

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

**FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

DENER SOUZA VALÊNCIO

**PROJETO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO DE 3 GRAUS DE LIBERDADE
COM OBJETIVO DE CONFEÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

**Ilha Solteira
2023**

DENER SOUZA VALÊNCIO

**PROJETO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO DE 3 GRAUS DE LIBERDADE
COM OBJETIVO DE CONFEÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Dr. Márcio Antônio Bazani

Ilha Solteira
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

V152p Valêncio, Dener Souza.
Projeto de um manipulador robótico de 3 graus de liberdade com objetivo de confecção de placas de circuito impresso / Dener Souza Valêncio. -- : [s.n.], 2023
36 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Márcio Antônio Bazani

Inclui bibliografia

1. Manipulador robótico. 2. Cinemática inversa. 3. Graus de liberdade. 4.
Scara.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: Projeto de um manipulador robótico de 3 graus de liberdade com objetivo de confecção de placas de circuito impresso

ALUNO: Dener Souza Valêncio RA: 151051356

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcio Antônio Bazani

Aprovado (X) – Reprovado () pela Comissão Examinadora

Nota obtida: 7,5

COMISSÃO EXAMINADORA:

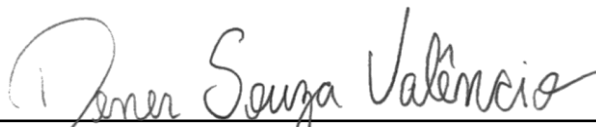
Documento assinado digitalmente
 MARCIO ANTONIO BAZANI
Data: 04/07/2023 21:54:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

PRESIDENTE (ORIENTADOR) - Prof. Dr. Marcio Antônio Bazani


Diogo Cunha José Karmouche

Documento assinado digitalmente
 HENRIQUE CORDEIRO NOVAIS
Data: 04/07/2023 16:44:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Henrique Cordeiro Novais


Assinatura do Aluno

Ilha Solteira, 03 de Julho de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente ao Prof. Dr. Márcio Antônio Bazani pela paciência e dedicação na orientação deste trabalho.

Agradeço, também, a minha mãe que nunca desistiu de mim e não fosse ela, não poderia realizar este trabalho.

Por fim, agradeço aos amigos que fiz durante a graduação, que de alguma forma contribuíram para que fosse uma experiência completa, e ao grupo de robótica TERA, o qual fiz parte por 4 anos e meio e tive experiências que vou levar para o resto da vida.

RESUMO

Placas de circuito são a base de qualquer projeto eletrônico, partindo deste princípio, este estudo aborda um manipulador robótico de três graus de liberdade, que tem a finalidade de confeccionar tais placas, sendo estudada a cinemática inversa do mesmo. O manipulador estudado é do tipo SCARA (do inglês Braço Robótico para Montagem de Conformidade Seletiva), um robô que consiste em dois elos principais, com duas juntas rotativas realizando a movimentação no plano XY e uma junta linear para realizar o movimento no eixo Z. Embora a área de trabalho deste manipulador seja limitada, sua precisão de movimentos no plano XY é um fator mais importante, visto que para a confecção das placas considerou-se um volume de trabalho cúbico de 20 centímetros em cada lado. Para saber se o manipulador conseguiria alcançar todos os pontos neste volume de trabalho é preciso analisar a cinemática inversa deste robô, sendo assim, uma representação do manipulador foi projetada no software Solidworks para auxiliar na análise geométrica e obter as equações necessárias para o cálculo de sua cinemática inversa. Com o auxílio do software MATLAB, foi escrito um código para simular os ângulos das juntas do robô para cada ponto do volume de trabalho definido, com a análise dos gráficos gerados concluiu-se que seria possível operar perfeitamente nas condições propostas.

Palavras-chave: Manipulador Robótico, Cinemática Inversa, Graus de Liberdade, SCARA

ABSTRACT

Circuit boards are the foundation of any electronic project. Based on this principle, this study focuses on a three-degree-of-freedom robotic manipulator designed to fabricate such boards, with a study of its inverse kinematics. The manipulator under investigation is of the SCARA type (Selective Compliance Assembly Robot Arm), a robot consisting of two main links with two revolute joints for movement in the XY plane and one linear joint for movement along the Z-axis. Although the workspace of this manipulator is limited, its precision in the XY plane is a more important factor, considering a cubic working volume of 20 centimeters on each side for board fabrication. To determine if the manipulator can reach all points within this workspace, it is necessary to analyze the inverse kinematics of this robot. Therefore, a representation of the manipulator was designed in Solidworks software to assist in geometric analysis and obtain the necessary equations for calculating its inverse kinematics. Using MATLAB software, a code was written to simulate the joint angles of the robot for each point within the defined workspace. By analyzing the generated graphs, it was concluded that the robot could operate perfectly under the proposed conditions.

Keywords: Robotic Manipulator, Inverse Kinematics, Degree of Freedom, SCARA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Projeto do Manipulador Robótico para produção de placas de circuito impresso.....	15
Figura 2	- Representação dos elementos de um braço robótico.....	16
Figura 3	- Exemplos de juntas de manipuladores.....	17
Figura 4	- Movimentos das juntas em relação ao próprio eixo.....	18
Figura 5	- Movimentos de punho.....	19
Figura 6	- Manipulador de cadeia cinemática parcialmente fechada (esquerda) e fechada (direita).....	20
Figura 7	- Manipulador de cadeia cinemática aberta.....	21
Figura 8	- Manipulador cartesiano.....	22
Figura 9	- Manipulador cilíndrico.....	23
Figura 10	- Manipulador polar.....	24
Figura 11	- Manipulador articulado.....	24
Figura 12	- Manipulador paralelo.....	25
Figura 13	- Manipulador SCARA.....	26
Figura 14	- Vista superior do manipulador SCARA.....	32
Figura 15	- Vista frontal do manipulador SCARA.....	33
Figura 16	- Área de trabalho do manipulador SCARA.....	34
Figura 17	- Valores do ângulo θ_1 ao longo do plano XY.....	37
Figura 18	- Valores do ângulo θ_2 ao longo do plano XY.....	38
Figura 19	- Valores do deslocamento d_3 ao longo do eixo Z.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Esquema de notação de configuração de corpo de robôs.....	18
Tabela 2	- Esquema de notação de configuração de pulso de robôs.....	19
Tabela 3	- Distância entre os eixos da juntas.....	25

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1. ANATOMIA DO MANIPULADOR ROBÓTICO	13
2.2. GRAUS DE LIBERDADE	15
2.3. CADEIA CINEMÁTICA.....	16
2.4. CONFIGURAÇÃO DE MANIPULADORES ROBÓTICOS.....	18
3. CINEMÁTICA DE MANIPULADORES	22
3.1. CINEMÁTICA INVERSA DO MANIPULADOR SCARA DE 3 GDL	23
4. RESULTADOS	28
5. CONCLUSÃO.....	30
6. REFERÊNCIAS	31

1. INTRODUÇÃO

Os processos de produção que precedem a primeira revolução industrial eram manuais, limitando a escala de produção. Diante de uma população em ritmo de crescimento alarmante era preciso melhorar a eficiência dos métodos de produção, o que ocorreu na Inglaterra, em meados do século XVIII com o aperfeiçoamento da máquina à vapor (CAVALCANTE; SILVA, 2011). Desde então, a capacidade produtiva das fábricas vem aumentando constantemente ao longo dos anos, a medida que novos processos inovadores são propostos e aperfeiçoados.

