

**DISEÑO, CONSTRUCCION Y CONTROL DE UN BRAZO ARTICULADO  
USANDO I.A.**

**JUAN CARLOS VILLAMIZAR RINCON**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA ELECTRONICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
MAESTRIA EN POTENCIA ELECTRICA  
BUCARAMANGA  
2002**

**DISEÑO, CONSTRUCCION Y CONTROL DE UN BRAZO ARTICULADO  
USANDO I.A.**

**JUAN CARLOS VILLAMIZAR RINCON**

**Investigación para optar el título de magíster en potencia eléctrica**

**Director  
PH. D. OSCAR GUALDRON**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA ELECTRONICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
MAESTRIA EN POTENCIA ELECTRICA  
BUCARAMANGA  
2002**

## DEDICATORIA

---

A mis padres, por su primer granito de arena para  
iniciar este peldaño en mi vida.

A mi esposa y mi hijo, por haber confiado en mi

A la Universidad Industrial de Santander,

Por la formación recibida.

A la Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga

Por haberme facilitado el estudio de la maestría.

## **DEDICATORIA**

---

A mi director de tesis por haberme ayudado en los momentos difíciles.

A mi esposa e hijo.

A mis padres.

## CONTENIDO

1	FENÓMENOS MECÁNICOS.....	14
1.1	MOVIMIENTO LINEAL O DE TRASLACION.....	14
1.1.1	ACELERACIÓN DE CUERPOS.....	14
1.1.2	FRICCIÓN.....	15
1.2	movimiento de rotación.....	16
1.2.1	momentos de inercia.....	17
1.2.2	teorema de los ejes paralelos.....	17
1.3	RADIO DE GIRO.....	18
1.4	CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....	18
1.5	ELEMENTOS MECANICOS.....	19
1.5.1	CORREAS, CABLES Y CADENAS.....	20
1.6	TRENES DE ENGRANAJES IDEALES.....	25
1.7	PROBLEMAS CON ENGRANAJES UTILIZADOS EN ROBÓTICA:.....	28
1.7.1	eficiencia.....	28
1.7.2	excentricidad.....	29
1.7.3	desalineamiento.....	29
1.7.4	error entre dientes.....	29
1.7.5	vibraciones.....	29
1.8	CONSTRUCCIÓN MECÁNICA.....	30
1.8.1	diseño de la pinza o grip.....	31
1.8.2	diseño y vista del antebrazo.....	31
1.8.3	diseño del brazo.....	32
1.8.4	base del robot.....	33
1.9	CALCULO DE TORQUES.....	33
2	GENERALIDADES DEL MOTOR DE C.C.....	37
2.1	MODELO EN BLOQUES DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA.....	37
2.2	ARRANQUE DE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA.....	40
2.2.1	arranque por límite de tiempo.....	41
2.2.2	arranque por límite de corriente.....	42
2.3	FRENADO DE MOTORES DE CORRIENTE COTINUA.....	42
2.3.1	frenado natural.....	42
2.3.2	frenado a contracorriente.....	43
2.3.3	frenado reostatico.....	43
2.3.4	frenado con control de velocidad o regenerativo.....	43
2.4	CONTROL DE VELOCIDAD.....	44
2.4.1	control de velocidad por medios continuos.....	44
2.4.2	control de velocidad por pwm.....	44
2.5	INVERSIÓN DE GIRO DE LOS MOTORES DE C.C.....	45
2.6	DRIVER DE LOS MOTORES DE C.C.....	45
2.6.1	circuito en t.....	45
2.6.2	circuito en h.....	46

2.7	PRINCIPALES CARACTERISTICAS DEL MOTOR DE CORRIENTE	
	CONTINUA.....	47
2.8	ZONAS DE OPERACIÓN DEL MOTOR DE C.C. ....	49
2.9	RAMPA DE ACELERACIÓN.....	50
2.10	SELECCIÓN DE LOS MOTORES UTILIZADOS EN ROBÓTICA. ....	53
2.10.1	calculo del torque máximo y pico. ....	54
2.10.2	calculo de la corriente pico. ....	55
2.10.3	calculo de la temperatura de la armadura.....	55
2.10.4	requerimentos de la tension pico de la fuente. ....	56
2.11	CALCULO DE LOS MOTORES.....	56
2.12	CALCULO DEL CIRCUITO EN H PARA MANEJAR LOS MOTORES.....	59
2.13	CALCULO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA LOS MOTORES. ..	61
3	CONFIGURACIÓN DEL HARDWARE Y EL SOFTWARE DE BAJO NIVEL .	63
3.1	DIAGRAMA DE BLOQUES.....	63
3.2	SUBROUTINAS DEL MICROCONTROLADOR. ....	66
4	SUBROUTINAS IMPLEMENTADAS EN MATLAB PARA EL MANEJO DEL	
	BRAZO. ....	70
4.1	INTERFAZ PARA MANEJAR LOS MOTORES. ....	72
5	POSICIONAMIENTO DE LOS MOTORES DE D.C. ....	74
5.1.1	el controlador pid convencional.....	74
5.2	RED NEURONAL TIPO ADALINE. ....	76
5.2.1	simulación del control de posición usando pi mas término de polarización.....	77
5.2.2	simulación del control de posición usando una red adaline.....	78
5.2.3	obtención de los parámetros de la red neuronal.....	78
5.2.4	emulación de los parámetros de la red adaline.....	78
5.2.5	desempeño de la red neuronal implementada en el microcontrolador.....	79
6	ENTRENAMEINTO DE LAS REDES NEURONALES. ....	81
6.1	TRATAMIENTO MATEMATICO DEL BRAZO .....	81
6.2	TRATAMIENTO DEL BRAZO REAL DE FORMA AISLADA .....	84
6.2.1	entrenamiento de la red que maneja la pinza .....	84
6.2.2	entrenamiento de la red que maneja la muñeca del brazo.....	86
6.2.3	entrenamiento de la red que maneja la muñeca del brazo.....	86
6.2.4	entrenamiento de la red que maneja el brazo.....	87
6.2.5	entrenamiento de la red que maneja la base del brazo.....	89
6.2.6	resultados otenidos.....	90
6.3	TRATAMIENTO DEL BRAZO REAL DE FORMA AISLADA .....	90
6.4	AREA DE TRABAJO. ....	92
6.5	CINEMÁTICA DIRECTA E INVERSA DEL BRAZO. ....	92
6.6	MEDICION DEL DESEMPEÑO DE LA RED NEURONAL. ....	94
6.7	PROGRAMA PARA EVALUAR LA CINEMATICA DIRECTA E INVERSA	
	REAL.....	99
7	OBSERVACIONES.....	101
8	CONCLUSIONES .....	102
9	MEJORAS AL PROYECTO.....	104
10	BIBLIOGRAFIA. ....	105

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Fuerzas de fricción con respecto a la velocidad .....	15
Figura 1.2 Comensación de torques .....	19
Figura 1.4 Vista general del brazo articulado. ....	30
Figura 1.5 vista superior de la pinza .....	31
Figura 1.6 Vista general del antebrazo.....	32
Figura 1.7 Vista del brazo. ....	32
Figura 1.8 Vista lateral de la base del brazo. ....	33
Figura 1.9 Pesos y ángulos que actúan en la pinza .....	34
Figura 1.10 Diagrama de cuerpos libres para el antebrazo. ....	35
Figura 1.11 Diagrama de cuerpo libre para calcular el trabajo del brazo .....	36
Figura 2.1 Diagrama de bloques del servomotor. ....	39
Figura 2.2 Circuito en T para el control de motores en robótica .....	46
Figura 2.3 Puente en H para el manejo de motores.....	47
Figura 2.4 Zonas de operación del motor de c.c. ....	49
Figura 2.5 Rampa de aceleración trapezoidal .....	52
Figura 2.6 Puente en H para el control de los motores .....	60
Figura 2.7 Topología de la fuente de alimentación.....	61
Figura 3.1 Diagrama de bloques de la investigación. ....	63
Figura 3.2 Descripción del encoder. ....	64
Figura 3.3 Codificador de prioridad.....	64
Figura 3.4 Detector de flancos. ....	65
Figura 3.5 Distribución de pines del microcontrolador 89C51 .....	66
Figura 3.6 Diagrama de flujo de la subrutina del PWM. ....	67
Figura 4.1 interfaz para manejar los motores.....	73
Figura 5.1 Control PID usando transformada de Laplace.....	75
Figura 5.2 Modelo usado por Clark y Hills para el control de posición. ....	76
Figura 5.3 Red neuronal ADALINE. ....	76
Figura 5.4 Control de un motor de c.c. usando PI más un término de polarización B. ....	77
Figura 5.5 Simulación de una articulación del brazo usando simulink.....	79
Figura 5.6 Red neuronal usada en el control de posición de la gráfica 5.5.....	79
Figura 6.1 Presentación del programa para encontrar la cinemática directa e inversa. ....	82
Figura 6.2 Ángulos, distancias y ecuaciones para mover el brazo articulado.....	83
Figura 6.3 Angulos, distancias y ecuaciones para hallar la cinemática inversa.....	83
Figura 6.4 Parámetros de entrenamiento de la red neuronal del grip.....	85
Figura 6.5 Relación entre las vueltas del motor y amplitud del grip. ....	85
Figura 6.6 Medidas para hacer la tipificación de la red de la muñeca. ....	86
Figura 6.7 Ángulos tomados para la tipificación de la red de la muñeca. ....	87
Figura 6.8 Medidas para hacer la tipificación de la red del brazo. ....	87
Figura 6.9 Ángulos tomados para la tipificación del brazo. ....	88
Figura 6.10 Medidas para la tipificación de la red del antebrazo. ....	88
Figura 6.11 Ángulos tomados para la tipificación del antebrazo.....	89
Figura 6.12 Tipificación de la red para mover la base.....	89

Figura 6.13 Presentación del programa para encontrar la cinemática directa e inversa con articulaciones de forma aislada. ....	91
Figura 6.14 área de trabajo del brazo. ....	93
Figura 6.15 datos de entrenamiento y resultados del área de trabajo para la cinemática inversa. ....	94
Figura 6.16 Comprobación teórica de las redes. ....	95
Figura 6.17 Desempeño de la cinemática directa e inversa matemática. ....	95
Figura 6.18 Desempeño de la cinemática directa e inversa real. ....	96
Figura 6.19 Desempeño de la red neuronal ante la evaluación con el prototipo. ....	98
Figura 6.20 Desempeño de la red neuronal ante la evaluación con el prototipo. ....	99
Figura 6.21 Interfaz para realizar la cinemática directa e inversa del brazo. ....	100

TITULO: Diseño, construcción y control de un brazo articulado usando I. A.<sup>1\*</sup>

AUTOR: Juan Carlos Villamizar Rincón<sup>2\*\*</sup>.

PALABRAS CLAVES: Robótica, Redes neuronales, Motores, microcontroladores.

## RESUMEN

En esta investigación se revisaron tres tópicos a saber: Selección y manejo de motores de c.c, interfaz con matlab y redes neuronales en el posicionamiento de articulaciones.

En la primera parte, se realizó el estudio de las fuerzas actuantes sobre cada una de las articulaciones del brazo, se realizaron los cálculos para seleccionar cada uno de los motores y se seleccionaron los correspondientes en corriente continua.

En la segunda sección, se hizo controles por tiempo, PID y se usó la red adaline para posicionar correctamente el brazo, claro está que el control general o fino se realizó por medio de una red Back propagation.

En la tercera parte, se entrenó una red neuronal del tipo back propagation para desarrollar la cinemática directa e inversa del brazo. Para obtenerla se tuvo como referencia un desarrollo matemático usando la trigonometría euclidiana; donde a partir de las ecuaciones que gobiernan el movimiento se tomaron los ángulos del brazo antebrazo y muñeca para obtener las coordenadas X, Y y ángulo de la pinza con el plano de trabajo. El primer modelo experimental se obtuvo usando con cada una de las articulaciones por separado donde se entrenó una red neuronal para cada articulación los parámetros de entrada era el número de vueltas dadas por el motor y las salidas era el ángulo de cada una de las articulaciones. Este método no fue válido para la solución del problema, puesto que se pierde la influencia de una articulación sobre la otra y el error en el posicionamiento fue grande.

En un segundo enfoque, se tomaron todas las articulaciones influyendo sobre el posicionamiento general del brazo, se usó una gran red neuronal del tipo back propagation con tres neuronas en la capa de entrada, 51 en la capa intermedia y 3 en la capa de salida para obtener la cinemática directa. Con esta red, se pudo obtener un error bajo en el posicionamiento el tiempo de proceso fue corto y los datos de entrenamiento fueron pocos.

---

<sup>1</sup> \* Trabajo de investigación

<sup>2</sup> \*\* Facultad de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones  
Maestría en potencia eléctrica  
Oscar Guldron.

TITLE: Diseño, construcción y control de un brazo articulado usando I. A.<sup>3\*</sup>  
AUTOR: Juan Carlos Villamizar Rincón<sup>4\*\*</sup>.  
KEY WORD: Robotics, Neural networks, Motors, microcontrollers.

## ABSTRACT

In this investigation three topics were revised that is: Selection and handling of motors of c.c, interface with matlab and neural networks in the positioning of articulations.

In the first part, they were carried out the study of the forces on each one of the articulations of the arm, they were carried out the calculations to select each one of the motors and the corresponding ones were selected in continuous current.

In the second section, it was made controls by time, PID and a adaline network was used to position the arm correctly, clearing is that the general control was carried out by means of a net Back propagation.

In the third part, he trained a neural network of the type back propagation to develop the direct and inverse kinematics of the arm. To obtain it one had like reference a mathematical development using the euclidian's trigonometry; where starting from the equations that govern the movement the angles of the arm forearm and doll they took to obtain the coordinated X, Y and angle of the clip with the work plane. The first experimental model was obtained using with each one of the articulations for separate where she trained a neural network for each articulation the entrance parameters it was the number of turns given by the motor and the exits was the angle of each one of the articulations. This method was not valid for the solution of the problem, since it gets lost the influence of an articulation on the other one and the error in the positioning it was big.

In a second focus, they took all the articulations influencing on the general positioning of the arm, a great netural network of the type back propagation was used with three neurons in the input layer, 51 in the intermediate layer and 3 in the exit layer to obtain the direct kinematics. With this net, one could obtain a low error in the positioning the time of process it was short and the data of training were few.

---

<sup>3</sup> \* Trabajo de investigación

<sup>4</sup> \*\* Facultad de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones  
Maestria en potencia eléctrica  
Oscar Guldron.

## INTRODUCCIÓN

Este texto es la recopilación de información de la investigación Diseño, construcción y control de un brazo articulado usando inteligencia artificial (I. A). y ha sido el producto de dos años de incansable dedicación y pruebas.

Esta investigación es importante en el campo de la robótica y el control porque hace uso de técnicas de control no tradicionales basadas en las redes neuronales artificiales. Adicionalmente en cada capítulo se da unas pautas de diseño para la construcción de brazos articulados y presentan alguna metodología para controlar los motores de corriente continua como accionadores de las articulaciones.

Esta investigación nació como una inquietud personal necesaria para el diseño y construcción de accionamientos eléctricos de brazos articulados. También hay que destacar el interés personal e institucional por establecer una metodología para la selección de motores eléctricos que no solo muevan brazos articulados sino cualquier elemento mecánico industrial. Como un fruto de la investigación se puede destacar la aplicabilidad de las redes neuronales artificiales al control de posición de las diferentes articulaciones y su uso en la corrección de errores de posicionamiento debidas a imprecisiones de construcción de los diferentes mecanismos.

Los objetivos perseguidos con esta investigación son:

Diseñar, construir y controlar un brazo articulado utilizando técnicas de inteligencia artificial.

Diseñar un prototipo de brazo articulado con cinco grados de libertad.

Seleccionar los materiales más adecuados y económicos para la elaboración de un brazo articulado.

Seleccionar la forma más adecuada, económica y de menor paso para la transmisión de potencia mecánica desde un motor eléctrico hasta el efector final del robot.

Diseñar e implementar el control de un motor de corriente continua para el movimiento de las articulaciones usando la metodología de rampas de aceleración trapezoidal.

Caracterizar el movimiento de cargas de hasta 200g en el efector final en un cubo de trabajo de 70 cm.

Desarrollar el software necesario para el posicionamiento de las articulaciones del brazo usando técnicas de inteligencia artificial.

En esta investigación se propone explorar algunos tópicos básicos de la robótica especialmente los relacionados con el diseño de las partes mecánicas, controlabilidad y selección de los motores eléctricos, criterios de selección de los *encoders*, aplicación de la inteligencia artificial, y la obtención de los perfiles de aceleración, entre otros.

La selección de los motores también requiere especial atención, ya que se deben satisfacer los requerimientos de peso, momento de inercia, bajo consumo de energía y además se deben manejar estos con cuidado especial para minimizar los esfuerzos mecánicos sobre las estructuras y conseguir un posicionamiento preciso.

La metodología de la investigación basó en los siguientes pasos:

Diseño y construcción del sistema mecánico: en esta parte se realizó el diseño mecánico, la construcción de la estructura y la selección de los reductores de velocidad.

Selección de los motores: esta etapa comprendió la selección de los motores, las compras y consecución, pruebas de los mismos y el montaje en la estructura mecánica.

Desarrollo del software de comunicación entre el computador y el manejo de los motores: se desarrolló un programa en un microcontrolador de intel, 89C51, que se encarga de ejecutar las rampas de aceleración trapezoidal, posicionar el motor con una red del tipo ADALINE para liberar al computador de estas tareas.

Caracterización de los parámetros de funcionamiento del robot: aquí se minimizaron los efectos mecánicos y eléctricos por medio de una red neuronal con el fin de minimizar los errores en el posicionamiento del efector final.

# 1 FENÓMENOS MECÁNICOS

En este capítulo se presentan aspectos relacionados con los efectos mecánicos que se pueden observar en un brazo articulado como son: torques producidos por rozamiento, aceleración, frenado, propios del brazo y de la carga. Se incluye una introducción teórica de como minimizarlos y se discute el diseño del brazo articulado.

## 1.1 MOVIMIENTO LINEAL O DE TRASLACION.

### 1.1.1 Aceleración de cuerpos.

En el caso de manipuladores en robótica se pueden ciertas uniones que se mueven en línea recta. Estas son llamadas lineales o prismáticas. Si se aísla una de estas se puede estudiar como un cuerpo rígido que se mueve en traslación para poder mover una carga de masa  $M$ ; en un sistema asociado se necesita una fuerza  $F$  que viene relacionada con la masa por una de las leyes de Newton así:

$$F(t) = M a(t) \quad \text{ecu. 1.1}$$

Lo cual implica que para poner en movimiento un cuerpo o detenerlo se necesita una fuerza y que ésta es proporcional a la rapidez con la que se necesite mover el cuerpo.

Es importante recordar que el peso del cuerpo se obtiene de multiplicar su masa por la gravedad; o en otras palabras, no es lo mismo mover un kilogramo cerca al mar que en una alta montaña. Si se desea controlar un brazo de robot con precisión en todos los sitios de la tierra es necesario tener presente este fenómeno.

### 1.1.2 Fricción.

En todo movimiento existe una fuerza que se opone a este, con lo cual se configura un efecto no lineal que depende de muchos factores entre los que se pueden citar velocidad, presión entre las dos superficies presentes en el movimiento y los materiales de las superficies. Para analizar las fuerzas de fricción se pueden dividir en tres a saber:

*Fricción viscosa.* Es aquella que tiene una relación directa entre la fuerza necesaria para producir el movimiento y la velocidad que lleva el cuerpo; frecuentemente esta relación se denota por la letra B y su componente se puede hallar con la expresión.

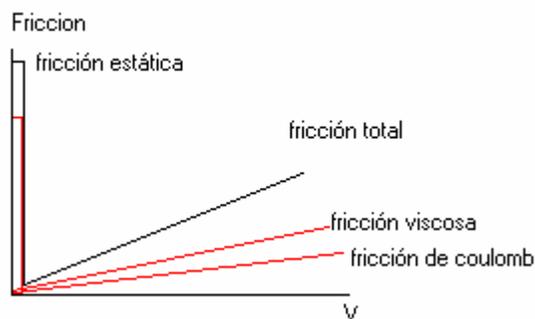
$$F(t)=B*v(t) \quad \text{ecu 1.2}$$

*Fricción estática.* Algunas veces se llama fricción de arranque y es definida como aquella fuerza que se opone al movimiento inicial y se puede relacionar por medio de la ecuación 1.3:

$$F(t)=F_s \quad !v=0 \quad \text{ecu 1.3}$$

*Fricción de Coulomb.* También se le llama fricción de movimiento y tiene una amplitud constante para cierta velocidad. Generalmente se denota en los libros con el coeficiente  $\mu$  y se opone al movimiento. En la figura 1.1 se muestra la relación que tienen estas tres fuerzas.

**Ilustración 1.1.** Fuerzas de fricción con respecto a la velocidad



El solo hecho de querer controlar un cuerpo rodando sobre una superficie es tedioso y se necesita conocer cada uno de las diferentes fuerzas que intervienen.

## **1.2 MOVIMIENTO DE ROTACIÓN.**

El movimiento de rotación tiene lugar cuando un cuerpo gira sobre un eje fijo. Para el caso de un cuerpo rígido, si todo los puntos a lo largo de una línea recta permanecen constantes durante el movimiento, el cuerpo está rotando sobre esta línea. El movimiento rotacional tiene sus expresiones y fenómenos similares a los que se presentan en el movimiento de traslación, solo que aquí cambian de nombre, Por ejemplo el desplazamiento tiene su similar en la rotación angular y se mide en radianes; el momento de inercia es el análogo a la masa, torque es el análogo a la fuerza, etc. Algunas ecuaciones que rigen este movimiento son:

$$T(t) = J * \alpha(t) \quad \text{ecu 1.4}$$

Donde  $T(t)$  es el torque instantáneo que se necesita para adquirir una aceleración  $\alpha(t)$  y  $J$  es el momento de inercia del cuerpo en movimiento.

Otra forma de representar el torque es teniendo un brazo pivotado en uno de sus extremos y cargado en el otro (similar a un brazo de robot). El torque necesario para mantener el brazo en posición es el producto de la fuerza por la distancia horizontal del pivote al vector fuerza. Ahora bien, se debe tener en cuenta que el brazo está aumentando el ángulo con respecto a la horizontal, es decir, se está haciendo movimiento contra la gravedad. En este caso el motor que mueve el brazo debe estar venciendo dos torques, uno debido al propio peso y otro el que se debe almacenar como energía potencial (equivalente a la altura). Ahora si se quiere bajar el brazo el motor debe ejercer una fuerza menor para bajar el peso o en algunos mecanismos la carga no se mantiene en la posición deseada.

El movimiento de rotación también experimenta las fuerzas de fricción que se mencionaron en el movimiento de traslación. La ecuación 1.5 representa el torque necesario para vencer los tres tipos de fricción existentes.

$$T(t) = F_s \cdot l_{v=0} + B \cdot \omega(t) + F_s \quad \text{ecu 1.5}$$

Ahora bien, estas fuerzas son fáciles de controlar comparadas con el fenómeno que se estudiará a continuación.

### 1.2.1 Momentos de inercia.

El cálculo del momento de inercia es importante para el dimensionamiento de los motores y el modelado dinámico de las articulaciones que tiene el brazo. El momento de inercia de un cuerpo resulta bastante dependiente de su forma y masa; además depende grandemente del eje o radio de giro del cuerpo.

Las ecuaciones 1.6 muestran las dependencias de los momentos de inercia para cualquier cuerpo:

$$J = \int \rho r^2 dv \qquad J = \sum M_i r_i^2 \qquad \text{ecu 1.6}$$

donde  $M_i$  es la masa que gira con un radio  $r_i$  y  $\rho$  es la densidad de volumen que gira en un radio  $r$  y tiene un diferencial de volumen  $dv$ . El cálculo de los momentos de inercia de áreas complejas se puede calcular dividiéndola en áreas conocidas y luego se suman o se restan dependiendo del contorno. Como se ha podido notar en la anterior sección, la inercia solo aparece cuando hay aceleraciones o cambios de velocidad; a grosso modo, no parece un problema, pero tal vez es uno de los más importantes cuando se trata de mover algún brazo. El general un brazo no tiene conocimiento previo sobre el objeto que va a manipular (reconocer su forma, peso, etc). Por tal razón, este fenómeno debe tratarse de forma indirecta; en esta investigación se debe tener un estimativo que se puede obtener pesando el objeto y por medio de redes neuronales se promediarán sus efectos sobre la posición final de la articulación.

### 1.2.2 Teorema de los ejes paralelos.

Este teorema ofrece una alternativa para encontrar el momento de inercia de un cuerpo que gira sobre un eje que no pasa por su centro de gravedad y que es paralelo a este.

$$J = J_c + Mr^2 \qquad \text{ecu 1.7}$$

Donde:  $J_c$  es el momento de inercia propio del cuerpo sobre el eje que pasa por su centro de gravedad,  $M$  es la masa total del cuerpo y  $r$  es la distancia que hay entre los ejes de giro y de gravedad. Este fenómeno puede ser controlable si se conocen los ángulos de cada una de

las articulaciones y sus longitudes. Cuando se entrene la red neuronal que mueve cada articulación se tendrán en cuenta los ángulos propios y los de las otras articulaciones que se involucran en el movimiento.

### **1.3 Radio de giro.**

Es la distancia radial de giro de cualquier eje dado en el cual la masa del cuerpo puede concentrarse sin alterar el momento de inercia del cuerpo sobre el eje. Se define el radio de giro  $K$  como:

$$K = \sqrt{\frac{J}{M}} \quad \text{ecu 1.8}$$

es importante anotar que el eje de giro no necesariamente coincide con el centro de gravedad del cuerpo.

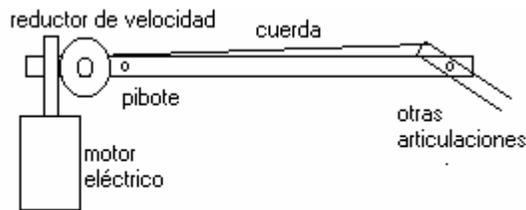
### **1.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO.**

Para poder seleccionar los actuadores que van a mover un brazo mecánico se debe tener presente que el torque y el momento de inercia deben ser lo más bajos posibles. El primero es proporcional al peso de la carga y del brazo propiamente dichos y resulta bastante conveniente que el motor se seleccione teniendo este parámetro como la primera guía de diseño. El momento de inercia es una medida de la oposición que tiene cualquier cuerpo para ponerse en rotación o dejar de rotar, y como tal genera un torque, llamado torque de aceleración o de frenado, según sea el caso, que empieza a ser importante cuando se necesita que una articulación llegue a la posición deseada lo más rápido posible.

Considerese una articulación de robot donde la carga está en un extremo y el motor está en el otro. En este caso las cargas del brazo están expuestas a fuerzas gravitacionales. Para evitar la rotación de la junta hacia abajo, el actuador debe producir un torque (en el pivote) que sea opuesto e igual al torque generado por la gravedad. Si se quiere que el brazo se mantenga en una posición deseada el motor debe consumir una corriente, o se debe colocar un contrapeso para vencerlo. Como el torque que tiene un brazo es cambiante este contrapeso debe seleccionarse de forma muy cuidadosa. La forma más adecuada de compensar estos torques sin necesidad de adicionar peso es ubicar el motor que mueve la articulación de tal forma que su propio peso ayude a minimizar el torque, colocándolo en el extremo opuesto del brazo.

La forma más conveniente para mantener el brazo en posición, es colocarle reductores de velocidad que no pierdan la posición, es decir que tengan autobloqueo. Como los motores y la carga están en extremos opuestos las cuerdas son elementos valiosos cuando se trata de trasladar torques necesarios en el movimiento de la articulación. Por medio de estas se puede conectar el motor al otro extremo de la carga, sin que el motor afecte el momento de inercia o el torque de carga. Ver en la gráfica 1.2.

**Ilustración 1.2** Compensación de torques



En el momento de calcular los torques necesarios para mover una junta se deben tener presentes el torque pico y torque medio o promedio. El primero es una indicación del torque máximo que debe ejercer el motor en un momento dado (especialmente cuando se quiere acelerar la articulación en posición horizontal) y solo se produce en un punto dentro del recorrido del actuador. El valor promedio indica el torque que se debe ejercer continuamente el motor. Así, en el uso de la compensación se debe buscar un compromiso entre el torque pico requerido en la aceleración para vencer las cargas de fricción e inerciales y el torque requerido para hacer el balance estático de cargas.

Puede demostrarse que en ciertas configuraciones (por ejemplo, cuando la longitud del pivote hasta la compensación es más corta que la longitud desde el pivote hasta carga) el momento de inercia agregado por la compensación puede ser pequeño. Lo cual reduce grandemente el torque promedio. El torque debido a las aceleraciones no se ve grandemente afectado debido a las bajas velocidades con que se mueve el brazo.

## **1.5 ELEMENTOS MECANICOS.**

En este aparte del capítulo se tratarán las principales características de los elementos mecánicos y como influyen ante los cambios de torque y momentos de inercia.

