



Anais do XXXIV COBENGE. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, Setembro de 2006.
ISBN 85-7515-371-4

MODELAGEM CINEMÁTICA DE UM ROBÔ MANIPULADOR

João Carlos Sedraz Silva – joao.sedraz@univasf.edu.br

Universidade Federal do Vale do São Francisco, Colegiado de Engenharia Civil
Rodovia Juazeiro/Sobradinho s/n
CEP 48.900-000 – Juazeiro – Bahia

Marcelo Linder – marcelolinder@yahoo.com.br

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia
Rua Aristides Novis, 02, Escola Politécnica, Federação,
CEP: 40210-630 - Salvador – Bahia

Marcos A. da S. Irmão – marcos.silva@univasf.edu.br

Universidade Federal do Vale do São Francisco, Colegiado de Engenharia Mecânica
Rod. Juazeiro/Sobradinho s/n, Bairro Malhada da Areia, Caixa Postal 309,
CEP 58-900, Juazeiro, BA

Ricardo Perrone da Silva - perrone@rocketmail.com

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia
Rua Aristides Novis, 02, Escola Politécnica, Federação,
CEP: 40210-630 - Salvador - Bahia

Resumo: *A aplicação de robôs na indústria moderna está consolidada, e os benefícios provenientes disso, representam uma realidade irreversível. Existem diversos tipos de robôs, com custos, características e benefícios variados. Entretanto, na automação de processos industriais o tipo mais utilizado é o robô Manipulador. Sua utilização é direcionada à execução de tarefas específicas e com certo grau de risco, onde a precisão, eficiência e repetibilidade são características imprescindíveis. Por isso, o projeto de um robô manipulador requer uma análise criteriosa sobre os mais diversos fatores envolvidos no processo de automação. Neste artigo descrevemos uma aplicação prática dos conceitos de robótica utilizados no desenvolvimento de um protótipo de robô manipulador, considerando um modelo cinemático adotado. Este modelo permite descrever todos os seus movimentos a partir de um eixo referencial posicionado na base do robô (Modelo Cinemático Direto). A cadeia cinemática é composta por três juntas de rotação que permitem três graus de liberdade para execução da tarefa.*

Palavras-chave: *Robô Manipulador, Modelagem Cinemática, Automação, Controle.*

1. INTRODUÇÃO

A definição formal de um robô industrial enfrenta certas dificuldades devido à algumas diferenças conceituais adotadas por alguns mercados como: mercado asiático e mercado euro-americano. Para os japoneses, um robô é qualquer dispositivo mecânico dotado de articulações móveis destinadas à manipulação. Já o mercado ocidental é mais restritivo, exigindo um maior grau de complexidade, sobre tudo no que se refere a forma de controle adotada. A definição mais aceita é a empregada pela Associação Internacional de Robótica (RIA), segundo a qual: Um robô industrial é um manipulador multifuncional reprogramável, capaz de mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais, em trajetórias variáveis e programado para realizar tarefas diversas (BARRIENTOS, 1997).

Com respeito à estrutura, um robô é um sistema mecânico de geometria variada, composto por corpos rígidos, articulados entre si, destinado a sustentar, posicionar e orientar a ferramenta terminal (ROSÁRIO, 2005). Atualmente existem diversos tipos de robôs para a execução de diversas tarefas. A especialidade que o robô pode vir assumir, depende muito do tipo de atividade que ele irá desempenhar, e principalmente do ambiente em que ele estará inserido. Por exemplo, para os robôs que desempenham atividades de exploração, temos os modelos terrestres e aquáticos. Existem muitos outros tipos, mas para atender as finalidades deste artigo, estaremos nos concentrando apenas nos robôs manipuladores. Um robô manipulador é normalmente constituído por um conjunto de corpos rígidos ligados em série por intermédio de juntas rotativas ou prismáticas, formando uma cadeia cinemática aberta, onde uma das extremidades do manipulador encontra-se rigidamente ligada a uma base fixa, enquanto que a extremidade oposta suporta o efetuador que pode mover-se livremente no espaço (LOPES, 2001). Podemos também classificá-los segundo uma característica arbitrada, como: Mobilidade, Tipo de Atividade, Forma, etc. (GRAIG, 1989).

