



UNIVERSIDAD PANAMERICANA
SEDE GUADALAJARA

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE
ROBOT, DE CONFIGURACION CARTESIANA,
CONTROLADO POR COMPUTADORA, PARA
EL LABORATORIO DE ROBOTICA DE LA
UNIVERSIDAD PANAMERICANA.

FERNANDO SPAOA DAVALOS

Tesis presentada para optar por el título de Licenciado en
Ingeniería Electromecánica con reconocimiento de Validez
Oficial de Estudios de la SECRETARÍA DE EDUCACION
PÚBLICA, según acuerdo núm. CC933087 con fecha 29-1-93

Zapopan, Jal., Agosto de 1994



UNIVERSIDAD PANAMERICANA
SEDE GUADALAJARA

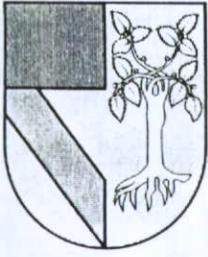
DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE
ROBOT. DE CONFIGURACION CARTESIANA,
CONTROLADO POR COMPUTADORA, PARA
EL LABORATORIO DE ROBOTICA DE LA
UNIVERSIDAD PANAMERICANA.

FERNANDO SPADA DAVALOS

Tesis presentada para optar por el título de Licenciado en
Ingeniería Electromecánica con reconocimiento de Validez
Oficial de Estudios de la SECRETARIA DE EDUCACION
PUBLICA, según acuerdo núm. 00933087 con fecha 29-1-93

Zapopan, Jal., Agosto de 1994

CLASIF: _____
ADQUIS: 47412
FECHA: 08/08/02
DONATIVO DE _____
\$ _____



UNIVERSIDAD PANAMERICANA
SEDE GUADALAJARA

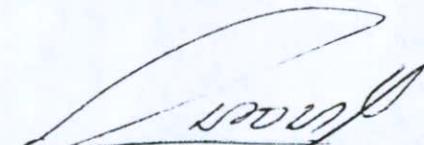
DICTAMEN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

FERNANDO SPADA DAVALOS

Presente

En mi calidad de Presidente de la Comisión de Exámenes Profesionales y después de haber analizado el trabajo de titulación en la alternativa tesis titulado "**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE ROBOT, DE CONFIGURACION CARTESIANA, CONTROLADO POR COMPUTADORA, PARA EL LABORATORIO DE ROBOTICA DE LA UNIVERSIDAD PANAMERICANA**", presentado por usted, le manifiesto que reúne los requisitos a que obligan los reglamentos en vigor para ser presentado ante el H. Jurado de Examen Profesional, por lo que deberá entregar ocho ejemplares como parte de su expediente al solicitar el examen.

Atentamente



EL PRESIDENTE DE LA COMISION

Zapopan, Jal. octubre 17 de 1996



UNIVERSIDAD PANAMERICANA

SEDE GUADALAJARA

Agosto 15 de 1994

COMITE DE EXAMENES PROFESIONALES
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA
UNIVERSIDAD PANAMERICANA

Hago constar que el alumno: **FERNANDO SPADA DAVALOS**, ha terminado satisfactoriamente el trabajo de tesis titulado: **"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE ROBOT, DE CONFIGURACION CARTESIANA, CONTROLADO POR COMPUTADORA, PARA EL LABORATORIO DE ROBOTICA DE LA UNIVERSIDAD PANAMERICANA "**, que presentó para optar por el título de la Licenciatura en Ingeniería Electromecánica.

Se extiende la presente para los fines que convengan al interesado.

A t e n t a m e n t e

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Luis Felipe Guerrero Sandoval', is written over the typed name.

ING. LUIS FÉLIX GUERRERO SANDOVAL
Asesor de Tesis
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Dedicada a:

Mis Padres, que me dieron la vida y el deseo de superación.

Mi Hermana, a la que, aunque no lo crea, amo con todo mi corazón.

Mi Asesor en la tesis, quien fue mi maestro y es mi amigo.

A mi compañera de toda la vida.

A la Escuela de ingeniería.

INDICE

	Página
INTRODUCCION	6
I. FUNDAMENTOS DE LA ROBOTICA	8
A. Historia y fundamentos de la tecnología del robot	8
B. Anatomía y volumen de trabajo	9
C. Sistemas de impulsión	14
D. Sistemas de control	17
E. Precisión del movimiento	22
F. Programación	26
G. La automatización	30
H. Perspectivas para el futuro	34
II. HERRAMIENTAS PARA LA AUTOMATIZACION Y LA ROBOTICA	36
A. Introducción	36
B. Sensores	37
C. Analizadores	42
D. Actuadores	44
E. Impulsores	46
III. CONTROL DEL SISTEMA	62
A. Introducción	62
B. La computadora integrada en el control	63
C. Los PLC	67
IV. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO	74
A. Introducción	74
B. Los requisitos	74
C. Las consideraciones	75
D. El diseño	76

V.	EL CIRCUITO DE CONTROL	78
	A. Introducción	78
	B. La computadora	78
	C. El circuito	83
VI.	DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO	92
	A. Introducción	92
	B. El diseño inicial	92
	C. El método de diseño y cálculo	93
	D. El actuador final	98
	E. Las secciones de movimiento en los tres ejes	100
VII.	EL SOFTWARE CONTROLADOR	105
	A. Introducción	105
	B. Descripción del lenguaje	105
	C. Características del programa de control	107
	D. La programación del puerto paralelo	108
	CONCLUSIONES	110
	BIBLIOGRAFIA	114
	APENDICE A	
	APENDICE B	

INTRODUCCION

El gran desarrollo de la industria en los últimos años, es causa y efecto del desarrollo de la robótica y la automatización. La industria incorpora cada vez mas a los robots y a los mecanismos automáticos en sus procesos. Los robots ya no son solo personajes o temas de la ciencia ficción. No sólo son monstruos que nadie puede entender. Ahora los robots pueden cumplir con muchas tareas repetitivas o peligrosas.

El Ingeniero Electromecánico forma y debe formar parte de este desarrollo, tanto el de la industria, como el de la automatización y la robótica. Debe conocer las tendencias, diseños y aplicaciones de los robots y los mecanismos automáticos. El Ingeniero Electromecánico, es el que debe llenar el vacío que existe entre las Ingenierías Electrónica, Mecánica y en Sistemas. Esta es la gran ventaja del Ingeniero Electromecánico, puede conocer una gran diversidad de campos.

La razón por la que se me ocurrió y tomé este proyecto para mi tesis, es precisamente el desarrollo de la robótica. Además, me propuse probar, que el Ingeniero Electromecánico esta capacitado para tratar con temas de las tres ingenierías que ya antes mencioné.

Se decidió entrar en tres areas: La Mecánica, La Electrónica y la Computación, ademas de las diversas areas que están dentro de estas grandes ramas.

En el momento en el que la Universidad Panamericana, decidió financiar la construcción del prototipo, el proyecto tomó aún mayor importancia.

El proyecto trata de cómo se diseñó y construyó el prototipo, de qué se utiliza para controlarlo, de la lógica de funcionamiento, de la tecnología que se utiliza y del programa que lo controla, además de la justificación de todos los temas anteriores.

El primer capítulo habla sobre las bases y los inicios de la robótica, de qué se incluye en ella y de qué se puede considerar un robot. En el segundo capítulo, se habla de las herramientas de la robótica, de qué se utiliza en la actualidad; en pocas palabras, de la tecnología de los robots. En el tercer capítulo se toca el tema del control de los sistemas automáticos y de los robots. En el cuarto capítulo se habla acerca de las consideraciones especiales sobre el diseño del prototipo, es decir, de los detalles que no podían faltar al momento de construirlo. El diseño y construcción del circuito controlador, son tema del quinto capítulo. El diseño, cálculo y construcción del prototipo, son tema del sexto capítulo. Y el séptimo capítulo habla sobre el programa controlador.

En la sección final de la tesis, los apéndices, se presentan los diagramas del circuito, las especificaciones, un listado del programa y datos técnicos del prototipo.

I. FUNDAMENTOS DE LA ROBOTICA

A. Historia y Fundamentos de la Tecnología del Robot

Sin duda alguna, la Ciencia Ficción ha contribuido al desarrollo de la robótica, ofreciendo ideas a la gente interesada en este campo y dando a conocer las múltiples ventajas que este descubrimiento ofrece. Durante los siglos XVII y XVIII se dan los primeros pasos en el desarrollo de la automatización, aún cuando no todos ellos tienen relación directa con la robótica industrial. Jacques de Vaucanson construyó varios músicos de tamaño humano a mediados del siglo XVIII, Henri Maillardert construyó una muñeca mecánica que era capaz de escribir y dibujar por medio de una serie de levas que funcionaban como programa; ejemplos, los dos, de autómatas para el entretenimiento. Las primeras raíces de los verdaderos robots industriales se dan con el surgimiento del control numérico en las máquinas y herramientas. Como su nombre lo indica, este tipo de control realiza su acción por medio de números, aquí también surge el campo de la telequímica es decir: << la utilización de un manipulador remoto controlado por un ser humano >> . ¹

En 1954 el inventor británico C.W. Kenward solicitó una patente para el diseño de un robot. La patente británica fue emitida en 1957. En 1959 se introduce el primer robot comercial por la Planet Corporation, controlado por interruptores de fin de carrera y levas. Poco tiempo después de esto se introduce oficialmente la robótica a la industria. En 1961 un robot para atender una

¹ GROOVER Mikell P., WEISS Mitchell, NAGEL Roger N., ODREY Nicholas G. Robótica Industrial. México, Ed. Mc Graw Hill, pág. 6

máquina de fundición en troquel se introduce por la Ford Motor Company. Posteriormente surgen aplicaciones como robots para pintura, desplazamiento de materiales, soldadura, etc. Con el desarrollo de los robots, se desarrolla también la programación y el control de los mismos, de modo que surge lo que hoy se conoce como CAD-CAM (Computer Aided Design - Computer Aided Manufacturing), es decir, diseño asistido por computadora, manufactura asistida por computadora y junto con esto surge también el desarrollo de los PLC (Programmable Logic Controllers) Controladores Lógicos Programables. El desarrollo actual de la robótica es para muchos de nosotros increíble de creer, pues tan solo hace una generación lo que hoy podemos observar en, por ejemplo, plantas automotrices, era tan sólo tema de la ciencia ficción. Aquí la definición de un robot industrial proporcionada por la Robotics Industries Association (RIA) antes el Robotics Institute of America (RIA):

<< Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprograble, diseñado para desplazar materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales mediante movimientos programados variables para la ejecución de una diversidad de tareas>>. ²

B. Anatomía y Volumen de Trabajo

La anatomía del robot se refiere a la construcción física del cuerpo, brazo y muñeca de la máquina. La mayoría de los robots en la actualidad están fijos sobre una base sujeta al suelo, el cuerpo unido a la base y el brazo unido al

² GROOVER Mikell P., WEISS Mitchell, NAGEL Roger N., ODREY Nicholas G. Robótica Industrial. México, Ed. Mc Graw Hill, pág. 6

cuerpo. Al final del brazo se encuentra la muñeca, construida para poder realizar una diversidad de movimientos. Los movimientos relativos entre los diversos componentes del Robot son proporcionados por un conjunto de articulaciones, y estas pueden implicar desplazamientos o giros. A todo el conjunto anterior se le llama comúnmente manipulador. Unida a la muñeca del robot va una mano. El nombre técnico aplicado a la mano es efector final, y no se le considera parte de la anatomía de la máquina.

Existen cuatro configuraciones de robots comunes, existen robots industriales en una gran variedad de tamaños, formas y configuraciones físicas y la gran mayoría de ellos tienen una de estas cuatro configuraciones básicas:

- (a) Polar
- (b) Cilíndrica
- (c) Cartesiana
- (d) Brazo Articulado

Estas cuatro configuraciones están ilustradas en la figura 1.1.

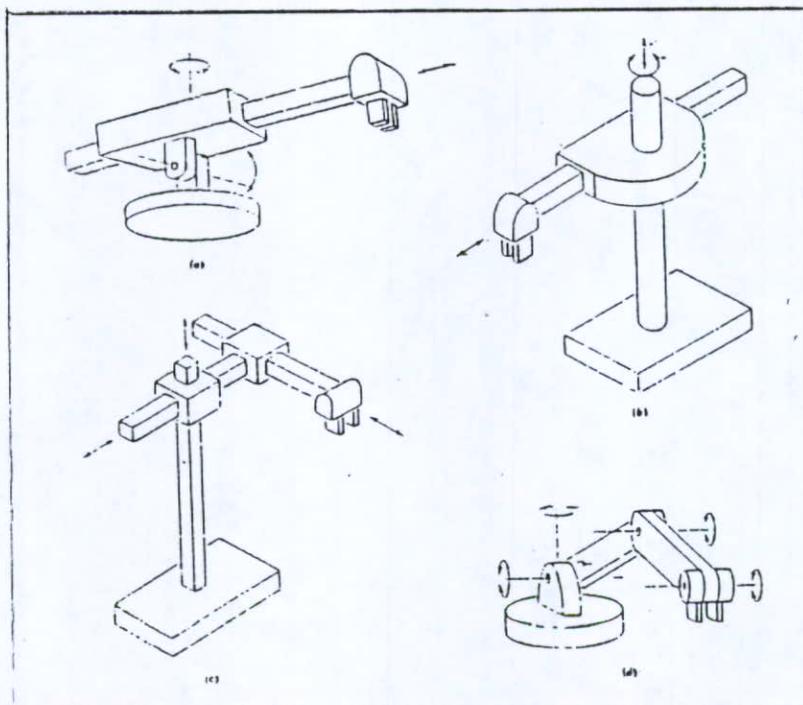


FIGURA 1.1

La configuración que nos ocupa es la cartesiana, que se encuentra encuadrada en la figura 1.1. Según lo muestra la figura, utiliza una columna vertical y un dispositivo de deslizamiento que puede moverse hacia arriba o hacia abajo a lo largo de la columna. El brazo del robot está unido al dispositivo deslizante de modo que a su vez puede moverse en sentido horizontal con respecto a la columna y a esta unión, se encuentra una tercera que cumple con el mismo requisito de moverse en sentido horizontal con respecto a la columna; cada uno de los tres movimientos son perpendiculares entre sí. Con esto se logra abarcar los tres planos de las coordenadas cartesianas, x , y , z . Desplazando los tres dispositivos deslizantes entre sí, el robot es capaz de operar dentro de una envolvente rectangular de trabajo.

Existen ventajas y desventajas para cada una de las cuatro anatomías del robot, simplemente debido a sus geometrías. En términos de repetitibilidad del movimiento (la capacidad para desplazarse de un punto a otro determinado del espacio con un error mínimo), es probable que el cartesiano tenga ventaja. Debido a su estructura inherentemente rígida, al robot de configuración cartesiana también se le suele llamar robot xyz , robot rectilíneo, robot de caja o de "pórtico". Los robots cartesianos de pórtico suelen ser grandes y tienen la forma de una grúa de tipo de pórtico.

Los robots industriales están diseñados para realizar un trabajo productivo. El trabajo se realiza permitiendo que el robot desplace sus componentes mediante una serie de movimientos y posiciones. Los movimientos de un robot pueden dividirse en dos categorías generales: movimientos de brazo y cuerpo y movimientos de la muñeca. Aquí surge un nuevo concepto llamado "grado de

libertad" y se define como: << Los movimientos de articulaciones individuales asociados con las categorías generales de movimientos >>. ³

Un robot industrial típico está dotado de cuatro a seis grados de libertad. Los movimientos del robot se realizan por medio de articulaciones accionadas y esta consideración se utiliza para basar la nomenclatura de los diferentes modos de movimiento. Las articulaciones utilizadas en el diseño de robots industriales suelen implicar un movimiento relativo de las uniones contiguas, movimiento que es lineal o rotacional.

Para efectos de esta tesis tanto el movimiento lineal como el rotacional son de importancia. El movimiento lineal implica un movimiento deslizante o de traslación de las uniones de conexión. Este movimiento puede conseguirse de varias formas, por ejemplo mediante un pistón, un mecanismo telescópico y el movimiento relativo a lo largo de un carril o vía lineal. En el caso de los movimientos rotacionales existen como mínimo, tres tipos de articulación giratoria. En la primera articulación el eje de rotación es perpendicular a los ejes de las dos uniones, el segundo tipo implica un movimiento de torsión entre las uniones de entrada y salida; el eje de rotación de la articulación de torsión es paralelo a los ejes de ambas uniones. El tercer tipo es una articulación de revolución en la que la unión de entrada es paralela al eje de rotación y la de salida es perpendicular a dicho eje; esencialmente, la unión de salida gira alrededor de la de entrada como si estuviera en órbita. Para el caso

³ GROOVER Mikell P., WEISS Mitchell, NAGEL Roger N., ODREY Nicholas G. Robótica Industrial. México, Ed. Mc Graw Hill, pág. 6

del robot de configuración cartesiana, los tres grados de libertad asociados con los movimientos del brazo y del cuerpo son:

1. **Transversal vertical (eje z):** Es la capacidad para desplazar la muñeca hacia arriba o abajo para proporcionar la postura vertical deseada.
2. **Hacia dentro o hacia fuera (eje y) :** Implica la extensión o retracción (movimiento hacia adentro o afuera) del brazo desde el centro vertical del robot.
3. **Derecha o izquierda (eje x) :** Extensión o retracción del brazo a partir del eje y.

Volumen de Trabajo es el término que se refiere al espacio dentro del cual el robot puede manipular el extremo de su muñeca, o el punto al cual esta unido el efector final, este puede ser por ejemplo las pinzas que toman un objeto. Es importante señalar que el efector final no se cuenta para obtener el espacio, pues es muy variable el tamaño del efector que quede acoplado a la muñeca, además el efector final podría no ser capaz de alcanzar puntos dentro del espacio del volumen normal de trabajo, debido a la combinación particular de límites de articulaciones de brazo.

El volumen de trabajo viene determinado por las siguientes características físicas del robot:

- La configuración física del robot.

- Los tamaños de los componentes del cuerpo.
- Los límites de los movimientos de las articulaciones del robot.

La configuración de los tipos de robot tiene una relación directa con la forma del espacio que forman en su volumen de trabajo, es decir, un robot de coordenadas polares tiene un volumen de trabajo que es una esfera parcial, un robot de coordenadas cilíndricas tiene una envolvente de trabajo cilíndrica, un robot de coordenadas cartesianas tiene un espacio de trabajo de forma rectangular y un robot de brazo articulado tiene un volumen de trabajo aproximadamente esférico. El tamaño está obviamente influido por las dimensiones de los componentes del brazo y por los límites de los movimientos de sus articulaciones. En la configuración cartesiana, los límites de trabajo quedan determinados simplemente por la extensión de los ejes del robot, es decir, las medidas de cada uno de los componentes dentro de los tres grados de libertad darán como resultado el volumen de trabajo, que como ya se ha mencionado en la configuración cartesiana es semejante a un rectángulo.

C. Sistemas de Impulsión

El sistema de impulsión del robot determina la capacidad del robot para desplazar su cuerpo, brazo y muñeca. El sistema impulsor determina también la velocidad de movimiento del brazo, la resistencia mecánica del robot y su rendimiento dinámico. De alguna manera el tipo de impulsión que se utilice determinará la aplicación del robot.

Existen tres tipos de sistemas de impulsión en el mercado, y todos los robots industriales se encuentran accionados por alguno de estos tipos; los tres tipos son:

1. Impulsión hidráulica
2. Impulsión eléctrica
3. Impulsión neumática

Las primeras dos son los tipos más utilizados en los robots más sofisticados. La impulsión hidráulica suele estar asociada con los robots más grandes, la ventaja habitual de este tipo de impulsión es proporcionar al robot una mayor velocidad y resistencia mecánica, sin embargo sus inconvenientes radican en que suelen añadir más necesidades de espacio y que un sistema hidráulico es propenso a las fugas de aceite, lo que puede resultar molesto e inconveniente.

Los sistemas de impulsión eléctrica no suelen proporcionar tanta velocidad o potencia como los sistemas hidráulicos, pero la exactitud y la repetibilidad de los robots de impulsión eléctrica suelen ser mejores. Como consecuencia, los robots eléctricos tienden a ser más pequeños, con menos exigencias de espacio y sus aplicaciones tienden hacia un trabajo más preciso, tal como el montaje. Los robots de impulsión eléctrica son accionados por motores paso a paso o servomotores de corriente continua.

Estos motores son idóneos para el accionamiento de articulaciones rotacionales mediante sistemas de engranajes y trenes impulsores. Aunque la impulsión neumática la trataremos con mayor detalle durante el capítulo II,

cabe mencionar que suele reservarse para los robots más pequeños que tienen menos grado de libertad (movimientos de dos a cuatro articulaciones). Estos robots suelen estar limitados a simples operaciones de "tomar y dejar" con ciclos rápidos. La potencia neumática puede adaptarse fácilmente a la actuación de dispositivos de pistón para proporcionar un movimiento de traslación de articulaciones deslizantes.

También puede emplearse para accionar actuadores giratorios para articulaciones rotacionales; las variedades también las trataremos con mayor detalle durante el capítulo II.

La velocidad de movimiento, es la velocidad medida en la muñeca de los robots industriales actuales. Las capacidades de velocidad llegan hasta un máximo de 1.7 m/s. Por tanto, las mas altas velocidades pueden observarse en los robots más grandes con el brazo extendido a su distancia máxima del eje vertical del robot. Los robots hidráulicos son los mas veloces. La velocidad determina la rapidez con la que el robot puede realizar un ciclo de trabajo determinado. La mayoría de los robots tienen diferentes medios mediante los cuales se pueden ajustar las velocidades. La determinación de la velocidad óptima, además de un simple intento por reducir al mínimo el tiempo del ciclo de producción, dependería de otros factores tales como:

- La exactitud con la que debe de situarse el efector final.
- El peso del objeto que se manipula.
- Las distancias a recorrer.
- El tipo de objeto y en su caso el contenido del mismo

Suele existir una relación inversa entre la exactitud y la velocidad de los movimientos del robot. Mientras mas exactitud se requiere en el movimiento o posicionamiento del efector final, es necesario reducir la velocidad con el fin de corregir los errores que pudieran presentarse en las articulaciones del robot, con el objeto de lograr la posición final deseada. El peso de los objetos manejados tiene efectos sobre la velocidad, debido a su inercia; mayor peso significa mayor inercia. Además, mientras mayor sea el peso a transportar, mayor será la cantidad de movimiento (momento). En general, es cierta la afirmación de que el robot debe accionar con mayor lentitud para tratar con seguridad estos factores.

D. Sistemas de Control

Resulta obvio que para que el robot pueda operar se hace necesaria la utilización de un medio que permita controlar su sistema de impulsión y obtener la regulación adecuada de sus movimientos. En esta sección se trata de explicar de manera breve los diversos tipos de sistemas de impulsión y las características de cada uno de ellos. La explicación mas profunda de los tipos de sistema de impulsión y, en particular del que se utilizará en el desarrollo del prototipo de esta tesis, se dará en el Capitulo III.

En general existen cuatro tipos de sistemas para el control del robot. Las cuatro categorías de robots, de acuerdo con sus sistemas de control son:

1. **Robots de Secuencia Limitada**
2. **Robots de Reproducción con Control Punto a Punto**

3. Robots de Reproducción con Control de Recorrido Continuo
4. Robots Inteligentes.

De las cuatro categorías, los robots de secuencia limitada representan el control más primitivo o de nivel más bajo y los robots inteligentes representan el nivel más alto. Los robots de secuencia limitada no utilizan servomecanismos para indicar las posiciones relativas de las articulaciones. Se controlan por el posicionamiento de interruptores de fin de carrera y/o topes mecánicos para establecer los puntos finales del desplazamiento para cada una de las articulaciones. En otras palabras, el establecimiento de las tareas a realizar por parte del robot, es cuestión del posicionamiento de los topes y/o interruptores en los lugares adecuados y las secuencias de estos topes, implica una puesta a punto mecánica del manipulador y no una programación del robot en el sentido común de la palabra. En resumen, con este método de control, el robot sólo es capaz de desplazarse a sus límites de desplazamiento extremos. Esto tiene el efecto de limitar a un número pequeño la cantidad de puntos que el efector final puede alcanzar. No suele existir realimentación para especificar que el robot ha encontrado la posición deseada para este tipo de control; la impulsión neumática es la utilizada con mayor frecuencia. Las aplicaciones para este tipo de control suelen implicar tareas simples, como la de tomar y dejar.

Los robots de reproducción utilizan una unidad de control más sofisticada, en la que una serie de posiciones y movimientos se programan en el robot para que sean repetidos cuantas veces sea necesario, bajo su propio control. El término de programación en el robot engloba el procedimiento de enseñar y

registrar en memoria. Los robots de reproducción suelen tener alguna forma de servomecanismos para el control, para asegurar que las posiciones obtenidas por el robot son las posiciones que se le enseñaron. Los robots de reproducción pueden clasificarse en dos categorías: robot de punto a punto (PTP) y robot de trayectoria continua (CP). Los de punto a punto son capaces de realizar ciclos de movimiento que consisten en una serie de localizaciones de puntos deseados y acciones afines; al robot se le enseña cada punto y este punto queda registrado en su programa. El control de la secuencia de posiciones es el adecuado para aplicaciones como la carga de máquinas y la soldadura por puntos.

Los robots de trayectoria continua son capaces de realizar ciclos de movimiento, en los que se controla la trayectoria seguida por el robot. Esto se cumple efectuando el desplazamiento del robot a través de una serie de puntos próximos que describen la trayectoria deseada. Los punto individuales los define la unidad de control y no el programador. El movimiento en línea recta es un método de control normal para los robots de trayectoria continua. Lo que hace el programador del robot es especificar el punto inicial y el punto final de la trayectoria deseada y la unidad de control calcula la secuencia de puntos que permite cumplir la trayectoria deseada.

En este tipo de control el uso de las computadoras ya es indispensable; se suele utilizar un microprocesador como unidad central de proceso de la computadora.

El control CP se requiere para algunos tipos de aplicaciones industriales, tales como el revestimiento por pulverización y la soldadura por arco.