### 1.5.1 Correas, cables y cadenas

*Correas.* Se pueden usar como tendones para transmitir fuerza, posición y velocidad. Este tipo de dispositivo solo se usa en máquinas que tengan un solo plano de trabajo, pues no permiten cambios de plano. También se utilizan como fusibles mecánicos, ya que después de cierta tensión las poleas tienden a patinar o deslizarse.

*Correas delgadas.* Este tipo de correas son comunes en la transmisión de movimiento a través de poleas de gran diámetro. Se aconseja utilizarlas en la transmisión de velocidad de máquinas grandes y no se aconseja utilizarlas en robótica.

*Características:*

- Presentan una dependencia de la tensión para transmitir potencia.
- No están expuestas a las fuerzas centrífugas por ser planas. Por tal razón se usan en la transmisión de altas velocidades
- Se usan en poleas relativamente pequeñas.
- Presentan eficiencias inferiores al 90%.
- Son silenciosas.
- Absorben vibraciones producidas en las cargas, en el motor y las debidas a la torsión.
- Presentan deslizamientos y se pueden usar como fusibles mecánicos.
- Son sensibles a los ambientes contaminados con polvos y aceites.
- Para que funcionen adecuadamente los cojinetes están expuestos a presiones extras debidas a la tensión de operación.

*Correas en v.* Se les llama así por que el corte transversal tienen forma de V. Su forma le da gran capacidad de transmisión de energía; se aconseja usarla en máquinas donde se permitan deslizamientos, ya que en general las correas pueden deslizarse sobre las poleas. Su acople mecánico es difícil y se necesita tener una buena tensión entre los elementos que se va transmitir la energía. Por esta razón resulta conveniente usarlas en máquinas de mediana potencia.

*Características:*

- La eficiencia en la transmisión de potencia está entre el 79% y el 96%.
- Son silenciosas y absorben los choques.
- Trabajan con menores presiones en los cojinetes que las correas planas.
- Pueden transmitir más potencia que las planas.

*Correas Elásticas.* Este tipo de correas se usan en la transmisión de pequeñas potencias, son muy utilizadas en los equipos de sonido, grabadoras, etc, y presentan la ventaja de no permitir deslizamientos entre las partes que conforman el reductor de velocidad.

*Cables.* Se utilizan en la transmisión de energía mecánica rotativa y presentan un desempeño similar a las poleas; por medio de estos se puede transmitir potencia a diferentes planos de trabajo y además se puede tener varias curvas en el trayecto. No tiene sección definida pero en su mayoría son redondas. Ese tipo de transmisión es útil en robótica solo en aquellos casos donde no se necesite gran precisión o cuando se cambia de plano de trabajo; además se debe tener presente el gasto de energía adicional para vencer la fricción que se presenta entre el cable y el protector o guía. Solo se pueden transmitir pequeñas potencias.

*Características:*

- El límite de la potencia o tensión transmitida es alta.
- No necesita alineamientos perfectos entre las poleas.
- Presentan pequeñas pérdidas por deslizamientos.
- No son ruidosas.
- Las poleas requieren menos espesores.
- En algunos casos pueden se pueden presentar estiramientos.
- Los ejes en los que transmiten potencia pueden estar en planos e inclinaciones diferentes.

*Cadenas.* Sirven como poleas de trabajo pesado porque son construidas de hierro y necesitan unas poleas especiales para el acople mecánico. Un ejemplo apropiado son las cadenas de las bicicletas. Este tipo de dispositivo es bastante útil en la transmisión de posición, ya que no permite deslizamientos entre las partes. La principal ventaja es que no permite la transmisión de vibraciones en planos diferentes al de uso.

*Características.*

- Son compactas y se utilizan para transmitir energía en ejes que están a cortas distancias.
- Permiten flexibilidad en los ejes y no necesitan que estén bien alineados.
- No presentan deslizamientos.
- Permiten relaciones de velocidad entre 1 y 8 en un paso.
- Presentan pequeñas presiones en los cojinetes debidas a su peso.
- Son más pesadas que una correa y por tal razón presenta una catenaria más pronunciada.
- Tienen una eficiencia mecánica cercana al 98%.
- Son inmunes a efectos de temperatura, polvo, aceites y humos.
- La relación costo mantenimiento es baja.

- La lubricación se hace de forma sencilla.
- la máxima velocidad de transmisión está entre 500 y 600 r.p.m.

*Sistemas de cadenas y cables ideales.* El análisis de este tipo de dispositivo es similar al tratamiento matemático que reciben los engranajes. Note que el movimiento relativo de los dos ejes en este sistema rotan en el mismo sentido. La principal ventaja sobre los engranajes es que pueden transmitir energía a distancias más largas que la de los engranajes. En las cadenas y poleas es común que haya deslizamiento entre la partes en contacto, por tal razón, es conveniente usarlas en elementos que transmitan con precisión en la posición, porque las correas presentan el efecto de un resorte, es decir se acumula energía al iniciar el movimiento y luego se libera cuando termina este resultando difícil el posicionamiento con precisión.

*Trenes de engranajes.* Son las formas más usadas en la transmisión de energía mecánica, ya que la velocidad y el torque son función directa del diámetro o número de dientes que poseen. Este tipo de transmisor mecánico solo puede transmitir energía en forma de movimientos circulares y debe haber mínimo dos piñones para que exista acople mecánico. Los trenes de engranajes pueden ser del tipo:

*Engranaje de eje paralelo.* Es el más utilizado por su geometría sencilla y paralela; la principal característica es que los dientes son paralelos al eje de transmisión o línea central. El principal problema es que la operación del engranaje, el encaje de los dientes, se hace instantáneamente a amplitud total. El contacto ajustado, significa que el diente experimenta una expansión para comenzar la deformación debida a la flexión bajo la carga del diente que fue previamente encajado. El movimiento resultante del robot no es perfectamente suave y por lo tanto, se presentan algunas vibraciones.

*características.*

- Se usan para conectar ejes paralelos.
- Trabajan bien con grandes tolerancias en los ejes.
- Son los más utilizados en servomecanismos por su precisión.
- Soportan deslizamientos axiales.
- Presentan bajas inercias cuando se practican sobre el eje del motor.
- Eficiencia superior al 98%.
- Presentan larga vida.
- Transmiten vibraciones entre las partes.
- Entre los engranajes son los más económicos.

*Engranaje Helicoidal.* En este engranaje se tiene un contacto gradual entre los elementos encajantes, y transmiten la carga más ligeramente. El ángulo de la hélice introduce una componente axial para la fuerza requerida en el último rodamiento (rodamiento en contacto) para conducir de una forma mejor la carga radial. Los engranajes helicoidales pueden ser acomodados en trenes de engranajes de "opposite hand" forma opuesta (una hélice rodando a la derecha y otra rodando a la izquierda) que balancee las cargas axiales.

*Engranaje Doble Helicoidal.* Es construido de forma similar a las espinas de pescado, es decir tienen una hélice a la izquierda y otra a la derecha que giran como un engranaje sencillo. Las cargas axiales presentes en los engranajes cónicos se balancean por si mismas. El engranaje doble helicoidal requiere localidades axiales muy precisas en el momento de ajustarlos. El método más común y simple para montar este tipo de engranajes es utilizando rodamientos en un eje y el otro se deja que flote axialmente. Este tipo de transmisión es poco utilizada en robótica, ya que su construcción resulta costosa y no es fácil conseguir repuestos de este tipo, su construcción es exclusiva.

#### *Características.*

- Conecta ejes paralelos.
- Conecta ejes en ángulos rectos y no intersecantes.
- El contacto entre dientes se hace en un solo punto, por tal razón no pueden transmitir grandes potencias.
- La eficiencia en la transmisión de potencia es baja, al rededor del 36%.
- Presenta cargas axiales o cruzadas debidas a la inclinación de los dientes.
- Puede girar a más altas velocidades que los rectos.
- Presenta menor ruido que los rectos al girar.
- Tiene una eficiencia similar a los rectos.
- Tiene igual inercia que los rectos.

*Engranajes Internos.* Un engranaje interno puede ser del tipo recto o helicoidal. La principal característica es que el piñón pequeño va dentro del grande y se utiliza en ejes planetarios y transmisiones reductoras. El piñón interno es más compacto y la acción del diente es más suave que en los engranajes tradicionales. Con este tipo de engranajes se consigue que los reductores de velocidad sean más pequeños y livianos.

#### *Características:*

- Se usan para conectar ejes paralelos.
- Pueden ser helicoidales, simples o dobles y en la mayoría de los casos son rectos.
- No se fabrican en pequeñas dimensiones.
- Pueden manejar grandes torques en los ejes.

- Presentan mayor retenimiento de las grasas lubricantes.
- Pueden presentar relaciones de velocidad 500:1 en una sola etapa.
- La eficiencia en la transmisión de potencia es alrededor del 67%.
- No se aconseja hacer una reducción de velocidad en un paso de más del 50%.
- Refleja la totalidad de las cargas inerciales.

*Engranajes de ejes intersecantes.* Este tipo de engranaje se utiliza en donde se necesite transmitir energía mecánica en geometrías diferentes a la paralela y se pueden construir de dos clases:

- Engranaje de bisel
- Engranaje de bisel en espiral.

*Engranaje de bisel* El término bisel describe a los engranajes basados en el desplazamiento de superficies que son troncos de conos, cuyas extensiones se intersectan en la unión de los ejes. Cuando los engranajes son conectados con ángulos de desplazamiento inferiores de 45° (90° entre ejes) se llaman engranajes de inglete. La acción de los engranajes de bisel será la misma que un engranaje helicoidal o recto, solo que estos tienen una mayor relación de contacto (pueden transmitir mayor torque) y su movimiento es más suave.

*Engranajes de bisel en espiral.* Son los mismos arreglos de engranajes de bisel, solo que estos tienen los dientes en forma transversal (similares a los dientes de los engranajes helicoidales) y dan un radio de acción más grande.

*Características:*

- Se usan para transmitir potencia en ejes intersecantes y que estén en el mismo plano.
- Siempre se deben comprar en pares.
- No se aconseja utilizarlos en transmisiones donde se requiere precisión.
- El montaje es crítico.

*Engranajes de ejes no intersecantes o no paralelos.* Se utilizan donde se necesite transmitir energía en ejes que no se intersectan y no son paralelos. La limitante, es que solo se pueden transmitir cargas livianas. El desplazamiento del engranaje en este tipo de transmisores solo está en un punto y la rotación está acompañada por el deslizamiento del engranaje sobre el otro lo cual reduce la eficiencia y aumenta el desgaste. Normalmente los engranajes rotan en la misma dirección (ángulo helicoidal); sin embargo para ángulos pequeños los engranajes pueden tener direcciones opuestas. Los dos engranajes deberán tener el mismo ángulo de presión y desplazamiento en el plano normal de contacto.

*Engranajes de tornillo sin fin.* En general el tornillo sin fin se usa en mecanismos para conducir energías en ejes no intersecantes que tengan un ángulo recto. El tornillo sin fin, es considerado como un engranaje helicoidal involuto real de un solo diente. La apariencia de las roscas resulta de una combinación de un ángulo helicoidal relativamente grande y su engranaje de diámetro pequeño. El ángulo de desplazamiento corresponde al desplazamiento de un hilo (roscas del tornillo). El avance es la distancia en un punto sobre el paso de la rosca durante una revolución. El ángulo de avance es el ángulo en el diámetro de desplazamiento entre un hilo y el plano de rotación.

La mayor ventaja de este tipo de mecanismo es que alcanza unas relaciones de velocidad superiores a las que se pueden alcanzar con dos engranajes normales y además bajo construcciones especiales se puede obtener auto bloqueos (la salida por el engranaje solo se mueve si el tornillo se mueve). La principal desventaja que tiene este tipo de engranaje es que solo se pueden conducir cargas livianas, por que solo se tiene un punto de contacto entre el engranaje y el tornillo. Debidos a las altas pérdidas causadas por la fricción, se presenta un desgaste acelerado de las piezas y además sufren de altas pérdidas de energía (la eficiencia es baja). Este tipo de mecanismo es bastante útil en la construcción de robots pequeños por su bajo costo, altas relaciones de velocidad, auto freno, y la transmisión no paralelas.

#### *Características.*

- Presentan grandes relaciones de velocidad en una sola etapa.
- Transmiten energía en ejes no intersecantes que hacen un ángulo recto.
- No son reversibles.
- Consiguen relaciones de velocidad están entre 5:1 y 70:1.
- Pueden transmitir cargas medianas.
- No presentan altas prestaciones en la transmisión de precisión.
- El ensamblaje de las partes es crítico y debe ser preciso.
- Debe ser lubricado con grasas especiales.
- Tiene alto desgaste.
- La eficiencia es del orden del 25% al 35%.
- La inercia reflejada es menor que en los engranajes rectos.
- Son más económicos que los rectos.
- Presentan vibraciones al moverse.

## **1.6 TRENES DE ENGRANAJES IDEALES.**

Para entender un reductor de velocidad se iniciará la discusión con el concepto de trenes engranajes ideales. Entendiéndose por este una transmisión compuesta de piñones que son

perfectamente redondos, rotan en sus ejes verdaderos, no tienen inercias y además entre los cuales no hay fricción.

Un reductor de velocidad está compuesta de engranajes ideales, que están compuestos de un eje de entrada de energía, dos (caso de esta discusión) o más piñones y un eje de salida. El piñón superior tiene un radio  $r_1$  y en la periferia se le pueden practicar  $N_1$  número de dientes. El piñón inferior tiene un radio  $r_2$  y  $N_2$  número de dientes. Los piñones tienen acoplados a sus ejes un torque  $T_1$  y  $T_2$  y pueden girar un ángulo  $\theta_1$  y  $\theta_2$  respectivamente. Note que las direcciones de rotación de los dos ejes son opuestas.

Examinando las relaciones físicas entre los dos piñones e igualando las relaciones entre velocidad, desplazamiento y torques en los dos ejes se pueden tener las siguientes relación entre el número de dientes y el radio.

$$N_1/r_1=N_2/r_2 \quad \text{ecu 1.9}$$

Es decir que el número de dientes y los radios de los piñones son proporcionales entre sí. Para un tren de engranaje ideal sin pérdidas se cumple la relación de torques así:

$$T_1*\theta_1=T_2*\theta_2 \quad \text{ecu 1.10}$$

Se puede afirmar que el torque ejercido sobre un eje por un desplazamiento angular es igual al torque por el desplazamiento en el otro eje.

La longitud de arco recorrida por un engranaje debe ser igual a la del otro engranaje y de aquí se obtienen las expresiones para la longitud de arco.

$$r_1*\theta_1=r_2*\theta_2 \quad \text{ecu 1.11}$$

Si los radios de los piñones no cambian con respecto al tiempo, las ecuaciones anteriores se pueden expresar como en la ecuación 1.12.

$$N_1/N_2=r_1/r_2=T_1/T_2=\theta_2/\theta_1=w_2/w_1=\alpha_2/\alpha_1 \quad \text{ecu 1.12}$$

con las cuales se pueden deducir algunas propiedades de los trenes de engranajes ideales como son:

- Si se parte del hecho que la velocidad del eje 1 es más grande que la del eje 2, se puede afirmar que el número de dientes del segundo engranaje es más grande que el número de dientes del primero;  $N_1/N_2=w_2/w_1$ .
- Si el torque en el primer eje es conocido, se puede encontrar el torque en el segundo eje  $T_2*N_1=T_1*N_2$ . Esta relación en particular muestra la propiedad de reducción de velocidad y la multiplicación de torques que se pueden obtener con estos mecanismos. Es importante notar que un tren de engranajes ideal es similar a un

transformador ideal. De hecho, se puede hacer la analogía eléctrica de componentes mecánicos y tratar matemáticamente los problemas de forma más fácil.

Los trenes de engranajes se pueden utilizar para cambiar los torques de cargas mecánicas de forma similar a las cargas eléctricas en un transformador y se pueden obtener las propiedades:

- Si se trata de una carga meramente inercial (aquella que no necesita gastar energías en fricción o cambio de altitud, base móvil del robot) el torque requerido en la entrada solo se usa para acelerar o frenar la base y se puede calcular por la ecuación:

$$T_1 = N_1/N_2 * \alpha_2 * J_2 \quad \text{ecu 1.13}$$

Esta ecuación se puede nombrar como la "carga vista por el motor" y significa que para mover una carga inercial hay necesidad de aplicar un torque en el eje de entrada de energía.

- Si se necesita mover una carga que necesita un torque y además la carga tiene un momento de inercia considerable (levantar un peso por medio de un brazo) la ecuación se convierte en:

$$T_1 = N_1/N_2 * (a_2 * J_2 + T_{c2}) \quad \text{ecu 1.14}$$

- Finalmente, si se necesita mover solo cargas de fricción o cargas puras (caso de un carro subiendo una pendiente) el torque necesario se halla como:

$$T_1 = N_1/N_2 * (T_{c2}) \quad \text{ecu 1.15}$$

Partiendo de la ecuación  $T_1 = N_1/N_2 * \alpha_2 * J_2$  se puede hallar la ecuación para ver los efectos de los momentos de inercia de la carga en el eje del motor:

$$J_1 = (N_1/N_2)^2 * J_2 \quad \text{ecu 1.16}$$

Al igual que el momento de inercia las fuerzas de fricción y las fuerzas de Coulomb también se reducen o se aumentan en un engranaje reductor o multiplicador de velocidad en un factor cuadrático. El torque total en la entrada de una cadena de engranajes será:

$$TR = N_1/N_2 \quad \text{ecu 1.17}$$

$$T_1 = (J_1 + TR_2 J_2) a_1 + (B_1 + TR_2 b_2) w_1 + T_{f1} \quad \text{ecu 1.18}$$

$$T_{f1} = F_{f1} * \text{sig}(\theta_1) + TR * F_{f2} * \text{sig}(\theta_2) \quad \text{ecu 1.19}$$

En robótica, es frecuente acelerar cargas altamente inerciales y por tal razón estos elementos resultan bastante apropiados para reducir significativamente el peso, tamaño, volumen y costo de varias uniones del robot. En el momento de usar engranajes se deben tener en cuenta los siguientes enunciados:

- No se recomienda usar grandes relaciones de velocidad excesivas en dos engranajes, porque se pueden partir los dientes de algún piñón.
- Los torque de carga se reducen en un factor de la relación de velocidad al cuadrado, lo cual es beneficioso, pero se pueden presentar fuerzas mucho más grandes que aquellas debidas a la carga por el mal montaje de los engranajes. Es aconsejable asignar el montaje de este tipo de elementos a personal que tenga experiencia.
- Muchas veces resulta impráctico el montaje de reductores de velocidad de dos piñones cuando hay reducciones de velocidad altas, porque un engranaje es pequeño (algunos milímetros) y el otro queda demasiado grande (algunos centímetros).

## **1.7 PROBLEMAS CON ENGRANAJES UTILIZADOS EN ROBÓTICA:**

En los párrafos anteriores solo se consideraron elementos ideales que muchas veces resultan alejados notablemente de la realidad debido a problemas propios de los elementos. Si se quiere conseguir un elemento ideal hay necesidad de invertir cantidades de dinero que pueden hacer poco práctico un diseño a la hora de su construcción. Pero se pueden hacer manejos o arreglos para acercarlos y esta tarea se deja a personal experto.

### **1.7.1 EFICIENCIA.**

La eficiencia se define principalmente como la relación que existe entre la potencia de salida sobre la potencia de entrada. En un primer diseño se considera como uno (algunos diseñadores expertos o empresas dedicadas a la construcción de engranajes pueden dar la eficiencia en tablas), pero en el montaje final resulta menor a esta cantidad debido principalmente a la fricción que existente entre los elementos, desacoples mecánicos, etc. Esta eficiencia se debe tener presente en el momento de especificar el motor que mueve la unión, ya que se pueden cometer subdimensionamientos de estos. En algunos reductores la eficiencia es función de la velocidad. La eficiencia no afecta en nada la relación de velocidad de un engranaje, solo afecta al torque final aplicado al eje de entrada en términos de posición, velocidad y aceleración. La eficiencia es función del material de construcción de los elementos, los coeficientes de fricción, el ángulo de montaje y de corte de los dientes.

### **1.7.2 EXCENRICIDAD.**

La excentricidad trata el fenómeno de todo disco cuya circunferencia exterior nunca coincide totalmente con el centro de la circunferencia del eje de rotación. Se puede definir como la distancia que hay entre el eje ideal y el eje real de giro de un elemento. Este fenómeno trae como consecuencia que algunos dientes o sectores de la periferia no tengan la misma velocidad o posición con respecto al eje, lo cual aumenta considerablemente el error de posición y velocidad en una vuelta completa con respecto a otros piñones.

### **1.7.3 DESALINEAMIENTO.**

El desalineamiento es una consecuencia de la descentralización de los ejes de rotación de dos o más piñones y trae problemas similares a la excentricidad pero entre dos engranajes. Al presentarse este problema no hay una transferencia apropiada de velocidad, posición, ni aceleración debido a que los radios de contacto entre los engranajes no son iguales.

### **1.7.4 ERROR ENTRE DIENTES.**

Es resultado de la mala construcción del espesor de los dientes practicados en un engranaje principalmente debidos a la no simetría de la circunferencia exterior del piñon, al corte no igual de los dientes. Se pueden encontrar periodos de vibración grandes debido a la excentricidad y periodos pequeños de vibración debidos al error entre dientes.

### **1.7.5 VIBRACIONES.**

Existen dos tipos de vibraciones mecánicas en los engranajes, las debidas al movimiento de las máquinas y las debidas a la resonancia. Como se ha visto hasta ahora hay bastantes problemas mecánicos en la construcción de robots entre los que se pueden citar:

- Momento de inercia cambiante, debido al cambio de peso de la carga manipulada y a la posición del robot.

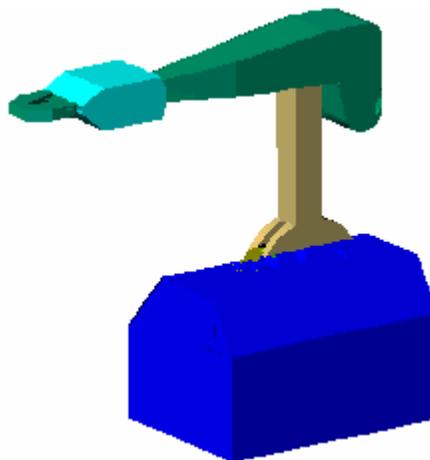
- Se deben considerar las fórmulas exactas para reflejos de los momentos de inercia, eficiencia, fricción de los engranajes.
- Se tienen varios problemas en la construcción de los engranajes que difícilmente se pueden corregir en la construcción.

Los enunciados anteriores implican que si se tiene un control clásico del robot este no va a funcionar muy bien en todo el rango de control. Estos errores se pueden promediar y algunas veces se llega a tener un control lo suficientemente preciso para ser comercializados.

## 1.8 CONSTRUCCIÓN MECÁNICA.

El diseño mecánico del brazo del robot articulado se ilustra en la gráfica 1.4. Este consta de una base móvil que puede girar sobre el eje Z, una pinza con la cual se pueden manipular objetos, un brazo y un antebrazo que le permiten moverse en el plano X, Y que en conjunto con el eje Z le permiten posicionarse en un espacio de trabajo tridimensional. La estructura y la carcasa están contruidos de aluminio; el eje de cada articulación es una varilla de perfil cuadrado de 1cm de lado que le da la suficiente rigidez al brazo. Cada articulación es movida por un motor de corriente continua que está ubicado en el extremo opuesto de la carga para disminuir los torque de carga. El reductor de velocidad está contruido de plástico y es del tipo tornillo sin fin corona para reducir al mínimo el peso del brazo.

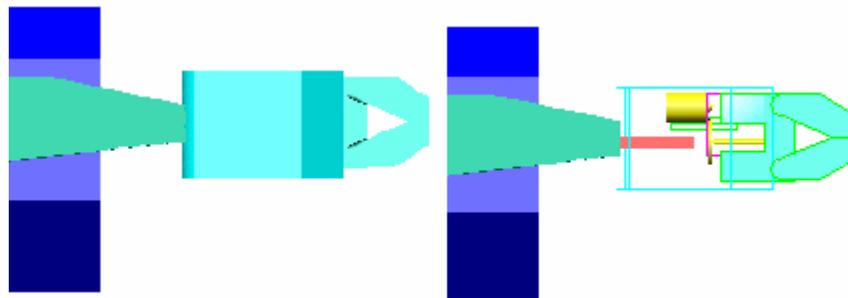
**Ilustración 1.4** Vista general del brazo articulado.



### 1.8.1 DISEÑO DE LA PINZA O GRIP.

El diseño del grip, presentado en la gráfica 1.5, consta de dos láminas de acrílico que semejan unos dedos. Estos son movidos por un motor localizado en la parte posterior de la mano y está conectado, a través de un reductor de velocidad, a un tornillo que a su vez mueve un pasador de acrílico donde se conectan unas varillas de cobre que mueven los dedos. El diseño mecánico no permite establecer una relación sencilla entre las vueltas del motor y la apertura de los dedos. Para determinar la abertura se debe entrenar una red neuronal como se describe en el capítulo 3. La pinza está protegida con una lámina de aluminio para darle mejor presentación y solo se puede abrir y cerrar. No se puede controlar la fuerza con que sujeta los elementos a manipular. En los dedos se le ha acondicionado una espuma compacta que sirve para evitar que las cargas se deslicen al moverse el brazo. El movimiento arriba y abajo es conseguido por el motor que está en el otro extremo del antebrazo y la transmisión se hace por medio de una cadena.

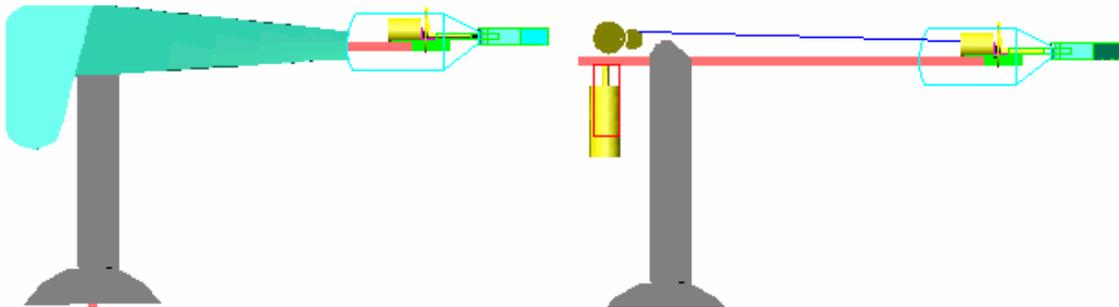
Ilustración 1.5 vista superior de la pinza



### 1.8.2 DISEÑO Y VISTA DEL ANTEBRAZO.

El antebrazo está compuesto de una varilla de sección cuadrada como eje central y es el encargado de soportar todo los pesos del antebrazo y del grip. Tiene 30cm de longitud y en la parte frontal se conecta el grip que se mueve sobre un eje de acero y un buje del mismo material. En la parte posterior se encuentran localizados el motor y el reductor de velocidad que mueven la pinza. El motor gira a una velocidad de 900 r.p.m. y el reductor está compuesto por un tornillo sin fin acoplado a un engranaje de 41 dientes (reducción de velocidad de 41 veces) el cual mueve otro piñón que en conjunto permiten una reducción de velocidad de 1 :254. El grip se mueve a una velocidad de 3.54 r.p.m. Al igual que la pinza, el antebrazo se recubre con una cubierta de aluminio de 0.8mm. El motor que mueve el antebrazo se ubica en la parte inferior del brazo y la transmisión de potencia se hace por medio de una cable de acero para reducir el peso total de la estructura. La apariencia final del antebrazo se ilustra en la gráfica 1.6.

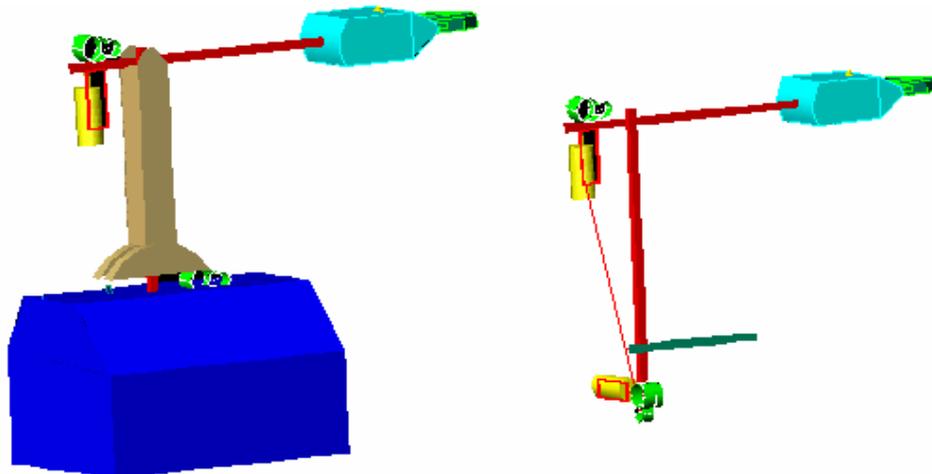
**Ilustración 1.6** Vista general del antebrazo



### 1.8.3 DISEÑO DEL BRAZO.

Al igual que en el antebrazo, el eje y la cubierta del brazo están contruidos en aluminio. El motor que mueve el antebrazo se encuentra en la parte inferior para reducir el tamaño del motor que mueve el brazo (torques de compensación). El eje tiene una longitud de 24 cm y en el extremo superior se conecta, por medio de un eje de acero y un buje, el antebrazo. En la parte inferior se encuentra el motor que mueve el antebrazo por medio de una cadena metálica. El motor gira a una velocidad de 600 r.p.m, activado con un reductor de velocidad tornillo sin fin corona que mantiene la posición cuando el motor no tiene energía. El reductor de velocidad está construido de plástico y el tornillo es de aluminio. El piñón que va directamente acoplado al tornillo sin fin tiene 41 dientes y se acopla a otro piñón más pequeño que dan una relación de velocidad de 1:254 que hace mover el brazo a 3.75 r.p.m. El motor que mueve el brazo está ubicado en el eje de la base y es el motor más grande, ya que debe mover toda la estructura. También está recubierto con láminas de aluminio de 0.8 mm para darle la presentación final.

