citado acima.

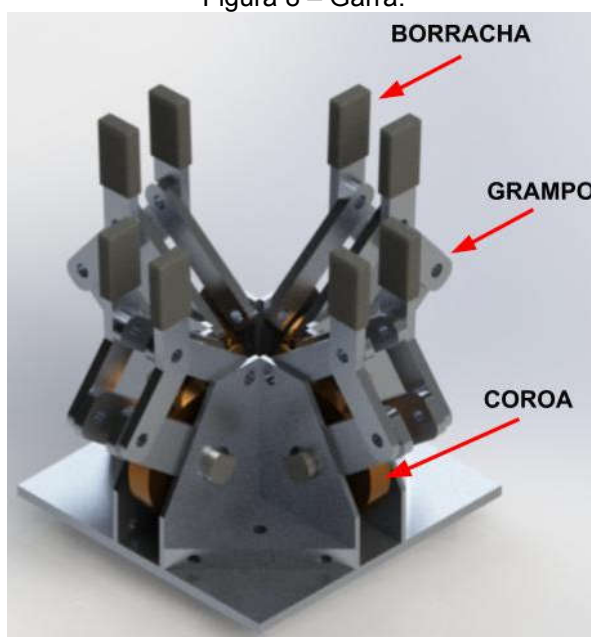
Figura 7 – Conjunto do rolamento agulha.



Fonte: Próprios autores (2017).

Por fim, tem-se a Figura 8 ilustrando detalhadamente a garra. Ela possui um parafuso sem fim (não visível na figura) e quatro engrenagens que proporcionam o movimento dos grampos, os grampos por sua vez possuem uma abertura de aproximadamente 100mm. Nas extremidades dos grampos há capinhas de borracha que servem para melhorar a aderência dos grampos com o objeto apanhado.

Figura 8 – Garra.



Fonte: Próprios autores (2017).

Com o projeto CAD finalizado, iniciou-se o processo de fabricação do manipulador robótico. As peças necessárias para a conclusão do manipulador foram fabricadas, em sua grande maioria, dentro da instituição. Por conta disso, o material bruto precisou sofrer processos de fabricação como corte, torneamento, fresamento, furação e abertura de rosca para que as peças atingissem as dimensões e as características necessárias.

A Figura 9 ilustra o processo de furação da flange da base giratória, a fabricação dos grampos da garra e o corte de um tarugo de aço no qual posteriormente foi usinado no torno para fabricar um eixo.

Figura 9 – Processos de fabricação: a) Furação da flange da base giratória; b) Eletroerosão a fio dos grampos da garra; c) Corte de um tarugo de aço.



Fonte: Próprios autores (2017).

A Figura 10 ilustra o processo de fresamento dos apoios das hastes e o torneamento do eixo principal da base giratória citado anteriormente.

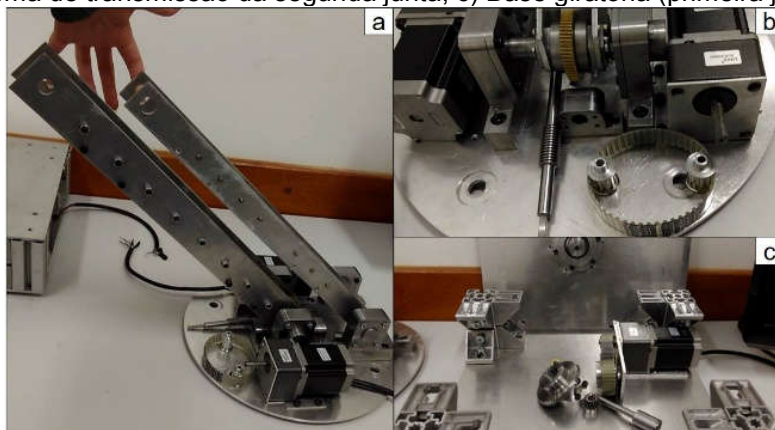
Figura 10 – Processos de fabricação; a) Fresamento do apoio da haste; b) Torneamento do eixo principal da base giratória.



Fonte: Próprios autores (2017).

Com as peças fabricadas, iniciou-se o processo de montagem e ajustes do manipulador. Durante este processo, as peças fabricadas anteriormente e os componentes comerciais como motores, polias sincronizadoras, engrenagens e fixadores que foram adquiridos foram posicionados de acordo com o projeto CAD. A Figura 11 ilustra o processo de montagem de algumas partes do projeto.

