

**PROJETO ELETROMECAÂNICO E MODELAMENTO MATEMÁTICO DE UM
ROBÔ MANIPULADOR SERIAL DUPLO**

**DISEÑO ELECTROMECAÂNICO Y MODELADO MATEMÁTICO DE UN ROBOT
MANIPULADOR DOBLE SERIE**

**ELECTROMECHANICAL DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING OF A
DOUBLE SERIAL MANIPULATOR ROBOT**

Apresentação: Comunicação Oral

Valdenio João Francisco José Lima de Sousa¹; Ian Ribeiro Nascimento²; Fábio Guilherme de Andrade Soares³;
Alexander Patrick Chaves de Sena⁴

DOI: <https://doi.org/10.31692/2596-0857.VIIICOINTERPDVGT.0017>

RESUMO

O desenvolvimento de um manipulador serial duplo teve como objetivo principal a execução de múltiplas funções de trabalho, atuando como uma ferramenta auxiliar em diversas atividades humanas. O sistema robótico, composto por dois braços que operaram de forma conjunta para realizar uma única tarefa, conseguiu executar tarefas de forma mais complexa e eficiente, ampliando consideravelmente suas aplicações em diferentes contextos industriais e de pesquisa. Este projeto destacou-se por sua capacidade de auxiliar em tratamentos médicos, apoiar operações industriais e fomentar a realização de pesquisas científicas, entre outras aplicações relevantes. Os cinco graus de liberdade de cada manipulador foram acionados por motores de passo e circuitos drivers tipo TB6560. Os circuitos drivers receberam sinais de controle da placa de aquisição NI USB-6353 X-Series que realizou o papel de interface eletrônica com um computador desktop. No software LabView[®] foram programados a interface homem-máquina e o modelo matemático para controle. A utilização do software LabView[®] facilitou a programação e o controle dos movimentos do robô, proporcionando uma interface homem-máquina amigável e acessível para desenvolvedores e pesquisadores. O projeto eletromecânico destacou-se pela alta acessibilidade e redução de custos, focando em tecnologias inovadoras e de baixo custo. A estrutura do robô, produzida com impressão 3D, facilitou modificações rápidas e flexibilidade no design. A combinação de impressão 3D, circuitos eletrônicos e componentes mecânicos acessíveis foi fundamental para o caráter inovador do manipulador. Essa abordagem permitiu a criação de robôs versáteis e acessíveis, ampliando as aplicações da robótica, especialmente em países em desenvolvimento, e impactando setores como saúde, educação e manufatura.

Palavras-chave: Manipulador serial duplo, Função colaborativa, Robótica, Acessibilidade.

RESUMEN

El desarrollo de un manipulador serial dual tuvo como objetivo principal la ejecución de múltiples funciones laborales, actuando como herramienta auxiliar en diversas actividades humanas. El sistema robótico, compuesto por dos brazos que operaban juntos para realizar una sola tarea, pudo realizar tareas de una manera más compleja y eficiente, ampliando considerablemente sus aplicaciones en diferentes

1 Bacharelado em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), vjfls@discente.ifpe.edu.br

2 Bacharelado em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), irn@discente.ifpe.edu.br

3 Bacharelado em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), fgas@discente.ifpe.edu.br

4 Doutor em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br

contextos industriais e de investigação. Este projeto se destacou por sua capacidade para ajudar em tratamentos médicos, apoiar operações industriais e incentivar a investigação científica, entre outras aplicações relevantes. Os cinco graus de liberdade de cada manipulador foram impulsionados por motores passo a passo e circuitos controladores tipo TB6560. Os circuitos do controlador receberam sinais de controle da placa de aquisição NI USB-6353 Serie X que serviu como interface eletrônica com uma computadora de escritorio. A interface homem-máquina e o modelo matemático para o controle se programaram no software LabView®. O uso do software LabView® facilitou a programação e o controle dos movimentos do robô, proporcionando uma interface homem-máquina amigável e acessível para desenvolvedores e investigadores. O projeto eletromecânico destacou-se por sua alta acessibilidade e redução de custos, enfocando-se em tecnologias inovadoras e de baixo custo. A estrutura do robô, produzida mediante impressão 3D, facilitou modificações rápidas e flexibilidade de design. A combinação de impressão 3D, circuitos eletrônicos e componentes mecânicos acessíveis foi fundamental para o caráter inovador do manipulador. Este enfoque permitiu a criação de robôs versáteis e acessíveis, ampliando as aplicações da robótica, especialmente em países em desenvolvimento, e impactando setores como a saúde, a educação e a manufatura.

Palabras clave: Manipulador serial dual, Função colaborativa, Robótica, Acessibilidade.

ABSTRACT

The development of a dual serial manipulator had as its main objective the execution of multiple work functions, acting as an auxiliary tool in various human activities. The robotic system, composed of two arms that operated together to perform a single task, was able to perform tasks in a more complex and efficient way, considerably expanding its applications in different industrial and research contexts. This project stood out for its ability to assist in medical treatments, support industrial operations and encourage scientific research, among other relevant applications. The five degrees of freedom of each manipulator were driven by stepper motors and driver circuits type TB6560. The driver circuits received control signals from the NI USB-6353 X-Series acquisition board that served as an electronic interface with a desktop computer. The human-machine interface and the mathematical model for control were programmed in the LabView® software. The use of LabView® software facilitated programming and control of the robot's movements, providing a friendly and accessible human-machine interface for developers and researchers. The electromechanical project stood out for its high accessibility and cost reduction, focusing on innovative and low-cost technologies. The robot's structure, produced using 3D printing, facilitated rapid modifications and design flexibility. The combination of 3D printing, electronic circuits and accessible mechanical components was fundamental to the innovative character of the manipulator. This approach has enabled the creation of versatile and affordable robots, expanding the applications of robotics, especially in developing countries, and impacting sectors such as healthcare, education and manufacturing.

Keywords: Dual serial manipulator, Collaborative function, Robotics, Accessibility.

