



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ROBOT ANTROPOMÓRFICO TELEOPERADO
DE MIEMBRO SUPERIOR**

T E S I S
Que para obtener el título de
INGENIERO MECATRÓNICO

P R E S E N T A:

OCTAVIO DÍAZ HERNÁNDEZ

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JESÚS MANUEL DORADOR GONZÁLEZ**



MÉXICO D.F.

ENERO 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

<i>Título</i>	3
<i>Resumen</i>	3
<i>Objetivo</i>	4
Índice temático	4
<i>Alcance</i>	5
<i>Justificación</i>	6
<i>1. Introducción</i>	7
<i>2. Antecedentes</i>	8
2.1 Datos históricos	8
2.2 Situación actual.....	12
2.3 Marco teórico	14
2.3.1. Anatomía de miembro superior	14
2.3.2. Robótica	15
2.3.3. Actuadores	17
2.3.4. Sensores	19
2.3.5. Teleoperación.....	21
2.3.6. Conversión Analógico Digital.....	22
<i>3. Diseño</i>	24
3.1 Especificaciones	24
3.2. Diseño Conceptual.....	26
3.2.1. Diagrama Conceptual de Sistemas	26
3.2.2. Operador	27
3.2.3. Robot.....	27
3.2.4. Control.....	27
3.2.5. Sensores	27
3.3 Diseño de detalle	28
3.3.1. Descripción del Problema.....	28
3.3.2. Control y fase de potencia	28
3.3.3. Tabla de entradas y salidas.....	30
3.3.4. Diagramas de Flujo	31
3.3.5. Diagramas de conexión.....	32
3.3.6. Exoesqueleto.....	33
3.3.7. Descripción del Programa	34
<i>4. Construcción</i>	35
4.1 El robot.....	35
4.2 El exoesqueleto	36
4.3 Los sensores.....	37
4.4 El control	38
<i>5. Resultados</i>	39
<i>6. Conclusiones</i>	42
<i>7. Referencias</i>	44

Título

Robot Antropomórfico Teleoperado de Miembro Superior

Resumen

En este trabajo se pretende armar un dispositivo para colocarlo en un brazo humano, el cual controlará un robot de tres grados de libertad. Cada uno de estos grados de libertad será referenciado con una de las articulaciones del brazo humano (dos en hombro, una en codo).

El dispositivo de control tendrá instrumentos capaces de obtener información sobre la posición angular de cada articulación, así como al robot, también se le colocarán instrumentos de medición en las articulaciones.

La información obtenida se interpretará, y se harán comparaciones entre las posiciones del robot con las del operador, esto para determinar si las posiciones son iguales o no; en cada caso, se ejecutará una acción establecida con el fin de igualar las posiciones del robot con las del humano. De esta forma se espera copiar el movimiento del operador para que esté reflejado en las acciones del robot, las cuales son ejecutadas por sus motores.

En el robot se tienen tantos motores como grados de libertad, estos motores son los encargados de los movimientos del robot. Para controlar a los motores es necesario enviar dos señales: el encendido y el sentido de giro; los cuales serán manipulados para los fines del este trabajo.

Objetivo

- Controlar un robot antropomórfico con señales provenientes de un mecanismo instrumentado, capaz de captar los movimientos del brazo humano.

Índice temático

- Introducción (dar información del presente trabajo al nuevo lector)
- Antecedentes (breve descripción sobre los trabajos previos y de vanguardia relacionados con el tema a tratar)
- Justificación (determinar las razones por las que se piensa abordar el tema)
- Mecanismo en el operador (diseñar un modelo que se adapte a los movimientos del brazo humano)
- Sensores de posición angular (determinar cuales son los mejores instrumentos para captar información del movimiento del brazo humano y del robot)
- Control del robot antropomórfico (diseñar el programa que procese la información obtenida de los sensores de posición angular para controlar las acciones de los motores en el robot)
- Pruebas (determinar y corregir las fallas que surgen entre la teoría y la práctica)
- Conclusiones (dar a conocer la resolución del trabajo, proyecciones y propuestas)

Alcance

En el presente trabajo se conjuntan los conocimientos adquiridos en Mecatrónica para que el movimiento de un miembro superior humano sea plasmado en un robot de tipo antropomórfico. De esta manera, se desarrollará una propuesta sencilla al manejo teleoperado de un robot, pero no es el desarrollo integral del control de un manipulador, ni tampoco el diseño o manufactura de uno. Respecto a los sensores, tampoco se pretende diseñarlos ni elaborarlos. El diseño y desarrollo se enfoca en el mecanismo para captar el movimiento de la persona y el programa que ejecuta las acciones necesarias para transmitir el movimiento al robot.