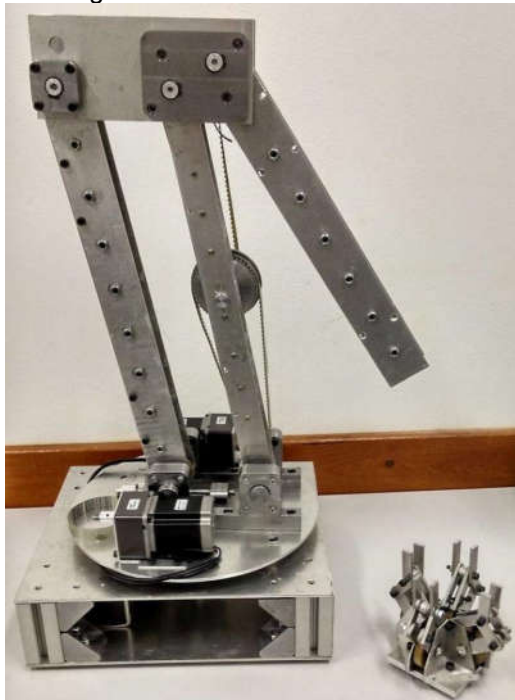
Figura 11 – Montagem; a) Conjunto formado pela segunda junta e pelo segundo elo; b) Sistema de transmissão da segunda junta; c) Base giratória (primeira junta).



Fonte: Próprios autores (2017).

O estágio atual da montagem do projeto mecânico do manipulador é apresentado na Figura 12. Como a garra é modular, a mesma não está acoplada ao robô.

Figura 12 – Estágio atual de desenvolvimento do manipulador.



Fonte: Próprios autores (2017).

Projeto Eletroeletrônico

O projeto eletroeletrônico desenvolvido dispõe de diversos componentes que tem a finalidade de acionar os sensores, atuadores e controladores responsáveis pela movimentação do manipulador. Os atuadores utilizados para realizar o movimento das juntas foram motores de passo com caixa de redução. Seu controle é realizado por drivers de motor de passo. Para o controle do robô,

utilizou-se a *RaspBerry PI3* (RASPBerry, 2017) e o *Arduino UNO* (ARDUINO, 2017).

Os sensores empregados inicialmente foram sensores de fim de curso evitando que o manipulador saia de sua área de movimento e também para que seja possível encontrar seu sistema de referência de coordenadas. Futuramente, pretende-se empregar outros sensores, inclusive sistema de visão. Por fim, a alimentação do sistema é realizada a partir de baterias.

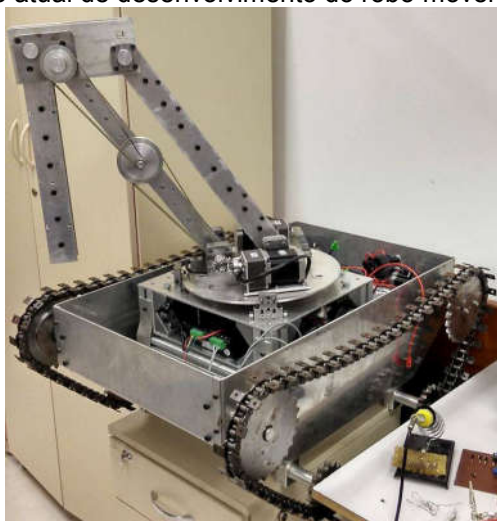
Estágio corrente do desenvolvimento

As montagens mecânica e eletroeletrônica foram finalizadas e testes de desempenho preliminares foram realizados. O primeiro teste refere-se ao acionamento independente dos motores das juntas para que fosse possível analisar como a estrutura mecânica se comportava sem nenhuma carga externa. Ao final deste teste, os resultados obtidos foram satisfatórios e notou-se que os sistemas de transmissões que são formados por engrenagens possuem uma pequena folga decorrente do engrenamento dos dentes durante o movimento. Em seguida, realizaram-se testes de esforço, alterando gradativamente a carga carregada até uma massa de aproximadamente 1,5 quilos. Ao final desses testes, o manipulador obteve bons resultados e a estrutura se manteve firme. O centro de massa próximo à base impediu que o manipulador tombasse no momento em que ele estava suportando a carga de 1,5 kg com os elos esticados em posição horizontal.