A robótica foi uma das inovações que possibilitaram uma mudança no ambiente de trabalho industrial e um aumento na escala de produção. Trabalhos que antes seriam duros demais ou perigosos demais para um ser humano poderiam ser feitos por uma máquina que, com o passar do tempo, ganhou ainda mais funções e a qualidade de seu serviço se aproximou e, em algumas funções, até superou a de um ser humano (DUMBÁ, 2013).

O primeiro robô industrial foi o Unimate, construído pelo inventor George Devol, com o objetivo de ser uma máquina autônoma que armazenava instruções digitais passo-a-passo para mover partes em uma fábrica. Em 1961 sua primeira versão comercial entrou em serviço em uma fábrica da General Motors no estado de Nova Jersey, extraíndo placas de metal quentes de uma máquina de fundição (MALONE, 2011).

A automação é uma tecnologia que se utiliza dos sistemas disponíveis nos robôs (mecânicos, elétricos, eletrônicos e computação) de modo a controlar os processos produtivos, podendo exercer funções como linhas de montagem, soldas e máquinas operatrizes do tipo CNC. Distingue-se as formas de automação industrial como:

- Automação fixa: Máquinas específicas para cada produto produzido, aumentando a escala de produção do mesmo e diminuindo a variação entre o que é produzido. Mesmo tendo o custo elevado de investimento acabam reduzindo o custo de produção, amortizando esse custo com o volume de produção e vendas a longo prazo (CARRARA, 2015).
- Automação flexível: Máquinas que podem produzir uma variedade de outros produtos semelhantes ao ser reprogramada. Essa capacidade adaptativa faz com que

se perca algumas características que aceleram a produção de tal produto, tendo assim um volume de produção médio (CARRARA, 2015).

- Automação programável: Reduz-se ainda mais o volume de produção, aumentando, porém, a flexibilidade do que é produzido. São máquinas adaptáveis por meio de programação, como por exemplo, máquinas CNC e impressoras 3D (CARRARA, 2015).

Um dos processos que se beneficia da automação é o da manufatura de placas de circuito impresso. Estas placas datam de meados de 1903, quando o alemão Albert Hanson desenvolve um método para criar trilhas condutoras em placas isolantes de cerâmica (HIRST, 1993). No entanto, é durante a Segunda Guerra Mundial, com os avanços na tecnologia de rádio e comunicação, que as placas se tornaram uma solução viável permitindo uma montagem mais eficiente dos componentes em uma plataforma plana. Desde então, as placas evoluíram em termos de tecnologia, design e complexidade, se tornando a base para a fabricação de dispositivos eletrônicos (SHAMKHALICHENAR; BUECHE; CHOI, 2020).

Este trabalho teve como finalidade o estudo da viabilidade do uso de um manipulador robótico para a automação do processo de confecção destas placas de circuito impresso, utilizando como objeto de estudo um robô de tamanho reduzido, apresentado na Figura 1, tendo como base as necessidades de produção do grupo de robótica TERA, da Unesp de Ilha Solteira.

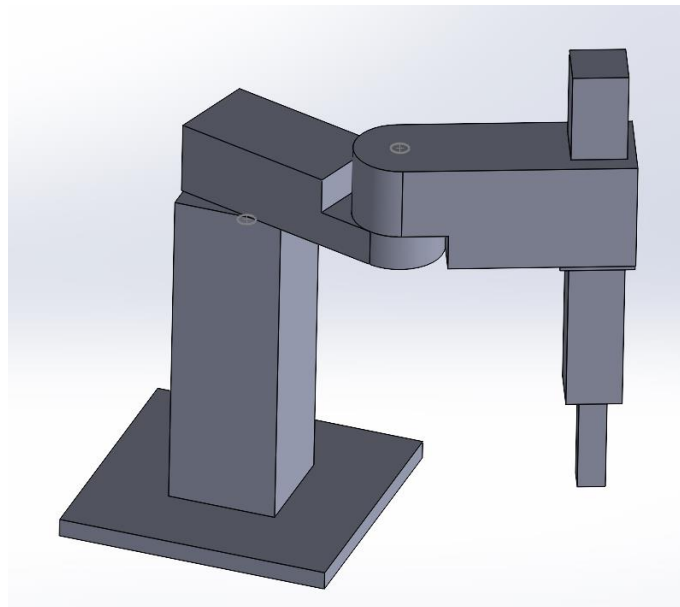
Para o projeto do manipulador foi considerado um volume de trabalho cúbico de 20 centímetros em cada lado, que possibilita o desenvolvimento de todas as placas trabalhadas no grupo, levando o mesmo em consideração no dimensionamento dos elos do braço robótico.

A configuração escolhida para este trabalho foi a SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*), uma vez que a precisão de movimentos no plano XY e a linearidade de movimentos no eixo Z são características ideais para esta tarefa. Esta configuração de manipulador será melhor detalhada na seção X.

Uma vez definido o manipulador, o trabalho tem como foco o cálculo da cinemática inversa do mesmo, processo que possibilita que, partindo da posição desejada para o efetuador final do robô, possa se definir a posição dos motores para que o manipulador possa chegar naquele ponto do espaço. A cinemática e o processo de cálculo da mesma será detalhado na seção X.

Utilizando as equações obtidas no cálculo da cinemática inversa, foram gerados gráficos mostrando o ângulo de cada uma das juntas rotativas do manipulador em cada ponto do plano XY da área de trabalho estipulada, assim como a posição da junta linear para cada ponto do eixo Z, para que se verifique a possibilidade de interação com todos os pontos no volume de trabalho definido.

