

Desenvolvimento de robô manipulador com juntas rotacionais e prismática

Victor Ben-Hur Neves Araújo, Justino Medeiros, Andrea Bitencourt

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia – IFBA. e-mail: vbenhur@gmail.com, justino@ifba.edu.br, andreabitencourt@ifba.edu.br.

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento do projeto de um robô manipulador SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*), robô com juntas rotacionais e prismática, integrado a célula de manufatura didática, cuja metodologia empregada priorizou a contabilidade, funcionalidade e otimização de custos. Com o objetivo de estimular a utilização de ferramentas didáticas em ambientes educacionais, este artigo aborda as etapas de criação de um manipulador integrado a uma célula de manufatura.

Palavras-chave: Arduino, Célula Didática, Efetuador, Manipulador, SCARA

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais presente no cotidiano, a robótica deixou de ser ficção científica para se tornar realidade e otimizar os processos industriais modernos. Sendo uma recente área de pesquisa no ramo da tecnologia moderna que emerge em meio as engenharias tradicionais para revolucionar as relações existentes. Exige o conhecimento dos diversos campos das engenharias, pois se sustenta nos pilares da mecânica, elétrica, computação e matemática.

De acordo com Instituto de Robôs da América (Robot Institute of America - RIA), o robô é “reprogramável, multifuncional, manipulador designado para mover materiais, partes, ferramentas, ou dispositivos especializados através da programação para realização de varias tarefas”.

Os robô manipuladores foram inseridos pela primeira vez em ambiente industrial, através do pesquisador Raymond Goertz, desempenharam um papel fundamental no controle a distância de materiais nocivos na Comissão de Energia Atômica dos EUA em 1951 (PANSE,2012). Longe de se tornarem obsoletos, a utilização dos manipuladores cresce a cada década, desde a confecção de outros robôs, montagem em linhas de produção de veículos e máquinas, a integração em células de manufatura, onde possuem grande utilização.

Células de manufatura surgiram da necessidade de otimização dos processos industriais, baseando-se no conceito de Tecnologia de Grupo. Este é caracterizado pela filosofia de manufatura, cujas partes semelhantes são identificadas e agrupadas a fim de melhorar os processos de produção. Responsáveis pela integração e otimização dos ciclos industriais, reduzem o ciclo de fabricação, transporte e movimentação, simplificam o controle e fluxo de produção, diminuindo assim o número de operadores e custos operacionais (GROOVER,2001).

As células de manufatura didáticas buscam simular de maneira realista sistemas de manufatura integrados. Com o objetivo de aprimorar o ensino da automação industrial, a célula didática é uma importante ferramenta interdisciplinar que contribui para difusão do conhecimento unindo a teoria e prática, tornando mais acessível a aplicação dos conteúdos abordados em ambientes de ensino, como programação, controle, sensores, atuadores, integração da manufatura, entre outros.

A Figura 01 apresenta um modelo baseado em (CURZEL et al.,2006) e encontra-se em desenvolvimento no Grupo de Pesquisa em Sistemas Mecatrônicos (GSAM) do Instituto Federal da Bahia.

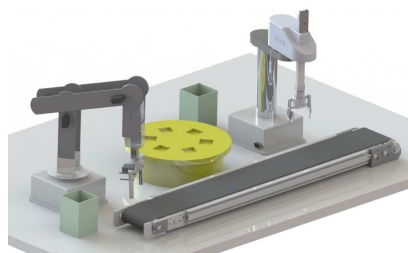


Figura 1 – Projeto da célula de manufatura didática.

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um manipulador RRP chamado de SCARA, robô com duas juntas rotacionais e uma prismática, integrado a uma célula de manufatura didática, com ênfase nas etapas da concepção, design e controle.

A primeira etapa da estrutura desse artigo consiste no estudo da arte do manipulador SCARA, apresentando sua história, características e modo de funcionamento. Por conseguinte é descrita a metodologia aplicada ao desenvolvimento, descrevendo as etapas da concepção ao detalhamento. Em seguida, os resultados obtidos com a fase de projeto, justificando todas as escolhas e detalhando o projeto final. Por fim, a conclusão e perspectivas futuras.

