

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BRAZO MECÁNICO DE TRES GRADOS DE LIBERTAD

Design and construction of a three degrees of freedom mechanical arm

RESUMEN

En este artículo se presenta la metodología empleada para el diseño y la construcción de un robot de tres grados de libertad con configuración angular, cuyos movimientos son definidos por medio de un algoritmo de control desarrollado en el entorno de MATLAB, e impulsados por medio de dos motores paso a paso y un cilindro neumático de doble efecto. Se ha seleccionado el poliuretano de alta densidad como material constructivo del dispositivo, como consecuencia de la versatilidad de sus propiedades mecánicas. Adicionalmente, se expone el análisis cinemático realizado así como también el estudio de la matriz jacobiana asociada al robot.

PALABRAS CLAVES: grados de libertad, configuración angular, poliuretano de alta densidad, análisis cinemático, matriz jacobiana.

ABSTRACT

In this article is presented the methodology used in the design and construction of a three degrees of freedom robot with angular configuration, whose displacements are defined by an control algorithm developed under MATLAB software, and driven by two steppers and one double effect pneumatic cylinder. High density polyurethane has been selected as construction's material for the device, as a result of the versatility of its mechanical properties. Additionally, is exposed the kinematic analysis as well as the jacobian matrix study associated with the manipulator.

KEYWORDS: *degrees of freedom, angular configuration, high density polyurethane, kinematic analysis, jacobian matrix.*

1. INTRODUCCIÓN.

Un robot es una máquina multifuncional y reprogramable, diseñada para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, o bien levantar cargas mediante movimientos programados, variables y controlados. El control de un brazo mecánico puede realizarse a través de un lazo cerrado por medio de sensores, que registran constantemente la posición y permiten tomar una decisión en función de dicha información. No obstante, en multitud de aplicaciones el control se puede realizar desde un ordenador, para ello se precisa de un lenguaje de programación específico con el cual se desarrolla el software al que responderá la máquina; tal lenguaje se compone de instrucciones a las que responde el manipulador. A este tipo de control se le conoce como textual [1], y necesita de la intervención de un operario mediante el empleo del citado ordenador.

Las fuentes de movimiento propician los desplazamientos realizados por el brazo mecánico. Una de las más usadas viene representada por el motor eléctrico, el cual convierte la energía eléctrica en energía mecánica rotacional, que se utiliza para darle movimiento a los medios de locomoción. Los más utilizados en la robótica,

JESÚS OTERO YUGAT

Ingeniero Mecánico
Doctorando
Universidad Politécnica de Cataluña
jesus.otero-yugat@upc.edu

SAGID ENRIQUE RODRÍGUEZ

Ingeniero Mecánico
Ingeniero de Proyectos
NEGROVEN S.A.
sagidenrique@hotmail.com

JOSÉ JAVIER GUTIÉRREZ

Ingeniero Mecánico
Profesor Asistente
Universidad de Carabobo
jgutierrez@uc.edu.ve

son los motores de corriente continua, los servomotores y los motores paso a paso. Sin embargo, también son usadas aquellas máquinas motrices de índole neumática que se emplean para controlar movimientos rápidos derivados de aire comprimido como fuente de energía; o bien actuadores hidráulicos empleados cuando se requiere una gran capacidad de carga junto con una precisa regulación de velocidad. Por otra parte, la transmisión de movimiento viene representada por un arreglo que adecúa la potencia suministrada por las fuentes, a la potencia requerida por el robot para la ejecución de sus movimientos. Para el caso del dispositivo diseñado, se ha utilizado un sistema de transmisión por engranajes y cadenas.

Finalmente, el brazo mecánico posee una forma física constituida a través de una configuración angular, la cual abarca un mayor volumen de trabajo y presenta una articulación con movimiento rotacional impulsada por el actuador neumático y dos angulares gobernadas a través de los motores paso a paso, de esta forma el brazo articulado puede realizar el movimiento conocido como interpolación lineal, para lo cual requiere mover simultáneamente dos o tres de sus articulaciones, siendo

el movimiento natural el de interpolación por articulación, tanto rotacional como angular.

