

Implementation and Validation of Thor 3D Printed Open Source Robotic Arm

J. Costa, T. Machado, and M. Carneiro

Abstract—This paper aims to present the implementation and validation of a 3D printed Open Source Robotic Arm with 6 degrees of freedom and an industrial shape. Unlike the original Open Source Thor design, printed with PLA material, ABS printed parts were used for their higher mechanical strength. Changes were implemented in the electronic system through the use of two Arduino Mega systems with the Ramps interface cards for controlling all actuators, besides the use of Marlin firmware and Pronterface control software for 3D printers. The torque on the first joint on the base was increased by the addition of one more stepper motor and the open source project validation was done by moving the robot through its working area.

Index Terms—Robotic arm, Additive manufacturing, Open code.

I. INTRODUÇÃO

EM um ambiente industrial, há que se lidar com a crescente demanda por produtividade e qualidade. Para tanto, diversas são as vantagens de se utilizar manipuladores robotizados controlados por computador. Exemplos são a maior precisão e a maior flexibilidade no processo produtivo e melhores condições de trabalho humano, já que atividades repetitivas, perigosas ou de grande esforço físico são executadas por robôs [1].

Os robôs industriais se assemelham ao braço humano em seu modo de operação, sendo compostos por *links* rígidos conectados a uma base, que se movem, usualmente, com 6 graus de liberdade [2]. Aplicações de braços robóticos incluem montagem, fabricação e tarefas de seleção e colocação (do inglês *pick and place*) [3].

O braço robótico industrial é um produto de alto valor agregado. Todavia, com o advento da impressão 3D, tornou-se possível fabricar as peças necessárias para a concepção de um braço robótico com custos menores e sem perda de qualidade. Este método de fabricação opera por meio de deposição de materiais em camadas, no intuito de se produzir um objeto tridimensional. O uso do desenho feito em *software* CAD (do inglês, *Computer Aided Design*) orienta o processo, possibilitando a manufatura de peças customizadas com precisão [4].

No cenário da globalização, diversos são os projetos *open source* disponíveis de impressão tridimensional em repositórios virtuais. Alguns impactos positivos surgem deste tipo de abordagem, tais como flexibilidade, redução de custos e possível uso no meio acadêmico [5]. Além do mais, projetos livres permitem a participação de grupos heterogêneos de indivíduos, seja no processo de desenvolvimento ou de *feedback* da implementação, possibilitando constantes atualizações

e melhorias. Todavia, este tipo de comunidade não possui organização formal e estrutura de controle, o que pode atuar como impedimento para o sucesso final do projeto [6]. Assim, é de suma importância a implementação e validação de resultados para que se assegure o progresso científico.

Nos últimos anos, diversos artigos a respeito de braços robóticos e seus sistemas de controle tem sido publicados. A maior parte destes artigos se concentra na modelagem matemática do robô, suas equações e sistemas de controle [7] [8] [9] [10]. Grande parte destas pesquisas utilizam normalmente robôs com estrutura muito simples, compostos por servo motores ou então robôs profissionais de indústrias. Poucos artigos se concentram na implementação de sistemas robóticos, detalhando seus acoplamentos mecânicos, engrenagens e sistemas eletrônicos de acionamento. A maior parte dos robôs de estrutura simplificada utilizam servo motores com baixo torque [11] [12]. Quando os trabalhos utilizam robôs industriais, normalmente não são fornecidos detalhes de seus motores ou estrutura mecânica, apenas diagramas de tipos de juntas e dimensões de suas hastes. Percebe-se uma lacuna em estudos de implementação de braços robóticos principalmente devido ao custo destes equipamentos e à complexidade das peças necessárias.

Atualmente, há um grande foco em diferentes sistemas de controle, até mesmo sistemas adaptativos com inteligência artificial [13] [14]. A implementação de sistemas robóticos mais desenvolvidos através da manufatura aditiva apresenta o potencial de realizar um salto na robótica por possibilitar a construção de baixo custo de robôs com elevada complexidade e acabamento profissional. Outro ponto importante do estudo está no uso de motores de passo no lugar de servo motores [12] [15] [16]. O custo dos servomotores se eleva exponencialmente com o aumento do torque. No caso dos motores de passo, que também possuem uma elevada precisão, o custo é bem menor e o controle também muito simples. Hoje existe uma forte separação entre o que é feito na indústria e o que é feito na academia, com relação aos trabalhos de robótica. Encontra-se na indústria braços robóticos com elevado custo e robustez, mas em grande maioria os produtos possuem um controle simplificado. Na academia observa-se um elevado número de trabalhos com modelagem matemática e sistemas de controle complexos, aplicados em estruturas mecânicas improvisadas, de baixo custo, baixa precisão e torque.

