

ANÁLISE DE MANIPULADOR ROBÓTICO PARA FINS DIDÁTICOS¹

Weverton Tobias dos Santos – wevertontobias09@gmail.com

Prof. Dr. Sérgio Luís Rabelo de Almeida – prof.sergio@mackenzie.br

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo aprimorar o estudo de conceitos de robótica industrial pela implementação de ensaios práticos padronizados em disciplinas do currículo de engenharia mecânica e mecatrônica. O processo foi pautado na análise do braço robótico industrial da ABB modelo IRB140 M2004 com Seis Graus de Liberdade (6-DOF) e nas respectivas normas de caracterização. O trabalho também buscou relacionar termos de aula com experiências e conhecimentos empíricos adquiridos ao longo da pesquisa. Ao final, foi feito um levantamento geral da percepção dos alunos quanto as práticas adotadas. Os resultados principais foram que os alunos envolvidos demonstraram boa receptividade ao método adotado, exercitando um estilo autodidata e crítico perante o conteúdo, onde pode-se concluir que o uso de manipuladores industriais para o ensino da robótica pode oferecer ótimos resultados de elevado valor na melhoria do processo de ensino.

Palavras-chave: Robótica. Manipulador. Didática. Braço Robótico. Robô. Acurácia. Repetibilidade. MATLAB. ABB

ROBOTIC MANIPULATOR ANALYSIS FOR TEACHING PURPOSES

This academic work had an objective to improve the study of industrial robotics concepts by the implementation of standardized hands-on experiments in the curricular disciplines of mechanical and mecatronics engineering. The process is based on the analysis at the ABB's industrial robotic arm model IRB140 M2004 with Six degree of Freedom (6-DOF) and its respective standard description. The academic work also aimed to connect terms of class with experiences and empirical knowledge acquired throughout the research. At the end, was made a general survey with the students perception about the adopted hands-on method. The main results was that the involved students demonstrated a good acceptance about this method, exercising a self-taught and critical style towards content, where is possible to conclude that using industrial manipulator to teach robotics can offer great results with elevated value at the improvement of teach process.

¹ Artigo do Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Mecânica com Ênfase em Mecatrônica, EE, UPM, São Paulo, 2019.

Key-words: Robotic. Manipulator. Didatic. Robotic Arm. Robot. Accuracy. Repeatability. MATLAB. ABB

1 INTRODUÇÃO

O estudo da robótica tem sido muito discutido ao longo dos anos e apresenta notável evolução com o avanço da tecnologia, desde o surgimento do conceito do robô industrial, Craig (2013) já o identificava como uma tendência no processo da automação da manufatura e relata o crescimento do mercado robótico apesar de sujeito as flutuações econômicas.

Pensando nesse cenário percebe-se a necessidade da introdução dos conceitos básicos e avançados no tema da automação e robótica para estudantes que desejem participar da geração e propagação de conhecimento, assim como a criação de projetos e pesquisas sobre dispositivos relacionados. Um fato interessante sobre a área das ciências exatas a ser analisado é que muitos dos alunos que chegam aos cursos de graduação superior, tendem a abandoná-los conforme dito pelo Censo da Educação Superior (2017), os resultados levantados por Amaral (2017) indicam que para uma mesma turma de ingressos nos cursos nacionais de engenharia, percebeu uma queda significativa 58% entre alunos que se matricularam e alunos que chegaram a se formar.

Parte da justificativa encontrada pela autora para essa diferença é dada pela falta de conhecimento prévio em conceitos básicos do ensino fundamental e médio. Tal situação somente reforça uma percepção dada por Papert (1985) ao reafirmar uma visão de que a falta de conhecimento em determinado assunto afasta os alunos daquilo que eles julgam não conhecer ou não serem capazes de compreender.

Diversificar a quantidade de meios didáticos é de total importância para qualquer disciplina, assim como abordado por Papert (1994) ao afirmar que não somente o aperfeiçoamento da instrução seja capaz de melhorar o desempenho do ensino, mas que é necessário a criação de micromundos verdadeiramente interessantes que estimulem o aprendizado.

Permitir aos discentes novos meios de aprendizado para este tema tão relevante na mecatrônica, que é a robótica, pode ser de total diferença para termos profissionais mais capacitados atuando na indústria nacional, inclusive, estudos levantados pela *International Federation Of Robotics* (2018) indicam a necessidade de reação do mercado brasileiro de robótica ao apontar que as estimativas de crescimento do mercado de robótico brasileiro são de apenas 10% ao ano, estando abaixo da estimativa mundial de um crescimento de aproximadamente 14% ao ano até o final de 2021. Dessa forma, o projeto abordado neste trabalho pode aprimorar o entendimento dos estudantes perante a área da robótica, apoiando a pesquisa e desenvolvimento tecnológico nacional.

2 METODOLOGIA

Para execução deste trabalho, foram utilizadas pesquisas tanto práticas quanto teóricas para compilação de métodos e resultados no aprendizado por meio do uso da robótica.

No que tange à pesquisa prática, em sala de aula foi observado, a reação e compreensão dos alunos por meio do contato com o robô manipulador e simuladores virtuais, para testes de conceitos de automação e robótica, verificando a aplicabilidade de teorias para fixação do conteúdo aos discentes.

Quanto à pesquisa teórica, foi realizado o levantamento de alguns métodos didáticos que já foram abordados e documentados como boas práticas no auxílio do ensino nos mais diversos níveis de educação assim como técnicas de avaliação de desempenho de manipuladores industriais proposta pela ISO 9283:1998.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Boa parte do que concerne o estudo da robótica é baseado no estudo do movimento e da posição no espaço, seja do dispositivo ou de um objeto a que se pretende ter algum tipo de interação, nesses tipos de situação é necessário que se atribua ao objeto em questão um sistema de coordenadas (CRAIG, 2013), essa definição pode ser exemplificada pela figura 1. Para Craig (2013) um manipulador pode ser considerado um equipamento composto por elos praticamente rígidos, conectados por juntas, sendo essas de rotação ou deslizamento.

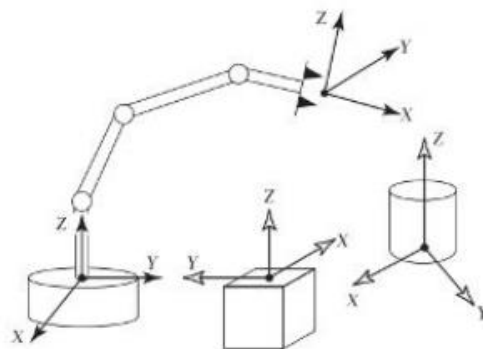


Figura 1 - Sistemas de coordenadas aplicadas nos manipuladores e objetos em estudo

Fonte: CRAIG, 2013

Para elucidar a ideia de um elo rígido, deve-se considerar a linha de pensamento de Selig (1992) onde o autor assume como hipótese simplificadora que todos os objetos sólidos são também corpos rígidos. Respeitando-se o raciocínio de que se adotado um sistema de referência padrão, pode-se ligar dois pontos de um corpo à origem por meio dos vetores \vec{v}_1 e \vec{v}_2 e por meio do cálculo matricial é possível aferir que a distância entre os pontos se manterá a mesma, seja qual for a posição

do corpo rígido em relação ao sistema de coordenadas, isto é, o quadrado da distância entre os pontos que se encontram ao final desses vetores é dado pela equação 1.