Figura 1 – Projeto do Manipulador Robótico SCARA para produção de placas de circuito impresso



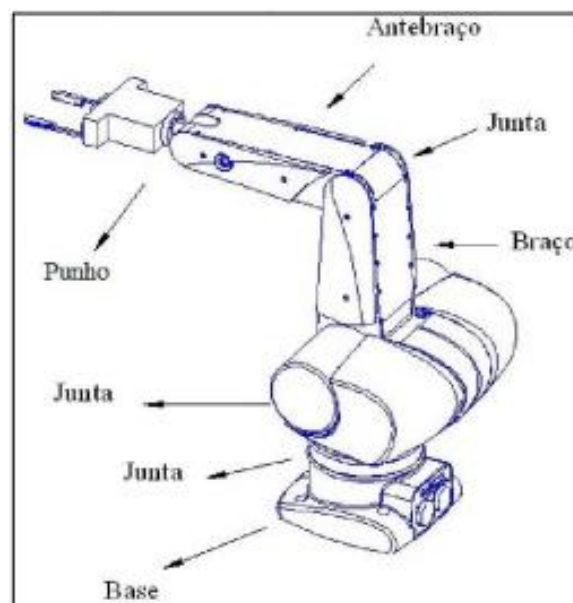
Fonte: Autor

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ANATOMIA DO MANIPULADOR ROBÓTICO

Define-se como manipulador robótico um dispositivo mecânico controlado por software, cuja finalidade é a execução de processos automatizados específicos (LOPES, 2002). Estes manipuladores são geralmente antropomórficos, com formato semelhante ao de um braço humano e são compostos por uma série de corpos, denominados elos, interligados por juntas, com um efetuador (também chamado de órgão terminal) ligado ao seu último elo, de forma a interagir com o ambiente por meio deste, podendo ser, por exemplo, uma garra, uma extrusora ou uma broca (CARRARA, 2015). É possível visualizar na Figura 2 uma representação dos elementos do manipulador robótico mencionados.

Figura 2 – Representação dos elementos de um braço robótico

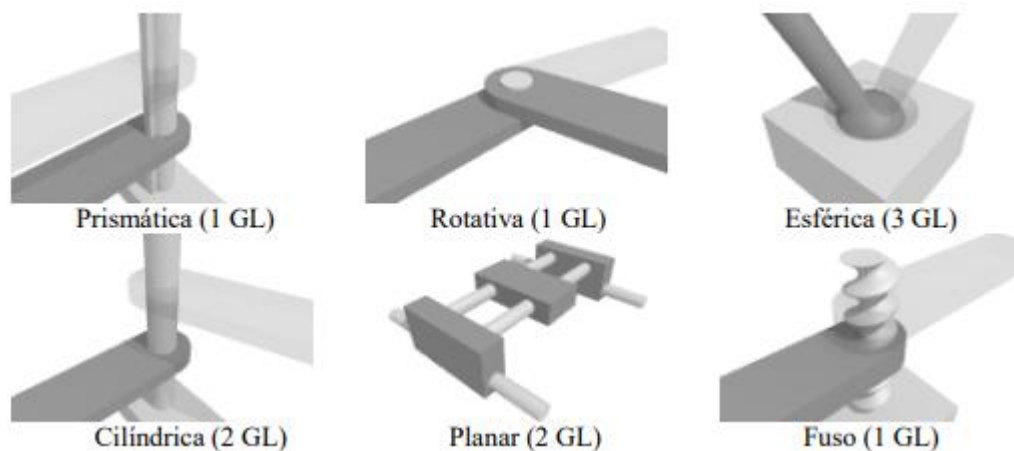


Fonte: Lazzarim (2012).

São utilizados, normalmente, motores de passo ou servo motores para realizar o movimento de um manipulador robótico devido a sua precisão de movimento. Estes atuadores interagem com as juntas do manipulador, proporcionando um movimento relativo entre os elos, podendo ser classificadas como lineares (ou prismáticas),

rotativas, esféricas, cilíndricas, de parafusos e planares. Dependendo dos movimentos permitidos pelas juntas, elas podem se mover em uma, duas ou três direções, ou graus de liberdade (GDL). Os diferentes tipos de juntas são descritos a seguir e podem ser visualizados na Figura 3. (CARRARA, 2015)

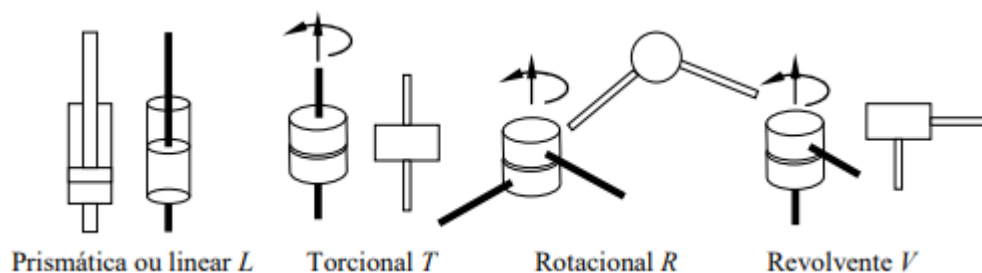
Figura 3 – Exemplos de juntas de manipuladores



Fonte: Carrara (2015)

- As juntas **prismáticas ou lineares (L)** geram um movimento em linha reta, são compostas de duas hastes que deslizam entre si;
- As juntas **rotativas** giram em torno de uma linha imaginária estacionária chamada de eixo de rotação, as juntas rotativas podem ser classificadas, ainda, de acordo com as direções dos elos de entrada e de saída em relação ao eixo de rotação, pode-se ver a representação gráfica na Figura 4:

Figura 4 – Movimentos das juntas em relação ao próprio eixo



Fonte: Carrara (2015).

- **Rotativa Torcional (T):** Os elos de entrada e de saída têm a mesma direção do eixo de rotação da junta;
- **Rotativa Rotacional (R):** Os elos de entrada e de saída são perpendiculares ao eixo de rotação da junta;
- **Rotativa Revolvente (V):** O elo de entrada possui a mesma direção do eixo de rotação, mas o elo de saída é perpendicular a este.
 - As juntas **esféricas** funcionam com a combinação de três juntas de rotação e permitem rotações em torno de três eixos distintos;
 - As juntas **cilíndricas** são compostas por uma junta rotativa e uma prismática;
 - As juntas **planares** são compostas por duas juntas prismáticas, realizando movimentos em duas direções;
 - As juntas tipo **parafuso** são constituídas de um parafuso e uma rosca que executa um movimento semelhante ao de uma junta prismática, porém com movimento de rotação no eixo central. (CARRARA, 2015)

2.2. GRAUS DE LIBERDADE

Define-se o conjunto de movimentos individuais de cada junta que especificam a movimentação do braço robótico no espaço bidimensional ou tridimensional como "graus de liberdade" (GDL, ou DOF – Degrees of Freedom em inglês). Robôs industriais costumam possuir entre 4 e 6 graus de liberdade (ZWIRTES, 2004), sendo possível realizar transporte de materiais pesados, pintura e revestimento de objetos, soldagem, inspeção e controle de qualidade e operação em ambientes perigosos (NOF, 1999).