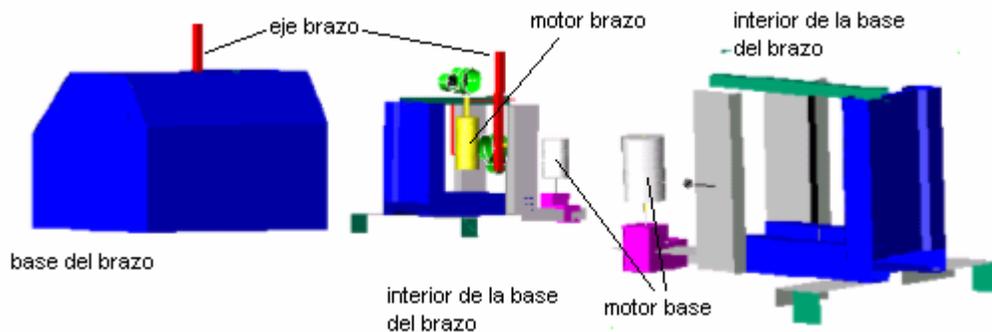
**Ilustración 1.7** Vista del brazo.



#### 1.8.4 BASE DEL ROBOT.

La base del robot fue tal vez la más difícil de diseñar, ya que aquí se soportan grandes esfuerzos y sirve de soporte para todos los elementos del brazo. El soporte está construida de láminas de hierro calibre 0.6 mm y reforzadas con varillas de aluminio de 1cm de lado. En esta base se conectan dos motores que se encargan de darle movimiento al brazo del robot y le dan el movimiento al brazo en el eje z. La carcasa de la base fue construida de aluminio que resulta económico, fácil de trabajar (moldear) y le da buen acabado final. El motor que mueve el brazo del robot está ubicado en la parte superior de la base, este acciona un reductor de velocidad 1 :254 que mueve el brazo a 0.5 r.p.m. Y la base del robot está movida por un motor de 900 r.p.m. a su vez, la base se ubica un segundo motor que es el encargado de darle el movimiento de rotación a la base del brazo. Este motor es similar al motor que mueve la pinza, ya que éste solo debe mover cargas inerciales. Este motor está acoplado a una caja reductora de velocidad que a su vez mueven unas pequeñas ruedas. El eje de movimiento de la base se encuentra en la mitad del eje imaginario que une las ruedas laterales.

Ilustración 1.8 Vista lateral de la base del brazo.



#### 1.9 CALCULO DE TORQUES

Para solucionar rápidamente los problemas relacionados con el movimiento de cargas en robótica se pueden plantear el problema mecánico usando el concepto de trabajo y energía. Su gran ventaja radica en que el trabajo realizado por una fuerza y la energía cinética de las partículas son cantidades escalares, y se pueden calcular por la ecuación 1.20.

$$E_1 + W_{1-2} = E_2 \quad \text{ecu 1.20}$$

Donde:

$E_1$  y  $E_2$  son los valores inicial y final de la energía cinética de las partículas que forman el cuerpo rígido

$W_{1-2}$  Corresponde al trabajo de todas las fuerzas que actúan sobre las diferentes partículas del cuerpo.

Para un cuerpo que gira alrededor del eje, el trabajo se puede expresar como:

$$W_{1-2} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} T d\theta \quad \text{ecu 1.21}$$

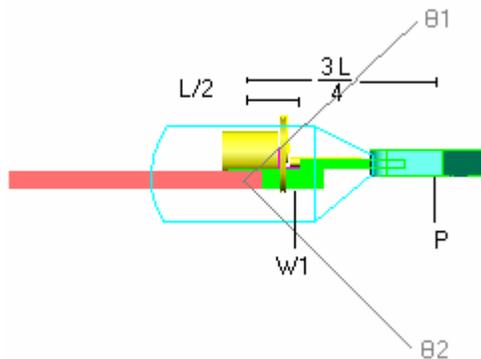
y la energía cinética se puede expresar por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}Jw^2 \quad \text{ecu 1.22}$$

Como el brazo del robot solo tiene movimiento de rotación el término de la izquierda es cero. Ahora bien, el brazo se llevará de una posición  $\theta_1$  a una posición  $\theta_2$ . En el primer instante el motor lleva una velocidad cero, luego tiene que acelerarse hasta una velocidad  $w_1$ . Cuando el motor vaya llegando a su posición en  $\theta_2$ , el motor debe llegar un una velocidad  $w_2=0$ , es decir el segundo término también es cero. Quedando por evaluar sólo el trabajo que hace el motor.

El trabajo realizado por la pinza se puede obtener con la ayuda de la gráfica 1.9. y los pesos que actúan sobre la pinza son; el peso del motor que mueve los dedos de la pinza, pero debido a su posición estratégica sobre el eje de giro el torque se puede despreciar, quedando solo el peso de carga que transporta la pinza y el peso total de la pinza. El peso de la carga es el más significativo porque es el más alto y el que se encuentra más alejado del eje de giro. El peso de la cubierta también se desprecia por ser relativamente bajo.

Ilustración 1.9 Pesos y ángulos que actúan en la pinza

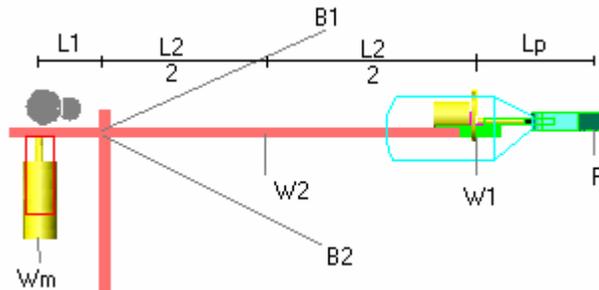


$$w = \int_{\theta_1}^{\theta_2} T d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} l_1 \left( \frac{w_1}{2} + \frac{3}{4}P \right) \cos \theta d\theta = l_1 \left( \frac{w_1}{2} + \frac{3}{4}P \right) \sin \theta \Big|_{\theta_1}^{\theta_2} = l_1 \left( \frac{w_1}{2} + \frac{3}{4}P \right) (\sin \theta_1 - \sin \theta_2)$$

ecu 1.23

Para el antebrazo se puede usar la gráfica 1.10 y los pesos más significantes son: El peso que va a manipular la pinza, el peso de la pinza y del motor que mueven los dedos, que se consideran ubicados sobre el eje de giro de la pinza, el peso del antebrazo (varilla eje y cubierta), el motor que mueve la pinza y el reductor de velocidad. Adicionalmente, el antebrazo se puede mover entre los ángulos  $\beta_1$  y  $\beta_2$ .

Ilustración 1.10 Diagrama de cuerpos libres para el antebrazo.



Según [Beer, 1981] el trabajo de un cuerpo rígido se puede dividir en el trabajo realizado por cada una de las partes que lo conforman.

$$W_{1-2} = W_1 + W_2$$

$$W_{1-2} = \int_{\beta_{2a}}^{\beta_{2b}} l_2 \frac{W_2}{2} \cos \beta d\beta + l_1 \left( \frac{W_1}{2} + \frac{3}{4} P \right) (\text{sen } \theta_2 - \text{sen } \theta_1) = \frac{l_2 W_2}{2} (\text{sen } \beta_{2b} - \text{sen } \beta_{2a}) + l_1 \left( \frac{W_1}{2} + \frac{3}{4} P \right) (\text{sen } \theta_2 - \text{sen } \theta_1)$$

ecu 1.24

Para calcular los torques que debe desarrollar el motor que mueve el brazo se deben tener en cuenta el peso que va a mover la pinza, el peso de la pinza y su carcasa, el peso del antebrazo y su carcasa, el peso del motor que mueve la pinza, el peso del brazo y su carcasa y el peso del motor que mueve el antebrazo como se muestra en la gráfica 1.11.

$$W_{1-2} = \frac{W_3 l_3}{2} (\text{sen } \beta_{3b} - \text{sen } \beta_{3a}) + \frac{l_2 W_2}{2} (\text{sen } \beta_{2b} - \text{sen } \beta_{2a}) + l_1 \left( \frac{W_1}{2} + \frac{3}{4} P \right) (\text{sen } \theta_2 - \text{sen } \theta_1)$$

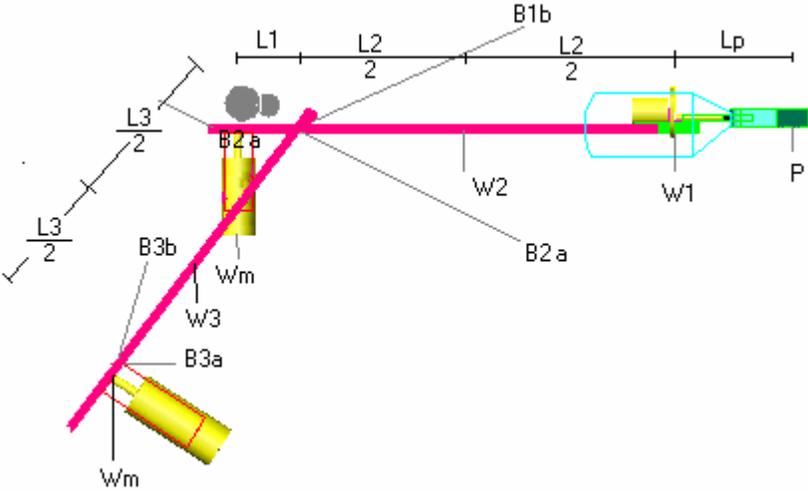
ecu 1.25

Los torques que deben ser desarrollar por cada uno de los motores se listan en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Torques que se deben vencer en cada uno de las uniones de las articulaciones.

Parte	T carga [Nm]
Mano	0.618
Antebrazo	3.243
Brazo	4.335

Ilustración 1.11 Diagrama de cuerpo libre para calcular el trabajo del brazo



El motor de la pinza se calculó a prueba y error porque no se tenían parámetros suficientes que guiaran una correcta selección.

## 2 GENERALIDADES DEL MOTOR DE C.C.

Los motores de corriente continua están formados básicamente por una parte móvil llamada ROTOR y otra fija llamada ESTATOR. El estator en los servomotores, está compuesto de imanes permanentes y por tal razón no se puede hacer control sobre este; es el encargado de producir el flujo magnético que creará la fuerza necesaria para que el motor se mueva. El rotor está compuesto de un devanado cuyo diseño permite que siempre haya dos campos magnéticos repeliéndose para producir el movimiento; sobre este circuito se puede tener control y se le pueden controlar tanto la tensión como la corriente. Estas dos partes crean un torque electromagnético que se va a convertir en una fuerza y se encuentra disponible en el eje del motor.

La fuerza con que se repelen los campos depende de la corriente del circuito de armadura y el campo producido en los imanes permanentes. Además, la velocidad con que se mueve el rotor depende de la tensión de alimentación, la unión de estas dos características posibilitan al motor de corriente continua que solo controlando un circuito se pueda controlar el torque y la velocidad; haciendo por ahora el candidato más acertado para trabajar en robótica. Además posee otras características favorables como son:

- Baja relación peso potencia.
- Bajo momento de inercia en el rotor.
- Las tensiones de alimentación son bajas.
- Simplicidad en el control de posición y velocidad.
- La aceleración y el frenado se pueden controlar por medio de la tensión de alimentación.
- Presenta buen comportamiento térmico.
- Con un circuito de control sencillo, como lo es el puente en H, se puede tener control total del motor.

### 2.1 MODELO EN BLOQUES DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA.

En esta sección se presentará el desarrollo del diagrama de bloques para observar el comportamiento del motor de corriente continua y sacarle más provecho en el control de máquinas mecánicas, ya que sobre los otros elementos que comprenden el robot no se puede tener control.

Teniendo como base las leyes de Faraday podemos citar la tensión que se induce en un conductor.

$$E=(B \times V) \cdot L \quad \text{ecu 2.1}$$

Como se puede observar en la ecuación la tensión generada en un conductor depende de la densidad de campo B (establecida por los imanes permanentes), de una velocidad lineal V, que se convierte en rotacional por medio de la ecuación  $V=w*r$ , y de la longitud del conductor dentro del campo magnético, estos parámetros son constantes para un servomotor, en el rotor solo se puede controlar la velocidad de rotación. Haciendo los reemplazos apropiados se puede afirmar que la tensión inducida en un conductor depende de la velocidad de rotación del mismo en un campo magnético como se observa en la siguiente ecuación:

$$E=K_e W \quad \text{ecu 2.2}$$

Una segunda ecuación que servirá para describir el comportamiento del motor se deriva del comportamiento eléctrico del circuito de armadura como:

$$L \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + E_g = V_a \quad \text{ecu 2.3}$$

Esta ecuación interrelaciona los fenómenos eléctricos, mecánicos y de tensión inducida que se presenta en el motor. El motor se debe alimentar con una tensión V en bornes del rotor, Esta tensión produce una corriente  $I_a$  que genera un torque y hace mover el rotor y este por estar en movimiento crea una fuerza contraelectromotriz  $E_g$  inducida en los conductores del rotor. Como la tensión con que se va a alimentar el rotor no es constante (se va a alimentar la armadura utilizando técnicas de PWM) la inductancia empieza a tener efectos en el circuito. Ahora bien, el único factor que falta por definir es de que depende la corriente del motor.

Para determinar de que depende la corriente del motor se hace referencia de la fuerza F que experimenta un conductor que lleva una corriente eléctrica I en un campo magnético con densidad B;

$$F=(I \times B).l. \quad \text{ecu 2.4}$$

La fuerza depende de la densidad de campo B (que permanece constante) de la corriente I que circula por el conductor, y de la Longitud del mismo dentro del campo. La relación que hay entre la fuerza y el torque se pueden expresar como  $T = F \times R$  donde R es el radio del rotor del motor; haciendo un tratamiento matemático se puede llegar a la conclusión que la corriente es directamente proporcional al torque y se pueden relacionar por la ecuación:

$$T=K_t * I_a \quad \text{ecu 2.5}$$

Se debe desarrollar una ecuación que relacione los torques de carga, los torques producidos por el motor y las características de los elementos mecánicos que se han desarrollado en el capítulo 1 de la siguiente forma:

$$J \cdot \alpha + B \cdot w + T_c = T_m \quad \text{ecu 2.6}$$

Aquí se relaciona el momento de inercia  $J$ , torques de carga  $T_c$ , velocidad  $w$ , coeficientes de rotación  $B$ , torque motor  $T_m$ , y la aceleración, la constante de rozamiento viscosa y los torques de carga y motor. Expresando las anteriores ecuaciones en Laplace se llega a las ecuaciones que rigen el comportamiento del motor y la carga expresadas en función de la variable compleja  $S$ :

$$e_b = k_b \theta s \quad \text{ecu 2.7}$$

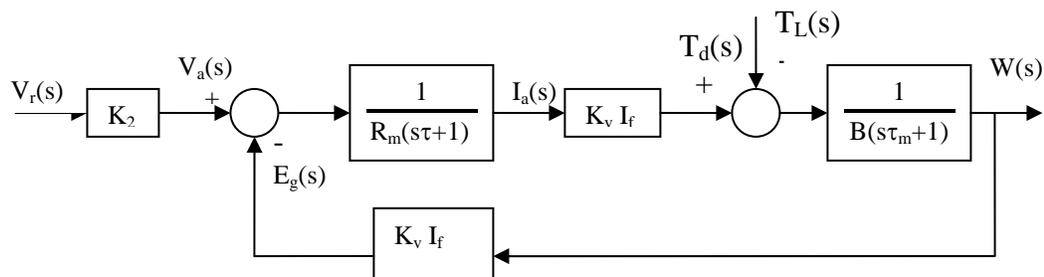
$$(1s+r)i(s) + e_b = V_a \quad \text{ecu 2.8}$$

$$T = K_p i(s) \quad \text{ecu 2.9}$$

$$w(s) = (T_m(s) - T_c(s)) / (Js + B) \quad \text{ecu 2.10}$$

Se debe tener en cuenta la retroalimentación que existe entre la intensidad y velocidad como se muestra en la figura 2.1:

Ilustración 2.1 Diagrama de bloques del servomotor.



En este diagrama nos da un primer enfoque de la complejidad que tiene el control de un brazo robot que se puede resumir de la siguiente manera:

- Momento de inercia  $J$ : el efecto de esta variable solo se presenta cuando hay cambios de velocidad, aceleraciones, o perturbaciones en ella y da una idea que tan rápido puede responder el sistema ante ellas.
- Constante de viscosidad  $B$ : produce un torque no útil en el movimiento, depende de los materiales con que está construido el motor, suele ser pequeño, no tiene linealidad y va a crear un torque opuesto al movimiento del motor. Este es proporcional a la velocidad. En la gráfica 1.1 se puede tener una idea aproximada del comportamiento de esta variable y del torque que produce.

- Momento de carga del brazo: este momento depende de la posición en que está la articulación y tiene un comportamiento cosenoidal (exclusivo para ésta aplicación). Este se le va aplicar al brazo para que tenga un desplazamiento útil.
- Inductancia L: junto con la resistencia de armadura indican la rapidez con que puede cambiar la corriente en la armadura. Esta variable generalmente se desprecia por que en control convencional se alimenta con corriente continua pero para esta investigación cobra bastante significado por el hecho de que el motor se va a alimentar con ondas PWM que van a ser variables en el tiempo y como tal generan una tensión de pérdidas.
- Resistencia de armadura: esta resistencia debe observarse como un obstáculo, ya que allí se va a disipar parte de la energía eléctrica que se le entrega al motor, además lo calentará y limitará la potencia, así como también los valores de las constantes  $K_t$  (constante del torque) y  $K_e$  (constante de velocidad). Cuando se haga la selección del motor este es un parámetro que se debe mantener lo más bajo posible.
- Posición del motor: normalmente es la variable a controlar en el posicionamiento del brazo; esta se debe controlar de forma indirecta, ya que al motor de c.c. solo se le puede controlar la velocidad. Para conseguir un buen posicionamiento se usarán las técnicas de aceleraciones trapezoidales y el control por PWM combinadas con un *encoder* óptico.
- Constantes  $K_g$  y  $K_t$ : estas constantes son características del motor y una vez construido no se pueden alterar (solo si la temperatura del motor se eleva).
- Corriente del circuito de armadura: esta corriente va a ser la responsable del funcionamiento del motor, por tal razón se debe controlar con especial cuidado. Dependiendo de la corriente se va a controlar el torque, temperatura interna del motor, pérdidas de potencia, una regulación de velocidad (caída de tensión en  $R_a$ ).
- Tensión de alimentación: esta va a ser tomada de un transformador y va a ser constante. Su valor se va a controlar usando técnicas de PWM para poder hacer compensaciones de velocidad a medida que se cambie la carga del brazo.

## 2.2 ARRANQUE DE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

Para analizar el motor en este instante se parte de la ecuación que rige el circuito de armadura:

$$V_a = E_g - R_a I_a \quad \text{ecu 2.11}$$

$$V_a = K_g W - R_a I_a \quad \text{ecu 2.12}$$

Como se está en el momento del arranque la velocidad  $W$  es cero; lo que implica que el motor va a tomar una corriente alta en el momento del arranque, que solo es limitada por la resistencia de armadura. En servomotores, las resistencias de armadura son de algunos ohmios (entre 10 a 25  $\Omega$  para motores de 12V, 10W) que someten al motor a unas corrientes entre (12 y 2 A) en este momento, siendo la corriente nominal es al rededor de 3A a 1A. Los motores usados en la investigación no tienen problemas graves por que las fuentes de alimentación son pequeñas y por casuística (combinación de límites físicos) llegan solo a tener entre 5 y 2A por cortos periodos, por lo cual las implicaciones son mínimas. Si se necesita motores más grandes se debe limitar la corriente usando los métodos de arranque que se estudian en el control de máquinas clásico. En el momento de arrancar o frenar el motor es importante limitar la corriente máxima teniendo en cuenta las curvas características del motor para no dañarlo y acortar su vida útil.

El principal problema que se debe enfrentar en el momento del arranque es limitar la corriente y generalmente se limita a una, dos (recomendable en robótica) o tres veces la corriente nominal para evitar traumatismo en las instalaciones mecánicas (aceleraciones altas que pueden romper las máquinas) y en las eléctricas (caídas de tensión en los equipos instalados en paralelo), o en las propias del motor (temperatura máxima). Para limitar la corriente hay dos métodos; uno es insertándole una resistencia en serie con la armadura y otro disminuyendo la tensión de alimentación del circuito de armadura. El método utilizado en esta investigación, es el segundo, ya que con esta se controla la velocidad de giro, no se aumentan las pérdidas de energía eléctrica excesivamente, el motor puede desarrollar su máximo torque; el control se hace desde una pocas revoluciones hasta la velocidad nominal y adicionalmente se puede obtener de forma sencilla en un microcontrolador haciendo uso del PWM.

Dentro de los arranques con control de tensión se pueden obtener arranques con control por límite de tiempo y arranque con límite de corriente y por control de tensión de armadura, que es tal vez la más ventajosa en robótica

### **2.2.1 ARRANQUE POR LÍMITE DE TIEMPO**

Este arranque limita el tiempo necesario para que el motor se lleva de velocidad cero a la nominal controlando el tiempo, es decir se estipula un tiempo preciso para que el motor llegue a la velocidad deseada y se descuida un poco los picos de corriente que pueda tener el motor para que el motor cumpla su cometido. Se recomienda averiguar los torque máximos que soporta el motor y las piezas mecánicas para evitar daños. Este método somete al motor y la estructuras mecánicas a torque altos (especialmente cuando el brazo está sin carga) debido a las altas aceleraciones que se presentan; no se tiene control de las corrientes del circuito de armadura y además someten al motor a temperaturas altas. Este método es tal vez el menos preciso de todos. El cuidado que se debe tener es no darle poco tiempo en la aceleración (debe ser mayor que un  $\tau_m$ ), ya que, muchas veces el sistema no

alcanza a reaccionar correctamente. Este método es el que se va a usar en la presente investigación, ya que con la selección de un buen tiempo de aceleración se mantienen bajas las corrientes y las cargas a manipular no presentan aceleraciones fuertes. Para el usuario el tiempo está dado por  $C \cdot 0.54$  seg donde C puede variar entre 0 y 100. Después de varias pruebas se ha notado que una constante  $C=10$  da buenas características de movimiento, no recalienta el motor, la carga se acelera con suavidad y las corrientes se mantienen en valores cercanos al nominal.

## **2.2.2 ARRANQUE POR LÍMITE DE CORRIENTE.**

Como su nombre lo indica este método controla la corriente máxima que el motor puede tomar en un instante (indirectamente se está controlando el torque) y se descuida el tiempo que toma el motor para que llegue a su máxima velocidad. Este tiempo depende de la carga que esté manejando en el momento de energizarlo; si el motor no tiene carga el tiempo va a ser muy corto y si el motor tiene la carga nominal o máxima el motor se va demorar un poco. Este método se usa normalmente en motores de gran tamaño y los circuitos de control son complejos como lo son sus algoritmos. Los motores usados en esta investigación tienen límite de corriente, esta se mantiene dentro de los rangos de operación por los cálculos de diseño de los puentes en H que manejan cada motor.

## **2.3 FRENADO DE MOTORES DE CORRIENTE COTINUA.**

El frenado de motores en robótica es muy importante porque permite llevar el brazo o articulación a la posición deseada con velocidad y aceleración cero (necesarias para que haya un posicionamiento con poco error). Si se llega a la posición con una velocidad y aceleraciones diferentes se tienen posicionamientos con errores.

### **2.3.1 FRENADO NATURAL.**

Es un frenado, en el que se deja que el motor pierda velocidad por medios naturales (la energía cinética debida a las inercias de los cuerpos se disipa como calor o se almacenan en forma de posición). Este método es dependiente de la carga y de su momento de inercia. Si se tiene un alto torque de carga el tiempo de frenado es corto, si la carga presenta momentos de inercia altos, el tiempo de frenado, también se aumenta, por esta razón este método presenta errores grandes cuando se controlan robots, ya que dependiendo de la carga que lleve en cierto momento el brazo puede detenerse antes o después.

### **2.3.2 FRENADO A CONTRACORRIENTE.**

Aquí se le invierte la polaridad al motor y se le mantiene por un pequeño tiempo, lo suficiente pequeña para no invertir el sentido de giro. Este tipo de frenado resulta más fuerte para el motor que el frenado anterior, ya que al eje del motor se le adiciona un torque de frenado, al hacer la inversión de giro, que puede tener corrientes que pueden llegar a ser el doble del torque de arranque y la velocidad se pierde mucho más rápido, sometiendo las cargas a desaceleraciones fuertes.

### **2.3.3 FRENADO REOSTATICO.**

En este tipo de frenado, el motor se convierte en generador (aprovechando la energía almacenada en las inercias y las convierte en eléctricas) y la energía se disipa en una resistencia externa. El tiempo de frenado resulta influido por el valor de la resistencia; si la resistencia es pequeña el motor se para rápidamente y si su valor es grande el tiempo de frenado es más grande, al final este tipo de frenado es similar al frenado natural, solo que con este el motor va a llegar a una velocidad cero más rápidamente.

### **2.3.4 FRENADO CON CONTROL DE VELOCIDAD O REGENERATIVO.**

Este tipo de frenado es el más aconsejable en el uso de motores que mueven robots, ya que se le puede quitar velocidad al motor a una rata constante (controlado por el usuario) y se tiene control en todo el rango del frenado. Adicionalmente con este método se controla la aceleración y se evitan daños o fracturas en la estructura mecánica del motor, se puede controlar con mayor precisión la posición final del elemento. Este método es el que se va a utilizar en la presente investigación, ya que se puede conseguir de forma fácil utilizando técnicas de PWM y un sencillo puente en H.

Existen dos métodos para frenar el motor por medio de este método, usando una rampa de desaceleración por tiempo y una segunda que consiste en quitarle la velocidad en forma proporcional al error de posición. El segundo no se encuentra influenciado por la carga y es más preciso que el primero. Por otra parte, el primer método es bastante influenciado por la carga del motor y por la posición del brazo. Para obtener un buen posicionamiento por este método es necesario entrenar la red neuronal con casos estadísticos. El método usado en esta investigación es de forma proporcional a la posición, solo que se usa una red neuronal del tipo ADALINE para lograr este cometido, la metodología se explica en el capítulo 3.

## 2.4 CONTROL DE VELOCIDAD

Como se dijo anteriormente el control de velocidad se hace controlando la tensión de armadura del motor y se puede hacer uso de la ecuación.

$$W=(V_a-I_aR_a)/K_g \quad \text{ecu 2.13}$$

En esta ecuación hay dos términos que modifican el comportamiento lineal de la velocidad con respecto a la tensión de alimentación. El término  $R_a I_a$ , es un término, que depende de la corriente de armadura o de carga del motor; si la corriente es baja (funcionamiento en vacío o con poca carga) la velocidad no va a cambiar significativamente. Pero si la carga es alta la velocidad se va a caer grandemente ( $E_g=V_a-R_a I_a$ ); de los análisis anteriores se puede afirmar que la velocidad del motor es modificada por la corriente de armadura. Como la velocidad cambia dependiendo de la carga, la posición también variará, y para ello se debe tener un mecanismo de interpolación. Al hacer control de velocidad es importante alimentar el motor con un valor de tensión un poco por arriba de la nominal para compensar este efecto y así alcanzar la velocidad máxima.

Si se desea llevar con precisión el brazo de una posición a otra, es necesario, llevarlo a una velocidad constante y hacer la compensación de este término. En esta investigación se hace el control de velocidad sin esta compensación y al final del posicionamiento la red neuronal se encarga de mantener un ancho de pulso proporcional al error de posición.

### 2.4.1 CONTROL DE VELOCIDAD POR MEDIOS CONTINUOS

Este tipo de alimentación trabaja de forma similar a como se controla la tensión de salida en un amplificador de audio, es decir, se va variando un nivel de tensión en la salida, sin presentar cambios bruscos en ella, Este tipo de control es costoso (en operación e implementación), debido a que los transistores y resistencias del circuito de potencia están continuamente disipando energía, situación que los obliga a tener tamaños y disipadores grandes. Adicionalmente, este tipo de control no somete a las articulaciones a ningún tipo de vibraciones ni perturbaciones adicionales.