$$(\vec{v}_1 - \vec{v}_2) * (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) = (\vec{v}_1 - \vec{v}_2)^T * (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) \quad (1)$$

Se alterada a posição do manipulador, os pontos escolhidos assumem novas posições e respectivamente novos vetores \vec{v}'_1 e \vec{v}'_2 em relação à origem do sistema de coordenadas, após os tratamentos dados nas equações 2 e 3, nota-se que a transformação obtida é rígida pois a distância entre os pontos mantém-se a mesma. (SELIG, 1992)

$$(\vec{v}'_1 - \vec{v}'_2) * (\vec{v}'_1 - \vec{v}'_2) = (\vec{v}'_1 - \vec{v}'_2)^T * (\vec{v}'_1 - \vec{v}'_2) \quad (2)$$

$$(\vec{v}_1 - \vec{v}_2) * (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) = (\vec{v}'_1 - \vec{v}'_2) * (\vec{v}'_1 - \vec{v}'_2) \quad (3)$$

Desta forma, é válido compreender o estudo da posição do robô, analisando a atuação de um manipulador planar e sua matriz de rotação. Segundo Selig (1992) as matrizes de rotação $R(\Theta)$ são consideradas para transformações rígidas por manterem o formato do corpo, ou seja, após a movimentação da junta rotacional, o elo rígido não é deformado e a posição dele pode ser definida pela matriz $R(\Theta)$ (Equação 4):

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

Com sua posição definida no espaço por meio da matriz de rotação $R(\Theta)$, é possível definir o pacote de trabalho, que nada mais é do que o campo de atuação do efetuador do manipulador, esse pacote de trabalho pode ser exemplificado na figura 2, nela é expresso um manipulador planar de elos com comprimento l_1 e l_2 , ambos com angulação possível no intervalo dado pelas equações 5 e 6:

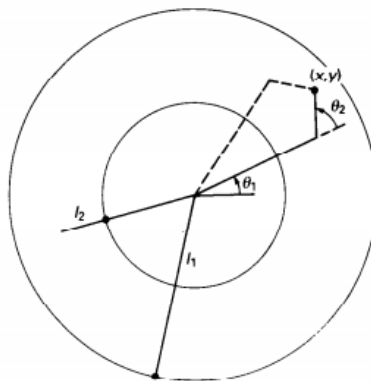


Figura 2 - Manipulador planar e seu pacote de trabalho

Fonte: SELIG, 1992

$$0 \leq \theta_1 \leq 2\pi \quad (5)$$

$$0 \leq \theta_2 \leq 2\pi \quad (6)$$

Dessa forma, para Selig (1992) o deslocamento da extremidade do elo l_2 do manipulador até determinado ponto do envelope de trabalho, se dá para uma posição de coordenadas x e y expressas pelas equações 7 e 8.

$$X = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (7)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (8)$$

Para Craig (2013) esse modelo de estudo onde a partir dos ângulos de junta definimos as posições dos pontos de um elo do robô manipulador no espaço, dadas pelos valores nos eixos x e y é um campo abordado pela cinemática direta. Já a sua contraparte, a cinemática indireta, é responsável por definir os ângulos de junta a partir dos valores de x e y do efetuador no espaço (CRAIG, 2013), tais condições são possíveis a partir das equações 9 e 10, assim como abordado por Selig (1992).

$$\cos \theta_2 = \frac{1}{2l_1l_2}(x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2) \quad (9)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{1}{x^2+y^2}(x(l_1 - l_2 \cos \theta_2) + yl_2\sqrt{1 - \cos^2 \theta_2}) \quad (10)$$

Uma ferramenta de cálculo bem difundida é a notação por Denavit-Hartenberg, de acordo com Rosário (2011), por meio da cinemática sistematizada durante o cálculo é possível obter as coordenadas no espaço somente do elemento final da cadeia aberta do manipulador.

Ainda de acordo com o autor, para um equacionamento correto por D-H (Denavit Hartenberg), considera-se que um elo somente poderá se conectar com outros dois elos, no caso um elo qualquer poderá estar ligado somente ao elo i-1 e ao elo i+1. Rosário (2011) ainda defende que a posição dos elos “elo i” e “elo i-1” é determinada por d_i que é a distância ao longo do eixo das juntas entre suas normais e por θ_i que é o ângulo de junta entre as normais.

Outras variáveis que Rosário (2011) explica em seu livro são a_i que nada mais é do que a menor distância ao longo da normal comum entre os eixos das juntas e α_i descrito como ângulo de torção do “elo i”. Para uma melhor representação das variáveis é possível conferi-las na figura 3.

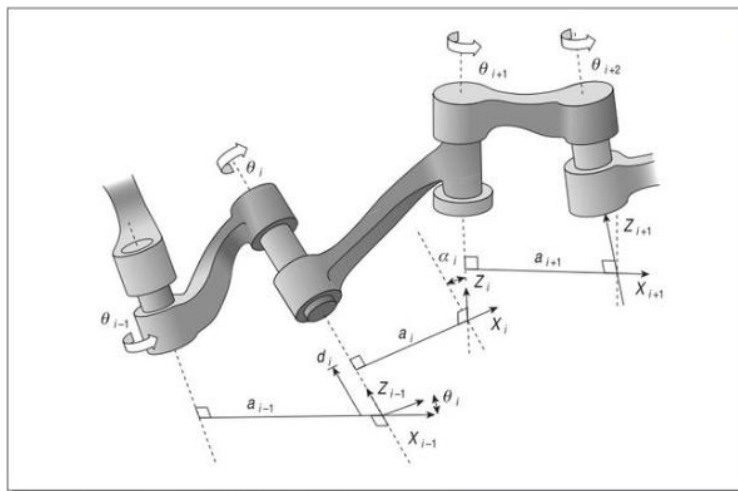


Figura 3 - Notação DH

Fonte: ROSÁRIO, 2011

Após a determinação dos parâmetros, Rosário (2011) infere que é possível separá-los em duas categorias, a primeira diz respeito à estrutura do elo e seus parâmetros de junta, com as variáveis a_i e α_i , os demais d_i e θ_i representam a localização em relação aos elos mais próximos. Por fim, outra

configuração de suma importância citada pelo autor é que o eixo z_{1-i} é alocado ao longo do eixo de movimentação da junta i , que o eixo x_i é posicionado ortogonalmente a z_{1-i} com sentido para fora dele e por fim, utilizando a regra da mão direita, o eixo y_i é posicionado respeitando as demais regras.

De posse dessas variáveis, Silva et al. (2012) afirma que é possível montar o sistema por meio da equação 11.

$${}^{k-1}T_k = R_{z,\theta} * Transl_{z,d} * Transl_{x,a} * R_{x,\alpha} \quad (11)$$

Onde:

$R_{z,\theta}$ = Rotação θ em torno do eixo z

$Transl_{z,d}$ = Translação d ao longo do eixo z

$Transl_{x,a}$ = Translação a ao longo do eixo x

$R_{x,\alpha}$ = Rotação α em torno do eixo x

Matricialmente pode ser apresentada conforme a equação 12 de acordo com Silva et al. (2012):

$${}^{k-1}T_k = \begin{bmatrix} c_{\theta k} & -s_{\theta k}c_{\alpha k} & s_{\theta k}s_{\alpha k} & a_k c_{\theta k} \\ s_{\theta k} & c_{\theta k}c_{\alpha k} & -c_{\theta k}s_{\alpha k} & a_k s_{\theta k} \\ 0 & s_{\alpha k} & c_{\alpha k} & d_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Onde: a_k = Distância ao longo de x_k , partindo da origem O_k à interseção dos eixos x_k e z_{k-1} ;

d_k = Distância ao longo de z_{k-1} , partindo de O_{k-1} à interseção dos eixos x_k e z_{k-1} ;

α_k = Ângulo do eixo z_{k-1} para o eixo x_k , medido em torno de x_k ;

θ_k = Ângulo do eixo x_{k-1} para o eixo x_k , medido em torno de z_{k-1} , (sinal obtido pela regra da mão direita).