A construção de braços robóticos com o auxílio da manufatura aditiva é capaz de aproximar o nível dos trabalhos acadêmicos do nível dos sistemas robóticos industriais, permitindo que sistemas de controle mais avançados possam ser testados em estruturas mais próximas as da indústria. Com efeito, este trabalho também tem como objetivo apresentar a

All authors were with Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, e-mails: jessantillo@gmail.com, thallesurzedo@gmail.com, marcoslajovic@hotmail.com.

implementação de braço robótico industrial baseado no projeto *open source* imprimível Thor [17], tendo como referência de modelagem do projeto, *firmware* e *softwares* livres.

Foram implementadas alterações no sistema eletrônico, através do uso de dois sistemas Arduino Mega com as placas de interface Ramps para o controle de todos os atuadores, além do uso do *firmware* Marlin e *softwares* de controle Pronterface direcionados para impressão 3D [18]. Houve a correção no torque produzido na base pela a adição de mais um motor de passo nesta primeira junta, além de novos suportes para sensores de fim de curso. A validação do projeto foi feita através da movimentação do robô. Com o objetivo de indicar possíveis novos aperfeiçoamentos no projeto, foram apresentados outros requisitos e soluções de problemáticas encontradas.

Para reduzir ainda mais o custo de produção e aumentar o tempo de vida do robô, o material PLA, utilizado no projeto original, foi substituído por ABS. Fator de grande valia em ambientes em que exista restrição de recursos, como é o caso das áreas de pesquisa e ensino em países de economias emergentes. Espera-se, portanto, que este projeto contribua em atividades acadêmicas na área de robótica.

Neste artigo são apresentados na seção II os materiais e métodos utilizados no projeto. Em seguida, na seção III são apresentados os resultados obtidos, bem como sua discussão. As conclusões finais se encontram na seção IV.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Para orientar e implementar este trabalho, utilizou-se como modelo o braço robótico imprimível e *open source*, denominado Thor [17]. Dotado de 6 graus de liberdade e punho rotacional, sua configuração de robô articulado é a mesma usada na maioria dos robôs manipuladores atualmente no mercado, em que todas as articulações são rotacionais [17]. O movimento de suas juntas é realizado através de 7 motores de passo Nema17 (projeto original) com diferentes parâmetros, o que viabiliza a transmissão de movimento com maior precisão e sem custos elevados.

A Fig. 1 apresenta o modelo adotado e o protótipo desenvolvido. A notação de articulações e diagrama de movimento pode ser observada na Fig. 2. Nas articulações 2 e 3, foram utilizados motores com caixa de redução (5:1) para aumentar o torque. Já as duas últimas articulações (5 e 6) possuem motores de passo menores, uma vez que não é desejável excesso de peso nesta parte do robô.

Como *driver* dos motores, foram utilizados 7 Pololus A4988 [17]. Para transmissão das articulações 3, 5 e 6, foram utilizadas correias e polias GT2. O projeto original indica o uso de um sistema eletrônico composto por um Arduino Mega juntamente com uma placa de interface para a inserção de todos os drivers necessários. Também foi indicado o uso do *firmware* GRBL e o *Universal GCODE Sender* para o controle do robô. Utilizou-se neste projeto o mesmo tipo de hardware de impressoras 3D RepRap *Open Source*. O sistema eletrônico foi composto de duas placas Arduino Mega, juntamente com duas Ramps (Fig. 3). A disposição das conexões realizadas entre os motores e os drivers é apresentada na Fig. 4. O

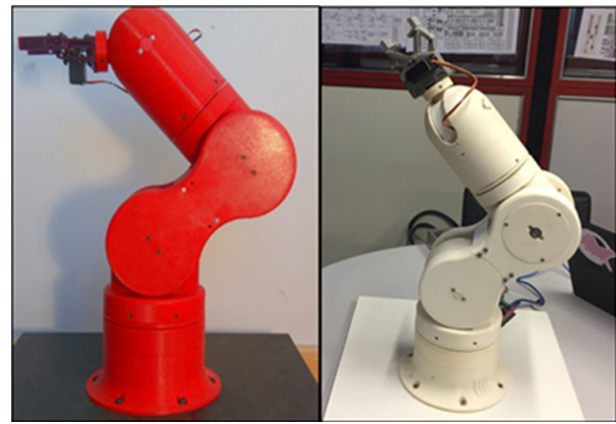


Fig. 1. Braço robótico Thor [17] à esquerda e protótipo desenvolvido pelos autores à direita.

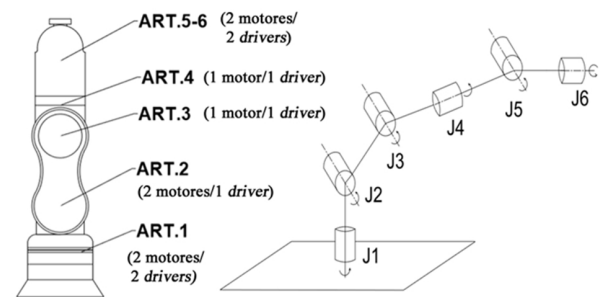


Fig. 2. Diagrama esquemático das articulações e esquema simplificado de movimentação das juntas.

robô foi controlado através do *firmware* Marlin, software Pronterface e o envio de comandos GCODE por linha de comando.