### 2.4.2 CONTROL DE VELOCIDAD POR PWM.

Es el tipo de control más económico porque los transistores y resistencias con las que se implementan los circuitos son de tamaño reducido. Los transistores trabajan en la clase D (corte y saturación) y además tienen una frecuencia de trabajo que es elevada (de algunos KHz). Este tipo de control puede llegar a ser problemático debido a la continua energización y desenergización del motor, si se hace a bajas frecuencias. La tensión de salida de este tipo de amplificadores es directamente proporcional al tiempo de encendido y

se aconseja tener constante el periodo de la señal cuadrada (se pueden relacionar por la fórmula  $V_{out}=V_{in} \cdot T_{on}/T^5$ ). Además este tipo de amplificador no necesita que la fuente de energía tenga un rizado excesivamente bajo como sucede con los otros tipos de amplificadores. Para lograr un óptimo desempeño del motor con este tipo de control se necesita que el periodo de conmutación esté por debajo de la constante de tiempo mecánica del brazo y el mínimo debe ser igual o superior a la constante eléctrica del circuito de armadura ( $L_a \cdot R_a$ ). Teniendo en cuenta estos dos límites el motor se desempeña muy bien.

## **2.5 INVERSIÓN DE GIRO DE LOS MOTORES DE C.C.**

Para invertir el sentido de rotación solo se necesita invertir la polaridad a la tensión de alimentación del circuito de armadura. En robótica es aconsejable, casi obligatorio, parar (esperar que la velocidad llegue a cero) el motor antes de invertir el sentido de giro del motor debido a que las cargas se someten a torques demasiado altos (ver frenado a contracorriente).

## **2.6 DRIVER DE LOS MOTORES DE C.C.**

Para controlar los motores de c.c. se pueden utilizar dos tipos de control el electromagnético (usa principalmente contactores o relevos) y los métodos electrónicos (transistores, SCR, triacs, etc). El primero de ellos, es una forma bastante económica, (cuando se trata de motores de medianas y grandes potencias) pero no se pueden aplicar a la robótica debido a las imprecisiones que se derivan del comportamiento de los relevos. Cuando haya que controlar un motor para robótica se hace obligatorio el control de los motores por medios electrónicos. Para hacer este tipo de control se han desarrollado dos circuitos básicos.

### **2.6.1 CIRCUITO EN T.**

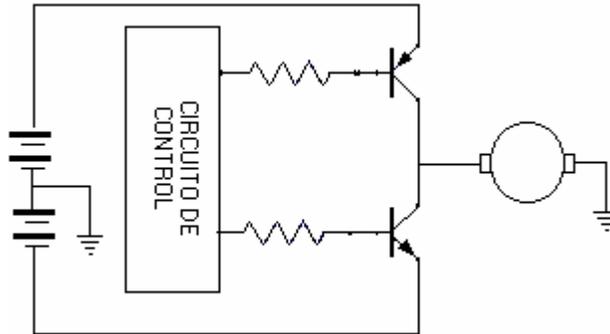
Este tipo de circuito se muestra en la gráfica 2.2 y consta de un fuente dual con dos niveles de tensión, que puede ser implementada con un transformador con tap central (trifilar, dos fases y un neutro), un puente de diodos, encargado de rectificar la tensión, o sencillamente con dos baterías, También se necesitan dos transistores, uno para manejar la

---

<sup>5</sup> La demostracion se encuentra en Richardsson, 1998

corriente que viene del positivo hasta el motor y otro para manejar la corriente desde el terminal de tierra hasta el negativo de la fuente del terminal negativo. Este tipo de control necesita menos transistores, los cuales deben trabajar en la zona de corte y saturación. La fuente debe tener tap central. Puede tenerse un control completo de los parámetros del motor, arranque control de velocidad, frenado e inversión de giro.

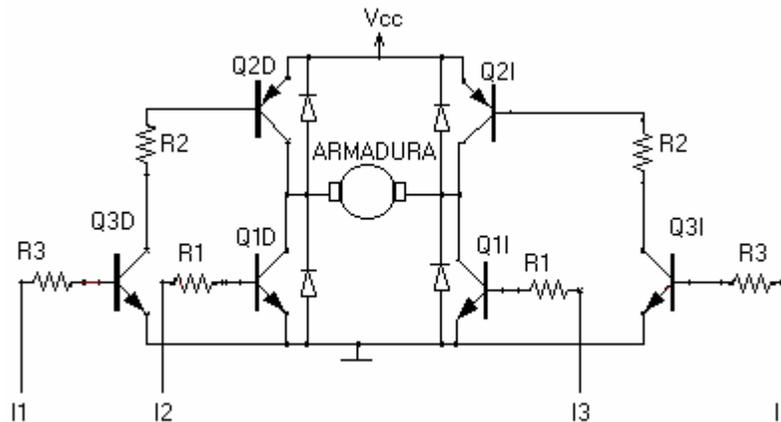
Ilustración 2.2 Circuito en T para el control de motores en robótica



### 2.6.2 CIRCUITO EN H.

Este tipo de driver se puede utilizar cuando se dispone de fuentes monopolares (una fase y un neutro) y contiene seis transistores como se muestra en la gráfica 2.3. Cuando se desee que el motor gire en un sentido se energizan los transistores Q1D y Q2I y para invertir el sentido de giro se energizan los transistores contrarios Q2D y Q1I. Este tipo de control permite hacer frenados (energizando Q1D y Q1I o Q2D y Q2I), inversión de giro, control de velocidad, arranques suaves; es decir es el tipo de control más versátil que se pueda usar en robótica. Este tipo de driver fue el implementado en la tesis, ya que presenta una estabilidad mejor que la del driver en T, el diseño es sencillo, da más estabilidad al funcionamiento del motor, necesita una fuente monopolar, no se necesita aisladores entre el driver y el circuito de control, las corrientes que necesitan los transistores en las bases son bajas, se necesitan dos terminales de control para un control completo del motor.

Ilustración 2.3 Puesto en H para el manejo de motores



## 2.7 PRINCIPALES CARACTERISTICAS DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA.

A continuación se describirán los parámetros más importantes que se deben tener presentes en el momento de la selección del motor de corriente continua para lograr un control para no sobrepasar las especificaciones sin correr el riesgo de dañarlo.

*Potencia nominal:* es la potencia máxima con la que se recomienda trabajar el motor en forma continua. Corresponde a la potencia de salida en el eje del motor ( $\tau \cdot \omega$ ), resulta de la multiplicación de torque por la velocidad de rotación y se denota por  $P_n$ . Esta potencia también tiene su respectiva parte eléctrica ( $E_g \cdot I_a$ ) que corresponde a la fuerza contraelectromotriz inducida en la armadura multiplicada por la corriente del mismo circuito.

*Voltaje nominal:* Es la tensión que se debe aplicar al motor para que pueda desarrollar la velocidad nominal en vacío; no se recomienda sobrepasarla porque se deterioran rápidamente los cojinetes y se corre el riesgo de calentar el motor. El rango de operación puede ir desde 0 hasta que se alcance la potencia nominal de salida recomendada (limitada por el torque que puede soportar el eje del motor y la temperatura de los devanados del circuito de armadura).

*Velocidad sin carga:* Es la velocidad que alcanza el motor con la tensión nominal y sin carga en el rotor. Es proporcional a la tensión de alimentación.

*Torque de arranque:* Es el torque que puede desarrollar el motor en el momento de energización y se encuentra limitado por la corriente de arranque. Este torque se ve afectado por la temperatura de operación del motor (a mayor temperatura menor torque), no se recomienda arrancar de forma sucesiva el motor a plena tensión (ver arranque del motor de c.c.).

*Corriente en vacío:* Es la corriente que requiere el motor cuando está operando sin carga y es proporcional a la velocidad (tensión) de funcionamiento del motor. Esta corriente es necesaria para vencer los torques de fricción y mantener funcionando el ventilador.

*Corriente de arranque:* Es el cociente entre la tensión de alimentación y la resistencia en terminales del motor (el motor está parado), además, el torque de arranque es proporcional a esta corriente.

*Resistencia en bornes:* Es la resistencia física de los devanados de armadura del motor, responsable de la regulación de velocidad del motor y de la temperatura de operación del motor (gran generadora de potencia de pérdidas). En el momento de escoger un motor se recomienda mantener este valor lo más bajo posible.

*Máxima velocidad permitida:* Esta velocidad no debe ser sobrepasada durante la operación del motor, ya que se pueden presentar problemas en el colector debido a la conmutación rápida y puede sobrecalentar los rodamientos del motor acortándole su vida útil.

*Corriente máxima continua:* Corriente nominal del motor que no se debe sobrepasar durante mucho tiempo cuando el motor opera por largos periodos. Se puede sobrepasar ocasionalmente siempre y cuando la temperatura máxima permitida no sea sobrepasada.

*Torque continuo máximo:* Es el torque promedio que puede entregar el motor sin calentar excesivamente los devanados del mismo. Tiene relación directa con la corriente promedio del motor.

*Máxima potencia de salida:* Es la potencia máxima que puede entregar el motor sin que la temperatura la máxima permisible no se exceda de 25°C. Ningún límite máximo debe sobrepasar este valor.

*Eficiencia máxima:* la eficiencia máxima se puede expresar como una relación entre la potencia que ingresa al motor y la potencia neta que entrega en el eje a una carga específica. La eficiencia máxima se consigue aproximadamente a un séptimo de la corriente de arranque.

*Constante de torque:* Se refiere a un torque específico, y es el cociente entre el torque generado y la corriente de armadura.

*Constante de velocidad:* Representa el cambio de velocidad por el cambio en un voltio en la tensión de alimentación del circuito de armadura.

*Constante de tiempo mecánica:* es el tiempo necesario para que el eje del motor vaya desde el reposo hasta el 63% de la velocidad nominal. Se considera que el rotor llega al 99% de su velocidad máxima en 4 constantes de tiempo. Cuando el motor opera sin carga.

*Momento de inercia:* representa el momento de masa inercial que tiene el rotor.

*Inductancia en terminales:* es la inductancia del devanado de armadura cuando el rotor está en reposo y generalmente se mide con una onda senoidal de 1KHz (midiendo el ángulo de desfase).

*Resistencia térmica:* es una medida de la oposición a que el calor generado en los devanados del rotor llegue a la periferia del mismo sin tener disipadores adicionales.

## 2.8 ZONAS DE OPERACIÓN DEL MOTOR DE C.C.

En la gráfica 2.4 se pueden observar las zonas de operación del motor y las recomendaciones respectivas para su uso en ellas.

*Zona recomendada de operación:* Es la zona donde se debe mover el motor, en la cual no se está sobrepasando ningún parámetro y por ende el motor tendrá una larga vida. En robótica se debe tratar de operar en esta zona, aunque muchas veces es difícil debido a los cambios de torque que surgen al cambiar la posición de la articulación. Sin embargo se puede hacer uso de las otras zonas.

*Zona de operación continua:* Representa la zona de operación donde no se ha sobrepasado la máxima temperatura del motor referida a los 25°C. También se puede llamar zona térmica límite. En esta zona, la velocidad puede ser más alta que la nominal, lo cual representa una mejor ventilación, pero en algunos motores la corriente de armadura puede crecer lo que hace limitar la velocidad máxima. Si se trabaja por mucho tiempo el motor en esta zona la vida de los cojinetes o rodamientos puede reducirse.

*Zona de operación de corto tiempo:* En esta zona, el motor puede funcionar por corto tiempo, sin que se presente riesgo de daño por sobrecalentamiento de los devanados del circuito de armadura. Esta zona hace resaltar, que el motor puede operar con torques más altos que el nominal (las corrientes de armadura pueden ser mayores que la nominal) lo cual es bastante útil en el momento de arrancar o frenar el motor ya que en tales condiciones el motor debe desarrollar torque de aceleración adicional.

Ilustración 2.4 Zonas de operación del motor de c.c.



*Límite superior por velocidad:* Es la velocidad máxima que puede obtener el motor en un momento dado. Este límite depende de la vida de los cojines o rodamientos del motor. Adicionalmente si se trabaja con estas velocidades (tensiones por arriba de la tensión nominal) puede correrse el riesgo de debilitar la rigidez dieléctrica del aislamiento de los devanados debido a los transitorios que se presentan al conectarse, variar la carga o conectar el motor a la fuente de alimentación. Además se puede presentar inestabilidad en la operación del motor debido a la reacción de armadura. Recuérdese que la corriente de vacío se incrementa a medida que la velocidad va aumentando.

*Límite máximo de torque:* Este límite no se debe superar de ninguna forma, ya que se está poniendo en peligro el eje del rotor o los ajustes del motor y en caso de uso de esta zona se debe hacer durante intervalos cortos de tiempos, ya que las corrientes son altas y las pérdidas por calentamiento de los devanados del rotor empieza a ser críticas. Además en las máquinas grandes que no tienen polos de compensación, la distribución de flujo en los polos es irregular presentándose concentraciones de éste en ciertas zonas, lo cual produce pérdidas adicionales en el núcleo.

*Límite de potencia máxima:* Este límite depende de las características térmicas de los devanados del motor. Si en algún caso se trabaja el motor en esta zona se corre el riesgo de disminuir la vida útil del mismo.

## **2.9 RAMPA DE ACELERACIÓN.**

Hay muchos métodos para controlar la posición de un servomotor, entre los cuales se encuentran la rampa de aceleración trapezoidal que se puede ver en la gráfica 2.5. Esta se puede dividir en tres tiempos. Un  $t_f$  que es el correspondiente al tiempo es el cual se acelera el motor. En este intervalo de tiempo se debe llevar el motor desde una velocidad cero (reposo) hasta una velocidad deseada. Un segundo tiempo  $t_v$  en el cual el motor debe llevar lo más rápido posible la articulación desde el ángulo inicial hasta casi el final. Y un tercer tiempo  $t_f$  que es el encargado de posicionar la articulación con una velocidad cero; es decir controlar la desaceleración. Adicionalmente durante este tiempo el motor debe alcanzar la posición deseada con el menor error posible.

Como se puede observar en la gráfica 2.5, el posicionamiento no es completamente lineal sino que en los momentos correspondientes a  $t_a$  y  $t_f$  la trayectoria seguida es una parábola. Si se permiten cambios bruscos de aceleración durante estos intervalos, la catenaria empieza a ser pronunciada y se van a presentar grandes errores en el posicionamiento (matemáticamente no es fácil encontrarla). Por otro lado, la estructura mecánica va a sufrir y con el tiempo se desajustará. Durante este intervalo, también, se deben mantener lo

suficientemente bajas las corrientes de armadura para no sobrepasar la temperatura máxima del motor.

Teniendo ya control sobre las aceleraciones, es importante saber que velocidad máxima se le debe impartir a la articulación para que llegue a su destino final sin ningún percance y lo más rápido posible. Esta condición no se satisface fácilmente, ya que, la velocidad depende de la tensión de alimentación y esta a su vez se encuentra modificada por el valor de  $I_a R_a$  del circuito de armadura. En motores grandes este modificador no influye tanto, ya que el valor máximo que se puede conseguir es del orden del 10%. Pero en servomotores empieza a ser un poco más importante debido a la resistencia que presenta el motor. Por ejemplo, un motor de 9W tiene una resistencia aproximada de  $3\Omega$  y una corriente nominal cercana a 1.5A. Si se alimenta el motor a condiciones nominales (tensión de armadura y corriente nominal) nunca se podrá alcanzar la velocidad nominal. Por tal razón se deben hacer estimaciones para que el brazo se pueda mover con velocidad de un 60% a un 70% de la velocidad nominal.

Como bien se sabe, la corriente del motor depende del torque de carga y este a su vez depende del ángulo que forma la articulación con la horizontal y del sentido de rotación del motor. Si el motor debe elevar una carga, este debe hacer un esfuerzo más grande para vencer la gravedad mientras que si debe bajar la carga debe desarrollar un torque mucho menor al de subida debido al torque negativo (están en el mismo sentido del torque motor).

Durante la etapa de aceleración el método trapezoidal presenta las siguientes características:

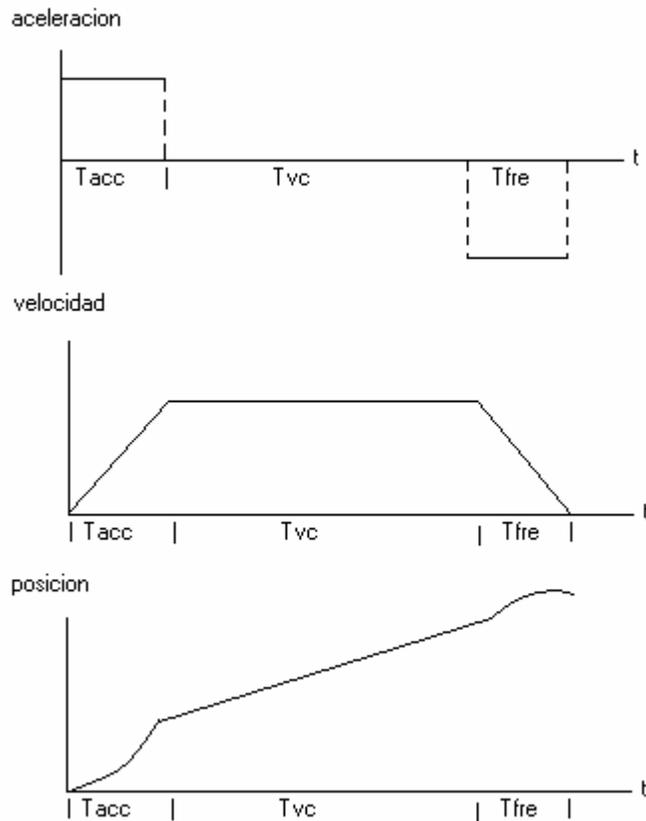
- Se necesita un alto torque para vencer el torque estático que presenta toda carga al iniciar el movimiento.
- Se necesita un torque lo suficientemente alto para poder acelerar la carga.
- Se debe tener un tiempo suficiente para no exponer a la articulación a una aceleración alta y no exigir al motor demasiada corriente y evitar así sobrecalentarlo.
- Se debe acelerar el motor de forma uniforme, para evitar posicionamientos erróneos.
- Se almacena energía potencial y cinética en la carga y el motor respectivamente.

La segunda etapa corresponde a la etapa de desplazamiento a velocidad constante, las características que se tienen son:

- Debe tener la máxima velocidad posible para no demorar la articulación.
- El motor debe tener la suficiente tensión en el circuito de armadura para mover la articulación y hacer la compensación de tensión en la resistencia de armadura  $R_a I_a$ .
- Puede tener acumulación de energía potencia en la articulación o puede almacenar energía potencial de la articulación en la fuente de alimentación (condensador).
- El torque desarrollado es exclusivamente dedicado a mover la carga y vencer las fuerzas de fricción.

- La máxima velocidad que se puede alcanzar depende del ángulo que este haciendo la articulación con respecto a la horizontal.
- La velocidad puede variar en un rango dependiendo del momento de inercia, torque de carga y fricción.

Ilustración 2.5 Rampa de aceleración trapezoidal



la tercera etapa corresponde a una etapa de frenado o desaceleracion para la cual se tienen las siguientes características:

- Hacer decrecer la velocidad hasta llevarla a cero.
- Debe tener el tiempo suficiente para no someter las cargas a torque elevados.
- Limitar las corrientes para no sobrecalentar los devanados del motor.
- La energía cinética del motor se debe almacenar en forma de tensión en el condensador.
- Puede existir la posibilidad de frenado regenerativo.
- El torque va en favor del movimiento.

La etapa que tiene más importancia en el posicionamiento del motor es la de velocidad constante, ya que esta tiene la duración más grande, y es donde se pueden presentar más perturbaciones. Para poder encontrar el tiempo que debe durar esta etapa se hace necesario

conocer la carga de la pinza, un estimativo del momento de inercia, las posiciones en que están las otras articulaciones, los posibles movimientos simultáneos entre articulaciones, posibles caídas de pesos en la carga (caso de manipular polvos o arenas) y las perturbaciones propias de los componentes mecánicos, etc. Por tales razones se hace necesario combinar la técnica de aceleración trapezoidal con un método de interpolación para poder predeterminar la posición.

## **2.10 SELECCIÓN DE LOS MOTORES UTILIZADOS EN ROBÓTICA.**

Las cantidades que se deben tener presente en el momento de calcular el motor son, momento de inercia  $J_L$ , torque de carga  $T_L$ , coeficiente de fricción  $B_L$ . Los torques de carga y el coeficiente de fricción deben estar referidos al eje del motor. Los pasos que se deben tener presentes son

- a) Cálculo del torque máximo y continuo.
- b) Cálculo de la corriente pico.
- c) Cálculo de la temperatura de la armadura.
- d) Requerimiento del voltaje pico de la fuente de alimentación.

Antes de iniciar el proceso se deben conocer los siguientes cantidades del brazo del robot.

$W_{pk}$	velocidad angular pico del motor (rad/seg).
$T_a$	tiempo de aceleración.
$T_{cv}$	tiempo de velocidad constante.
$T_s$	tiempo de frenado.
$T_d$	tiempo de parada.
$J_L$	momento de inercia de la carga.
$B_L$	coeficiente de fricción.
$T_L$	torque aplicado a la carga.
$\theta_{amb}$	temperatura ambiente.
$I_{psmax}$	corriente pico de la fuente.
$V_{psmax}$	voltaje de la fuente de poder máxima.

Como se dijo anteriormente el perfil de aceleración es trapezoidal para facilitar los cálculos de los diferentes torques.

### 2.10.1 CALCULO DEL TORQUE MÁXIMO Y PICO.

a) como un primer enfoque asuma que los parámetros del motor son todos cero ( $J_M=0$ ;  $T_F=0$ ;  $B=0$ ) para que:

$$J_{tot}=J_M+J_L=J_L \quad \text{ecu 2.14}$$

$$B_{tot}=B_M+B_L=B_L \quad \text{ecu 2.15}$$

$$T_{tot}=T_M+T_L=T_L \quad \text{ecu 2.16}$$

Haciendo los cálculos para cada uno de los tramos de la rampa de aceleración se puede dividir en:

$$T_{acc} = J_L \alpha_{acc} + T_L + B_L W_{pk} \quad \text{ecu 2.17}$$

$$= \frac{J_L W_{pk}}{T_a} + T_L + B_L W_{pk} \quad \text{ecu 2.18}$$

$$T_{cv} = T_L + B_L W_{pk} \quad \text{ecu 2.19}$$

$$T_{fre} = J_L \alpha_{fre} - T_L \quad \text{ecu 2.20}$$

$$T_{dwell} = T_L \quad \text{ecu 2.21}$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{t_a T_{acc}^2 + t_{cv} T_{cv}^2 + t_{fre} T_{fre}^2 + t_d T_{dwell}^2}{t_a + t_{cv} + t_{fre} + t_d}} \quad \text{ecu 2.22}$$

b) De una lista de los motores seleccione el más barato o el que menos peso tenga teniendo en cuenta los siguientes requerimientos:

$$T_{pico} > T_{acel} \quad \text{ecu 2.23}$$

$$T_{pico} > T_{fre} \quad \text{ecu 2.24}$$

$$T_{cont} > T_{rms} \quad \text{ecu 2.25}$$

c) Tome los valores de  $J_M$ ,  $T_M$  y  $B_M$  de la lista de los motores. Recalcule  $T_{acce}$ ,  $T_{vc}$ ,  $T_{fre}$ ,  $T_{rms}$ . Como sigue

$$T_{acc} = (J_M + J_L) \frac{W_{pk}}{t_a} + T_f + (B + B_L) W_{pk} + T_L \quad \text{ecu 2.26}$$

$$T_{cv} = T_f + (B + B_L) W_{pk} + T_L \quad \text{ecu 2.27}$$

$$T_{fre} = (J_M + J_L) \frac{W_{pk}}{t_s} - T_f - T_L \quad \text{ecu 2.28}$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{t_a T_{acc}^2 + t_{cv} T_{cv}^2 + t_{fre} T_{fre}^2 + t_d T_{dwell}^2}{t_a + t_{cv} + t_{fre} + t_d}} \quad \text{ecu 2.29}$$

d) Si los nuevos valores de  $J_M$ ,  $T_F$  y  $B$  no producen un cambio en el motor, se deja el motor seleccionado y si no satisface seleccione el siguiente motor de la lista y repita los pasos c) y.

### 2.10.2 CALCULO DE LA CORRIENTE PICO.

e) Para el motor seleccionado en el procedimiento anterior obtenga  $K_T$  de las tablas y la corriente de desmagnetización  $I_{max}$  y calcule los siguientes parámetros:

$$I_1 = \frac{T_{acc}}{K_T} \quad \text{ecu 2.30}$$

$$I_2 = \frac{T_{cv}}{K_T} \quad \text{ecu 2.31}$$

$$I_3 = \frac{T_{fre}}{K_T} \quad \text{ecu 2.32}$$

$$I_{pk} = \max(I_1, I_2, I_3) \quad \text{ecu 2.33}$$

f) Si  $I_{pk} > I_{max}$ , escoja el motor próximo de la lista, de tal forma que la corriente máxima sea superior. Repita nuevamente los pasos desde c) hasta e).

### 2.10.3 CALCULO DE LA TEMPERATURA DE LA ARMADURA

g) calcule:

$$I_{rms} = \frac{T_{rms}}{K_T} \quad \text{ecu 2.34}$$

$$\theta_{max} = \frac{R_a I_{rms}^2 R_{th}}{1 - R_a I_{rms}^2 R_{th} \Psi} \quad \text{ecu 2.35}$$

$$\theta_{arm} = \theta_{max} + \theta_{amb} \quad \text{ecu 2.36}$$

Donde  $\Psi$  es el coeficiente de resistencia térmica del cobre y es igual a 0.00393  
 $R_a$  resistencia de armadura  
 $R_{th}$  resistencia térmica de la armadura al ambiente.

h) si la  $\theta_{arm} < \theta_{max}$  continúe con el siguiente paso. En caso contrario seleccione el siguiente motor que pueda soportar la temperatura o repita el procedimiento desde el paso e) hasta el h).

## 2.10.4 REQUERIMIENTOS DE LA TENSION PICO DE LA FUENTE.

- i) Calcule la resistencia de la armadura a la temperatura de trabajo máxima del motor.

$$R_h = R_a [1 + \Psi(\theta_{arm} - 25)] \quad \text{ecu 2.37}$$

calcule el coeficiente para la velocidad del motor

$$N_0 = 9.593 * 10^{-3} w_{pk} \quad \text{ecu 2.38}$$

el voltaje pico de la tensión de armadura se obtiene escogiendo el valor máximo de los que aparecen a continuación.

$$V_1 = R_h I_1 + K_E N_0 \quad \text{ecu 2.39}$$

$$V_2 = R_h I_2 + K_E N_0 \quad \text{ecu 2.40}$$

$$V_3 = R_h I_3 + K_E N_0 \quad \text{ecu 2.41}$$

- j) si el de la tensión escogida en el paso anterior es superior a la tensión máxima que soporta el motor, pásese al siguiente y repita los pasos desde c) hasta j).

- k) Escriba en alguna hoja el número del motor, fabricante, el número del devanado, costo por unidad, y los parámetros más importantes  $I_{pk}$ ,  $V_{pk}$ ,  $T_{pk}$ ,  $T_{rms}$ ,  $\theta_{max}$ .

## 2.11 CALCULO DE LOS MOTORES

Para calcular los motores se debe observar la gráfica 2.5, donde se muestra la rampa de aceleración donde se distinguen tres partes, la primera es un tiempo donde se acelera la carga, la segunda es la parte donde se lleva el motor a velocidad constante y la tercera parte es donde se lleva el motor de una velocidad definida a una velocidad cero.

Para poder seleccionar los motores y la fuente de alimentación se deben tener los datos de torque máximo, torque promedio desarrollado por el motor y el momento de inercia del brazo que fueron obtenidos en el capítulo 1 y se deben referir al lado del motor (dividir por la relación de velocidad del reductor de velocidad, piñones) que se pueden describir en las siguientes ecuaciones.

$$T_{mon} = T_{brazo} * \frac{W_{brazo}}{W_{motor}} \quad \text{ecu 2.42}$$

$$I_{mon} = I_{brazo} * \frac{W_{brazo}}{W_{motor}} \quad \text{ecu 2.43}$$

donde T son los torques en cada una de las articulaciones y del motor  
 I momentos de inercia  
 W velocidades de rotación.