Posteriormente, Silva et al. (2012) afirma que a multiplicação das matrizes de transformação (Equação 13), torna possível obter a matriz de transformação homogênea do manipulador inteiro (Equação 14), isso é, uma matriz que agrupa desde a base do manipulador até a extremidade da cadeia aberta do manipulador, no caso o efetivador final, nas equações 15 e 16.

$${}^0T_n = {}^0T_1 * {}^1T_2 * \dots * {}^{n-1}T_n \quad (13)$$

$${}^{base}T(q)_{ferramenta} = \begin{bmatrix} R(q) & p(q) \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} c_{\theta 1} & 0 & s_{\theta 1} & a_1 c_{\theta 1} \\ s_{\theta 1} & 0 & -c_{\theta 1} & a_1 s_{\theta 1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c_{\theta 2} & -s_{\theta 2} & 0 & a_2 c_{\theta 2} \\ s_{\theta 2} & c_{\theta 2} & 0 & a_2 s_{\theta 2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c_{\theta 3} & s_{\theta 3} & 0 & a_3 c_{\theta 3} \\ s_{\theta 3} & -c_{\theta 3} & 0 & a_3 s_{\theta 3} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$${}^3T_6 = \begin{bmatrix} c_{\theta 4} & 0 & -s_{\theta 4} & 0 \\ s_{\theta 4} & 0 & c_{\theta 4} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c_{\theta 5} & 0 & s_{\theta 5} & 0 \\ s_{\theta 5} & 0 & -c_{\theta 5} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c_{\theta 6} & -s_{\theta 6} & 0 & 0 \\ s_{\theta 6} & c_{\theta 6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Por fim, outro tópico de demasiada importância e o mais abordado dentro deste projeto, se dá pela compreensão dos conceitos de repetibilidade, do desempenho dinâmico e da exatidão, também chamada por diversos autores de acurácia, precisão ou eficácia.

Segundo Pazos (2002), a repetibilidade é a capacidade de um manipulador de retornar para um determinado ponto no espaço quando pedido pelo usuário mantendo o mínimo de alteração desde a última vez em que este saiu desta posição pedida. Já a eficácia pode ser determinada como a capacidade do robô alcançar o ponto no espaço. Segundo Rosário (2010), o desempenho dinâmico por sua vez é definido como o comportamento do robô para chegar na postura desejada, portanto, é possível afirmar que o desempenho dinâmico se refere a capacidade do robô de seguir a mesma trajetória para concluir um deslocamento.

Para determinar essas características, é necessário que seja vinculado um sistema de coordenadas à extremidade da cadeia aberta, esse ponto é chamado de *TCP (Tool Center Point)* ou Elemento Terminal (Rosário, 2010). Comumente é utilizado um sistema cartesiano para esse sistema de coordenadas (Figura 4) segundo o autor.

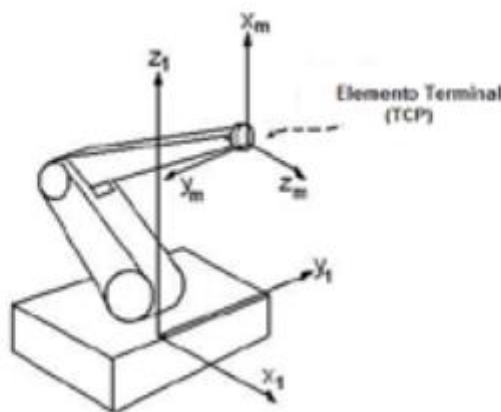


Figura 4 - Sistema de coordenadas no TCP

Fonte: ROSÁRIO, 2010

Para efeito de cálculos, a norma ISO 9787 considera que a postura do manipulador, ou em outras palavras, o ponto no espaço em que o *TCP* está localizado, se dá por meio de sua orientação em relação ao sistema de coordenadas definido na base do manipulador (x_1 , y_1 e z_1), sua posição no espaço dentro do sistema da base do manipulador (x_m , y_m e z_m) e em relação aos ângulos “a”, “b” e “c” exatamente como mostra a figura 5. (ROSÁRIO, 2010)

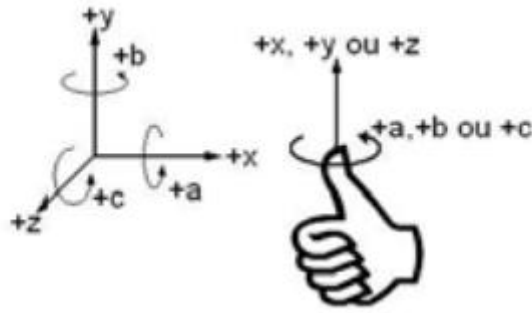


Figura 5 - Sistema de coordenadas e ângulos para localização do TCP

Fonte: ROSÁRIO, 2010

Mello (2016) afirma que pela norma ISO 9283:1998, a tendência de postura pode ser separada em duas vertentes, a primeira delas diz respeito a tendência de posicionamento e avalia a diferença entre a posição que foi programada com o baricentro da média das posições que o manipulador de fato atingiu, a segunda corresponde à tendência de orientação, esta por sua vez avalia a diferença entre a orientação programada e a média das orientações atingidas. Ambas as vertentes são graficamente exploradas pela figura 6.

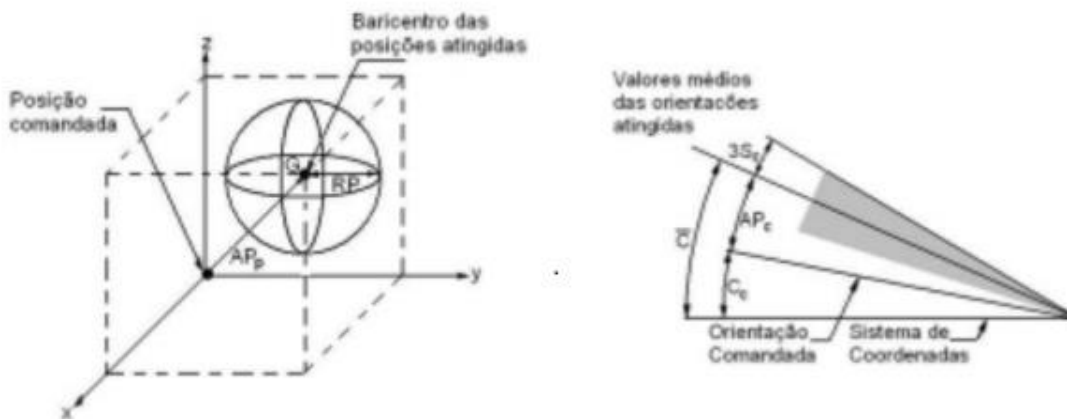


Figura 6 - Representação do baricentro de posições atingidas e da tendência de orientação