A aplicação de robôs na indústria moderna é uma realidade cada vez mais evidente. Diversos segmentos industriais têm feito uso de robôs em atividades como: Soldagem por resistência por pontos, manipulação de materiais/paletização, soldagem por arco, pintura, corte a jato de água, corte por gás, acabamento e montagem, etc. Podemos citar a indústria automobilística e petrolífera como os segmentos que mais investem em robótica. O crescimento do uso de robôs na indústria é hoje motivado, por um lado, pelo aumento do custo da mão-de-obra e, por outro, pela melhoria de produtividade, da qualidade, das condições de segurança e qualidade de vida que a utilização de robôs traz, sobretudo quando eles substituem o homem na realização de tarefas perigosas. Por fim, a queda no custo dos robôs também tem contribuído para a disseminação de seu uso (ROSÁRIO, 2005).

Neste trabalho, buscando apresentar uma aplicação prática e consolidar os conceitos envolvidos no estudo de manipuladores, serão descritas as etapas do processo de modelagem cinemática de um robô manipulador com três graus de liberdade.

O artigo está organizado na seguinte estrutura: Na seção *Notação de Denavit-Hartenberg*, é abordada a descrição cinemática de sistemas mecânicos articulados com n graus de liberdade, utilizando a notação de Denavit-Hartenberg (DENAVID, 1955). Em seguida, são apresentadas *Definições Envolvidas no Projeto de Manipuladores*. Por fim, na seção *Modelagem Cinemática*, são apresentadas as etapas do processo de modelagem cinemática de um manipulador com três graus de liberdade.

2. NOTAÇÃO DE DENAVIT-HARTENBERG

A evolução no tempo das coordenadas das juntas de um robô representa o modelo cinemático de um sistema articulado no espaço tridimensional. A notação de Denavit-

Hartenberg (DH) é uma ferramenta utilizada para sistematizar a descrição cinemática de sistemas mecânicos articulados com n graus de liberdade (DENAVID, 1955).

A representação DH de um elo rígido depende de quatro parâmetros a ele associados, os quais descrevem completamente o comportamento cinemático de uma junta prismática ou revoluta. Na Figura 1 são indicados os parâmetros para uma melhor visualização, conforme abaixo definidos (ROSÁRIO, 2005):

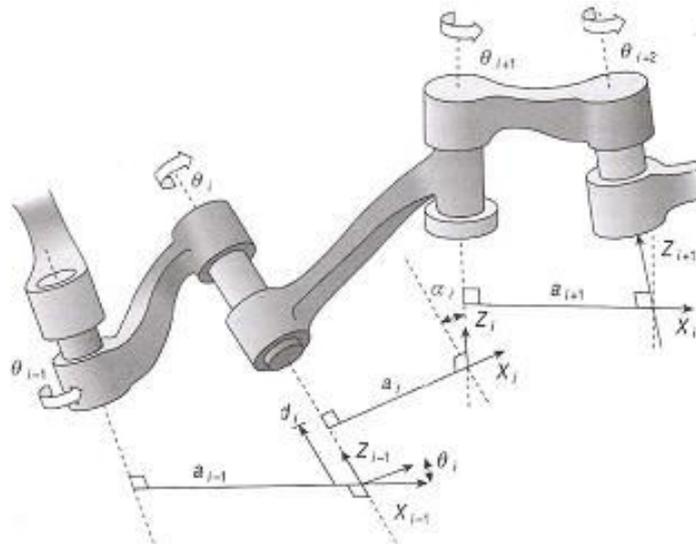


Figura 1- Notação – DH

- θ_i é o ângulo de junta obtido entre os eixos X_{i-1} e X_i no eixo Z_{i-1} (usando-se a regra da mão direita).
- d_i é a distância entre a origem do $(i-1)$ -ésimo sistema de coordenadas até a interseção do eixo Z_{i-1} com o eixo X_i ao longo do eixo Z_{i-1} .
- a_i é a distância (off-set) entre a interseção do eixo Z_{i-1} com o eixo X_i até a origem do i -ésimo sistema de referência ao longo do eixo X_i (ou a menor distância entre os eixos Z_{i-1} e Z_i).
- α_i é o ângulo (off-set) entre os eixos Z_{i-1} e Z_i medidos no eixo X_i (usando-se a regra da mão direita).