2. DISEÑO ESTRUCTURAL.

Partiendo de la premisa de optimizar y facilitar el proceso constructivo del manipulador, se ha seleccionado como material constitutivo el poliuretano de alta densidad, que posee una resistencia mecánica adecuada para las condiciones de trabajo del robot, sencilla maquinabilidad, una densidad menor comparada con el aluminio o el acero lo cual permite reducir el peso de la estructura, además de que es autolubricante por lo que presenta un bajo coeficiente de fricción, reduciendo así la presencia de cualquier carga que pueda ocasionar esfuerzos adicionales en los actuadores generadores de potencia que posee el manipulador. La tabla 1 muestra las propiedades mecánicas más importantes del material.

| | |
|---|------|
| Esfuerzo de resistencia última a la tracción (S_{Ut}) [MPa] | 60 |
| Esfuerzo de resistencia última a la compresión (S_{Uc}) [MPa] | 68.9 |
| Densidad (ρ) [kg/m³] | 1220 |
| Coefficiente de fricción | 0.19 |

Tabla 1. Propiedades del poliuretano de alta densidad.

Adicionalmente, la figura 1 muestra la configuración del brazo mecánico. Se observa que la base incorpora un conjunto de esferas rígidas que simulan las funciones de un rodamiento rígido de bolas, de esta forma la estructura inferior es capaz de soportar el estado dinámico de cargas producido durante el funcionamiento, facilitando además el movimiento rotacional de la misma motivado por medio del cilindro neumático de doble efecto.

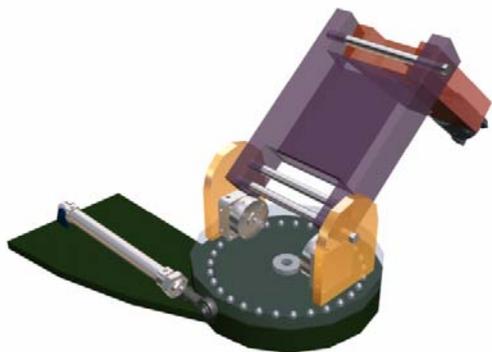


Figura 1. Esquemización del manipulador.

2.1. Análisis de esfuerzos.

Utilizando la metodología de análisis por elementos finitos, se ha determinado el estado de esfuerzos existente en el manipulador durante las condiciones normales de funcionamiento. Para el análisis de dicho estado y de las fallas derivadas del mismo, se ha empleado la Teoría de Mohr Modificada, en virtud de que la estructura es

severamente anisotrópica como consecuencia del proceso de vaciado del poliuretano. El análisis por elementos finitos permitió determinar los tres esfuerzos normales además de los esfuerzos cortantes, en cada uno de los eslabones que constituyen el brazo mecánico desarrollado ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$). La figura 2 esboza el estado de esfuerzos normales σ_x ; se observa que los caballetes de la base constituyen la sección más crítica.

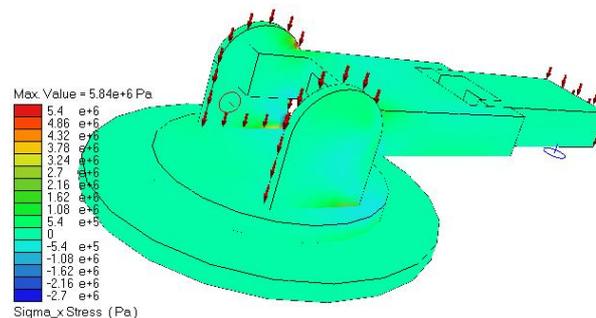


Figura 2. Estado de esfuerzos normales en el manipulador.