Fonte: MELLO, 2016

Para garantir uma avaliação correta desses indicadores, o manipulador deve realizar um percurso por 30 vezes (Figura 7), passando pelos pontos P1, P2, P3, P4 e P5 localizados dentro de um cubo no espaço do pacote de trabalho representado pela figura 7 (MELLO, 2016). Após o procedimento, para o cálculo da tendência de postura, uma característica para a eficácia, deve ser calculada a equação 17 para resultados unidirecionais (MELLO, 2016):

$$Tp = \bar{p} - p_c \quad (17)$$

Onde:

Tp = Tendência de postura

\bar{p} = média das posturas

p_c = posição comandada

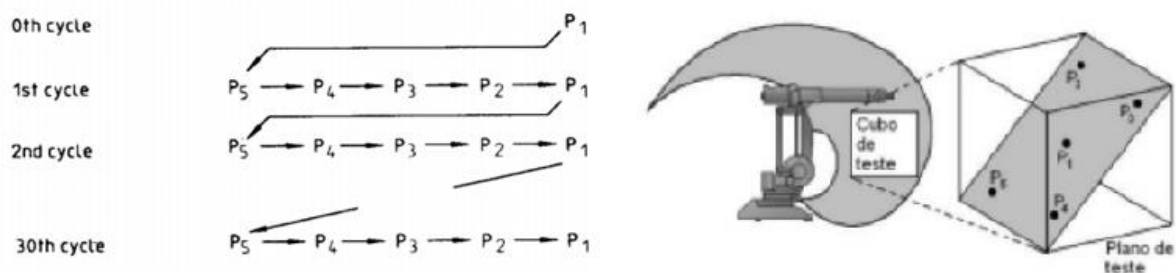


Figura 7 – Ciclos e pontos no espaço do pacote de trabalho definidos pela norma ISO 9283:1998

Fonte: MELLO, 2016

Em vias de realizar uma avaliação de repetibilidade de postura, o procedimento a ser executado é o mesmo, tendo como diferencial que a variável a ser quantificada é o raio da esfera de pontos atingidos conforme dito anteriormente. Uma outra avaliação se dá pela faixa de três desvios padrão das médias dos ângulos de orientação em relação a postura alcançada. (MELLO, 2016)

Por fim, este trabalho teve como objetivos utilizar como base de estudo e experimentos o manipulador industrial da ABB modelo IRB140 M2004 e ferramentas virtuais para aplicação de conceitos e teorias de automação e robótica, além de analisar teorias sobre um melhor aproveitamento do conteúdo disciplinar.

Adentrando no campo da didática no ensino, segue aqui a mesma metodologia utilizada por Papert (1985) ao afirmar em seu livro que o uso do computador não é necessário para se propor boas estratégias de aprendizado, contudo, para o autor, por meio da assimilação da construção de um programa e do processo de aprendizagem, vale a reflexão de como essa ferramenta, pode aperfeiçoar a estratégia de *debugging*, que nada mais é do que o ato de estudar o erro, não visando-o como algo ruim, mas sim como um meio, isto é, parte do caminho para encontrar a solução.

E o ato de utilizar a tecnologia pode ser também um fator motivacional e não somente um meio para observação de erros, tornando o aprendizado uma atividade interessante e motivadora, por exemplo, em sua pesquisa com LOGO, Papert (1985) notou um comportamento nas crianças onde estas discutiam animadas sobre seus próprios conhecimentos a fim de replicarem suas ações na Tartaruga (Figura 8) por meio de programas computacionais.



Figura 8 - Crianças utilizando a Tartaruga para desenhar um urso

Fonte: PAPERT, 1985

Outro ponto importante é que medida que o tempo passa, novos recursos vão surgindo, e estes por sua vez podem ter a capacidade de oferecer um ganho intelectual, partindo desse princípio, é papel do educador reconhecer quais das opções disponíveis podem auxiliar no desenvolvimento da educação, geralmente essas tendências acompanham o mercado, e somente um contato direto pode ser capaz de dizer se a mudança no modo de ensino por meio do uso de um novo recurso é realmente eficaz. (PAPERT, 1985)

Essa linha de pensamento ainda hoje é presente e defendida por Franco et al. (2018) ao afirmar que os métodos didáticos precisam ser modificados, baseando-se no fato de que as mudanças evolutivas tecnológicas e suas tendências influem para a necessidade de se desenvolverem técnicas que possibilitem ao discente estar preparado para diversas situações no cotidiano profissional nos ramos de robótica, automação, comunicação e tecnologia de informação, sendo esses segmentos importantes impulsionadores do desenvolvimento na atualidade.

4 RESULTADOS

Buscando o contato com importantes elementos em campos distintos da robótica, foram projetados 3 ensaios, de modo a permitir aos alunos o contato com a cinemática do mecanismo e sua avaliação de desempenho. A fim de testar a eficiência da aplicação, os alunos foram submetidos à um questionário avaliativo sobre o impacto causado pelas atividades práticas com as ferramentas virtuais e com o manipulador IRB 140 M2004.

O primeiro ensaio teve como objetivo, avaliar a tendência de percurso que o manipulador da ABB, modelo IRB 140 M2004 apresenta e se ela estava de acordo com as condições informadas pela fabricante nas especificações técnicas da máquina. O procedimento de montagem iniciou-se com a adequação de uma ferramenta de acoplamento para o relógio apalpador, como ilustrado na figura 9.



Figura 9 - Relógio apalpador acoplado no flange do TCP

Fonte: Autoria própria

Tendo ordenado este fator ferramental, a programação mandatoriamente seguiu as definições dadas pela fabricante, sendo importante em um primeiro momento criar o programa de fato. Dentro

do programa foi especificada a ferramenta *tool*, neste caso a ferramenta criada referia-se ao relógio apalpador.

Após especificar qual o efetuator utilizado, foi necessário realizar a translação do *TCP* para a ponta do relógio apalpador, vale enfatizar que o ponto inicial desta característica se apresenta no flange. Esse procedimento necessita que seja aproximado a ponta do relógio apalpador em um ponto fixo no espaço, quatro vezes, sendo que em cada vez a postura comandada deve ser diferente. Com as quatro posições, o robô pôde localizar a ponta do relógio apalpador como seu novo *TCP*.

Para a próxima etapa deve-se especificar o plano de trabalho a ser utilizado no código, isso é possível definindo três pontos do plano (dois pontos no eixo x e um no eixo y). Feitos os procedimentos supracitados, agora o programa já possui ferramenta e objeto de trabalho.

Por fim, para definir a trajetória adotada pelo manipulador, por meio da *flex pendant* o braço robótico foi posicionado de modo a garantir um ponto de referência na leitura do relógio apalpador, para esse experimento em questão foi definido a leitura em 0,00 mm. Seguindo paralelamente à parede da cantoneira foram marcados dez pontos de observação (Figura 10), esses pontos são denominados *targets*, onde o robô foi programado para parar durante um período de dez segundos em cada um dos pontos, por fim, com dez *targets* criados fez-se a conexão entre eles, gerando o percurso denominado *path*.