Para uma junta rotacional, d_i , a_i e α_i são os parâmetros da junta, cujo valor varia na rotação do elo i em relação ao elo $i-1$. Para uma junta prismática, θ_i , a_i e α_i são os parâmetros da junta, enquanto d_i é a variável de junta (deslocamento linear).

Com os sistemas de coordenada DH estabelecidos, uma matriz de transformação homogênea pode facilmente ser desenvolvida relacionando-se o i -ésimo ao $(i-1)$ -ésimo frame de coordenadas. Como demonstra a matriz abaixo.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \cdot \text{sen} \theta_i & \sin \alpha_i \cdot \text{sen} \theta_i & a_i \cdot \cos \theta_i \\ \text{sen} \theta_i & \cos \alpha_i \cdot \text{sen} \theta_i & -\text{sen} \alpha_i \cdot \cos \theta_i & a_i \cdot \text{sen} \theta_i \\ 0 & \text{sen} \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

3. DEFINIÇÕES ENVOLVIDAS NO PROJETO DE MANIPULADORES

3.1 Cadeia Cinemática

A estrutura de um robô manipulador consiste basicamente numa série de corpos rígidos, idealmente sem deformação pela ação de forças aplicadas sobre estes. Em geral são feitos de um material resistente como aço, e são denominados de elos. Esses elos podem ter diversos tamanhos e formas dependendo da aplicação, e são unidos por juntas que lhes permitem um movimento relativo entre si. Com isso, passamos a ter uma Cadeia Cinemática aberta composta por elos interligados por juntas (PAZOS, 2002).

O movimento da junta de um robô pode ser linear (prismático), permitindo um deslocamento em uma direção, ou rotacional (revolução), permitindo um deslocamento angular. O Movimento que um elo pode desempenhar em relação ao elo imediatamente anterior, é determinado pelo tipo de junta que os une. Logo, um movimento prismático em um elo somente pode ser obtido se o mesmo estiver fazendo uso de uma junta prismática. O mesmo se aplica para movimentos rotacionais, que devem fazer uso de uma junta de revolução. A combinação dos diversos tipos de elos com os diferentes tipos de juntas, seguem a conveniência da configuração de projeto estabelecida. Logo, as juntas determinam os movimentos possíveis do manipulador, e juntamente com as características físicas dos elos, como suas formas e tamanhos, determinam a anatomia do manipulador (PAZOS, 2002). E isso acaba por determinar os aspectos de mobilidade que influenciam no Espaço de Trabalho que o manipulador irá ter.

Para representar os movimentos de um elo com relação ao seu antecessor, são utilizadas grandezas físicas que identificam os ângulos das juntas(θ) e o comprimento dos elos(d). O estado dessas grandezas é suficiente para determinar a posição do efetuador (Modelo Cinemático Direto), pois, se for conhecida a posição de cada uma das juntas a partir da primeira, e os comprimentos dos elos, é possível conhecer a posição do efetuador. Como o estado das grandezas físicas (θ) podem variar dinamicamente, a depender do movimento executado, as mesmas são identificadas como variáveis e são conhecidas como Coordenadas Generalizadas (PAZOS, 2002). Cada um dos movimentos independentes que pode realizar uma articulação (junta | elo) em relação a anterior, é denominado de Grau de Liberdade (BARRIENTOS, 1997). Um manipulador típico possui 6 graus de liberdade, três para o posicionamento do efetuador dentro do espaço de trabalho, e três para obter uma orientação do efetuador adequada para segurar o objeto (PAZOS, 2002).

Em geral, os manipuladores estão montados sobre uma base fixa, à qual está fixado o primeiro elo através da primeira junta. Esta base pode estar montada sobre uma superfície também fixa, ou num veículo que lhe permita um deslocamento pelo local de trabalho.