Justificación

Los robots han sido creados para dignificar la actividad humana en algunas áreas de trabajo, ya sea en la industria o en la investigación. Las razones de porqué realizar un miembro robótico teleoperado son principalmente aplicaciones que pueden ir más allá de lo aquí planteado. Sin embargo por citar ejemplos, existe la necesidad de manejar productos tóxicos o nocivos para el contacto humano, las condiciones de trabajo en las que una persona no pueda estar por seguridad u otra razón fisiológica. En la industria es evidente que puede usarse para manufactura flexible, entre otras. En el campo de la investigación dentro de las universidades es una plataforma ideal para el “trabajo virtual” o telepresencia. En el área médica se puede emplear como equipo médico o de laboratorio, prueba de productos, trabajo a distancia o telepresencia. Además de las razones mencionadas, está el entretenimiento, donde los robots han cobrado importancia en las atracciones de parques de diversiones temáticos, el también llamado entretenimiento educativo.

1. Introducción

La teleoperación es uno de los avances tecnológicos que han permitido imitar movimientos complejos, tales como el funcionamiento mecánico del ser humano. En específico, el miembro superior humano es uno de los elementos motrices más complejos en la naturaleza. De tal forma que realizar un proyecto basado en los movimientos del brazo, requiere un acercamiento a su funcionamiento y al conocimiento de los elementos mecánicos que puedan aproximarse a los movimientos que un brazo realiza, además de hacerlo a larga distancia. Los adelantos a este respecto se han dedicado principalmente a la industria aeroespacial.

Es por eso que en la Administración Nacional para la Aeronáutica y Espacio de los Estados Unidos de América (*National Aeronautics and Space Administration, (NASA)*) se está desarrollando un robot humanoide teledirigido diseñado para actuar bajo las exigencias de un ambiente de gravedad cero. Se trata del *Robonaut* (“Robonauta”) con dos miembros superiores (brazos, antebrazos y manos), tórax y cabeza. La razón para generar esta tecnología se relaciona con las limitantes humanas para realizar procedimientos en el espacio, incluso por seguridad y tiempo.

En este trabajo se estudian las habilidades natas para el ser humano, como por ejemplo, levantar el brazo, desplazarlo o flexionarlo. Además se *pretende conjuntar los conocimientos adquiridos en Mecatrónica para reproducir el movimiento de una persona y plasmarlo en un robot. Específicamente, que el movimiento de un miembro superior humano (brazo) sea captado por un dispositivo con sensores y se ejecute el mismo movimiento por un robot con tres articulaciones.*

2. Antecedentes

2.1 Datos históricos

El concepto de máquinas automatizadas se remonta a la antigüedad, con mitos de seres mecánicos vivientes. Los autómatas, o máquinas semejantes a personas, ya aparecían en los relojes de las iglesias medievales. La palabra "robot", es de origen checo y significa siervo o esclavo; fue inventada por el escritor checo Karel Capek (1890-1938)[Capek, K. Robots Universales de Rossum, 1920]. Algunos de los primeros robots empleaban mecanismos de realimentación para corregir errores, mecanismos que siguen empleándose actualmente.

El primer auténtico controlador realimentado fue el regulador de Watt, inventado en 1788 por el ingeniero británico James Watt. Este dispositivo constaba de dos esferas metálicas unidas al eje motor de una máquina de vapor y conectadas con una válvula que regulaba el flujo de vapor. A medida que aumentaba la velocidad de la máquina de vapor, las esferas se alejaban del eje debido a la fuerza centrífuga, con lo que cerraban la válvula. Esto hacía que disminuyera el flujo de vapor a la máquina y por tanto la velocidad [Muirhead, *Origin and Progress of the Mechanical Inventions of James Watt*, 1854].