INTRODUÇÃO

Diante do cenário atual, observamos uma crescente integração da robótica nos processos industriais e nas atividades cotidianas. Nesse contexto, torna-se imperativo a criação de produtos robóticos capazes de desempenhar tarefas específicas, visando otimizar a eficiência e a versatilidade operacional (OGATA, 2011). Surge então, a possibilidade de desenvolver manipuladores de dupla série representa uma oportunidade significativa. Essa abordagem envolve a utilização de dois braços robóticos colaborativos, os quais, quando operam em conjunto, ampliam consideravelmente a capacidade de manipulação. Isso não apenas facilita tarefas rotineiras, mas também simplifica operações mais complexas para os atuais robôs do

segmento. Diante da crescente demanda por sistemas robóticos mais eficazes e adaptáveis, essa inovação se destaca como uma solução promissora para atender às exigências do mercado.

Diante das crescentes demandas por construções de máquinas robóticas, surge um desafio significativo relacionado ao elevado custo de fabricação do conjunto eletromecânico. Buscando enfrentar essa questão, uma alternativa viável foi encontrada na inovadora abordagem educacional e cultural conhecida como cultura maker. Esta metodologia se revela como um meio eficaz para reduzir os custos de fabricação, abrindo caminho para novas possibilidades e aprimoramentos a um custo acessível. Esta abordagem não apenas estimula novos pioneiros tecnológicos, mas também se destaca como um incentivo para o surgimento de novas tecnologias. Um exemplo notável dessa cultura emergente é a utilização da impressora 3D, uma ferramenta que permite a construção de modelos de maneira econômica e acessível ao público (UNIFESP, 2019). A combinação de hardware e software está impulsionando a evolução da robótica industrial. A cultura maker tem transformado a criação de projetos eletrônicos, oferecendo soluções acessíveis e inovadoras para o desenvolvimento de dispositivos complexos. Essa abordagem tem sido particularmente benéfica na redução dos custos de desenvolvimento e produção, especialmente através do uso de drivers para motores de passo. Drivers de motores de passo são componentes cruciais que facilitam o controle preciso de motores de passo, amplamente utilizados em aplicações que requerem movimento controlado e repetitivo, como impressoras 3D e sistemas de automação. Esses drivers simplificam o controle de motores, oferecendo funcionalidades avançadas como microstepping. O microstepping é uma técnica que divide cada passo do motor em muitos subpassos menores, permitindo um controle muito mais preciso e suave do movimento. Essa técnica reduz a vibração e o ruído, além de melhorar a resolução e a precisão do posicionamento do motor. Ao utilizar drivers prontos com suporte a microstepping, os desenvolvedores evitam a complexidade de projetar e montar circuitos de controle de potência e de controle de corrente, o que reduz significativamente o custo e o tempo de desenvolvimento. A capacidade de controlar motores de passo com alta precisão através de microstepping permite a criação de sistemas mais avançados e eficientes, enquanto a acessibilidade desses drivers contribui para a economia de custos. A vasta gama de drivers de motores de passo disponíveis no mercado, juntamente com a documentação e o suporte comunitário, facilita a implementação desses componentes em projetos diversos. Isso permite que entusiastas e profissionais experimentem e inovem com custos reduzidos, promovendo o desenvolvimento de novos dispositivos e sistemas de forma mais acessível. Portanto, o uso de drivers para motores de passo com suporte a microstepping na cultura maker oferece uma maneira eficiente e econômica de controlar

motores com alta precisão. Essa abordagem reduz significativamente os custos de desenvolvimento e simplifica a criação de projetos eletrônicos, democratizando o acesso à tecnologia e incentivando a inovação a um custo acessível.

Por outro lado, para validar o sistema eletromecânico, é interessante utilizar sistemas confiáveis como as interfaces multifuncionais de aquisição e envio de dados conjuntamente ao software LabView® para que posteriormente, o sistema robótico seja totalmente de baixo custo com a implementação do controle através de microcontroladores. O LabView® é um software gráfico que permite aos engenheiros e cientistas visualizar e controlar sistemas complexos. Sendo assim, possibilita-se a inclusão de visualização e simulação de modelamento matemático da máquina, permitindo assim o estudo do controle em tempo real.

Desta forma, o intuito desta pesquisa é a implementação destas ferramentas para o desenvolvimento da construção de baixo custo e acessível dos robôs colaborativos com implementação de interface homem-máquina para a manipulação de controle e estudo de modelos matemáticos para a execução da máquina. Pretende-se em trabalho futuro, substituir a interfaces multifuncionais de aquisição e envio de dados por microcontroladores se comunicando com o desktop.

DESENVOLVIMENTO

Na primeira etapa do projeto, os esforços foram concentrados no desenvolvimento do hardware mecânico, resultando na construção da estrutura do robô de maneira mais eficiente. Atendendo às exigências estabelecidas pela pesquisa e aproveitando a competência técnica da equipe, foram utilizados softwares de modelagem 3D, como o Autodesk Inventor, para criar protótipos precisos. Esses protótipos permitiram uma visualização detalhada e clara do projeto antes da construção física, facilitando a identificação de possíveis melhorias e ajustes.

A segunda etapa focou no desenvolvimento cinemático do manipulador, com a modelagem matemática dos movimentos para garantir a precisão e eficiência em suas operações. A análise minuciosa da cinemática direta e inversa permitiu a implementação eficaz das equações de movimento, possibilitando o controle preciso dos ângulos e posições dos braços robóticos.