Los robots inteligentes constituyen una clase cada vez mas numerosa de los robots industriales, tienen la capacidad no solo para reproducir un ciclo de movimiento programado, sino para interaccionar con su entorno de una manera que efectivamente parece inteligente. En esta aplicación es totalmente indispensable la utilización de una computadora digital. Los robots inteligentes pueden modificar su ciclo programado en respuesta a los cambios en su entorno. Pueden tomar decisiones lógicas basándose en los datos de los sensores que tienen. Los robots de esta clase tienen capacidad de comunicarse durante el ciclo de trabajo con los operadores humanos o con sistemas basados en la computadora. Los robots inteligentes se suelen programar utilizando un lenguaje similar al inglés y un lenguaje simbólico. Las aplicaciones típicas de los robots inteligentes son las tareas de montaje y las operaciones de soldadura por arco.

En el control de los robots existen dos factores importantes a considerar: la velocidad de respuesta y la estabilidad; estas son dos características importantes en el rendimiento dinámico en relación con el diseño de los sistemas de control.

La *velocidad de respuesta* se refiere a la capacidad del robot de desplazarse de una posición a otra en un breve periodo, este tiempo de respuesta esta obviamente relacionado con la velocidad del movimiento del robot. En robótica

la estabilidad se define como, la medida de las oscilaciones que se producen en el brazo durante el movimiento desde una posición a la siguiente.

Un robot con buena estabilidad presentará pocas o ninguna oscilaciones durante el movimiento o el fin de éste. En el diseño de controladores de robots es deseable que se tenga un tiempo de respuesta corto y una buena estabilidad, pero en la realidad estos dos son incompatibles. La estabilidad de un robot puede lograrse en cierta medida incorporando elementos amortiguadores de diseño del mismo. El problema con la amortiguación, es que reduce la velocidad de respuesta; en consecuencia, existe una solución en donde se puede acoplar la estabilidad del robot y su capacidad para operar a altas velocidades. En las gráficas de la figura 1.2 se ilustra la relación entre la amortiguación y la velocidad de respuesta.

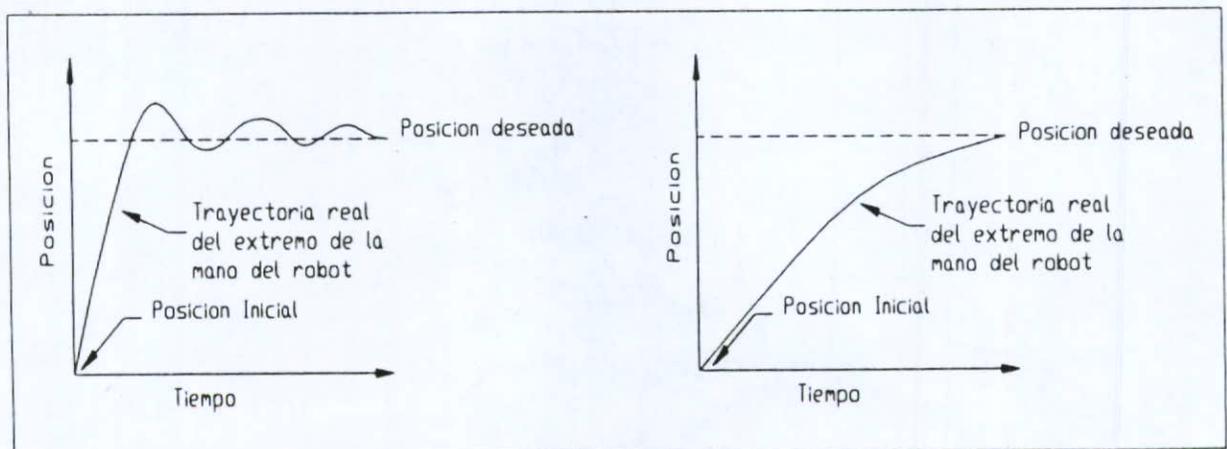


FIGURA 1.2

E. Precisión del Movimiento

Otra medida del rendimiento es la precisión del movimiento del robot. Una definición de precisión podría quedar relacionada con el tiro al blanco, en donde la precisión es que, dada una cantidad de disparos, todos ellos atinen en la misma posición, independientemente de en donde peguen, pues el hecho de la puntería quedaría mas bien relacionado con la exactitud y no tanto con la precisión. Definiremos la precisión como una función de tres características:

1. Resolución Espacial
2. Exactitud
3. Repetibilidad

Las definiciones de los términos anteriores se presentan con algunas suposiciones. Primera, las definiciones se aplicarán al extremo de la muñeca del robot sin ninguna mano unida a la muñeca. En segundo lugar, los términos se aplicarán a las condiciones mas desfavorables, es decir cuando el robot este en la peor posición posible. La tercera es que las condiciones se desarrollarán en el contexto de un robot punto a punto. Es mas fácil definir las características de precisión del movimiento en un contexto estático y no en uno dinámico; en el contexto dinámico sería complicado, aunque es posible, efectuar el análisis.

La resolución espacial se define como el mas pequeño incremento en el movimiento, con el cual el robot podría dividir su volumen de trabajo. La resolución espacial depende de dos factores: Del control del sistema y de las inexactitudes mecánicas propias del robot. Para cuestiones de análisis es mas

sencillo estudiar un robot con un grado de libertad. La resolución es la capacidad del controlador para dividir el margen total de movimiento para una articulación en incrementos individuales que pueda utilizar el controlador. Los incrementos se denominan como puntos direccionables.

La capacidad de resolución depende del número de bits que pueda almacenar el controlador. El número de incrementos identificables separados (puntos direccionables) para un eje viene dado por :

$$\text{Número de Incrementos} = 2^n$$

donde n = número de bits de almacenamiento

Por ejemplo, un robot con 8 bits de almacenamiento puede dividir el margen en 256 posiciones distintas. El número de posiciones distintas puede utilizarse para obtener los incrementos en el control, es decir, en el caso de la tesis si la longitud total del movimiento horizontal es de 75 cm, para obtener la resolución de control se divide 75 cm / 256 incrementos, y obtenemos la resolución de control que es de .2929 cm. Este cálculo se aplica sólo a un grado de libertad del prototipo, sin embargo para cada una de los movimientos del robot, se tendrá una resolución diferente. Como también utilizaremos movimiento giratorio, la resolución puede quedar expresada en grados o en su caso radianes. Las inexactitudes mecánicas pueden constituir el otro problema que afecta a la resolución espacial. Las inexactitudes mecánicas proceden de la desviación elástica de los miembros estructurales como pueden ser la holgura de los engranes, tensión de los cordones en poleas, fugas en los

sistemas neumáticos, etc. Estas inexactitudes tienden a incrementarse al aumentar el tamaño del robot; también se ven afectadas por la carga que se manipula, las condiciones del mantenimiento y la velocidad de desplazamiento. La resolución espacial del robot entonces, queda definida como la resolución degradada menos las inexactitudes mecánicas. La resolución espacial puede incrementarse con el número de bits de almacenamiento.

La *exactitud* se refiere a la capacidad de un robot para situar el extremo de su muñeca en un punto de destino deseado del volumen de trabajo, esta puede definirse en términos de la resolución espacial, porque la capacidad para alcanzar un punto de destino determinado depende de cuan próximos pueda el robot definir los incrementos de control para cada uno de sus movimientos de las articulaciones. En el peor caso, el lugar, posición o punto que se desea alcanzar estaría en el medio de dos puntos contemplados en el control. Se puede observar un diagrama que describe este concepto en la figura 1.3.

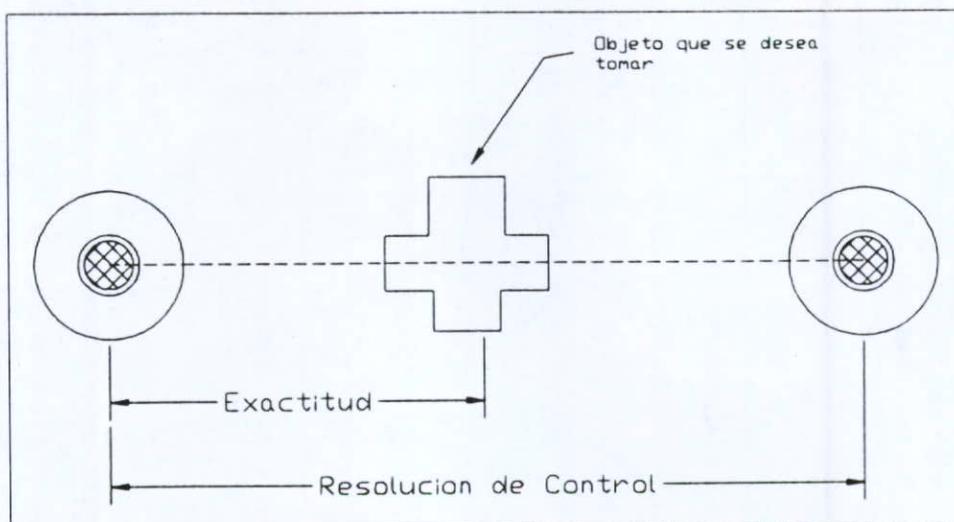


FIGURA 1.3

Lo que sucede es que los puntos reconocidos por la resolución de control son los puntos a y b, mientras que el objeto que deseamos alcanzar esta justo en el medio de los dos puntos, de modo que la exactitud podría quedar definida como la mitad de la resolución de control en el caso mas desfavorable. Esta definición implica que la exactitud es la misma en cualquier lugar del volumen de trabajo del robot. Sin embargo la exactitud se ve afectada por varios factores: en primer lugar la exactitud de hecho varía, tendiendo a ser peor en el rango exterior del volumen de trabajo y mejor cuando el brazo esta próximo a su base; de aquí nace el término de mapa de error, es decir, la localización precisa de los lugares donde los errores de exactitud se hacen mayores. En segundo lugar, la exactitud se mejora si el ciclo de movimiento esta restringido a un margen de trabajo limitado, la capacidad del robot para alcanzar un punto de referencia particular, dentro del espacio de trabajo limitado, se suele denominar su exactitud local. El tercer caso en donde se ve afectada la exactitud del robot es con la carga que se transporta, cuando son mas pesadas producen mayores desviaciones en la exactitud. A manera de resumen sobre la exactitud, podríamos regresar a nuestra comparación con el tiro al blanco; mientras que la precisión es que tantas veces acertamos en el mismo lugar, aún cuando este no fuera el blanco, la exactitud esta relacionada con nuestra puntería, es decir si le pegamos al blanco o no.

La repetibilidad esta relacionada con la capacidad del robot para situar su muñeca o efector final unido a su muñeca, en un punto en el espacio que de algún modo hubiera quedado almacenado en la memoria de control del robot. La repetibilidad y la exactitud se refieren a dos aspectos diferentes de la precisión del robot. La exactitud se relaciona con el punto destino, mientras

de sus movimientos suele ser simplemente un proceso de prueba y error. Debe recordarse que para la programación del robot es posible calcular todo el movimiento de cualquiera de las articulaciones y así manejar el movimiento a base de coordenadas.

Para comenzar con la revisión de los principales *Métodos de Programación* diremos que los robots más básicos están, al menos en parte, programados mecánicamente, es decir, mediante topes. Además de la fijación mecánica de límites, muchos de los robots básicos utilizan lo que en inglés se denomina como *Teach Pendant*, que traducido sería *Enseñanza Colgante*, esto es, simplemente una manera de llamar a los controles que quedan unidos al sistema de robot por medio de un cable.

En este punto es importante señalar que una capacidad clave de los robots es la de poder reprogramarlos para realizar diferentes tareas. Esta es una capacidad que les faltaba a los manipuladores mecánicos anteriores al advenimiento de los robots industriales.

La mayoría de los robots tienen algún tipo de *Teach Pendant* o controlador colgante; con este el operador moviliza al robot manualmente a través de las posiciones deseadas mediante apretar botones en el controlador manual, mediante este movimiento, las posiciones alcanzadas en cada caso quedan guardadas en la memoria del controlador, para después reproducirse de manera automática. El paso o rapidez en el movimiento mediante la simple presión de botones es mas lento que la rapidez del control ya automatizado.

que la repetibilidad se refiere a la capacidad del robot para volver al punto programado cuando se le ordena que lo haga. Los errores de repetibilidad forman una variable aleatoria y constituyen una distribución estadística. En forma ideal sería lo mejor que formaran una curva en forma de campana, para considerar una variable estadística normalmente distribuida; sin embargo, en la realidad esta situación no se da, puesto que la distribución no se hace simétrica. Sin embargo cuando los varios errores se combinan, el error total resultante (de varios movimientos) está influido por el teorema de límite central en la probabilidad. Este teorema establece que las sumas de variables aleatorias tienden a formar una variable normalmente distribuida, aun cuando los componentes individuales no proceden de una distribución normal. En general y utilizando de nuevo nuestro ejemplo del tiro al blanco, mientras que la precisión se refiere a que tan constantemente acertamos en el mismo lugar, y la exactitud a nuestra puntería, la repetibilidad se refiere a la capacidad del sistema para no alejarse del punto en donde acertamos; la repetibilidad por tanto se encuentra más relacionada con la precisión.

F. Programación

Para iniciar con esta sección podríamos fijar este problema, el mundo real de un humano y el aprendizaje de éste, es similar al mundo del robot y su aprendizaje. En otras palabras, el robot para aprender necesita de un proceso complicado de prueba y error, exactamente igual que cuando comenzamos a caminar, primero intentamos gatear y aprendemos a coordinar nuestros movimientos, luego intentamos pararnos y es ahí donde encontramos problemas, pues caemos y tropezamos. Igual es con el robot, la programación

Una vez que se tiene el paso automatizado, se cumple con los requerimientos de velocidad industriales.

En un controlador manual puede existir una característica que lo hace superior a otros, esta es la disponibilidad de dos modos de "enseñanza". Podemos clasificar estos modos como A y B; el modo A puede ser para enseñar tanto la secuencia de operaciones, como el tiempo en que esta se debe realizar, de modo que si el programador es capaz de llevar a cabo la programación lo suficientemente rápido como para simular la operación en tiempo real, es decir, previendo todos los movimientos que puede hacer el robot, entonces el modo A es el único que se necesita. Pero la mayoría de nosotros necesitamos tiempo para pensar mientras estamos programando, de manera que necesitamos un modo adicional para pensar en cada paso de nuestro programa; el modo en el que podemos hacer esto, se llama modo B. La necesidad del modo B se hace obvia cuando cualquier programador principiante comienza a observar los resultados de su primer programa, el cual inevitablemente se detiene para señalar que el programador pasó por alto detalles en el programa.

En resumen, el método de programación de *Enseñanza Colgante* es una manera conveniente y poderosa de enseñar al robot a realizar una tarea simple. Es especialmente efectivo para la programación de operaciones de tomar y dejar, cuando tanto el lugar para tomar como el lugar para dejar están prefijados. Además, se pueden programar salidas externas adicionales en el ciclo del robot, pero la respuesta programada a las señales de entrada se hace torpe porque cada señal de entrada dispara, de manera lógica, una secuencia

diferente de acciones del robot. También, utilizando únicamente un controlador manual, puede ser difícil programar patrones geométricos como los círculos o incluso las líneas rectas. Finalmente, la programación por medio de controladores manuales no hace uso de las técnicas computacionales tan poderosas como las subrutinas y la programación iterativa.

La programación por medio del teclado es la respuesta a los huecos que deja la programación con controlador manual, pero antes de continuar debe quedar claro que el uso del controlador manual es una herramienta básica para la correcta programación por medio del teclado. Esto no significa que no se pueda utilizar únicamente el teclado para programar al robot, esto es un campo fértil para los interesados en la robótica, y existen diversos modelos muy interesantes, que únicamente tienen un teclado integrado a ellos para su control.

El primer lenguaje de programación por medio del teclado que tocaremos en esta sección, es el lenguaje ensamblador hexadecimal, que es un código muy eficiente desde el punto de vista de la memoria de la computadora, y del hardware y el software que se requiere, pero aprenderlo y programarlo toma mucho tiempo. Por esta razón, se han desarrollado lenguajes de programación mucho más simples, que se ajustan mucho a la estructura y sintaxis del lenguaje BASIC, algunos de estos lenguajes son: el VAL de Unimación, el AML/2 de IBM, y el ARMBASIC de Microsoft. Estos lenguajes pueden incluso simplificar la operación al grado de establecer una "conversación" entre el programador y la computadora; es decir, los comandos se pueden simplificar tanto como para llegar al punto de sólo tener que teclear: TOMA --- SOSTEN ---

TRANSPORTA --- DEJA. Esta simplificación puede hacer que operaciones como la de agrupar un montón de ladrillos, sea cuestión de sólo un minuto de programación.

Uno de los principales problemas en la programación del robot es hacer la traducción de la estructura de referencia del operador a la estructura de referencia del robot y viceversa. Los seres humanos pensamos en nuestro espacio, como derecha, izquierda, frente, detrás y arriba, abajo.

Pero los robots "ven" su espacio en términos de los tipos de movimientos de sus uniones requeridos para llegar a un punto en el espacio. Falta mencionar la existencia de los PLC (Programable Logic Controllers) o Controladores Lógicos Programables, los cuales son un medio muy difundido actualmente para controlar los sistemas de robots. Acerca de los PLC hablaremos con mayor detalle en el Capítulo III.

G. La Automatización

Es obvio que si estamos hablando de robots industriales, entonces estamos hablando de la automatización. Es también un hecho que la automatización de procesos industriales no utiliza únicamente robots. En esta sección hablaremos en general de lo que ha sido y es la automatización.

El tipo clásico de automatización, típica de los años 40's y 50's, es la de equipo fijo (rígida), generalmente fabricado en el mismo lugar y diseñado para facilitar la fabricación de un producto específico. La automatización fija puede

lograr velocidades de producción muy altas, pero en general es muy cara. Este gasto se puede hacer muy doloroso cuando se cambia el modelo del producto o cuando se introduce uno nuevo. La automatización fija o rígida, como su nombre lo indica, no es muy ajustable si se da un cambio en el proceso o producto.

Por lo tanto, se requiere de una cierta cantidad de estabilidad en el producto y en el mercado como prerrequisito para la toma de la decisión en la instalación de una automatización fija; mas aún, se requiere de un gran volumen de producción para justificar tal decisión.

A pesar de que la automatización fija era la única clase de automatización disponible en los 40's y 50's, de ninguna manera se puede afirmar que es obsoleta en la actualidad. Consideremos por ejemplo el caso de la fabricación de focos de la General Electric, la cual por sí misma produce aproximadamente dos mil millones de focos cada año. Con este volumen, es fácil justificar el equipo de automatización fija, el cual es especializado, rápido y de alto costo. Además de los enormes volúmenes, los focos son un producto de gran estabilidad. No parece ser posible que la luz eléctrica incandescente se haga obsoleta durante los próximos años. Cuando esto suceda millones de dólares en equipo de automatización fija se harán obsoletos.

La automatización flexible es el contraste de la automatización fija y es el tipo mas nuevo de automatización disponible para el ingeniero de automatización actual. No es adecuado llamar a este tipo de automatización, suave, por que consiste tanto de objetos materiales como de programas computacionales

flexibles e intangibles. De cualquier manera, la automatización flexible es ciertamente "suave" comparada con la automatización rígida o fija.

La característica mas notoria de la automatización flexible es que su equipo es programable y por lo tanto reprogramable. Hoy en día, esto significa que el equipo tiene una computadora digital como uno de sus componentes, pero esto no siempre fue así. Antes, las máquinas de control numérico se podían considerar como una automatización flexible, pero no estaban basadas en computadoras. La reprogramabilidad de la automatización flexible le da una ventaja clave sobre el equipo de automatización rígida. No se requieren de grandes volúmenes para justificar la automatización flexible, por que después de que la producción de algo se completa, el equipo de automatización flexible se puede utilizar para producir otra cosa. El equipo se puede programar o reprogramar para una gran variedad de tareas, haciendo uso de sus diversas rutinas aprendidas y guardadas en algún medio como el disco o cinta magnética, pudiendo así volverlas a "llamar" cuando sea necesario.

La automatización flexible es la base principal de esta tesis. La automatización flexible apareció por primera vez en los años 50's con la introducción de las maquinas de control numérico. Mas tarde las máquinas de control numérico evolucionaron a máquinas de control numérico computarizado, en donde cada máquina tenía una pequeña computadora digital, generalmente una micro computadora, como uno de sus componentes. El robot industrial es un ejemplo clave de la automatización flexible, y su desarrollo sólo es una extensión del desarrollo de las maquinas de control numérico.

<< Los robots industriales y todo el equipo de automatización flexible, deben tener sistemas para el manejo de las condiciones cuando surgen tomando decisiones lógicas, para después tomar las decisiones correctas y realizar las acciones adecuadas >>. ⁴

A los sistemas integrados de robots industriales y equipos de automatización flexible, se les llama sistemas industriales de control lógico. El equipo real para la implementación de sistemas industriales de control lógico es el Controlador Lógico Programable (PLC). Los controladores lógicos programables no son del todo comprendidos por el público en general, y ciertamente están opacados por los increíbles robots industriales que existen. Pero muchos de los robots industriales se controlan por medio de PLC's. Es incluso posible para el Ingeniero de Automatización diseñar y construir un robot industrial casero, utilizando un controlador lógico como "cerebro" del robot.

En conclusión se puede afirmar que los robots y la fabricación automatizada difícilmente requieren de propaganda de ventas, especialmente en países en desarrollo industrial como México, en donde ya se tiene un sentido de urgencia respecto a la necesidad de automatizar los procesos de fabricación. Tal vez el mayor beneficio que se obtiene de examinar la viabilidad de la instalación de un robot industrial es la atención que se pone en el diseño del producto, la estabilidad de los procesos y la confiabilidad de las máquinas de proceso.

⁴ CRAIG John J. Introduction to Robotics, Estados Unidos, ed. Addison Wesley, 1989, pág. 4

Los enormes volúmenes generalmente se consideran como indispensables para el éxito de la automatización en la fabricación, pero esta vieja verdad comienza a desaparecer.

H. Perspectivas para el futuro

Es indudable que para el México de los 90's, la automatización y la instalación de los robots industriales se está haciendo indispensable. Es importante señalar que ya existen plantas en México que tienen uno u otro grado de automatización en sus procesos. Ejemplos de esto pueden ser: Nissan de México en su Planta de Aguascalientes, la cual tiene un grado de automatización muy alto; o la Planta de Black and Decker en Querétaro, donde para 1993 se introdujo una línea de producción con equipos de automatización rígida.

Los avances en el plano de la automatización y los robots industriales se está encaminando cada vez mas hacia la inteligencia artificial, en donde se busca que los robots no sólo aprendan lo que los programadores indican, sino que el robot aprenda por medio de "experiencias", es decir, aprenda de las situaciones que van surgiendo en el proceso. Se dice que algún día se podría llegar a lo que hoy se menciona sólo en novelas y películas de ciencia ficción: los robots que cobran de algún modo conciencia de su existencia y por tanto se hacen dueños de sus propios actos.

El campo del desarrollo de los autómatas, como cualquiera de los campos de la tecnología, está teniendo un desarrollo sumamente acelerado, por lo que es difícil predecir incluso lo que podría suceder de aquí hasta el final del siglo.

II. HERRAMIENTAS PARA LA AUTOMATIZACION Y LA ROBOTICA

A. Introducción

El objetivo de este capítulo es identificar las herramientas básicas para la implementación de un sistema automatizado o para la construcción de un robot. De uno en uno, cada vez se encuentran mejores métodos para sensor, mover, posicionar, orientar, etc. Es, por tanto, propósito de este capítulo, examinar y clasificar los componentes básicos de la automatización y la robótica a nivel de las estaciones de trabajo. Es importante señalar que tal propósito, no es el diseño de todos los elementos que mencionaremos, sino la descripción y exposición de los usos que se pueden dar a cada uno de ellos.

En el desarrollo de este capítulo también especificaremos cuales de estas herramientas utilizaremos en la construcción del prototipo que se desarrolla paralelamente a esta tesis.

Para que tenga sentido la diversidad de componentes que existen en la automatización, se necesita formar una clasificación. La clasificación no puede ser del todo precisa porque muchos de los componentes mas útiles pueden quedar dentro de varias clasificaciones, dependiendo de cómo se utilicen. De cualquier manera podemos afirmar que los componentes quedan clasificados dentro de una de las siguientes categorías:

- 1. Sensores**
- 2. Analizadores**

3. Actuadores
4. Manejadores

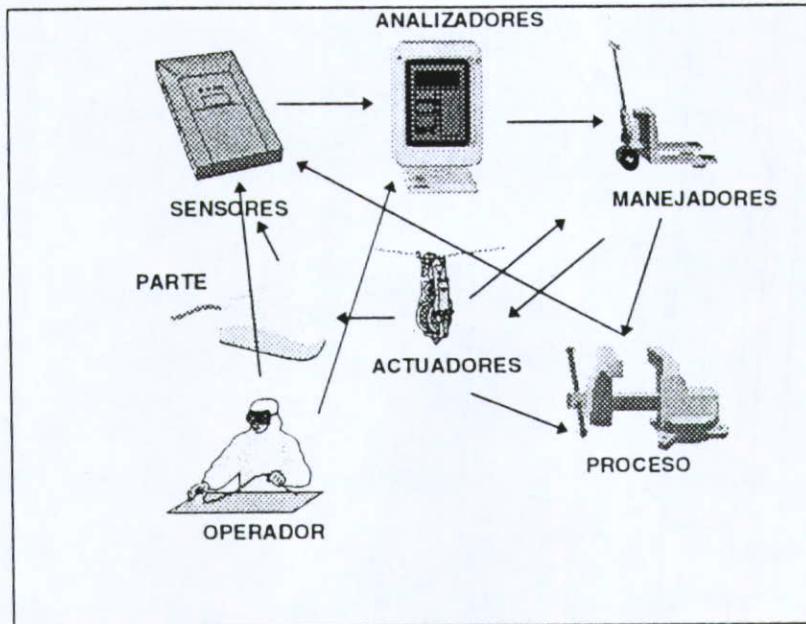


FIGURA 2.1

B. Sensores

Los sensores son el primer eslabón entre el sistema automatizado típico y el proceso convencional, tal como lo indica la figura 2.1. Los sensores reúnen información del proceso que está sucediendo; tomando datos que se extraen de la parte que se está fabricando, del medio ambiente que la rodea, o de las condiciones físicas que imperan alrededor del robot.