El control por realimentación, el desarrollo de herramientas especializadas y la división del trabajo en tareas más pequeñas que pudieran realizar obreros o máquinas fueron ingredientes esenciales en la automatización de las fábricas en el siglo XVIII. A medida que mejoraba la tecnología se desarrollaron máquinas especializadas para tareas como poner tapones a las botellas o verter caucho líquido en moldes para neumáticos. Sin embargo, ninguna de estas máquinas tenía la versatilidad del brazo humano, y no podían alcanzar objetos alejados y colocarlos en la posición deseada [Cagliani, M.A, 2006].

El desarrollo del brazo artificial multiarticulado, o manipulador, llevó al moderno robot antropomórfico. George Devol desarrolló el primer brazo robot programable en 1954, al que llamó "manipulador universal" [Devol,G. Multiaxed Programmable Arm patent, 1975]. Junto con Joseph F. Engelberger en 1956 iniciaron la primera compañía de brazos robóticos "Unimation", a este último se le conoció como el "padre de la robótica". En 1975, el ingeniero mecánico estadounidense Victor Scheinman, cuando estudiaba la

carrera en la Universidad de Stanford, en California, desarrolló un manipulador polivalente realmente flexible conocido como Brazo Manipulador Universal Programable (*Programable Universal Manipulator Arm*, PUMA). El PUMA era capaz de mover un objeto y colocarlo en cualquier orientación en un lugar deseado que estuviera a su alcance. El concepto básico multiarticulado del PUMA es la base de la mayoría de los robots actuales [Cagliani, M.A, 2006]. Se debe hacer notar que las investigaciones entorno a la telemanipulación de objetos nacieron en los laboratorios de la industria nuclear, debido al alto riesgo que presenta estar en contacto directo con los elementos radioactivos.

En 1947 comenzaron las primeras investigaciones por Raymond Goertz [Vertut J., 1985] del “*Argonne National Laboratory*” en Estados Unidos, encaminadas al desarrollo de algún tipo de manipulador de fácil manejo a distancia mediante el uso por parte del operador de otro manipulador equivalente. El primer fruto se obtuvo en 1948 con el desarrollo del primer manipulador teleoperado mecánico, denominado M1, antecesor de toda la familia de sistemas maestro-esclavo de telemanipulación existentes actualmente. En la figura 2.1 se aprecia al mecanismo de este sistema que permitía a la pinza situada en el extremo del manipulador esclavo reproduciera de forma fiel los movimientos hechos por la mano del operador al extremo del manipulador maestro. Ambos manipuladores eran prácticamente iguales, y los movimientos entre ambos se reproducían eje a eje, de tal manera que el extremo de ambos describiese la misma trayectoria.

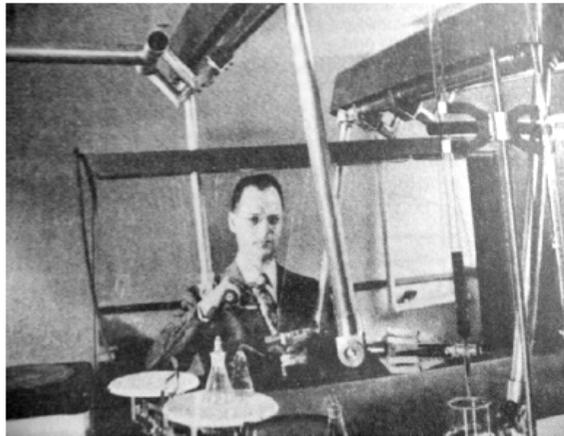


Figura 2.1. Primer telemanipulador maestro-esclavo mecánico. Fotografía correspondiente a Raymond Goertz manipulando químicos a través de un cristal de protección, hecha en 1948 en el Laboratorio Nacional de Argonne USA. Tomada de Vertut J., 1985

A principios de los años 50 se comenzaron los desarrollos encaminados a motorizar ambos manipuladores, maestro y esclavo, de una forma adecuada. Fue en 1954 cuando Goertz presentó el primer manipulador maestro-esclavo con accionamiento eléctrico y servocontrol en ambos manipuladores llamado E1.