O conceito de Cadeia Cinemática e outros discutidos neste artigo, são apresentados na disciplina Sistemas Robóticos oferecida pelo Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da UFBA. Como forma de facilitar a compreensão dos conceitos, foi desenvolvido pelos autores do presente artigo, alunos do referido programa, um protótipo concebido com uma estrutura composta por três juntas de revolução que possibilitam até três graus de liberdade. O eixo referencial foi estabelecido com uma altura de 9,3cm a partir de um plano fixado como base do manipulador. O primeiro elo, a partir do eixo referencial, possui comprimento de 19,1cm, enquanto que o segundo possui 19,3cm de comprimento. O efetuador foi posicionado no punho, com um comprimento de 3,7cm. Nas Figuras 2 e 3 são demonstrados detalhes da estrutura do protótipo e na Tabela 1 são relacionados os ângulos das juntas e o comprimento dos elos.

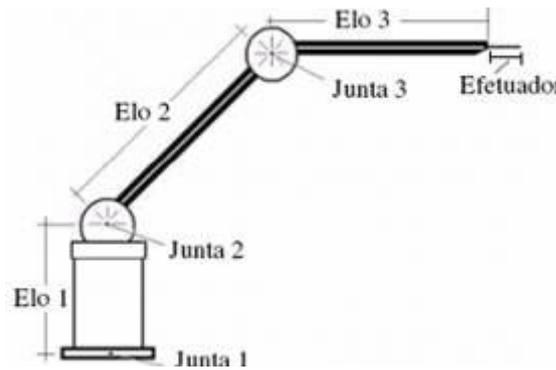


Figura 2- Detalhes da cadeia cinemática do protótipo.



Figura 3- Protótipo da cadeia cinemática do robô manipulador.

Tabela 1- Elementos da Cadeia Cinemática

ELEMENTO	RANGE	DIMENSÃO
Junta 1	0° / 90°	-----
Elo 1	-----	9,3 cm
Junta 2	0° / 90°	-----
Elo 2	-----	19,1 cm
Junta 3	-90° / 0°	-----
Elo 3	-----	19,3 cm
Efetuator	-----	3,7 cm

Como pode ser visto na Figura 3, os elos do manipulador foram constituídos por perfis de alumínio. Para a tomada das medidas dos parâmetros do manipulador e da posição final do efetuador, foi fixada uma folha de papel milimetrado na base do protótipo e uma escala em cada uma das juntas.

3.2 Espaço de Trabalho

O Espaço de Trabalho do manipulador é o termo que se refere ao espaço dentro do qual este pode movimentar o efetuador. É definido como o volume total conformado pelo percurso do extremo do último elo, o punho, quando o manipulador efetua todas as trajetórias possíveis (Pazos, 2002). Diante disso, o volume de trabalho depende da configuração geométrica do manipulador e das restrições físicas das juntas (limites mecânicos). Na Figura 4 é

representado o espaço de trabalho utilizado pelo protótipo, que pode ocupar até $\frac{1}{4}$ de volume esfera.

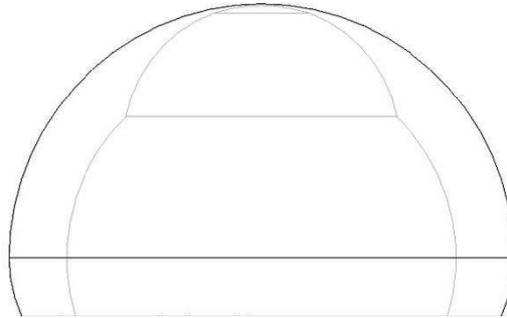


Figura 4- Espaço de Trabalho do protótipo.

3.3 Volume de Trabalho

Define a região do espaço onde existe uma probabilidade não nula de uma parte constituinte do manipulador ser encontrada. Essa região está representada na Figura 5.

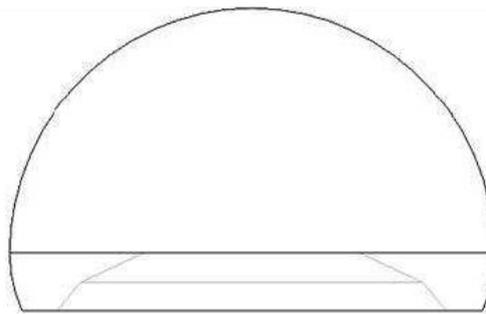


Figura 5- Volume de Trabalho do protótipo.