2. SCARA

Criado em 1979 na Universidade de Yamanashi, no Japão, o robô SCARA foi desenvolvido a fim de atender uma demanda específica da indústria, mas por se popularizar, deixou de ser uma configuração especial (STONE and KURFESS,2005). Por possuir elevada precisão e repetibilidade, torna-se ideal em montagens mecânicas e eletrônicas.

A configuração fundamental do SCARA apresenta eixos de revolução paralelos e um prismático que realiza o movimento vertical. Esta configuração é apropriada para montagem de peças, inserção de componentes e empacotamento, pois possui ótima precisão, velocidade, *design* compacto, 3 graus de liberdade $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, como mostrado na Figura 2. Entretanto, seu volume de trabalho é limitado a $4\pi L^3$, sendo L o comprimento de cada elo.

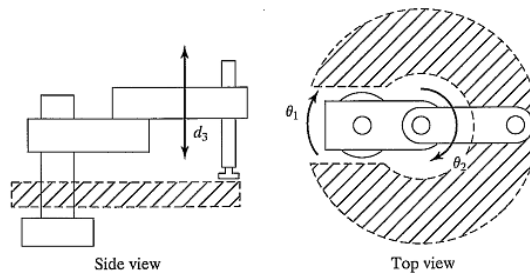


Figura 2 – Volume de Trabalho SCARA. Fonte: (CRAIG, 2004)

O estudo da movimentação do robô desprezando as forças existentes é realizado através da análise cinemática. Esta fornece dados importantes para o controle de posicionamento dos elos do robô. A cinemática direta expressa a partir dos ângulos das juntas, as coordenadas das posições da ferramenta. A cinemática inversa faz o cálculo inverso, a partir das coordenadas da ferramenta expressa os ângulos das juntas.

Segundo (GURINI,2004) se indica com X o vetor que contém as coordenadas do efetuador (por exemplo 3 coordenadas cartesianas mais 3 ângulos para orientação) e com Q o vetor contendo as coordenadas das juntas, resultando em $X=F(Q)$.

$$\begin{cases} x_1 = f_1(Q) \\ x_2 = f_2(Q) \\ \dots \\ x_n = f_n(Q) \end{cases} \quad \begin{aligned} X &= F(Q) \\ Q &= [q_1, q_2, \dots, q_m]^T \\ X &= [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \end{aligned}$$

Onde "n" é número de coordenadas do efetuador e "m" o número de variáveis das juntas e consequentemente dos graus de liberdade do manipulador. A análise da velocidade pode ser feita derivando a equação $X=F(Q)$ em relação ao tempo:

$$\frac{dX}{dt} = J(Q) \cdot \frac{dQ}{dt}$$

A matriz $J(Q)$ é a matriz jacobiana do sistema, assim definida:

$$J(Q) = \frac{dF}{dQ}; \quad [j_{ij}] = \frac{\partial f_i}{\partial q_j}$$

Caso o jacobiano seja inversível, o problema cinemático inverso para a velocidade pode ser resolvido através da seguinte equação:

$$\frac{dQ}{dt} = J^{-1} \frac{dX}{dt}$$

2.1 Cinemática Direta

Simplificando a geometria para 2 graus de liberdade, as equações da cinemática direta das posições são as seguintes:

$$\begin{cases} x_p = l_1 \cos \alpha + l_2 \cos (\alpha + \beta) \\ y_p = l_1 \sin \alpha + l_2 \sin (\alpha + \beta) \end{cases}$$

Logo,

$$X = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$$

A matriz Jacobiana necessária para análise da velocidade resulta em:

$$\text{Sendo } \gamma = (\alpha + \beta),$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_p}{\partial \alpha} & \frac{\partial x_p}{\partial \beta} \\ \frac{\partial y_p}{\partial \alpha} & \frac{\partial y_p}{\partial \beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \alpha - l_2 \sin \gamma & -l_2 \sin \gamma \\ l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \gamma & l_2 \cos \gamma \end{bmatrix}$$