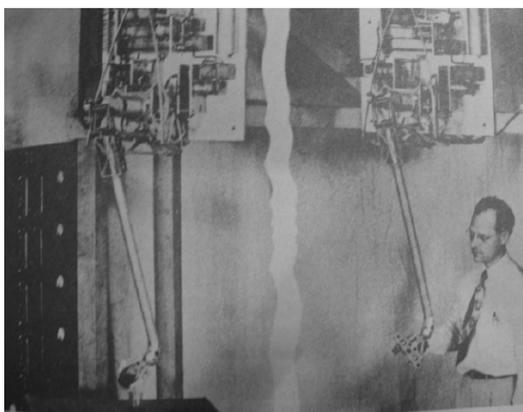


Figura 2.2. Primer telemanipulador maestro-esclavo eléctrico. Fotografía correspondiente a Raymond Goertz haciendo tareas de aprehensión de objetos, 1954, Laboratorio Nacional de Argonne USA. Tomada de Vertut J., 1985

En los años sesenta se extendieron las investigaciones hasta el campo de las aplicaciones submarinas, siendo los sistemas cada vez más sofisticados, especialmente por la inclusión de cámaras y demás dispositivos para aumentar la telepresencia del operador.

El desarrollo de los dispositivos submarinos autónomos comenzó con vehículos como el *Rebikoff Sea Spook* construido por la Universidad de Washington [Vertut J., 1985]. A éste le siguieron otros como el *SPURV* (*Self-Propelled Underwater Research Vehicle*, vehículo de investigación submarina autoimpulsado) y el *SKAT* del *Shirshov Institute of Oceanology* (Rusia), entre otros.

Los robots submarinos constituyen herramientas muy poderosas que se ponen al servicio de los científicos, y les facilita el estudio de las variables marinas. La mayor parte de los robots submarinos comerciales están guiados con un cable y son controlados remotamente, usualmente se les conoce como *ROV* (*Remotely Operated Vehicles*, Vehículos Operados Remotamente). También existen robots autónomos, es decir, que no son guiados por un cable ni por un operador. A estos robots se les conoce como *AUV* (*Autonomous Underwater Vehicles*, Vehículos Submarinos Autónomos).

A finales de los años sesenta y principios de los setenta, la tecnología de la teleoperación empezó a explorar su utilización en aplicaciones espaciales. El primer vehículo teleoperado en la luna fue *Lunakhod 1* (Rusia) y recorrió 10 kilómetros en 11 días de misión, el problema con este tipo de aplicación es que los sistemas de teleoperación experimentaron grandes retardos en sus sistemas de telecomunicaciones, aunque de

aquí a la luna el retardo sea de sólo algunos segundos los sistemas de control en lazo cerrado se vuelven inestables, en este caso se usaba el método “mueve y espera”. Un retardo mucho mayor lo sufrió el sistema *Sojourner* de la NASA, el retardo era de 10 a 20 minutos, y este sistema fue teleoperado con éxito durante 7 días marcianos [NSSDC Master Catalog Display, 2006].

En adición a la carrera espacial, en años más recientes y debido al incremento de criminalidad y terrorismo se han creado un cierto tipo de sistemas teleoperados llamados *TERROBOTS*, que son usados para asegurar bombas, vigilancia, asaltos policíacos entre otros, estos vehículos son teleoperados con un lazo de control cerrado desde una conexión por cable o por radio frecuencia, el equipo del que disponen generalmente son un sistema de visión, cámaras infrarrojas, manipuladores robóticos, armas letales y no letales. En la figura 2.3 se puede ver un *terrobot*.



Figura 2.3. Robot policía. Foto tomada de *Sandia National Laboratories*

Los brazos antropomórficos tuvieron su desarrollo en la industria, los cuales fueron empleados en líneas de producción. A pesar de las posibles aplicaciones para dichos robots teleoperados, no se habían difundido por la falta de precisión y reducción del tiempo de respuesta. Sin embargo, se han logrado resultados satisfactorios para resolver estos dos parámetros, aunque el costo es aún demasiado alto para implementarlo de forma masiva.

En 1990, la NASA remarcó que la teleoperación es crítica en el mantenimiento exitoso de equipo de larga permanencia en órbita, tal como la estación espacial [Fisher W., 1990]. Por lo que comenzó la investigación en busca de las mejoras de la teleoperación tal como hacer interfaces que requieran menos entrenamiento del operador y que permitan hacer jornadas más largas al operador sin cansarle.