El primer sensor que examinaremos son los *interruptores manuales*. Un ejemplo pueden ser los interruptores de las lámparas. Es difícil pensar en los

interruptores de las lámparas como sensores en la automatización, pero el interruptor es el eslabón que une a la lámpara y a la persona que decide si quiere que este prendida o apagada. De la misma manera, el sistema se encuentra unido al operador que puede decidir prenderlo, apagarlo, o realizar cambios en el mismo. Los interruptores manuales se presentan de muy diversas formas: el primero de ellos es el de dos posiciones, prendido y apagado. Existen también interruptores de 3 posiciones y rotatorios, todos ellos utilizados frecuentemente en la vida diaria. Los interruptores manuales simplemente cumplen la función de activar o desactivar de la misma manera que lo hacemos con una lámpara. Estos interruptores en general requieren de la intervención del operador.

Los *Interruptores de límite* son el siguiente tipo del que hablaremos. Al igual que los manuales, los interruptores de límite actúan de manera mecánica, pero estos son datos que entran de manera automática a partir del proceso, sin la intervención del operador. Existen literalmente miles de variedades de interruptores de límite, aún más que en el caso de los interruptores manuales. La razón es muy sencilla, los interruptores de límite necesitan acoplarse a necesidades muy específicas, con características muy precisas de tamaño, fuerza de actuación etc. Los sistemas de robots utilizan los interruptores de límite tanto en la construcción del robot mismo como en el equipo que lo rodea (periféricos). Los interruptores de límite se pueden utilizar para "limitar" el viaje del brazo de un robot, sobre cualquiera de sus ejes de movimiento. Cuando se alcanza el límite, se abre un circuito que quita la energía a lo que esté moviendo el brazo.

Nos toca hablar de los *Interruptores de Proximidad*. Algunas veces los interruptores no necesitan del contacto físico o de la radiación de la luz, para "sentir" o sentir un objeto. A estos interruptores se les llama interruptores de proximidad porque pueden sentir la proximidad de un objeto sin necesidad de tocarlo. Con esta característica los interruptores de proximidad pueden dar ventaja al robot sobre el operador humano. Los sensores de proximidad pueden detectar ya sea clases de metales, objetos de madera, objetos calientes, etc. Existen bases físicas para los sensores o interruptores de proximidad que pueden responder ante cualquier objeto. Un tipo utiliza una antena electromagnética diseñada especialmente y colocada para ajustarse a la aplicación. Este sistema es análogo al sistema de radar. Por este motivo el tamaño del objeto juega un papel importante al igual que la fuerza de la señal que se maneja. De esta manera el sistema se puede calibrar para que, de alguna manera sea sensible a ciertos objetos. Un interruptor de proximidad sofisticado emplea el efecto Hall, en el que un pequeño voltaje se genera a través de un conductor que lleva corriente en un campo magnético generado externamente. El sistema mas simple utiliza únicamente una foto celda para detectar la presencia de la luz que irradia algún objeto en el proceso. Un buen ejemplo es el uso de las foto celdas para encender los sistemas de iluminación de manera automática al anochecer y luego apagarlos al amanecer. El segundo enfoque sobre los fotoeléctricos emplea un rayo de luz emitido por medio de una fuente artificial de luz.

El principal propósito de este enfoque es detectar la presencia o ausencia de objetos en la ruta del rayo de luz. El emisor del rayo de luz puede ser una unidad separada o puede encontrarse incorporada al sensor. La variedad

combinada, requiere de algún tipo de reflector natural o artificial para redireccionar el rayo de luz hacia el emisor/sensor. Las superficies reflejantes pueden ser de tres tipos: Difusas, reflectivas epeculares y retroreflectivas. La mas baja en costo y que describe mejor a las superficies reflectivas es la superficie reflectiva difusa y la mas cara de los tres tipos es la superficie retroreflectiva. Aunque los fotoeléctricos son muy útiles, el ingeniero de automatización debe estar al cuidado de las situaciones que pueden confundir o engañar al sistema fotoeléctrico. Algunos de los factores que pueden causar un efecto negativo sobre los fotoeléctricos pueden ser: luz fuerte emitida por alguien soldando con arco, luz directa sobre el fotoeléctrico etc. Pero si estos problemas se preveen de manera adecuada, el ingeniero siempre podrá resolverlos y mantendrá el adecuado funcionamiento de los sistemas fotoeléctricos.

Los *Sensores Infrarrojos*. Algunas veces es útil detectar la radiación electromagnética que se encuentra fuera del rango del espectro visible. Los sensores infrarrojos responden a la radiación en el rango de las longitudes de onda que están justo por encima del espectro visible, al final del extremo rojo del espectro. Estos sistemas pueden ser útiles para detectar fallas de funcionamiento. Los sensores infrarrojos son también muy útiles cuando se utilizan con rayos artificiales para detectar la presencia o ausencia de objetos, convirtiéndose así en fotoeléctricos. Existen algunas ventajas en el uso de los rayos infrarrojos y los receptores infrarrojos en lugar de los fotoeléctricos ordinarios, con ventajas obvias. Una estrategia que esta ganando popularidad es el uso del rayo infrarrojo modulado, en el cual la fuente es de pulsaciones

para ofrecer una mayor intensidad y el sensor se modula para poder recibir a la misma frecuencia.

Otros sensores importantes son la Fibra Optica, un complemento conveniente para los sistemas de sensores fotoeléctricos o infrarrojos, los cuales son tubos flexibles de vidrio o plástico que se pueden utilizar para conducir rayos de luz. Cuando se utilizan pedazos de fibra, se pueden transmitir imágenes completas. De cualquier manera, la aplicación típica en la automatización es usar una fibra para transmitir un rayo de luz que se sensa por medio del sistema y se reconoce como presente o ausente. Una ventaja de la fibra óptica es su sorprendente eficiencia. La fibra óptica es tan eficiente que se ha hecho importantísima para la industria telefónica y en general para la industria de las comunicaciones.

El último tipo de sensores del que hablaremos es el LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) es decir Amplificación de Luz por Medio de Emisión Estimulada de Radiación. Este es capaz de entregar una gran cantidad de energía a larga distancia, y hacerla pasar por un pequeño agujero y esto tiene obvias aplicaciones industriales. En sistemas automatizados, el láser es útil para ofrecer muy largos haces de luz con mucha precisión.

La presencia o ausencia de un LÁSER continuo puede utilizarse entonces como un dato lógico para un sistema de control automático o para el funcionamiento de un Robot.

C. Analizadores

Una vez que se sensa o se "recoge" la información y llega al sistema automatizado, se debe registrar y analizar y posteriormente se debe tomar una decisión por medio del sistema al respecto de que acción se debe tomar. Esta función puede ser muy compleja, y los componentes del sistema generalmente son muy complicados. Algunos de los componentes que se mencionarán en esta sección se utilizan en máquinas de control numérico, controladores programables, y otros instrumentos de fabricación automatizada.

Las computadoras digitales son el medio primario de análisis de los datos de los sistemas automatizados. Las computadoras son extremadamente versátiles al respecto de las maneras en que se pueden programar para manipular los datos. Para efectos de esta tesis, este instrumento es muy importante ya que nuestro robot estará totalmente controlado (y analizado) por medio de una computadora personal. La continua militarización de los circuitos de computadora junto con los decrecientes costos que rodean el ambiente de las computadoras, hicieron posible que cada vez se utilicen mas las computadoras en los sistemas automatizados, el tema de las computadoras como analizadores y en particular de como se utilizará una computadora para controlar nuestro robot se tratará en el Capítulo III con mayor detalle.

Los contadores son un tipo de analizador que se utiliza muy frecuentemente en los sistemas automatizados para determinar la cantidad de piezas que están presentes o pasan a través de un sistema automatizado. Esta función puede manejarla una computadora o controlador programable de manera

interna, pero el control externo de esta función lo realizan los contadores. El contador puede ser mecánico, pero la mayoría de los sistemas automatizados utilizan contadores electrónicos de estado sólido. Si el contador es una unidad separada, generalmente tendrá una pantalla para mostrar en ella el estado del proceso. En la figura 2.2 se muestra un contador dentro del sistema automático. La cantidad contada es generalmente una serie de pulsos de voltaje que han sido generadas por medio de un sensor o interruptor que detecta la cantidad de algo de importancia para el sistema automatizado, por ejemplo botellas de vidrio que salen de un sistema de llenado. Se puede observar en la figura que el espaciamiento de las botellas no es uniforme y por lo tanto esto se refleja en que los voltajes no tienen un espaciamiento uniforme. También es posible que los picos varíen en amplitud y en tiempo. Esto es normal dentro de ciertos límites; la mayoría de los contadores industriales son capaces de detectar picos e intervalos de menos de 100 microsegundos de duración. También existe un límite respecto al voltaje requerido para generar un pulso que se pueda contar.

Los temporizadores (Timers) son contadores que "cuentan" pulsos precisos de reloj. Un timer industrial es más bien un reloj con alarma. Cuando el tiempo acumulado se hace igual al valor que tiene el contador, se genera una señal de salida, y de aquí la similitud con la alarma de un reloj común y corriente. Los timers con frecuencia tienen una característica adicional que los hace interruptibles, es decir, pueden acumular la cuenta por medio de varios periodos de voltaje alto interrumpidos por periodos de bajo voltaje. La aplicación de los timers en la robótica es mayor que la de los contadores.

Los lectores de código de barras son un sistema de análisis que incorpora un sensor fotoeléctrico convencional o scanner de LASER junto con timers y contadores. En este sistema se explora una serie de barras de diferente longitud, la secuencia de barras se analiza para decodificarlas y traducirlas en datos alfanuméricos para procesarlos por medio de sistemas automatizados. Los scanners de barras generalmente utilizan LASERs porque la luz del LASER puede retener el punto aun a través de un gran espacio. Lo que esto nos dice es que la etiqueta con el código de barras no necesita estar a una distancia precisa del LASER. Es también una característica del sistema de código de barras que son inmunes a la orientación, puesto que el sistema busca las barras. La probabilidad de obtener una lectura errónea de un scanner de código de barras es muy baja debido al diseño del código.

D. Actuadores

Una vez que una variable del mundo real se ha sentido y analizado, algo puede necesitarse hacer. Es en este punto que la automatización de muchos sistemas se detiene puesto que se cree que el operador humano debe intervenir y aplicar el juicio para tomar decisiones y luego ejercer alguna acción. Sin embargo mas y mas sistemas automatizados están cerrando el ciclo tomando acciones físicas de manera automática y sin la ayuda de un operador. La actuación puede ser una acción directa sobre el proceso, como una barra que empuje cajas para que éstas sean envueltas en papel, un actuador es simplemente un circuito eléctrico que tiene un efecto mecánico final, un ejemplo sería un relay.

En este punto es necesario hacer una aclaración, para efectos de esta tesis los pistones o cilindros no funcionan como actuadores, aunque en el común de las aplicaciones de automatización de procesos si cumplen una función de actuadores, es importante señalar que el prototipo de esta tesis no es un sistema automatizado, hablando de manipulación de procesos, sino la representación de un modelo de grúa robot que utilizará pistones para impulsar y no para modificar ningún proceso. Por la razón anterior, la explicación sobre los pistones la dejaremos para la sección de impulsores.

Los Solenoides eléctricos son una selección obvia cuando se requiere de un dispositivo que ofrezca pequeños y rápidos movimientos lineales. En física básica, aprendimos que el principio de los solenoides es la creación de un campo magnético que se crea haciendo pasar corriente eléctrica a través de una bobina.

Por lo tanto el núcleo del solenoide se mueve a nuestra elección de acuerdo a la formación del campo magnético, es decir cuando se activa el campo magnético el núcleo se desplaza y cuando se retira la corriente y se apaga el campo magnético entonces el núcleo regresa a su estado de reposo.

El relay es el mas popular de todos los solenoides y se utiliza para prender o apagar (cerrar o abrir) un circuito eléctrico. Los circuitos de prendido y apagado generalmente operan a menores voltajes y especialmente a menores amperajes comparados con los circuitos de potencia. Un relay entonces se puede describir como cerrado o abierto. En general los relays y solenoides típicos operan en corriente directa con poco voltaje. Pero la conveniencia y la

generalización de las corriente alterna y los 120 volts, han dado lugar al surgimiento del relay y el solenoide de corriente alterna. Otra clasificación es la del relay normalmente abierto y normalmente cerrado.

El normalmente abierto es el que mantiene el circuito no energizado cuando no hay energía en relay, es decir, cuando éste está en su estado de reposo; mientras que el normalmente cerrado, mantiene el circuito energizado también cuando el relay esta en su estado de reposo. El uso mas común de los relays es arrancando motores eléctricos, su función es la de prever la sobre carga en el arranque.

E. Impulsores

Al igual que los actuadores, los impulsores intervienen de alguna manera en el proceso obedeciendo la orden de una computadora o analizador. Para los propósitos de clasificación, la distinción que se utilizará para diferenciar a los impulsores de los actuadores es que los segundos se utilizan para efectuar un movimiento corto y discreto, generalmente lineal, y los impulsores ejecutan movimientos mas continuos en general, mas no siempre, de rotación. Los actuadores, además, pueden encender o apagar a los impulsores y estos pueden dar la energía para el movimiento de los actuadores. Existen dispositivos que parecen ajustarse a las dos definiciones, por ejemplo los cilindros o pistones neumáticos. Esta sección es de mucha importancia para el desarrollo de la tesis, no solo por la aplicación de los impulsores, sino porque en el prototipo que acompaña a la tesis se utilizan mucho; de modo que

dedicaremos varias páginas al tema de los impulsores, donde hablaremos de como funcionan y de los criterios mas importantes para su selección.

Los motores son los impulsores mas esenciales. El ingeniero en robótica debe tener una amplia perspectiva del término de *motor* no sólo de los eléctricos sino de los motores hidráulicos y neumáticos. Los motores de combustión interna, son relativamente insignificantes como dispositivos motrices para la automatización. Para efectos de esta tesis, los motores a pasos son los que nos interesan.

El motor a pasos (stepper motor) es, por diversas razones, un impulsor muy útil para la automatización. Por un lado, funciona a base de pequeños pulsos de voltaje, los cuales son las salidas mas comunes de los analizadores. Los motores a pasos también son convenientes para ejecutar movimientos angulares precisos, como para operaciones de ciclo abierto, donde el sistema da un comando de salida específico y espera a que el resto del sistema reaccione de manera apropiada sin necesidad de monitorear los resultados, y por lo tanto cerrar el ciclo. Algunos robots industriales utilizan los motores a pasos, y estos motores son también muy útiles en las máquinas de control numérico.

Cuando sea necesario utilizar una retroalimentación para cerrar el ciclo, esta deberá comparar la posición que se tiene con respecto a la deseada.

De aquí en adelante hablaremos con mas detalle acerca de los motores a pasos, de como funcionan y de como se seleccionan. Los motores de corriente directa (dc) son baratos, entregan mucho torque para su tamaño y son

fácilmente adaptables para una gran variedad de diseños. Por naturaleza, el motor de corriente directa común es muy impreciso, es decir, no se puede controlar de manera exacta. Sin la utilización de un servomecanismo o un tacómetro, no existe manera de decir que tan rápido está girando el motor. Aún más, es difícil controlar al motor para que gire a un número específico de revoluciones, sin mencionar una fracción de revolución. El diseño en robótica requiere de que los factores anteriores sean plenamente controlables; es en este punto donde los motores a pasos hacen su aparición.

<< Los motores a pasos son en efecto motores de corriente directa, solo que con un truco: En vez de ser impulsados por un flujo continuo de corriente, como es el caso de los motores de corriente directa común y corrientes, a los motores a pasos los impulsa una serie de pulsos de corriente; mientras más pulsos se alimentan al motor, más giro tendrá la flecha. >>. ⁵

Los motores a pasos son por naturaleza dispositivos "digitales", lo cual es obviamente útil cuando se desea controlar al robot por medio de una computadora como es el caso de esta tesis. Cabe señalar que también existen motores a pasos de corriente alterna, pero estos no son aplicables a la robótica y por lo tanto no los trataremos aquí.

Los motores a pasos no son tan fáciles de controlar como los motores de corriente directa normales, además de que son mucho más difíciles de conseguir y son mucho más caros. Pero para las aplicaciones de la robótica,

⁵ ASFAHL C. Ray. Robots and Manufacturing automation, Estados Unidos, Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1992, pág. 46

este tipo de motores puede resolver muchos problemas con un mínimo de complicaciones.

Vamos a explorar el interior de los motores a pasos. Existen muchos diseños de motores a pasos. Por el momento nos concentraremos en el tipo mas popular que es el que utilizaremos para la construcción del prototipo que justifica esta tesis, el de cuatro fases, el cual se muestra en la figura 2.2. Un motor a pasos de cuatro fases es en realidad dos motores unidos. Cada motor se compone de dos devanados. Se conectan cables a cada uno de los cuatro devanados de la pareja de motores, de modo que hay ocho cables que salen del motor. Los comunes o tierras de los devanados se pueden conectar entre si, así que se puede reducir el número de cables a cinco o seis en vez de ocho. Podemos observar como queda la conexión de estos motores en la figura 2.2

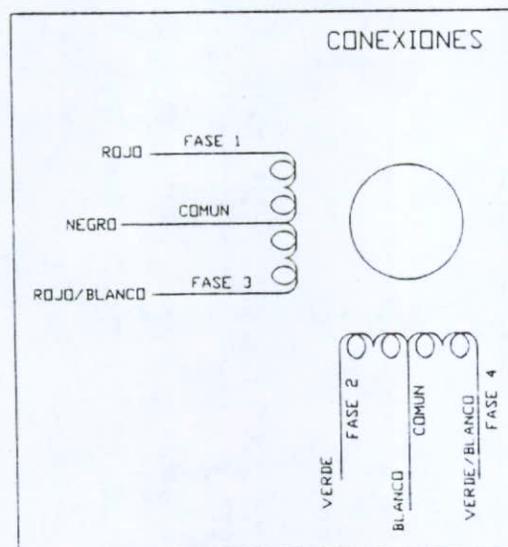


FIGURA 2.2

Toca el turno hablar de la secuencia de pasos. En operación, los cables de tierra se conectan al negativo de la fuente de alimentación. Después se energiza cada devanado según un "turno", conectándolos al positivo de la

fuelle por un instante. La flecha del motor gira una fracción de revolución cada vez que se energiza un devanado. Para que la flecha pueda girar de manera apropiada, los devanados se deben de energizar en una secuencia determinada. Por ejemplo, si energizamos los devanados uno, dos, tres y cuatro en ese orden, haremos que el motor gire en el sentido de las manecillas del reloj, obviamente, si energizamos en la secuencia contraria, entonces lograremos un giro en sentido contrario.

El método anterior es el básico para la energización de los devanados, sin embargo existe un segundo método que se denomina *prendido-prendido/apagado-apagado*.

El segundo método es mejor. Esta secuencia mejorada incrementa la potencia del motor, además de mejorar la precisión en el giro del motor. El segundo método es el que se utilizará para el control de los motores a pasos en el robot de esta tesis. El funcionamiento de este sistema es en realidad simple, lo único que se debe hacer es energizar pares de devanados, mientras que el otro par se mantiene desactivado. En un giro se han de hacer funcionar todos los pares que se pueden obtener, que en un motor de cuatro fases son cuatro. La secuencia la determina la manera en que conectemos los pares al dispositivo controlador, en este caso la computadora. Posteriormente retomaremos este tema, hablando específicamente de nuestro proyecto.

Existen otras variedades de motores a pasos, y se manejan de diferentes maneras, uno que se puede encontrar es el de dos fases. Este tiene cuatro cables que son energizados en forma de pulsos por medio de la inversión de la

polaridad de la fuente de poder para cada uno de los cuatro pasos. Los motores a pasos difieren en sus características de diseño de los motores de corriente directa normales y por lo tanto el criterio de selección varía.

En los párrafos siguientes hablaremos acerca de los principales puntos a tomar en cuenta para la selección de los motores a pasos.

El ángulo de paso es la primer característica que vamos a analizar. Los motores a pasos varían en la cantidad de rotación que sufre la flecha cada vez que se energizan los devanados. Al monto de rotación se le llama *ángulo de paso* y puede ser tan pequeño como $.9^{\circ}$ o tan grande como 90° ; aún cuando el más común es el de 1.8° . El ángulo de paso determina el número de pasos por revolución. Así pues para los motores que se utilizan en el prototipo, el ángulo de paso es de 1.8° y por lo tanto se deben generar 200 pulsos para completar una revolución.

La segunda característica de la que hablaremos es de la *frecuencia de pulsos*. Obviamente mientras más pequeño sea el ángulo de paso, más preciso es el motor. Pero los motores a pasos tienen un límite superior para el número de pulsos que pueden aceptar por segundo.

Los motores a pasos de alto rendimiento y mayor tamaño tienen una frecuencia de pulsos máxima de 200 o 300 pasos por segundo y por lo tanto tienen una velocidad límite efectiva de una a tres revoluciones por segundo o 60 a 180 rpm. Algunos motores a pasos de menor tamaño pueden manejar mil o más pulsos por segundo, pero no pueden ofrecer mucho torque además de

que no son tan buenos para impulsar y controlar. Se debe señalar que los motores a pasos no pueden funcionar a su máxima velocidad inmediatamente después de que se han encendido; la aplicación de una gran cantidad de pulsos inmediatamente después de que está detenido el motor, puede ocasionar que el motor se mantenga en ese estado. Para poder lograr las máximas velocidades, se debe acelerar al motor de manera gradual. La aceleración puede ser muy fluida en términos humanos o mejor dicho, para el ojo humano. La velocidad puede ser de 1/3 durante los primeros milisegundos, 2/3 en los siguientes 50 o 75 milisegundos y después se puede alcanzar la velocidad máxima.

El torque de funcionamiento es la tercera característica de la que hablaremos; ya dijimos que los motores a pasos no pueden dar tanto torque como los motores de corriente directa normales. Un motor a pasos típico (pequeño) de 12 volts puede llegar a tener un torque de funcionamiento de solo 25 onzas - pulg. El mismo motor de 12 volts de corriente directa podría dar de 3 a 4 veces mas torque. Sin embargo gracias a los avances en la tecnología de la robótica, los motores a pasos han incrementado su torque sin necesidad de incrementar su tamaño o su voltaje de alimentación; el motor a pasos que se utiliza en el prototipo tiene un torque de funcionamiento nominal de 200 onzas - pulg, con sólo 2.5 pulgadas de largo. Sin duda es una gran diferencia con los motores a pasos de 25 onzas - pulg. De cualquier manera, los motores funcionan mejor cuando giran lentamente; mientras mas lento gire el motor, mayor torque se obtendrá. En la figura 2.4 se presenta la gráfica del funcionamiento del motor a pasos que se utiliza en el prototipo. La gráfica presenta tanto el torque como la

potencia en función de la velocidad de rotación en mitades de paso por segundo.

La cuarta característica a tratar es el *efecto de frenado*. Cuando se activa uno de los devanados el motor gira y si se mantiene el flujo de corriente en ese devanado durante un periodo mayor, el motor deja de girar inmediatamente, de hecho la flecha quedará "asegurada". Como resultado de este efecto de frenado, nunca se necesita añadir un circuito para que cumpla con esta tarea, porque de hecho tiene sus propios frenos incluidos. A la cantidad de potencia de frenado de un motor a pasos se le llama torque de sostenimiento. Los motores a pasos de poco tamaño tienen un torque de sostenimiento de pocas onzas-pulgada. En el caso de los motores a pasos mas modernos como el que se utilizará en el prototipo se obtienen torques de sostenimiento mayores, específicamente en el motor del prototipo se obtiene un torque de sostenimiento de 300 onzas - pulgada.

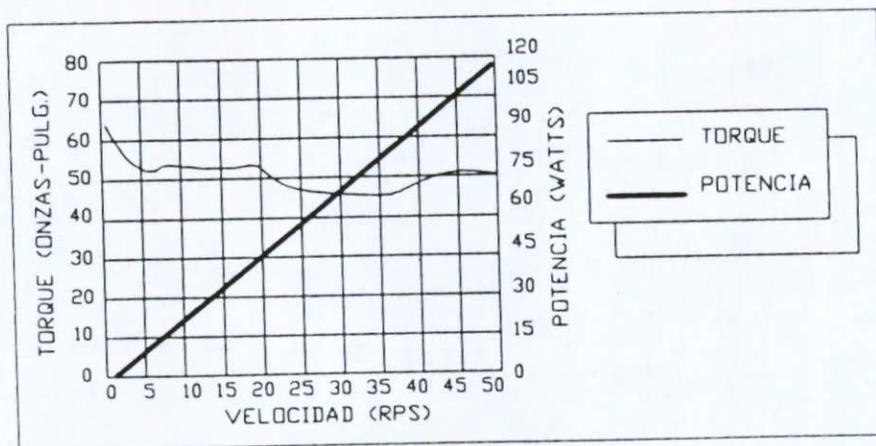


FIGURA 2.3

La última característica de la que hablaremos son *el voltaje y la corriente nominales*. Al igual que los motores de corriente directa normales, existen motores a pasos de diferentes voltajes y corrientes nominales. Son comunes los motores de 5,6 y 12 volts nominales de alimentación; en el caso del motor utilizado en el prototipo, su alimentación es de 12 volts. Cabe señalar que a diferencia de los motores de corriente directa, la sobrealimentación de voltaje en los motores a pasos no ocasiona mas velocidad de funcionamiento; si se sobrealimenta al motor a pasos en un 40 a 60% mas de lo nominal, entonces se puede llegar a quemar el motor.

A manera de resumen sobre la sección de los motores a pasos se puede decir: La aplicación de los motores a pasos puede ser tan fácil o difícil como lo dicte la experiencia del diseñador; mientras mayor sea esta, la versatilidad y las diversas maneras de usar un motor a pasos se hacen mas obvias. Las siguientes notas de aplicación son de ayuda al momento de seleccionar un motor a pasos, además de ayudar en la ampliación de la experiencia ya mencionada.

Los siguientes elementos debe considerarse en general para la selección de los motores a pasos:

1. Torque de fricción requerido en mNm
2. Carga de inercia en g.m²
3. Movimiento que se requiere en grados
4. El tiempo para completar el movimiento en segundos
5. Número de pasos y ángulo de pasos del movimiento

6. Frecuencia de pasos en pasos por segundo
7. Aceleración en segundos
8. Potencia disponible
9. Sistema de control
10. Tamaño, Peso y consideraciones en el montaje de la flecha

La importancia de los elementos anteriores dependerá por supuesto de las consideraciones del sistema en el que se montará el motor a pasos y del presupuesto disponible. Los motores a pasos de las características que se necesitan en el prototipo, tienen un costo aproximado de \$300 U.S. dlls; a estos precios, el factor del dinero necesario para el proyecto toma mucha importancia. Algunos motores a pasos se usan sólo en aplicaciones de tipo posicional como la que nos ocupa. Se deben de tomar en cuenta otras consideraciones para aplicaciones de velocidad fija o variable, entre ellas:

1. RPM requeridas
2. Frecuencia de pulsos máxima/mínima requerida
3. Precisión de la fuente de pulsos
4. Variaciones de velocidad permisibles
5. Resonancia.