En el momento de la aceleración el motor debe ser capaz de vencer el torque propio de la carga y el torque acelerante. Los datos calculados en el capítulo se pueden retomar en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Cálculos de los parámetros del motor

Parte	T carga [Nm]	J carga [g-m <sup>2</sup> ]	T <sub>max</sub> carga [Nm]	T motor [mNm]	J motor [mg-m <sup>2</sup> ]	T <sub>max</sub> motor [mNm]
Mano	0.618	24.825	0.309	2.43	97.73	1.21
Antebrazo	3.243	54.6	2.061	12.76	214.96	8.11
Brazo	4.335	263	4.335	17.06	1.035	17.06

Los cálculos a continuación se hacen teniendo en cuenta los datos referidos al lado del motor (la potencia en ambos lados del reductor de velocidad debe ser igual)

En el momento de la aceleración el motor debe ser capaz de mover los torques de carga mas los torques acelerantes como se ve a continuación (se supone que el motor debe subir la carga)

$$P_{ace} = \frac{T_{carga}}{t_{ace}} + \frac{E_c}{t_{ace}} = \frac{T_{max} \text{sen} \theta / \theta_1}{t_{ace}} + \frac{I(w_f^2 - w_i^2)}{2t_{ace}} \quad \text{ecu 2.44}$$

En el momento que el brazo se mueva a velocidad constante el motor solo debe vencer las el torque de carga

$$P_{vel} = \frac{T_{max} \text{sen} \theta / \theta_1}{t_{vel}} \quad \text{ecu 2.45}$$

En el momento del frenado el motor debe recuperar la energía cinética dada al motor en la aceleración, favorece el movimiento del motor y seguir subiendo la carga. El motor debe ser capaz de tener un torque de frenado dado por:

$$P_{fren} = \frac{T_{carga}}{t_{fren}} - \frac{E_c}{t_{fren}} = \frac{T_{max} \text{sen} \theta / \theta_1}{t_{fren}} - \frac{I(w_f^2 - w_i^2)}{2t_{fren}} \quad \text{ecu 2.46}$$

Los resultados para los diferentes motores se pueden observar en la tabla 2.2

La potencia total del motor se debe seleccionar teniendo en cuenta la ecuación:

$$P = \sqrt{\frac{P_{ace}^2 * t_{ace} + P_{vel}^2 * t_{vel} + P_{fren}^2 * t_{fren}}{t_{fren} + t_{vel} + t_{fren}}} \quad \text{ecu 2.47}$$

Las potencias de cada uno de los motores se pueden observar en la tabla 2.3

Tabla 2.2 datos de potencias, tiempo de aceleración y velocidades de los diferentes motores del brazo

Motor	t <sub>ace</sub> [seg]	t <sub>vel</sub> [seg]	t <sub>fren</sub> [seg]	W/η [rad/seg]/rpm	P <sub>ace</sub> [mW]	P <sub>vel</sub> [mW]	P <sub>fren</sub> [mW]
Mano	1.5	2	1.5	209.43/2000	54.68	309	46.54
Antebrazo	1.5	10	1.5	240.85/2300	272	324	204
Brazo	1.5	15	1.5	209.43/2000	563	437	334

Tabla 2.3 Potencia de cada motor a usar en el brazo

Motor	Potencia mecánica [mW]
Mano	201.57
Antebrazo	309
Brazo	334

De acuerdo al manual dado por [maxon, 99] los motores seleccionados se pueden ver en la siguiente tabla 2.4.

Tabla 2.4 Parámetros de cada uno de los motores del brazo articulado

Motor	Valimen [V]	Potencia [W]	Tmax [mNm]	Tprom [mNm]	Kt [Nm/A]	Kg [rpm/V]	R arma [Ω]	Iarr [mA]	Ipro [A]
Grip	6	1.2	1	.5	0.065	333	20	400	200
Mano	6	3	2	1.2	0.071	360	10	600	350
Antebrazo	6	3	10	7	0.074	350	12	900	450
Brazo	9	5	15	10	0.078	300	7.8	1500	500
Base	6	3	2	1.2	0.074	360	10	600	380

Los desempeños de los motores una vez instalados en las diferentes posiciones se presentan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Desempeños de los motores instalados en el brazo

Motor	Corrientes [mA]	Tiempo ejecución [seg]	Corriente vacío [mA]	Velocidad [r. p. m.]
Grip	150	2	70	2300
Mano	330	5/4	150	1800/2000
Antebrazo	380-290	13/9	180	2197/2300
Brazo	450-360	9/9	180	1800/2000
Base	330	8	150	1800/2000

Las corrientes en la tabla 2.5 hacen referencia a las corrientes máximas y mínimas que toman de la fuente al moverse en la trayectoria completa.

Tiempos de ejecución: es el tiempo que demora la articulación de ir desde el punto más bajo al más alto y el de ir del mas alto al más bajo.

Las velocidades hacen referencia a la velocidad cuando debe subir una carga y cuando la baja.

## 2.12 CALCULO DEL CIRCUITO EN H PARA MANEJAR LOS MOTORES

Como se mencionó anteriormente el motor va a ser impulsado por un puente en H, ya que este permite acelerar, controlar velocidad, invertir el sentido de giro, controlar las corrientes máximas del motor y se conecta directamente con las salidas del microcontrolador.

El puente en H está compuesto por seis transistores. Dos PNP que se ubican en la parte superior de puente que son llamados Q2D y Q2I, los cuales son manejados por dos transistores NPN más pequeños Q3D y Q3I y en la parte inferior se encuentran dos transistores de potencia NPN Q1D y Q1I, estos últimos son manejados con las resistencias que aparecen en la gráfica 2.5 y que en conjunto pueden manejar a cabalidad el motor de corriente continua. En la presente investigación se montaron 5 puentes para manejar igual número de motores en el brazo. Los cálculos aparecen a continuación:

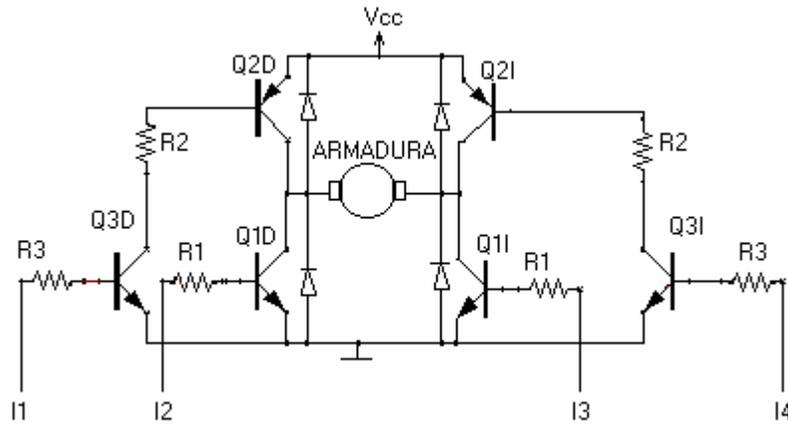
La corriente de diseño del puente debe ser la mayor de las corrientes de arranque, inversión de giro o frenado

$$I_{dis} = \max(I_{arr}, I_{fre}, I_{inv}) \quad \text{ecu 2.48}$$

La corriente que va por las bases de los transistores Q1 y Q2 se pueden halla como :

$$I_{b1} = I_{b2} = I_{dis} / (0.7 * \beta) \quad \text{ecu 2.49}$$

Ilustración 2.6 Puento en H para el control de los motores



Siendo la  $\beta$  la ganancia que aparece en los manuales. La resistencia R2 se puede calcular como:

$$R_2 = (V_{cc} - 0.7 - V_{CE2}) / I_{b2} \quad \text{ecu 2.50}$$

La potencia de esta resistencia viene dada por:

$$P_{R2} = I_{b2}^2 * R_2 \quad \text{ecu 2.51}$$

Los parámetros del transistor Q3 se rigen por las ecuaciones:

$$I_{C3} = I_{B2} \quad \text{ecu 2.52}$$

$$I_{b3} = I_{C3} / (0.7 * \beta) \quad \text{ecu 2.53}$$

$$R_{b3} = (2.5 - 0.7) / I_{b3} \quad \text{ecu 2.54}$$

Y esta debe ser menor de 7 mA para que pueda ser excitada por una salida TTL estándar, sino debe utilizarse un par darlington. Haciendo los cálculos para Q1

$$I_{b1} = I_{dis} / (0.7 * \beta) \quad \text{ecu 2.55}$$

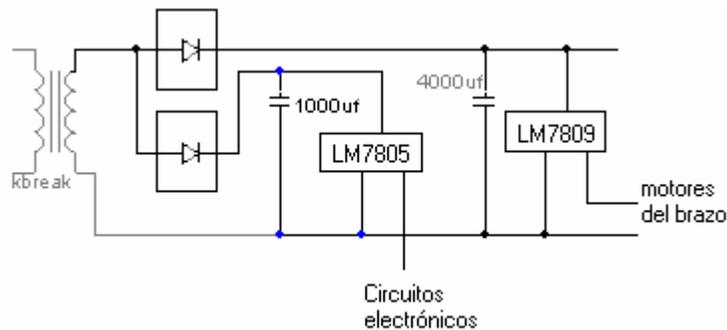
$$R_1 = (2.5 - 1.4) / I_{b1} \quad \text{ecu 2.56}$$

Nuevamente se debe tener cuidado de no sobrepasar la corriente que puede manejar un TTL normal.

## 2.13 CALCULO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA LOS MOTORES.

Para seleccionar la fuente de alimentación se hizo necesario tomar las corrientes máximas que consumían los motores con base en ellas se selecciona el transformador, los puentes rectificadores, los condensadores de filtrado, y los reguladores tensión para cada motor y para el circuito electrónico. La topología de la fuente de alimentación se puede observar en la gráfica 2.7. Aquí se puede observar que de un solo transformador de potencia se alimentan los circuitos electrónicos y los motores. Los motores se alimentan con un regulador de tensión LM7809 para mantener la tensión en los bornes del motor constante y así evitar que la velocidad de estos varíe enormemente; cada circuito tiene un condensador especialmente calculado para mantener el rizado lo más bajo posible. Cada disipador de energía está ubicado en la carcasa del brazo para que siempre esté en el rango de operación establecido.

Ilustración 2.7 Topología de la fuente de alimentación.



La tensión de alimentación del transformador se escogió teniendo en cuenta la tensión máxima de alimentación que debe tener cada motor y se le debe agregar la tensión mínima de alimentación que debe tener cada regulador [National, 95] y se puede resumir como:

$$E_{alim} = \max(V_{alim-motor}) + 3 = 9 + 3 = 12V \quad \text{ecu 2.57}$$

La corriente de la fuente se debe calcular sumando las corrientes que consume el circuito electrónico y la corriente máxima que consumen los motores. La corriente que consume el circuito electrónico se puede hallar

$$I_{led} = \frac{V_{cc} - V_{led}}{R} = \frac{5 - 1.2}{100} = 38mA \quad \text{ecu 2.58}$$

$$I_{cto} = n * I_{led} + I_{int egra dos} = 10 * 38mA + 43mA = 418mA \quad \text{ecu 2.59}$$

La corriente que consumen todos los motores se puede hallar por

$$I_{mot} = \sum I_{max-mot} = 0.330 + 0.1380 + 0.450 + 0.330 = 1.49A \quad \text{ecu 2.60}$$

La corriente que debe suministrar la fuente es:

$$I_{trf} = I_{cto} + I_{mot} = 1.46 + 0.418 = 1.908A \quad \text{ecu 2.61}$$

Se escoge un transformador TR9 fabricado por la industria laser que tiene una tensión de alimentación primaria de 120V, y en el secundario puede suministrar 2 A a 9V. El transformador se debe proteger por un fusible en el lado de alta tensión que tenga la capacidad de:

$$I_{fuse} = I_{sec} * \frac{V_{sec}}{V_{prim}} = 2 * \frac{12}{120} = 0.2A \quad \text{ecu 2.62}$$

En el mercado se puede encontrar fácilmente un fusible de 250mA

Los motores debe ser alimentados con un puente rectificador de onda completa, ya que el voltaje de rizado es el menor de todos y debe soportar mas de 1.5 A, Se escoge un puente rectificador de 2A y 400V. El condensador se debe seleccionar de tal manera que no permita un rizado mayor de 1V por medio de la ecuación:

$$C = \frac{I_{dc}}{4\sqrt{3}fV_{risado}} = 3584\mu f \quad \text{ecu 2.63}$$

El puente rectificador que alimenta el circuito electrónico debe soportar una corriente de 0.418A y debe tener un rizado menor de un voltio. El puente rectificador es de 1A y el condensador es de 1000 $\mu$ f.

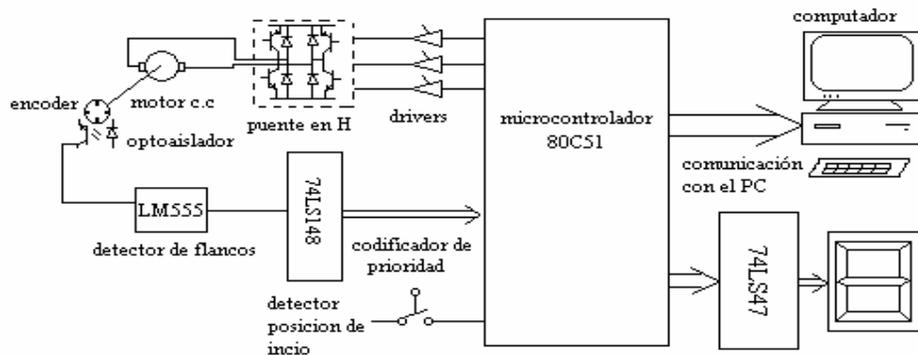
### 3 CONFIGURACIÓN DEL HARDWARE Y EL SOFTWARE DE BAJO NIVEL

En esta sección se describen los elementos de hardware que se desarrollaron en esta investigación. En las primeras páginas se explica el diagrama de bloques del prototipo y como fueron implementada cada etapa. Al final del capítulo se explican la forma como se comunica el microcontrolador con un computador, que significa cada palabra y el significado de cada bit.

#### 3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES.

El diagrama de bloques de esta investigación se presenta en la gráfica 3.1. Allí se pueden distinguir los siguientes bloques:

Ilustración 3.1 Diagrama de bloques de la investigación.



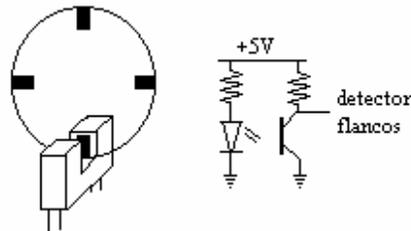
*Motor de corriente continua:* es el motor encargado de mover cada una de las articulaciones del brazo. El procedimiento para ser seleccionado se presenta en el capítulo dos de la presente investigación. Es accionado por un puente en H y el brazo cuenta con cinco unidades. Una que se encarga de mover o cerrar el grip, un segundo que mueve la muñeca, un tercero que mueve el antebrazo, un cuarto que mueve el brazo y un quinto que se encarga de mover la base del brazo que está sujeta a una mesa de trabajo.

*Puentes en H:* son los encargados de manejar cada uno de los motores antes mencionados. Los cálculos y circuito completo se encuentran en el capítulo 2. Se seleccionó este driver porque con este se le pueden controlar todas las características al motor de forma sencilla y

económica. El puente en H se controla con una señal PWM proveniente del microcontrolador; esta señal se genera fácilmente con un programa de microcontrolador que se discutirá con más detalle en este mismo capítulo.

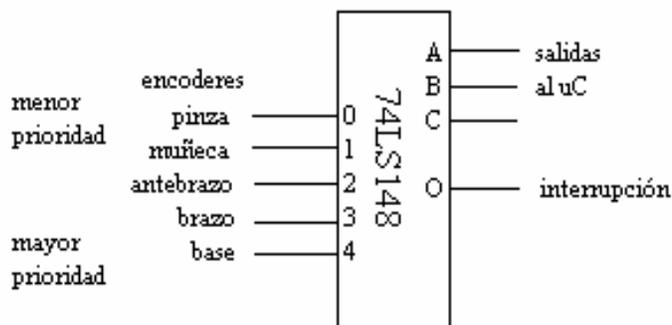
*Encoder:* los encoders se encargan de reportar señales al microcontrolador, movimientos del motor y el micro con una subrutina especial calcula la posición actual del brazo. El encoder está compuesto por un LED infrarrojo, un fototransistor y un círculo con sectores negros y transparentes. Este dispositivo es especial para el control de velocidad y posición de motores, ya que no tiene partes en contacto mecánico y con un software especial se pueden controlar o medir diferentes variables del motor como posición, velocidad y aceleración que a su vez transforman al encoder en el candidato casi único e ideal para el control del motor.

Ilustración 3.2 Descripción del encoder.



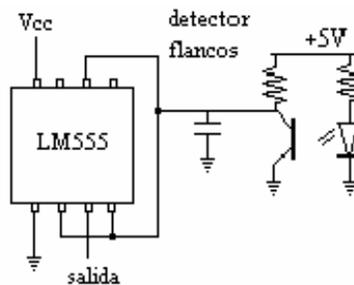
*Codificador de prioridad:* el codificador de prioridad es el sistema encargado de darle la mayor o menor importancia al movimiento de los motores (en caso de que se muevan simultáneamente), reduce los pines de conexión al microcontrolador y permite detectar el movimiento en un motor por medio de un pin de interrupción. Este codificador se activa con un nivel bajo en la entrada por lo cual es posible que se pierdan posiciones de los motores cuando el encoder del motor de más alta prioridad se encuentre accionado (interrumpiendo la luz entre el emisor y el receptor del encoder). Por tal razón fue necesario pasar la señal por un detector de flancos desarrollado con un LM555.

Ilustración 3.3 Codificador de prioridad.



*Detector de flancos:* este circuito desarrollado con un LM555 tiene la tarea de detectar cuando hay un flanco de bajada o de subida en la señal proveniente del encoder e informarle al detector de prioridad para posteriormente ser recibido por el microcontrolador.

Ilustración 3.4 Detector de flancos.



*Microcontrolador:* Se seleccionó el microcontrolador 89C51 de intel, ya que presenta gran cantidad de pines de entrada salida (40 configurables), timers (dos unidades que se pueden usar como contadores o timers), interrupciones externas (dos posibles interrupciones), facilidad de programación (programación en ensamblador para mejorar la velocidad), estabilidad aceptable en cuanto al ruido eléctrico, compatibilidad con circuitos TTL y de computador, facilidad de programación, economía, versatilidad, y permite llevar a cabo operaciones de división y multiplicación con facilidad.

El microcontrolador es un elemento clave en el sistema por encargarse de ejecutar las aceleraciones trapezoidales para cada motor, contabilizar la posición de los motores, comunicarse con el computador por el puerto paralelo, detectar cuando una articulación llega a una posición máxima, controlar la velocidad de los motores, y hacer el control de la posición de los motores usando una red ADALINE. La distribución de pines del microcontrolador se muestra en la gráfica 3.5.

*Drivers de los puentes en H:* Los drivers de los puentes en H están constituidos por un integrado 74LS241 que es un buffer no inversor de tres estados y se encargan de reforzar la corriente proveniente del microcontrolador, ya que estos no pueden dar la corriente necesaria para manejarlos cuando todos operan simultáneamente, además permite aislar el sistema de potencia del microcontrolador.

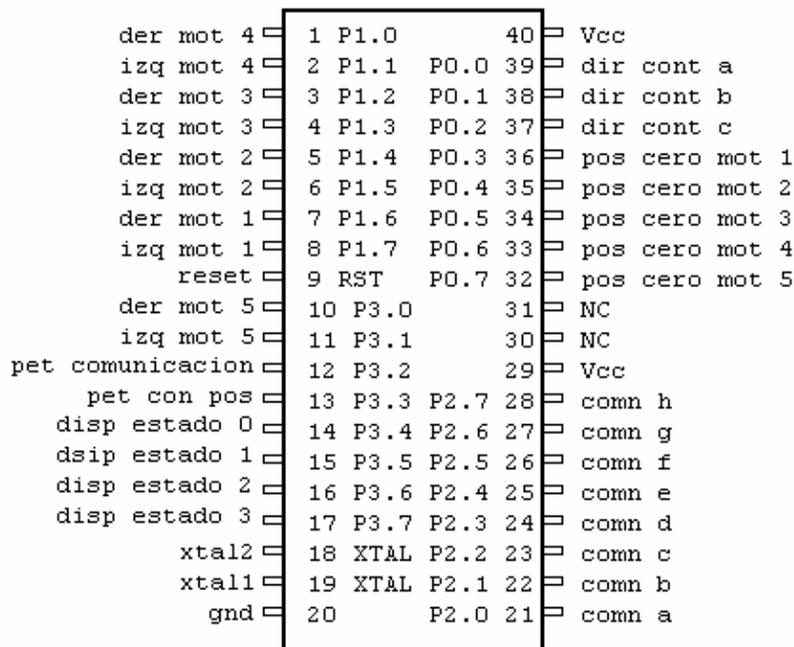
*Comunicación con el computador:* La comunicación se hace por medio del puerto paralelo del computador y utiliza diez líneas. Ocho que conforman el bus de comunicación bidireccional entre el puerto 378h del PC, una para referenciar el potencial de tierra, cuatro asociadas con el estado del microcontrolador las cuales están conectadas al puerto 379H, y un pin adicional para generar la interrupción de comunicación entre el PC y el micro.

### 3.2 SUBROUTINAS DEL MICROCONTROLADOR.

Para que el microcontrolador llevara a cabo la misión de controlar los motores que mueven el brazo articulado y pudiera comunicar los datos al computador se desarrollaron las siguientes subrutinas:

*subrutina del PWM:* Esta es la subrutina más sencilla de todas y base de la investigación. Consiste controlar los ciclos de encendido y apagado poniendo un bit en uno o cero respectivamente. Este proceso se implementó por medio de un contador de 0 a 100 llamado *ciclo* (valor máximo del ancho de pulso), con base en una posición de memoria llamada *ancho*; el conteo va siempre de 0 a 100 y nunca se interrumpe. Si el valor del ancho es menor al valor de ciclo se pone en uno el bit correspondiente y si el valor del ciclo es mayor al ancho, el pin se pone en cero. Teniendo en cuenta un bit de dirección se le puede dar el sentido de rotación del motor. En la gráfica 3.6 se ve el diagrama de flujo utilizado para el desarrollo del PWM.

Ilustración 3.5 Distribución de pines del microcontrolador 89C51

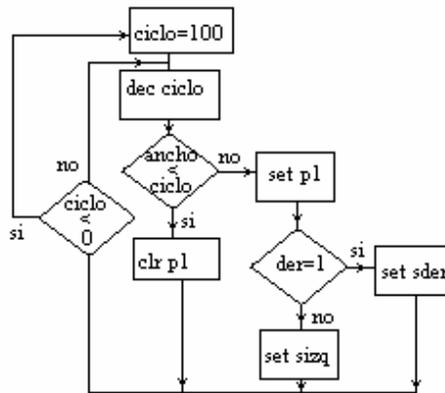


*Subrutina rampa:* En un primer ensayo, la subrutina de rampa se implementó en tres secciones con subrutinas para controlar el tiempo de aceleración, el de velocidad y el de frenado. Estos valores se encuentran inicialmente en su valor de programación, y se van decrementando a velocidad constante de acuerdo con una interrupción del timer 0 (programada cada 0.545 s) y de acuerdo con el estado van modificando el ancho de pulso

para generar la rampa. Estos valores no le dan estabilidad al posicionamiento de las articulaciones, por tal motivo se vio la necesidad de hacer el control por medio de una red del tipo adaline para la rampa de aceleración y para el frenado.

*Subrutina posición:* Esta subrutina es un contador descendente o ascendente que se modifica cada vez que se genera un flanco de subida o bajada en el encoder. La señal eléctrica proveniente de encoder se lleva a un codificador de prioridad para jerarquizar los movimientos de cada articulación y poderlos acomodar a una fuente de interrupción. Una vez estén dentro del microcontrolador se debe especificar de cada motor proviene e incrementar o decrementar el contador respectivo. En la acción anterior se tiene en cuenta el pin de dirección de cada movimiento. Por omisión, en caso de que el brazo se mueva, se especifica que la posición se decremente porque todos los torques en el diseño se tienen en cuenta para que el brazo baje de su posición.

Ilustración 3.6 Diagrama de flujo de la subrutina del PWM.



*Subrutina de estado:* Esta subrutina se encarga de visualizar en un display de siete segmentos el estado de ejecución del programa de acuerdo con la tabla 3.1 y se modifica en cada parte respectiva del programa. También sirve para especificar el estado de funcionamiento del brazo en caso de error:

*Subrutina de comunicación:* Esta se encarga controlar la comunicación entre el computador y el microcontrolador; utiliza un bus bidireccional (puerto 378H del pc) de ocho bits por donde se transfieren los datos y un terminal de petición de interrupción que se utiliza en el protocolo de comunicación. Este pin, genera una interrupción donde se controla el estado de la misma y por medio de bits dedicados a la comunicación reconoce el estado donde se encuentra.

Por medio de la comunicación se deben introducir los datos de tiempo de aceleración, tiempo de velocidad, velocidad máxima, y posición; donde esta se estima por medio de la

red ADALINE. Por medio de esta subrutina también se puede conocer la posición de cada motor.

Para establecer la comunicación se ha desarrollado la siguiente palabra como el protocolo.

bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0
nu	start	reset	eje_stop	impr/tomar	direccion motor		

nu: no utilizado.

start: Cuando el bit se encuentra en uno, lleva cada uno de las articulaciones a la posición especificada en la programación, ejecuta la rampa de aceleración y controla la posición de la articulaciones. En cero no se ejecuta acción alguna.

reset: cuando se encuentra en 1, interrumpe las rampas que se están ejecutando y lleva al microcontrolador al estado cero para indicarle al usuario que puede ejecutar cualquier otra acción. Este pin puede usarse como un parado de emergencia. Cuando toma valor 0 no realiza acción alguna.

tabla 3.1 Estados de funcionamiento del brazo

0	'esperando comandos'
1	'esperando tiempo de aceleración'
2	'esperando velocidad máxima'
3	'esperando tiempo de velocidad'
4	'esperando byte bajo de la posición'
5	'puede ejecutar las rampas en el micro'
6	'ejecutando rampas'
7	'consulta del byte menos significativo de la posición'
8	'consulta del byte más significativo de la posición'
9	'consulta de posición terminada'
10	'llevando brazo a la posición de inicio' <sup>6</sup>
11	'esperando byte bajo de la posición'
12	'esperando terminación de entrada de datos'
13-15	'código de error no estipulado' <sup>7</sup>

<sup>6</sup> En el display los números a partir del 10 se muestran con caracteres especiales, favor consultar el manual TTL para conocer el número respectivo

<sup>7</sup> estos mensajes de error también se pueden visualizar desde matlab por medio de la instrucción estado.

eje\_stop: Cuando está en uno, permite ejecutar las rampas programadas en el microcontrolador. Mientras en cero mantiene en estado de espera el microcontrolador.

impr/tomar: Permite indicarle al microcontrolador cuando se está leyendo la posición de la articulación o programando los datos de la rampa. En uno, visualiza los datos de la posición, iniciando con el byte más bajo. En una segunda interrupción, toma el bit más significativo, y es necesario provocar otra interrupción para que el microcontrolador vuelva a su estado original. Cuando está en cero permite programar los datos de la rampa de aceleración, en su estricto orden, tiempo de aceleración (0-100), tiempo de velocidad (0-255), velocidad máxima (0-100), y provoca una última interrupción para volver al estado original el microcontrolador.

*Dirección del motor:* Estos tres bits permiten identificar un motor para consultar su posición o programar su rampa. Los motores tienen la siguiente codificación:

- 0 motor pinza o grip.
- 1 motor muñeca.
- 2 motor antebrazo.
- 3 motor brazo.
- 4 base.

## 4 SUBROUTINAS IMPLEMENTADAS EN MATLAB PARA EL MANEJO DEL BRAZO.

Las subrutinas comentadas en esta sección tienen como objeto principal hacer la comunicación entre el computador y el prototipo. Al principio del capítulo se comentan las subrutinas que son transparentes al usuario y son necesarias para que haya una correcta comunicación entre los dos elementos. Al final del capítulo se describe una subrutina que sirve para hacer la comunicación con el prototipo de forma sencilla sin que el operario memorice los comandos respectivos y además que den la mayor comodidad al usuario cuando trabaje con el prototipo.

Se seleccionó Matlab para implementar algunos aspectos por su sencillez de uso, por contar con una completa librería matemática, y por que permite hacer interfase con C++ para implementar subrutinas en bajo nivel o en ensamblador. Adicionalmente, las subrutinas implementadas pueden ser consultadas o modificadas con facilidad, y es un lenguaje que se está imponiendo a nivel mundial. Por medio de unas subrutinas sencillas se puede hacer uso de los puertos estándar del computador.

*IN* y *OUT*: Son dos subrutinas de enlace dinámico desarrolladas en visual C++, que se utilizan para tener acceso a los puertos del computador. *In*, se utiliza leer datos desde los puertos y *out* para enviar datos por los puertos sus formas de uso son:

```
a=in(puerto)
out(puerto,dato)
```

donde: puerto es la dirección a la cual se quiere tener acceso y dato es la palabra que se quiere enviar por el puerto. Estas dos subrutinas son implementadas para computadores de 32 bits y por tal razón pueden presentar problemas al usarse en puertos de 8 o 16 bits. Se recomienda hacer uso con la instrucción *andb*.

*ORB*, *XORB*, *NOTB*, *ANDB*: son subrutinas desarrolladas en visual C++ que utilizan las operaciones lógicas básicas a saber OR, OR exclusiva, negación, y AND. Estas fueron desarrolladas debido a que hay versiones de matlab que no las poseen, especialmente la 5.0. La forma de utilización es:

```
a=orb(dato1,dato2)
a=andb(dato1,dato2)
a=notb(dato1)
a=xorb(dato1,dato2)
```

donde dato1 y dato 2 son los operandos. Estas subrutinas también son desarrolladas para datos de 32 bits.