Na terceira etapa, foi realizado o desenvolvimento da programação, utilizando ferramentas como Matlab e LabView. No Matlab, foram implementados algoritmos de controle e simulação, que possibilitaram prever e ajustar o comportamento do robô em diversas condições. No LabView, foi criada uma interface gráfica intuitiva que facilitou a interação e o controle do manipulador, tornando o sistema acessível para usuários com diferentes níveis de

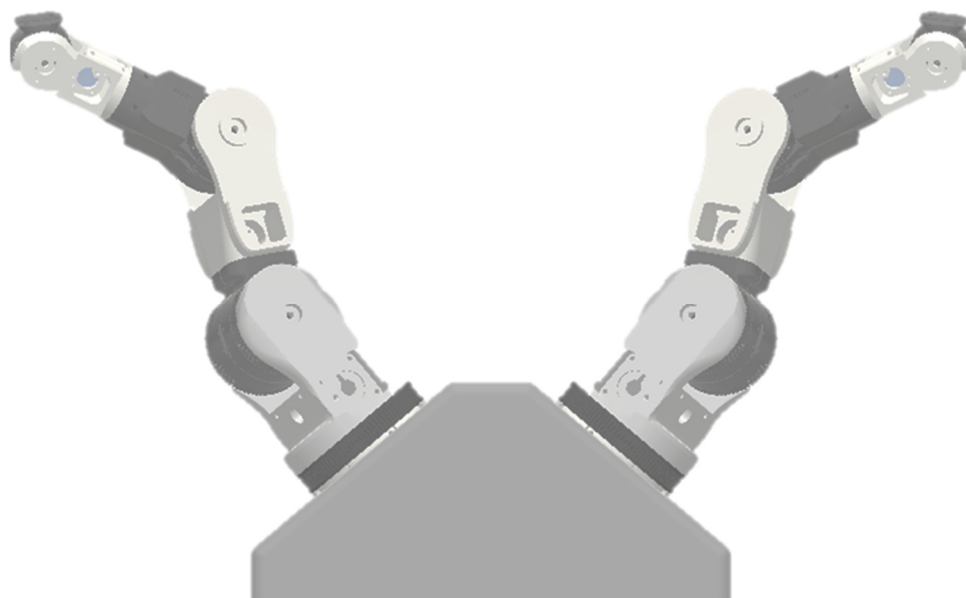
experiência técnica.

A integração dessas etapas resultou na criação de um protótipo funcional de um manipulador serial duplo colaborativo, alinhado com os objetivos de baixo custo e acessibilidade. Este projeto não apenas demonstra a viabilidade da construção de robôs eficientes e econômicos, mas também contribui para a promoção da cultura maker, incentivando a inovação e a criatividade no campo da robótica. A aplicação dos métodos e ferramentas descritos confirma a capacidade de desenvolver soluções robóticas que são tanto economicamente viáveis quanto tecnologicamente avançadas.

Definição do Modelo Estrutural

O desenvolvimento estrutural iniciou-se com a modelagem 3D (CAD) utilizando o software Inventor da Autodesk. Essa abordagem permitiu a dimensionamento preciso e a visualização detalhada da estrutura conforme a Figura (1), e dos componentes necessários para a construção do manipulador. A utilização do Inventor foi fundamental para identificar possíveis problemas e realizar ajustes na fase de projeto, garantindo que o produto final fosse funcional e eficiente. A modelagem 3D não apenas facilitou o processo de construção, mas também proporcionou uma plataforma para testar e simular diferentes configurações e cenários, otimizando o design antes da produção física.

Figura 1: Projeto 3D do robô colaborativo.

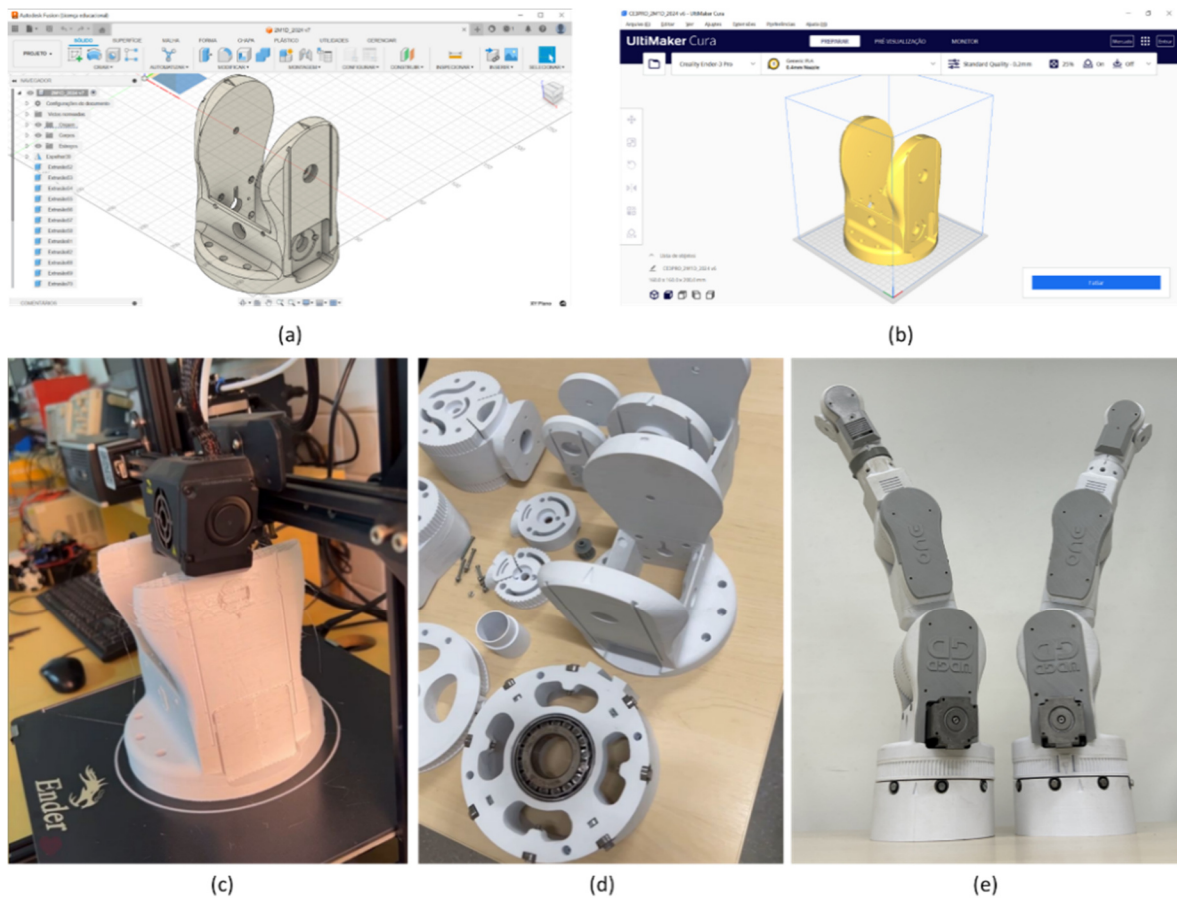


Fonte: Autoria própria.

