

DESENVOLVIMENTO DE UM BRAÇO MANIPULADOR ROBÓTICO: APLICAÇÃO DE INTERDISCIPLINARIDADE ENTRE PROJETO ASSISTIDO POR COMPUTADOR, MICROCONTROLADORES E ROBÓTICA INDÚSTRIAL

Raul Fontenele Santana – raulfontenele@edu.unifor.br
Pesquisador na Universidade de Fortaleza - Unifor
Av. Washington Soares, 1321 - Edson Queiroz
60811-905 - Fortaleza – CE

Paulo Cirillo Souza Barbosa – pauloc@unifor.br
Av. Washington Soares, 1321 - Edson Queiroz
60811-905 - Fortaleza – CE

Reginaldo Florencio da Silva – reginaldoflorencio@edu.unifor.br
Av. Washington Soares, 1321 - Edson Queiroz
60811-905 - Fortaleza – CE

Afonso Henriques Fontes Neto Segundo – afonsof@unifor.br
Professor da Universidade de Fortaleza
Universidade de Fortaleza
Av. Washington Soares, 1321 - Edson Queiroz
60811-905 - Fortaleza – CE

Joel Sotero da Cuha Neto – joelsotero@unifor.br
Universidade de Fortaleza
Av. Washington Soares, 1321 - Edson Queiroz
60811-905 - Fortaleza – CE

Resumo: *Este trabalho foi idealizado com base na Aprendizagem baseada em projetos (ABP) e apresenta as etapas de concepção, desenvolvimento e modelagem matemática de um manipulador robótico de baixo custo e com cinco graus de liberdade através de um projeto interdisciplinar, ligando três disciplinas muito importantes do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade de Fortaleza: Projeto Assistido por Computador, Microcontroladores e Robótica Industrial. Ao fim são apresentados os resultados que o projeto trouxe para o melhor aprendizado da disciplina de Robótica Industrial sobe a ótica do professor orientador e dos alunos.*

Palavras-chave: *Robótica Industrial. Projeto Assistido por Computador. Microcontroladores. Cinemática. Robô Manipulador.*

1 INTRODUÇÃO

Um braço robótico é um dispositivo eletromecânico que consiste em articulações que podem ser acionadas por motores ou atuadores. Esses braços costumam ser guiado por sensores e controlados atrás de microcontroladores. Eles foram desenvolvidos com o objetivo de realizarem funções semelhantes ao braço humano com grande precisão. Possuem diversas aplicações e são usados amplamente na indústria para a realização de tarefas repetitivas que exigem grande precisão ou em situações de elevado risco a vida humana (JAHNAVI; SIVRAJ, 2017). Muitos manipuladores robóticos possuem um elevado custo devido a necessidade de atuadores de alta precisão e componentes personalizados e de difícil fabricação (QUIGLEY; ASBECK; NG, 2011).

A proposta deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de um braço robótico de baixo custo com 5 graus de liberdade, que permita a integração entre as disciplinas de robótica industrial, microcontroladores e projeto assistido por computador, do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade de Fortaleza (UNIFOR). A idealização da proposta foi inspirada na metodologia de aprendizado baseada em projetos (ABP), que segundo Barell (2010), é uma das mais eficazes formas disponíveis de envolver os alunos com o conteúdo que está sendo apresentado na disciplina. A ABP é um formato de ensino no qual o aluno é motivado a aprender resolvendo problemas reais, que em muitos casos podem trazer contribuições às comunidades, o que implica em um maior envolvimento individual e uma maior interação com o grupo (BENDER, 2015).