Como ya se ha podido observar los motores a pasos requieren de un tratamiento mucho mas complicado. Aun falta mencionar el aspecto del control de estos motores. Existen muchas maneras de controlar estos motores, pero han de ser tema del capítulo III.

Los siguientes impulsores que utilizaremos en el prototipo son *los dispositivos neumáticos*. En el prototipo se han de utilizar dos dispositivos neumáticos diferentes, el primero un cilindro de movimiento lineal y el segundo un actuador de giro neumático.

Antes de especificar las características de los dispositivos neumáticos que utilizaremos, describiremos el funcionamiento que tiene cualquier impulsor o actuador neumático.

Los *cilindros de desplazamiento lineal* son los primero de los que hemos de hablar. La energía del aire comprimido se transforma, por medio de los cilindros, en un movimiento lineal alternativo. Este movimiento alternativo se puede aprovechar en un sin fin de aplicaciones. En el caso del prototipo, el cilindro de desplazamiento lineal se utilizará para abrir y cerrar las pinzas del efector final del robot. Los cilindros neumáticos que trabajan longitudinalmente tienen una o dos conexiones de aire comprimido según si son de simple o doble efecto. Realizan trabajo también en uno o en los dos sentidos según sea el caso. Entonces, el aire comprimido es necesario para dar la fuerza de la traslación. En ocasiones los pistones o cilindros neumáticos tienen un resorte interno, este resorte interno se dimensiona de manera tal, que devuelva lo mas rápidamente posible al émbolo a su posición inicial.

Profundizando un poco en los cilindros de doble efecto, podemos decir que la fuerza ejercida por el aire comprimido, impulsa al embolo a moverse en los dos sentidos, es decir, se dispone de fuerza útil tanto en la carrera de ida como en la de retorno. La carrera en principio no se encuentra limitada, pero existe el

riesgo de que uno de los dos límites se pierda. Es importante señalar que se tienen dos puntos de inyección del aire a presión.

De entre los muchos otros tipos de cilindros neumáticos que existen sobresale por ejemplo el *cilindro de amortiguación interna*. Cuando las masas trasladadas son importantes, para evitar los choques y el deterioro prematuro, se utiliza el sistema de amortiguación regulable, el cual, entra en acción momentos antes de alcanzar el final de la carrera. Este sistema está constituido principalmente por un émbolo amortiguador que reduce considerablemente la sección de paso del escape de aire contenido en esta cámara. El aire almacenado se comprime en la última parte de la cámara del cilindro y el exceso de presión que se crea en esta "sub-cámara", es el que se encarga de absorber la energía o amortizar.

En general se puede decir que con los cilindros neumáticos se logra un movimiento lineal de forma sencilla y económica mediante tres elementos principales:

1. La camisa
2. El vástago
3. El émbolo

La camisa es la cubierta del cilindro, el vástago es el eje o flecha que trasmite el movimiento y el émbolo es sobre el que se ejerce la presión de aire para obtener el movimiento.

El siguiente tema a tratar de los cilindros neumáticos, trata de los criterios de selección. Lo primero a seleccionar es el diámetro del cilindro y el primer dato para realizar esta elección, es la fuerza que se precisa en relación con la presión de servicio. La fuerza del émbolo se emplea en un pequeño tanto por ciento en rozamiento y el resto en el movimiento de la carga. La siguiente fórmula es la base del cálculo:

$$F = \frac{p \cdot (3.141592 \cdot d^2)}{4} - R$$

F = Fuerza efectiva vástago(N)
 p = Presión de Trabajo (bar)
 d = Diámetro del émbolo (cm)
 R = Rozamientos (pérdidas) (N)

Sólo pueden darse valores base o de orientación, puesto que la fuerza de fricción o rozamiento depende de muchos factores como la lubricación, la presión de trabajo, la contrapresión, etc.) La contrapresión genera una fuerza que actúa en dirección contraria, anula en parte la fuerza útil y se presenta particularmente cuando se estrangula el aire en la etapa de escape.

Lo segundo con lo que se selecciona es con el diagrama de pandeo. La carga admisible del vástago, para grandes carreras, debido al esfuerzo de pandeo o flexión es inferior a la que resulta de la presión de trabajo y la superficie del émbolo dada. La carga no debe sobrepasar en ese caso, de determinados valores máximos, que dependen de la carrera y del diámetro del vástago. Esta dependencia se puede comprobar según la siguiente fórmula:

$$F = \frac{(3.141592)^2 \cdot E \cdot J}{l^2 \cdot S}$$

Fk = Fuerza de pandeo admisible (N)

E = Modulo de Elasticidad (N/mm²)

J = Momento de Inercia

l = Longitud de pandeo = 2 * carrera

S = Coeficiente de seguridad, (5)

El tercer punto de la selección de un cilindro neumático es el consumo de aire.

El Diagrama de consumo de aire que se ajusta a la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{3.1415 \cdot d^2 \cdot h \cdot p \cdot 10^{-6}}{4}$$

Q = Volumen de aire/cm de carrera

d = Diam. émbolo o vástago (mm)

h = Carrera (aquí cte de 10 mm)

p = Presión de Trabajo (bar)

Los valores representados de este modo sólo representan valores orientativos, puesto que cuando el número de ciclos es elevado, la cámaras no se vacían completamente, de manera que el consumo total de aire puede ser considerablemente menor.

Como observación, podemos decir que existen varios tipos de fijación de los cilindros neumáticos, entre ellos: Por pies, Brida, Ajustable, Caballete, Oscilante, Oscilante con caballete, etc.

De los tipos de fijación la mas desfavorable para el pandeo es la oscilante trasera; en las demás fijaciones, la carga admisible es aproximadamente un 50% superior.

En un actuador de giro, la flecha se encuentra conectada a una paleta que esta encerrada dentro de un cilindro. Una pared, a la cual se le llama límite, sella contra la flecha. La paleta y el límite dividen al cilindro en dos zonas. La aplicación de alta presión a un punto A y de baja presión a un punto B, produce un diferencial de presión entre las dos zonas. La presión mas alta empujará a la paleta con mayor fuerza que la presión menor. Dado que la paleta se encuentra conectada a una flecha, tanto la paleta como la flecha rotarán. La paleta sólo girará hasta que tope con el límite o con algo externo que la detenga. La dirección de la rotación cambia cuando se intercambian los niveles de alta y baja presión.

En este capítulo hemos presentado las herramientas principales en la automatización y la robótica. La automatización inicia con la mecanización no siempre simple de posiciones individuales de trabajo operadas por seres humanos. Aún cuando es prudente siempre tener en mente el sistema completo de fabricación, es un hecho, que la mayoría de las automatizaciones se realizan parte por parte, en la realidad, la mayoría de las fabricas se automatizan parte por parte.

Es difícil clasificar los componentes de la mecanización y la automatización, pero a pesar de esto se han identificado en cuatro categorías amplias: Los sensores, analizadores, actuadores y los impulsores. Además en el transcurso

de este capítulo hemos mencionado cuales de los anteriores se utilizarán en la fabricación del prototipo que se construye junto con esta tesis. Aun falta hablar acerca de como se controlan estos dispositivos, sobre todo los impulsores de los que hablamos; pero esto es tema del siguiente capítulo.

III. CONTROL DEL SISTEMA

A. Introducción

En este capítulo se hablará de uno de los temas mas interesantes e importantes de la robótica y la automatización. Una definición para control, hablando de tecnología, es:

<< El conjunto de operaciones específicamente destinadas a comprobar el buen funcionamiento y/o correcto desempeño de una aparato, dispositivo, máquina, instalación etc., verificando su conformidad con ciertas normas o puntos prefijados, por medio del análisis de ciertas variables >>. ⁶

El objeto de este capítulo es presentar las opciones mas importantes para el control en la automatización, las que utilizaremos en el control del prototipo y las que simplemente son comúnmente utilizadas.

En este capítulo, se hablará sobre los principios en el control, tanto en robótica como en la automatización, por medio de computadoras, y los PLC. Y posteriormente en el capítulo V, al momento de hablar específicamente del prototipo, se detallará el diseño y el funcionamiento de la tarjeta que irá conectada a la computadora.

⁶ OGATA Katsuhiko, Ingeniería de Control Moderna, Estados Unidos, Ed. Prentice Hall, 1993, pág. 3

B. La Computadora Integrada en el Control

Las primeras computadoras digitales tenían mentes de una sola pista. Los programadores tenían que almacenar los programas en forma de "fila" y estos sólo se ejecutaban uno a la vez. Las computadoras de hoy en día, aun aceptan este tipo de organización, cuando utilizamos lenguajes de programación tales como el BASIC, PASCAL, COBOL y FORTRAN, pero el hardware de la computadora y la organización interna para las tareas, han cambiado. Aún existen computadoras "atadas" a una sola tarea, pero son muy caras e imprácticas. Las computadoras modernas se han convertido en una herramienta muy importante para la automatización y la robótica, gracias a su contribución a la ciencia y al procesamiento de datos. De alguna manera se puede pensar en las computadoras como robots, pues realizan tareas que antes pertenecían a los humanos.

Para apreciar los diversos niveles o el grado en el que la computadora interviene para asistir en la automatización y control de procesos de fabricación, es necesario conocer como se hacen las cosas manualmente. En el proceso manual convencional se puede ir desde el movimiento manual de las cosas, la adquisición de datos por medio de una libreta y pluma hasta el cuidado de variables en registros, medidores y anunciadores, para después ejercer una acción por medio de una consola con interruptores; sin tomar en cuenta que cuando un operador se encarga del cuidado de un proceso, debe tener un gran conocimiento del mismo y/o tener a su alcance los manuales con respuestas a diversas situaciones. También hay que observar que el operador debe mantener el diario del proceso de manera manual y esto puede acarrear una gran cantidad de problemas.

La primera operación que puede realizar una computadora, es entonces, el mantenimiento del diario de un proceso dado. Una computadora de almacenamiento y procesamiento de datos puede ser de beneficio para el operador humano en el control de un proceso, por medio de la simplificación del análisis de las variables de un proceso dado. Pero esa función puede presentar un problema, la computadora toma un cierto tiempo en convertir los datos a un formato entendible por ella y después otro cierto tiempo en procesarlos y presentarlos; en ese momento aún falta que el operador los comprenda y tome una decisión; para cuando todo este proceso termina, puede ser que el proceso ya haya sufrido un cambio.

El segundo grado en el que puede intervenir una computadora es el monitoreo del proceso. En este punto la computadora no solo recolecta datos, sino que además los procesa y dice al operador qué debe hacer en una circunstancia dada, además la computadora mantiene un registro, tanto en su memoria como impreso, de lo que va sucediendo dentro del proceso. Nótese que en este punto el operador ya no lleva más el diario del proceso, además de que se libra de la toma de decisiones ante el cambio de alguna variable.

El tercer grado de intervención de las computadoras y el más alto, es el control de ciclo cerrado. En este punto, el operador sólo permanece sentado "observando", porque ya no tiene nada que ver con el control del proceso; aun cuando muchas veces se le mantiene ahí para poder corregir en caso de que algo vaya mal con la computadora.

La interfase al proceso es un punto de vital importancia al momento de hablar de las computadoras como medio de control. Además de los periféricos comunes de entrada/salida de datos, tales como las impresoras, los plotters y el teclado, con los cuales la computadora debe tener conexión, una computadora de control debe tener una unión con las variables de un proceso. Para un sistema de ciclo cerrado, el más completo, se deben tener líneas para los arrancadores de motores, relays, actuadores, válvulas, etc. Las entradas y salidas de un proceso son de dos tipos: *Digitales y analógicos*.

Los datos digitales o discretos, son los más sencillos de manejar de los dos tipos, porque ya están en el formato que maneja la computadora: el binario. El sistema digital simplemente se basa en prendido o apagado, (1 ó 0). Ejemplos de datos digitales pueden ser:

- Objeto presente o no presente
- Voltaje positivo o negativo
- Temperatura sobre o por debajo del límite
- Encender o apagar motor
- Abrir o cerrar válvula
- Aceptar o rechazar válvula

Podemos observar que muchas de las variables anteriores tienen características de variables continuas, como la temperatura o el voltaje, pero la entrada o salida de la computadora es discreta porque se han establecido ciertos límites o parámetros.

Los datos digitales se pueden "empaquetar" de manera muy conveniente para el manejo por medio de la computadora. Por ejemplo: las condiciones de ocho variables lógicas diferentes se pueden almacenar en una sólo registro de la computadora, con un tamaño de un byte (ocho bits). De cualquier manera, cabe señalar que estos empaquetamientos a veces son difíciles de manejar utilizando lenguajes de programación de alto nivel, como el BASIC, Fortran o Pascal. Es mas conveniente entonces utilizar lenguajes como el Ensamblador.

Los datos analógicos ofrecen mas complejidad en su manejo. Si se deben ingresar datos a la computadora sobre los niveles reales de variables de proceso, tales como la temperatura, flujo y presión, entonces es necesario realizar una conversión, puesto que la computadora sólo acepta datos digitales. En este punto es donde interviene una operación que tiene sus complicaciones: La conversión Analógica-Digital y Digital-Analógica.

La conversión Analógica-Digital consiste en traducir un dato del nivel de una variable a un número digital que lo represente. Generalmente el dato sobre el nivel de una variable ya esta representado a su vez por medio de un voltaje. Esta representación en voltaje la llevan a cabo diferentes dispositivos electrónicos, un ejemplo puede ser una galga extensiométrica, la cual ofrece una variación en la resistencia, debido a la presión, que puede traducirse en una variación de voltaje.

Al proceso de conversión de una señal analógica a una digital, se le llama, *cuantificación*, y es una mera aproximación, dado que la señal analógica puede tomar una cantidad infinita de valores y la señal digital no.

La conversión Digital-Analógica se efectúa por medio de un convertidor D/A, un dispositivo que transforma un número digital en un voltaje o corriente continuos en el tiempo, que son una representación de dicho número. Se puede decir que este convertidor es un potenciómetro controlado digitalmente que produce un voltaje analógico a la salida.

Los datos analógicos no son tan importantes para los robots como lo son los datos digitales. Es la combinación de condiciones de lógica digital la que necesita de una acción correctiva automatizada. Es cierto que muchas plantas tiene procesos con variables continuas, pero esto es mas bien preocupación de la ingeniería de control. Para el campo de los robots y la automatización de la fabricación, los productos, procesos, y las variables de control son en su mayoría discretas.

Hasta aquí la introducción a lo que la computadora se refiere, posteriormente hablaremos mas en particular de como se ha de conectar nuestro robot con este "aparato" que lo ha de controlar: La computadora.

C. Los PLC

PLC son las siglas en inglés para Controladores Lógicos Programables. La relación entre los controladores lógicos y los robots industriales es muy interesante. En esta sección hablaremos sobre los PLC, aún cuando este no sea el método que se utilice para controlar al prototipo.

Lo primero por hacer, es presentar una comparación entre los PLC y las computadoras. Los componentes de la unidad principal de un PLC, como la memoria y el CPU, son de algún modo pruebas de que los PLC son simplemente otra computadora. Pero esto no es del todo cierto. Casi todo el mundo puede decir que la computadora realiza una gran cantidad de operaciones rápidamente, siguiendo una serie de operaciones dentro de un programa, cuyo tiempo de ejecución dependerá de la complejidad de las operaciones a realizar. Esta operación no queda dentro de las de los PLC. El programa completo de un PLC se ejecuta en fracciones de segundo. Esto no es complicado pues la función del PLC es simplemente tomar decisiones de Si o NO y no la de realizar una complicada serie de cálculos. El PLC analiza casi simultáneamente una serie de datos o condiciones, para después ir tomando decisiones y mandando datos de regreso al proceso. En pocas palabras podemos decir, que la computadora puede cumplir con una gran variedad de tareas, mientras que los PLC se encuentran mas enfocados a tareas específicas.

Aquí se presenta una definición amplia de lo que son los PLC:

<< Un Controlador Lógico Programable es un dispositivo electrónico que lleva a cabo funciones de control de diversos tipos y variados niveles de complejidad. Una persona que no tenga entrenamiento en computadoras, puede ser capaz de programarlo, controlarlo y operarlo. El PLC operará cualquier sistema que tenga dispositivos que se enciendan o apaguen.>>⁷

⁷ WEBB John W., Programable Logic Controllers, Estados Unidos, Ed. Maxwell Macmillan, 1992, pág. 4

Los primeros sistemas de PLC, fueron una evolución de las computadoras convencionales de finales de los 60's. Los primeros PLC en su mayoría se instalaron en plantas automotrices. Uno de los grandes problemas de los primeros PLC era que no podían ser reprogramados con facilidad, hasta que a mediados de los 70's, se añadió a ellos el microprocesador, lo que los hizo mucho mas aplicables a un sin fin de tareas de automatización y con robots.

A continuación se mencionan algunas de las principales ventajas de la utilización de los PLC:

La Flexibilidad. En vez de requerir de un control electrónico para cada máquina que se desee controlar, se puede utilizar un solo PLC para controlar una gran cantidad de máquinas, puesto que cada una tendría su propio programa.

Costo Menor. La tecnología moderna hace posible compactar mas funciones en paquetes mas pequeños y menos costosos. En los 90's se pueden conseguir PLC's muy funcionales por cantidades tan bajas como 300 dólares.

Corridas Piloto Un circuito programado por medio de un PLC puede pre evaluarse en una oficina o laboratorio. El programa se puede teclear, probar, observar y modificar si es necesario, ahorrando así valioso tiempo.

Velocidad de Operación La velocidad de operación de un Programa de PLC es muy rápida. La velocidad de la operación lógica de un PLC es simplemente cuestión de milisegundos.

Confiabilidad Los dispositivos de estado sólido son mas confiables en general, que los dispositivos mecánicos o eléctricos. El PLC esta formado de componentes electrónicos de estado sólido, con tasas de confiabilidad muy altas.

En contraparte existen ciertas desventajas en el uso de los PLC:

La nueva Tecnología Es muchas veces difícil cambiar la ideología tanto de la gerencia, como de los trabajadores, para que evolucionen de los relays a los conceptos de los PLC.

Consideraciones Ambientales Ciertos procesos se llevan a cabo en ambientes que interfieren con el correcto funcionamiento de los dispositivos electrónicos del PLC. Esto limita su uso.

En realidad las anteriores son las desventajas mas importantes que se presentan con los PLC, todo depende de la correcta selección y de saber cuando en realidad no se necesita de uno. Las cinco partes principales de un PLC son:

1. La unidad central de proceso CPU, es el "cerebro" del sistema.
2. El teclado sobre el cual se teclean las instrucciones y se ven en un monitor.

3. Los módulos de entrada y salida, son donde se manipulan las señales de datos, desde y hacia dispositivos externos.
4. La impresora, donde se puede imprimir el programa y ocasionalmente información necesaria.
5. Donde se graba el programa. Algunos PLC antiguos utilizan dispositivos de cinta; los más nuevos utilizan simplemente drives de discos flexibles y discos duros.

El tema de la *programación de los PLC* es, sin duda, muy interesante. Los métodos de programación de PLC, varían de fabricante a fabricante, pero lo que prevalece en todos los métodos es la estructura básica de programación de lógica tipo escalera. Para el que programa el PLC, la ejecución de su programa es simplemente una cuestión de ir siguiendo los "escalones" de la escalera. La popularidad de las computadoras personales ha causado movimiento entre los fabricantes de PLC, en el sentido del diseño de programas que permitan a su vez la programación con lógica escalera en computadoras. Dado que esta sección de la tesis, no es, ni pretende ser una guía amplia y especializada sobre PLC, no hemos de profundizar más sobre la programación de estos. Mas bien vamos a hablar más acerca de la relación que guardan los PLC con los robots.

Es un hecho que la relación entre los PLC y los robots industriales es muy interesante. Existen dos clases de control de los PLC sobre los robots: la de supervisión y la de control directo.

El control de supervisión. Los controladores lógicos programables se pueden utilizar para controlar un proceso automatizado completo, del cual los robots industriales suelen ser parte. Por lo tanto, el PLC indica al robot, por medio de señales, que es momento de realizar la secuencia de operaciones asignada. El PLC, también puede monitorear diversas funciones, interacciones con el equipo del proceso y condiciones anormales o críticas, para después ordenar acciones de acuerdo a la situación. En el modo de supervisión de los PLC sobre los robots industriales, se debe recordar que además el robot tiene su propio controlador integrado, el cual se encuentra programado para que el robot ejecute sus movimientos. En resumen el modo de supervisión es un control indirecto sobre el robot.

El Control directo sobre el robot. Los controladores lógicos programables, no sólo son útiles en la unión y sincronización de los robots con el proceso de fabricación; un PLC puede ser, de hecho, el que controle al robot. Si observamos dentro del panel de control de un robot industrial, frecuentemente encontraremos que vienen con un Controlador Lógico Programable de fábrica. Los PLC son ideales para los robots simples con límites de ejes, y se aplican sobre todo en robots neumáticos con operaciones de tomar y dejar.

En resumen, el Controlador Lógico Programable es un dispositivo ingenioso que ha simplificado muchos, hasta casi eliminar, aquellos grandes paneles de control eléctrico, que antes consistían casi totalmente de relays. Junto con esta simplificación, los PLC traen consigo mucha flexibilidad y poco equipo, tanto en volumen como en costo. Los Controladores Lógicos Programables y las Computadoras se encuentran relacionados en que ambos tienen unidades

centrales de proceso y memorias, pero el Controlador Lógico Programable ejecuta el mismo pequeño programa, miles de veces en una hora, mientras que las computadoras ejecutan o pueden ejecutar una variedad de programas comparativamente mayores. Las entradas y salidas de los PLC son circuitos lógicos. Quedó claro que la base para la programación de los PLC es la lógica escalera. Los PLC operarán continuamente hasta que se les ordene algún cambio. Las ventajas de la flexibilidad, facilidad de instalación, confiabilidad y mantenimiento son obvias para cualquiera que tenga relación con los PLC.

A pesar de todo lo anterior, el hecho de no utilizar un PLC para el control del prototipo de esta tesis, responde a la inquietud personal de conocer y tratar con todos los aspectos que involucran la construcción de un robot, es por esto que junto con el prototipo se diseñó y construyó una tarjeta controladora, que va unida a la computadora. La tarjeta entonces será controlada por medio de un programa, pero esto es tema de los siguientes capítulos. Lo interesante es que la implementación e integración de un PLC al prototipo de robot de la tesis, puede ser un buen tema de otro proyecto.

En la actualidad, la meta es automatizar lo mas posible, es decir, reducir al máximo la intervención de la mano del hombre tanto en la realización de tareas como en el control de dispositivos. Existen otros tipos de control, pero para el alcance de esta tesis, los mencionados son los que aplican.

IV. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO

A. Introducción

En este capítulo se hablará de los requisitos que se definieron para el prototipo en general y se mencionan algunas consideraciones con base en lo expuesto en los capítulos anteriores sobre los elementos que se utilizarán en la construcción del prototipo, como lo son los motores a pasos y los dispositivos neumáticos.

B. Los Requisitos

Como meta se propusieron ciertos requisitos que son necesarios cumplir en la construcción del prototipo, ellos son:

- . Que el robot sea totalmente controlable por medio de una computadora PC con un puerto paralelo.
- . Que el robot sea fácilmente montable y operable
- . La facilitación de la operación por medio de un programa comprensible y manejable.
- . La tarjeta de control debe tener una estructura lo mas sencilla y lógica como para que su construcción, estudio y reparación no presenten ninguna complicación.
- . El diseño del robot debe ser en forma de módulos y debe permitir que en un momento dado se le puedan añadir aditamentos, además de permitir modificaciones a los módulos ya existentes.

Debe ser una representación totalmente real de un aplicación en la industria y bajo ningún concepto debe parecer un simple juguete.

C. Las Consideraciones

Existen diversas consideraciones y justificaciones a tomar en cuenta al ver el desarrollo del prototipo:

La Computadora. Como ya se mencionó, la principal razón por la que se utilizó una computadora para controlar al robot, no reside en que hoy en día sea el método mas común, sino en que uno de mis propósitos al construir este prototipo es involucrarme con todas las areas relacionadas con la robótica y una de las principales es sin duda la electrónica de control.

El Uso del Puerto Paralelo. Existen múltiples formas de conectar aparatos a una computadora, por medio del puerto serial, del puerto paralelo y por medio de los slots de expansión. En realidad las opciones que serian mas adecuadas para el robot son el puerto serial y el puerto paralelo. El uso del puerto paralelo responde a que en realidad la señal de control no va a recorrer grandes distancias, lo que haria necesaria la utilización del puerto serial, además de que la programación del puerto paralelo es mas rápida y ágil.

. *La Tarjeta.* En principio pensé en dejar la circuitería de la tarjeta en un "Proto-Board" o tarjeta de pruebas, pero con objeto de dejar un prototipo que sea completamente permanente, decidí posteriormente fabricar el impreso. En esta tesis se deja también el diagrama del circuito impreso, pues las tarjetas de control de motores a pasos pueden aplicarse en una variedad de cosas.

. *El Programa.* Se utilizó el Lenguaje BASIC por la razón de que el acceso al puerto paralelo por medio de este, es sumamente sencillo. Además, dado el diseño del programa se requería de una capacidad gráfica adecuada y el Lenguaje BASIC, permite el dibujo en pantalla sin demasiadas complicaciones. El programa es de uso sencillo, pero hablaremos sobre él en detalle en un capítulo posterior.

. *La Estructura.* Para la construcción de la armadura, decidí utilizar perfiles de aluminio, por su ligereza y resistencia. En la construcción de la armadura se unen también el montaje de los tornillos sin fin y de todo lo que se relaciona con el movimiento de los ejes.

D. El Diseño

En el diseño y en la construcción del prototipo completo se pensó en un diseño modular: El prototipo está diseñado y construido bloque por bloque; cada uno de los bloques tiene una función que cumplir, y se encuentran unidos solamente porque dependen entre ellos para que todo el conjunto funcione correctamente. El método modular tiene dos ventajas importantes: El diseño

modular facilita la detección de errores, dado que si un bloque funciona correctamente y el siguiente no funciona, bastará con darse cuenta de cual o cuales son los que funcionan adecuadamente, para concluir cual es el que no responde. La segunda ventaja reside en que es flexible y fácilmente expandible, por ejemplo: Supongamos que el vez de las pinzas que lleva el robot, se desea poner una ventosa para tomar objetos; bastará con remover el modulo de las pinzas y colocar el nuevo módulo, para obtener el nuevo conjunto.