Cada junta define um ou dois graus de liberdade, assim, o número de graus de liberdade do robô é igual à somatória dos graus de liberdade de suas juntas. Quanto maior a quantidade de graus de liberdade, mais complicadas são a cinemática, dinâmica e controle do manipulador (CARRARA, 2015).

Pode-se separar os movimentos do manipulador em movimentos do braço e do punho, os movimentos do braço são realizados pelos acionadores do manipulador para que o mesmo se movimente no espaço definido por sua área de atuação. Podem-se identificar três movimentos independentes em um braço robótico:

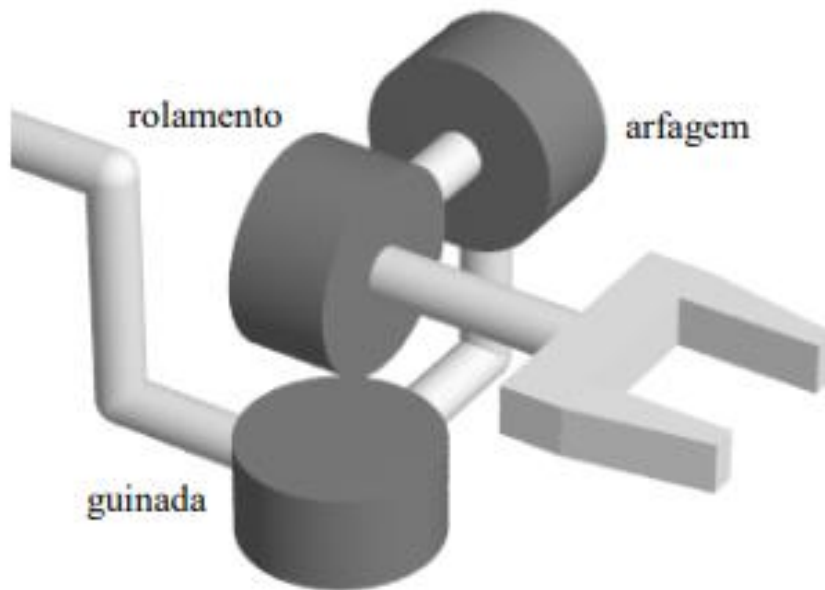
- Vertical transversal – Movimento vertical do punho para cima ou para baixo;

- Rotacional transversal – Movimento de rotação horizontal do punho para esquerda ou para direita;
- Radial transversal – Movimento de aproximação ou afastamento do punho.

Os punhos costumam ser compostos por dois ou três graus de liberdade e seus movimentos, apresentados na Figura 5, possuem nomenclaturas específicas:

- Rolamento – Rotação do punho em torno do braço;
- Arfagem – Rotação do punho para cima ou para baixo;
- Guinada – Rotação do punho para a esquerda ou direita.

Figura 5 – Movimentos de punho



Fonte: Carrara (2015).

2.3. CADEIA CINEMÁTICA

Para que se possa fazer uso destes movimentos é preciso considerar a forma como os elementos do manipulador estão conectados, denomina-se cadeia cinemática a sequência de elementos mecânicos interconectados que transmitem o movimento de entrada para a saída desejada em um sistema mecânico, considerando as juntas, elos, engrenagens, correias e demais componentes que transferem e transformam o movimento (NORTON; AL, 2010).

Robôs podem possuir cadeia cinemática aberta, fechada ou semi-fechada. Manipuladores de cadeia cinemática fechada, como visto na Figura 6, possuem uma sequência de elementos mecânicos interconectados em que pelo menos um caminho fechado é formado, assim, o movimento da saída afeta diretamente a entrada (JOSEPH EDWARD SHIGLEY; JOHN JOSEPH UICKER; PENNOCK, 2011). Robôs de cadeia cinemática fechada possuem uma rigidez estrutural maior, podendo operar cargas maiores.

Figura 6 – Manipulador de cadeia cinemática parcialmente fechada (esquerda) e fechada (direita)



Fonte: Carrara (2015)

Um robô de cadeia cinemática aberta, como visto na Figura 7, é aquele que, partindo da base, chega-se ao punho por meio de um único caminho, numa sequência elo-junta-elo (CARRARA, 2015). Neste tipo de cadeia cinemática não há retroalimentação do movimento, o que significa que o movimento gerado no elemento de entrada é transmitido sucessivamente através dos demais elementos da cadeia (NORTON; AL, 2010). Manipuladores de cadeia parcialmente fechada possuem alguns de seus elementos conectados de forma fechada localizados em uma estrutura maior, que é aberta.

Figura 7 – Manipulador de cadeia cinemática aberta



Fonte: Carrara (2015)

2.4. CONFIGURAÇÃO DE MANIPULADORES ROBÓTICOS

Ao analisar a cadeia cinemática de um manipulador, considera-se o caminho desde a base até o punho, seguindo essa convenção, é possível classificar o braço robótico por meio do tipo de juntas contidas neste caminho. Considerando a definição de juntas apresentada na seção 2.1, apresenta-se nas Tabelas 1 e 2 as notações de configuração referentes ao corpo e ao punho dos robôs, respectivamente.

Tabela 1 – Esquema de notação de configuração de corpo de robôs.

Configuração do robô	Símbolo
Cartesiano	LLL
Cilíndrico	LVL/TLL
Articulada ou Revoluta	TRR
Esférica	TRL
SCARA	VRL

Fonte: Autor

Tabela 2 – Esquema de notação de configuração de pulso de robôs.

Configuração do robô	Símbolo
Punho de 2 eixos	RT
Punho de 3 eixos	TRT

Fonte: Autor

A notação utilizada, neste caso para robôs com três graus de liberdade, tem a forma **123**, onde a posição 1 indica a junta mais próxima da base e a posição 3 a junta mais próxima do punho. Utilizam-se as abreviações dos nomes das juntas apresentadas na seção 2.1, de forma que, por exemplo, um manipulador com uma junta linear seguida de duas juntas rotativas teria o formato **LRR**.

- **Robô cartesiano (LLL):** O robô de coordenadas cartesianas é o robô de configuração mais simples, desloca as três juntas em relação à outra, possui uma área de trabalho cúbica, impressoras 3D, máquinas CNC e robôs Gantry (Figura 8) são exemplos de robôs cartesianos;

Figura 8 – Manipulador cartesiano



Fonte: Smtnet (2013).

Robô cilíndrico (LVL/TLL): Este robô possui duas configurações utilizadas. A primeira consiste em uma junta prismática na base, conectada a uma junta rotativa revolvente, que se conecta a outra junta prismática formando uma configuração LVL. A outra configuração consiste em uma junta rotacional torcional conectada a duas juntas prismáticas em sequência, resultando em uma área de trabalho cilíndrica.

Figura 9 – Manipulador cilíndrico



Fonte: Electronics (2007).