2 DESENVOLVIMENTO DO MANIPULADOR ROBÓTICO

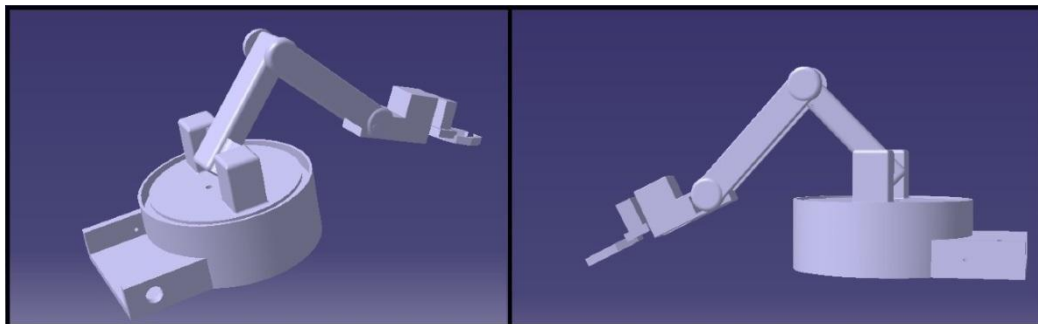
Para o desenvolvimento do manipulador, apelidado Jeri-Mun, foram inicialmente definidas algumas premissas para que braço pudesse ser usado não somente pelos alunos que o desenvolveram, mas por qualquer aluno da universidade que necessite realizar simulações em um braço robótico com 5 graus de liberdade em um ambiente laboratorial. As premissas do trabalho definiam que o manipulador deveria possuir baixo custo de fabricação em relação aos disponíveis no mercado e que utilizasse peças que possuíssem fácil reposição. Em relação ao funcionamento do manipulador, o mesmo deveria realizar movimentos suaves e precisos, com capacidade de carga de até 1 quilograma. Para o controle do braço robótico, deveria ser possível que o usuário enviasse valores de angulação aos motores ou valores de coordenadas desejadas da ponta do manipulador, enquanto o sistema deveria ser capaz impedir a realização de movimentos que acarretassem em colisões com objetos ou com ele mesmo.

Partindo destas premissas optou-se pela utilização de impressão 3D para fabricação das partes mecânicas do manipulador uma vez que a universidade possui uma impressora 3D para a utilização em projetos disciplinares. Para o controlador, foi escolhido a plataforma de prototipagem Arduino, por ser uma plataforma aberta e de fácil manipulação, enquanto para os atuadores foram escolhidos os servos motores MG995, uma vez que os mesmos possuem um torque de 8,5 kgf*cm quando alimentados em 5V.

2.1 Confecção e montagem

O Jeri-Mum é formado por um conjunto de corpos conectados em cadeia por juntas, esses corpos são chamados de elos. A fim de imprimir todas as peças do manipulador, foi utilizado o software CATIA V5 para fazer a modelagem 3D do braço, elo por elo, ilustrado na Figura 1.

Figura 1-Modelagem 3D do Jeri-Mun



Fonte: O autor

Na Figura 2, pode-se ver o manipulador finalizado, juntamente com um rótulo indicando cada um dos seus cinco eixos, portanto, pode-se afirmar que o braço possui 5 graus de liberdade.

Figura 2 - Jeri-Mun finalizado



Fonte: O Autor

2.2 Cinemática

Na ponta de um manipulador robótico encontra-se a ferramenta necessária para execução da tarefa para a qual o manipular foi desenvolvido. Para o projeto em questão, a ferramenta utilizada foi uma garra, que pode ser programada para executar uma série de movimentações que a leve para um conjunto de posições e orientações de um plano cartesiano base. Uma das grandes contribuições deste trabalho é o desenvolvimento matemático das cinemáticas direta e inversa que possibilitam o planejamento da trajetória da ferramenta.

A cinemática direta permite determinar a posição e a orientação da ferramenta em função das variáveis das juntas do manipulador em relação a sua base. Ou seja, é possível obter as coordenadas (x, y, z) da garra, utilizando as angulações de cada junta e o comprimento de cada elo. Enquanto a cinemática inversa faz exatamente o contrário da cinemática direta, ou seja, a partir da posição desejada em coordenadas (x, y, z) obtêm os ângulos dos eixos de rotação necessários para o braço robótico alcance essas coordenadas (COCOTA, 2013).