Para determinar el factor de seguridad del dispositivo, se ha examinado el estado dinámico de la sección más esforzada, representada por los mencionados caballetes de la base que sujetan las articulaciones que efectúan desplazamientos angulares, tales caballetes se encuentran identificados por medio de las piezas color amarillo de la figura 1. A partir de este estado de esfuerzos, se han calculado los esfuerzos principales σ_i y el esfuerzo cortante máximo τ_{max} según las expresiones:

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \tag{1}$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} + \tau_{max}; \quad \sigma_2 = 0; \quad \sigma_3 = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} - \tau_{max} \tag{2}$$

Para aplicar la mencionada teoría, se han utilizado las formulaciones para calcular el esfuerzo efectivo desarrolladas por [2], las cuales permiten comparar los esfuerzos C_i aplicados respecto a los esfuerzos normales, donde los primeros se obtienen a partir de las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{2} \left(|\sigma_1 - \sigma_2| + \frac{S_{Uc} + 2S_{Ut}}{S_{Uc}} (\sigma_1 + \sigma_2) \right) \\ C_2 &= \frac{1}{2} \left(|\sigma_2 - \sigma_3| + \frac{S_{Uc} + 2S_{Ut}}{S_{Uc}} (\sigma_2 + \sigma_3) \right) \\ C_3 &= \frac{1}{2} \left(|\sigma_3 - \sigma_1| + \frac{S_{Uc} + 2S_{Ut}}{S_{Uc}} (\sigma_1 + \sigma_3) \right) \end{aligned} \tag{3}$$

El mayor valor de la comparación entre los tres esfuerzos aplicados más los tres esfuerzos principales, permite definir el esfuerzo efectivo aplicado sobre el caballete del manipulador, atendiendo a la ecuación 4.

$$\tilde{\sigma} = \begin{cases} \text{MAX}(C_1, C_2, C_3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3); & \text{MAX} \geq 0 \\ 0; & \text{MAX} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Este esfuerzo efectivo de Mohr modificado, se puede equiparar con la resistencia máxima a tensión del poliuretano de alta densidad, con la finalidad de hallar el factor de seguridad N .

$$N = \frac{S_{Ut}}{\tilde{\sigma}} \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que el robot se ha diseñado para unas condiciones de carga de 5 kg, el factor de seguridad presente en el caballete de la base rotatoria es igual a 2.09, el cual es suficiente e indica que el modelo teórico representa el sistema manipulador con precisión.

2.2. Diseño de los ejes de transmisión de potencia.

Según lo apreciado en la figura 1, el brazo mecánico posee un total de tres ejes, dos de ellos se encuentran ubicados en el eslabón angular intermedio y uno en el eslabón angular final, siendo el más esforzado uno de los ejes que se encuentra en el primer eslabón citado ya que este se vincula con uno de los motores paso a paso y se encarga del movimiento del eslabón angular intermedio. Al ser este eje el más crítico, se puede afirmar que con el diseño de este se asegura que los dos ejes restantes cumplan con las condiciones operativas del robot.

Existe un reductor de engranajes cilíndricos rectos que recibe la potencia del motor paso a paso, por lo que se tiene una carga axial nula sobre el eje. Por otro lado, el eje recibe una fuerza radial representada por la carga máxima que el manipulador puede levantar, junto al peso propio del mismo; carga que se distribuye uniformemente en sus dos apoyos. Además, existe un momento torsor equivalente a dividido en cada apoyo. Dado que el material del eje un acero dúctil y que está sometido a un estado constante de fatiga, se ha usado el Criterio de Goodman Modificado [3], para calcular el diámetro mínimo que ha de tener el eje ante las condiciones dinámicas de trabajo en el manipulador. La ecuación 6 permite describir la teoría empleada.

$$\frac{\sigma_a}{S_{eje}} + \frac{\sigma_m}{S_{Ut\ eje}} = \frac{1}{N_{eje}} \quad (6)$$

siendo N_{eje} el factor de seguridad del eje, σ_a el esfuerzo alternante, σ_m el esfuerzo medio, S_{eje} la resistencia a la fatiga corregida y $S_{Ut\ eje}$ la resistencia última a la tracción del acero. Cabe destacar que al no existir cargas axiales el esfuerzo medio es nulo, sin embargo el esfuerzo alternante se obtiene a partir de la ecuación 7.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad \sigma_{\max} = \frac{Mc}{I} + \frac{P}{A}; \quad \sigma_{\min} = -\frac{Mc}{I} + \frac{P}{A} \quad (7)$$