2.2 Cinemática Inversa

A matriz inversa do Jacobiano necessária para análise da velocidade resulta em:

$$J^{-1} = A \cdot \begin{bmatrix} l_1 \sin \alpha - l_2 \sin \gamma & l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \gamma \\ -l_2 \sin \gamma & -l_2 \cos \gamma \end{bmatrix}, \text{ com } A = \frac{1}{l_1 l_2 \sin(\gamma)}$$

3. METODOLOGIA

A construção de um manipulador SCARA envolve habilidades em diferentes campos da engenharia, tornando a elaboração do seu projeto uma atividade complexa. A metodologia de desenvolvimento priorizou a confiabilidade, funcionalidade e otimização de custos. Baseado na estrutura proposta por (ARCHILLA, 2008), o projeto foi dividido em algumas etapas, como mostra a Figura 3.

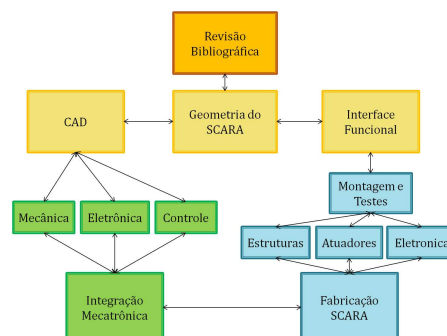


Figura 3 – Fluxograma da Metodologia

A revisão bibliográfica deu início ao projeto, coletando todas as informações e tecnologias já desenvolvidas em células de manufatura, além da análise de trabalhos correlacionados. A inserção das mesmas tem grande importância em ambientes educacionais com foco no aprimoramento do conhecimento dos alunos, porém, a sua escassez reflete a dissociação entre a teoria e prática ainda existentes em algumas instituições de ensino.

A geometria de alguns manipuladores é padronizada e possui características que precisam ser conservadas. Estas identificam e definem o robô se tornando um critério de classificação, utilização e caracterização do escopo da matriz morfológica.

Segundo (FORCELLINI,2003), na matriz morfológica são atribuídos princípios de solução a cada uma das funções elementares da estrutura funcional do produto. De forma a atender a função global, esses princípios devem agora ser combinados, elaborando-se modelos de princípio de solução do produto. A partir desta solução é determinada a função síntese do produto e os parâmetros necessários para criação do protótipo em ambiente virtual.

A qualidade do *design* do produto se relaciona diretamente com a qualidade do projeto. O *Computer-Aided-Design* (CAD) faz a utilização de softwares para desenvolver o produto em ambiente virtual, aperfeiçoando a técnica de desenvolvimento, simulação e visualização do produto final antes mesmo de ser produzido. Um dos pontos importantes da utilização desta ferramenta está na possibilidade de redução de custos de produção, onde pode ser mensurada e testada diversas formas de criação. Com o custo de produção reduzido, a probabilidade de sucesso do produto aumenta, como também influencia no seu ciclo de vida.

Na descrição das partes mecânica, eletrônica e o controle, todas as informações coletadas são aplicadas com o auxílio da ferramenta CAD, que por sua vez retornam dados importantes para análise e adaptações a fim de atender o objetivo final.

A integração mecatrônica é a união de todos os itens anteriores, estabelecendo o elo de conexão para aperfeiçoar e constatar a semelhança entre o projeto e protótipo. A metodologia empregada e os resultados não abrangem da interface funcional à fabricação do protótipo real.

4. RESULTADOS

O objetivo do projeto é integrar o manipulador a uma célula de manufatura com a possibilidade de realizar tarefas de montagem e transporte. Visando alcançar esses objetivos as seguintes especificações foram elaboradas:

- Robô com 5 graus de liberdade (2 juntas rotacionais, 1 junta prismática e no mínimo 3 graus de liberdade); Curso dos eixos X=250mm , Y=250mm , Z=300mm; Ângulo Máximo 270°; Precisão;

Para a elaboração do projeto, Figura 4, foram atendidas as características principais do projeto no intuito de se obter uma melhor performance entre o controle e funcionamento.