O desenvolvimento da estrutura mecânica do manipulador serial duplo começou com a criação de um modelo detalhado em CAD, que foi essencial para a impressão 3D do projeto. Esse modelo garantiu a precisão das peças e a viabilidade do design. Durante a modelagem e

construção, foram realizadas modificações para otimizar a resistência mecânica, incluindo ajustes para assegurar que os motores fossem adequados para suportar o peso dos braços robóticos e permitir movimento fluido e controlado. A Figura (2) apresenta o processo de projeto, fabricação e montagem da máquina.

Figura 2: a) Processo da concepção mecânica em CAD, b) Processo de preparo para fabricação em impressão 3D, c) fabricação de peças na impressora 3D, d) peças fabricadas para montagem, e) manipuladores montados.



Fonte: Autoria própria.

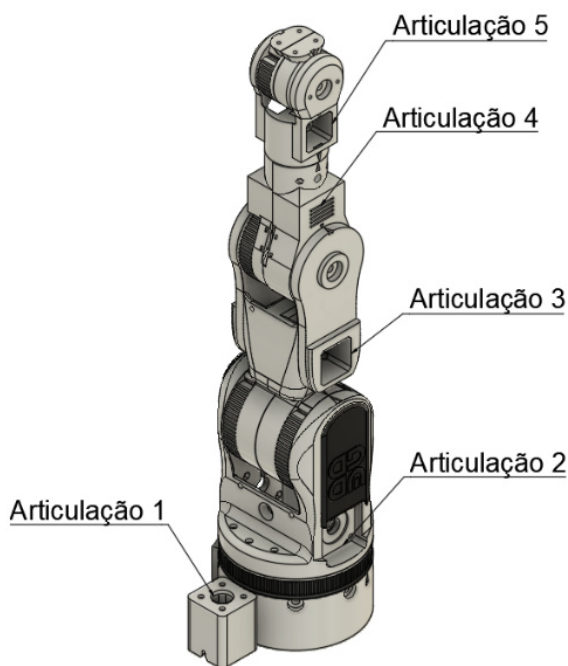
A análise dinâmica do sistema ajudou a identificar melhorias na distribuição de massa e na configuração dos atuadores. Ajustes nos parâmetros de controle, como velocidade e aceleração dos motores, foram feitos para minimizar vibrações e aumentar a estabilidade. O software Ultimaker Cura foi utilizado para preparar as peças para fabricação nas impressoras 3D, realizando o fatiamento e configuração dos parâmetros de impressão. Duas impressoras foram utilizadas: a Ender 3 Pro, conhecida por sua precisão e confiabilidade, e a Ender 3 Max, que se destaca pelo maior volume de impressão. Ambas as impressoras foram configuradas com precisão para garantir alta qualidade nas peças fabricadas. O Ultimaker Cura permitiu o ajuste

de configurações como temperatura de extrusão, velocidade de impressão, altura das camadas e densidade de preenchimento, essenciais para otimizar o processo de fabricação e assegurar que os resultados finais atendessem aos requisitos específicos do projeto.

Desenvolvimento dos Sistemas Eletrônicos

A esquematização da parte eletrônica deste projeto foi desenvolvida com base em três componentes principais: o motor de passo, o driver para motor de passo Toshiba BL-TB6560-V2 e a placa de aquisição de dados NI USB-6353 X-Series. Estes elementos são essenciais para a operação dos atuadores e controladores do sistema, garantindo precisão e eficiência no controle dos movimentos. A Figura (3) apresenta a localização de cada articulação mencionada.

Figura 3: Articulações do mecanismo.



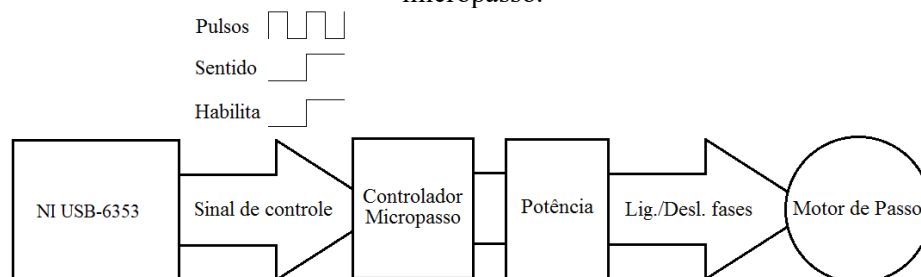
Fonte: Autoria própria.

Foram utilizados motores de passo KP35/9HM2 (200 passos por rotação completa com 3A na ligação bipolar) padrão NEMA 23 para movimentação da articulação 2, motores Nema 17 HS8401S (200 passos por rotação com 1,7 A na ligação bipolar) para a movimentação das articulações 1, 3 e 4. A articulação 5 utilizou um motor de passo Nema 14 FY35EC180AP (200 passos por rotação com 1,8A na ligação bipolar).