Desde ese momento los dispositivos teleoperados aumentaron de complejidad en busca de imitar la anatomía humana. El primero fue una palanca de mando con tres grados de libertad empleado para controlar un sistema de manipulación a distancia en la plataforma de lanzamiento, pero resultó inadecuado para los objetivos anteriores. Posteriormente la NASA exploró la posibilidad de emplear “exoesqueletos” para controlar dispositivos complejos anatómicamente similares, tales como la “mano diestra” de la universidad de Utah/MIT (*Dextrous Hand, UMDH*) [Jacobsen S., 1986], mapeando la posición del operador directamente en la posición del robot.

MANU SYSTEMS ha trabajado desde los años noventa para la NASA en el modelo de un brazo y mano robóticos humanoides, para ser controlados por un operador con un exoesqueleto instrumentado.

2.2 Situación actual

La tabla 2.1 muestra algunos modelos donde interviene la teleoperación de manera importante para los avances tecnológicos.

Tabla 2.1. Aplicaciones de brazos teleoperados desarrollados en la actualidad

Océano	Brazos en vehículos submarinos.
Militar	Brazos en robots para desarmar bombas.
Espacio	Robonauta con extremidades para reparaciones en el espacio.
Industria nuclear	Brazos para manejar desechos tóxicos.
Medicina	Brazos o actuadores con tenazas en cirugías endoscópicas o a distancia.
Construcción y minería	Brazos de construcción o excavación.

Sin ser el único en su clase, para fines de este trabajo, se toma como referencia el dispositivo de la NASA llamado Robonauta (*Robonaut*) que es un robot teleoperado cuyo propósito es realizar las funciones de reparación que tiene que hacer un humano en el espacio. Consta de dos cámaras en los ojos para que la persona que lo está operando pueda tener una visión del entorno en que se está trabajando. En las figuras 2.4 y 2.5 se observa al Robonauta.



Figura 2.4 y 2.5. Vista de las manos y el torso del Robonauta.
Fotos tomadas de NASA, U.S.A., 2006

Este robot está diseñado para trabajar en condiciones de presión y variaciones de temperatura que se experimentan en el espacio. El dispositivo conserva las dimensiones de la mano y brazo con respecto a un humano promedio. El dispositivo reproduce fielmente los movimientos del operador en un rango cercano al 100%.

2.3 Marco teórico

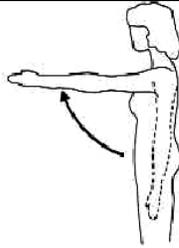
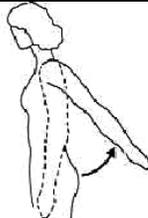
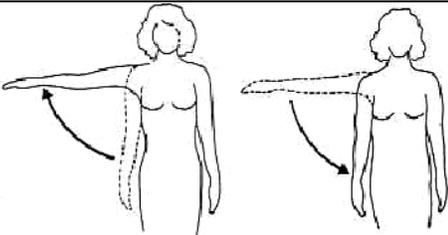
2.3.1 Anatomía de miembro superior

El hombro consta de cuatro articulaciones: glenohumeral, acromio clavicular, esternoclavicular, escapulo-torácica. Y en contribución con la columna es posible realizar el movimiento en conjunto con alrededor de 17 músculos para generar movimiento en el hombro [Nordin, Biomecánica, 2001].

El codo es una articulación en bisagra formada por los huesos húmero, cúbito y radio. Permite el movimiento hasta los 140°, ejecutado principalmente por los músculos bíceps y tríceps [Moore, Anatomía humana, 1996].

A continuación se muestra un resumen de los movimientos que se pretenden abarcar. Considerando la posición anatómica como: estar de pie, cabeza erguida, sin inclinación, ojos abiertos, mirando al frente y al mismo nivel, brazos extendidos a los lados del cuerpo, palmas de las manos mirando hacia delante, piernas extendidas y juntas, pies paralelos y talones juntos.

Tabla 2.3.1.1. Movimientos humanos del miembro superior.