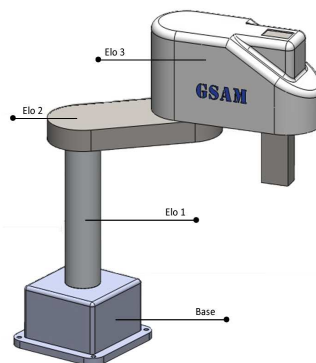


Figura 4 – Protótipo Conceitual

Com o levantamento dos dados do projeto foi desenvolvida a matriz morfológica do sistema no intuito de atender dentre as várias possibilidades as que mais se adequam ao sistema proposto. Com

base na elaboração da matriz morfológica, Figura 5, a concepção do projeto com *layout* e descrição foi concluída.



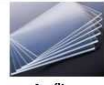


















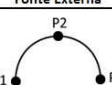



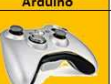





Material	Carcaça Superior	 Aço	 Resina de Vidro	 Acrílico
	Estrutura Rígida	 Aço	 Alumínio	
	Base	 Alumínio	 Composto ACM	 Aço
	Junta Prismática	 Corrediça Telescópica		
	Engrenagens	 PVC	 Aço	 Acrílico
	Rolamentos	 Cônico	 Axial	 Radial
Acionamento	Juntas	 Motor C.C	 Motor de Passo	 Servo Motor
	Alimentação	 Fonte Interna	 Fonte Externa	
Controle	Cinemática	 Junta a junta	 Linear	
	Processamento	 Arduino	 PIC	 CLP
	Interface	 Joystick	 Autonomo IA	 Programa Gravado
Efetuator	Tipo	 Garra de dedos	 Ferramenta	 Garras a vácuo

Figura 5 – Matriz Morfológica

4.1 Material

Com base nas premissas do projeto o material escolhido para confecção da base e Elo 2 foi o Material de Alumínio Composto (ACM). Sendo formado por duas lâminas de alumínio com núcleo de polietileno de baixa densidade, o ACM possui dentre suas características a resistência, baixo peso e facilidade de conformação, o que aumentam sua eficácia na capacidade de carga x desgaste mecânico. Já na confecção do Elo 3, a fibra de vidro se adequou às especificações do projeto, pois a carcaça é irregular e requer baixo peso. Já para o Elo 1 foi utilizado tubo de alumínio, pois é necessário rigidez mecânica para equilibrar todas as forças existentes com o peso e movimento das partes superiores.

4.2 Acionamento

Dentre as características para o motor são destacadas a precisão e o conjugado Velocidade x Torque (VxT). A precisão do movimento é de extrema importância quando se trata de robôs manipuladores, sendo esta a principal característica do robô SCARA. Apesar da velocidade ser um fator importante, neste projeto não foi priorizado a alta velocidade, e sim, o equilíbrio entre o torque e velocidade. Com base nesses critérios a melhor opção para o acionamento é o servomotor.

Os servomotores são motores de corrente contínua incrementados com um circuito eletrônico responsável pelo *feedback* da posição. Ou seja, possuem grande precisão devido ao sistema de conferência instantânea e cíclica das posições, atual e desejada. Utilizam como sinal de controle o PWM (*Pulse Width Modulation*), ou modulação por largura de pulso que gera uma forma de onda quadrada onde é analisado a duração dos pulsos, *HIGH* e *LOW*, durante um período e se obtém uma média do valor na tensão de saída.

Para a construção do protótipo foram utilizados 3 servomotores, sendo um trabalhando em conjunto com um pinhão e uma cremalheira, a fim de transformar o movimento rotativo em linear, e outros dois para rotacionar diretamente os elos 2 e 3.