donde c es la distancia existente entre la fibra más alejada y el eje neutro representada en este caso por el radio del eje, I la inercia del eje, A el área del mismo, M el momento aplicado y P la carga existente. Por su parte, la resistencia a la fatiga corregida se determina a partir de la hipótesis de una vida suficientemente infinita, lo cual lleva a la expresión:

$$S_{eje} = 0.504 \cdot S_{Ut\ eje} \cdot k \quad (8)$$

siendo k un parámetro que permite tomar en cuenta las condiciones operativas del eje del manipulador, abarcando su acabado superficial, las condiciones de carga, de temperatura, de corrosión por apriete y de concentración de esfuerzos. Considerando un factor de seguridad conservador en el eje igual a 2, se ha podido concluir que el diámetro mínimo y óptimo del eje más esforzado es igual a 25 mm, dimensión razonable y adecuada para la geometría del manipulador.

3. ANÁLISIS CINEMÁTICO.

El estudio de la cinemática del manipulador, se ha basado en un análisis del movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia, para ello se ha descrito analíticamente el robot como una función del tiempo, además de definir las relaciones entre la posición y orientación del extremo del manipulador, para establecer la localización del mismo y los valores de sus coordenadas articulares. Para ello se han utilizado en este análisis tres modelizaciones distintas: el modelo cinemático directo, el modelo cinemático inverso y el modelo diferencial.

3.1. Análisis cinemático directo.

A través de este estudio se ha concretado la dinámica que describe la posición y orientación del extremo del manipulador, con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot.

Se ha considerado al manipulador como una cadena cinemática formada por objetos rígidos o eslabones unidos entre sí mediante articulaciones, estableciendo un sistema de referencia fijo situado en el eslabón inferior o base del manipulador, con el objetivo de describir la localización de cada uno de los eslabones generadores de los tres movimientos que posee el robot respecto a dicho sistema de referencia. De esta manera, el problema cinemático directo se ha reducido a la definición de una matriz homogénea de transformación T , la cual viene en función de las coordenadas articulares. Para poder obtener dicha matriz, se ha desarrollado el algoritmo de Denavit-Hartenberg [4], el cual no es más que una aplicación matricial que permite definir las relaciones cinemáticas existentes entre dos eslabones adyacentes, para ello se realizan una serie de transformaciones

secuenciales, donde el extremo del brazo puede ser transformado de manera tal que sus coordenadas se puedan expresar en coordenadas de la base del robot o eslabón fijo. La figura 3 permite esbozar la disposición de los ejes en cada una de las articulaciones del manipulador.

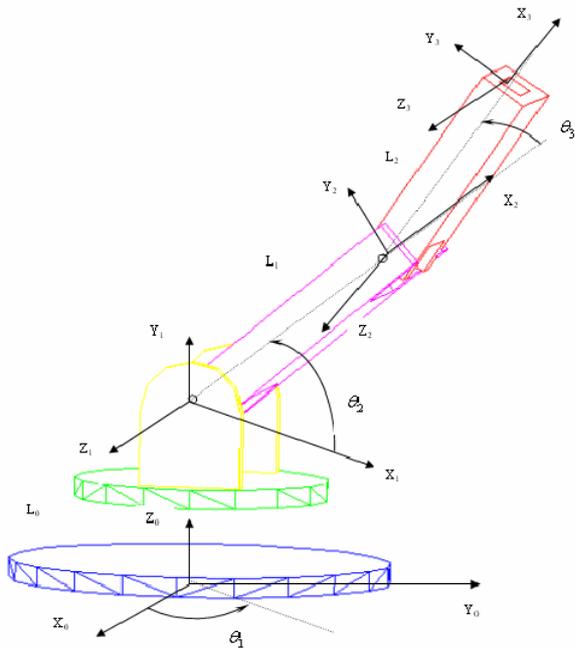


Figura 3. Representación de los ejes en las articulaciones del manipulador.