4. MODELAGEM CINEMÁTICA

A metodologia adotada para modelagem cinemática do protótipo, baseada na notação de Denavit-Hartenberg, permite descrever todos os movimentos do manipulador, gerado pelo movimento das juntas, a partir de um eixo referencial, posicionado na base do robô (Modelo Cinemático Direto). As etapas identificadas, no processo da modelagem realizada, foram:

Determinação dos parâmetros das juntas: Nesta etapa, foram levantados os parâmetros das juntas de acordo com a notação de Denavit-Hartenberg. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 2.

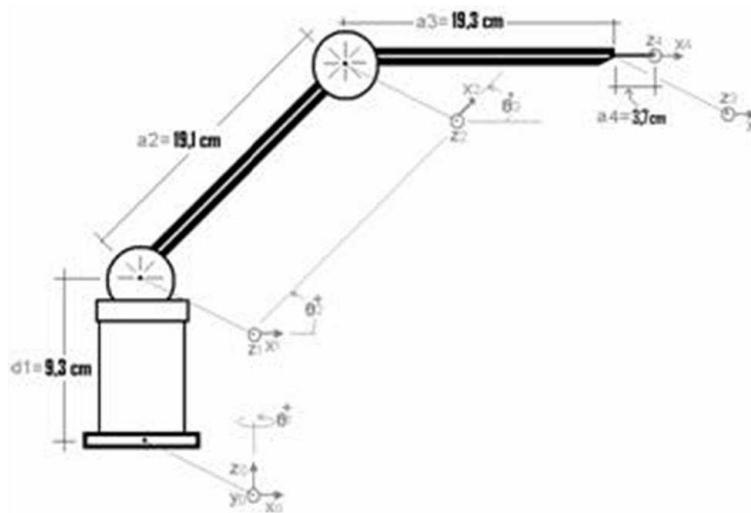


Figura 6- Cadeia cinemática com os parâmetros de Denavit-Hartenberg

Tabela 2- Parâmetros de D-H do protótipo.

JUNTA	θ_i (°)	α_i (°)	a_i (cm)	d_i (cm)	RANGER (°)
1	* φ_1	90	0,0	9,3	0 / 90
2	* φ_2	0	19,1	0,0	0 / 90
3	* φ_3	0	19,3	0,0	-90 / 0
4	0	0	3,7	0,0	-----

* Variáveis das Juntas.

Determinação das matrizes homogêneas parciais: A metodologia da notação de Denavit-Hartenberg permite estabelecer de maneira sistemática a relação (matriz de transformação homogênea) entre o i -ésimo e $(i-1)$ -ésimo sistema de coordenadas a partir da Equação 1. Aplicando os valores da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** foram obtidas as relações entre os sistemas de coordenadas, desde a base (*sistema 0*) até a extremidade do efetuador (*sistema 4*), como indicado nas equações 2, 3, 4 e 5.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 & \sin \varphi_1 & 0 \\ \sin \varphi_1 & -\cos \varphi_1 & -\cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9,3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 & 0 & 19,1 \cdot \cos \varphi_2 \\ \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & 0 & 19,1 \cdot \sin \varphi_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_3 & -\sin \varphi_3 & 0 & 19,3 \cdot \cos \varphi_3 \\ \sin \varphi_3 & \cos \varphi_3 & 0 & 19,3 \cdot \sin \varphi_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 3,7 \cdot \cos \varphi_4 \\ 0 & 1 & 0 & 3,7 \cdot \sin \varphi_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Determinação da matriz homogênea total: A matriz homogênea total (T) que relaciona o sistema de referência da base ao da extremidade do efetuador, foi obtida pelo produto de todas as matrizes ${}^{i-1}A_i$ (Equação 6).

$$T = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \cdot {}^3A_4 \quad (6)$$

Validação do modelo encontrado: Para validar a equação 6, foram estabelecidos valores para as variáveis das juntas e, por meio da matriz T obtida, foi determinada a posição (*valor teórico*) da extremidade da ferramenta. Com o auxílio do protótipo, verificamos se os resultados correspondiam à realidade (*valor medido*). Após revisões no modelo obtido na equação 6, para todos os casos os resultados teóricos foram equivalentes aos obtidos no protótipo. Na Tabela 3 apresentamos os resultados obtido quando o protótipo foi posicionado com $\varphi_1 = 45^\circ$, $\varphi_2 = 90^\circ$ e $\varphi_3 = -70^\circ$.