Hombro	Flexión anterior	Elevación del hombro en el plano sagital	90°	
	Extensión posterior	Movimiento del hombro en el plano sagital	45°	
	Aducción: Descenso del brazo. Abducción Elevación del brazo.		90°	

Codo	Flexión Y Extensión.	Ángulo entre los huesos del antebrazo y el brazo.	140°	
Figuras tomadas de Nordin, Biomecánica, 2001				

2.3.2 Robótica

Un robot es un dispositivo mecánico controlable mediante programación que emplea sensores para guiar uno o más actuadores con la finalidad que puede ir desde manipular objetos hasta realizar actividades muy particulares. Existen tres tipos de articulaciones que pueden combinarse para obtener diferentes configuraciones de robots [Ollero, Robótica, 2001].

Tabla 2.3.2.1. Articulaciones

Tipo de articulación	Notación	Símbolo	Descripción
Rotacional	R		Movimiento rotacional sobre un eje
Prismática	P		Movimiento lineal sobre un eje
Esférica	E	•	Combinación de movimiento en tres ejes

A continuación se nombran algunos tipos de los robots más empleados en la industria, sin embargo, las combinaciones de las articulaciones no serán agotadas.

Robot tipo Cartesiano. Posee tres articulaciones prismáticas, la especificación de su posición se efectúa mediante coordenadas cartesianas (x,y,z); esta configuración es usual en estructuras industriales, tales como pórticos, transporte de cargas voluminosas. Figura 2.3.2.1.a

Robot tipo Cilíndrico. Posee dos articulaciones prismáticas y una rotacional, la posición se especifica de forma natural en coordenadas cilíndricas. Se emplea en áreas de trabajo posicionadas radialmente alrededor del robot y su alcance dependerá de sus dimensiones. Figura 2.3.2.1.b

Robot tipo Esférico o Polar. Posee dos articulaciones rotacionales y una prismática; las variables articulares expresan la posición del extremo del tercer enlace en coordenadas polares. Se puede emplear en estaciones de trabajo radiales, pero puede elevarse por encima de su base describiendo una semiesfera. Figura 2.3.2.1.c

Robot tipo Antropomórfico. Posee tres articulaciones rotacionales. La posición del extremo final se especifica de forma natural en coordenadas angulares. Su estructura le confiere un mejor acceso a espacios cerrados. Se emplea frecuentemente en robots manipuladores industriales, sobre todo en tareas complejas y su volumen de trabajo es mayor con respecto a las anteriores. Además es ampliamente usada en laboratorios de investigación. Figura 2.3.2.1.d