4.3 Controle

A lógica de programação ilustrada na Figura 6, responsável pelo controle dos servomotores com um único ciclo de execução. Desenvolvida em Linguagem C, consiste em primeiro plano analisar as posições atuais dos servomotores, visto que é necessário saber qual a sua posição antes de enviar qualquer comando de movimentação. Em seguida, um filtro de valores melhora a qualidade das leituras de posição. A terceira etapa se refere a interação do homem com a máquina, uma vez que o usuário irá controlar a posição dos servomotores, por conseguinte os elos, através do joystick que estará interligado com a placa de controle. O *software* faz a comparação da posição atual de cada servomotor e a setada no joystick para assim, enviar o comando de movimentação dos elos até a posição final. O controle IHM (Interface Homem Máquina) foi desenvolvido na plataforma didática Arduino.

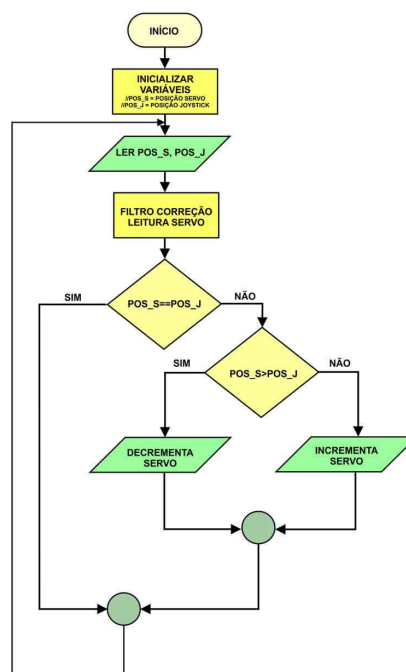


Figura 6 - Fluxograma Programação

Esta plataforma desenvolvida em 2005 por um grupo de estudantes do Instituto Ivrea, Itália, utiliza microcontroladores Atmel AVR, baseada em *hardware* e *software* livre, de baixo custo e

interface amigável, simplifica a criação e prototipagem de projetos eletrônicos. Existem diversos modelos do Arduino: *Uno*, *Mega*, *Fio*, *Pro*, *Nano*, *Duemilanove* e outros. O Duemilanove apresentado na Figura 7, é baseado no *ATmega328*, possui 14 pinos de entrada/saída digitais, 6 entradas analógicas, 32KB de memória *flash* destinada para o armazenamento de código, 2KB de *SRAM* e 1KB de *EEPROM*, simples conexão com o computador através da porta *USB* (Arduino Home Page, 2012). Dos 14 pinos digitais existentes 6 podem ser utilizados como gerador de PWM, o que o torna eficaz para controle de servomotores.

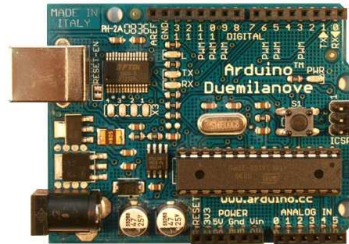


Figura 7: Arduino Duemilanove. Fonte: (Arduino Home Page, 2012)

4.4 Efetuador

Considerado o elemento mais crítico nos sistemas robóticos, o efetuador e o seu design dependem da especificação do robô, do objeto a ser manipulado, das tarefas a serem executadas e do volume de trabalho. Um robô manipulador é projetado para desempenhar determinadas atividades, tarefas muitas vezes singulares como pintura, cortes, manipulação, soldagem ou prensa (STONE and KURFESS, 2005). Diversas configurações já foram criadas a fim de atender inúmeras necessidades, dentre elas: garra de 3 dedos, garra de 2 dedos, garra à vácuo, eletromagnética, ferramentas específicas.