Cinemática Direta

Para realizar a cinemática direta, a convenção de Denavit-Hartenberg foi utilizada, já que a mesma permite a obtenção da posição e da orientação da ferramenta e estabelece, dentre outras proposições, que o comprimento e a torção de um elo qualquer dependem das juntas adjacentes. Dessa forma o sistema fica totalmente interdependente e a movimentação de qualquer junta impacta na posição da ferramenta (COCOTA, 2013).

Para o estudo e orientação de um corpo é necessário utilizar um sistema cartesiano como referência. Assim tem-se um sistema cartesiano fixo e um outro variando em relação ao movimento do corpo. Para representar um sistema de coordenadas em relação a outro, são usadas as matrizes de rotação, que irão representar a rotação do sistema em relação aos eixos x, y ou z (COELHO; IBRAHIM; CARVALHO, 2018).

De acordo com Carvalho *et al* (2017), as matrizes homogêneas de rotação são:

Para o eixo x:

$$Rot(x, \theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Para o eixo y:

$$Rot(y, \theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Para o eixo z:

$$Rot(z, \theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

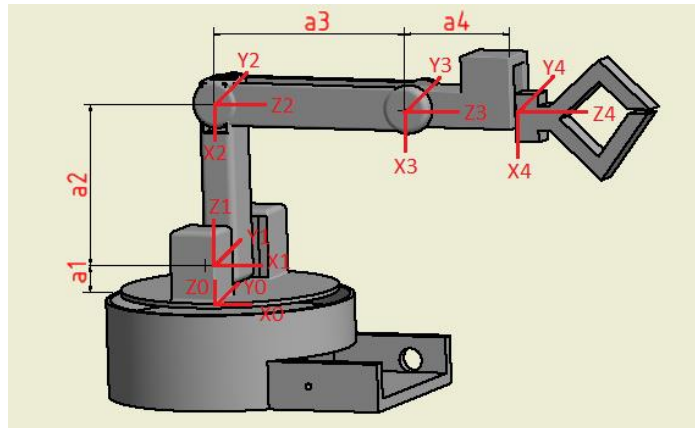
No caso das matrizes de translação, essas mostram o deslocamento feito pelo elo sobre o eixo x, y ou z. Sua representação de acordo com FOLEY *et al* (1982):

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta_x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta_y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Sendo os valores de Δ_x , Δ_y e Δ_z referentes a translação realizada.

A Figura 3 mostra um esquemático do braço visto lateralmente em sua posição inicial de repouso. Para a realização dos cálculos da cinemática direta as distâncias entre as juntas do braço robótico são as seguintes: $a_1 = 63\text{mm}$ para a base, e para os demais eixos: $a_2 = 145\text{mm}$; $a_3 = 170\text{mm}$ e $a_4 = 110\text{mm}$.

Figura 3 - Representação esquemática do braço em repouso



Fonte: Os autores

Dessa forma, para cada elo de ligação haverá uma matriz equivalente que será formada pela multiplicação das respectivas matrizes de rotação e translação e indicará a sequência de movimentação total entre junções consecutivas. Neste projeto, as matrizes que representam cada um desses elos são representadas pelas seguintes equações:

$$M_1^0 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$M_1^0 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$M_2^1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(90 + \theta_3) & 0 & \sin(90 + \theta_3) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(90 + \theta_3) & 0 & \cos(90 + \theta_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$M_3^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\theta_4) & 0 & \sin(\theta_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_4) & 0 & \cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$M_4^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_5) & \cos(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

O índice superior indica a junção inicial, enquanto o índice inferior representará a final. A matriz M_1^0 representa uma rotação de a_1 e uma rotação de θ_1 graus ambas no eixo z, seguida de uma rotação de θ_2 graus no eixo y. A matriz M_2^1 é resultante de uma translação de a_2 no eixo z seguida de uma rotação de $90 + \theta_3$ graus no eixo y. A matriz M_3^2 representa uma translação de a_3 no eixo z, acompanhada de uma rotação no eixo y de θ_4 graus. Por fim a matriz M_4^3 é resultante de uma translação de a_4 com uma rotação de θ_5 graus, ambas no eixo z.