Outro detalhe importante concerne às articulações 5 e 6. Estas utilizam uma transmissão semi diferencial. Este tipo de transmissão permite dois tipos de movimento, utilizando duas engrenagens pequenas atuando sobre uma maior (Fig. 5). Quando as engrenagens menores rotacionam na mesma direção, a maior rotaciona ao redor do eixo das menores. Quando as engrenagens menores rotacionam em direções opostas, a maior rotaciona ao redor do seu próprio eixo [19]. As especificações dos motores inicialmente utilizados em cada uma das juntas estão apresentadas na Tabela I.

Quanto ao material de impressão, o modelo do projeto contém como sugestão o plástico PLA (Ácido Polilático). Todavia, após realizar um estudo sobre as propriedades físicas do material, o plástico PLA se mostrou não adequado para peças de uso frequente e sujeito a alto impacto, sendo susceptível a rachaduras e quebra. Na Fig. 6, é possível observar o resultado de ensaio realizado com uma peça impressa em ácido



Fig. 3. Placa de Arduino Mega, shield Ramps e driver Pololu A4988.

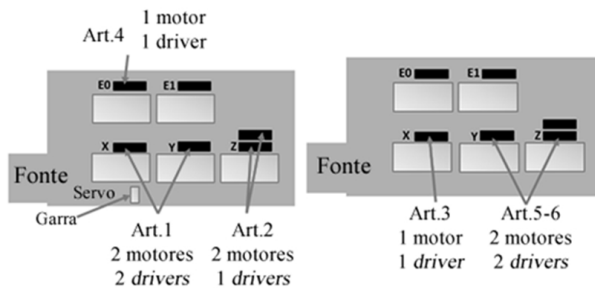


Fig. 4. Diagrama esquemático das conexões dos motores nas Shields Ramps 1.4.

TABELA I
ESPECIFICAÇÕES DOS MOTORES

Características	Nema 17	Nema 17 com caixa de redução 5:1	Nema 17
Comprimento (mm)	40	34	34
Corrente de Fase (A)	0.4	0.4	0.4
Holding Torque (N.cm)	40	110	25.4
Ângulo de Fase (°)	1.8	1.8	1.8
Massa (g)	240	500	280
Posição (Juntas)	J1	J2, J3	J4, J5, J6

polilático e outra em plástico ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) [20]. O teste consistiu na inserção de parafuso e observação ao longo do tempo das alterações ocorridas nas peças. A partir do resultado do ensaio, é possível notar a maior integridade estrutural da peça impressa em ABS. As propriedades físicas dos materiais citados estão apresentadas na Tabela II [21] [22] [23]. Dentre elas, a comparação do alongamento na ruptura pode ser observada em detalhe na Fig. 7 [21].

É possível perceber que, apesar do plástico PLA suportar tensões superiores ao ABS, seu alongamento percentual durante um esforço é notavelmente inferior. Da mesma forma, a resistência à força de impacto do PLA é inferior ao ABS. O uso de PLA na produção deste robô se apresenta insatisfatório devido à necessidade de inserção de diversos parafusos e do encaixe de diversas peças que produzem uma força constante entre si. Nestas situações, peças de PLA sofrem grandes

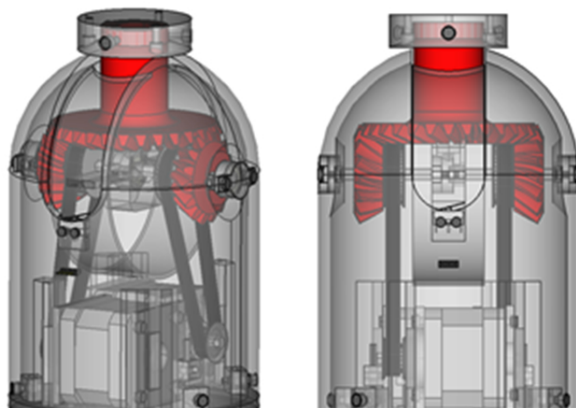


Fig. 5. Mecanismo semi diferencial [17].



Fig. 6. Resultado de ensaio realizado com peças impressas em plástico PLA (acima) e plástico ABS (abaixo) a partir de inserção de parafuso [20].

TABELA II
PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS PLA E ABS

Características	PLA	ABS
Resistência à força de impacto (KJ/m^2)	69.7	425
Módulo de Armazenamento (MPa)	2805	1556
Módulo Elástico (MPa)	2024	807
Força de Tensão (MPa)	65.7	38.1
Alongamento na Ruptura (%)	6	3-75

rachaduras com o tempo, sendo que o ABS permanece estável e sem rachaduras por um tempo indeterminado nas mesmas condições. Sendo assim, justifica-se o melhor desempenho do plástico ABS em uso mecânico, adotando-se, portanto, este material para o desenvolvimento do protótipo.