- **Robô esférico ou polar (VVL):** O robô esférico conta com duas juntas rotativas seguidas de uma junta prismática, onde a primeira junta rotativa move o braço ao redor de um eixo vertical, enquanto a segunda o move ao redor de um eixo horizontal. O volume de trabalho é um setor esférico. Este robô possui a capacidade de ter amplo alcance e suporta grandes cargas.

Figura 10 – Manipulador polar



Fonte: Carrara (2015).

- **Robô articulado ou revoluto:** Este robô é o mais utilizado nas indústrias por terem uma configuração semelhante ao braço humano, sendo o mais versátil dos manipuladores e assegurando uma maior variedade de movimentos mesmo em um espaço limitado. É constituído por três juntas rotativas.

Figura 11 – Manipulador articulado



Fonte: Aeroexpo (2023).

- **Robô paralelo:** Este manipulador pode ser construído com juntas prismáticas ou com juntas que transformam movimento de rotação em translação. Possui volume de trabalho reduzido, porém com alta velocidade e precisão e ao contrário de outros robôs industriais não são projetados com cadeia cinemática aberta.

Figura 12 – Manipulador paralelo



Fonte: Supply (2023)

• **Robô SCARA:** Seu nome é um acrônimo de *Selective Compliance Assembly Robot Arm*, este manipulador consiste em dois elos principais, com duas juntas rotativas que permitem o movimento no plano XY, e uma junta linear que possibilita o movimento no eixo Z. Possui a capacidade de combinar um alto nível de rigidez e precisão nas direções X e Y, enquanto sua junta linear proporciona movimento vertical no eixo Z. Este manipulador é especialmente adequado para aplicações que exigem alto grau de repetibilidade e posicionamento.

Figura 13 – Manipulador SCARA



Fonte: Omron (2023).

3. CINEMÁTICA DE MANIPULADORES

Definidos os elementos que compõem o manipulador robótico, é possível estudar o movimento do mesmo, define-se como cinemática, o estudo do movimento dos corpos sem levar em consideração as forças envolvidas, descrevendo a relação entre as variáveis de posição, velocidade e aceleração de um sistema robótico, permitindo a análise e a previsão dos movimentos realizados pelos robôs. (CRAIG, 2012). A cinemática possibilita projetar trajetórias, determinar limitações de movimento e resolver problemas de posicionamento para robôs, o que será útil para definir se o robô estudado está apto para desenvolver a tarefa a qual foi projetado.

A posição instantânea do órgão terminal de um manipulador depende dos valores dos deslocamentos angulares das juntas rotativas e deslocamentos lineares das juntas prismáticas, sendo assim, ao se conhecer a posição de cada junta, é possível conhecer a posição do órgão terminal. O mesmo é válido para o inverso, ao se conhecer a posição da extremidade do robô pode-se calcular a configuração das juntas necessária para se chegar em tal posição (CARRARA, 2015).

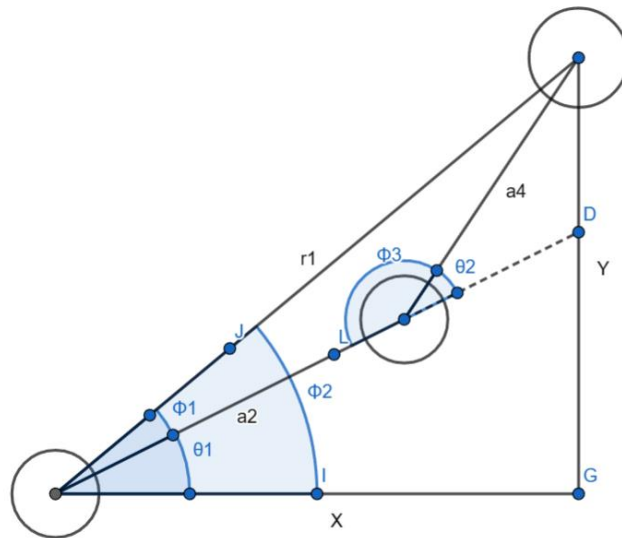
Define-se como **cinemática direta** o cálculo da posição cartesiana no espaço e a orientação do punho partindo do conhecimento dos ângulos das juntas. Já o cálculo das posições angulares e lineares das juntas a partir da posição no espaço do órgão terminal é definido como **cinemática inversa**. Este trabalho considera como mais interessante para seu propósito o cálculo da cinemática inversa, uma vez que o objetivo de uso do manipulador é movimentar seu órgão terminal por uma sequência de posições definidas em um espaço delimitado.

Pode-se efetuar o cálculo da cinemática inversa de duas maneiras pelo método algébrico e pelo método geométrico. Este trabalho utilizará o método geométrico. Este método determina as configurações das juntas do robô a partir de uma posição desejada do efetuador final. Este método não leva em consideração as forças ou dinâmicas envolvidas (CRAIG, 2012).

3.1. CINEMÁTICA INVERSA DO MANIPULADOR SCARA DE 3 GDL

Para se calcular a cinemática inversa pelo método geométrico é preciso estabelecer um sistema de coordenadas, a Figura 14 apresenta a vista superior do manipulador, definindo o sistema de coordenadas cartesiano, com a vista do plano XY. Define-se como ângulos das juntas rotacionais θ_1 e θ_2 , respectivamente, observa-se que a posição do efetuador final, em coordenadas cartesianas pode ser escrita em função destes ângulos, e que a variação destes ângulos gera o movimento do efetuador final.

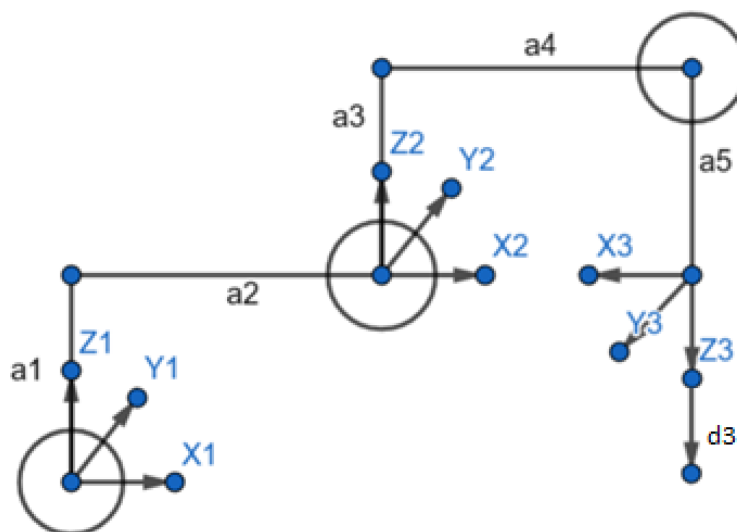
Figura 14 – Vista superior do manipulador SCARA



Fonte: Autor

A Figura 15 apresenta o modelo de visão frontal das juntas do manipulador, percebe-se a orientação escolhida dos eixos para a realização dos cálculos. A Tabela 3 contém os valores em centímetros das medidas de a_1 a a_5 . A variável d_3 determina a posição no eixo Z do efetuador final. É possível observar que o movimento no eixo Z depende somente do tamanho dos elos no sentido vertical e da variação linear da junta, portanto possui variação linear.