Figura 10 - Pontos localizados na cantoneira apoiada no desempenho

Fonte: Aatoria própria

De modo a garantir a precisão em seu melhor desempenho para o manipulador, para os *targets* inicial e final o comando de aproximação adotado foi o *movj*, um modelo de aproximação por junta, pois o próprio é utilizado para aplicações onde não é necessária muita precisão no movimento e pode-se aceitar desvios de percurso. Ao longo dos *targets* utilizados na leitura da postura para cálculo utilizou-se o comando de aproximação por *movl*, este modelo de aproximação linear evita grandes desvios de percurso e tem aplicações mais utilizadas quando é desejável um grau de eficácia mais elevado.

Para modelar matematicamente a tendência de postura, foi utilizado o cálculo proposto por Mello (2016) ao referenciar a equação 17 utilizada pela norma ISO 9283:1998, no caso utilizou-se o modelo de cálculo para tendência de postura unidirecional considerando que as leituras feitas pelo relógio apalpador se referiam unicamente aos deslocamentos do *TCP* no eixo X.

De modo a garantir uma maior interação por parte dos alunos, a turma de “Automação Industrial” foi dividida em três grupos (Figura 11) e com o robô programado para realizar um percurso paralelo à superfície lateral da cantoneira apoiada no desempenho, iniciaram-se os testes.



Figura 11 - Grupos de alunos tomando medidas do ensaio

Fonte: Autoria própria

O programa foi executado, e em vias de aproximar-se às sugestões da norma o percurso foi repetido quinze vezes sendo que os três grupos foram responsáveis por tomar nota do posicionamento do manipulador em dez pontos do percurso para cada repetição, tendo cada grupo anotado os valores referentes a 5 repetições, foram formalizados cento e quarenta e cinco pontos no espaço, descartando-se e valores ilegíveis por tempo insuficiente de estabilização.

Com os grupos divididos, dois alunos eram responsáveis pela interação direta com o manipulador, sendo um responsável por realizar a leitura de dez posições marcadas por meio de parada do robô manipulador ao longo do percurso para cada repetição, e os demais integrantes do grupo eram responsáveis por revezarem a anotação dos dados para posterior cálculo. Por fim, o percurso e sua tendência foram modelados matematicamente conforme a norma.

O segundo ensaio, teve como objetivo principal, inserir os alunos da turma de “Automação e Robótica” também dentro dos conceitos de avaliação de desempenho de um robô manipulador, seguindo a norma ISO 9283:1998 dentro das limitações técnicas apresentadas no experimento, as características do modelo IRB 140 M2004 escolhidas foram a repetibilidade, a tendência de orientação e a repetitividade de postura.

O procedimento de preparação seguiu as mesmas indicações do ensaio inicial, ou seja, assim como no estudo de tendência de postura, foi utilizada a mesma ferramenta de acoplagem para o relógio apalpador e a programação seguiu como obrigatório as definições dadas pela fabricante,

criando o programa de fato, especificando a ferramenta, transladando o *TCP* para a ponta do relógio apalpador, e definindo seu plano de trabalho.

As diferenças de preparação foram dadas no momento de definir a trajetória adotada pelo manipulador, primeiro definiu-se um ponto P_1 no espaço conforme as especificações da norma ISO 9283:1998. O ponto escolhido estava dentro do pacote de trabalho de forma a se adequar ao cubo de testes sugerido pela norma e pela fabricante (Figura 12).

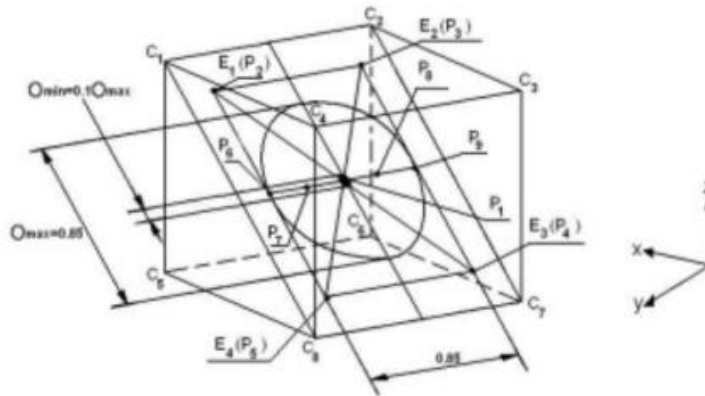


Figura 12 - Cubo de teste de acordo com a ISO 9283:1998 e sugerido pela fabricante

Fonte: MELLO, 2016

De acordo com a norma, os demais pontos (P_2 , P_3 , P_4 e P_5) foram especificados e o robô foi programado para realizar uma varredura por eles, passando a ponta de contato do relógio apalpador nos pontos escolhidos no espaço. Em vias de tornar os cálculos factíveis, foram escolhidos pontos de referência na leitura do relógio apalpador para cada vez que o manipulador levasse o próprio até um ponto definido para leitura.

Devido à quantidade de alunos na sala, o procedimento ocorreu em dois dias distintos, e similar ao primeiro ensaio, os alunos foram divididos em três grupos cada dia de modo a garantir o ensaio em tempo hábil e com maior interação por parte da turma. Por restrições de tamanho e ferramental, a dimensão do cubo e consequentemente do plano de trabalho (Figura 13), não seguiu as dimensões especificadas pela fabricante, a ABB sugere um cubo de aresta 250 mm, sendo que no experimento em questão o plano de trabalho adotou um quadrado de lado 175 mm.

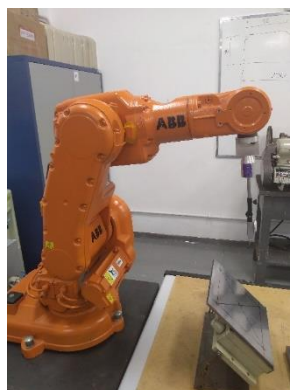


Figura 13 - Plano inclinado e manipulador IRB140 M2004

Fonte: Autoria própria

O robô foi programado para passar por todos os pontos, seguindo a ordem decrescente e parar por tempo determinado para leitura da medida, esse tempo de espera para movimentação entre um ponto e outro foi de 5 segundos. Para adequar-se à norma, cada vez que o robô completava os cinco pontos, um ciclo era concluído e em conjunto foram realizados trinta ciclos, totalizando 150 leituras. Assim como no experimento anterior, os grupos eram divididos de modo a permitir uma melhor interação com a máquina, dentro dos grupos os alunos se revezaram para realizar a leitura do relógio apalpador e anotar os valores obtidos.

Por fim, o último experimento teve como objetivo modelar virtualmente com o pacote suplementar do MATLAB, denominado Robotics Toolbox v9.10, as matrizes de transformação do manipulador robótico da ABB modelo IRB140 M2004 em pontos do seu envelope de trabalho.

Para tal, foram adotados os parâmetros apresentados por Cristoiu e Nicolescu (2017) conforme a tabela 1.