Tabela 3- Comparação entre os valores medidos no protótipo e os obtidos pela equação 6 ($\varphi_1 = 45^\circ$, $\varphi_2 = 90^\circ$ e $\varphi_3 = -70^\circ$)

	Valor Medido (cm)	Valores Teóricos (cm)	Erro relativo (%)
x	15,5	15,3	1,31
y	15,4	15,3	0,65
z	36,3	36,3	NULO

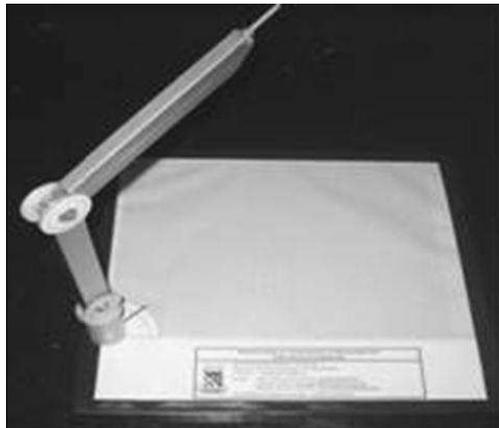


Figura 7- Protótipo com $\varphi_1 = 45^\circ$, $\varphi_2 = 90^\circ$ e $\varphi_3 = -70^\circ$.

Os valores medidos foram obtidos a partir do papel milimetrado fixado na base do protótipo e de um esquadro auxiliar para coletar a medida da extremidade do efetuador na direção z . Contrapondo os valores teóricos e os valores medidos no protótipo, podemos considerá-los iguais, tendo em vista os erros de medição, provenientes de folgas e ajustes das escalas.

5. CONCLUSÃO

A construção do protótipo e a validação do modelo cinemático, determinado a partir da notação de Denavit-Hartenberg, explicitou todos os problemas intrínsecos da aplicação prática da teoria, ajudando e consolidando o conhecimento dos parâmetros das juntas e conceitos teóricos de robótica, conseqüentemente, contribuindo para o estudo de modelagem cinemática de manipuladores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRIENTOS, A.; Penin, L. F. B. C. **Fundamentos de Robótica**, 1 edn, MacGraw Hill, 1997.

DENAVIT, J. **Description and displacement analysis of mechanics based on the 2x2 dual matrices**, 1 edn, University of Northwestern, Evanston, 1955.

GRAIG, J. J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**, 2 edn, Mac Graw Hill, 1989.

LOPES, A. M. **Robótica Industrial**, Universidade do Porto, 2001.

PAZOS, F. **Sistema e Robótica**, 1edn, Axcel Books, 2002.

ROSÁRIO, J. M. **Princípios de Mecatrônica**, 1 edn, Prentice Hall, 2005.

KINEMATIC MODEL OF THE A ROBOT MANIPULATORS

Abstract: *The application of robots in the modern industry is consolidate and the benefits emerging from this, represents an irreversible reality. There are several kinds of robots with different costs, characteristics and benefits. But on industrial processes automation the Manipulator robot is more used and is directed to the execution of specific tasks and with a certain degree of risk, where the precision, efficiency and repeatability are essential characteristics. Therefore, the project of a manipulator robot requires a rigorous analysis due to several factors involved in automation process. In this article we describe a practical application of the robotics' concepts used on development of one Manipulator robot prototype, considering a kinematics model adopted. This model allows describing all its movements from a reference axle located in the robot's base (Direct Kinematics Model). The kinematic chain is composed by three rotation links that allows three freedom degrees for task execution.*

Keywords: *Manipulator Robot, Kinematic Model, Automation, Control.*