*SETB Y CLRB*: son subrutinas desarrolladas en matlab que sirven para poner en uno o poner en cero un pin específico de un puerto. El puerto que se quiere modificar debe tener hardware implementado y se desarrollaron especialmente para modificar los bits de los puertos de la impresora (378h, 278h, 3BCh). Por tal razón es posible que su uso tenga efectos colaterales en otros puertos.

La forma de utilizarlas es:

```
setb(puerto,bit)
clrb(puerto,bit)
```

donde: puerto es la dirección donde se quiere modificar el bit y bit es el número del bit que se quiere modificar (0, 1, 2, 3, ....., 8).

*Pauserob*: Esta subrutina se usa para hacer una pausa de 1/18.5 segundos en la escritura de datos al microcontrolador usado para el brazo articulado. El tiempo de espera corresponde a un tic del reloj interno del computador. No puede usar una base de tiempo menor debida a la arquitectura del PC, por tal razón, al ejecutarse algunos comandos se pueden presentar retardos significativos en la respuesta.

*Escibir*: Se usa para programar los datos correspondientes a la rampa de aceleración en su orden, numero del motor, tiempo de aceleración, velocidad máxima, y posición. La forma de uso es:

```
ESCRIBIR(Motor,Ta,Velmax,Posicion)
```

donde

Motor	representa el motor al que se desea controlar 0, 1, 2, 3, 4.
Ta	tiempo en que se debe acelerar el motor, numéricamente debe ser menor que la velocidad máxima
Velmax	velocidad máxima (en %) que debe tener el motor
Posicion	es la posición a la cual se quiere llevar el brazo

El motor que se desea controlar corresponde a los códigos:

0	motor pinza o grip.
1	motor muñeca.
2	motor antebrazo.
3	motor brazo.
4	motor base.

*Leer*: Se usa para consultar la posición en la que se encuentra cada articulación, inicialmente toma la parte baja (8 bits) de la dirección y después toma la parte alta. La forma de utilizarla es:

```
a=leer(motor)
```

Donde motor es la articulación a la que se quiere consultar la posición y tiene la misma designación del numeral anterior.

*execute*: Permite ejecutar las rampas trapezoidales programadas en el microcontrolador.

*Ejecute*: Permite ejecutar una rampa de aceleración para un motor en especial. Espera a que la articulación llegue a su posición, y al finalizar la ejecución devuelve la posición donde se encuentra la articulación.

A=EJECUTE(Motor,Ta,Velmax, Posición)

Motor	representa el motor al que se desea controlar
Ta	tiempo en que se debe acelerar el motor
Velmax	velocidad máxima (en %) que debe tener el motor
Posición	es la posición a la cual se quiere llevar el brazo

*Estado*: Permite conocer el estado en que se encuentre el microcontrolador de acuerdo a la nomenclatura establecida en la subrutina de estado.

a=ESTADO(n)

si n=255 se hace la consulta del estado.

si n es un numero entre 0 y 16 explica el código de estado. Esta información corresponde a la mostrada en el display del brazo.

*Rst*: Es un parado de emergencia que lleva a velocidad cero todos los motores cuando se está ejecutando un rampa. El frenado producido por este comando puede ser dañino para el motor y para la estructura. No se recomienda hacerlo a menos que sea estrictamente necesario.

*Start*: Permite llevar las articulaciones hasta la posición de inicio o de home hasta donde se encuentren los finales de carrera para tal fin. Este comando no permite el uso de RST y el desplazamiento lo hace a máxima velocidad.

## **4.1 INTERFAZ PARA MANEJAR LOS MOTORES.**

En la gráfica 4.1 se puede ver la interfaz usada para realizar las pruebas sobre los diferentes motores que tiene el brazo mecánico de esta investigación. En este programa, desarrollado en Matlab, se unieron los programas execute, escribir, leer, etc comentados con anterioridad con el fin de evaluar el desempeño de cada uno de los motores.

Esta interfaz cuenta con casillas de texto donde se especifica el tiempo de aceleración (Tacc), la velocidad del motor (V max), la ubicación del motor (motor), la posición final del motor (posición). Se ubicaron botones adicionales para escribir la rampa de aceleración del motor en el microcontrolador (escribir), ejecutar la rampa del motor (ejecute), detener el avance del motor (reset), llevar el motor a la posición de origen (Start), leer la ubicación del motor (leer), cerrar la pinza (cerrar) y consultar el estado del microcontrolador (estado).

Ilustración 4.1 interfaz para manejar los motores.



## **5 POSICIONAMIENTO DE LOS MOTORES DE D.C.**

En un primer instante se quería controlar los motores de dc con base en tiempos. Esto no fue posible porque con las redes neuronales no se logra predecir la posición del motor con precisión debido a la existencia de cargas variables y su posición; por tal motivo fue necesario implementar un método que llevara las articulaciones a una posición deseada con un pequeño error.

El candidato número uno a implementarse fue el controlador PI pero investigando la literatura especializada se encontró que este mecanismo no es totalmente fiable cuando se usan cargas y posiciones variadas en un prototipo por tal motivo se implementó una red neuronal del tipo adaline como controlador debido especialmente por su parecido.

Cabe notar que la red neuronal fue implementada en el microcontrolador 89C51 de intel para darle la precisión y velocidad adecuadas al prototipo. La red fue implementada con matemáticas que manejan dos cifras decimales para darle velocidad de control al micro y suficiente precisión al controlador. Después de que todo el programa fue desarrollado la velocidad de control es de 0.5 segundos.

### **5.1.1 EL CONTROLADOR PID CONVENCIONAL.**

El control proporcional, integral y derivativo es el más usado en la industria hoy en día. Dependiendo de la aplicación específica, cualquiera de los tres componentes o combinación de estos puede utilizarse para dar características diferentes a la planta que se desea controlar.

Un controlador proporcional es la forma más simple de control y la más fácil de entender; todo sistema debe tener una diferencia entre la salida deseada y la posición real a controlar, la diferencia entre estas dos es la señal de error. El controlador proporcional solo amplifica esta señal, usándola para alimentar el actuador y así llevarlo hasta la señal de referencia o setpoint. El control proporcional tiene limitaciones cuando se emplea como único elemento controlador; un controlador de este tipo no puede conseguir un error cero en estado estable. Incrementando la ganancia o valor proporcional, el sistema puede decrementar el error en estado estable pero nunca lo va a llevar a cero. Otra característica que tiene el controlador proporcional es que el tiempo de estabilización se hace más pequeño a medida que se aumenta el valor de proporcionalidad. Sin embargo, cuando la ganancia es demasiado alta, el sistema tiene un OVERSHOOT que puede causar inestabilidad al sistema. El control proporcional se usa primeramente en procesos donde la ganancia puede ser lo suficientemente grande para reducir el error en estado estable, mientras se mantenga la estabilidad.

El control proporcional e integral, se usa en sistemas donde la cantidad de error generada por el controlador proporcional no puede ser tolerada. Esta técnica es necesaria cuando se debe responder a un error en estado estable de cero o bastante pequeño. Esta técnica conocida como PI, usa la integración de la señal de error para adicionársela continuamente a la señal proporcional y llevar el error a cero. La suma de estos dos efectos tiene la posibilidad de volver inestable al sistema. Así, el controlador PI es usado en sistemas donde el error en estado estable debe ser reducido a valores cercanos a cero que no se pueden conseguir con solo el controlador proporcional. Además, el integrador necesita tener presente el tiempo de integración que en algunos casos puede afectar notablemente el comportamiento del sistema.

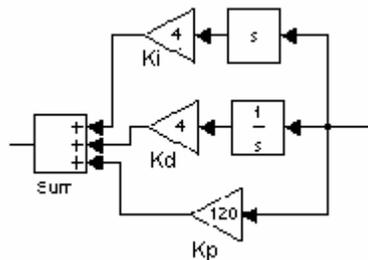
El término derivativo, da una fuerza proporcional a la tasa de cambio del error en la posición. Esto actúa como un amortiguador viscoso en un sistema de resorte y masa (similar a un absorbedor de choque en un automóvil). En muchos casos el término derivativo no mejora enormemente el error y si aumenta el tiempo de computación del controlador por tal razón algunos sistemas se controlan adecuadamente sin este término.

Si se desea hacer el control completo con este modelo se sugiere implementar al ecuación 5.1 o se puede montar como lo muestra la gráfica 5.1.

$$u(n)=K_p*e(n)+K_i*\sum e(n-k)+K_d*[e(n)-e(n-1)] \quad \text{ecu 5.1}$$

donde  $u(n)$  es la señal de control de salida en la muestra  $n$ ,  $e(n)$  es el error de posición,  $n$  es un entero,  $K_p$ ,  $K_i$ , y  $K_d$  son los parámetros del filtro para las cargas que desee el usuario.

Ilustración 5.1 Control PID usando transformada de Laplace.



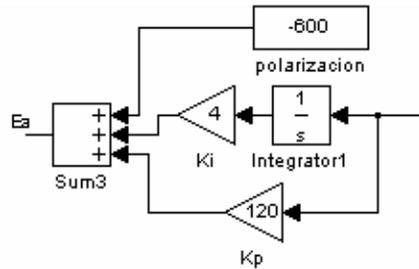
[Clark y Hills] en su trabajo sobre redes neuronales involucran un nuevo término de compensación al PID como se muestra en la ecuación 5.2.

$$u(n)=K_p*e(n)+K_i*\sum e(n-k)+K_d*[e(n)-e(n-1)]+B \quad \text{ecu 5.2}$$

Donde  $B$  es un término de compensación. Este término puede ser variable o constante dependiendo de los resultados experimentales que se hagan. El esquema de control se muestra en la gráfica 5.2. Este tiene un pequeño valor cuando el error es grande y puede llegar a ser significativo cuando el error es pequeño. Se usa como un adicionador de fuerza

(cuando se usa en posicionamiento) para contrarrestar los efectos aleatorios de los prototipos mecánicos.

Ilustración 5.2 Modelo usado por Clark y Hills para el control de posición.

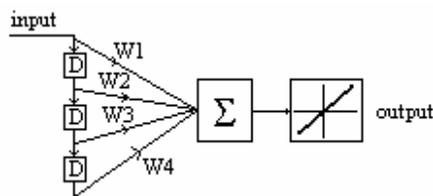


## 5.2 RED NEURONAL TIPO ADALINE.

Una red ADALINE en su estructura es muy similar a un perceptrón solo que su función de salida es una línea recta (purelin). Es decir tiene sus entradas, salidas y puede resolver solo problemas linealmente separables. Si embargo, la red ADALINE es una de las más usadas hoy en día en aplicaciones prácticas tales como filtros adaptativos.

Lo que hace potente a la hora de solucionar problemas a la red ADALINE es el uso de retardos como se muestra en la gráfica 3.28. Allí las señales de entrada entran por la izquierda y son pasadas por unas unidades de retardo de N dimensiones (TDL). Y la salida es una sumatoria de la multiplicación de las entradas por su peso respectivo.

Ilustración 5.3 Red neuronal ADALINE.



El uso de retardos puede convertir a la red en un filtro adaptativo donde la salida es dada por :

$$a(k) = \text{purelin}(W_p + b) = \sum W_{1,i} a(k-i+1) + b \quad \text{ecu 5.3}$$

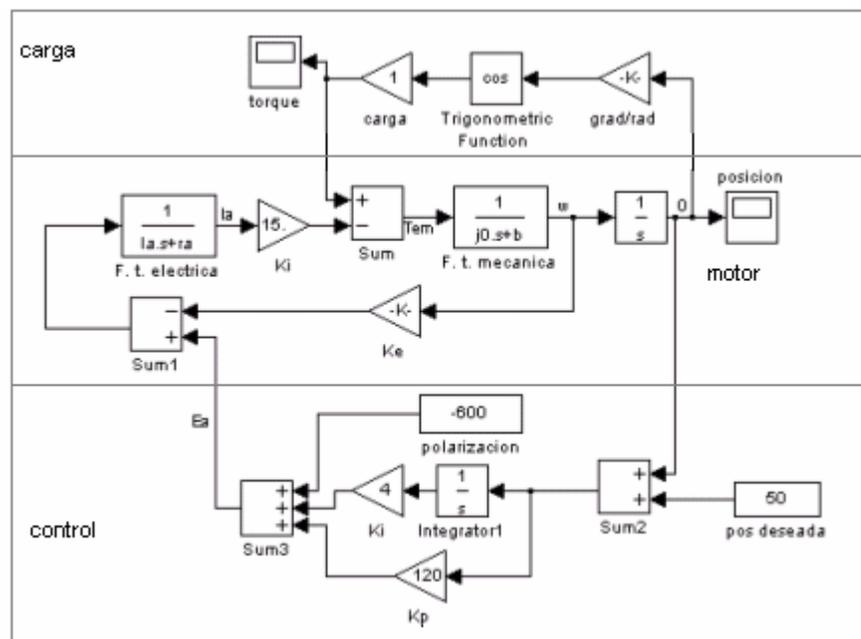
Que representa un filtro procesador de señales digitales de respuesta finita (FIR). Comparando las ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3 se puede llegar a la conclusión que una red neuronal se puede comportar como un PI.

## 5.2.1 SIMULACIÓN DEL CONTROL DE POSICIÓN USANDO PI MAS TÉRMINO DE POLARIZACIÓN.

Usando el modelo que plantea [Mohan, 1995] de un motor de corriente continua se le adaptó la red PI convencional más un término de polarización B como aparece en la gráfica 5.4.

El efecto del término de polarización B baja el overshoot que se puede presentar por uno valores grandes de  $K_p$  y  $K_d$  manteniendo el error cercano a cero. Y no se presenta el efecto de un error grande en el posicionamiento como es de esperarse. El efecto del termino B se mantiene para valores grandes de carga o para valores pequeños, así como también para posicionamientos positivos y negativos. Las simulaciones se hicieron usando simulink que viene implementado en MATLAB y la forma para resolver las ecuaciones diferenciales es ode23t(mod. stiff/ Trapezoidal).

Ilustración 5.4 Control de un motor de c.c. usando PI más un término de polarización B.



## **5.2.2 SIMULACIÓN DEL CONTROL DE POSICIÓN USANDO UNA RED ADALINE.**

Para realizar el control usando la red neuronal se utilizó el mismo modelo del motor que aparece en la gráfica 5.4 y se controló usando la red neuronal ADALINE que tiene matlab en su toolbox y que se reproduce en la gráfica 5.6.

La ubicación de la red neuronal dentro del control es la misma que ocupa el control PI en la gráfica 5.4. Los resultados de la simulación fueron los mismos que los obtenidos con el control PI+B, solo que el error en el posicionamiento no es cero, sino es pequeño pero su magnitud se mantiene constante y de pequeño valor. Tal situación limita su uso para posicionamientos menores de  $0.1^\circ$  (puesto que el error es de 0.06). Al aumentar el término de polarización el error en la posición no decrece ni para posicionamientos positivos ni negativos.

La implementación de redes con solo dos retardos resulta suficiente para un control apropiado. Los efectos logrados al introducir más retardos en la red neuronal no son muy apreciables

## **5.2.3 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA RED NEURONAL.**

Para efectos de la simulación los parámetros de la red neuronal se obtuvieron a prueba y error. Inicialmente se selecciona un valor de K1 para que el error en la posición deseada sea mínimo y lo más cercano a la posición deseada. Luego se escoge la variable K2 que tiene en cuenta las posiciones anteriormente alcanzadas. La implementación es mostrada en la gráfica 5.6 donde se ha implementado un motor de c.c. con las diferentes cargas que puede tener el brazo. Allí se observó que el parámetro K1 tiene el mismo comportamiento de la constante de proporcionalidad en el control PID y el término K2 tiene el mismo comportamiento del término derivativo.

## **5.2.4 EMULACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA RED ADALINE.**

Los parámetros de la red neuronal implementada en el microcontrolador se hallaron por medio de emulación. Para ello se controló el prototipo, de allí se tomaron los parámetros del error de posición y ancho pulso para controlar la tensión que debe ser aplicada al motor usando un microcontrolador adicional y se enviaron a matlab. Se entrenó la red y los parámetros fueron introducidos al micro de control por medio de la ecuación 5.4

$$a(k)=\text{purelin}(Wp+b)=\sum W_{1,i} a(k-i+1)+b \quad \text{ecu 5.4}$$

El procedimiento antes descrito se debió utilizar para cada uno de los motores.

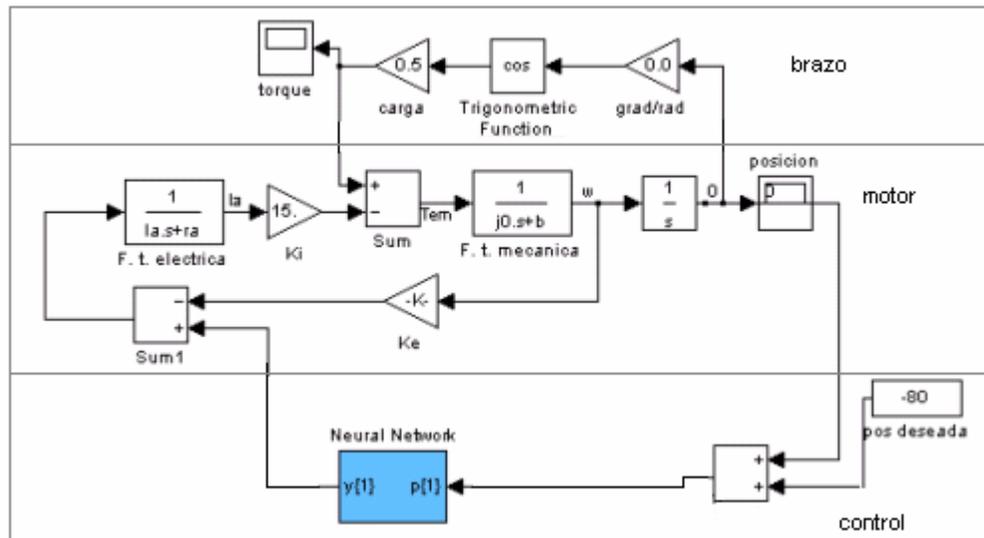
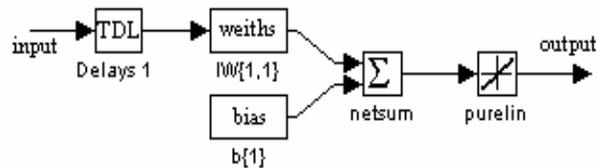


Ilustración 5.5 Simulación de una articulación del brazo usando simulink.

Ilustración 5.6 Red neuronal usada en el control de posición de la gráfica 5.5.



### 5.2.5 DESEMPEÑO DE LA RED NEURONAL IMPLEMENTADA EN EL MICROCONTROLADOR.

El desempeño de la red neuronal que fue entrenada por medio de la prueba y error fue excelente desde el punto de vista del posicionamiento pero tuvo problemas recorridos cortos; en estos la salida proporcionada por el PWM que controla el motor es pequeña y no activa el motor, dando como resultado que el micro mantenía por un tiempo indefinido el motor funcionando y no salía de la subrutina respectiva. Para solucionarlo fue necesario implementar un tiempo de arranque en el microcontrolador primero para que minimizara los esfuerzos mecánicos a que es expuesto el brazo y segundo para aumentar el error entre la posición deseada y la real, esto trajo como resultado que el motor se mueva sin error

hasta la posición deseada y el overshoot en cuanto al error de posición no tenga control, pero para recorridos cortos pequeños la red funciona adecuadamente.

La otra modificación que se le debió hacer a la red neuronal es que al llegar el motor a la posición deseada no es fácil detectar la velocidad cero o simplemente el error cero no coincide con velocidad cero. Por esta razón para que el micro salga de la rutina es necesario sacrificar la velocidad. Esto trae como consecuencia que el motor se detenga después de dar una pocas vueltas. El número máximo de vueltas que el motor dio durante los ensayos fue de 12 vueltas que aun mantienen bajo el error, ya que el reductor de velocidad acoplado al motor tiene una reducción de 255 dando como consecuencia que el error en el posicionamiento software es de 2.82 minutos. Dicho valor es bajo con respecto al error que se puede generar por desperfectos mecánicos.

Otro de los inconvenientes vistos en el desempeño de la red neuronal adaline es que el error aumenta a medida que el motor tiene más velocidad. Por esta razón fue necesario limitar las cargas a valores pequeños. Los motores se ubican en posición perfecta cuando el ancho del pulso es inferior o igual al 30% y con este ancho solo se pudieron manejar cargas hasta de 50g. Las cargas con mayores pesos se pueden mover con el motor pero el error va aumentando considerablemente y no se justifica mejorarlo con otra red neuronal adicional.

## **6 ENTRENAMIENTO DE LAS REDES NEURONALES.**

En esta sección se describe el entrenamiento de las redes neuronales para poder realizar la cinemática directa e inversa; esta se debió implementar porque el brazo no tiene un acople directo entre el motor y la articulación. El acople como se ha tratado se realizó por medio de cadenas, aunque estas no se estiran demasiado introducen un error cuando el brazo cambia de posición o cuando la carga varia.

Para poder desarrollar este capítulo hubo necesidad de hacer tres tratamientos uno meramente matemático que sirvió para enfocar el problema además de servir como referencia para medir el desempeño de las redes.

En el tratamiento teórico del brazo se evaluó el desempeño de una brazo idóneo desde el punto de vista matemático; para ello se realizó el tratamiento matemático usando trigonometría convencional junto con unas construcciones adicionales para poder resolver el problema.

Como un segundo enfoque, se realizó el control del brazo mecánico teniendo en cuenta solo una articulación, reduciendo los errores al mínimo, evaluando el desempeño de cada articulación y del brazo en general.

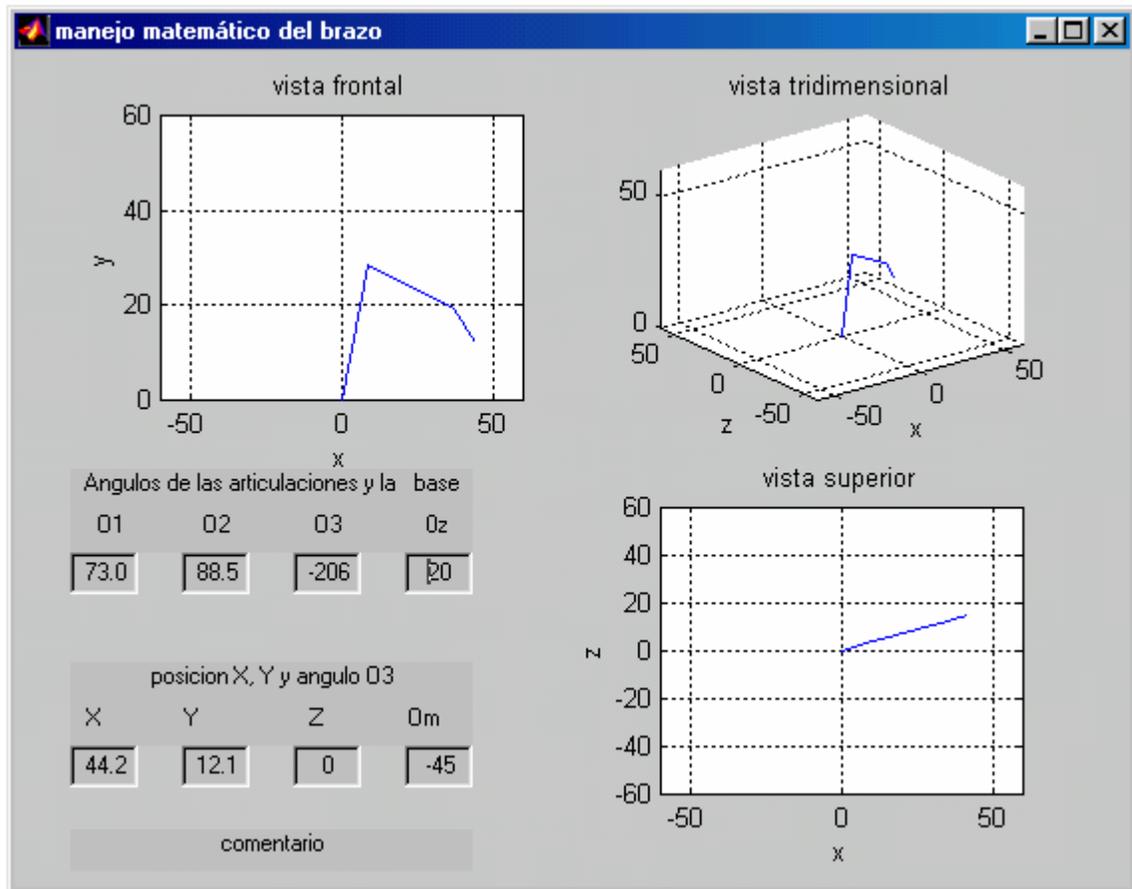
El tercer enfoque, se hizo avaluando el comportamiento de todas las articulaciones simultáneamente resultando en el desempeño más valido para el control del brazo.

### **6.1 TRATAMIENTO MATEMATICO DEL BRAZO**

Debido a la no familiarización con el tratamiento matemático de la cinemática directa e inversa se hizo necesario implementar varios programas de computador que diera la oportunidad de conocer el enfoque. Para ello se realizó el programa llamado brazomec, donde por medio de una interfaz gráfica sencilla se pueden modificar tanto las coordenadas cartesianas como las polares (gráfica 6.1). Esta figura se dividió en cuatro secciones donde se pueden observar la ubicación tridimensional del brazo, la ubicación lateral y la superior. Esta Interfaz es fácil de usar, simplemente se ubica sobre la casilla que se va a modificar, se digita el valor correspondiente y al finalizar se oprime la tecla enter. El programa hace los cálculos necesarios de la cinemática directa e inversa y actualiza los valores sobre las casillas correspondientes. Este programa está soportado por dos más pequeños llamados XYZ e INV\_XYZ, donde se calcula la cinemática directa e inversa respectivamente.

$\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  y  $\theta_z$  representan respectivamente el ángulo que debe llevar la articulación de la muñeca, antebrazo, brazo y la base del robot. X, Y, Z, son las coordenadas x, y, z, de la punta del grip y  $\theta_m$  representa el ángulo que debe hacer la pinza con la vertical ver gráfica 6.2.

Ilustración 6.1 Presentación del programa para encontrar la cinemática directa e inversa.



Para hallar la cinemática directa se elaboró un programa llamado XYZ donde a partir de los ángulos reales  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ , longitud del brazo ( $L_1$ ), antebrazo ( $L_2$ ) y la muñeca ( $L_3$ ) se pueden encontrar la posición final de la punta del grip. El proceso se realizó usando las funciones trigonométricas clásicas y su representación matricial se muestra a continuación.

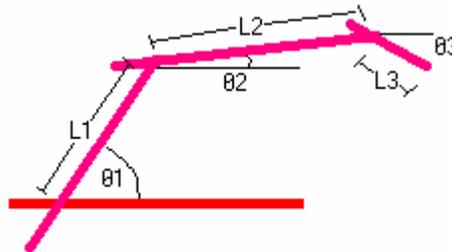
$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ \cos(\theta_1) & \cos(\theta_2) & 0 \\ \cos(\theta_1) & \cos(\theta_2) & \cos(\theta_3) \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \sin(\theta_2) & 0 \\ \sin(\theta_1) & \sin(\theta_2) & \sin(\theta_3) \end{bmatrix}$$

$$\text{long} = [L_1 \quad L_2 \quad L_3]$$

$$\text{pos} = (X+Y) * \text{long}$$

Ilustración 6.2 Ángulos, distancias y ecuaciones para mover el brazo articulado.



Para realizar la cinemática inversa hubo necesidad de elaborar un programa llamado INV\_XYZ donde a partir de la ubicación x, y y z de la punta de la pinza y el ángulo que realiza esta con la horizontal se pueden hallar los ángulos de las articulaciones del brazo, antebrazo y muñeca como se puede ver en la figura 6.3. Las ecuaciones respectivas se muestran a continuación. Cabe destacar que para que el problema de la cinemática inversa sea soluble se debe especificar al ángulo que hace la pinza con la horizontal, de lo contrario el problema no tiene solución.

$$x_1 = x - l_m * \cos(\theta_m)$$

$$y_1 = y - \sin(\theta_m)$$

$$L_{au} = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$$

$$\theta_{au} = \text{atg}\left(\frac{y_1}{x_1}\right)$$

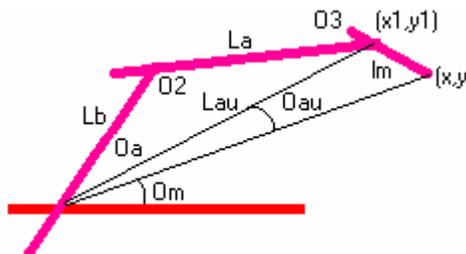
$$\theta_a = a \cos\left(\frac{l_a^2 - l_b^2 - l_{au}^2}{-2 * l_a * l_{au}}\right)$$

$$\theta_1 = \theta_a + \theta_{au}$$

$$\theta_2 = a \cos\left(\frac{l_{au}^2 - l_b^2 - l_a^2}{-2 * l_a * l_b}\right)$$

$$\theta_3 = \theta_m - \theta_1 - \theta_2$$

Ilustración 6.3 Ángulos, distancias y ecuaciones para hallar la cinemática inversa.