Contudo, é importante salientar que o plástico ABS apresenta uma maior dificuldade de impressão 3D quando utilizado em impressoras abertas e sem uma câmara com controle de temperatura [23] [22]. Neste cenário, há a possibilidade do descolamento das peças da mesa de impressão, além de ondulações e deformações nas extremidades (do inglês, *warp*). Neste projeto foi utilizada uma impressora 3D ZMorph, que possui uma câmara semi fechada, sem câmara com controle de temperatura, contudo apresentando ótimos resultados na impressão com ABS.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Desenvolvimento

Inicialmente, foi utilizado o *software* FreeCAD para o estudo do design das partes a serem impressas do robô e sua respectiva montagem. Após a realização do estudo, foi efetuada a primeira etapa do projeto, que consistiu na impressão de 51 peças. Os parâmetros de impressão adotados estão dispostos na Tabela III.

Alguns episódios de retrabalho das peças foram necessários, para que, em seguida, o encaixe de motores, correias e sensores ópticos ocorresse. Por fim, montagens parciais das articulações foram realizadas (Fig.8).

Após a conclusão das etapas iniciais de montagem, foi possível realizar o teste dos motores acoplados às articulações. Alguns problemas enfrentados nesta fase se originaram do fabricante dos motores adquiridos, uma vez que motores iguais, com idêntico padrão de cores, possuem configuração de bobinas diferentes, dificultando a identificação da sequência correta de fios no conector. A Tabela IV ilustra os dados referentes ao número de fabricação dos motores e a sequência de cores utilizadas nos conectores das respectivas juntas.

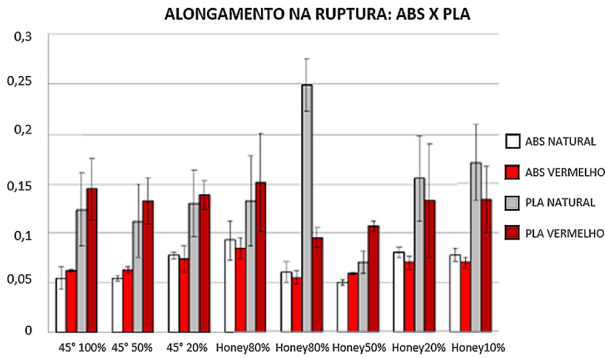


Fig. 7. Comparação do alongamento na ruptura dos plásticos PLA e ABS [22].

TABELA III
PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Peças	
Altura da camada (mm)	0.3
Altura da primeira camada (mm)	0.2
Largura do caminho (mm)	0.4
Velocidade de viagem (mm/s)	120
Velocidade na primeira camada (%)	30
Altura da retração (mm)	0.3
Velocidade de retração (mm/s)	50
Multiplicador de extensão de viagens	3
Preenchimento (%)	30
Tipo de preenchimento	Honeycomb
Suporte	
Ângulo de corte (°)	45
Distância mínima (mm)	0.5

Para o teste do funcionamento dos motores e calibração, foi utilizado o *firmware* Marlin, amplamente aplicado em impressoras 3D. Algumas configurações de parâmetros foram alteradas para adequar ao uso da aplicação, referentes a passos por mm, *feed rate* e aceleração. Outra adaptação feita para a realização do teste foi a inserção de 3 *jumpers* na RAMPS para cada motor, isto se fez necessário para a configuração dos micro-passos. Os valores ótimos encontrados mediante ensaios estão dispostos na Tabela V.

O *software* Pronterface, usualmente aplicado em projetos de impressão 3D e Comando Numérico Computadorizado (CNC), foi utilizado como interface para controle. Através da linha de comandos GCODE ou ícones interativos, foi possível executar a movimentação das juntas. Tendo sido verificada a funcionalidade do sistema de acionamento dos motores, realizou-se novos testes com a montagem total do robô (Fig.

TABELA IV
SEQUÊNCIA DE CORES DOS CONECTORES

Juntas	Bobinas				Modelo do Motor
	A+	B+	A-	B-	
J1	Preto	Verde	Vermelho	Azul	17HS15-0404S
J2	Preto	Vermelho	Verde	Azul	17HS13-0404S-PG5
J3	Preto	Vermelho	Verde	Azul	17HS13-0404S-PG5
J4	Preto	Vermelho	Verde	Azul	17HS13-0404S1
J5	Preto	Verde	Vermelho	Azul	17HS13-0404S1
J6	Preto	Verde	Vermelho	Azul	17HS13-0404S1



Fig. 8. Peças impressas e montagens parciais das articulações.

TABELA V
CONFIGURAÇÕES DO FIRMWARE PARA OS MOTORES

Modelo	Passos/mm	Feed Rate (mm/s)	Aceleração (mm/s^2)
Nema 17	80	500	600
Nema 17 com caixa de redução 5:1	80*5	1000	600

9).