Se observa que cada eje z_i está ubicado sobre la articulación $i+1$, además de que se ha situado el origen del sistema del eslabón fijo S_0 en cualquier punto del eje z_0 , mientras que los ejes x_0 e y_0 se han ubicado de manera tal que han formado un sistema dextrógiro con z_0 . Adicionalmente se ha definido θ_i como el ángulo que se debe girar en torno a z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos. La distancia d_i es aquella medida a lo largo del eje z_{i-1} , necesaria para desplazar el sistema S_{i-1} con la finalidad de que los ejes x_{i-1} y x_i queden alineados. Finalmente, α_i es el ángulo que gira el eje z_{i-1} para alinearse con el eje z_i alrededor de x_i . Basándose en las definiciones previas, la matriz homogénea de transformación se describe atendiendo a lo especificado en la ecuación 9.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

De acuerdo a las generalizaciones anteriores, los parámetros requeridos para el desarrollo del algoritmo de Denavit-Hartenberg, se han especificado en la tabla 2, donde L_0 , L_1 y L_2 representan las distancias físicas del manipulador.

| Eje | θ_i | α_i | a_i | d_i |
|-----|------------|------------|-------|-------|
| 1 | θ_1 | 90° | 0 | L_0 |
| 2 | θ_2 | 0 | L_1 | 0 |
| 3 | θ_3 | 0 | L_2 | 0 |

Tabla 2. Parámetros del algoritmo de Denavit-Hartenberg.

Por consiguiente, la matriz de transformación resultante entre el extremo del manipulador y la base fija, así como también las ternas ortonormales n , o y a , y el vector de posición P_i asociado a dicho extremo, son respectivamente:

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & -C_1 S_{23} & S_1 & L_1 C_1 C_2 + L_2 C_1 C_{23} \\ S_1 C_{23} & -S_1 S_{23} & -C_1 & L_1 S_1 C_2 + L_2 S_1 C_{23} \\ S_{23} & C_{23} & 0 & L_0 + L_1 S_2 + L_2 S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$n = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} \\ S_1 C_{23} \\ S_{23} \end{bmatrix}; \quad o = \begin{bmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_1 S_{23} \\ -S_1 S_{23} \\ C_{23} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$a = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ -C_1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad P_i = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 C_1 C_2 + L_2 C_1 C_{23} \\ L_1 S_1 C_2 + L_2 S_1 C_{23} \\ L_0 + L_1 S_2 + L_2 S_{23} \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.2. Análisis cinemático inverso.

El objetivo alcanzado mediante el estudio cinemático inverso, ha permitido formular expresiones que permiten determinar los valores adoptados por las coordenadas articulares del manipulador, para que su extremo se posicione y se oriente según una determinada localización espacial. Para ello se ha utilizado una resolución no sistemática, ya que la misma depende de la configuración del robot y en consecuencia pueden existir múltiples soluciones, por lo que se ha planteado una solución cerrada basada en relaciones geométricas. Analizando la matriz de transformación homogénea representada en la ecuación 10, se puede deducir que la determinación de la coordenada generalizada θ_1 , obedece a la expresión:

$$\theta_1 = \arctan 2 \left(\frac{n_y}{n_x} \right) \quad (13)$$

Las expresiones asociadas a las coordenadas generalizadas θ_2 y θ_3 se han hallado a partir de las características dimensionales del manipulador, según lo vislumbrado en la Figura 4.

$$\theta_2 = \arctan 2 \left(\frac{P_y}{\pm \sqrt{P_x^2 + P_z^2}} \right) - \arctan 2 \left(\frac{L_2 \sin \theta_3}{L_1 + L_2 \cos \theta_3} \right) \quad (14)$$

$$\theta_3 = \pm \arccos \left[\frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2} \right] \quad (15)$$

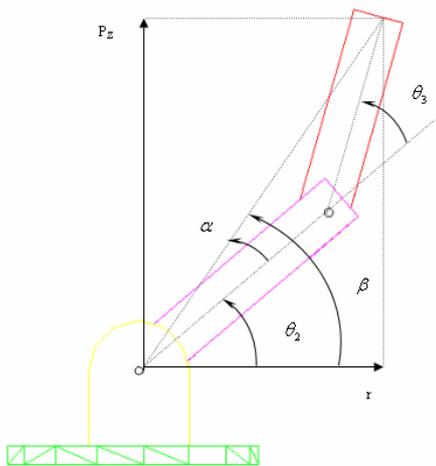


Figura 4. Representación de las coordenadas generalizadas para el análisis cinemático inverso.