Figura 15 – Vista frontal do manipulador SCARA



Fonte: Autor

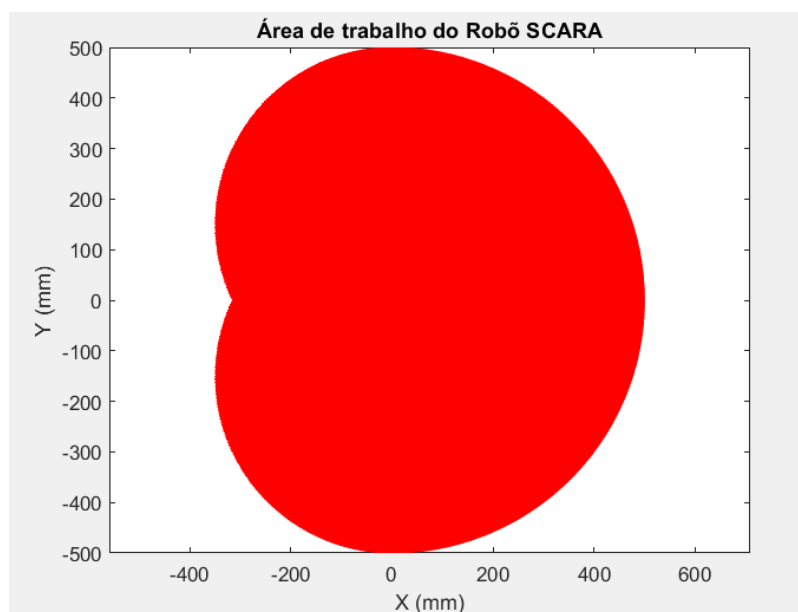
Tabela 3 – Distância entre os eixos da juntas

a_i	Distância [cm]
a_1	2
a_2	15
a_3	2
a_4	15
a_5	6

Fonte: Autor

Espera-se operar em um volume de trabalho cúbico de 20 centímetros, porém o manipulador possui capacidade de operação em um espaço maior, caso necessário, o volume de trabalho simulado pode ser encontrado na Figura 16 e o código utilizado para gerar a simulação pode ser encontrado no Apêndice A. Para gerar o gráfico da área de trabalho foi utilizado uma variação de 180° ($-\frac{\pi}{2}$ a $\frac{\pi}{2}$) na junta 1 e de 270° ($-\frac{3\pi}{4}$ a $\frac{3\pi}{4}$) na junta 2, esta diferença da variação dos ângulos de juntas gera uma área de trabalho do formato apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Área de trabalho do manipulador SCARA



Fonte: Autor

Levando em consideração as ângulos e distâncias entre elos apresentados nas Figuras 14 e 15 pôde-se extrair as equações necessárias para o cálculo da cinemática inversa, com o objetivo de encontrar os ângulos de junta θ_1 e θ_2 além do deslocamento d_3 em função das coordenadas cartesianas.

Da Figura 14, pode-se retirar a Equação (1), isolando o ângulo θ_1 .

$$\phi_2 = \theta_1 \phi_1 \quad (1)$$

$$\theta_1 = \phi_2 - \phi_1 \quad (2)$$

Analisando a geometria do triângulo obtido, tem-se que:

$$\phi_2 = \arctg \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (3)$$

E a hipotenusa do triângulo formado é:

$$r_1 = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (4)$$

Por meio da lei dos cossenos pôde-se obter o ângulo ϕ_3 :

$$\phi_3 = \arccos \left(\frac{a_2^2 + a_4^2 - r_1^2}{2a_2a_4} \right) \quad (5)$$

Porém, sabe-se que:

$$\cos(180 - \theta_2) = -\cos(\theta_2) \quad (6)$$

Portanto:

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{r_1^2 - a_2^2 - a_4^2}{2a_2a_4} \right) \quad (7)$$

Para encontrar o valor de θ_1 , segundo (1) e (2), precisamos encontrar o valor de ϕ_1 , visto que tem-se o valor de ϕ_2 . Assim como feito em ϕ_3 , obtemos por meio da lei dos cossenos a Equação (8):

$$\phi_1 = \arccos \left(\frac{r_1^2 - a_2^2 - a_4^2}{2a_2a_4} \right) \quad (8)$$

Utilizando assim, a Equação (2) para encontrar o valor de θ_1 .

Encontrar o deslocamento no eixo Z é uma tarefa mais simples, visto que é uma junta linear, basta considerar as distâncias na direção do eixo, a_1 , a_3 e a_5 vistas na Figura 15. O processo resulta na Equação (10).

$$Z = a_1 + a_3 - a_5 - d_3 \quad (9)$$

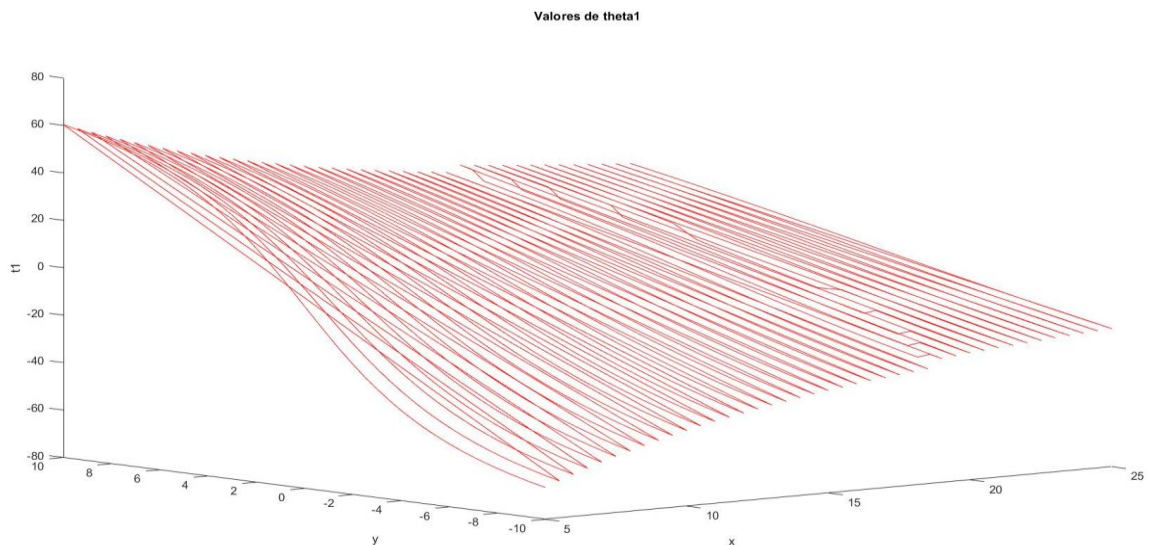
$$d_3 = a_1 + a_3 - a_5 - Z \quad (10)$$

4. RESULTADOS

Com as Equações (2), (7), (8) e (10) em mãos foi escrito um código no software MATLAB para realizar o cálculo da cinemática inversa, que se encontra no Apêndice B. Considerou-se um volume de trabalho cúbico de 20 centímetros de lado nas iterações, partindo de 5cm no eixo X, considerando que a área próxima da origem não pode ser acessada pelo efetuador final devido a estrutura do robô, além disso iterou-se de -10cm a 10cm no eixo Y para que o volume de trabalho esteja centralizado.