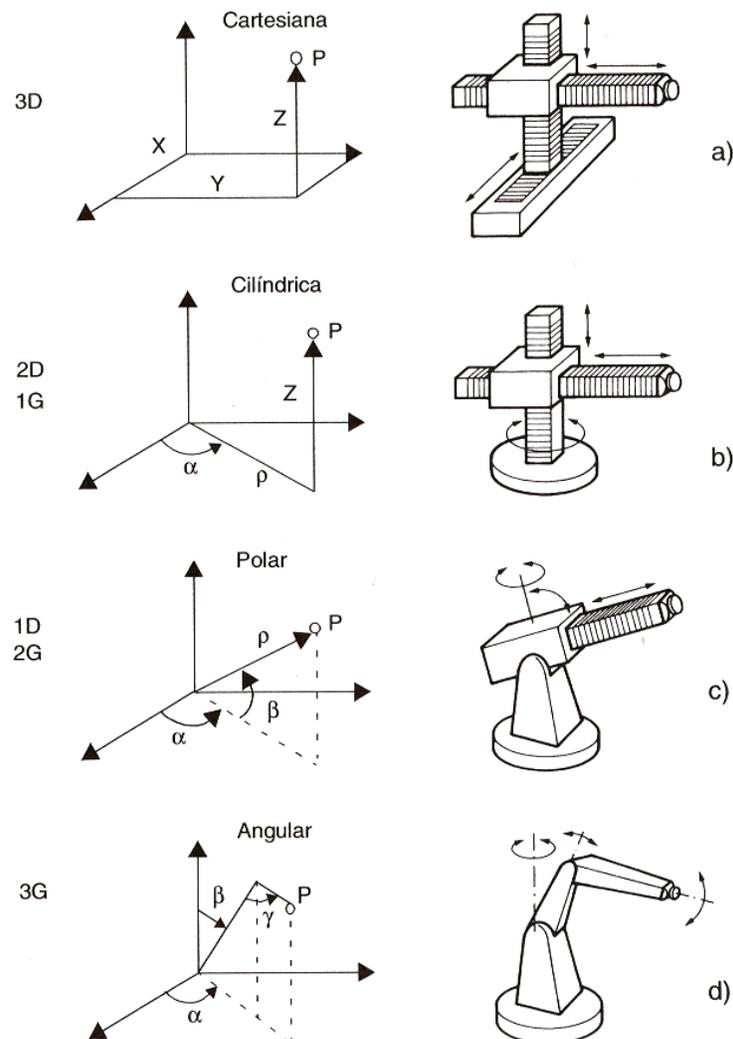


Figura 2.3.2.1. Configuraciones típicas de robots; a) cartesiana, b) cilíndrica, c) esférica, d) angular. Tomada de Ollero, Robótica, 2001

2.3.3 Actuadores

Los actuadores son dispositivos capaces de generar un trabajo a partir de algún tipo de energía. Se cuenta con un gran número de actuadores, tales como motores a pasos, servomotores, músculos neumáticos, y otros. Sin embargo, para los fines de este trabajo, sólo se profundizará en los motores de corriente directa de rotación continua.

Motores de corriente directa de rotación continua [Bolton, Mecatrónica, 2001]

Los principios básicos del funcionamiento de un motor son los siguientes:

Cuando en un campo magnético, una corriente pasa por un conductor, se ejerce una fuerza sobre el conductor (figura 2.3.3.1). Para un conductor de longitud L que lleva una corriente I en un campo magnético que tiene una densidad de flujo B y es perpendicular al conductor, la fuerza ejercida F es igual a BIL .

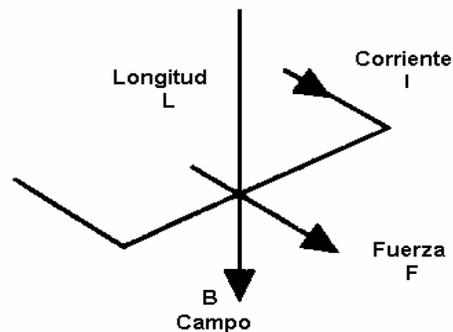


Figura 2.3.3.1. Fuerza sobre un conductor por el que pasa una corriente Tomada de Bolton, Mecatrónica, 2001

Cuando un conductor se desplaza dentro de un campo magnético, sobre él se induce una Fuerza Electromotriz (F.E.M.). Véase figura 2.3.3.2.

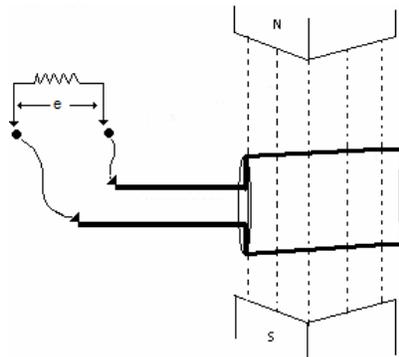


Figura 2.3.3.2. F.E.M. inducida. Tomada de Bolton, Mecatrónica, 2001

La F.E.M. inducida, e , es igual a la velocidad con la que cambia el flujo magnético Φ (el flujo magnético es igual al producto de la densidad de flujo por el área) que cubre el conductor (ley de Faraday), es decir, $e = -d\Phi/dt$. El signo menos indica que la dirección de la F.E.M. es en sentido opuesto al cambio que la produce (ley de Lenz); es decir, la dirección de la F.E.M. inducida es tal que produce una corriente que crea campos magnéticos que tienden a neutralizar el cambio en el flujo magnético asociado al devanado que produjo la F.E.M. Por ello, con frecuencia se le conoce como fuerza contraelectromotriz.