O circuito driver Toshiba BL-TB6560-V2 é um módulo especializado para o controle de motores de passo, capaz de operar com tensões de alimentação de até 40V e correntes de saída de até 3,5A. Ele utiliza tecnologia de controle de corrente por PWM (modulação por largura de

pulso) para garantir um controle preciso dos pulsos e da corrente enviada aos motores de passo. Este driver permite o ajuste da frequência dos pulsos, o que é essencial para a movimentação suave e precisa dos braços robóticos, possibilitando a execução de tarefas com alta precisão. O controle dos motores utiliza os pinos de controle externo EN+, CW+ e CLK+ dos drivers. O EN+ habilita o funcionamento do sistema em nível lógico baixo, desabilitando os motores em nível alto. O pino CW+ em nível baixo habilita o sistema a girar para o sentido anti-horário, e em nível alto no sentido horário. Para determinar a velocidade da movimentação dos eixos, utilizou-se um sinal de controle PWM no pino CLK+ com largura de pulso variável, e quantidade de pulsos calculada para controle de posição. Para que o manipulador execute suas tarefas com precisão e repetitividade, é essencial que, além de mecanismos e sistemas de acionamento adequados, haja um sistema de controle eficiente. Para a operação de motores de passo, além do próprio motor, é necessário o uso de um dispositivo eletrônico denominado driver. Este dispositivo controla o chaveamento da corrente, que pode alcançar vários amperes, a partir de sinais lógicos (pulsos) recebidos como entrada. No modo de operação em micropasso, o ângulo de passo natural de um motor pode ser subdividido em ângulos menores, através do controle da corrente que flui por cada enrolamento. Esse controle origina uma componente do campo magnético resultante, conforme um modelo trigonométrico. A utilização de um circuito de limitação de corrente, que regula a aplicação de tensões nas fases, é conhecida como modulação por largura de pulso (PWM). Esse método mantém a corrente oscilando em torno do valor nominal desejado, uma técnica comumente referida como "chopping". Controladores avançados de motores de passo utilizam a modulação por largura de pulso para realizar micropassos, o que permite obter uma maior resolução de posição e uma operação mais suave. Na Figura (4), apresenta-se o diagrama de blocos proposto para o acionamento de cada grau de liberdade do manipulador, responsável por seu preciso posicionamento.

Figura 4: Diagrama de blocos proposto para o acionamento do motor de passo com operação em micropasso.



Fonte: Autoria própria.

A placa de aquisição NI USB-6353 X-Series, com suas 16 entradas analógicas de 16

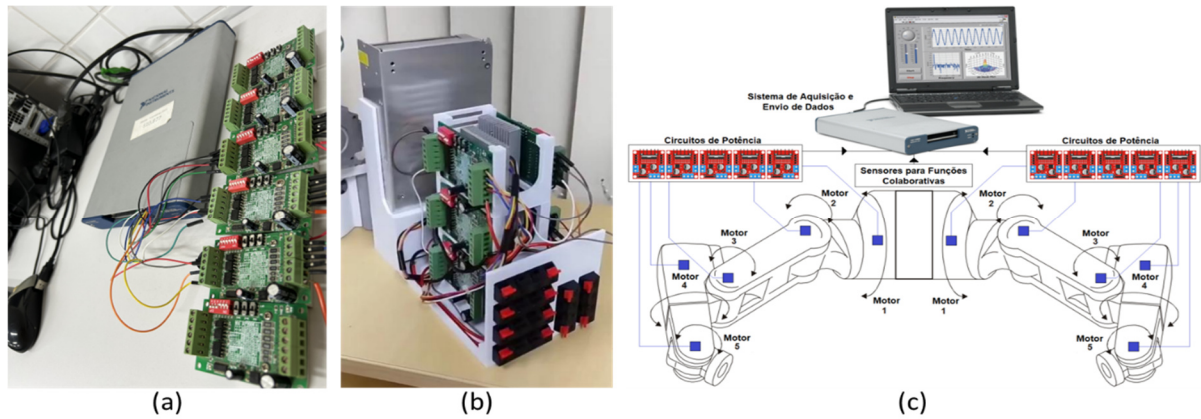
bits e uma taxa de amostragem de até 1,25 MS/s, desempenha um papel crucial no controle dos sinais enviados aos drivers dos motores de passo. Esta placa possui 48 linhas de E/S digitais, que operam com níveis de tensão de 0 a 5V e uma taxa de transferência de até 10 MHz. Além disso, a placa dispõe de quatro contadores/temporizadores de 32 bits, capazes de operar com frequências de até 100 MHz. Estes contadores são essenciais para a geração de pulsos precisos e medição de eventos temporais críticos no sistema.

Esta placa se conecta ao computador via interface USB, permitindo uma integração direta com o software LabView. O LabView é uma plataforma de desenvolvimento de sistemas de controle e aquisição de dados, oferecendo uma interface gráfica intuitiva para a programação e controle de sistemas eletrônicos. A interface homem-máquina (IHM) desenvolvida em LabView proporciona uma visualização em tempo real dos dados operacionais do sistema robótico, facilitando o monitoramento e a realização de ajustes instantâneos para otimizar a eficiência operacional. Além disso, o LabView oferece uma ampla gama de ferramentas para análise de dados e desenvolvimento de algoritmos de controle personalizados, permitindo uma adaptação precisa às necessidades específicas do projeto.

A integração dos motores de passo, drivers e a placa de aquisição dentro da estrutura do manipulador serial duplo é essencial para o funcionamento harmonioso do sistema. A precisão no controle dos movimentos dos motores de passo é fundamental para a realização de operações complexas com alta exatidão. A IHM desenvolvida em LabView, por sua vez, fornece ao usuário final uma interface poderosa e acessível para o controle e monitoramento do sistema, garantindo uma operação segura e eficiente.

A combinação dos componentes eletrônicos descritos e a utilização do LabView como plataforma de desenvolvimento resultam em um sistema robusto e preciso, adequado para um manipulador serial duplo. Esta abordagem atende às demandas rigorosas de precisão e facilidade de uso, essenciais para aplicações em ambientes industriais e de pesquisa. A Figura (5) apresenta os drivers e a placa de aquisição, a configuração final dos drivers com a fonte de alimentação (para 1 manipulador) e o esquemático do sistema eletrônico.

Figura 5: a) Drivers e placa de aquisição, b) estrutura final dos drivers com fonte de alimentação (1 manipulador), c) Esquemático do sistema eletrônico.



Fonte: Autoria própria.