Ao final, será calculada a matriz equivalente formada pela multiplicação de todas as anteriores da seguinte forma:

$$M_4^0 = M_1^0 \times M_2^1 \times M_3^2 \times M_4^3 \quad (10)$$

Assim, a partir da matriz representada pela Equação (10) será possível representar, com base nas rotações e translações ocorridas ao longo da estrutura do braço, a posição e a orientação do manipulador.

Cinemática Inversa

Como visto anteriormente, através da cinemática direta é possível encontrar a posição final de uma ferramenta a partir de seus ângulos de junta bem como as possíveis translações em elos. Ao passo que na cinemática inversa, a partir das coordenadas da posição pretendida e da orientação, é possível encontrar os valores dos ângulos e transações que necessitam ser realizados para que a ponta da ferramenta se desloque até a coordenada (CRAIG, 2012). Para Craig, a grande dificuldade em realizar a modelagem através da cinemática inversa está relacionado ao fato de que o método de resolução de suas equações é de forma não linearidade. Este método tem como características seu alto custo de interação, poucos pontos de interpolação e garantia de chegada ao final da trajetória, mesmo passando por uma região não alcançável (ROCHA, 2017).

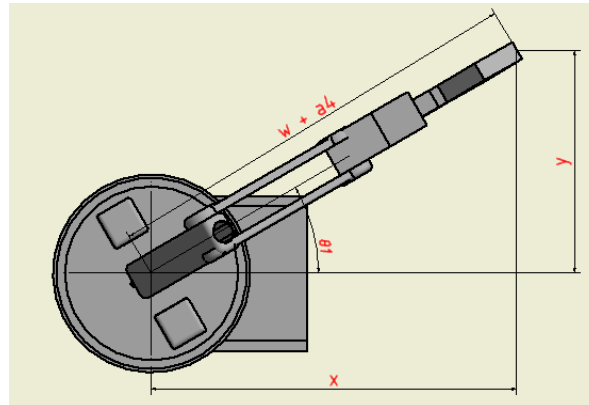
Para o manipulador desenvolvido neste projeto, o desafio está em encontrar os ângulos referentes a cada um dos três eixos que posicione a garra em um conjunto de coordenadas globais fornecidas previamente, levando em consideração que o elo representado por a_4 sempre estará paralelo com o solo. Sendo assim, é necessário o uso de das vistas superior e lateral para obtenção das equações de cinemática inversa.

A Figura 4 representa a vista superior do braço robótico, que através de uma análise matemática, é possível obter as Equações 11 e 12.

$$w = \sqrt{x^2 + y^2} - a_4 \quad (11)$$

$$\theta_1 = \text{atan}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (12)$$

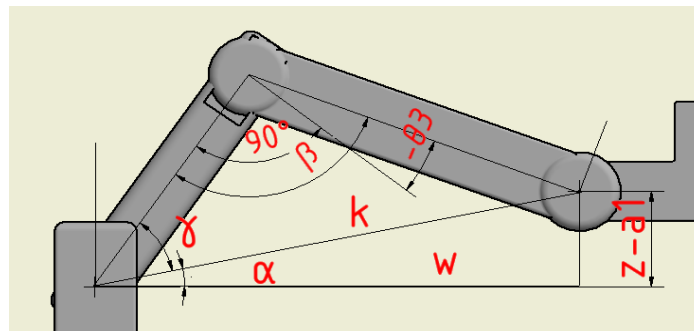
Figura 4 - Vista superior do manipulador



Fonte: O Autor

Através da vista lateral, representada na Figura 5, é possível obter, com outra análise matemática, as Equações 13, 14, 15, 16, 17 e 18, que combinadas, fornecem os valores dos ângulos desejados.