Para realizar la comparación entre el prototipo real y el ejemplo matemático hubo necesidad de tomar los datos de las posiciones x, y, z así como también los ángulos de cada

una de las articulaciones se realizó el entrenamiento de las redes por medio de los archivos trainmat y trainmati. El primero entrena la una red para resolver la cinemática directa, teniendo los ángulos de las articulaciones hallar los puntos x, y, y z; el segundo realiza la cinemática inversa, teniendo las coordenadas x, y, z y el ángulo que tiene la muñeca con respecto al plano de trabajo se hallan los ángulos de las articulaciones  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  y el ángulo de la base.

## **6.2 TRATAMIENTO DEL BRAZO REAL DE FORMA AISLADA**

Como se puede apreciar después de haber leído el primer capítulo de este documento, hay varios parámetros de desempeño que deben evaluarse antes de poner en operación el brazo. Entre estos parámetros se tienen:

- Fricción.
- Momentos de inercia.
- Eficiencia.
- Excentricidad.
- Deslizamientos.
- Vibraciones.
- Error entre ejes.
- Desacoples mecánicos.
- Ruidos eléctricos.

Que en una forma u otra hacen que el posicionamiento de las diferentes partes del brazo tengan errores. Algunos de estos elementos pueden ser expresables matemáticamente y otros son aleatorios, lo importante de estos parámetros estén dentro de unos rangos donde los errores no influyan demasiado en el posicionamiento.

Con el fin de disminuir el trabajo de cálculo del computador y que los errores se puedan predecir, se hace uso de la técnica de redes neuronales para realizar la tares de cinemática inversa y directa, además de predecir los errores en el posicionamiento.

Como un primer enfoque se maneja por separado cada una de las articulaciones y no se tiene el efecto de las otras. Este enfoque tiene que ver con el tratamiento matemático que la posición final de la pinza es la suma de cada una de las secciones que comprenden el brazo. También se estudia los posibles efectos que tiene las cargas sobre las partes del brazo.

### **6.2.1 ENTRENAMIENTO DE LA RED QUE MANEJA LA PINZA**

En la gráfica 6.4, se puede ver como se toman las medidas para tomar los datos de entrenamiento que mueven la pinza. Las variables que se necesitan para entrenar la red

neuronal de forma directa son las vueltas que da el motor y la separación que hay entre los dedos del grip.

La red neuronal que se entreno es un perceptrón multicapa con una capa de entrada, tres capas intermedias y una capa de salida, las funciones de salida en las capas son tansig y tansig, se pudo entrenar con un promedio de 200 épocas de forma batch usando el algoritmo backpropagation.

Ilustración 6.4 Parámetros de entrenamiento de la red neuronal del grip.

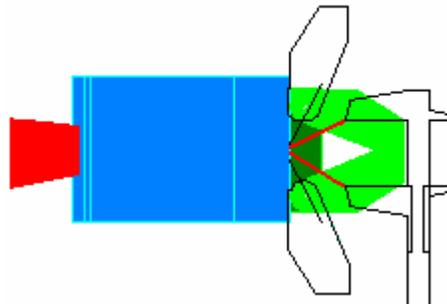
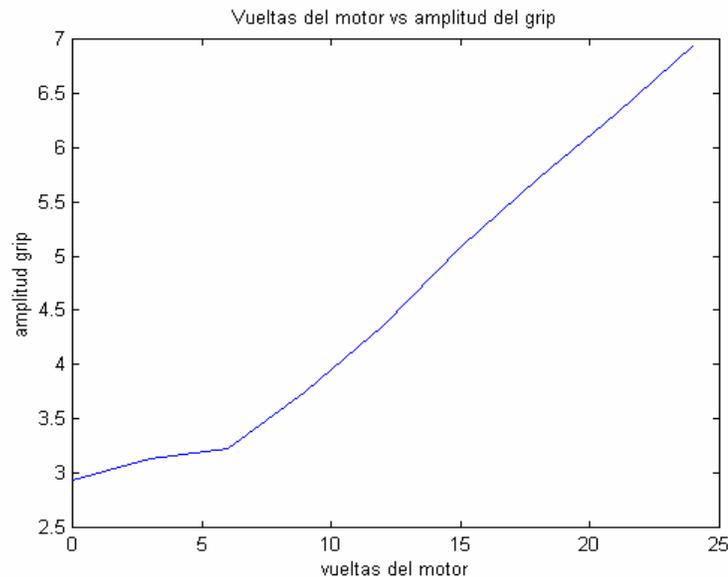


Ilustración 6.5 Relación entre las vueltas del motor y amplitud del grip.

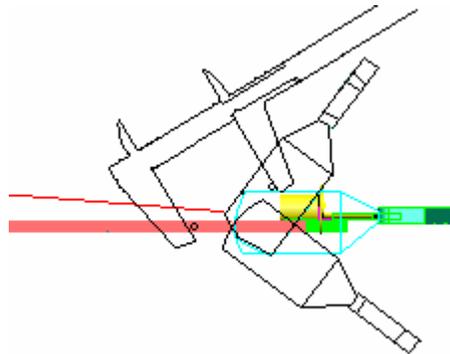


Esta red no dio los resultados esperados, ya que para tener una apertura máxima y mínima el motor debía dar 12 vueltas; que resultan pocas para que el algoritmo adaline implementado las controlara. Para evitar este impase se dejó la pinza para que trabajara en dos estados cerrado y abierto. Para que la pinza estuviera totalmente abierta se introdujo un final de carrera en la base de la pinza y el cierre es controlado por tiempo en el computador.

## 6.2.2 ENTRENAMIENTO DE LA RED QUE MANEJA LA MUÑECA DEL BRAZO.

Como se puede ver en la gráfica 6.6, para tipificar la red neuronal que controla la muñeca se tomaron el número de vueltas que da el motor y una distancia que permite hallar el ángulo que en este momento tiene la muñeca. Como se puede observar la muñeca es movida por una cuerda y esta se tensiona a medida que se aumenta el peso de la carga adicionalmente el ángulo cambia a medida que se aumenta el peso y la catenaria va disminuyendo, esto hace que el ángulo se modifique a medida que el peso de la carga aumenta.

Ilustración 6.6 Medidas para hacer la tipificación de la red de la muñeca.

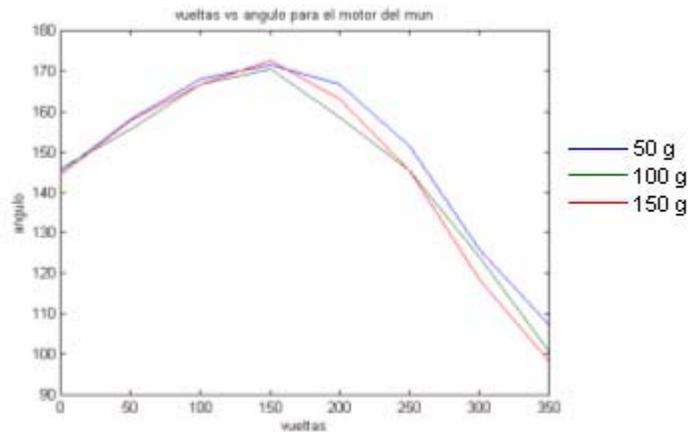


En la gráfica 6.7 se pueden observar los rangos entre los cuales cambia el ángulo de la muñeca a medida que se cambia el peso. La red neuronal se pudo obtener con dos entradas, el peso de la carga a manipular y el número de vueltas que da el motor, la salida es el ángulo que tiene la muñeca con respecto al antebrazo. Esta red neuronal presenta los niveles de error más significativos.

## 6.2.3 ENTRENAMIENTO DE LA RED QUE MANEJA LA MUÑECA DEL BRAZO.

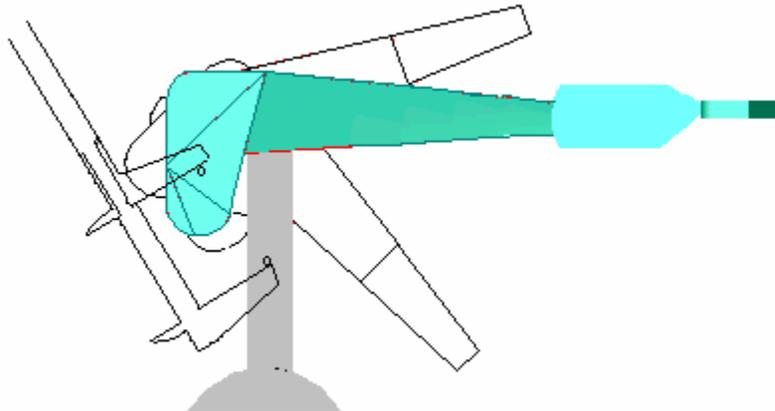
Para entrenar la red neuronal que maneja el antebrazo, se tomaron la distancia que hay entre un tornillo en el brazo y otro que está en el antebrazo. Por medio del teorema de los cosenos y las distancias que hay entre cada uno de los tornillos y el eje de giro se hallan los ángulos respectivos como se muestra en la gráfica 6.8.

Ilustración 6.7 Ángulos tomados para la tipificación de la red de la muñeca.



Los ángulos se pueden observar en la gráfica 6.9 y en esta se puede mostrar la poca variabilidad que tienen los ángulos cuando se cambia la carga. Esta relación es casi lineal. La red neuronal se pudo obtener con una red de una capa intermedia con funciones de transferencia del tipo lineal y del tipo tangente sigmondal. Las entradas que se necesitan son el peso que lleva la pinza y el número de vueltas que da el motor para dar como salida el ángulo que hay entre el brazo y el antebrazo.

Ilustración 6.8 Medidas para hacer la tipificación de la red del brazo.



#### 6.2.4 ENTRENAMIENTO DE LA RED QUE MANEJA EL BRAZO.

La distancia tomada entre el eje que soporta el brazo y un tornillo ubicado en el brazo, como se ve en la gráfica 6.10, sirve para tipificar la red neuronal que va a predecir el ángulo que tiene el brazo con respecto al plano de trabajo. En la gráfica 6.11 se puede observar la variabilidad del ángulo cuando se le cambia el peso que maneja la pinza. La red neuronal entrenada cuenta con una capa intermedia de tres neuronas, cuyas funciones de

transferencia en las capas intermedias son lineales y en la capa de salida son tangente sigmoideal.

Ilustración 6.9 Ángulos tomados para la tipificación del brazo.

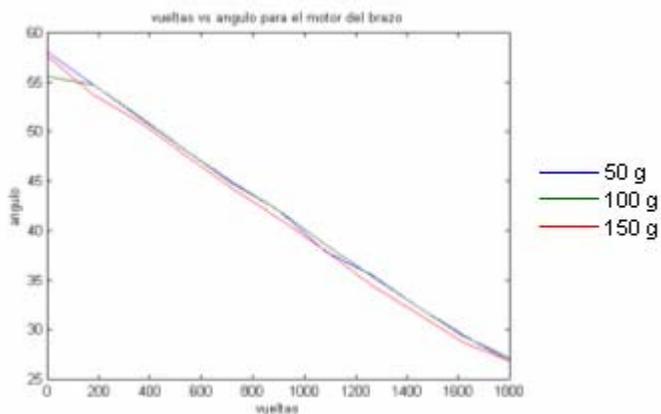


Ilustración 6.10 Medidas para la tipificación de la red del antebrazo.

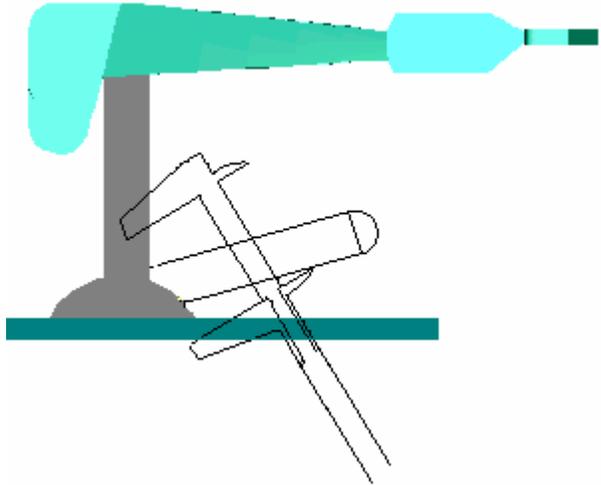
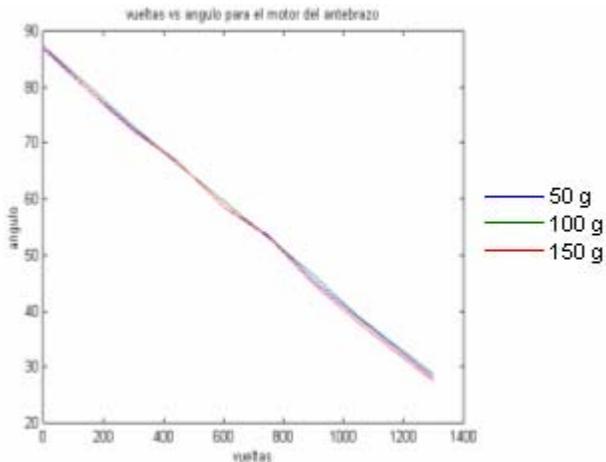


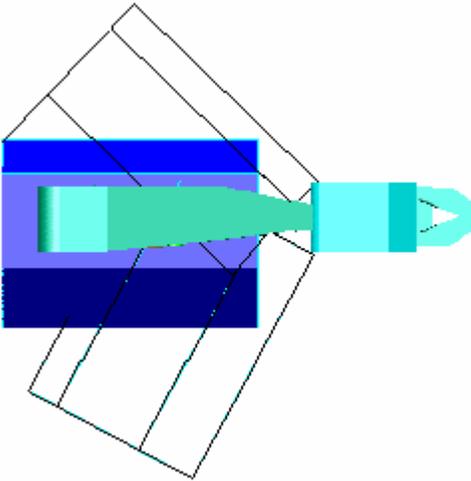
Ilustración 6.11 Ángulos tomados para la tipificación del antebrazo.



### 6.2.5 ENTRENAMIENTO DE LA RED QUE MANEJA LA BASE DEL BRAZO.

La base no necesita red neuronal para obtener el ángulo entre la referencia y el eje medio de la base, ya que no hay dispositivos mecánicos que alteren esta relación. El ángulo que necesita la base simplemente se debe multiplicar por 2 para obtenerlo.

Ilustración 6.12 Tipificación de la red para mover la base.



## **6.2.6 RESULTADOS OBTENIDOS.**

Para trabajar el brazo de forma aislada se escribieron los programas trainmuneca, trainbrazo, trainante que entrenan las redes respectivas y los archivos consante, consbrazo y consbase para revisar el desempeño de la red.

El desempeño total del entrenamiento se pudo evaluar en el programa brazomecp donde se hacia la evaluación tanto de forma matemática como con las redes. La pantalla de trabajo se puede observar en la gráfica 6.13. En esta se puede observar el posicionamiento del brazo desarrollado de forma matemática y la ubicación real del brazo además se puede comprobar las posiciones x, y y z del brazo real.

En las casillas superiores el usuario puede cambiar los valores de los ángulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  y el ángulo de la base. Por medio de los botones que aparecen en la parte inferior de cada ángulo se puede dar movimiento a la articulación respectiva. En la parte superior e inferior izquierda se pueden observar las posiciones del brazo ideal; en el centro de la pantalla se pueden observar los botones para controlar la pinza (cerrar, abrir) detener el brazo (reset) y llevar el brazo a la posición de inicio (Start). En la parte inferior se puede encontrar un pop menú para consultar la posición del brazo.

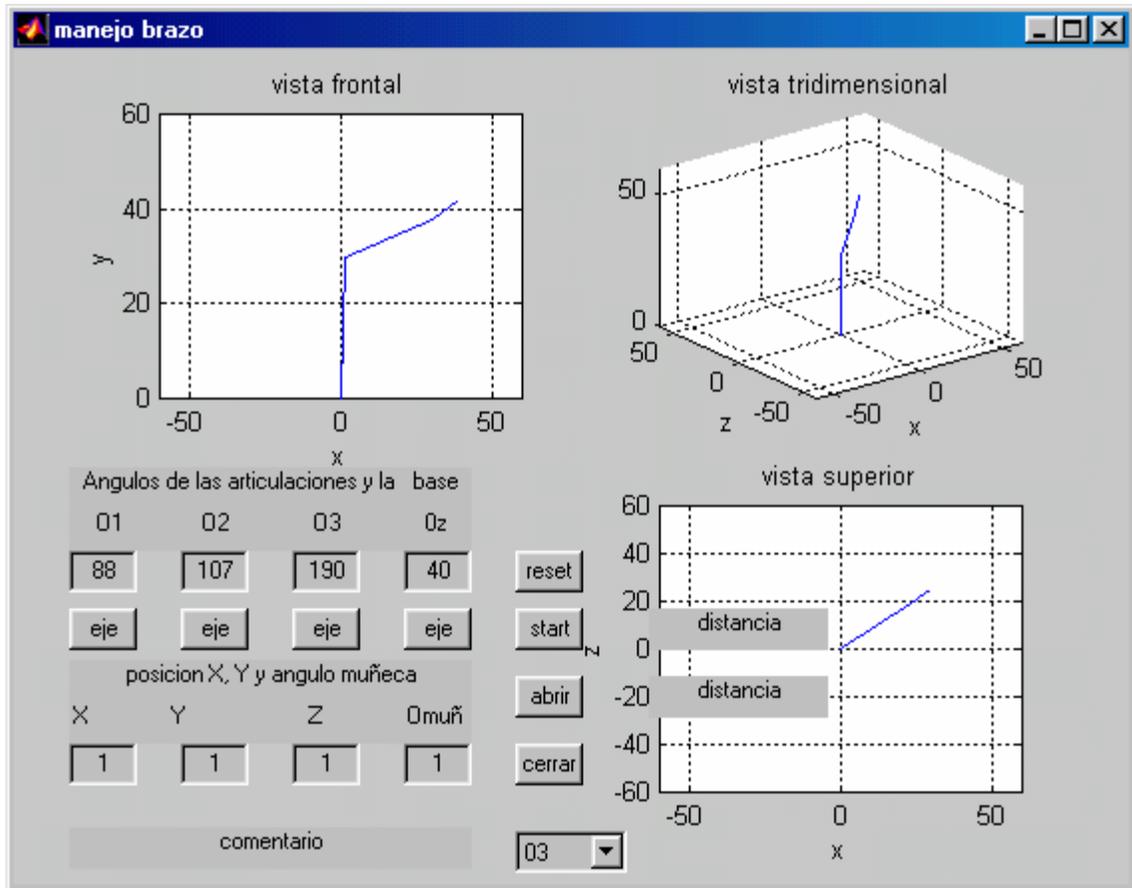
El movimiento total del brazo no se puede considerar como el resultado de la sumatoria de cada una de las articulaciones, ya que el torque de cada articulación generado en las otras hace que las articulaciones no involucradas en el movimiento cambien su posición o que las cadenas se estiren un poco más. En general este enfoque no es válido porque la posición alcanzada no es la misma que la predicha por la red neuronal. Por tal razón hubo necesidad de tratar el problema como un conjunto.

## **6.3 TRATAMIENTO DEL BRAZO REAL DE FORMA AISLADA**

Como las redes neuronales implementadas por separado condujo a resultados no satisfactorios fue necesario replantear la toma de datos; en esta se tuvo en cuenta la influencia de la carga y las posiciones de las diferentes articulaciones como se describe a continuación. Para medir la posición de la punta del grip se colocaron tres metros, uno en la punta de la pinza, otro en la punta donde se articulan la muñeca y el antebrazo y el tercero se colocó paralelo a la mesa de trabajo (ver gráfica 6.13); con este arreglo se registró la influencia de la carga, posición relativa entre articulaciones y se obtuvo el ángulo de la pinza con la horizontal. Se tomaron datos de  $X_1$ ,  $X$ ,  $Y_1$  y  $Y$ . La distancia  $X_1$  corresponde a la distancia tomada desde la articulación de la base del brazo hasta la proyección de la articulación sobre la horizontal. La distancia  $Y_1$  corresponde a la altura

que hay entre la ubicación del acople mecánico y la proyección del acople da la base. La distancia X corresponde a la distancia tomada ente la base de la base hasta la proyección de la punta sobre la horizontal y la distancia Y corresponde a la distancia tomada entre la punta de la pinza y la proyección de la articulación de la base.

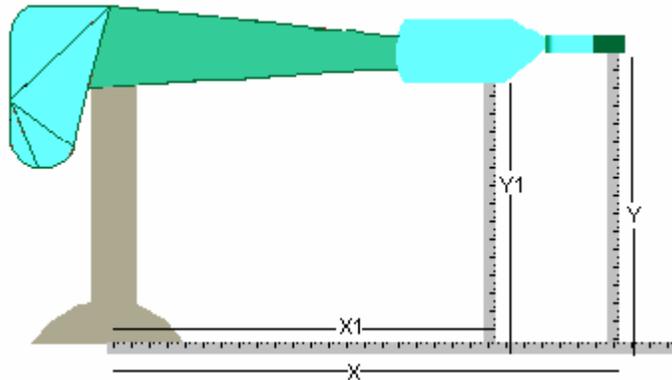
Ilustración 6.13 Presentación del programa para encontrar la cinemática directa e inversa con articulaciones de forma aislada.



En primera instancia, se tomaron los datos de las vueltas del motor de cada una de las articulaciones del brazo, antebrazo, muñeca y las distancias X1,Y1 y X,Y. Para el entrenamiento de la red se iba variando el número de vueltas del motor. Por ejemplo, el motor de la muñeca se movió desde 0 hasta 300 vueltas con intervalos de 75, (0, 75, 150, 225, 300). El motor del antebrazo se movió desde 0 hasta 1500 con intervalos de 300 (0, 300, 600, 900, 1200, 1500) y el motor del brazo se movió desde 0 hasta 600 vueltas con intervalos de 100 (0, 100, 200, 300, 400, 500, 600). Antes de mover los motores se hizo una prueba de precisión para certificar que los motores llegaron a la misma posición repetidas veces sin ningún problema.

La prueba de estabilidad consistió en mover los motores con carga y sin carga, medir las posiciones para verificar su exactitud y repetitibilidad; con el fin de determinar que ancho de pulso era adecuado para cada uno de los motores.

Toma de datos teniendo en cuenta las demás articulaciones.



#### **6.4 AREA DE TRABAJO.**

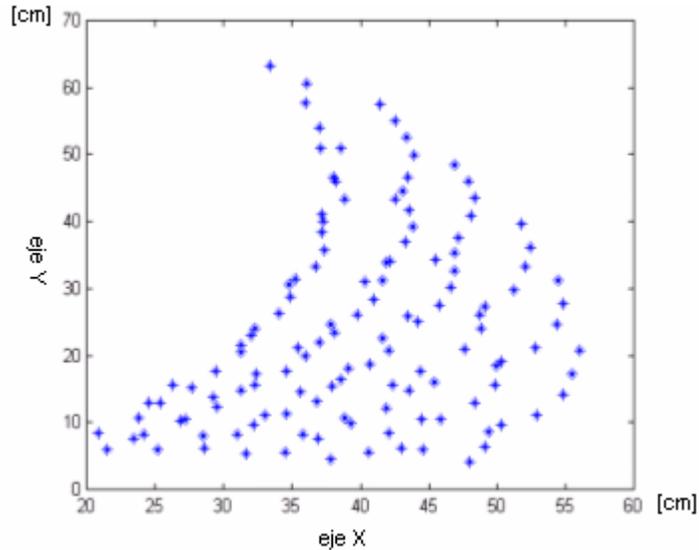
Una vez se movieron los motores con la exactitud necesaria se procedió a observar el área de trabajo donde se mueve el brazo en la posición  $(x,y)$ , como se observa en la figura 6.141. Esta tiene forma de triángulo, en la parte superior se considera que todos los motores están en la posición de inicio (cero vueltas) y en la parte inferior derecha los motores tienen su máxima posición. Esta posición es determinada por los topes mecánicos o por tropiezos que pueda tener el brazo. No hay una función matemática que los contenga y la zona se identificó experimentalmente.

#### **6.5 CINEMÁTICA DIRECTA E INVERSA DEL BRAZO.**

Para realizar la cinemática inversa del brazo con la influencia de las otras articulaciones se entrenaron dos redes neuronales, una donde la entrada sean la vuelta de los motores y la salida sea la posición  $x,y$  y el ángulo que hace la pinza con la horizontal. Esta red tiene tres entradas,  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$  que corresponden al número de vueltas del motor del antebrazo, del brazo y de la pinza. El archivo de entrenamiento se llama traintotal y la consulta de los datos se puede hacer por medio de la función constotal. El número de neuronas intermedias es 58 y el error de entrenamiento fue de  $2e-4$ , que se logró después de 1500 épocas. Para

que la red neuronal diera los datos correctos hubo necesidad de restringir la entrada de las vueltas de los motores a aquellas con las que se hicieron las pruebas.

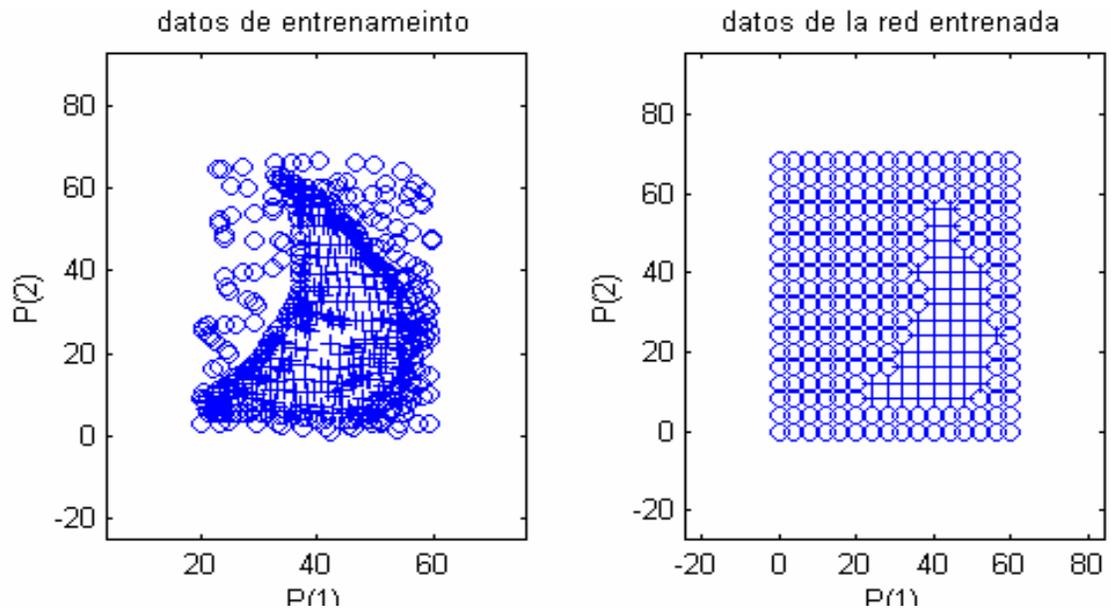
Ilustración 6.14 área de trabajo del brazo.



La cinemática inversa se obtuvo a partir de los mismos datos recolectados para el entrenamiento anterior solo que las entradas son las distancias  $x, y$ , y el ángulo que hace la pinza con la horizontal y la salida es el número de vueltas que debe tener cada motor. Para el entrenamiento fueron necesarias 55 neuronas en la capa intermedia; el entrenamiento se hizo en 160 épocas y el error fue de  $3e-4$ . Para que la red neuronal estuviera dentro de los rangos de trabajo hubo necesidad de entrenar una tercera red neuronal que memorizara el área de trabajo debido principalmente a la falta de una operación matemática que permitiera expresar esta.

La red neuronal que restringe el área de trabajo es una red del tipo probabilística donde la entrada son las coordenadas de trabajo, que fueron tomadas a mano y la salida es la validez de la zona, 1 si no es válido y 2 si es válido. Los datos del entrenamiento y los resultados se muestran en la gráfica 6.15. Esta área debe ser consultada antes de tener los valores correctos de la red usada en la cinemática inversa y solo se hace la consulta si las coordenadas  $x$  y  $y$  están dentro del área de entrenamiento. Para que la red entrenada diera buenos resultados hubo la necesidad de definir muy bien los contornos de trabajo y se tomaron algunos puntos dentro y fuera de la zona de trabajo para definir las áreas. Este trabajo fue dispendioso porque se debió hacer a mano y a prueba y error hasta que la respuesta obtenida fuera la adecuada. Algunas veces la red neuronal da malos resultados debido a la gran dificultad que se tuvo al definir los contornos.

Ilustración 6.15 datos de entrenamiento y resultados del área de trabajo para la cinemática inversa.



## **6.6 MEDICION DEL DESEMPEÑO DE LA RED NEURONAL.**

Para saber si las redes neuronales estaban bien entrenadas fue necesario evaluar su desempeño el cual se realizó en dos etapas. La primera comparación se realizó contra una red teórica y en la otra se evalúa en el desempeño real con el prototipo.

Para revisar el entrenamiento de forma teórica hubo la necesidad de comprobar la red entrenada de forma directa e inversa conjuntamente pues no se pueden tener referentes teóricos, especialmente para la red que trabaja con datos reales. Para esta revisión se tienen como entrada los datos de los ángulos de las articulaciones, por medio de la cinemática inversa se obtienen los datos  $x$ ,  $y$  y  $\theta_m$  que nuevamente son introducidos en la red de la cinemática directa para obtener unos segundos valores de  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  para ser comprobados con los originales como se muestra en la gráfica 6.16.