3.3. Modelado diferencial.

La tercera modelización del análisis cinemático comprende la obtención de la matriz jacobiana J_L . El jacobiano del manipulador representa la relación infinitesimal entre los desplazamientos del extremo del mismo y los desplazamientos de las uniones, y depende exclusivamente de su geometría y de su configuración angular. La ecuación 16 muestra la expresión utilizada para determinar la citada matriz, mientras que la ecuación 17 concretiza el resultado asociado:

$$J_L = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_x}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial P_y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial P_z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_z}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$J_L = \begin{bmatrix} -L_1 S_1 C_2 - L_2 S_1 C_{23} & -L_1 C_1 S_2 + L_2 C_1 S_{23} & -L_2 C_1 S_{23} \\ L_1 C_1 C_2 + L_2 C_1 C_{23} & -L_1 S_1 S_2 - L_2 S_1 S_{23} & -L_2 S_1 S_{23} \\ 0 & L_1 C_2 + L_2 C_{23} & L_2 C_{23} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Por medio de esta matriz ha sido posible concretar la aportación a la traslación del extremo del robot, a través de su inclusión en el algoritmo de control elaborado.

4. SISTEMA DE CONTROL.

4.1. Interfaz electrónica de control.

El control del brazo mecánico es asistido por medio de un ordenador, a través del cual el usuario especifica las coordenadas del punto destino asociado al extremo del robot. Esto se lleva a cabo por medio de la interfaz de control conformada por dispositivos de electrónica de potencia, mostrada en la figura 5 [5].



Figura 5. Dispositivos electrónicos usados para el control.

La tarjeta de control con puerto paralelo representa el canal de comunicaciones existente entre el manipulador y el usuario. Para ello se ha utilizado el conector DB25 del ordenador, que permite la emisión de las coordenadas de desplazamiento por medio de ocho líneas de información. Por otro lado, las líneas de control del conector se encargan de enviar y recibir información desde y hacia el computador; proceso regulado por un demultiplexer MC54/74HC154, que toma la información de una o más entradas del puerto paralelo y selecciona cuál de las múltiples salidas recibirá la señal de entrada.

La tarjeta Darlington convierte las señales electrónicas provenientes de la tarjeta con el puerto paralelo, en señales de potencia que activan los dos motores paso a paso que gobiernan los movimientos angulares del manipulador. Esto se realiza gracias a la acción de ocho transistores Darlington TIP 121 conectados con una lógica negativa NPN, dos para cada bobina de los motores que operan a una tensión de 12 V. Se emplea además, un noveno transistor para el manejo de la electroválvula del cilindro neumático, y tres latches 74HC573 de memoria, con la capacidad de conectarse o desconectarse a través de una impedancia, permitiendo generar una secuencia de conmutación para los motores paso a paso.

Se han utilizado dos tarjetas para la alimentación. La primera de ellas suministra energía a la tarjeta de control con puerto paralelo a una tensión nominal de 5 V. Su rectificador permite convertir la señal de corriente alterna entregada por un transformador a 24 V, en una señal de corriente continua, mientras que los reguladores de tensión, se encargan de tomar la tensión continua de entrada y mantener su salida en un valor constante. La segunda tarjeta de alimentación cumple con la función de suministrar la energía requerida por la electroválvula para lograr así su conmutación. Existe una etapa de rizado de la tensión continua para que la misma sea más estable, representada mediante un filtro constituido por un condensador en paralelo con una carga RL.

Con el propósito de adaptar esta interfaz de control a cualquier computador, de manera independiente a su

modelo o antigüedad, se ha realizado un circuito auxiliar para prever las diferencias presentes en la tensión nominal de funcionamiento de los ordenadores, donde los equipos recientes funcionan a una tensión de 5 V, mientras que modelos más antiguos lo hacen a 3.8 V. Dicho circuito está formado por un condensador electrolítico, una resistencia variable y un trimer LM317 que regula la tensión deseada.