O efetuador mostrado na Figura 8 foi projetado visando atender à necessidade de transportar materiais com superfícies laterais planas. Priorizando a confiabilidade mecânica e praticidade na montagem, o sistema utiliza um conjunto de duas engrenagens (coroas) e parafuso sem-fim. O parafuso sem-fim quando acoplado a um elemento motriz, no caso um motor de corrente contínua, transmite o movimento para as coroas que, por sua vez, estão interligados as hastes e a estrutura do efetuador, gerando assim, um movimento de abertura e fechamento da garra. Devido à sua configuração, com dois elementos de contato, recebe o nome de "Garra de 2 dedos".

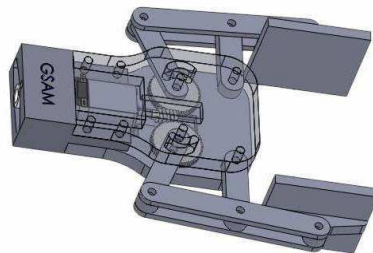


Figura 8 – Efetuador

O material para confecção das engrenagens foi o Nylon, devido a alta resistência mecânica, baixo peso específico, ponto de fusão elevado, boa resistência à fadiga, resistência a impactos, facilidade na usinagem e baixo custo. Na estrutura foi empregado material semelhante aos elos do robô manipulador, o ACM.

O projeto mecânico da engrenagem e cremalheira foi realizado com riqueza de detalhes nas especificações técnicas necessárias para usinagem.

4.5 Protótipo

A Figura 9 mostra a evolução com o protótipo detalhado utilizando a seleção da matriz morfológica. Foram acrescentados rolamentos nos eixos de revolução, servomotores e corredeira

telescópica para suavizar o movimento prismático realizado pela cremalheira. Corredoras telescópicas proporcionam maior suavidade e segurança ao movimento. Rolamentos com dimensões padrões auxiliam nas áreas de contato entre os elos e servomotores, como também suportam cargas axiais e radiais pré-definidas pelo fabricante.

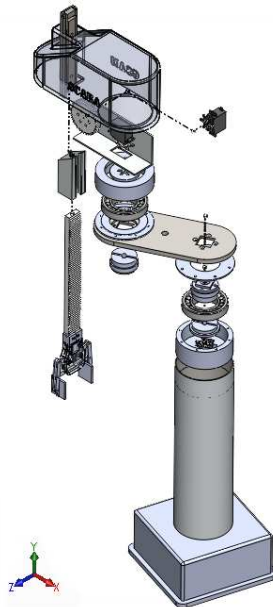


Figura 9 - Vista Explodida do Protótipo

5. CONCLUSÕES

As metas estabelecidas para a fase de projeto foram alcançadas. Da concepção a elaboração do protótipo foram realizadas as especificações, a concepção e detalhamento do protótipo. O protótipo do robô SCARA apresentado encontra-se atualmente em fase de desenvolvimento e testes. Com o objetivo inicial de explorar todas as características e, por fim, desenvolver um protótipo compatível com a utilização na célula de manufatura didática, como trabalho futuro, pretende-se implementar e avaliar diferentes estratégias de controle de trajetória.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA.

REFERÊNCIAS

- ARCHILA, J. F. **Estudo e projeto conceitual de um robô para inspeção de linhas de Serviço**. PhD thesis, 2008.
- Arduino, disponível em <http://www.arduino.cc/>, acesso 09 de julho de 2012.
- CRAIG, J. J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**, 3rd edn, 2004.
- CURZEL, J. L., da SILVA, F. T., LEAL, A. B. and AMARAL, S. D. **Concepção de uma Célula Flexível de Manufatura Didática para o Ensino de Engenharia**, COBENGE - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 2006.
- FORCELLINI, F. A. **Projeto Conceitual**. Apostila do curso de Projeto Conceitual utilizada no Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, 2003.
- GORGULHO, J. **Conhecendo o Robô Scara**, Revista Mecatrônica Atual, 2003.
- GROOVER, M. P. **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing**, 2001.
- PANSE, S. **History of Robots**, 2012.
- STONE, W. L. and KURFESS, T. R. **Robotics and Automation Handbook**, New York, chapter 1, p. 16, 2005.