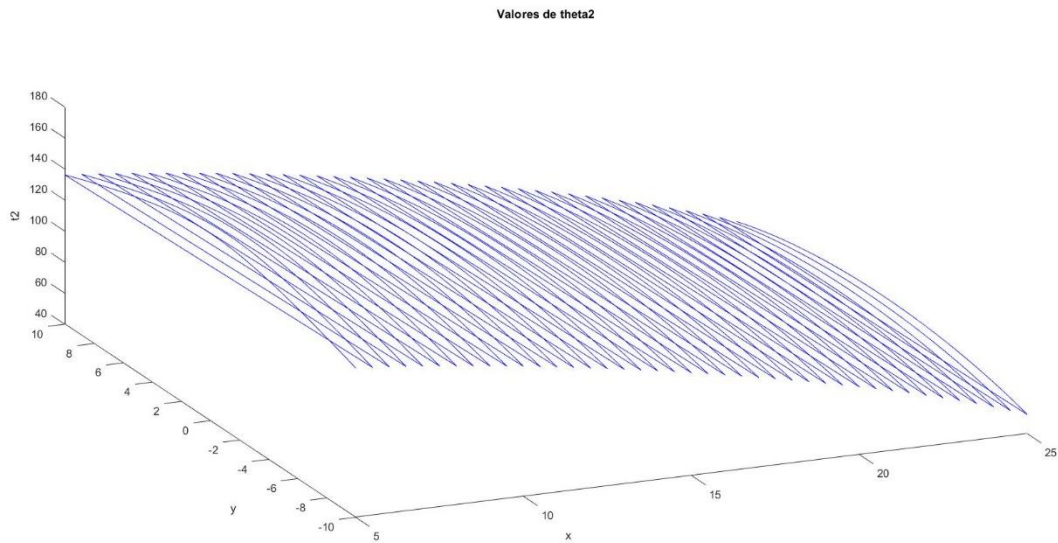
Nas Figuras 15 e 16 pode-se ver os gráficos formados pelos ângulos das juntas no intervalo simulado, pode-se ver uma superfície contínua formada em ambos, mostrando que o movimento nesta área de trabalho é possível de ser executado.

Figura 17 – Valores do ângulo θ_1 ao longo do plano XY



Fonte: Autor

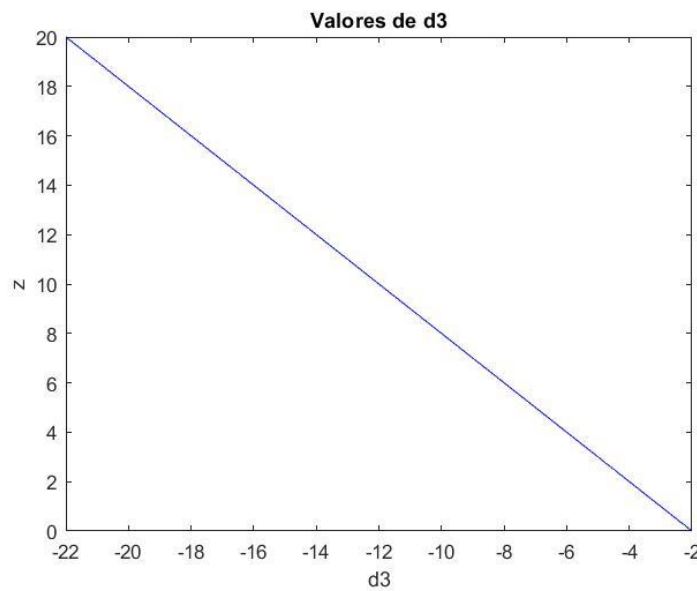
Figura 18 – Valores do ângulo θ_2 ao longo do plano XY



Fonte: Autor

Na Figura 19 é apresentado o gráfico da movimentação da junta prismática no eixo Z, observa-se que é uma reta, pois há uma variação linear do parâmetro d_3 .

Figura 19 – Valores do deslocamento d_3 ao longo do eixo Z



Fonte: Autor

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi estudada a cinemática inversa de um manipulador robótico com 3 graus de liberdade, da configuração SCARA, projetado com a finalidade de estudar a viabilidade do uso deste manipulador para a confecção de placas de circuito impresso, efetuou-se a análise geométrica do robô, obteve-se as equações para o cálculo da cinemática inversa e gerou-se gráficos dos ângulos das juntas em todos os pontos da área de trabalho estipulada.

Com a análise destes gráficos, podemos observar que o manipulador consegue alcançar todos os pontos no volume de trabalho proposto, que se considerou de tamanho satisfatório para a confecção das placas.

Propõe-se para uma continuação deste trabalho, a programação do microcontrolador que poderá efetuar o controle deste manipulador, assim como o projeto e construção do controlador dos motores de passo que deverão ser utilizados na construção de um protótipo. Considera-se interessante, também, o estudo do efeito das vibrações que a adição de uma broca como efetuator final pode vir a ter sobre a estrutura do robô e como minimizar este efeito.