O próximo teste que se deseja realizar será definir uma trajetória via software, sendo que o manipulador deverá atingir as coordenadas informadas. Como etapa futura deste projeto, tem-se o desenvolvimento do controle do braço com a finalização do sistema eletroeletrônico pela inserção de sensores para um sistema de visão.

Por fim, o manipulador foi acoplado provisoriamente ao robô móvel, conforme era objetivo do projeto, ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Estágio atual de desenvolvimento do robô móvel com o manipulador.



Fonte: Próprios autores (2017).

Quando finalizado, o manipulador será instalado definitivamente sobre a plataforma do robô móvel, cujo desenvolvimento está sendo realizado em paralelo.

Conclusão

O desenvolvimento de produtos mecatrônicos é um viés importante a ser trabalhado em cursos de graduação em engenharia e mestrado profissional, pois favorece a preocupação em solucionar problemas reais da sociedade/empresa, gera ideias e soluções inovadoras, fomenta a prática no ensino, além de tornar os estudantes mais confiantes, mais preparados para o mercado de trabalho. Por conta disso, o desafio relacionado ao desenvolvimento de um robô de busca e resgate, além do apelo social, representa uma excelente oportunidade de aprendizado sobre aspectos de mecânica, eletrônica e computação, sendo uma excelente estratégia didática no contexto tecnológico.

A metodologia de desenvolvimento de produto utilizada tornou a elaboração do manipulador melhor organizada facilitando assim as decisões de projeto. Além disso, os diagramas, o projeto CAD e circuitos elétricos desenvolvidos proporcionam aos desenvolvedores um melhor entendimento e organização do projeto, além de proporcionar que futuras melhorias sejam feitas mais rapidamente.

Quando finalizada a montagem e os testes do manipulador, cada um dos requisitos que orientam seu desenvolvimento será avaliado frente aos cenários que permitam validar sua efetividade.

Por se tratar da primeira versão do manipulador, o projeto mecânico ainda será aperfeiçoado para que as folgas das engrenagens sejam minimizadas e para que as velocidades da segunda e da terceira junta sejam aumentadas. Além disso, o sistema de controle e a programação estão sendo estudados e aprimorados já que até o momento apenas o projeto mecânico está finalizado.

Outra questão interessante nesta abordagem de ensino por projetos, é que o projeto permanece em atividade, independente dos alunos que estejam trabalhando no momento. Através da documentação gerada nas diferentes fases do projeto, pode-se dar continuidade no projeto com alunos de diferentes fases e níveis de ensino (inclusive do ensino técnico, como suporte na fabricação por exemplo).

Agradecimentos

À Instituição de ensino pelo apoio financeiro e ao CNPq pelo suporte de bolsas de iniciação científica.

Referências

- Arduino. **Arduino Uno**. Disponível em :<<https://www.arduino.cc/>> Acesso em: 10 ago. 2017.
- Back, N. et al. **Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem**. Santa Catarina. Manole, 2008.
- Carpes JR., W. P. **Introdução ao projeto de produtos**. Porto Alegre: Bookman, 2014.
- Cobham. Disponível em: <<http://www.cobham.com/>>. Acesso em: 25 set. 2017.
- Crasar. **Center for Robot-Assisted Search and Rescue**. Disponível em: <<http://crasar.org/>>. Acesso em: 20 set. 2017.
- Maurense, V.M., Dutra, G. R., Hertwig, P. V., Barbosa, A. M. N., Pamplona, G., Felizardo, C., Stivanello, M. E., Roloff, M. L. **Asimov II – Desenvolvimento de um Robô móvel empregando Tecnologias Abertas**. Computer On The Beach, 2017, Florianópolis.
- Nisbett, J. Keith; Budynas, R. G. **Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- Norton, R. **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- Raspberry. **Raspberry Pi**. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/>>. Acesso em: 10 ago. 2017.
- Santos, V. M. F. **Robótica Industrial**. Portugal, Apostila do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, 2001.
- Telerob. Disponível em: <<http://www.telerob.com/en/>>. Acesso em: 30 set. 2017.

Submetido em 23/08/2018.
Aceito em 23/10/2018.