Para realizar la comprobación teórica se tomaron los datos del ángulo real de las articulaciones dadas por los archivos XYZ e INV\_XYZ y el archivo brazomec. Se tomaron los datos de los ángulos y los datos de la posición  $x, y$ , se entrenaron dos redes neuronales adicionales donde se diera la cinemática directa y la inversa para poderlos comparar. Los archivos usados son trainmat y consmat para la cinemática directa y trainmati y consmati para la cinemática inversa. Para la evaluación se tomaron dos ángulos constantes y uno variable, los resultados se graficaron como se muestra en la gráfica 6.17.

Ilustración 6.16 Comprobación teórica de las redes.

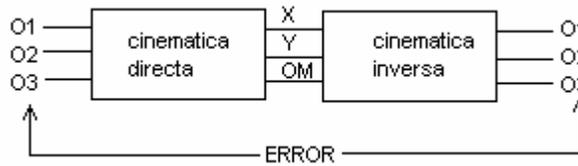
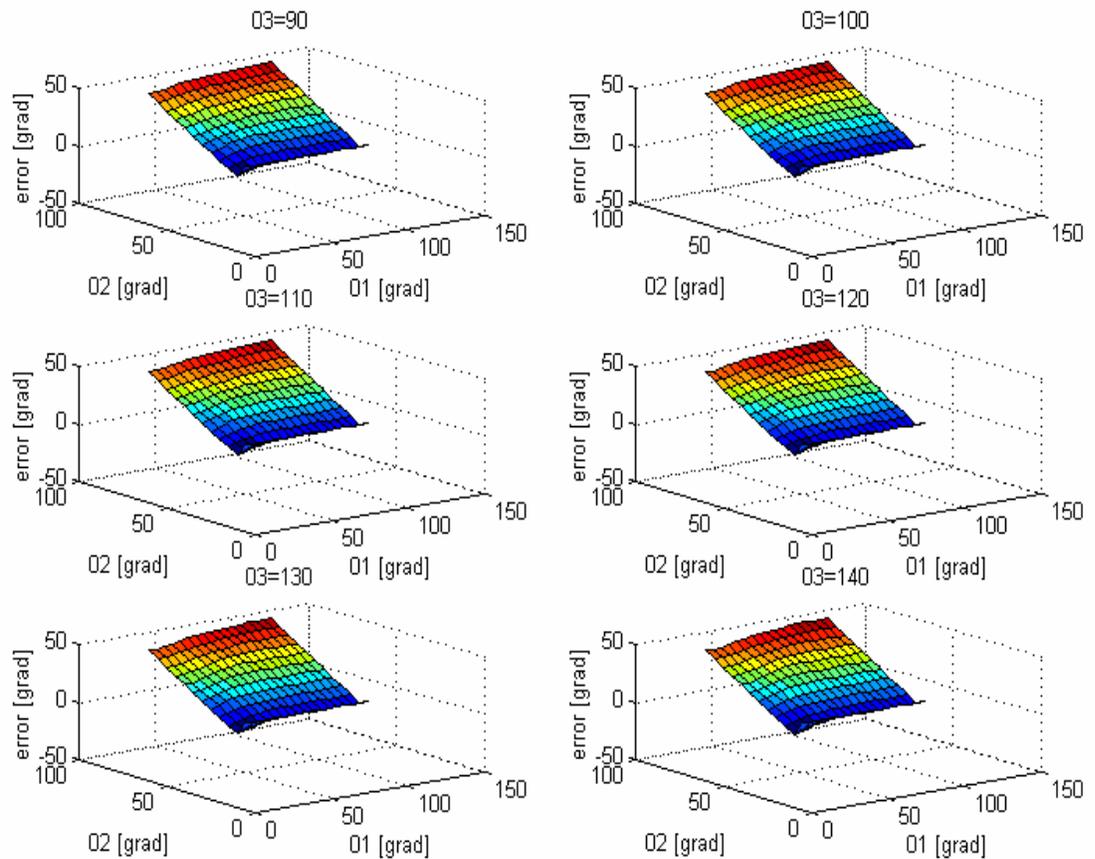
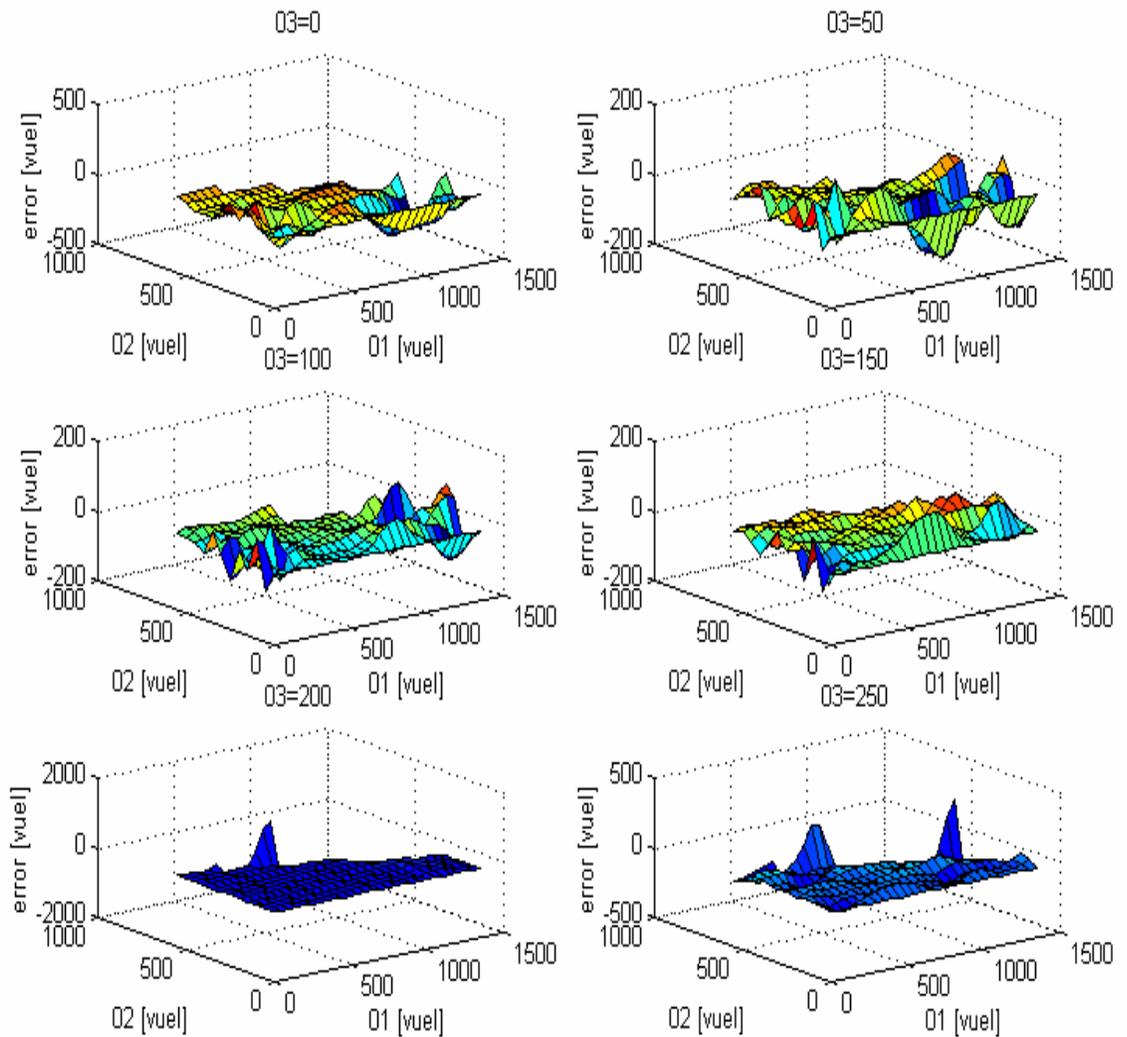


Ilustración 6.17 Desempeño de la cinemática directa e inversa teórica.



El desempeño de la red neuronal real se evaluó usando los datos tomados del brazo mecánico real. Para la prueba se tomaron el número de vueltas de cada uno de los motores y se registraron las distancia x,y y el ángulo que la pinza hace con la horizontal. En un archivo llamado evalreal1 se mantuvieron constantes dos ángulos y se varió el tercero. Los resultados se pueden observar en la gráfica 6.18.

Ilustración 6.18 Desempeño de la cinemática directa e inversa real.



La red neuronal entrenada de forma matemática dio unos resultados excelentes, ya que ésta se pudo entrenar con un intervalo de 5 grados entre movimientos; adicionalmente la relación que hay entre el ángulo y el desplazamiento del brazo es lineal. En los extremos de los movimientos hay una buena toma de datos. Los resultados del entrenamiento de la red neuronal con los datos reales no son tan buenos, ya que no hay una linealidad entre las vueltas del motor y el desplazamiento de las articulaciones; ya que no se disponía de un medio de medición del rango y precisión adecuados y las medidas registradas experimentalmente tenían limitaciones; adicionalmente cuando las articulaciones llegan a los extremos de los movimientos no se pueden tomar tantos datos, por ejemplo cuando la articulación del brazo y del antebrazo están cercanos al límite la pinza solo pudo moverse en un pequeño intervalo; por esta razón cuando el brazo se mueve en los extremos del

triángulo de la gráfica 6.15 hay errores, es decir cuando las vueltas del motor están llegando al límite.

Otro aspecto sobre el desempeño de la red tuvo que ver con la cinemática directa y el prototipo. Para esta prueba se variaron los ángulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  en intervalos conocidos; por medio del programa brazomec2 se movió el prototipo y de forma manual se consignaron los valores de X y Y. para luego ser comparados con sus respectivos valores de entrenamiento de la red. En las gráficas 6.19 y 6.20 se puede ver los errores tanto en X como en Y. Donde hubo mayor error es cuando el ángulo  $\theta_3$  alcanza su máximo valor (255 vueltas); ya que en esta zona pueden presentarse errores por que las cadenas ceden ante el torque ejercido por la carga. Cuando las articulaciones están en su posición inicial y ante recorridos cortos el error es bastante bajo aproximadamente de 60.3 cm mientras en los extremos pueden presentarse errores hasta de 5 cm.

La red neuronal que se entrenó con la cinemática inversa usando los mismos datos que para la red directa no dio los resultados esperados. La prueba se realizó por medio del programa brazomec2 donde a partir de los datos de  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  se hallaron sus respectivos valores de X, Y y  $\theta_m$  y no dieron los datos antes escritos. Para hacer un entrenamiento correcto de la red se debería tomar las distancias X, Y y  $O_m$  directamente del prototipo y reentrenar la red. Para esta investigación fue imposible realizar este procedimiento porque no se pueden tomar los datos de X y Y a intervalos regulares y también debido a la asimetría del prototipo.

Ilustración 6.19 Desempeño de la red neuronal ante la evaluación con el prototipo.

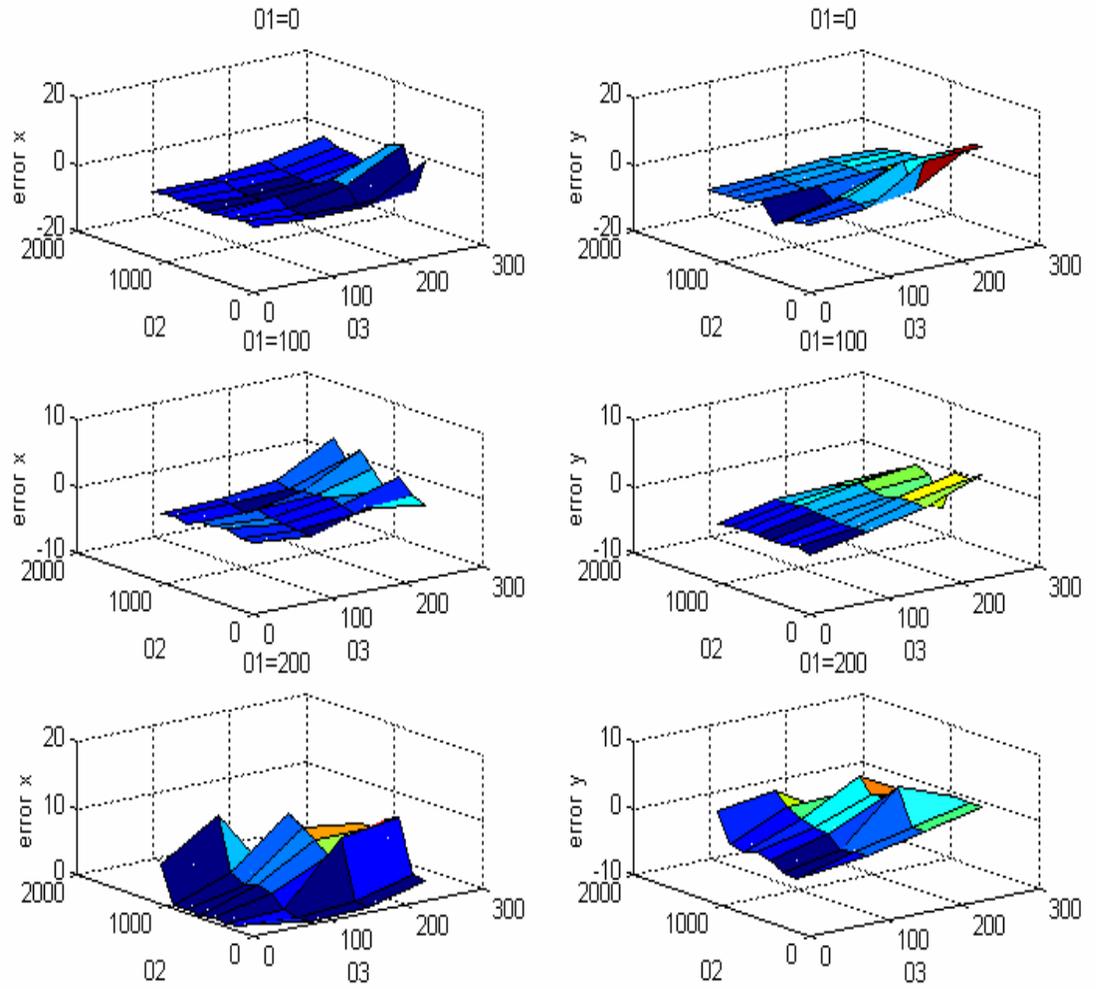
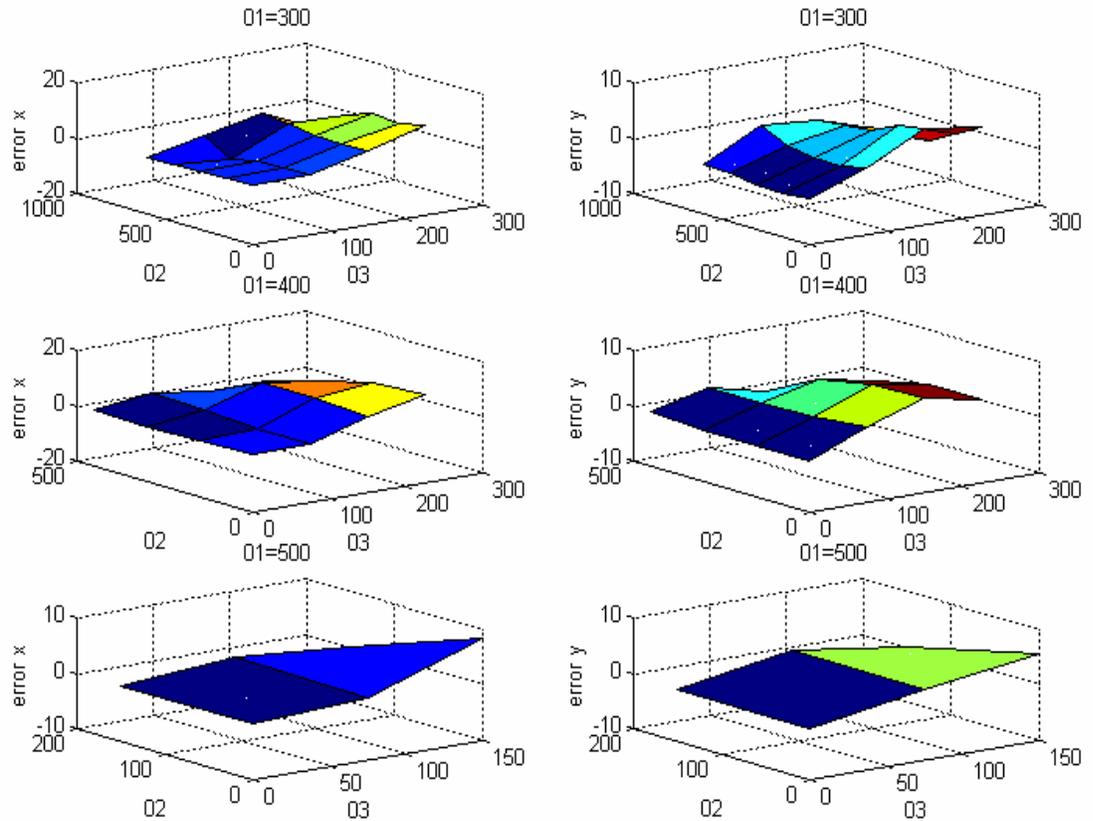


Ilustración 6.20 Desempeño de la red neuronal ante la evaluación con el prototipo.

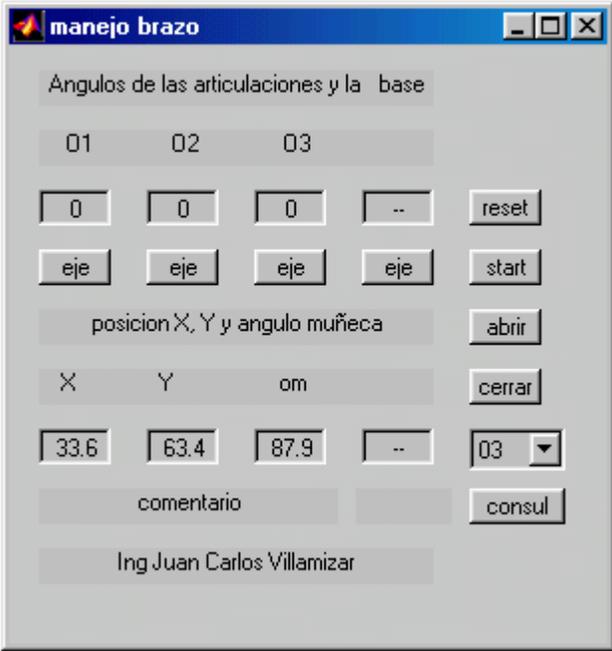


## 6.7 PROGRAMA PARA EVALUAR LA CINEMATICA DIRECTA E INVERSA REAL

En la gráfica 6.21 se puede observar la interfaz de usuario desarrollada para comprobar la cinemática directa e inversa del brazo mecánico desarrollado en esta investigación. El programa se invoca ejecutando el archivo `brazomec2` y la interfaz cuenta con los siguientes campos. Cuatro cajas editoras ubicadas en la parte superior para colocar los datos de  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  que corresponden a las vueltas que debe dar cada motor y una donde se coloca el ángulo de la base. Cuatro cajas editoras en la parte inferior donde se pueden variar las coordenadas X, Y, Z y el ángulo de la pinza con respecto a la horizontal. Cuatro botones pulsadores marcados con la leyenda `eje` que sirven para que el brazo mecánico pueda mover las vueltas dadas en las cajas editoras superiores. Un botón de `reset` para detener el brazo en caso de algún error, un botón marcado con `start` para llevar el brazo a la condición de inicio, dos botones para abrir y cerrar la pinza, una caja del tipo `pop menú` para consultar las posiciones reales de los motores y un comentario que sirve para alertar al usuario sobre

posibles daños. En el extremo inferior izquierdo se coloca un push botton con la leyenda cónsul para consultar el estado del microcontrolador y verificar el estado de funcionamiento del mismo.

Ilustración 6.21 Interfaz para realizar la cinemática directa e inversa del brazo.



## 7 OBSERVACIONES

- Para que haya un buen desempeño del prototipo del robot se requiere que la construcción mecánica del brazo sea muy buena para evitar excentricidad de los piñones, juegos en los cojinetes tanto radiales como axiales, error entre dientes.
- El microcontrolador usado en la implementación del control del brazo aunque hace varios años que se sacó al mercado todavía tiene una gran aceptación en este tipo de aplicaciones.
- El circuito elaborado con el LM555 como detector de flancos para conocer la posición de la articulación es de gran utilidad, aunque presenta problemas de gatilleo en el caso de usar optoaisladores en acetatos. Por esta razón hubo necesidad de implementar un encoder con un material que evite el paso de los rayos infrarrojos y hacerle orificios que si los dejen pasar.
- Debe existir una comunicación efectiva entre el microcontrolador y el computador, ya que de esta depende el buen desempeño del brazo. Para poder hacer una buena comunicación entre los elementos se debió montar un pequeño protocolo de comunicación entre los dos elementos principales de control del brazo.

## 8 CONCLUSIONES

- El prototipo desarrollado para esta investigación trabajó de acuerdo a los diseños en su parte mecánica y eléctrica alcanzando a manejar cargas hasta de 300g. Una vez implementada la red neuronal hubo necesidad de minimizar las cargas manejadas y reducir el espacio de trabajo.
- Cuando se vaya a diseñar la parte mecánica de un brazo hay necesidad de hacer un balance entre costos, peso, precisión, operabilidad, facilidad en el montaje, etc; para que el brazo se desempeñe satisfactoriamente. En esta investigación se le dio bastante peso al control y se trató de reducir costos en la construcción dando un desempeño aceptable en ciertos rangos y en otros hubo necesidad de restringir su operación.
- El peso que debe manejar el brazo es una parte clave en el diseño; ya que en base a este y sus dimensiones se calculan los motores. Que son aun más influyentes en el diseño de los otros motores.
- Se debe diseñar brazos con motores de altas prestaciones para reducir el tamaño del brazo, bajar el consumo de potencia, reducir el tamaño de los mismos. El mejor candidato para esta tarea, cuando se trata de brazos pequeños, lo es el servomotor de c.c; ya que su manejo es fácil, se consiguen fácilmente en el mercado, su desempeño ha mejorado en los últimos años, sus tensiones son estándares, y su peso por vatio es el mas bajo de todos.
- Para mejorar la precisión del brazo hay necesidad de usar uniones rígidas como piñones, ya que las correas y cadenas sufren estiramientos. Por otra parte el peso y costo de un brazo con piñones es más alto y los motores son más grandes.
- El dimensionamiento de los motores teniendo en cuenta el desempeño térmico es el más acertado, ya que permite sobrecargar por algunos instantes el motor y por ende puede manejar cargas un poco superiores a las de diseño.
- En el caso de construcción de brazos mecánicos pequeños, no es necesario tener tan presentes las dimensiones de las varillas que le dan la soporte al brazo ya que en el mercado no se consiguen muy delgadas y el módulo de young no influye demasiado en el posicionamiento.
- Cuando se necesite registrar la posición de un brazo articulado, es aconsejable usar sensores que se acoplen directamente en el eje del motor, para reducir el error producido por el desperfecto de la construcción mecánica y no acoplarlos directamente en los motores.

- Cuando se trabaje con brazos mecánicos, hay necesidad de tener en cuenta el efecto de una articulación en las demás y en lo posible no trabajar con articulaciones de forma aislada.
- La implementación de la red adaline como controlador de un motor no mejoró el desempeño del PI, ya que los parámetros de entrenamiento de la red provienen de mismo controlador. Se hace necesario realizar un control más robusto para mejorar el desempeño de la red neuronal.
- Para que la red neuronal sea capaz de posicionar el brazo con exactitud hay necesidad de entrenarla con gran cantidad de datos, tarea que resulta dispendiosa si se debe realizar a mano; en el diseño futuro se debe implementar un mecanismo que permita tomar datos de forma automática con el uso del computador.
- Los datos que se usan para entrenar una red neuronal con la cinemática directa de un brazo no sirven para entrenar la red neuronal que desarrolle la cinemática inversa. Por tal razón se debe mejorar el diseño mecánico para poder hacer esta tarea.
- Se debe tener presente que el manejo de cargas y el campo de trabajo de un brazo se ve reducido cuando se usan redes neuronales debido a la poca disposición de datos en los extremos de trabajo.

## 9 MEJORAS AL PROYECTO.

- Para que la red neuronal prediga de forma adecuada el posicionamiento de una articulación hay necesidad de conocer los pesos que manejan las demás articulaciones, debido a la falta de tiempo no se pudo implementar una subrutina en el microcontrolador que pesara la carga y evitar complicaciones al momento de trabajar el brazo.
- Implementar las subrutinas de la red adaline en un DSP y lenguaje de alto nivel para minimizar los errores en el posicionamiento y desempeño del brazo articulado.
- el protocolo de comunicaciones entre el brazo y el computador se puede mejorar usando la comunicación serial para reducir el tamaño del cable de conexión entre los dos elementos, ya que este puede interferir en el posicionamiento de la base del robot.
- Se debe estudiar un poco mejor el desempeño de la red adaline en el posicionamiento del motor con el fin de mejorar el overshoot y evitar los trastornos que se tienen al arrancar el control y al parar el control.
- Cuando se realice la detección de niveles en los encoders de posteriores prototipos hay necesidad de cambiar el detector de prioridad usado en esta, ya que el detector de flancos presentó problemas con cierto tipo de encoders

## 10 BIBLIOGRAFIA.

A. Y. ildirelq M. W. Vrmdegrift, and F. L. Lewis, "A neural network controller for flexible-link robots; in IEEE Int. Symp. Intelligent Control Aug. 1994, pp. 63-68.C. W. Han and E. J. Crane; 1948Mechanics of machinery; New York; Mcgraw Hill;

"Chun Sub Moon", Jung 11 Park\*, Ki Dong Lee", Suk Gyu Lee", Jae Hyung Lee\*"; design of Position Controller of Linear Pulse Motor Using Neural Network; Proceedings of the American Control Conference Philadelphia, Pennsylvania o June 1998.

F. L. Lewis, K. Liu, and A. Y4 ildirek, "Neural net robot controller: structure and stability proofs: in Proc. 3P IEEE Conj Decision and Control, Dec. 1993, PP. 2785-2791.

Fu, King Sun; Gonzalez, R. C; Lee C. S. G; Robótica: control, detección, visión e inteligencia; Madrid; McGraw Hill; 1988.

Frank Ciuca, Tarek Lahdhiri, and Hoda A. EIMaraghy; LINEAR ROBUST MOTION CONTROL OF FLEXIBLE JOINT ROBOTS PART A: MODELING Proceedings of the American Control Conference San Diego, California l June 1999.

Garcia Arenas, Guillermo; Atomatización y robótica industrial; Universidad Industrial de Santander;1986.

Hamton Ray E.; Mecanismos fundamentales; Buenos aires; Victor Zera; 1961.

Jemlica, J. Martyrer; E. Schualitz, A; Mecanismos, engranajes y acoplamientos; Bilbao; Urmo, 1969.

K. S., Narendra, and K. Parthasarathy, "Identification and control of dynamic systems using neural networks," IEEE Trans. Neural Networks, vol. 1, pp.4-27, 1990.

Layarte Urrat; Behety C. F. Cinemática de los engranajes; estudio de los mecanismos de ruedas dentadas; Buenos Aires; Gustavo Hill; 1952.

Luis B. Gutierrez and Frank L. Lewis; implementation of a neural net tracking controller for a single flexible link comparison with pd and ph controllers; IEEE transaction.

Manual de mecánica industrial; Madrid; Cultura S. A.

Masaki YAMAKITA and Takashi SATOH, Adaptive ANN Control of Robot Arm Using Structure of Lagrange Equation, Proceedings of the American Control Conference San Diego, California June 1999. Reg. James A; Introduction to robotics; a system approach; Prentice hall; 1985;

Qiqiang Li . Zhengqun Cheng, and Jixin Qian; Self-Learning Fuzzy PID Controller Based on Neural Networks; Proceedings of the American Control Conference Philadelphia, Pennsylvania \* June 1998.

Rehg, James A; introduction to robotics in CIM systems; Prentice hall; 1985.

Rashell C. Eberhart and Roy W. Dobbins; Neural network pc tools: a practical guide; Academic press; San diego CA; 1993

Schwamb; Peter; Nociones de mecanismos; Madrid; Aguilar; 1954.

Timothy Masters; Practical neural networks in C++; San Diego CA; Academic press; 1993

WANG Jin, GAO Wenzhong and WANG Fuli; A PID-LIKE CONTROLLER FOR NONLINEAR SYSTEMS;

Wen Yut, Alexander S. Poznyakt and Edgar N. Sanchez\*; Adaptive Control of of Two-Link Manipulator via Dynamic Neural Network; Proceedings of the American Control Conference San Diego, Californial June 1999.

Y,-M.Park, M.-S.Choi, and K. Y.Lee, "An optimal tracking neuro-controller for nonlinear dynamic systems," IEEE Trans. neural networks, VO1.7,pp. 1099- 1110, Sept 1996.