Se buscó además que toda la armadura fuera fácilmente desarmable, con el objeto de facilitar el mantenimiento y las reparaciones.

En el diseño de la tarjeta, se siguieron ciertos pasos, que a su vez permitieron ciertas modificaciones. El primer paso fue armar la idea básica en un "Proto-Board", sobre esta tabla de pruebas, realizamos ciertas modificaciones a la idea original. Posteriormente dibujé el circuito definitivo en su forma lógica para después dibujarlo en la forma definitiva que lleva el circuito impreso.

Es en este punto, donde inicia la parte descriptiva del diseño del prototipo y de todo lo que se encuentra involucrado con su funcionamiento. Los siguientes capítulos involucrarán totalmente esta descripción. En general, el resto del texto de la tesis está dedicado a la explicación de todos los detalles de la construcción y operación del prototipo.

V. EL CIRCUITO DE CONTROL

A. Introducción

El primer punto que tocaremos sobre la construcción del prototipo, es el circuito de control. En este capítulo hablaremos de como se diseñó, de como se construyó y de los componentes de este circuito.

Para controlar cualquier robot, siempre se necesitará de electrónica. De una u otra manera, la electrónica es parte esencial del control de los robots actuales. Ya sea que se utilicen los PLC, que sólo se use un circuito o que se utilice una computadora para realizar la tarea de control, siempre habrá algo de electrónica involucrada en este proceso.

Durante este capítulo tocaremos temas como la configuración de la computadora, el puerto paralelo, y la configuración del circuito que se construyó para el control, sobre todo, de los motores a pasos que impulsan al robot.

B. La Computadora

Es importante señalar que el circuito que se diseñó para poder manejar al robot, cumple básicamente dos funciones; la primera es la de dar la secuencia que se requiere para activar las fases de los motores a pasos y la segunda, es la de servir como una interfase con la computadora que, a final de cuentas, será la que se encargue de decir qué motor funciona y en qué momento. Dado

esto, para poder explicar cómo integramos la tarjeta a la computadora, hablaremos primero de dos temas importantes; la computadora en general y el puerto paralelo en particular.

La computadora que se encargará de controlar al circuito, es una PC compatible, cualquiera que se tenga a la mano. Para esto, vale la pena explicar las características de los diversos modelos que existen.

La PC original era un sistema con 32 K de memoria y con cinco slots de expansión. Esta PC era capaz de manejar dos discos de 5 1/4, cada uno con una capacidad de 160K. La computadora PC original, utilizaba el microprocesador 8088 de Intel que corría a 4.77 MHz. Este modelo tuvo, posteriormente, una modificación, a la que se le denominó XT. Algunas de las mejoras de este modelo fueron: incremento de los slots de expansión a 8, se añadió un disco duro, la fuente de poder subió a 135 watts, por 65 que tenía el modelo anterior.

El siguiente modelo de PC que surgió, fue el AT, este usaba ya el nuevo procesador de Intel, el 286. El Bus de datos creció hasta 16 bits, la velocidad de procesamiento se incrementó incluso hasta 25 MHz. Una máquina 286, con estados de cero espera, podía desafiar a la que después sería el siguiente modelo, la 386.

La aparición del procesador 386 de Intel, fue el siguiente gran avance. Este procesador tenía ya 32 bits. Este procesador ofrece de 12 a 50 veces el desempeño del primer modelo 8088. Estas mejoras, incluyen, aumento en la

rapidez de procesamiento, nuevas instrucciones y menos tiempo de espera por cada instrucción.

El siguiente modelo, fue el procesador 486, también de Intel. Este sigue siendo compatible con el software para el microprocesador 386. Las principales habilidades del 486 no se relacionan con una nueva arquitectura, sino mas bien con mejoras en la integración de silicón a alto nivel. En este se integra el coprocesador 387 y se llegan a obtener velocidades de hasta 50 MHz.

El último modelo de microprocesador de Intel, es el Pentium. Este nuevo microprocesador, incorpora muchos nuevos avances, puede incluso lograr velocidades de 66 MHz. Al momento de escribir esta tesis, el Pentium está apenas saliendo al mercado, de modo que no se tiene mucha información disponible.

Para controlar al robot, como ya se ha dicho, utilizaremos el puerto paralelo de la computadora. Es, entonces, primordial hablar de como funciona este puerto. El tema de cómo hacer llegar datos al puerto, será tema del capítulo en que hablamos del software.

De cualquier manera, es importante hablar de los ciclos del puerto. Existen dos ciclos, el de lectura y el de escritura. Estos ciclos se dan cada vez que el puerto recibe una orden, ya sea de lectura o escritura, procedente de un programa. El objetivo es, entonces, hacer llegar datos al puerto, o leerlos del mismo. La duración mínima del ciclo, depende de cada modelo de computadora; mientras mas rápida es, menos dura el ciclo.

Se debe aclarar que existen diversas formas de conectar dispositivos a la computadora, pero en nuestro caso, el puerto paralelo es el ideal por dos motivos. El primero es que es necesario transmitir la información a largas distancias, lo que hace posible que ésta se encuentre en paralelo. Y el segundo motivo es que el puerto paralelo es muy sencillo de utilizar. Y pues es claro, que la tarea de un ingeniero es buscar la solución óptima a los problemas; mientras mas sencilla y eficiente la solución, mejor para el proyecto. Lo anterior no significa que el puerto paralelo sea la única opción, pues también se puede utilizar el puerto serial o inclusive uno de los slots de expansión.

El puerto paralelo de un adaptador de despliegue monocromático tiene su dirección de inicio en el 956. Esta dirección esta en decimal, o en base 10, algunos lenguajes de programación, como el que utilizamos en el proyecto, requieren que la dirección se dé en hexadecimal. El equivalente hexadecimal es H3BC; la H significa que este es un número hexadecimal. El puerto paralelo que está contenido el una tarjeta de expansión I/O, como una tarjeta multifunciones, tiene una dirección en decimal con valor de 888 o H378. En general, se especifica la dirección cuando se instala el puerto.

A los puertos paralelos de la IBM se les da los nombre lógicos de LPT1, LPT2 y LPT3. Cada vez que se enciende o resetea el sistema, el BIOS ROM de la tarjeta madre de la computadora, busca automáticamente los puertos paralelos en las direcciones H3BC, H378 y H278 en ese orden. Los nombres se van asignando a cada uno de los puertos en el orden en que se van encontrando.

El puerto paralelo tiene un conector de 25 pines, seguido llamado conector DB-25. Las conexiones de este tipo, son muy comerciales, de modo que son fáciles de conseguir. En la figura 5.1 se presenta un dibujo del conector del puerto paralelo, junto con una descripción de que contiene cada uno de los pines.

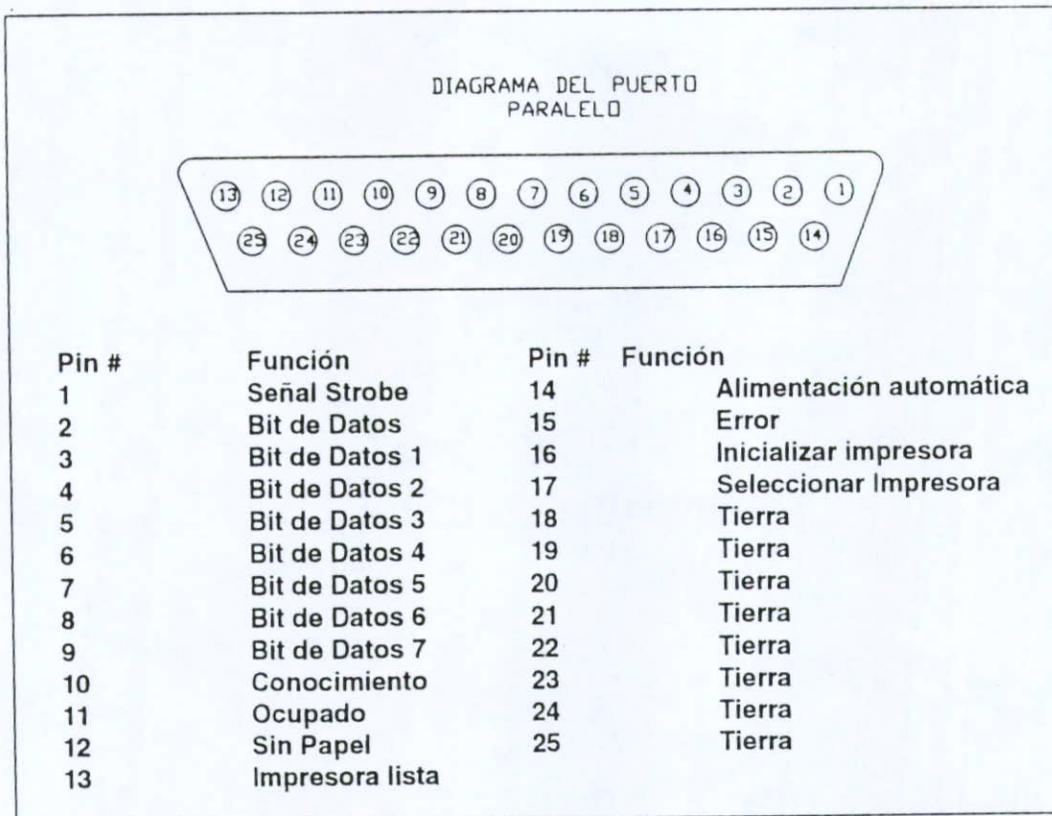


FIGURA 5.1

La señal del pin 1, es la que se encarga de establecer cambios de estado en los pines 1 a 9. En estas líneas, se puede poner información para que la lea el dispositivo que esté conectado. Para que la computadora pueda leer

información proveniente del dispositivo, existen cinco líneas de estado, estas son:

- La señal de error (No siempre disponible)
- Selección de impresora
- Error (No siempre disponible)
- Conocimiento
- Ocupado

Las líneas de conocimiento y ocupado, son realmente lo mismo para la impresora, pero en programa diferente, se pueden leer por separado.

Por último, el detalle mas importante es que los puertos paralelos funcionan con un voltaje TTL, es decir, un voltaje de 5 volts referidos a tierra.

C. El Circuito

El diseño del circuito tuvo varias etapas, todas ellas fueron muy productivas en cuestión de aprendizaje. La primera idea que surgió, fué buscar operar las fases de los motores desde la computadora, es decir, controlando directamente los transistores. Esta idea tenía un problema, era necesario disponer como mínimo de 12 salidas para los motores, esto significaba que las 8 salidas del puerto paralelo, no eran suficientes. La solución fue "multiplicar" las salidas por medio de una arreglo de compuertas AND. El máximo de salidas que se lograron fue de 16. Esto solucionaba el problema de la insuficiencia de salidas, pero planteó el problema del control. No era sencillo, ni resultado viable, controlar las fases directamente desde la computadora.

La segunda opción fue la de buscar un circuito controlador de las fases. La primera idea de buscar hacer este circuito nació por que existen tarjetas controladoras en venta y por la investigación que se realizó sobre le manejo de los motores a pasos. El circuito mismo, es fruto de esta investigación. El precio base del circuito controlador, en su versión comercial, es de aproximadamente 200 dls. De haber tomado la decisión de comprar las tarjetas controladoras, el costo hubiera incrementado grandemente.

La idea básica es controlar las fases por medio de un circuito, que su vez, se pueda controlar desde la computadora. Como ya se dijo a través de la tesis, los motores a pasos requieren, para funcionar, una cierta secuencia de accionamiento en sus fases. Esta secuencia se consiguió por medio de dos componentes básicos: compuertas or-exclusiva y los flip-flops.

Las compuertas o circuitos OR-exclusivos, se presentan con mucha frecuencia en los sistemas digitales. La expresión booleana de una compuerta or exclusiva es :

$$x = A'B + AB'$$

La tabla de verdad respectiva muestra que $x = 1$ en dos casos, cuando $A = 0$, $B = 1$ y cuando $A = 1$ y $B = 0$. En otras palabras, el circuito produce una salida alta siempre que las dos entradas estén en niveles opuestos. La tabla de verdad es la siguiente:

<u>A</u>	<u>B</u>	<u>x</u>
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Una compuerta ORBES sólo tiene dos estradas; no hay compuertas ORBES de tres o cuatro entradas.

Se disponen de varios circuitos integrados (CI) que contienen compuertas ORBES. En seguida se enlistan circuitos ORBES cuádruples, es decir, que tienen 4 compuertas en cada integrado:

- 74LS86 Quad ORBES (familia TTL)
- 74C86 Quad ORBES (familia CMOS)
- 74HC86 Quad ORBES (CMOS de alta velocidad)

El segundo componente del circuito controlador es el flip-flop JK. El sistema flip-flop es el elemento de memoria más importante; esta formado por un ensamble de compuertas lógicas. Aunque una compuerta lógica no tiene la capacidad de almacenamiento, pueden conectarse varias de ellas de manera que permitan almacenar información. Existen varias configuraciones de compuertas que se utilizan para producir los flip-flops. Normalmente el flip-flop, tiene dos tipos de salida, una normal y otra negada. Al flip-flop se le conoce también con otros nombres, entre ellos el de registro básico y

multivibrador biestable. A continuación se presenta la tabla de verdad de un flip-flop JK como el que se utiliza en el circuito:

<u>J</u>	<u>K</u>	<u>CLK</u>	<u>Q</u>
0	0	Pos	Qo (No cambia)
1	0	Pos	1
0	1	Pos	0
1	1	Pos	Qo (se complementa)

Las compuertas ORBES y los flip-flops, son los componentes básicos de la sección lógica del circuito controlador.

Aún cuando localizamos el circuito al momento de estar investigando, decidimos que antes de armarlo, era necesario probarlo. Para esto, utilizamos un programa que recién había adquirido la Universidad Panamericana, el Electronics Workbench. Este programa permite simular el funcionamiento de circuitos, tanto analógicos como digitales. El primer paso fue entonces, "dibujar" el circuito en el programa. Una vez que se tiene el circuito en pantalla, se pueden conectar a él, dispositivos tales como: un generador de funciones, una fuente, un osciloscopio, un analizador lógico etc. Esto permitió analizar por completo el funcionamiento del circuito. Al momento de la simulación, se pudo observar que el circuito sí generaba la secuencia de las fases que se requería para manejar los motores.

La segunda sección de la tarjeta es la sección de potencia. El circuito lógico, no puede, por sí mismo, alimentar a las fases del motor a pasos. La razón es

muy simple, los CI de la familia TTL, toleran un máximo de corriente de 500 mA. Mientras que los motores necesitan al menos 2.5 amperes para arrancar. La sección de potencia consta básicamente de dos elementos: transistores de potencia tipo Darlington y diodos. El uso de diodos es sumamente difundido, pero el tema de los transistores Darlington, merece unas palabras aparte.

Los transistores o amplificadores Darlington, también llamados mixtos o compuestos, son un arreglo de dos transistores, en nuestro caso NPN, que se encuentran unidos de la siguiente manera: El colector del primero está unido con el colector del segundo, el emisor del primero está unido con la base del segundo, mientras que la base del primero es la base del arreglo y el emisor del segundo es el emisor del arreglo. En la figura 5.2 se presenta un dibujo del transistor Darlington

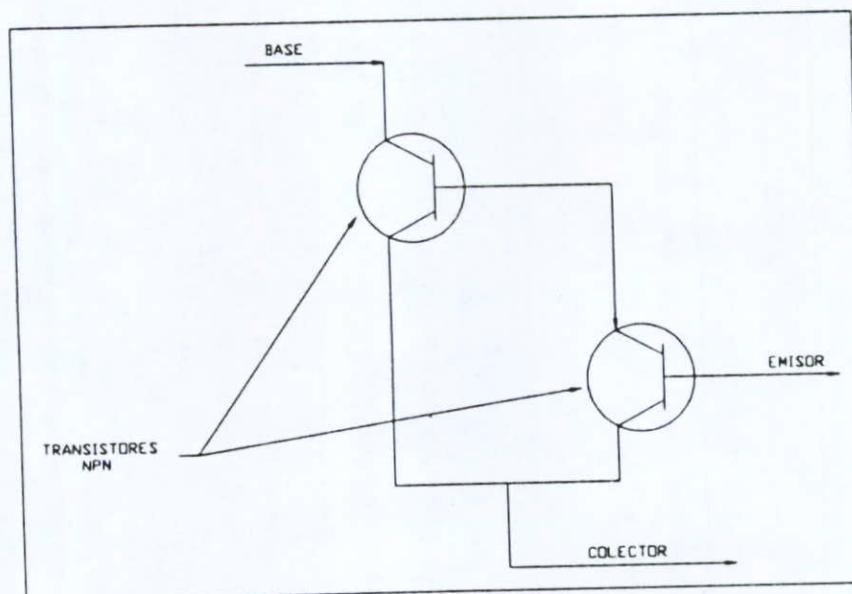


FIGURA 5.2

Esta configuración se utiliza para proveer mayor impedancia de entrada y muy alta ganancia de corriente. Esta característica, es la que hace a este arreglo útil para la aplicación que nos ocupa.

También la sección de potencia la analizamos en el Electronics Workbench, en su sección analógica. Para la simulación de la sección de potencia, colocamos el arreglo de los cuatro transistores Darlington que se necesitan para energizar las cuatro fases del motor, junto con sus resistencias y los diodos que se necesitaban. Para simular los motores colocamos una resistencia de .33 ohms y una impedancia de 630 mH en serie por fase, según las especificaciones de los motores. Esto nos permitió analizar el comportamiento del circuito de potencia y nos fué de mucha utilidad.

El análisis de la sección de potencia fue muy productivo por dos aspectos:

- a) Cuando quisimos conectar los motores para probarlos, tuvimos problemas porque alimentábamos las fases con 1.3 volts, según las especificaciones del fabricante. Con este voltaje no obteníamos la potencia que esperábamos de los motores y en primera instancia no sabíamos a que se debía. El análisis en el Electronics Workbench nos permitió descubrir que esos 1.3 volts, no eran el voltaje nominal, sino que eran la caída de voltaje requerida en cada fase. Cuando experimentamos con los motores, no nos atrevíamos a aumentar el voltaje, por temor a quemarlos, pero en el programa si pudimos y

con ello comprobamos que al momento de lograr la caída de voltaje mencionada, también se alcanzaba el valor nominal de corriente.

Para ser exactos, cuando llegábamos al valor de 1.29 volts en el análisis, se alcanzaba una corriente por fase de 3.89 volts.

- b) El segundo punto que quedó claro con el uso del programa fué que la resistencia que se acoplara al colector del transistor, era vital para lograr la adecuada caída de voltaje. Mientras mas creciera esta resistencia, mas difícil era alcanzar la caída de voltaje. Traducido a la ejecución física del proyecto, esto significaba que mientras menos cable le pusiéramos a la conexión de los motores, iba a ser mas fácil alcanzar el valor de la caída de voltaje.

En resumen, el uso del programa de análisis, fue de gran ayuda para lograr adaptar el circuito a nuestras necesidades.

Existe otro detalle importante de mencionar, en el circuito que encontramos al investigar, se sugería el uso de un transistor Darlington de denominación TIP 120, este resultó ser insuficiente, pues se calentaba demasiado. Se decidió entonces, sustituirlo por uno de denominación TIP 100, que probó ser mucho mas eficiente con estos valores de corriente.

Es importante mencionar que el circuito se encuentra armado en una tableta de pruebas, también llamada, proto-board. Esto es una presentación no definitiva,

pero tiene la ventaja de ser fácilmente modificable. Se busca que el proyecto final utilice un circuito que este en una tarjeta impresa.

La secuencia que el circuito controlador da y que es la que los motores a pasos que utilizamos requieren, es la siguiente:

<u>Paso</u>	<u>Fase 1</u>	<u>Fase 2</u>	<u>Fase 3</u>	<u>Fase 4</u>
1	1	0	1	0
2	0	1	1	0
3	0	1	0	1
4	1	0	0	1

Esta secuencia, se debe poder dar en los dos sentidos, es decir, tanto de 1 a 4, como de 4 a 1.

Sólo resta hablar acerca de cómo se controla el circuito desde la computadora. Aún cuando el circuito en sí, no esta diseñado para ser controlado desde una computadora, la adaptación que se hizo, resultó ser muy adecuada. La idea es la siguiente, el circuito para funcionar requiere de dos entradas: una para los pulsos que controlar, a final de cuentas, la velocidad del motor y otra para indicar el sentido de las fases y por tanto el sentido de rotación. Se unieron las entradas, tanto de sentido como de pulsos, de los tres circuitos que controlan a los tres motores, dando como resultado sólo dos punto de control, que van directamente a la computadora. La selección de que motor activar, es simple, sólo se energizan los VCC de los integrados que controlan determinado motor, esto se hace por medio de la computadora y con esto la computadora es la que

se encarga, por medio de un programa, de ir arrancando los motores según se requiera.

Como se puede ver, las salidas de la computadora hacia el circuito, se redujeron a 5, más 2 que se necesitan para controlar las electroválvulas. Las electroválvulas se activan simplemente activando dos transistores. Este proceso es sumamente sencillo y una vez más, la sección neumática no es estrictamente parte del control del robot, ya que las pinzas, que es lo único neumático, es sólo una opción para el actuador final. La configuración del robot, permite utilizar una gran variedad de actuadores finales, los cuales pueden ser o no neumáticos, y el control de los mismos no es tema de este trabajo.

Como conclusión, lo único que se puede decir, es que el circuito está ahí, funcionando y además, su funcionamiento está plenamente documentado.

VI. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

A. Introducción

La segunda sección de la que toca hablar sobre la construcción del prototipo, es la construcción física y los aspectos mecánicos del mismo. Esta sección es interesante, pues al momento de ir avanzando en la construcción, se presentaron detalles que son importantes de mencionar.

Para explicar el método del diseño y la construcción del robot, voy a dividir al mismo en secciones; las mismas secciones en las que se le dividió para construirlo y en esas secciones hablaré sobre los detalles especiales.

Sin embargo la primera sección de la que hablaremos, es acerca de los pasos que se siguieron antes de iniciar la construcción del prototipo. Todo el diseño se llevó a cabo cumpliendo con varias etapas, que van desde la concepción de la idea hasta poner esa idea en un dibujo.

B. El Diseño Inicial

La idea de la construcción de un prototipo de robot de coordenadas cartesianas, se tenía en la mente desde mucho tiempo antes de que se vislumbrará la posibilidad de construirlo. La primera idea, era que todo el mecanismo, en los tres ejes, fuera completamente neumático. El primer dibujo que se hizo de esta idea, reflejaba los actuadores neumáticos y cuando fue presentado al asesor de tesis, surgió la idea de que cambiáramos los

actuadores neumáticos por los motores a pasos. Esto modificó radicalmente el diseño de todo el prototipo y le dio al proyecto nuevos alcances.

La siguiente fase del diseño inicial, fue comenzar a dibujar la segunda versión del prototipo, la cual ya incorporaba las nuevas ideas. Esta segunda versión, sigue siendo radicalmente diferente al resultado final, pero ya contenía muchas de las ideas básicas. Fue en esta segunda etapa donde se decidió que el material que utilizaríamos sería el aluminio.

El momento en el que realmente se comenzó a desarrollar la idea, fue cuando se inicio la etapa de dibujo en AutoCad. Ya utilizando este poderoso programa de diseño y dibujo, se obtuvo una tercera versión del prototipo, ya muy parecida al ya construido y sobre de esta tercera versión, fue sobre la que realmente se inicio el trabajo de diseño a detalle.

C. El Método de Diseño y Cálculo

Antes de comenzar a hablar sobre las secciones en las que se dividió la construcción del prototipo, es importante nombrar y explicar los pasos del método de construcción que utilizamos.

Para obtener la mayor precisión posible, se decidió utilizar la fresa de control numérico que tiene la Universidad en su laboratorio de robótica, la cual puede maquinar con toda facilidad el aluminio.

Para poder utilizar la fresa de control numérico para maquinar las piezas, se necesitan cumplir primordialmente tres pasos:

- a) *Dibujar en AutoCad cada pieza que ha de maquinarse. Este dibujo debe tener las mismas dimensiones que tienen tanto la pieza como los maquinados que han de hacerse. Además, en el dibujo se deben "señalar" los maquinados, la manera de señalarlos es dibujar cada tipo de maquinado en una diferente capa, es decir, un taladrado se debe encontrar en una capa y por ejemplo el careo en otra. Es importante señalar que el dibujo debe tener su origen en las coordenadas universales de AutoCad Y NO en coordenadas personales.*
- b) *Obtener el programa de control numérico para el maquinado. Una vez generado el dibujo de una pieza en particular, se exporta el dibujo al software que genera el programa de control numérico. Este software es uno especial para esta tarea y también se encuentra en el laboratorio de robótica de la Universidad. Se carga el dibujo en el programa, la siguiente etapa es seleccionar la capa que se ha de maquinar, el tercer paso es seleccionar el proceso de maquinado que se desea realizar y por último se deben seleccionar, el tamaño de la herramienta, la velocidad de corte, la profundidad del corte, y la cantidad de material que se desea remover. Una vez cumplido lo anterior se puede ya generar el programa de control numérico.*
- c) *Ejecutar el programa de control numérico en el software específico de la máquina. Una vez que se generó el programa de C.N., este se debe ejecutar en un software específico, según la máquina que se utilice.*

Para la fabricación de todas y cada una de las piezas, utilizamos la fresa modelo TMC-1000 de Light Machines Corp. Antes de ejecutar el programa, se debe de fijar el origen de la máquina, que debe estar en el mismo punto que corresponde al origen del dibujo en AutoCad. El proceso de fijación del origen, es manual y debe de hacerse cada vez se maquine una pieza.

La mayoría de las piezas requirieron tanto de procesos de fresado como de taladrado. Cabe señalar que antes de los procesos de maquinado, fue necesario cortar cada una de las piezas a su tamaño, ya que el aluminio no se compró en los tamaños que se necesitaban. El proceso de corte se realizó en la sierra mecánica del laboratorio y en muchos de los casos fue necesario nivelar y carear utilizando el cepillo.