Modelamento Matemático

Com base na pré-visualização do robô colaborativo, foi possível dar início ao desenvolvimento do modelo matemático de um braço robótico. Esse processo foi respaldado por referências bibliográficas preexistentes, o que permitiu a elaboração e a demonstração do modelo cinemático. O modelo mais frequentemente empregado para manipuladores seriais é o de Denavit-Hartenberg. Essa estrutura possibilita o cálculo da trajetória previamente definida pelo usuário por meio de matrizes homogêneas, oferecendo, assim, a capacidade de controle (BORGES; QUEIROZ, 2016). A utilização deste modelo é fundamental para a compreensão do comportamento do robô colaborativo. Ele permite a análise detalhada das relações entre as variáveis do sistema e a simulação do desempenho do robô sob diferentes condições. Além disso, o modelo de Denavit-Hartenberg facilita a implementação de algoritmos de controle, permitindo que o robô execute tarefas complexas de maneira precisa e eficiente (LIMA, 2023). De acordo com Craig (2013), utilizando forma geral da transformação que relaciona os sistemas de referência fixados a elos vizinhos, apresentada na equação 1, e concatenando essas transformações individuais é possível encontrar a posição e a orientação do elo n com relação ao elo 0.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cdot \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cdot \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} \cdot d_i \\ \sin\theta_i \cdot \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cdot \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} \cdot d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Portanto, para realizar a transformação do conjunto de coordenadas de 0 até n necessita-se realizar a multiplicação de todas as matrizes:

$${}^0T_n = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n \quad (2)$$

Para o manipulador robótico de 5 graus de liberdade foi considerado um braço robótico do tipo antropomórfico com todas as juntas do tipo rotacional. Comparando a um braço humano, as juntas 1 e 2 realizam os movimentos do ombro, a junta 3 realiza o movimento do cotovelo, a junta 4 realiza o movimento de rotação do antebraço e a junta 5 realiza o movimento do pulso. O robô possui 5 graus de liberdade e 5 juntas variáveis, todas as juntas são do tipo de revolução, portanto cada uma possui um ângulo θ_i , o mecanismo tem 4 elos e cada elo possui um comprimento fixo L_i . Aplicando os parâmetros nas matrizes de transformação homogênea e fazendo o produto de 5 matrizes, temos a matriz resultante 0_5T .

$${}^0_5T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \cdot {}^4_5T \quad (3)$$

Onde a matriz 0_5T fornece a cinemática direta do manipulador de 5 graus de liberdade, na equação 4 os vetores r^1, r^2 e r^3 especificam a orientação do efetuador em relação ao sistema de coordenada da base do robô. Os elementos p_x, p_y e p_z expressam as coordenadas cartesianas da ponta do efetuador em relação ao sistema de referência da base.

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} r_x^1 & r_x^2 & r_x^3 & p_x \\ r_y^1 & r_y^2 & r_y^3 & p_y \\ r_z^1 & r_z^2 & r_z^3 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Considerando cosseno = c e seno = s:

$$r_x^1 = c\theta_5 \cdot (s\theta_1 \cdot s\theta_4 + c\theta_4 \cdot (c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3 - c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3)) - s\theta_5 \cdot (c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_3 + c\theta_1 \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_2) \quad (5)$$

$$r_y^1 = -c\theta_5 \cdot (c\theta_1 \cdot s\theta_4 + c\theta_4 \cdot (s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3 - c\theta_2 \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_1)) - s\theta_5 \cdot (c\theta_2 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_3 + c\theta_3 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_2) \quad (6)$$

$$r_z^1 = c(\theta_2 + \theta_3) \cdot s\theta_5 + s(\theta_2 + \theta_3) \cdot c\theta_4 \cdot c\theta_5 \quad (7)$$

$$r_x^2 = s\theta_4 \cdot (c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3 - c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3) - c\theta_4 \cdot s\theta_1 \quad (8)$$

$$r_y^2 = c\theta_4 \cdot c\theta_1 - s\theta_4 \cdot (s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3 - c\theta_2 \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_1) \quad (9)$$

$$r_z^2 = s(\theta_2 + \theta_3) \cdot s\theta_4 \quad (10)$$

$$r_x^3 = -s\theta_5 \cdot (s\theta_1 \cdot s\theta_4 + c\theta_4 \cdot (c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3 - c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3)) - c\theta_5 \cdot (c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_3 + c\theta_1 \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_2) \quad (11)$$

$$r_y^3 = s\theta_5 \cdot (c\theta_1 \cdot s\theta_4 + c\theta_4 \cdot (s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3 - c\theta_2 \cdot c\theta_3 \cdot s\theta_1)) - c\theta_5 \cdot (c\theta_2 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_3 + c\theta_3 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_2) \quad (12)$$

$$r_z^3 = c(\theta_2 + \theta_3) \cdot c\theta_5 - s(\theta_2 + \theta_3) \cdot c\theta_4 \cdot s\theta_5 \quad (13)$$

$$p_x = L_2 \cdot c\theta_1 \cdot c\theta_2 + L_3 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_4 + L_4 \cdot c\theta_5 \cdot (s\theta_1 \cdot s\theta_4 + c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3 \cdot c\theta_4 -$$

$$c\theta_1 \cdot c\theta_4 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3) - L_4 \cdot s(\theta_2 + \theta_3) \cdot c\theta_1 \cdot s\theta_5 + L_3 \cdot c(\theta_2 + \theta_3) \cdot c\theta_1 \cdot c\theta_4 \quad (14)$$

$$p_y = L_2 \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_1 - L_3 \cdot c\theta_1 \cdot s\theta_4 - L_4 \cdot c\theta_5 \cdot (c\theta_1 \cdot s\theta_4 - c\theta_2 \cdot c\theta_3 \cdot c\theta_4 \cdot s\theta_1 + c\theta_4 \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3) + L_3 \cdot c(\theta_2 + \theta_3) \cdot c\theta_4 \cdot s\theta_1 - L_4 \cdot s(\theta_2 + \theta_3) \cdot s\theta_1 \cdot s\theta_5 \quad (15)$$

$$p_z = L_1 + L_2 \cdot s\theta_2 + \frac{L_4 \cdot c(\theta_4 + \theta_5) \cdot s(\theta_2 + \theta_3)}{2} + L_3 \cdot s(\theta_2 + \theta_3) \cdot c\theta_4 + L_4 \cdot c(\theta_2 + \theta_3) \cdot s\theta_5 + \frac{L_4 \cdot c(\theta_4 - \theta_5) \cdot s(\theta_2 + \theta_3)}{2} \quad (16)$$