Junta	α_i (at elo)	a_i (c elo)	D_i	Θ_i
1	-90°	70	352	Θ_1
2	0°	360	0	Θ_2-90°
3	-90°	0	0	Θ_3
4	90°	0	380	Θ_4
5	-90°	0	0	Θ_5
6	0°	0	65	Θ_6+90°

Tabela 1 - Parâmetros D-H do IRB140 M2004

Fonte: Autorial própria

Onde: a_i (c elo) = Comprimento do elo
 α_i (at elo) = Ângulo de torção do elo
 d_i = Deslocamento de junta
 Θ_i = Ângulo de junta

A primeira instrução dada aos alunos foi a identificação de elos e juntas do robô manipulador, por consequência seu grau de liberdade, isso foi possível por meio da função “Link”, onde os alunos determinaram os parâmetros “ α ”, “ d ” e “ a ”, na figura 14 é possível visualizar o comando utilizado no software para os elos criados pelos alunos.

```

Command Window
>> L1 = Link ('d',352,'a',70,'alpha',-pi/2);
>> L2 = Link ('d',0,'a',360,'alpha',0);
>> L3 = Link ('d',0,'a',0,'alpha',-pi/2);
>> L4 = Link ('d',380,'a',0,'alpha',pi/2);
>> L5 = Link ('d',0,'a',0,'alpha',-pi/2);
>> L6 = Link ('d',65,'a',0,'alpha',0);
fx >> |
< >

```

Figura 14 - Elos criados no MATLAB

Fonte: Autorial própria

A segunda tarefa realizada pelos discentes foi conexão dos elos gerando a cadeia aberta do Robô Manipulador, nesse caso foi utilizada a função “SerialLink” (Figura 15) que após finalizada retorna diversas características estruturais do manipulador, assim como sua tabela de parâmetros DH, sua quantidade de eixos, seus tipos de junta e matriz de aceleração gravitacional.

```

Command Window
>> bot = SerialLink ([L1 L2 L3 L4 L5 L6])

bot =

noname (6 axis, RRRRRR, stdDH, fastRNE)

+-----+-----+-----+-----+-----+
| j |   theta |     d |     a |   alpha |  offset |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1 |     q1 |   352 |    70 | -1.571 |     0 |
| 2 |     q2 |     0 |   360 |     0 |     0 |
| 3 |     q3 |     0 |     0 | -1.571 |     0 |
| 4 |     q4 |   380 |     0 |  1.571 |     0 |
| 5 |     q5 |     0 |     0 | -1.571 |     0 |
| 6 |     q6 |    65 |     0 |     0 |     0 |
+-----+-----+-----+-----+-----+

grav =    0 base = 1 0 0 0 tool = 1 0 0 0
          0      0 1 0 0          0 1 0 0
          9.81  0 0 1 0          0 0 1 0
                   0 0 0 1          0 0 0 1

fx >> |
<

```

Figura 15 - Tabela de parâmetros DH gerada no MATLAB

Fonte: Autoria própria

Com o braço robótico modelado virtualmente, os alunos geraram as matrizes de transformação de acordo com pontos no contorno do envelope de trabalho (Figura 16) e com a tabela 2 fornecida pela fabricante.

Position (see Figure 12)	Position (mm) X	Position (mm) Z	Angle (degrees) Axis 2	Angle (degrees) Axis 3
0	450	712	0	0
1	70	1092	0	-90
2	314	421	0	+50
3	765	99	110	-90
6	1	596	-90	+50
7	218	558	110	-230
8	-670	352	-90	-90

Tabela 2 - Ângulos de junta e coordenadas cartesianas correspondentes

Fonte: ABB AUTOMATION TECHNOLOGIES AB ROBOTICS, 2004

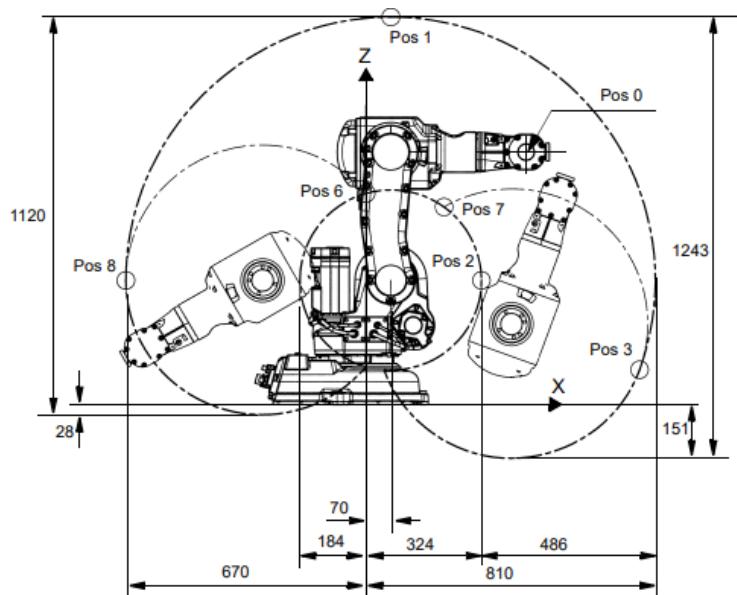


Figura 16 - Envelope de trabalho esquematizado

Fonte: ABB AUTOMATION TECHNOLOGIES AB ROBOTICS, 2004

Isso foi realizado por meio da função *fkine*, utilizada para extrair a matriz de transformação homogênea final do manipulador robótico, em conjunto com a função *transl*, que por sua vez converte os valores de uma matriz de transformação homogênea em resultados transladados nas respectivas coordenadas. Dentro desta tarefa os alunos tiveram de compor as matrizes “q” com os respectivos ângulos de junta fornecidos pela fabricante, respeitando a própria condição da tabela dos parâmetros de DH, ou seja, subtraindo 90° no ângulo dois e adicionando 90° ao ângulo seis. Um exemplo de matriz de transformação é visível na figura 17 e refere-se à posição número zero do robô manipulador.

```

Command Window
>> q0 = [0 -pi/2 0 0 0 pi/2];
>> m0 = fkine (bot,q0)

m0 =

    0.0000    -0.0000    1.0000   515.0000
   -1.0000     0.0000     0.0000     0.0000
    0.0000    -1.0000    -0.0000   712.0000
    0.0000     0.0000     0.0000     1.0000

>> transl (m0)

ans =

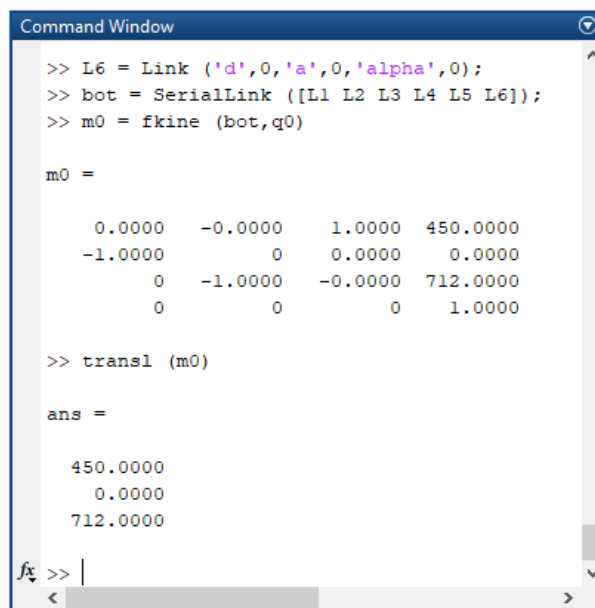
    515.0000
     0.0000
    712.0000
fx >> |

```

Figura 17 - Matriz de transformação gerada por meio da posição 0 indicada pela fabricante