Figura 5 - Vista lateral do manipulador



Fonte: O Autor

$$k = \sqrt{w^2 + (z - a1)^2} \quad (13)$$

$$\theta2 = 90 - \alpha - \gamma \quad (14)$$

$$\theta3 = 90 - \beta \quad (15)$$

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{z - a1}{w}\right) \quad (16)$$

$$\gamma = \text{acos}\left(\frac{a2^2 + k^2 - a3^2}{2 * a2 * k}\right) \quad (17)$$

$$\beta = \text{acos}\left(\frac{a2^2 + a3^2 - k^2}{2 * a2 * a3}\right) \quad (18)$$

Já para o ângulo $\theta4$, que está associado ao eixo responsável por manter a garra do manipulador sempre em paralelo à mesa onde o mesmo opera, é intuitivo dizer que o mesmo deve desfazer a angulação dos valores de $\theta2$ e $\theta3$, como expressa a Equação 19.

$$\theta3 = 90 - \beta \theta4 = -\theta2 - \theta3 \quad (19)$$

Não se faz necessário o cálculo do ângulo $\theta5$ já que o mesmo é responsável somente pela abertura e fechamento da garra, e isto depende do que se deseja fazer com o manipulador.

Validação dos cálculos

O processo de validação das cinemáticas se dá em fornecer ângulos arbitrários e encontrar as coordenadas da ponta do manipulador através da cinemática direta, e fornecer estes valores para a cinemática inversa, obtendo os ângulos de entrada. Como, para um manipulador com cinco graus de liberdade, existe mais de uma combinação de ângulos possíveis que cheguem as mesmas coordenadas, se faz necessário realimentar a cinemática direta com os ângulos obtidos pelo cálculo. Pode-se então afirmar que os cálculos estão corretos se, ao final deste novo ciclo de cálculos pela cinemática direta, for obtido os mesmos valores de x , y e z fornecidos como entrada. Após a realização desse teste, as modelagens do braço foram então consideradas válidas.

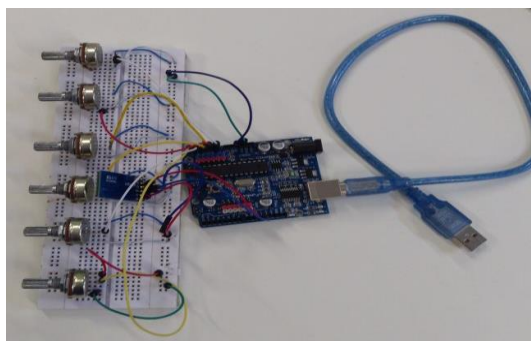
3 INTERFACE PARA PRÁTICAS E PROJETOS FUTUROS

Para que o manipulador robótico possa ser utilizado como bancada experimental e/ou como parte de um experimento interdisciplinar, foi desenvolvido uma interface de envio, recepção e validação de dados através de uma comunicação *bluetooth* mestre-escravo entre duas placas de prototipagem microcontroladas. O escravo está ligado a base do braço e, enquanto o mestre não se encontra fixo, uma vez que o mesmo é responsável por controlar o manipulador remotamente. As informações são transmitidas sempre de forma unidirecional, do mestre para o escravo, e podem conter dados referentes a angulação dos motores ou coordenadas desejadas para a ferramenta de manipulação.

A Figura 6 mostra a bancada mestre com o módulo *bluetooth*. A transmissão de informações somente é realizada quando há alteração nos parâmetros nos parâmetros de controle. A aquisição desses dados pode ser realizada de três maneiras distintas: através de informações das angulações de cada eixo pela porta serial, através de coordenadas absolutas (x,y,z) de onde deseja-se posicionar a ponta da ferramenta também pela porta serial ou através da conversão de valores adquiridos através de potenciômetros para ângulos em raios para cada um dos eixos de rotação.