6. REFERÊNCIAS

- AEROEXPO. **Robô articulado TX2-90**. 2023. Disponível em: <https://www.aeroexpo.online/pt/prod/staeubli/product-170642-21018.html>. Acesso em: 08 jul. 2023;
- CARRARA, Valdemir. **Introdução À Robótica Industrial**, 2015. Disponível em: http://www.dem.inpe.br/~val/homepage/cursos/rb_apostila.pdf Acesso em: 02 jun. 2022;
- CAVALCANTE, Z. V.; SILVA, M. L. S. da. **A importância da Revolução Industrial no mundo da Tecnologia**. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 7. 2011. Maringá. Anais eletrônico. Maringá. 2011. Disponível em:< https://www.unicesumar.edu.br/epcc-2011/wpcontent/uploads/sites/86/2016/07/zedequias_vieira_cavalcante2.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2022;
- CRAIG, John J., **Robótica**, 3ªed, Pearson education do Brasil, 2012;
- DUMBÁ, R., **Robótica: Teoria e Prática**, disponível em, <<https://www.passeidireto.com/arquivo/46266746/robotica-teoria-pratica>> acesso em 02 jun. 2022;
- ELECTRONICS, Industrial. **Cylindrical Robots**. 2007. Disponível em: https://industrial-electronics.com/industrial-electricity-com/4_Cylindrical_Robots.html. Acesso em: 08 jul. 2023
- GROOVER, Mikell P. **Robótica: Tecnologia e Programação**. McGraw-Hill, 1998;
- HIRST, R. J. **The Evolution of the Printed Circuit Board**. IPC Technical Review, 19-21, 1993;
- JOSEPH EDWARD SHIGLEY; JOHN JOSEPH UICKER; PENNOCK, G. R. **Theory of machines and mechanisms**. New York: Oxford University Press, 2011;
- LAZZARIM, Julio Cesar. **Construção de um manipulador robótico de baixo custo para ensino**. 2012. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência da Computação, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel. Disponível em: <http://www.inf.unioeste.br/~tcc/2012/TCC_Julio.pdf> Acesso em: 05 mai. 2022;
- MALONE, Bob. **George Devol: A Life Devoted to Invention, and Robots**: George Devol's most famous invention—the first programmable industrial robot—started a revolution in manufacturing that continues to this day. 2011. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/george-devol-a-life-devoted-to-invention-and-robots#toggle-gdpr>> Acesso em: 02 jun. 2022;
- NOF, S. Y. **Handbook of industrial robotics**. New York ; Chichester: Wiley, 1999;

NORTON, R. L.; AL, E. **Cinemática e dinâmica dos mecanismos**. [s.l.] Porto Alegre (Rs): Mcgraw-Hill; Amgh, 2010;

OMRON. **17111-16000(Q)**. 2023. Disponível em:
<https://store.omron.com.au/product/r6a-0051c>. Acesso em: 08 jul. 2023;

SHAMKHALICHENAR, Hamed; BUECHE, Collin J.; CHOI, Jin-Woo. Printed Circuit Board (PCB) Technology for Electrochemical Sensors and Sensing Platforms. **Biosensors**, [S.L.], v. 10, n. 11, p. 159, 30 out. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/bios10110159>;

SILVA, Fernando H. C. **Cinemática Inversa De Braço Robótico Manipulador De Três Graus De Liberdade**, 2014. TCC (Graduação) – Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira;

SMTNET. **Cartesius - Cartesian Robot Gantry System**. 2013. Disponível em:
https://smtnet.com/company/index.cfm?fuseaction=view_company&company_id=39568&component=catalog&catalog_id=19231. Acesso em: 08 jul. 2023;

SUPPLY, E-Motion. **ADEPT: QUATTRO PARALLEL ROBOTS (S650HS SERIES)**. Disponível em: https://www.e-motionsupply.com/product_p/s650hs.htm. Acesso em: 30 jun. 2023;

ZWIRTES, R. A. **Cinemática Inversa para Controle da Abordagem de Órgãos Terminais de Robôs Manipuladores**, [S.I.], 2004;

APÊNDICE A – Código do Matlab Para Cálculo do Volume de Trabalho do Manipulador SCARA

```
% Definição do tamanho dos elos
armLength1 = 150; % mm
armLength2 = 150; % mm
% Definição do tamanho dos ângulos e deslocamento
theta1Range = [-pi/2, pi/2]; % radians
theta2Range = [-3*pi/4, 3*pi/4]; % radians
d3Range = [0, 200]; % mm
% Criação dos vetores de ângulos e deslocamentos
theta1 = theta1Range(1):deg2rad(1):theta1Range(2);
theta2 = theta2Range(1):deg2rad(1):theta2Range(2);
d3 = d3Range(1):1:d3Range(2);
% Inicialização das matrizes de coordenadas
x = zeros(length(theta1), length(theta2), length(d3));
y = zeros(length(theta1), length(theta2), length(d3));
z = zeros(length(theta1), length(theta2), length(d3));
% Loop de cálculos das coordenadas
for i = 1:length(theta1)
    for j = 1:length(theta2)
        for k = 1:length(d3)
            x(i,j,k) = armLength1*cos(theta1(i)) +
armLength2*cos(theta1(i)+theta2(j)) +
d3(k)*cos(theta1(i)+theta2(j));
            y(i,j,k) = armLength1*sin(theta1(i)) +
armLength2*sin(theta1(i)+theta2(j)) +
d3(k)*sin(theta1(i)+theta2(j));
            z(i,j,k) = d3(k);
        end
    end
end
% Plot do gráfico
figure;
plot(x(:), y(:), 'r', 'MarkerFaceColor', 'none',
'MarkerEdgeColor', 'r');
xlabel('X (mm)');
ylabel('Y (mm)');
title('Área de trabalho do Robô SCARA');
axis equal;
```

APÊNDICE B – Código do Matlab Para o Cálculo da Cinemática Inversa do Manipulador SCARA

```
% Definir os valores das distâncias entre eixos das juntas
a1 = 2;
a2 = 15;
a3 = 2;
a4 = 15;
a5 = 6;

% Iniciar os vetores para guardar os valores
t1_values = [];
t2_values = [];
d3_values = [];
x_values = [];
y_values = [];
z_values = [];

% Loop de valores de x e y, utilizando um espaço de
trabalho de 20cmX20cm que será suficiente para o objetivo
do braço robótico
for x = 5:0.5:25
    for y = -10:0.5:10
        % Equações encontradas para o cálculo da cinemática
        inversa
        %  $\theta = t$ ,  $\phi = f$ 
        f2 = atan2d(y,x);
        r1 = sqrt(y^2 + x^2);
        t2 = acosd((r1^2 - a2^2 - a4^2)/(2*a2*a4));
        t1 = atan2d(y,x) - acos((r1^2-a2^2-
a4^2)*(2*a2*a4));
        % Guardar os valores nos vetores
        t1_values = [t1_values; t1];
        t2_values = [t2_values; t2];
        x_values = [x_values; x];
        y_values = [y_values; y];
    end
end

% Loop de valores de Z
for z = 0:1:20
    d3 = a1 + a3 - a5 - z;

    d3_values = [d3_values; d3];
    z_values = [z_values, z];
end

% Plot t1
```

```
figure;
plot3(x_values, y_values, t1_values, 'r');
title('Valores de theta1');
xlabel('x');
ylabel('y');
zlabel('t1');

% Plot t2
figure;
plot3(x_values, y_values, t2_values, 'b');
title('Valores de theta2');
xlabel('x');
ylabel('y');
zlabel('t2');

% Plot d3
figure;
plot(d3_values, z_values, 'b');
title('Valores de d3');
xlabel('d3');
ylabel('z');
```