A definição da cinemática inversa do manipulador do manipulador de 5 graus de liberdade proposto é consideravelmente mais complexa, pois existem múltiplas soluções para uma única coordenada cartesiana p_x , p_y e p_z . Neste sentido, se fez necessário fixar a orientação do efetuador em relação a rotação no eixo z_0 e o eixo y_0 , fazendo com que a orientação do eixo do efetuador, x_5 , permaneça a mesma do eixo da base, x_0 , para qualquer coordenada cartesiana, assim restringindo o número de soluções possíveis a um.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sistema Eletromecânico

Para a avaliação preliminar de desempenho do sistema de movimentação de um manipulador, foram realizadas medições com um conjunto de 10 amostras, conforme descrito na Tabela (1). O objetivo foi avaliar a repetibilidade e a velocidade dos graus de liberdade dos motores em diferentes articulações, considerando um deslocamento de 60° . A análise foi segmentada de acordo com os motores e suas respectivas articulações.

Tabela 1: Teste de repetibilidade dos motores e respectivas articulações.

Amostra	Motor Nema 17 - 60°						Motor Nema 14 - 60°		Motor Nema 23 - 60°	
	Articulação 1 Redução de 8,89		Articulação 3 Redução de 27,37		Articulação 4 Sem redução		Articulação 5 Redução de 3,89		Articulação 2 Redução de 6,67	
	Pulsos	mm/s	Pulsos	mm/s	Pulsos	mm/s	Pulsos	mm/s	Pulsos	mm/s
1	593	62	1825	63	67	60,8	259	101	445	58
2	593	62	1828	63	68	60,8	259	101	445	58
3	593	62	1825	63	67	60,8	259	101	445	58
4	593	62	1826	63	69	60,8	260	101	446	58
5	596	62	1827	63	69	60,8	261	102	447	58
6	593	62	1825	63	67	60,8	259	101	444	58
7	592	62	1825	63	67	60,8	259	102	447	58
8	593	62	1824	63	66	60,8	261	102	445	58
9	595	62	1825	63	67	60,8	260	102	444	58
10	594	62	1825	63	67	60,8	259	102	445	58

Fonte: Autoria própria.

A análise dos dados da Tabela (1) revela que o número de pulsos necessários para uma rotação de 60° é bastante consistente entre as amostras, demonstrando uma boa repetibilidade

do sistema. A velocidade observada também se mantém estável, indicando que os motores estão operando conforme o esperado nas respectivas articulações. A variação no número de pulsos e na velocidade entre as amostras é mínima, o que sugere que o sistema de movimentação é confiável para os motores e articulações avaliados. A consistência dos resultados nas diferentes articulações e motores pode indicar uma boa adequação do sistema para as condições testadas.

Quanto aos valores gastos, a Tabela (2) apresenta o componente e a quantidade de filamento utilizada para fabricação, observando um preenchimento de 20%. O preenchimento de 20% possibilitou um baixo peso do mecanismo, baixando a potência dos motores, mas ainda garantindo resistência do material aos esforços. Os valores do filamento tiveram como base 1kg de PLA custando 120 reais.

Tabela 2: Estimativa de gastos básicos.

Peça	Tempo	Manipulador 1		Manipulador 2	
		Filamento (g)	Valor (R\$)	Filamento (g)	Valor (R\$)
Polia giratória da base	21h15min	153	18,36	153	18,36
Base giratória	31h43min	255	30,60	255	30,60
Elo da Articulação 2	47h10min	395	47,40	395	47,40
Polia da Articulação 2 / metade 1	22h08min	152	18,24	152	18,24
Polia da Articulação 2 / metade 2	22h35min	156	18,72	156	18,72
Elo da Articulação 3	36h37min	279	33,48	279	33,48
Polia da Articulação 3 / metade 1	17h54min	126	15,12	126	15,12
Polia da Articulação 3 / metade 2	22h09min	141	16,92	141	16,92
Elo da Articulação 5	16h55min	125	15,00	125	15,00
Polia da Articulação 5 / metade 1	7h29min	40	4,80	40	4,80
Polia da Articulação 5 / metade 2	5h10min	34	4,08	34	4,08
		1856	222,72	1856	222,72
Total de filamento		Peso (g)		Valor (R\$)	
		3712		445,44	
Componente		Valor (R\$)		Valor (R\$)	
Driver tb6560		390,00		390,00	
3x Nema 17		171,00		171,00	
Nema 14		78,90		78,90	
2x Nema 23		258,00		258,00	
Total de eletrônica		897,90		897,90	
Total de gastos		1.120,62		1.120,62	

Fonte: Autoria própria.