B. Modificações

Durante a realização dos testes com a montagem total do protótipo, foi identificado que o motor indicado no modelo para a articulação 1 não possui torque dinâmico suficiente para movimentar a estrutura. Assim, foi realizada a adição de um novo motor para mover a mesma junta no mesmo sentido de rotação. As especificações do motor adicional estão dispostas na Tabela VI.

C. Comparação

Com o intuito de qualificar o protótipo desenvolvido, comparações foram feitas com braços robóticos industriais disponíveis no mercado. A comparação das características físicas está disposta na Tabela VII [24].

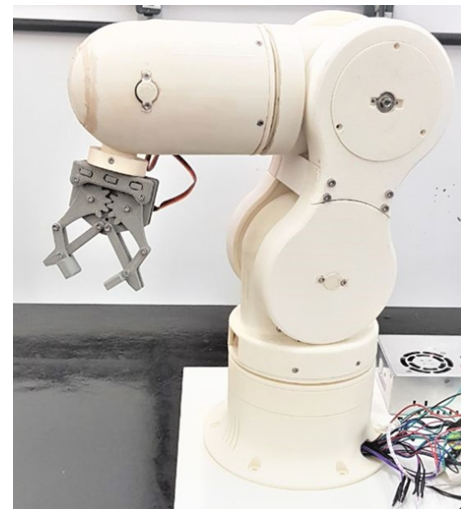


Fig. 9. Montagem final do protótipo.

TABELA VI
ESPECIFICAÇÕES DO MOTOR ADICIONADO

Características	Nema 17
Comprimento (mm)	40
Corrente de Fase (A)	1.7
Holding Torque (N.cm)	40
Ângulo de Fase (°)	1.8
Massa (g)	280
Posição (Juntas)	J1
Modelo	17HS4401

TABELA VII
COMPARAÇÃO DE ESPECIFICAÇÕES DE BRAÇOS ROBÓTICOS INDUSTRIAIS

Modelo	Payload (kg)	Massa (kg)	DOF	Alcance (mm)
WAM	3	25	7	*3.5 m ³
RV-2A Mitsubishi	2	37	6	706
S1A10D Motoman	10	60	7	720
Am501C/5L Fanuc	5	29	6	892
TX40 Staubli	2	27	6	515
IRB120 ABB	3	25	6	700
S560 Adept Viper	2.5	28	6	653
KR5 R560 KUKA	5	28	6	650
RS03N Kawasaki	3	20	6	620
Protótipo	0.75	6.1	6	427.5

A partir dos dados amostrados, é possível notar a diferença significativa quanto a massa do material utilizado no protótipo e a dos demais modelos, bem como o *Payload*. O alcance do protótipo é apenas 17% inferior ao do modelo TX40 Staubli e 52% inferior ao do modelo Am501C/5L Fanuc, contudo o protótipo possui massa aproximadamente 5.75 vezes inferior a ambos os modelos. Já quanto aos graus de liberdade (DOF), a maioria dos robôs possuem o mesmo padrão.

Outras especificações técnicas concernentes ao protótipo estão apresentadas na Tabela VIII. É possível observar a faixa de movimentação das articulações. Os valores dos ângulos de movimentação do protótipo estão relacionados às limitações físicas impostas pelo *design* do modelo, bem como visam o não embaraço dos fios internamente.

Para representação da área de trabalho do protótipo, foi realizado diagrama esquemático (Fig. 10). Analogamente aos ângulos de movimento, os valores atribuídos ao protótipo estão relacionados às limitações físicas do modelo.

Já no que concerne aos custos envolvidos, o desenvolvimento do protótipo teve em sua totalidade o dispêndio de

TABELA VIII
ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO PROTÓTIPO

Características	Protótipo
Dimensão da Base (mm)	Ø200
Dimensão da Altura (mm)	635
Ângulo de Movimento	
Art. 1	+180° a -180°
Art. 2	+90° a -90°
Art. 3	+135° a -135°
Art. 4	+180° a -180°
Art. 5	+90° a -90°
Art. 6	+180° a -180°

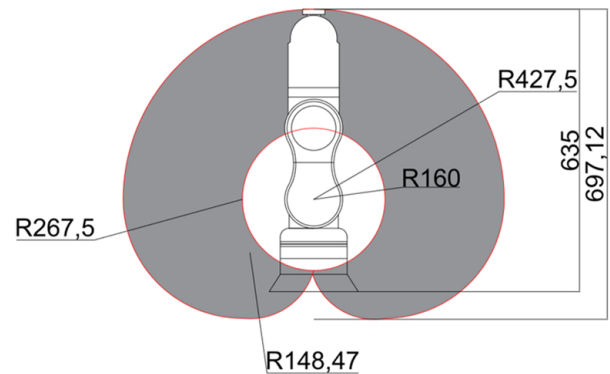


Fig. 10. Área de trabalho do protótipo (medidas em mm).

R\$1812,90, grande contraste com o valor de mercado de braços robóticos industriais. Isto atesta a capacidade de desenvolvimento de braço robótico industrial a custos reduzidos e abre margem para implementações em ambientes com limitações de recursos.