Una vez maquinadas las piezas, muchas de ellas pasaron por otro proceso, el machueleado, ya que se decidió que los tornillos para fijar las piezas, deberían estar sujetos con roscas internas y no con tuercas. Todos los tornillos que se utilizaron fueron tornillos Allen de 3/16" y 1/2" de largo. El machueleado se realizó todo manualmente y debido a lo suave que es el aluminio la tarea era difícil. En mas de una ocasión se nos rompieron machuelos dentro de las piezas, lo que hacía necesario repetir toda la pieza de nuevo.

Con lo anterior queda descrito en general el proceso del diseño y la fabricación de cada una de las piezas. También queda claro que para la construcción, se hizo un despiezado preciso del prototipo.

Para la selección de muchos de los perfiles, sobre todo de las guías y apoyos, calculamos el tamaño necesario de estos perfiles para que pudieran soportar las cargas que nosotros decidimos, porque en realidad no existía una especificación clara al respecto de qué tanto debía cargar la estructura, en otras palabras, nadie nos dijo que diseñáramos para que la estructura, y por lo tanto el prototipo, pudieran manejar un determinado peso. Para el cálculo, utilizamos el criterio del cálculo de vigas. A continuación, las fórmulas y los procesos utilizados para realizar el cálculo de los diámetros de las guías y un ejemplo de este proceso.

En el cálculo de las vigas, sabíamos de antemano las dimensiones de los elementos que se decidió utilizar como vigas de soporte. Como ejemplo utilizaremos los dos pares de tubos que sostienen todo el conjunto de los tres ejes, estos son de sección transversal uniforme y las consideramos con carga concentrada. Se puede ver en el prototipo, que ahora se encuentra en el laboratorio de la Universidad, que la "viga" se encuentra apoyada en sus extremos y la carga se encuentra en el centro. La longitud total de las vigas es de 76.5 cm y supusimos que en este punto se pudieran cargar un mínimo de 50 kilos. La fórmula que utilizamos es la siguiente:

$$f = \frac{FL^3}{48EI}$$

donde:

- f = Deflexión Máxima
- F = Fuerza en Carga Concentrada
- E = Coeficiente de Elasticidad

I = Momento de Inercia del Area transversal (Corona)

el proceso de cálculo fue el siguiente:

El momento de Inercia:

$$I = \frac{3.1415 (D^4 - d^4)}{64}$$

En este momento es importante señalar dos cosas: Decidimos utilizar tubo en vez de barra circular, porque buscábamos obtener la mayor resistencia posible, con el menor peso. El segundo punto que consideramos fue las opciones que existen en el mercado, con respecto a los Diámetros de los tubos de Aluminio. De las diversas opciones en las dimensiones, decidimos quedarnos con dos, las mas lógicas a nuestro juicio. Para justificar el cálculo de este ejemplo, a continuación esta una tabla con los datos para las dos opciones.

	Tubo de 3/8" D.I y P.G	Tubo de 3/4" D.I y P.G.
F (Newtons)	490.5 N	490.5 N
E (GPascales)	71.0 GPa	71.0 GPa
I	6.0606 x10 ⁻⁹ m ⁴	2.624 x 10 ⁻⁸ m ⁴
L (metros)	.755	.755
f (cm)	1.022	.23

* D.I. = Diámetro Interior

P.G. = Pared Gruesa (3/16")

* Los Diámetros se convirtieron a metros.

Dados los resultados de la deflexión máxima, la selección era obvia, decidimos utilizar el tubo de 3/4 de Diámetro Interior y Pared Gruesa. La razón por la que utilizamos dos de estos en cada lado, fue que quisimos bajar aún mas la deflexión y para darle mayor rigidez al conjunto de la estructura.

Todas las demás guías fueron calculadas de la misma manera y las decisiones tomadas en base a estos cálculos.

Debe quedar claro que los 50 kilos de base de cálculo, no son el verdadero límite del prototipo tal como quedó, pues existen tres limitantes: las guías superiores ya se encuentran cargando material, segundo, se debe de aplicar un cierto factor de seguridad, es decir, no llegar a los 50 kilos exactos y el tercer factor es que las pinzas, no están diseñadas para cargar más de 3 kilos.

Aún con las limitantes anteriores, si el actuador final fuera sustituido por uno más pesado, para otra operación o si fuera cambiado por uno que pudiera manejar mayores cargas, entonces la estructura principal del robot y el movimiento de los tres ejes, podrían seguir funcionando de manera adecuada y sin tener ningún riesgo por falla en la estructura.

D. El Actuador Final.

Con el dibujo preliminar, obtenido en AutoCad el siguiente paso fue obtener los perfiles de aluminio que de hecho ibamos a utilizar en la construcción de cada una de las secciones. Fue en este punto donde se dividió al prototipo en secciones; la primera sección fue el actuador final o "mano".

Existen dos prioridades en el diseño del actuador final, la primera es que este debe de ser compacto y la segunda, que debe ser ligero, pues este se encuentra conectado directamente al actuador de giro neumático, que soporta la carga de manera axial.

El hecho de que el actuador de giro soporte la carga de manera axial, es lo que hace que el peso de las pinzas sea crítico, ya que este actuador carga axialmente máximo 30N. La meta era, entonces, lograr el máximo posible de carga libre, es decir, que las pinzas tuvieran la máxima capacidad de carga posible, sin llegar al límite del actuador de giro.

Como ya se mencionó, todo el prototipo, se encuentra construido de aluminio. Y mas adelante mencionaremos cada uno de los perfiles que se habrán de utilizar de una manera muy descriptiva.

A lo largo del desarrollo del proyecto, existieron varios diseños preliminares de cada una de las secciones. Algunas de estas secciones o módulos sufrieron modificaciones importantes.

Para mucha de la gente que se enteró del proyecto y que iba observando los avances, la pregunta era, ¿ Porqué no sólo neumático o sólo eléctrico ? La respuesta es muy simple. Como ya se dijo a través de esta tesis, los dispositivos que se utilicen, se seleccionan en base a las necesidades, y en este caso no se requería que se controlara de manera precisa el movimiento de las pinzas y es por esto que se decidió que el accionamiento de las pinzas podía ser neumático.

Es muy importante señalar que el objetivo real del proyecto es conseguir el movimiento en los tres ejes y lograr controlarlo por medio de la computadora, la construcción de este actuador final, es simplemente para demostrar una de las posibles aplicaciones del robot; el actuador final no constituye en sí una parte del proyecto, pues la meta es, que se puedan adaptar mas tipos de actuadores finales.

E. Las Secciones de Movimiento en los Tres Ejes

El movimiento vertical fue el primero que diseñamos y el primero que construimos de los tres movimientos. En este punto empezamos a aplicar una función del AutoCad, la fusión de diversos dibujos.

Antes de iniciar la construcción de las secciones, se terminó con el diseño de cada una de ellas y el dibujo de las mismas en AutoCad. Esto nos permitió unir todas las secciones o "fusionarlas" en un solo dibujo. Las ventajas de esta función son muy claras, pues nos permitió observar que todo encajara de manera adecuada y, como los dibujos estaban dimensionados al tamaño real, pues pudimos también ver las dimensiones reales de todo el prototipo ya armado en su totalidad. El resultado físico es prácticamente igual al que diseñamos en AutoCad, pues al momento de realizar los dibujos ya sabíamos que materiales utilizaríamos.

Una vez que ya conocíamos las clases de perfiles que habríamos de utilizar , pudimos obtener el peso de cada una de las secciones, utilizando

simplemente la densidad del aluminio que es 2.71 g/cm^3 . Con este procedimiento se obtuvo el peso de cada una de las secciones y este peso es prácticamente el peso real, pues la variación porcentual del peso del aluminio por cálculos y el real, es muy pequeña. Para comprobar lo anterior, está la tabla de la página siguiente, que permite observar la variación entre el cálculo y la realidad del peso de cada uno de los perfiles que se utilizaron.

Para describir cada una de las secciones, lo mas descriptivo es presentar las tablas que obtuvimos para el desglose de materiales, junto con los dibujos, tanto isométricos como vistas, de cada una de las secciones.

SECCION VERTICAL

<u>Tipo</u>	<u>Longitud(cm)</u>	<u>Area Transv.(cm²)</u>	<u>Volumen(cm³)</u>	<u>Peso(gr)</u>
Placa 1 1/2 x 1/4	133	2.42	321.86	872.24
Placa 1 x 1/4	173	1.61	278.83	754.81
Placa 1 1/2 x 1/2	90	4.83	434.71	1178.03
Placa 1 x 1/2	11	3.22	35.42	95.98
Placa 2 x 1/2	11	6.45	70.96	192.30
Tubo 3/4	87	1.58	37.76	373.33
Barra Cuad. 3/4	6	3.62	21.77	59.00
Placa 2 1/2 x 1/2	24	8.06	193.53	<u>524.48</u>
			Peso Total:	4050.17

LISTA COMPARATIVA DE ALUMINIO				ROBOT GRUA				UNIVERSIDAD PANAMERICANA			
TIPO	LONG.	AREA	VOL.	PESO (ANALISIS)	PESO(REAL)	COSTO(ANAL)	COSTO				
Placa 1.5x.25	57	2.42 cm ²	137.94	373.8174	420.00	6.75	7.57				
Placa 1x.25	108	1.61	173.88	471.21	380.00	8.50	6.85				
Placa 1.5x.5	120	4.83	579.6	1570.716	1620.00	28.30	29.19				
Placa 1x.5	145	3.22	466.9	1265.39	1260.00	22.80	22.71				
Placa 2x.5	115	6.4516	741.934	2010.6411	2060.00	36.23	37.12				
Placa 2.5x.5	140	8.064	1128.96	3059.481	3020.00	55.13	54.42				
Placa 3x.5	25	9.6774	241.935	655.64	660.00	11.81	11.89				
Placa 2x.25	32	3.225	103.2	279.672	300.00	5.03	5.41				
Placa 3/8 x 1	164	2.4193	396.77	1075.25	1100.00	19.37	19.82				
Placa .5x.25	28	.80645	22.5806	61.1934	62.00	1.10	1.11				
Plac. Cuad. 3/4	10	3.6290	36.29	98.34	200.00	1.77	3.60				
Plac. Cuad 1/2	55	1.6129	88.7095	240.402	240.00	4.32	4.32				
Tubo 7/8 P.G.	259	.4049	104.8691	284.1952	370.00	5.41	7.03				
Tubo 1 P.G.	492	.4786	235.4712	638.12	750.00	12.17	14.26				
T. Cuad. 1.5	480	2.3185	1112.88	3015.90	2740.00	54.34	49.37				
Angulo 1.25	328	2.016	661.248	1791.98	1680.00	32.29	30.27				
Total:			16891.94	16862.00	305.32	304.94					

% de Diferencia Acumulada entre Peso Analizado y el Real = .17%

% de Diferencia Acumulada entre Costo Analizado y el Real = .12%

SECCION HORIZONTAL 1

<u>Tipo</u>	<u>Longitud(cm)</u>	<u>Area Transv.(cm²)</u>	<u>Volumen(cm³)</u>	<u>Peso(gr)</u>
Tubo 1" P.G.	157.48	2.21	349.10	946.08
Placa 2 1/2 x 1/2	38.41	8.06	309.81	839.59
Placa 2 x 1/2	96.52	6.45	622.70	1687.53
Placa 3 x 1/2	23.17	9.67	224.29	607.83
Placa 2 x 1/4	30.48	3.22	98.32	<u>206.44</u>
			Peso Total:	4347.52

SECCION HORIZONTAL 2 Y GUÍAS GENERALES

<u>Tipo</u>	<u>Longitud(cm)</u>	<u>Area Transv.(cm²)</u>	<u>Volumen(cm³)</u>	<u>Peso(gr)</u>
Tubo 1" P.G.	314.96	2.21	698.20	1892.13
Tubo 1/2 P.G.	157.48	.95	149.61	405.46
Placa 2 1/2 x 1/2	67.31	8.06	542.82	1471.04
Placa 1 x 1/2	40.64	3.22	131.09	355.27
Placa 1 1/2 x 1/2	78.74	4.83	381.00	1032.50
Placa 3/4 x 3/8	157.48	1.81	285.74	774.38
Placa 1 x 1/2	96.52	3.22	311.35	<u>843.76</u>
			Peso Total	6313.77

ESTRUCTURA GENERAL

<u>Tipo</u>	<u>Longitud(cm)</u>	<u>Area Transv.(cm²)</u>	<u>Volumen(cm³)</u>	<u>Peso(gr)</u>
T. Cuad. 1 1/2 x 1/16	467.36	2.31	1083.59	2936.54
Angulo 1 1/4	314.96	2.01	634.99	<u>1720.84</u>
			Peso Total	4657.38

Las tablas anteriores despliegan todos los materiales que se utilizaron para la construcción básica del prototipo y los pesos aproximados para cada una de las secciones. De este modo, se obtiene el resultado de que el cálculo final del prototipo, ya armado, es de aproximadamente 20 kilos.

En el apéndice A de esta tesis, se presentan todos los dibujos dimensionados y de ensamble del prototipo. Todos estos dibujos fueron realizados utilizando AutoCad versión 12.

Lo único que falta explicar es la transmisión del movimiento. Para lograr que hubiera movimiento, se utilizaron tornillos sin fin de tres entradas y media pulgada de diámetro. Hubo una gran dificultad para conseguir quien maquinara estos tornillos, pues requieren de una herramienta especial, tanto para el maquinado de los mismos tornillos como para el de las tuercas. Un dato curioso es que, los sin fin, fueron lo mas caro de todo lo que se compró ya hecho.

Con lo anterior, quedan ya descritos los temas del diseño, cálculo y construcción del prototipo en su forma mecánica. Sólo resta mencionar que el maquinado, armado y ajuste del robot, tomaron un tiempo aproximado de 2 meses y medio en total y aclarar que es sólo un prototipo; nosotros mismos encontramos puntos que, si el modelo se fuera a producir, podríamos eliminar o mejorar. Aún con el detalle anterior, el prototipo cumple y pasa las expectativas y los objetivos que se establecieron cuando se inició con el diseño. Las primeras pruebas demuestran que se cumple con el adecuado movimiento en los tres ejes. Pero las mejores pruebas son las que otras personas con inquietudes puedan llevar a cado.

VII. EI SOFTWARE CONTROLADOR

A. Introducción

La mayoría de las veces, cuando se decide controlar un sistema o mecanismo, por medio de una computadora, se diseña al mismo tiempo un software o programa que se encarga del control y permite manipular o dirigir el sistema. Como ya se mencionó en el capítulo en el que hablamos sobre la tarjeta, se puede decidir que la tarjeta haga la mayoría de las operaciones o que el programa se encargue de la mayor parte de las funciones.

El programa que se escribió para el control del robot, consiste básicamente de dos secciones, una que se encarga del control manual del robot y la segunda que se encarga del funcionamiento del robot, mediante un programa controlador del mismo.

Cabe aclarar de nuevo, que el programa cumple la función de controlar el robot y la de reducir al máximo la complejidad de la tarjeta controladora.

B. Descripción del Lenguaje

En el transcurso de los años, las computadoras se han ido haciendo mas pequeñas, baratas y confiables. En la actualidad, pequeñas computadoras portátiles son capaces de desarrollar complejos cálculos y diversas tareas. Pero éstas no funcionan por sí solas, necesitan de un programa que les diga

qué hacer y este programa se hace o escribe en un lenguaje especial para el uso en las computadoras. El lenguaje elegido para realizar el programa fué el Quick Basic, que no es mas que una variación del Basic. Las razones para elegir este lenguaje de programación son:

- Es un lenguaje de programación muy conocido
- Permite controlar el puerto paralelo, sin necesidad de escribir sub-rutinas en lenguaje ensamblador.
- Tiene un ambiente gráfico sencillo y fácil de manejar.

El lenguaje Basic fue desarrollado a mediados de la década de los años sesenta, en Dartmouth College, New Hampshire, bajo la dirección de los profesores John Kemeny y Thomas Kurtz. Se concibió para que fuera muy sencillo de aprender y que fuera sencillo y económico ponerlo en práctica. Se escribió de modo que muchos usuarios diferentes pudieran servirse de una sola minicomputadora para fines de aprendizaje. Por consiguiente se concibió como un lenguaje interactivo; es decir, un lenguaje en el que el usuario obtenga una respuesta inmediata a lo que se introduce por el teclado de la computadora, es decir, que no fuera necesario compilar, para lograr la ejecución de un programa. En su forma ampliada, ha resultado ser de utilización importante para usuarios que no son principiantes. En la actualidad se utiliza no solamente para fines de entretenimiento, sin también para actividades comerciales e industriales.

C. Características del Programa de Control

El objetivo de programar dentro del proyecto, no es en sí realizar un programa perfecto en todos sus aspectos, sino el de probar, que por medio de una programación adecuada, se puede lograr acceder al puerto paralelo y por lo tanto poder controlar al robot. Las características principales del programa son:

- ***Fácil Instalación.*** El programa puede funcionar en cualquier computadora PC compatible que tenga un puerto paralelo funcionando de manera adecuada. El usuario no necesita preocuparse mas que de conectar la tarjeta a la computadora, como si la primera fuera una impresora.
- ***Dos Versiones.*** Se tienen dos versiones, básicamente iguales en su funcionamiento. La única diferencia entre ellas es que una es para las computadoras de escritorio y la otra para las portátiles.
- ***Despliegue Gráfico.*** Se decidió que lo mas adecuado era presentar el movimiento del robot en la pantalla de la computadora. Esto se hizo simplemente dibujando las funciones del robot en la pantalla y simulando el movimiento al mismo tiempo en que esta ocurriendo.
- ***Fácilmente Modificable.*** Como ya se mencionó, lo único indispensable del programa es que se pueda comunicar con el puerto paralelo de la computadora.

D. La Programación del Puerto Paralelo

Como ya se dijo, en BASIC, llegar al puerto paralelo es sumamente sencillo.

Sólo se deben cumplir con dos pasos:

1.- Conocer el direccionamiento del puerto paralelo de la computadora que se ha de utilizar.

2.- Utilizar la orden Out para poder llegar al puerto paralelo, y "encenderlo" con el direccionamiento que se necesite.

El orden de los pines o conectores en la computadora, ya lo tratamos en el capítulo de la tarjeta controladora. De modo que, lo único que se tiene que hacer, es programar los datos, para que en el momento adecuado se mande la señal que se necesita. El proceso de mandar esta señal consiste simplemente en habilitar voltajes con un patrón predeterminado.

Un ejemplo puede ser el siguiente: Supongamos que requerimos que el motor de la sección vertical se active. Lo único que necesitamos hacer es activar el motor número 1, que corresponde al pin 2 de la computadora, o sea, el bit 0 de control. La orden para lograr esto sería:

```
OUTP (&H378),1
```

que le dice a la computadora que active el puerto paralelo que se encuentra en la dirección H378, mandándole encender solamente el pin 2, que corresponde a un 1 decimal.

De igual forma se pueden encender varios de los pines o salidas de la computadora, para lograr controlar mas de un dispositivo. Para el control del robot esto es indispensable, pues además del motor que deseamos encender, necesitamos controlar los pulsos y el sentido del movimiento. El pin que se encarga de los pulsos es el 5, que corresponde al bit 3 de la computadora, mientras que el pin del sentido es el 6, que corresponde al bit 4 de la computadora. La orden para cumplir con esto sería:

OUTP (&H378),25
que corresponde a:
1 1 0 0 1

el número binario anterior, como esta en la orden de salida, corresponde al número 25 decimal. Se conoce que en el sistema binario, la ponderación es de derecha a izquierda, es decir, el número de la izquierda tiene un valor mayor, comparado con el de la derecha. Por lo tanto el número de la derecha equivale al bit 0 de la computadora y el de la extrema izquierda al bit 4. Como se puede observar, los bits activados son el 0, el 3 y el 4. Esto, deja ya claro, el razonamiento de la programación del software.

Además, el programa tiene rutinas de control y muchas rutinas de dibujo. Pero las mismas no son tema del proyecto, pues mas bien, están encaminadas a perfeccionar un poco el programa. Para terminar con este capítulo, cabe decir que en los apéndices B de este trabajo, se encuentra el listado de la primera versión del programa.

CONCLUSIONES

La primera idea que surgió del proyecto era simplemente un sistema neumático, de movimiento de punto a punto, sin ningún elemento eléctrico. El prototipo final es un robot de coordenadas cartesianas, capaz de detenerse en cualquier punto dentro de un volumen de trabajo respetablemente amplio. Este robot es, realmente, mucho más capaz de probar ciertos puntos de la robótica, que el primer proyecto nunca hubiera probado.

Después de diversos errores y aciertos, como la mala selección de los motores, diversos cambios en el diseño del circuito controlador, un puerto paralelo quemado en pruebas, muchas horas de trabajo y de angustias, obtuvimos como resultado un prototipo, que tanto a mi asesor, como a mi, nos lleno de mucho orgullo. Nos dimos cuenta de que el campo de la robótica es sólo un campo más, no un tema imposible de entender; en este punto es similar a como se veían las computadoras hace algunos años.

La decisión de utilizar los motores a pasos, la impulsó mi asesor de tesis. Su sugerencia llamó mi atención, dado que, un robot, debe de tener movimientos controlados, y no sólo movimientos locos de punto a punto. En otras palabras, se trataba de construir un verdadero robot y no sólo un sistema automático.

Los motores a pasos plantearon el problema de como manejarlos, ninguno de los dos conocíamos nada al respecto del control de los mismos. La solución fue apareciendo a base de investigación y de mucho preguntar. En el momento en el que recibimos los motores a pasos, nos tomo casi una semana completa,

de trabajo continuo, el lograr arrancarlos, pero en el momento en el que los vimos funcionar, también nos dimos cuenta de que el proyecto era posible. Fue en este punto, donde realmente, tuvimos mayor confianza sobre el éxito del proyecto.

El circuito controlador fue, también, un punto muy importante del proyecto. Tuvimos algunos problemas con el hecho de que los primeros transistores que utilizamos, se calentaban demasiado y unos disipadores de calor, pues serían un elemento costoso y algo estorboso. La decisión fue cambiar los transistores, de unos TIP120 a unos TIP100, esto fue un acierto, pues se redujo en gran cantidad el calentamiento de los transistores, por el aumento en la disipación del calor. Además, le sumamos al sistema un ventilador, que se encarga de enfriar a los transistores.

Se desechó la idea de tener una tarjeta de múltiples salidas y, en su lugar, rediseñamos el control de los motores, con el objeto de reducir las salidas al mínimo. Esto se logró y de hecho obtuvimos una reducción hasta 7 salidas, lo que deja una libre para activar algún otro dispositivo. La tarjeta en conjunto es realmente económica y todos sus componentes son fáciles de conseguir y muy comerciales. Es decir, la tarjeta controladora, cumple la función que realizaría un controlador de 150 dls., a un costo de 100 Nuevos Pesos.

El circuito y el programa, son el resultado de varios meses de investigación, trabajo y de muchas pruebas. Nos dimos cuenta de que muchas de las especificaciones, van cambiando en el transcurso de la realización del proyecto, pero la fortuna es haber tenido la oportunidad de experimentarlo, es

decir, tuve la oportunidad de ver terminado el proyecto y no sólo platiqué y escribí sobre el mismo. En muchos sentidos es como me ha dicho mas de una persona, es un hijo. De uno modo u otro las especificaciones tienden a cambiar, ya sea para resolver dificultades o para mejorar los detalles. Es un hecho que, los objetivos que planteamos al principio, se vieron sumamente enriquecidos al final.

Muchos diseños terminan en un fracaso por necesidad y esto también pudimos comprobarlo, gracias a Dios, sin necesidad de experimentarlo. En mas de una ocasión, tuvimos que cambiar el diseño cuando ya habíamos construido o armado alguna de las partes del proyecto, porque se probó que de ese modo nunca iba a funcionar. Claro que en un momento dado, era difícil decidir desechar algo en lo que habíamos trabajado mucho, pero hubiera sido peor continuar con algo que era evidentemente erróneo.

De cualquier manera, el proyecto tiene puntos que se pueden mejorar, pero al fin y al cabo, es un prototipo, es decir, una primera versión, de algo, que puede tener mejoras.

Después de muchas angustias y alegrías, aquello, sobre lo que comenzamos a pensar en Octubre de 1993, lo vimos terminado en Agosto de 1994. Los primeros objetivos se cumplieron muy exitosamente, pero en realidad, logramos superarlos y lo que en muchos momentos causó, que se nos tachara hasta de locos, es ahora toda una realidad en movimiento. Falta ahora, que otros alumnos de ingeniería, se pregunten ellos mismos, qué puedo mejorar de

esto, qué puedo añadirle, qué puedo aprender del esfuerzo de quienes lo construyeron.

El robot, la tarjeta y el programa, están en la Universidad. Son resultado de mucho esfuerzo, sudor y sacrificios, como todo proyecto de interés. En tono personal cumplí con mis "caprichos", sobre los que hablé en el transcurso de este escrito, pero para mi, lo mas importante fue que diseñé, aprendí y construí, como resultado; *me sentí ingeniero.*

BIBLIOGRAFIA

1. ASFAHL C, Ray. "Robots and Manufacturing Automation". Estados Unidos. Ed. John Wiley & Sons, Inc.,1992, pp 24-50,108-118, 130-160.
2. CRAIG, John J. "Introduction to Robotics". Estados Unidos, Ed. Addison Wesley, 1989, pp 1-16.
3. EGGBRECHT, Lewis C. "Interfacing to the IBM Personal Computer", Estados Unidos, Ed. Howard W. Sams & Co., 1992, pp 47-67, 212-229.
4. GROOVER, Mikell P.,WEISS, Mitchell,NAGEL, Roger N,ODREY Nicholas G. "Robotica Industrial", México, Ed. MC Graw Hill, 1990, pp 3-19, 21-47.
5. JACOBUS Dávalos, Roberto, GALVEZ Hernandezvela, Alejandro J., "Diseño y Construcción de un Sistema de Adquisición de Señales y Control de Dispositivos", México, Universidad Panamericana, 1989, pp 3-8, 28-37.

6. MCCOMB, Gordon., "The Robot Builder's Bonanza: 99 Inexpensive Robotics Projects", Estados Unidos, Ed. MC Graw Hill, 1990, pp 111-125, 276-284.

7. OGATA, Katsunhiko, "Ingeniería de Control Moderna", Estados Unidos, Ed. Prentice Hall, 1993, 1020 p.3

8. SCHILLING, Donald L., BELOVE, Charles, "Circuitos Electrónicos, Discretos e Integrados", México, Ed. Mc Graw Hill, 1991. 794 p.47.

9. TOCCI, Ronald J., "Sistemas Digitales, Principios y Aplicaciones", México, Ed. Prentice Hall, 1993, pp 123-128, 138-145, 394-423.