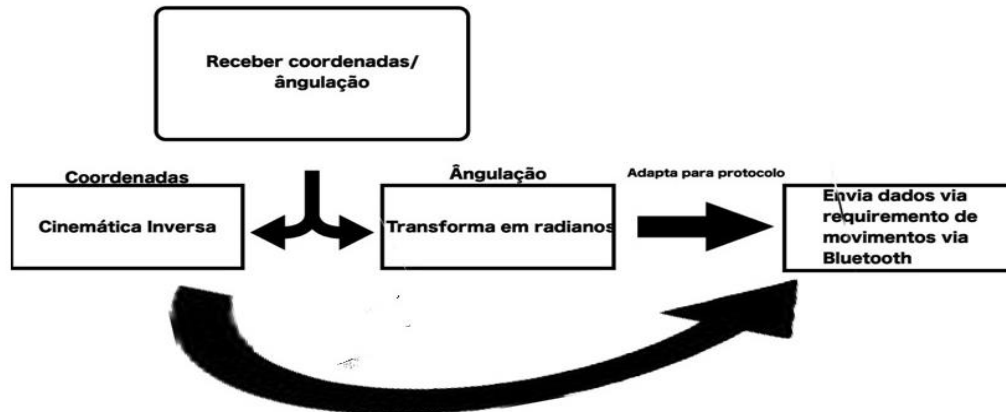
Os tipos de dados são identificados e tratados antes de serem transmitidos ao módulo escravo. Caso o dado informado seja um conjunto de ângulos desejados para cada eixo, faz-se a conversão dos mesmos para radianos. Caso seja informado um conjunto de coordenadas desejadas será necessário calcular a cinemática inversa do manipulador. Sendo assim, os dados tratados sempre resultam em um conjunto de ângulos em radianos. Essa lógica está ilustrada no fluxograma da Figura 7.

Figura 6 - Arduino mestre com controle analógico



Fonte: O autor

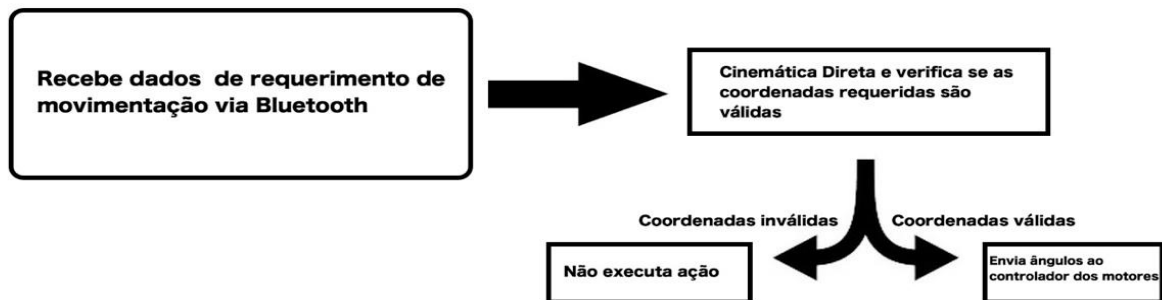
Figura 7 - Fluxograma de informações do Arduino mestre



Fonte: O Autor

A figura 8 representa o fluxograma de funcionamento do módulo escravo, onde o microcontrolador receberá as informações do mestre através do módulo *bluetooth* e aplicará a cinemática direta afim de verificar a validade dos ângulos desejados. Serão dados como ângulos válidos aqueles que não levem o manipulador a colidir com ele mesmo nem com a bancada onde foi instalado. Caso os ângulos sejam válidos, os mesmos serão aplicados aos motores.