D. Particularidades do Modelo

O modelo adotado apresenta algumas particularidades, que podem atuar como empecilho para o desempenho ótimo de movimentação do protótipo. As articulações 1 e 4 possuem sistemas de rolamento que possibilitam a existência de atrito elevado. A junta 1 conta com rolamento inteiramente impresso em ABS e a junta 4 possui bolas de *Airsoft* para a movimentação (Fig.11). Para minimizar este problema foi utilizado lubrificante nestas articulações. Todavia, outra solução efetiva seria a substituição destes sistemas por rolamentos de maior qualidade.

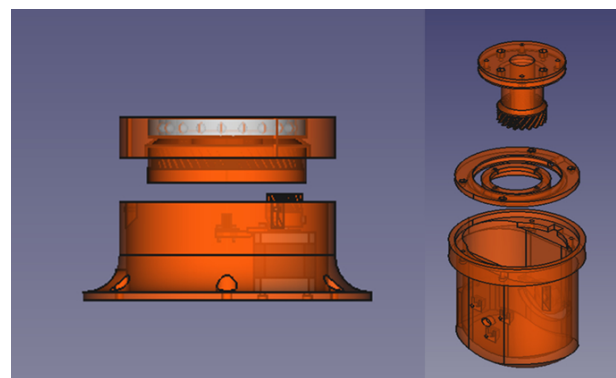


Fig. 11. Sistemas de rolamento das juntas 1 e 4 respectivamente [17].

Outro detalhe concerne à transmissão de movimento da junta 3 (Fig.12), que ocorre através de correia GT2 associada a um único motor e eixo em apenas um dos lados do protótipo. É uma configuração não homogênea com exigência de elevada tração e esforço. Uma sugestão de melhoria é a realização de novo design, em que fosse adicionado outro motor em posição simétrica. Desta maneira, a transmissão do movimento seria realizada em ambos os lados do braço robótico.

Por fim, o modelo possui um sistema não convencional de tracionamento da correia (Fig. 13). Presente na transmissão

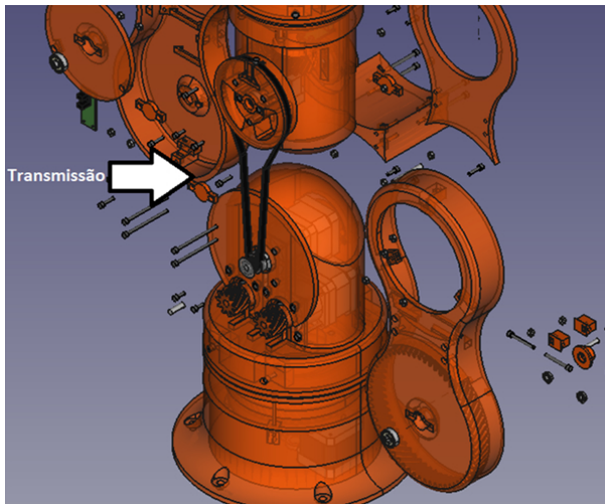


Fig. 12. Detalhe do mecanismo de transmissão da junta 3 [17].

da junta 3, este ocorre através do uso de parafuso (Fig. 13-a) acoplado a uma estrutura deslizante (Fig. 13-d). Ao se girar o parafuso no sentido anti-horário, a estrutura move-se para o centro (Fig. 13-b), tracionando a correia (Fig. 13-c). Este dispositivo não é intuitivo e dificulta a implementação do modelo, considerando-se a ausência de documentação formal acerca do projeto.

É importante salientar que a existência das particularidades supracitadas não se apresenta como impedimento da movimentação do protótipo. Entretanto, melhorias de desempenho podem ser obtidas e superadas.

E. Contribuições, Diferenciais e Expectativas

Considerando-se os dados supracitados, este trabalho demonstrou a validação e implementação de um projeto aberto de braço robótico industrial. Foi possível perceber a eficácia do modelo, bem como modificações que poderiam melhorar seu desempenho. A documentação das etapas de desenvolvimento abre espaço para que novos projetos possam ser realizados, sobretudo em ambientes de pesquisa e ensino.

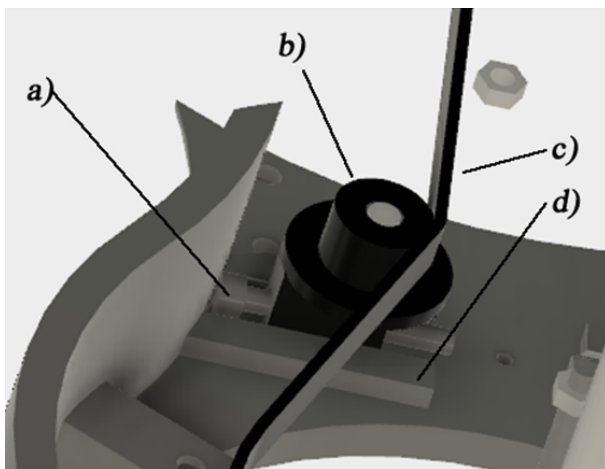


Fig. 13. Detalhe do mecanismo de tração de correia da junta 3 [17].