10. WEBB, John W., "Programable Logic Controllers", Estados Unidos, Ed. Maxwell Macmillan, 1992, p.4.

APENDICE A
DIBUJOS TECNICOS

REVISIONES

APROBADO

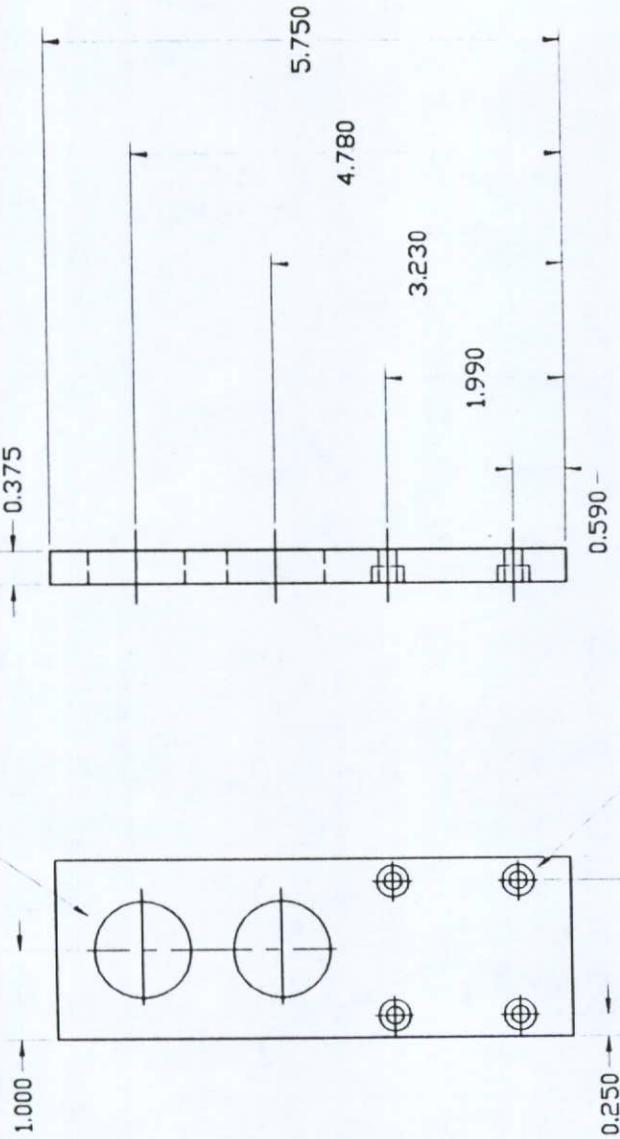
FECHA

DESCRIPCION

REV

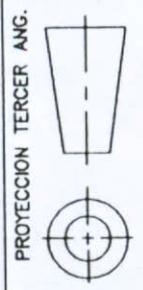
ZONA

Ø 1.08 2 LUGARES



BARREND PASADO Y CAJA PARA
TORNILLO ALLEN # 10-32 4 LUGARES

PIEZA	CANT. REQU.	PORTE NUMERO	DESCRIPCION	MATERIAL	NOTAS
4			LISTA DE MATERIALES	ALUMINIO	
A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE TODA DIMENSION ES EN PULGADAS NO ES DIBUJO A ESCALA CORTAR TODAS LAS ESQUINAS Y BORDES		CUENTE O PROYECTO		LABORATORIO DE ROBOTICA UNIVERSIDAD PANAMERICANA GUADALAJARA GUADALAJARA JALISCO MEXICO	
TOLERANCIAS		PREPARADO	FECHA	TITULO	
.X ± 0.30		CHECADO	FECHA		
.XX ± 0.10		APROBADO	FECHA	TAM	DIBUJO NO
.XXX ± 0.05					REV
ANGULAR ± 0°-30'				SCALA	HOJA DE
TERMINADO 100 P.V.					



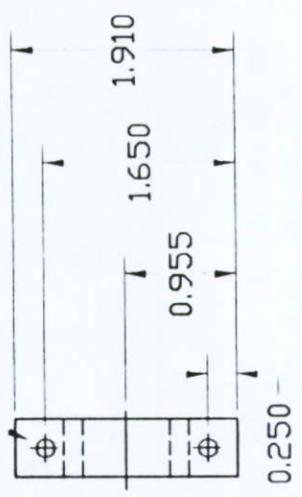
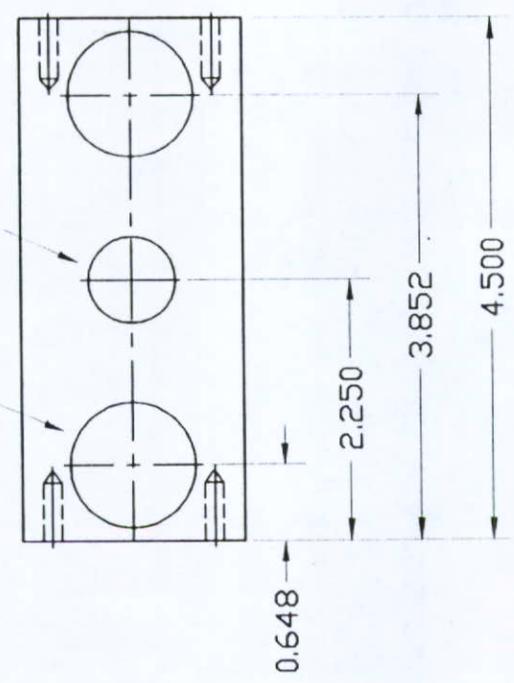
REVISIONES

ZONA	REV	DESCRIPCION	FECHA	APROBADO
------	-----	-------------	-------	----------

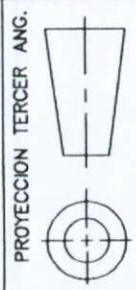
Ø 1.08 2 LUGARES

Ø 0.75

MACHUELO #10-32 x .5 PROF.
4 LUGARES



PIEZA	CANT. REQU.	PARTE NUMERO	DESCRIPCION	MATERIAL	NOTAS
1			LISTA DE MATERIALES	ALUMINIO	
A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE TODA DIMENSION ES EN PULGADAS NO ES DIBUJO A ESCALA CORTAR TODAS LAS ESQUINAS Y BORDES		CLIENTE O PROYECTO UNIVERSIDAD PANAMERICANA	LABORATORIO DE ROBOTICA UNIVERSIDAD PANAMERICANA GUADALAJARA GUADALAJARA JALISCO MEXICO		
TOLERANCIAS .X ± .030 .XX ± .010 .XXX ± .005 ANGULAR ± 0°-30° TERMINADO ± .05 RMS		PREPARADO: ER. SPADA FECHADO: ER. SPADA APPROBADO: ER. SPADA FECHA:	TITULO SOPORTE EJE SUPERIOR (GUAS)		
PROYECCION TERCER ANG.		TAM 1:1		DIBUJO NO. 20001-3	
		ESCALA 1:1	HOJA DE 1	REV No.	



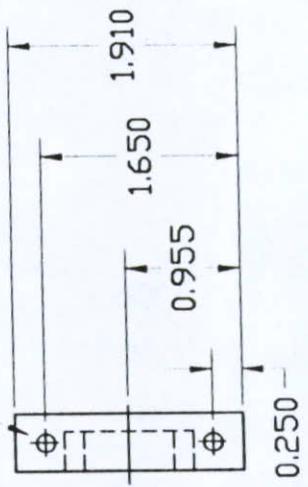
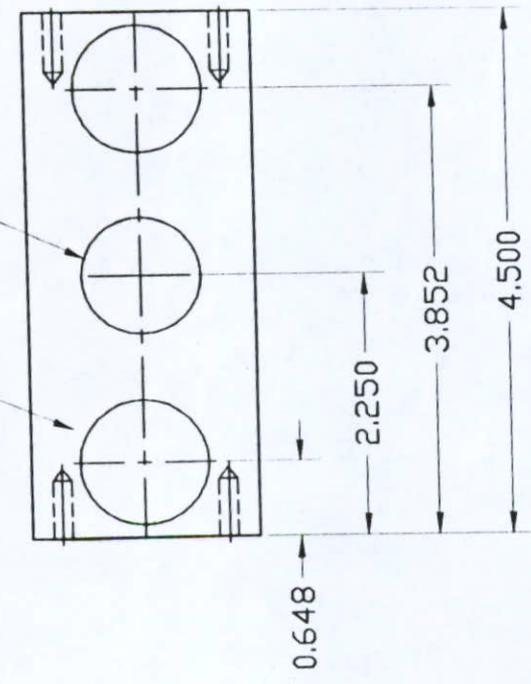
REVISIONES

ZONA	REV	FECHA	APPROBADO

∅ 1.04 x .35 DP
2 PLACES

∅ 1.000 x .35 DP

MACHUELO #10-32 x .5 PROF.
4 LUGARES



PIEZA	CANT. REQU.	PARTE NUMERO	DESCRIPCION	MATERIAL	NOTAS
1			LISTA DE MATERIALES	ALUMINIO	
A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE TODA DIMENSION ES EN PULGADAS NO ES DIBUJO A ESCALA CORTAR TODAS LAS ESQUINAS Y BORDES		CUENTE O PROYECTO UNIVERSIDAD PANAMERICANA	LABORATORIO DE ROBOTICA UNIVERSIDAD PANAMERICANA GUADALAJARA GUADALAJARA JALISCO MEXICO		
TOLERANCIAS .X ± .030 .XX ± .010 .XXX ± .005 ANGULAR ± 0°-30° TERMINADO 125 RVE		PREPARADO: EF SPADA	FECHA: AÑO 1994	TITULO SOPORTE EJE SUPERIOR (GUIAS) (LETRAS)	
PROYECCION TERCER ANG.		CHECADO	FECHA	REV N/C	
		APPROBADO	FECHA	DIBUJO NO. 200000-2	DE 1
				SCALA: N.C./N.A.	HOJA 1 DE 1

REVISIONES

FECHA

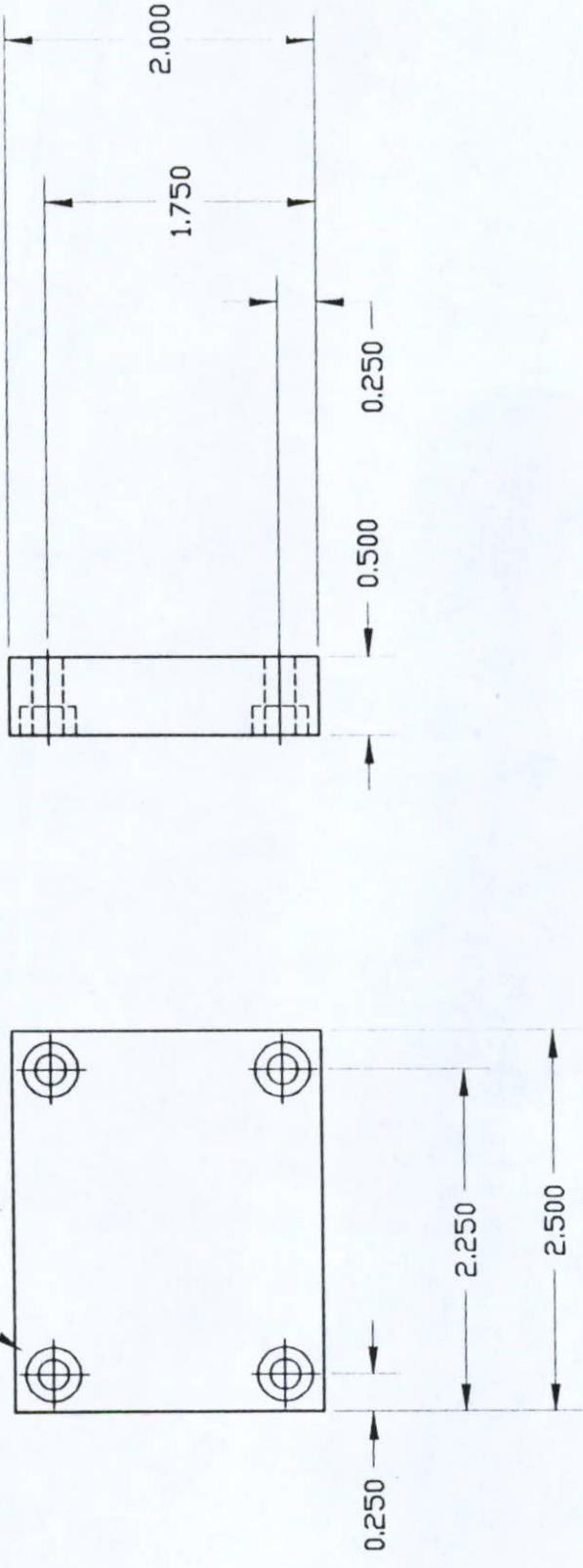
DESCRIPCION

REV

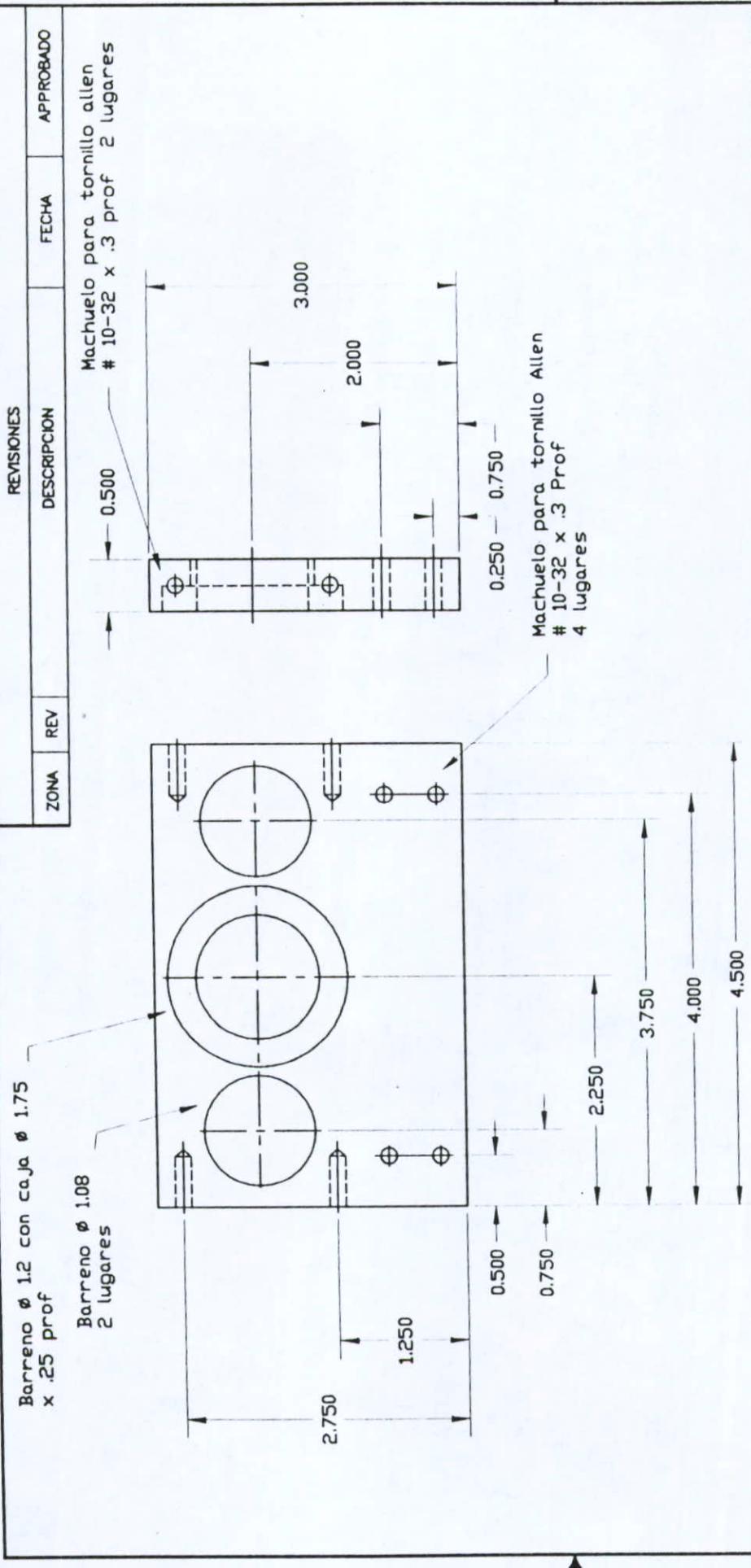
ZONA

APPROBADO

BARREND Y CAJA PARA
TORNILLO ALLEN # 10-32
4 LUGARES



PIEZA	CANT. REQU.	PARTE NUMERO	DESCRIPCION	MATERIAL	NOTAS
2			LISTA DE MATERIALES	ALUMINIO	
A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE TODA DIMENSION ES EN PULGADAS NO ES DIBUJO A ESCALA CORTAR TODAS LAS ESQUINAS Y BORDES		CLIENTE O PROYECTO UNIVERSIDAD PANAMERICANA	LABORATORIO DE ROBOTICA UNIVERSIDAD PANAMERICANA GUADALAJARA GUADALAJARA JALISCO MEXICO		
TOLERANCIAS .X ± .030 .XX ± .010 .XXX ± .005 ANGULAR ± 0°-30' TERMINADO ±.25 P.M.S		PREPARADOR: ER SPADA FECHA: MAYO 1994	TITULO UNION DE EJE HORIZONTAL CON VERTICAL.		
PROYECCION TERCER ANG.		CHECADO FECHA	TAM A	DIBUJO NO RCB002-2	REV N/C
		APPROBADO FECHA	ESCALA NINGUNA	HOJA DE 1	



PIEZA	CANT. REQU.	PARTE NUMERO	DESCRIPCION	MATERIAL	NOTAS
LISTA DE MATERIALES					
A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE TODA DIMENSION ES EN PULGADAS NO ES DIBUJO A ESCALA CORTAR TODAS LAS ESQUINAS Y BORDES		CLIENTE O PROYECTO UNIVERSIDAD PANAMERICANA		LABORATORIO DE ROBOTICA UNIVERSIDAD PANAMERICANA GUADALAJARA GUADALAJARA JALISCO MEXICO	
TOLERANCIAS .X \pm .020 .XX \pm .010 .XXX \pm .005 ANGULAR \pm 10'-30" TERMINADO		PREPARADO EF. SPADA	FECHA MAYO 1994	TITULO UNION DE EJE HORIZONTAL CON ESTERA	
PROTECCION TERCER ANG.		CHECADO	FECHA	TAM A	REV 1/0
		APPROBADO	FECHA	DIBUJO NO	DE
				SCALA 1/1	HOJA DE

REVISIONES

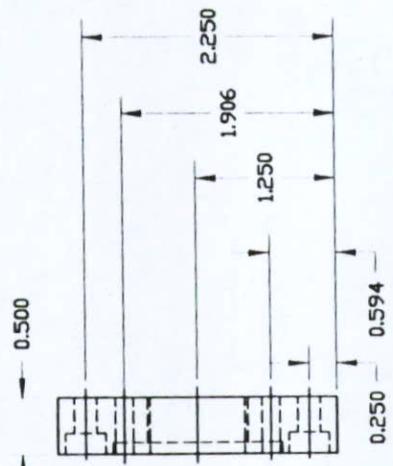
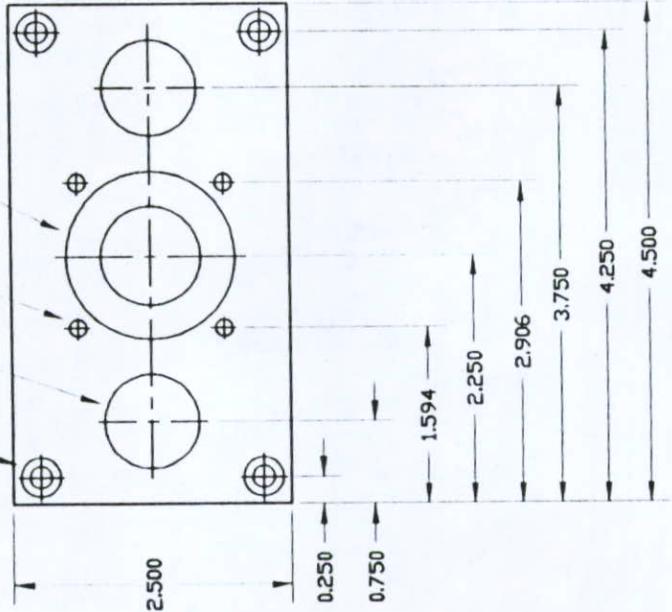
ZONA	REV	DESCRIPCION	FECHA	APPROBADO

BARREND Y CAJA PARA TORNILLO
ALLEN # 10-32
4 LUGARES

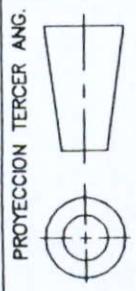
Ø 0.850 2 LUGARES

MACHUELO PARA TORNILLO
ALLEN # 10-32 4 LUGARES

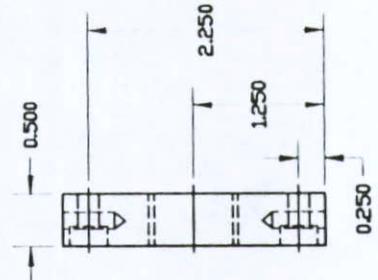
BARREND Ø 9 CON
CAJA Ø 1.515 x J PROF



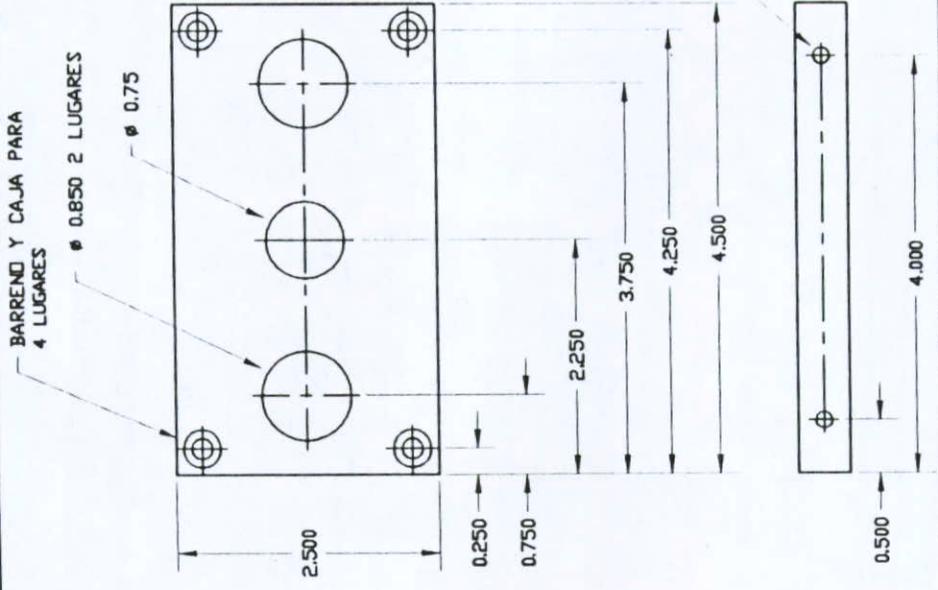
PIEZA	CANT. REQU.	PARTE NUMERO	DESCRIPCION	MATERIAL	NOTAS
LISTA DE MATERIALES					
A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE TODA DIMENSION ES EN PULGADAS NO ES DIBUJO A ESCALA CORTAR TODAS LAS ESQUINAS Y BORDES			CLIENTE O PROYECTO UNIVERSIDAD PANAMERICANA	LABORATORIO DE ROBOTICA UNIVERSIDAD PANAMERICANA GUADALAJARA GUADALAJARA, JALISCO MEXICO	
TOLERANCIAS .X ± 0.30 .XX ± 0.10 .XXX ± 0.05 ANGULAR ± 0°-30' TERMINADO 125 RMS			PREPARADO: EP SPADA	TITULO SOPORTE MOTOR EJE VERTICAL	
PROYECCION TERCER ANG.			CHECADO	DIBUJO NO	
			APPROBADO	ROB0003-2	
			FECHA	SCALA	HOJA DE
			FECHA	NINGUNA	



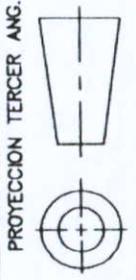
REVISIONES		DESCRIPCION	FECHA	APROBADO
ZONA	REV			



MACHUELO PARA TORNTILLO ALLEN # 10-32 x 5 PROF 4 LUGARES

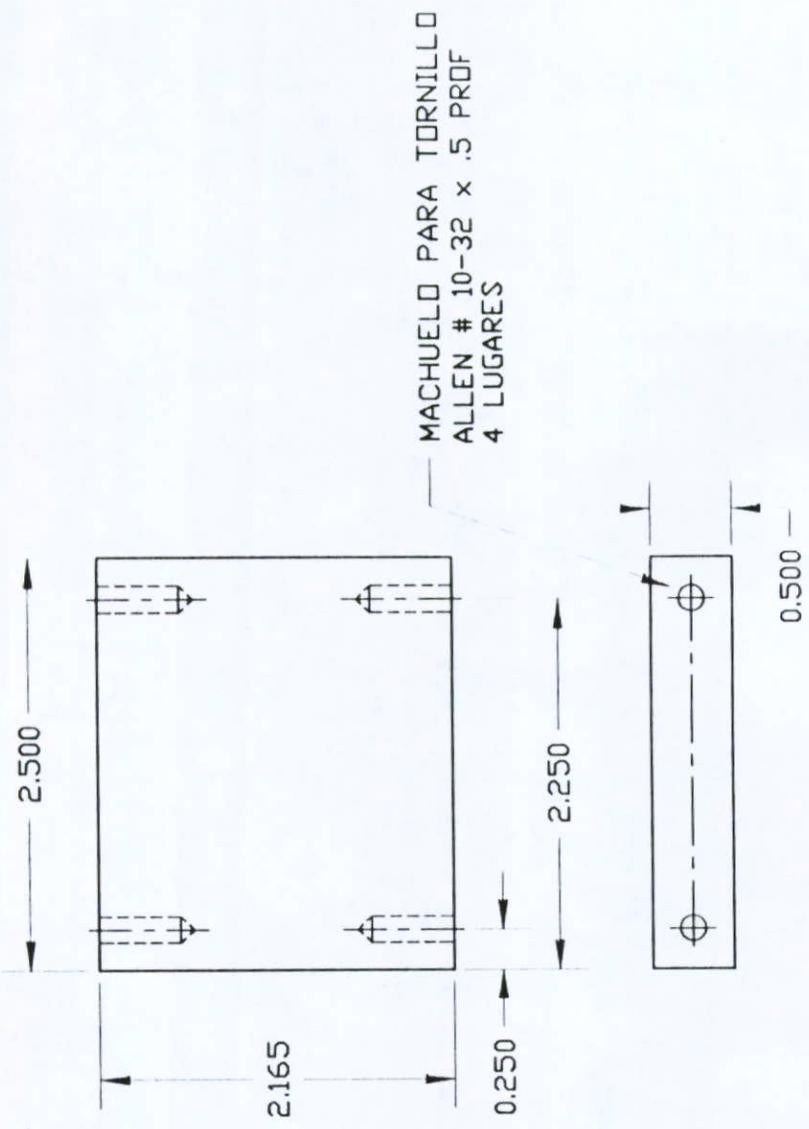


PIEZA	CANT. REQU.	PARTE NUMERO	DESCRIPCION	MATERIAL	NOTAS
LISTA DE MATERIALES ALUMINIO					
CLIENTE O PROYECTO UNIVERSIDAD PANAMERICANA			LABORATORIO DE ROBOTICA UNIVERSIDAD PANAMERICANA GUADALAJARA GUADALAJARA JALISCO MEXICO		
PREPARADO POR: SPACA			TITULO SUPORTE VERTICAL		
FECHA:			TAM:		
CHECKADO:			DIBUJO NO: ACE003-5		
APPROBADO:			REV: N/C		
TOLERANCIAS .X ± 0.30 .XX ± 0.10 .XXX ± 0.05 ANGULAR ± 0°-30' TERMINADO 125 R/M			ESCALA:		
PROYECCION TERCER ANG.			HOJA DE		