Fonte: Autoria própria

Por fim, ao observar os resultados e compará-los com as coordenadas indicadas pela fabricante, os estudantes perceberam divergências entre os valores obtidos e os considerados nominais, neste ponto, eles foram instigados a compreender que conforme dito por Cristoiu e Nicolescu (2017), um mesmo robô pode possuir diversas combinações de parâmetros DH e todas estarem corretas, desde que se respeite as regras de posicionamento conforme o sistema de referência em questão. Tendo esclarecido este detalhe, os alunos corrigiram a tabela para que ela estivesse de acordo com a proposição dada pela fabricante e repetiram os comandos para gerar as matrizes de transformação, sendo que nessa nova simulação os resultados correspondiam à tabela fornecida pela ABB conforme figura 18 representando a matriz de transformação no ponto 0.



```
Command Window
>> L6 = Link ('d',0,'a',0,'alpha',0);
>> bot = SerialLink ([L1 L2 L3 L4 L5 L6]);
>> m0 = fkine (bot,q0)

m0 =

    0.0000    -0.0000    1.0000   450.0000
   -1.0000     0.0000     0.0000     0.0000
         0    -1.0000    -0.0000    712.0000
         0         0         0         1.0000

>> transl (m0)

ans =

   450.0000
    0.0000
   712.0000
```

Figura 18 - Parâmetros corrigidos e matriz de transformação correspondente ao indicado pela ABB

Fonte: Autoria própria

5 DISCUSSÃO

Após os ensaios serem concluídos, os alunos foram submetidos à uma pesquisa para avaliação e receptividade do método adotado. Conforme apresentado pela figura 19, praticamente dois terços dos alunos já tiveram contato com o conteúdo apresentado em sala de aula para o primeiro ensaio (Figura 19.a), no caso o estudo sobre a tendência de percurso lidou massivamente com alunos que não eram leigos no assunto, uma situação similar ao experimento número dois onde pouco mais de três quartos dos alunos já haviam aprendido sobre os conceitos de tendência de orientação e tendência de postura (Figura 19.b), a principal divergência apresenta-se no terceiro ensaio ao tratar das características de Denavit Hartenberg, onde pela primeira vez os alunos estavam de fato tendo contato com esse conteúdo, sendo totalmente leigos no assuntos (Figura 19.c).

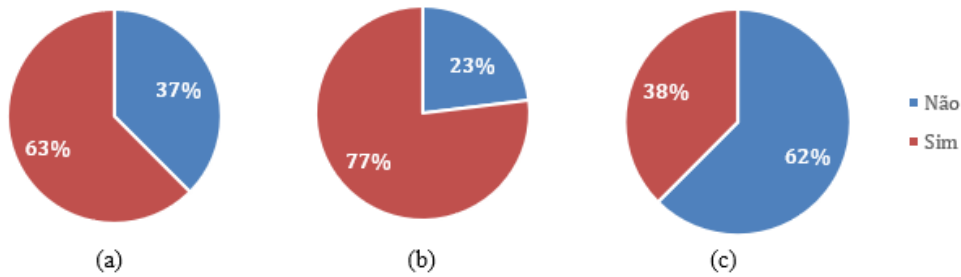


Figura 19 - Você já teve contato anterior com os conteúdos lecionados nessa matéria?

Fonte: Autoria própria

Pela figura 20 percebe-se que é quase que uma unanimidade entre os alunos que a atividade prática é essencial para o aprendizado, essa visão reafirma que os alunos anseiam por estarem envolvidos com os conteúdos não somente por meio da metodologia expositiva e baseada somente no desenvolvimento teórico, tal percepção pode ser utilizada na construção de novos modelos programáticos que promovam ainda mais o contato com os robôs dentro das disciplinas correlatas ao seu estudo, em vias de engajar os estudantes e aumentar sua compreensão sobre um sistema robótico qualquer.

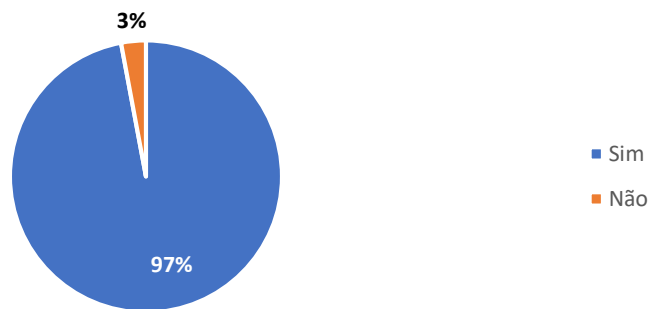


Figura 20 - Você considera o uso da prática essencial para o aprendizado?

Fonte: Autoria própria

Dentre todos os entrevistados, a grande maioria, responsável por 75% dos votos dentro da turma de “Automação Industrial” do décimo semestre de engenharia mecatrônica entendeu que mesmo com o desenvolvimento de ensaios laboratoriais e por meio de simulações virtuais, faltou mais envolvimento com o manipulador (Figura 21.a), tal dado reforça que a inserção de atividades práticas no meio acadêmico para o ensino de robótica é necessário do ponto de vista dos estudantes.

Esse dado é complementado quando analisado que 81% das avaliações dentro da turma de “Automação e Robótica” do nono semestre de engenharia mecânica apresentaram a mesma perspectiva em relação ao uso da prática com o manipulador robótico (Figura 21.b), indicando uma possível lacuna no modelo adotado, e a necessidade de inclusão mais eficaz das interações práticas com o robô manipulador.

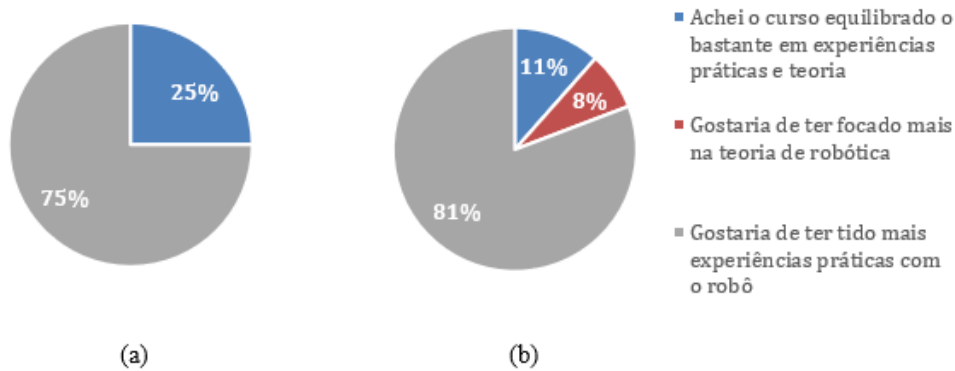


Figura 21 - Como você avalia o contato com o robô manipulador nessa disciplina?