Além do mais, os custos envolvidos, considerando-se o valor agregado de um braço robótico industrial, são notoriamente inferiores. Este fator é de grande valia para países de economias emergentes com recursos muitas vezes limitados para áreas de educação e pesquisa.

Cabe ressaltar que o material utilizado no protótipo (ABS) e o material indicado no modelo (PLA) apresentam valores de compra similares em países desenvolvidos. Todavia no mercado brasileiro, os custos do PLA são em média 30-40% superiores aos do plástico ABS. Sendo assim, até mesmo a partir da referência do modelo utilizado, este projeto possui custos reduzidos.

Espera-se, portanto, que a solução apresentada nesse trabalho possa contribuir com atividades de ensino e pesquisa na área de robótica.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho contribui para o preenchimento da lacuna existente entre a qualidade das estruturas mecânicas de robô acadêmicos e demonstra que sistemas mecânicos complexos e com bom acabamento podem ser realizados em ambiente com poucos recursos, caso exista disponível uma impressora 3D. O robô proposto demonstra a capacidade de se utilizar motores de passo no lugar dos servo motores que normalmente são utilizados para essas aplicações, sem que haja perda de precisão e torque.

Poucos artigos se concentram na implementação de sistemas robóticos, detalhando seus acoplamentos mecânicos, engrenagens e sistemas eletrônicos de acionamento. A maior parte dos robôs de estrutura simplificada utilizam servo motores com baixo torque [11] [12]. Quando os trabalhos utilizam robôs industriais, normalmente não são fornecidos detalhes de seus motores ou estrutura mecânica, apenas diagramas de tipos de juntas e dimensões de suas hastes. Percebe-se uma lacuna em estudos de implementação de braços robóticos principalmente devido ao custo destes equipamentos e à complexidade das peças necessárias.

Para a manufatura de peças tridimensionais utilizadas na construção de um braço robótico, utilizou-se como modelo um robô manipulador que atende às especificações de braços robóticos industriais. Dentre elas, pode-se citar que a sua movimentação se assemelha ao movimento realizado por um braço humano e que este possui 6 graus de liberdade.

A implementação do modelo *open source* adotado se mostrou viável, desde que algumas particularidades sejam observadas, tais como o torque necessário para a movimentação da junta 1, entendimento do mecanismo de tracionamento das correias e uso de lubrificante ou melhores rolamentos nas juntas 1 e 4. Foi também observado que melhorias no design do modelo podem ser realizadas, visando maior desempenho.

Além disso, é possível notar que os custos do projeto são muito inferiores ao preço de um robô manipulador industrial no mercado, correspondendo aos objetivos deste trabalho com a utilização da manufatura aditiva. A grande diferença entre os custos envolvidos e o valor de mercado de um braço robótico industrial torna o projeto atraente em ambientes com recursos reduzidos. Os autores acreditam que o projeto

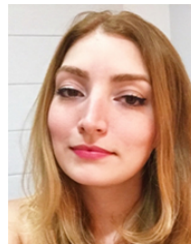
desenvolvido possa ser utilizado como modelo em aplicações de pesquisa e ensino, envolvendo robótica, comando numérico computadorizado e processos de manufatura.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo financiamento de parte deste projeto.