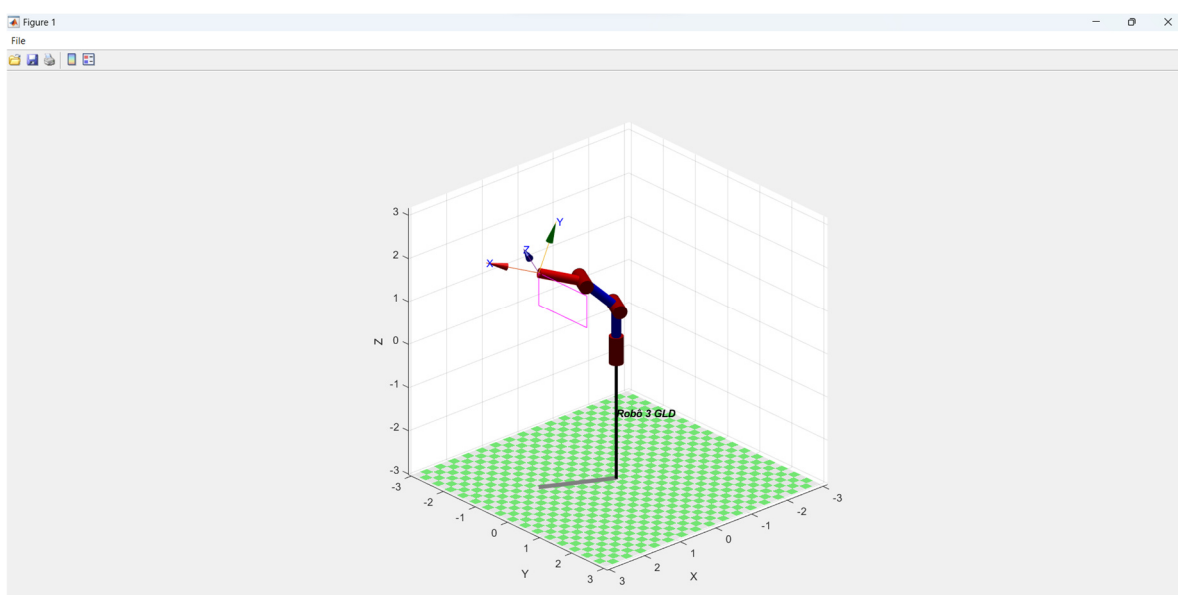
Com base nos dados fornecidos na Tabela (2), a análise dos valores é a seguinte: A tabela apresenta o tempo de impressão, a quantidade de filamento utilizado e o custo associado para cada componente dos manipuladores 1 e 2. A quantidade total de filamento utilizado para cada manipulador é de 1856 gramas, resultando em um custo total de R\$ 222,72, o que totaliza R\$ 445,44. Além dos custos de filamento, os componentes eletrônicos foram detalhados com

um total de R\$ 897,90 para cada manipulador. Este total inclui o driver TB6560 e diversos motores Nema, que somam um gasto significativo na eletrônica dos manipuladores. Portanto, o custo total dos materiais e componentes básicos para ambos os manipuladores, incluindo filamento e eletrônica, é de R\$ 2.241,24. Esta análise detalha o impacto financeiro dos componentes individuais e fornece uma visão clara do custo total associado à fabricação e montagem dos manipuladores. A estimativa final, incluindo componentes secundários como rolamentos do tipo 608 ZZ (8x22x7 mm), eixos de 8 mm, fiação e outros, totaliza aproximadamente R\$ 2.600,00. Cada manipulador teve um tempo de fabricação de 251 horas, totalizando 502 horas para a construção dos dois braços.

Modelo Matemático

Com o objetivo de validar a cinemática inversa de cada manipulador robótico e facilitar o estudo de suas trajetórias e desempenho, foi desenvolvido um aplicativo utilizando a plataforma App Designer do software Matlab[®]. O Matlab[®] é uma plataforma de programação e computação numérica amplamente utilizada em diversas áreas da ciência e engenharia. Destaca-se pela presença do App Designer, um ambiente que simplifica a criação de aplicativos com interfaces gráficas. Adicionalmente, sua capacidade de integrar extensões proporciona uma ampla gama de funções para o desenvolvimento de projetos e pesquisas. Por essas razões, optou-se por desenvolver o aplicativo para a validação e análise da cinemática inversa dos manipuladores de 5 graus de liberdade na plataforma App Designer do MATLAB[®]. A Figura (6) apresenta o ambiente de simulação.

Figura 6: Ambiente de simulação 3D do aplicativo.



Fonte: Autoria própria.

CONCLUSÕES

análise dos dados obtidos neste estudo evidencia que o sistema de A movimentação dos manipuladores robóticos demonstra uma elevada repetibilidade e confiabilidade. A consistência observada no número de pulsos necessários para uma rotação de 60° e a estabilidade na velocidade das articulações reforçam a eficiência do sistema nas condições experimentais testadas, garantindo um desempenho confiável dos motores e articulações.

Do ponto de vista econômico, o custo total para a fabricação dos manipuladores foi calculado em R\$ 2.241,24, abrangendo o filamento e os componentes eletrônicos. A estimativa final, incluindo componentes secundários, foi de aproximadamente R\$ 2.600,00. Este custo significativo dos componentes eletrônicos, incluindo o driver TB6560 e os motores Nema, reflete a complexidade e sofisticação do sistema desenvolvido.

A utilização do MATLAB® e do App Designer para a validação da cinemática inversa e a simulação dos manipuladores demonstrou a eficácia dessa plataforma na criação de aplicativos para análise e controle robótico. O desenvolvimento do manipulador serial duplo com função colaborativa destacou-se por sua capacidade de executar tarefas complexas e eficientes, ampliando suas aplicações industriais e de pesquisa. A combinação de impressão 3D para a estrutura mecânica com circuitos eletrônicos e componentes de baixo custo revela uma abordagem inovadora e acessível, promovendo a expansão da robótica em diversos contextos, particularmente em regiões com recursos limitados.

Conclui-se que o projeto atingiu com sucesso seus objetivos de projetar, fabricar e testar um manipulador robótico com alta precisão e baixo custo. A flexibilidade e o potencial do sistema para aplicações variadas, desde a saúde até a manufatura, foram evidenciados. O sucesso na implementação da interface homem-máquina e no controle dos movimentos através do LabVIEW® confirma a viabilidade e inovação do sistema desenvolvido.

REFERÊNCIAS

BORGES, R.A; QUEIROZ, T.A. **Matemática aplicada à indústria: problemas e métodos de solução**. 1ª edição. ed. São Paulo – SP, Brasil: Edgard Blücher Ltda, v. 1, 2016.

CRAIG, J. **Robótica**. 3ª edição. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

LIMA, É.F.S. **Desenvolvimento de Modelamento Cinemático Inverso e Aplicativo para Simulação do Controle de Manipuladores Tipo Braço Robótico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Caruaru, p. 52. 2023.

OGATA, K. **Engenharia De Controle Moderno**. 5ª edição. ed. São Paulo: Pearson, v. 1º,

SOUSA, V.J.F.J.L. et al.

2011.

UNIFESP, B.B.D.P. **Análise do Uso da Cultura Maker em Contextos Educacionais: Revisão Sistemática da Literatura.** Revista Novas Tecnologias na Educação, Rio Grande do Sul, 3 dez. 2019. 11.