Fonte: Autoria própria

As notas dadas para os ensaios apresentam-se conforme a tabela 3, para cálculo da satisfação foi utilizada a equação (18) considerando que pesquisas com notas nove e dez são promotores, pesquisas com notas 7 e 8 são neutros e as pesquisas menores ou iguais a 6 são detratores.

$$NPS = \frac{\#P - \#D}{\#P + \#N + \#D} \quad (18)$$

Onde:

NPS = Net Promoter Score

P = Promotor

N = Neutro

D = Detrator

ENSAIOS	DETRATOR	NEUTRO	PROMOTOR	NPS
Tendência de percurso	0	2	6	✓ 75%
Tendência de orientação e Repetibilidade	0	7	19	✓ 73%
Denavit-Hartenberg	1	6	1	✗ 0%

Tabela 3 - Avaliações dos ensaios

Fonte: Autoria própria

Com os dados levantados pela avaliação de satisfação de cada um dos ensaios propostos algumas observações puderam ser realizadas, a primeira delas sugere que uma importante observação se deve ao fato de que dentre os alunos que tiveram de fato contato com o robô manipulador, estes se mostraram mais satisfeitos com o método, avaliando com mais promotores a forma de abordagem, ao passo que no ensaio 3 mesmo sendo uma experiência com um simulador virtual, o caráter ainda muito teórico rendeu uma avaliação muito inferior para o experimento em questão, esse resultado se

cruzado com as informações observadas na figura 19.c em um primeiro momento já sustentam à teoria proposta por Papert (1985) ao afirmar que os alunos tendem a abster-se de tentar compreender sobre algum assunto que não conhecem.

Deve-se considerar também que o comportamento foi totalmente diferente para os ensaios de número 1 e 2 onde os alunos se viram muito mais engajados com prática da atividade e o contato com o robô manipulador, novamente o conceito que Papert levantou faz-se presente quando considerado que boa parte dos alunos já tinha conhecimento prévio sobre o conteúdo abordado.

Um outro detalhe importante a ser observado com as pesquisas recaí sobre o que Papert (1985) considera como micromundos que sejam interessantes ao aprendizado, nos ensaios de número 1 e 2 com a separação em grupos, os alunos estavam muito conectados e próximos ao robô, tornando o aprendizado dinâmico, algo que não ocorreu com o ensaio número 3 que por questões de inviabilidade técnica o contato direto com a ferramenta não foi tão eficaz. Dessa forma é importante considerar que boa parte da má avaliação obtida no terceiro ensaio decorre da falta de conexão dos alunos para com o experimento.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o final do levantamento dos dados abordados neste trabalho mais algumas considerações podem ser feitas. Assim como citado anteriormente, boa parte dos estudantes já possuía conhecimento prévio dentro dos ensaios de número 1 e 2, para uma pesquisa menos enviesada e com resultados mais limpos, seria adequado para trabalhos futuros a formação de turmas com pessoal mais leigo em vias de uma avaliação com menos tendência.

Um outro dado interessante a ser levantado para análise é o paralelismo com o estudo de Papert (1985), neste caso, o fato de ter em sala de aula alunos com conhecimento prévio no conteúdo e alunos leigos apresentou o mesmo comportamento de crianças interessadas em um assunto e realizando ligações com sua sabedoria empírica, isso pois durante os ensaios, alguns dos estudantes debateram sobre o que já conheciam relacionado ao robô manipulador e seu funcionamento.

A estratégia de *debugging* também se mostrou presente, durante os experimentos, de modo que os alunos se instigavam a compreender os resultados obtidos e analisá-los em caso de divergência com o esperado.

Em resumo, pode-se considerar com o estudo levantado que o uso de manipuladores industriais para o ensino da robótica é fundamental para a conexão dos alunos com o conhecimento que se deseja ser transmitido, pois esse método permite a interação prática com um equipamento a ser utilizado na vida profissional e tem a devida eficiência em engajar os alunos estimulando seu método crítico, aguçando sua curiosidade e desenvolvendo a capacidade de correlação com as múltiplas disciplinas envolvidas.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Andrea. **Ensino superior: entre o abandono e o baixo desempenho, poucos se destacam.** 2017. Disponível em: <<http://g1.globo.com/educacao/blog/andrea-ramal/post/ensino-superior-entre-o-abandono-e-o-baixo-desempenho-poucos-se-destacam.html>>. Acesso em: 27 maio 2019.

CENSO DA EDUCAÇÃO SUPERIOR: Notas Estatísticas 2017. S.i.: Inep, 2017. Anual. Disponível em: <http://download.inep.gov.br/educacao_superior/censo_superior/documentos/2018/censo_da_educacao_superior_2017-notas_estatisticas2.pdf>. Acesso em: 27 maio 2017.

CRAIG, John J. **Robótica.** 3. ed. São Paulo: Pearson, 2013. 381 p.

CRISTOIU, Cozmin; NICOLESCU, Adrian. NEW APPROACH FOR FORWARD KINEMATIC MODELING OF INDUSTRIAL ROBOTS. **Research And Science Today**, Targu Jiu, p.136-144, set. 2017. Disponível em: <<https://www.rstjournal.com/?mdocs-file=1771>>. Acesso em: 08 nov. 2019.

FRANCO, Matheus E. et al. **Grupo de Estudo, Pesquisa e Extensão em Robótica e Automação Como Fator Motivacional Para Estudantes de Computação.** In: WORKSHOP SOBRE EDUCAÇÃO EM COMPUTAÇÃO (WEI_CSBC), 26. 2018, 1/2018. 26º Workshop sobre Educação em Computação (WEI 2018). Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, julho 2018. ISSN 2595-6175.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS (S.i.). **Executive Summary World Robotics 2018 Industrial Robots.**2018. ed. S.i: Ifr, 2018. 10 p. (World Robotics). Disponível em: <https://ifr.org/downloads/press2018/Executive_Summary_WR_2018_Industrial_Robots.pdf>. Acesso em: 28 maio 2019.

MELLO, Marconi Silva Vaz de. **Análise de desempenho e melhorias em robô manipulador.** 2016. 116 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <<http://bdm.unb.br/handle/10483/14944>>. Acesso em: 29 set. 2019.

PAPERT, Seymour. **A Máquina das Crianças: Repensando a Escola na Era da Informática.** Porto Alegre: Artes Médicas, 1994. 210 p. Tradução de Sandra Costa.

PAPERT, Seymour. **Logo: Computadores e educação**. São Paulo: Brasiliense, 1985. 253 p. (Comunicação e Informática).

PAZOS, Fernando. **Automação de sistemas & robótica**. Rio de Janeiro: Axcel Books, 2002. 377 p.

ROSÁRIO, João Maurício. **Robótica Industrial I: Modelagem, Utilização e Programação**. São Paulo: Baraúna, 2010. 494 p.

ROSÁRIO, João Maurício. **Princípios de Mecatrônica**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. 356 p.

SELIG, J. M. **Introductory Robotics**. Wiltshire: Prentice Hall, 1992. 152 p.

SILVA, Sérgio Ricardo Xavier da et al. MODELAGEM MATEMÁTICA DA CINEMÁTICA DIRETA DO ROBÔ FANUC LR MATE 200IC COM SIMULAÇÃO NO MATLAB. In: XL CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 40., 2012, Belém. **Anais...**. Belém: Abenge, 2012. p. 1 - 11. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/7/artigos/103785.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2019.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer alguns colegas e profissionais que tornaram possível a conclusão deste trabalho como.

Aos alunos das turmas de “Automação e Robótica” do nono semestre do curso de engenharia mecânica e de “Automação Industrial” do décimo semestre de engenharia mecatrônica da Escola de Engenharia da UPM por prestarem com excelência nas tarefas propostas dos ensaios.

Ao professor Alexandre Lasthaus por fornecer tempo de aula e suporte na execução dos ensaios.

Aos técnicos das oficinas da UPM, Flávio, Oswaldo e Edson no apoio com a montagem dos experimentos e proposições de materiais.

A minha família e minha namorada por dar apoio e sugestões ao longo da condução deste trabalho.