REFERÊNCIAS

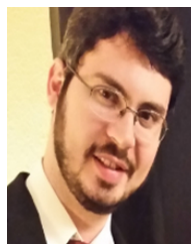
- [1] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2008.
- [2] D. N. Cuesta and J. R. Huerfano, "Diseño y construcción de un brazo robótico de 6 gdl," *Revista Tekhnê*, vol. 13, no. 1, pp. 73–82, 2016.
- [3] S. M. Mahil and A. Al-Durra, "Modeling analysis and simulation of 2-dof robotic manipulator," in *2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. IEEE, 2016, pp. 1–4.
- [4] C. L. Ventola, "Medical applications for 3d printing: current and projected uses," *Pharmacy and Therapeutics*, vol. 39, no. 10, p. 704, 2014.
- [5] A. Dudley-Sponaugle, "The social and economical impact of oss in developing countries," in *Handbook of Research on Open Source Software: Technological, Economic, and Social Perspectives*. IGI Global, 2007, pp. 102–114.
- [6] C. Bird, D. Pattison, R. D'Souza, V. Filkov, and P. Devanbu, "Latent social structure in open source projects," in *Proceedings of the 16th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of software engineering*. ACM, 2008, pp. 24–35.
- [7] J. de Jesus Rubio, P. Cruz, L. A. Paramo, J. A. Meda, D. Mujica, and R. S. Ortigoza, "Pid anti-vibration control of a robotic arm," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 7, pp. 3144–3150, 2016.
- [8] J. de Jesus Rubio, E. Garcia, C. A. Ibanez, and C. Torres, "Stabilization of the robotic arms," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 8, pp. 2567–2573, 2015.
- [9] J. de Jesus Rubio, I. Elias, J. Pacheco, R. S. Ortigoza, and P. Cruz, "Variable structure model of an articulated robotic arm," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 12, pp. 3794–3802, 2015.
- [10] J. de Jesus Rubio, A. G. Bravo, J. Pacheco, and C. Aguilar, "Passivity analysis and modeling of robotic arms," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 8, pp. 1389–1397, 2014.
- [11] L. Mathe, A. Caverzasi, F. Saravia, G. Gomez, and J. Pedroni, "Detection of human-robot collision using kinetic," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 1, pp. 143–148, 2013.
- [12] M. A. Destarac, C. E. G. Cena, J. Garcia, R. Espinoza, and R. J. Saltaren, "Orte: Robot for upper limb rehabilitation. biomechanical analysis of human movements," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 6, pp. 1638–1643, 2018.
- [13] E. Y. Veslin, M. S. Dutra, O. Lengerke, E. A. Carreno, and M. J. M. Tavera, "A hybrid solution for the inverse kinematic on a seven dof robotic manipulator," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 2, pp. 212–218, 2014.
- [14] E. O. Freire, F. G. Rossomando, and C. M. Soria, "Self-tuning of a neuro-adaptive pid controller for a scara robot based on neural network," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 5, pp. 1364–1374, 2018.
- [15] J. J. A. M. Junior, M. B. Pires, S. Okida, and S. L. Stevan, "Robotic arm activation using surface electromyography with labview," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 8, pp. 3597–3605, 2016.
- [16] A. F. P. Vidal, M. A. O. Salazar, and G. S. Lopez, "Development of a brain-computer interface based on visual stimuli for the movement of a robot joints," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 477–484, 2016.
- [17] A. Muro. (2019) Opensource 3d printable robotic arm. [Online]. Available: <http://github.com/AngellM/Thor>
- [18] J. Horvath, *Mastering 3D printing*. Apress, 2014.
- [19] P. R. C. Guedes, "Desenvolvimento de uma solução web para calcular parâmetros de transmissão de potência através de engrenagens cilíndricas de dentes retos," 2018.
- [20] V. Viana, D. Da Silva, L. Lino, M. Xavier, Y. Prado, and C. M.L., "Impressora 3d: Desenvolvendo a técnica de deposição e análise dos fatores que influenciam na qualidade de impressão," *Engineering Degree Course Final Work*, Pontifical University Catholique of Goiás, 2015.
- [21] A. Qureshi, S. Mahmood, W. Wong, D. Talamona et al., "Design for scalability and strength optimisation for components created through fdm process," in *DS 80-6 Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 6: Design Methods and Tools-Part 2 Milan, Italy, 27-30.07. 15*, 2015, pp. 255–266.
- [22] U. of Cambridge Engineering Department, "Materials data book," 2003. [Online]. Available: <http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/cueddatabooks/materials.pdf>
- [23] T. Hatakeyama and F. Quinn, *Thermal analysis*. Wiley, 1999.
- [24] H. A. Almurib, H. F. Al-Qrimli, and N. Kumar, "A review of application industrial robotic design," in *2011 Ninth International Conference on ICT and Knowledge Engineering*. IEEE, 2012, pp. 105–112.



Jessica Junia Santillo Costa possui graduação em Engenharia de Controle e Automação na Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO). Participou do Grupo de Pesquisa Biomedical Engineering and Embbed Systems na PUC-GO. Possui experiência em algoritmos de navegação e mapeamento, robótica embarcada, interação homem-máquina e interface de Android para portadores com Síndrome de Down. Realizou intercâmbio acadêmico fomentado pela CAPES na Instituição de ensino Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg (Alemanha) durante o período letivo de 2015/2016. Participa atualmente do Grupo de Pesquisa de Prototipagem Avançada da PUC-GO.



Thalles Antônio Urzedo Machado possui graduação em Engenharia de Controle e Automação na Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO). Realizou intercâmbio acadêmico fomentado pela CAPES na Instituição de ensino Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Alemanha) durante o período letivo de 2015/2016.



Marcos Lajovic Carneiro possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás (2007), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás (2009), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (UnB) e Universidade de Bordeaux I (co-tutela) e pós-doutorado realizado na Université de Bretagne Occidentale (Brest-França) em conjunto com o laboratório CEA-Leti em Grenoble (França). Atualmente é professor efetivo na Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO), coordenador do Núcleo de Inovação Tecnológica e do Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas. Realizou pesquisas nos seguintes campos: comunicações móveis, simulação de circuitos não-lineares, equilíbrio harmônico, envoltória complexa, projeto de amplificadores de potência integrados, transformada Unscented e dispositivos semicondutores.