REVISIONES

ZONA	REV	DESCRIPCION	FECHA	APROBADO



PIEZA	CANT. REQU.	PARTE NUMERO	DESCRIPCION	MATERIAL	NOTAS
2			LISTA DE MATERIALES	ALUMINIO	
A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE TODA DIMENSION ES EN PULGADAS NO ES DIBUJO A ESCALA CORTAR TODAS LAS ESQUINAS Y BORDES		CLIENTE O PROYECTO UNIVERSIDAD PANAMERICANA	LABORATORIO DE ROBOTICA UNIVERSIDAD PANAMERICANA GUADALAJARA GUADALAJARA JALISCO MEXICO		
TOLERANCIAS .X ± .030 .XX ± .010 .XXX ± .005 ANGULAR ± 0°-30' TERMINADO 125 PVS		PREPARADOR ER SPADA FECHA MAY 1994	TITULO SORTEO MOTOR EJE VERTICAL		
PROTECCION TERCER ANG.		CHECADO FECHA	TAM 1	DIBUJO NO. 03033-4	REV N/A
		APROBADO FECHA	ESCALA NINGUNA	HOJA 1 DE 1	

REVISIONES

FECHA

APPROBADO

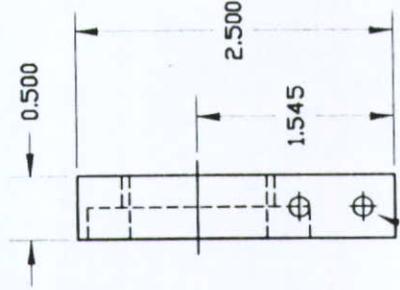
DESCRIPCION

REV

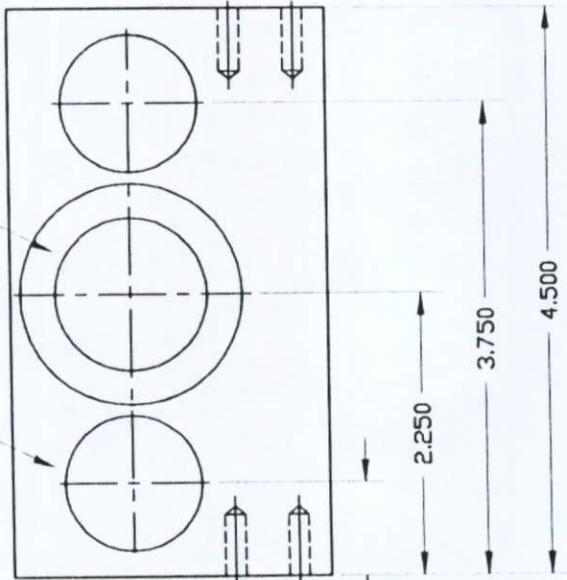
ZONA

Barreno ϕ 1.08
2 lugares

Barreno ϕ 1.2 con Caja ϕ 1.75
X .25 PRDF



Machuelo para Tornillo Allen
10-32 x 0.3 Prof.
4 lugares



PIEZA	CANT. REQU.	PARTE NUMERO	DESCRIPCION	MATERIAL	NOTAS
			LISTA DE MATERIALES		
A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE TODA DIMENSION ES EN PULGADAS NO ES DIBUJO A ESCALA CORTAR TODAS LAS ESQUINAS Y BORDES		CUENTE O PROYECTO UNIVERSIDAD PANAMERICANA		LABORATORIO DE ROBOTICA UNIVERSIDAD PANAMERICANA GUADALAJARA GUADALAJARA JALISCO MEXICO	
TOLERANCIAS		PREPARADO	FECHA	TITULO	
.X \pm .1X		CHECADO	FECHA	CORRECTOR: CENTRAL	
.XX \pm .01		APROBADO	FECHA	TAM	DIBUJO NO
.XXX \pm .001				4	REV
ANGULAR \pm 0.1-0.2				SCALA	HOJA DE
TERMINADO 1:5 RVS					

PROYECCION TERCER ANG.



REVISIONES

APPROBADO

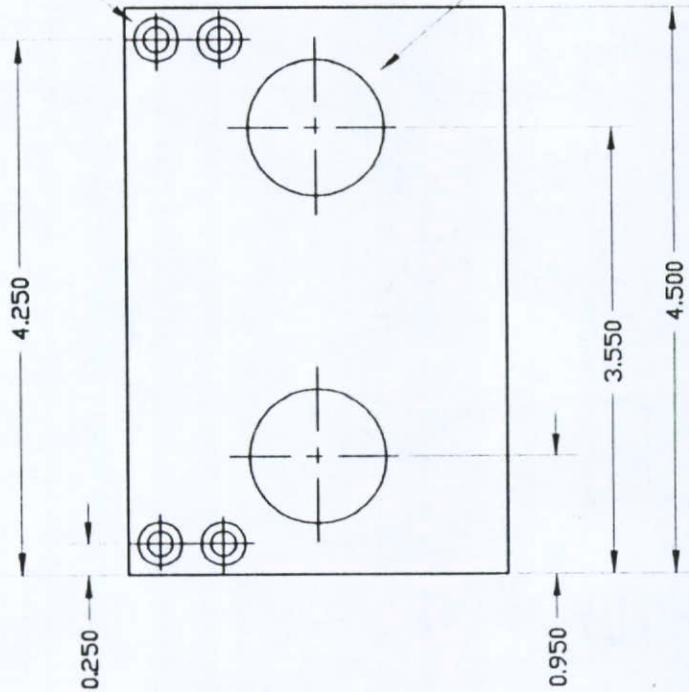
FECHA

DESCRIPCION

REV

ZONA

Barreno y Caja Para Tornillo Allen # 10-32
4 Lugares



Barreno ϕ 1.08
2 lugares

PIEZA	CANT. REQU.	PARTE NUMERO	DESCRIPCION	MATERIAL	NOTAS
LISTA DE MATERIALES					
<p>A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE TODA DIMENSION ES EN PULGADAS NO ES DIBUJO A ESCALA CORTAR TODAS LAS ESQUINAS Y BORDES</p> <p>TOLERANCIAS .X \pm .03C .XX \pm .01C .XXX \pm .00E ANGULAR \pm 0'-30" TERMINADO .25 RVS</p>		<p>CLIENTE O PROYECTO UNIVERSIDAD PANAMERICANA</p> <p>PREPARADO: EF SPADA FECHA: 1994</p> <p>CHECADO FECHA</p> <p>APROBADO FECHA</p>		<p>LABORATORIO DE ROBOTICA UNIVERSIDAD PANAMERICANA GUADALAJARA GUADALAJARA JALISCO MEXICO</p> <p>TITULO CORREDERA CENTRAL</p>	
<p>PROYECCION TERCER ANG.</p>		<p>DIBUJO NO. 103004-3</p>		<p>REV 1/8</p>	
		<p>SCALA: VINGUNA</p>		<p>HOJA 1 DE 1</p>	

APENDICE B

LISTADO DEL PROGRAMA DE CONTROL

```
*****  
; PROGRAMA PARA EL CONTROL DE ROBOT TIPO GRUA  
; DE LA UNIVERSIDAD PANAMERICANA  
; PROYECTO DE TESIS PARA EL TITULO DE ING.  
ELECTROMECHANICO  
; REALIZADO EN MARZO DE 1994  
; VERSION PARA EL CONTROL DE LA TARJETA  
; EN PUERTO PARALELO  
*****
```

TI = 200 "TIEMPO PARA EL LARGO DE MOVIMIENTO"

DIM PR(100, 100)

' PANTALLA DE ENTRADA

CLS

LOCATE 5, 25

PRINT "UNIVERSIDAD PANAMERICANA"

LOCATE 7, 10

PRINT "PROGRAMA DE CONTROL DEL ROBOT TIPO GRUA DEL LABORATORIO"

LOCATE 8, 16

PRINT "DE ROBOTICA DE LA UNIVERSIDAD PANAMERICANA"

LOCATE 10, 10

PRINT "REALIZADO COMO PARTE DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER"

LOCATE 11, 18

PRINT "EL TITULO DE INGENIERO ELECTROMECHANICO"

LOCATE 13, 30

PRINT "ABRIL DE 1994"

LOCATE 15, 22

PRINT "FERNANDO SPADA DAVALOS"

LOCATE 21, 19

PRINT "PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR"

DO

LOOP UNTIL INKEY\$ <> ""

PANTALLA DE SELECCION DE MODO DE USO

MENU:

CLS

OUT &H3BC, 0

X = 30

Y = 15

Z = 12

T = 30

W = 1

XA = 0

YA = 0

ZA = 0

TA = 0

GA = 1

LOCATE 3, 28

PRINT "MENU DE SELECCION"

LOCATE 6, 15

PRINT "1. COLOCAR EN EL ORIGEN (MANUALMENTE)"

LOCATE 7, 15

PRINT "2. MANEJO MANUAL DEL ROBOT"

LOCATE 8, 15

PRINT "3. EJECUCIÒN DE RUTINAS PROGRAMADAS"

LOCATE 9, 15

PRINT "4. PROGRAMACION DE RUTINAS"

LOCATE 10, 15

PRINT "5. AUTO CONFIGURACION DEL ROBOT"

LOCATE 11, 15

PRINT "6. SALIR DEL PROGRAMA"

LOCATE 14, 17

PRINT "SELECCION(1-6):"

```
DO
  DO
    LOCATE 14, 31
    PRINT "    "
    LOCATE 14, 33
    INPUT A
  LOOP UNTIL (A >= 1) AND (A <= 6)
  LOCATE 16, 34
  PRINT "    "
  LOCATE 16, 17
  INPUT "ESTA SEGURO (S/N)", A$
LOOP UNTIL A$ = "s" OR A$ = "S"

IF A = 6 THEN GOSUB final
IF A = 2 THEN GOSUB MANUAL
IF A = 3 THEN GOSUB EJECUCION
IF A = 1 THEN GOSUB PRUEBAS

GOTO MENU
END
```

RUTINA MANUAL

MANUAL:

```
CLS
SCREEN 2
LOCATE 20, 15
PRINT "NOTA: CADA MOVIMIENTO DEL ROBOT ES DE 1 CM"
LOCATE 21, 16
PRINT "EL ROBOT COMIENZA EN LA POSICION (0,0,0)"
LOCATE 22, 13
PRINT "LOS TOPES DEL MOVIMIENTO ESTAN EN (75,75,35) [CM]"
LOCATE 23, 13
PRINT "FTE [F] ATR [A] IZQU [I] DER. [D] ARR [R] ABA [B]"
LOCATE 24, 12
PRINT "TOMAR [T] DEJAR [E] GIRO POS [P] GIRO NEG [N] SAL [S]"
```

```
LINE (20, 10)-(280, 130), , B
LOCATE 1, 2
PRINT "0,75"
LOCATE 18, 2
PRINT "0,0"
LOCATE 1, 37
PRINT "75,0"
CIRCLE (X, Y), 5
LINE (300, 10)-(380, 130), , B
LOCATE 1, 46
PRINT "X,Y,0"
LOCATE 18, 46
PRINT "X,Y,35"
LINE (307, Z)-(373, Z + 2), , B
```

DIBUJO MANO

```
LINE (460, 30)-(510, 70), , B
LINE (445, 37)-(460, 63), , B
LINE (510, 30)-(520, 70), , B
LINE (521, T)-(557, T + 5), , B
LINE (521, 65)-(557, 70), , B
```

DIBUJO GIRO

```
CIRCLE (500, 110), 45
CIRCLE (555, 110), 5
```

DO

```
A$ = INKEY$
IF A$ = "F" AND (Y > 15) THEN GOSUB FRENTE
IF A$ = "A" AND (Y < 124.5) THEN GOSUB ATRAS
IF A$ = "I" AND (X > 30) THEN GOSUB IZQ
IF A$ = "D" AND (X < 270) THEN GOSUB DER
IF A$ = "R" AND (Z > 12) THEN GOSUB ARRIBA
IF A$ = "B" AND (Z < 124.75) THEN GOSUB ABAJO
```

```

IF A$ = "T" AND (T = 30) THEN GOSUB TOMAR
IF A$ = "E" AND (T = 58) THEN GOSUB DEJAR
IF A$ = "P" AND (W = 1) THEN GOSUB GIROP
IF A$ = "N" AND (W = 0) THEN GOSUB GIRON
LOCATE 1, 55
PRINT XA; " "; YA; " "; ZA; " "; TA; " "; GA
LOOP UNTIL A$ = "S"
RETURN

'   rutina final
final:
  CLS
  LOCATE 12, 22
  PRINT "GRACIAS POR TRABAJAR CON EL ROBOT GRUA"
  FOR G = 1 TO 9000
  OUT &H378, 0
  NEXT G
  CLS
END
RETURN

ATRAS:
  H = 0
  DA = DA + 32
  CIRCLE (X, Y), 5, 0
  YA = YA - 1
  Y = Y + 1.46
  CIRCLE (X, Y), 5
  DO WHILE H < TI
  OUT &H378, DA
  FOR G = 0 TO .004 STEP .001
  NEXT G
  OUT &H378, DA + 4
  H = H + 1
  LOOP
  DA = DA - 32

```

```
OUT &H378, DA
RETURN
```

```
FRENTE:
```

```
DA = DA + 40
H = 0
CIRCLE (X, Y), 5, 0
YA = YA + 1
Y = Y - 1.46
CIRCLE (X, Y), 5
DO WHILE H < TI
    OUT &H378, DA
    FOR G = 0 TO .005 STEP .001
    NEXT G
    OUT &H378, DA + 4
    H = H + 1
LOOP
DA = DA - 40
OUT &H378, DA
```

```
RETURN
```

```
IZQ:
```

```
H = 0
DA = DA + 64
CIRCLE (X, Y), 5, 0
XA = XA - 1
X = X - 3.2
CIRCLE (X, Y), 5
DO WHILE H < TI
    OUT &H378, DA
    FOR G = 0 TO .001 STEP .001
    NEXT G
    OUT &H378, DA + 4
    FOR G = 0 TO .001 STEP .001
    NEXT G
    H = H + 1
```

```
LOOP
DA = DA - 64
OUT &H378, DA
RETURN
```

DER:

```
H = 0
DA = DA + 72
XA = XA + 1
CIRCLE (X, Y), 5, 0
X = X + 3.2
CIRCLE (X, Y), 5
DO WHILE H < TI
    OUT &H378, DA
    FOR G = 0 TO .002 STEP .001
    NEXT G
    OUT &H378, DA + 4
    H = H + 1
LOOP
DA = DA - 72
OUT &H378, DA
```

RETURN

ARRIBA:

```
H = 0
DA = DA + 16
ZA = ZA - 1
LINE (307, Z)-(373, Z + 2), 0, B
Z = Z - 3.25
LINE (307, Z)-(373, Z + 2), , B
DO WHILE H < TI
    OUT &H378, DA
    FOR G = 0 TO .001 STEP .001
    NEXT G
    OUT &H378, DA + 4
    FOR G = 0 TO .002 STEP .001
```

```
NEXT G
H = H + 1
LOOP
DA = DA - 16
OUT &H378, DA
RETURN
```

ABAJO:

```
H = 0
DA = DA + 24
ZA = ZA + 1
LINE (307, Z)-(373, Z + 2), 0, B
Z = Z + 3.25
LINE (307, Z)-(373, Z + 2), , B
DO WHILE H < TI
  OUT &H378, DA
  FOR G = 0 TO .005 STEP .001
  NEXT G
  OUT &H378, DA + 4
  H = H + 1
LOOP
DA = DA - 24
OUT &H378, DA
RETURN
```

TOMAR:

```
DA = DA + 2
DO
  TA = 1
  LINE (521, T)-(557, T + 5), 0, B
  T = T + 2
  LINE (521, T)-(557, T + 5), , B
  OUT &H378, DA
  FOR G = 1 TO 50
  NEXT G
LOOP UNTIL T = 58
```

RETURN

DEJAR:

TA = 0

DA = DA - 2

DO

LINE (521, T)-(557, T + 5), 0, B

T = T - 2

LINE (521, T)-(557, T + 5), , B

OUT &H378, DA

FOR G = 1 TO 50

NEXT G

LOOP UNTIL T = 30

RETURN

GIROP:

GA = 1

W = 0

DA = DA + 1

OUT &H378, DA

CIRCLE (555, 110), 5, 0

CIRCLE (553, 115), 5

FOR G = 1 TO 70

NEXT G

CIRCLE (553, 115), 5, 0

CIRCLE (550, 120), 5

FOR G = 1 TO 70

NEXT G

CIRCLE (550, 120), 5, 0

CIRCLE (545, 125), 5

FOR G = 1 TO 70

NEXT G

CIRCLE (545, 125), 5, 0

CIRCLE (535, 130), 5

FOR G = 1 TO 70

NEXT G

```
CIRCLE (535, 130), 5, 0
CIRCLE (525, 135), 5
FOR G = 1 TO 70
NEXT G
CIRCLE (525, 135), 5, 0
CIRCLE (515, 135), 5
FOR G = 1 TO 70
NEXT G
CIRCLE (515, 135), 5, 0
CIRCLE (500, 135), 5
RETURN
```

GIRON:

```
GA = 0
W = 1
DA = DA - 1
OUT &H378, DA
CIRCLE (500, 135), 5, 0
CIRCLE (515, 135), 5
FOR G = 1 TO 70
NEXT G
CIRCLE (515, 135), 5, 0
CIRCLE (525, 135), 5
FOR G = 1 TO 70
NEXT G
CIRCLE (525, 135), 5, 0
CIRCLE (535, 130), 5
FOR G = 1 TO 70
NEXT G
CIRCLE (535, 130), 5, 0
CIRCLE (545, 125), 5
FOR G = 1 TO 70
NEXT G
CIRCLE (545, 125), 5, 0
CIRCLE (550, 120), 5
FOR G = 1 TO 70
```

```
NEXT G
CIRCLE (550, 120), 5, 0
CIRCLE (553, 115), 5
FOR G = 1 TO 70
NEXT G
CIRCLE (553, 115), 5, 0
CIRCLE (555, 110), 5
RETURN
```

EJECUCION:

```
SCREEN 2
CLS
```

```
LINE (20, 10)-(280, 130), , B
LOCATE 1, 2
PRINT "0,75"
LOCATE 18, 2
PRINT "0,0"
LOCATE 1, 37
PRINT "75,0"
CIRCLE (X, Y), 5
```

```
LINE (300, 10)-(380, 130), , B
LOCATE 1, 46
PRINT "X,Y,0"
LOCATE 18, 46
PRINT "X,Y,35"
LINE (307, Z)-(373, Z + 2), , B
```

' DIBUJO MANO

```
LINE (460, 30)-(510, 70), , B
LINE (445, 37)-(460, 63), , B
LINE (510, 30)-(520, 70), , B
LINE (521, T)-(557, T + 5), , B
LINE (521, 65)-(557, 70), , B
```

' DIBUJO GIRO

CIRCLE (500, 110), 45

CIRCLE (555, 110), 5

' DATOS DE COORDENADAS PARA SECUENCIA PROGRAMADA

LOCATE 22, 15

PR(1, 1) = 35

PR(1, 2) = -35

PR(1, 3) = 1

PR(1, 4) = 0

PR(1, 5) = 16

PR(1, 6) = 0

PR(1, 7) = 20

PR(1, 8) = -15

PR(1, 9) = 0

PR(1, 10) = 1

PR(1, 11) = 0

PR(1, 12) = 0

PR(1, 13) = 0

PR(1, 14) = 0

' EJECUCION DE SECUENCIA PROGRAMADA

PRINT "EJECUTANDO SECUENCIA PROGRAMADA EJEMPLO (TEMPORAL)"

IF PR(1, 1) < XA THEN

DO

GOSUB IZQ

LOOP UNTIL PR(1, 1) = XA

END IF

IF PR(1, 1) > XA THEN

DO

GOSUB DER

LOOP UNTIL PR(1, 1) = XA

END IF

```
IF PR(1, 2) < YA THEN
  DO
    GOSUB ATRAS
  LOOP UNTIL PR(1, 2) = YA
END IF
```

```
IF PR(1, 2) > YA THEN
  DO
    GOSUB FRENTE
  LOOP UNTIL PR(1, 2) = YA
END IF
```

```
IF PR(1, 3) = 0 AND TA = 1 THEN GOSUB DEJAR
```

```
IF PR(1, 3) = 1 AND TA = 0 THEN GOSUB TOMAR
```

```
IF PR(1, 4) = 0 AND GA = 1 THEN GOSUB GIROP
```

```
IF PR(1, 4) = 1 AND GA = 0 THEN GOSUB GIRON
```

```
IF PR(1, 5) < ZA THEN
  DO
    GOSUB ARRIBA
  LOOP UNTIL PR(1, 5) = ZA
END IF
```

```
IF PR(1, 5) > ZA THEN
  DO
    GOSUB ABAJO
  LOOP UNTIL PR(1, 5) = ZA
END IF
```

```
IF PR(1, 6) < ZA THEN
  DO
```

```
GOSUB ARRIBA
LOOP UNTIL PR(1, 6) = ZA
END IF
```

```
IF PR(1, 6) > ZA THEN
DO
GOSUB ABAJO
LOOP UNTIL PR(1, 6) = ZA
END IF
```

```
IF PR(1, 7) < XA THEN
DO
GOSUB IZQ
LOOP UNTIL PR(1, 7) = XA
END IF
```

```
IF PR(1, 7) > XA THEN
DO
GOSUB DER
LOOP UNTIL PR(1, 7) = XA
END IF
```

```
IF PR(1, 8) < YA THEN
DO
GOSUB ATRAS
LOOP UNTIL PR(1, 8) = YA
END IF
```

```
IF PR(1, 8) > YA THEN
DO
GOSUB FRENTE
LOOP UNTIL PR(1, 8) = YA
END IF
```

```
IF PR(1, 9) = 0 AND TA = 1 THEN GOSUB DEJAR
```

```
IF PR(1, 9) = 1 AND TA = 0 THEN GOSUB TOMAR
```

```
IF PR(1, 10) = 0 AND GA = 1 THEN GOSUB GIROP
```

```
IF PR(1, 10) = 1 AND GA = 0 THEN GOSUB GIRON
```

```
FOR G = 1 TO 2000
```

```
NEXT G
```

```
RETURN
```

```
PRUEBAS:
```

```
CLS
```

```
SCREEN 2
```

```
LOCATE 20, 15
```

```
PRINT "NOTA: CADA MOVIMIENTO DEL ROBOT ES DE 1 CM"
```

```
LOCATE 21, 16
```

```
PRINT "EL ROBOT COMIENZA EN LA POSICION (0,0,0)"
```

```
LOCATE 22, 13
```

```
PRINT "LOS TOPES DEL MOVIMIENTO ESTAN EN (75,75,35) [CM]"
```

```
LOCATE 23, 13
```

```
PRINT "FTE [F] ATR [A] IZQU [I] DER. [D] ARR [R] ABA [B]"
```

```
LOCATE 24, 12
```

```
PRINT "TOMAR [T] DEJAR [E] GIRO POS [P] GIRO NEG [N] SAL [S]"
```

```
LINE (20, 10)-(280, 130), , B
```

```
LOCATE 1, 2
```

```
PRINT "0,75"
```

```
LOCATE 18, 2
```

```
PRINT "0,0"
```

```
LOCATE 1, 37
```

```
PRINT "75,0"
```

```
CIRCLE (X, Y), 5
```

```
LINE (300, 10)-(380, 130), , B
```

```
LOCATE 1, 46
```

```
PRINT "X,Y,0"
```

```
LOCATE 18, 46
PRINT "X,Y,35"
LINE (307, Z)-(373, Z + 2), , B
```

```
' DIBUJO MANO
LINE (460, 30)-(510, 70), , B
LINE (445, 37)-(460, 63), , B
LINE (510, 30)-(520, 70), , B
LINE (521, T)-(557, T + 5), , B
LINE (521, 65)-(557, 70), , B
```

```
' DIBUJO GIRO
CIRCLE (500, 110), 45
CIRCLE (555, 110), 5
```

```
DO
A$ = INKEY$
IF A$ = "F" THEN GOSUB FRENTE
IF A$ = "A" THEN GOSUB ATRAS
IF A$ = "I" THEN GOSUB IZQ
IF A$ = "D" THEN GOSUB DER
IF A$ = "R" THEN GOSUB ARRIBA
IF A$ = "B" THEN GOSUB ABAJO
IF A$ = "T" THEN GOSUB TOMAR
IF A$ = "E" THEN GOSUB DEJAR
IF A$ = "P" THEN GOSUB GIROP
IF A$ = "N" THEN GOSUB GIRON
LOCATE 1, 55
PRINT XA; " "; YA; " "; ZA; " "; TA; " "; GA
LOOP UNTIL A$ = "S"
```

```
RETURN
```