4.2. Algoritmo de control.

La ejecución de los movimientos realizados por el manipulador, depende de las órdenes dictadas por el usuario en un programa de control realizado en MATLAB [6] y presentado en la figura 6.

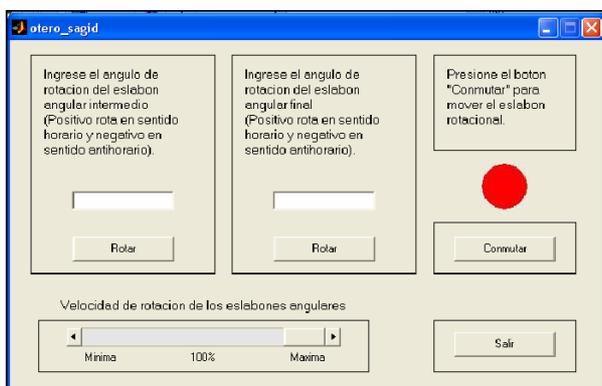


Figura 6. Ventana de control del manipulador.

Por medio de los botones de rotación se regula la ejecución de los dos movimientos angulares del manipulador, enviando una señal de gobierno hacia los motores paso a paso, a través de la interfaz electrónica. El algoritmo es capaz de determinar las coordenadas del extremo partiendo de la posición inicial, mediante el empleo de las expresiones derivadas del análisis cinemático. Si la configuración propuesta no es físicamente posible, el programa emitirá una advertencia de tal situación. Por otra parte, la barra de desplazamiento permite ralentizar o acelerar el avance angular de los motores; si dicha barra se encuentra en su nivel máximo, el programa enviará una secuencia de gobierno a una mayor frecuencia, excitando las bobinas de los motores a una mayor rapidez, provocando un consecuente aumento de la velocidad angular de sus ejes.

Por último, existe un botón independiente que permite conmutar la electroválvula que regula el cilindro neumático de doble efecto, el cual permite la rotación de la base del manipulador.

5. CONCLUSIONES.

El poliuretano de alta densidad seleccionado para la estructura del manipulador, presenta propiedades mecánicas que facilitan la elaboración de las condiciones de trabajo para las cuales ha sido diseñado, además de ser

lo suficientemente adecuado para el estado de esfuerzos presente durante el desarrollo de tales condiciones; lo cual hace de este material un apropiado sustituto de diversas aleaciones de acero y de aluminio.

El análisis cinemático realizado permitió establecer parámetros necesarios como el vector de posición del extremo del manipulador y las relaciones de velocidades existentes en las articulaciones del mismo, para así diseñar el sistema de control por ordenador.

El manipulador elaborado establece las bases para próximos campos de investigación, con la finalidad de extender su utilización hacia áreas más especializadas, al incluir sistemas de procesamiento de imágenes, de reconocimiento de posición y de movilidad más avanzados.



Figura 7. Disposición constructiva del manipulador.

6. AGRADECIMIENTOS.

Este proyecto de investigación se llevó parcialmente a cabo gracias a la ayuda y asesoría técnica prestada por la empresa Polissistemas UDS de Venezuela, en la manufactura y construcción del brazo mecánico.

7. REFERENCIAS.

- [1] ANGULO, J., ANGULO, I., ROMERO, S. Introducción a la robótica. Thompson Paraninfo, 2005. Madrid.
- [2] DOWLING, N.E. Mechanical behavior of materials. Prentice Hall: Englewood Cliffs, 1993.
- [3] NORTON, R.L. Diseño de máquinas. Prentice Hall, 1999. México.
- [4] BARRIENTOS, A., PEÑÍN, L.F, BALAGUER, C. Fundamentos de robótica. McGraw-Hill, 1997. Madrid.
- [5] LUPÓN, E. Electrónica. Edicions UPC, 2004. Barcelona.
- [6] MATLAB. Release Notes. MathWorks Corporation.