Figura 8 - Fluxograma de informações do Arduino escravo



Fonte: O autor

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da metodologia de aprendizagem através de projetos mostrou resultados bastante satisfatórios na disciplina, tanto com o aumento do interesse dos alunos, por estarem desenvolvendo algo que possui aplicações reais, quanto no aprendizado do conteúdo. Os alunos também se sentiram motivados por estarem no controle da situação e não apenas como ouvintes em uma sala de aula, assim estavam sempre buscando conhecimento e atrás dos professores para tirarem dúvidas para o aprimoramento do projeto.

Durante a aplicação do projeto foi possível notar o desenvolvimento de várias habilidades interpessoais como, por exemplo, trabalho em equipe, proatividade, liderança, gestão de projetos e capacidade de tomar decisões e resolver problemas. O projeto também requisitou que seus participantes resgatassem diversos conhecimentos vistos ao longo da graduação e que são requisitos para o mercado de trabalho.

Após a conclusão do trabalho foi realizado uma pesquisa com os alunos envolvidos no desenvolvimento do projeto com o propósito de avaliar a percepção dos mesmos sobre o trabalho desenvolvido. Foi pedido para que os mesmos atribuíssem notas de 1 a 5, onde 1 representava muito pouco ou nada e 5 representava muito, para o quanto o desenvolvimento do

braço robótico contribuiu para o seu aprendizado da matéria e o como a turma estava engajada para a conclusão do trabalho. Cerca de 82% dos entrevistados atribuíram nota 4 ou 5 para a contribuição do aprendizado e para o engajamento da turma, porém houve um maior percentual de notas 5 para a avaliação pessoal de desempenho.

Por fim, para todos os engajados, o projeto mostrou-se uma satisfatória experiência, demonstrando que a metodologia de aprendizado baseado em projetos pode ser um método bom no processo de ensino ou de aprendizado dos alunos, podendo ainda ser aplicado em outros projetos interdisciplinares

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARELL, John. **Problem-based learning: The foundation for 21st century skills**. 21st century skills: Rethinking how students learn, p. 175-199, 2010.

BENDER, Willian N. **Aprendizagem baseada em projetos: educação diferenciada para o século XXI**. Penso Editora, 2015.

CARVALHO, João Carlos *et al.* **Mecanismos, máquinas e robôs**. Elsevier Brasil, 2017.

COCOTA, José Alberto Naves *et al.* **Desenvolvimento de um robô antropomórfico com punho esférico para práticas de robótica com alunos de graduação**. Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, v. 1, n. 1, 2013.

CRAIG, John J. (2012). **Robótica**. 3ed. Pearson.

FOLEY, J. D.; DAM, A. V. *et al.* **Fundamentals of interactive computer graphics**. [S.l.]: Addison-Wesley Reading, MA, 1982. V. 2.

JAHNAVI, Kadirimangalam; SIVRAJ, P. **Teaching and learning robotic arm model**. In: 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT). IEEE, 2017. p. 1570-1575.

QUIGLEY, Morgan; ASBECK, Alan; NG, Andrew. **A low-cost compliant 7-DOF robotic manipulator**. In: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2011. p. 6051-6058.

DEVELOPMENT OF A ROBOTIC MANIPULATOR: APPLICATION OF INTERDISCIPLINARITY BETWEEN COMPUTER ASSISTED PROJECT, MICROCONTROLLERS AND INDUSTRIAL ROBOTICS

Abstract: *This work was conceived based on Project-Based Learning (ABP) and presents the design, development and mathematical modeling steps of a low-cost robotic manipulator with five degrees of freedom through an interdisciplinary project linking three very important disciplines of the course of Control Engineering and Automation of the University of Fortaleza: Computer Aided Design, Microcontrollers and Industrial Robotics. At the end are presented the results that the project has brought to the best learning of the discipline on the optics of the tutor and students.*

Key-words: *Industrial Robotics. Computer Assisted Design. Microcontrollers. Kinematics. Robot Manipulator.*