En la figura 2.3.3.3 se observan los elementos básicos de un motor de cd: Una espiral de alambre que gira de manera libre en medio del campo de un imán permanente. Cuando por el devanado pasa una corriente, las fuerzas resultantes ejercidas en sus lados y en ángulo recto al campo provocan fuerzas que actúan a cada lado produciendo una rotación. Sin embargo, para que ésta continúe, cuando el devanado pasa por la posición vertical se debe invertir la dirección de la corriente. En un motor de cd convencional, los devanados de alambre se montan en las ranuras de un cilindro de material magnético conocido como armadura. La armadura está montada en cojinetes y puede girar. Ésta se monta en el campo magnético producido por los polos de campo que pueden ser, en pequeños motores, por ejemplo, imanes permanentes o electroimanes, cuyo magnetismo se obtiene mediante una corriente que circula por los devanados de campo.

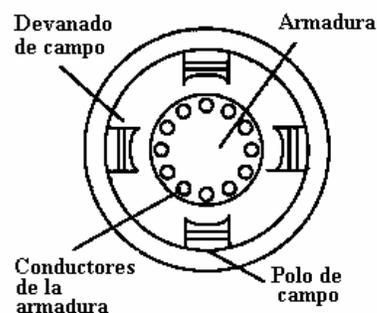
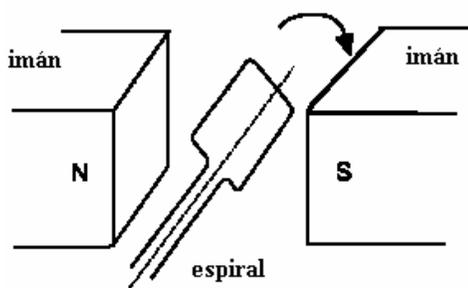


Figura 2.3.3.3. Elementos básicos, Motor CD Figura 2.3.3.4. Corte transversal, Motor CD
Figuras tomadas de Bolton, Mecatrónica, 2001

La figura 2.3.3.4 muestra el principio básico del funcionamiento de un motor de cd de cuatro polos, cuyo campo magnético se produce por devanados que transportan corriente. Los extremos de los devanados de la armadura se conectan con los segmentos adyacentes de un anillo segmentado conocido como conmutador y el contacto eléctrico con los segmentos se logra mediante contactos de carbón conocidos como escobillas.

Conforme la armadura gira, el conmutador invierte la corriente de cada uno de los devanados al desplazarse por los polos de campo. Esto es necesario a fin de que las fuerzas que actúan en el devanado sigan actuando en la misma dirección y la rotación continúe. La dirección de rotación del motor de cd se invierte al invertir la corriente de armadura o la corriente de campo.

2.3.4 Sensores

Un **sensor** es un dispositivo que detecta manifestaciones de fenómenos físicos. Para la medición de posición angular, se cuenta con elementos tales como *resolvers*, potenciómetros (resistencias variables), encoders de cuadratura y absolutos, entre otros. No obstante como se plantea en el capítulo de Diseño, en esta sección se detallan los potenciómetros.

Potenciómetros [Ollero, Robótica, 2001]

Actúan como divisores de potencial eléctrico. Se mide el desplazamiento mediante la variación de una resistencia. De esta forma puede emplearse una pista resistiva con un contacto móvil sobre la pista. Cabe distinguir entre potenciómetros lineales y rotatorios.

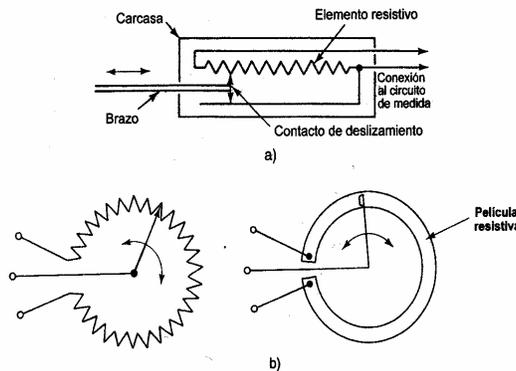


Figura 2.3.4.1. Potenciómetros: a) Lineal; b) giratorio.
 Figura tomada de Ollero, Robótica, 2001

El principio del funcionamiento lineal es: si se aplica una tensión V_e en la pista resistiva, se obtiene V_s en el contacto como función de la posición. El desplazamiento se obtiene como:

$$L_l = \frac{R_l L_T}{R_T} = \frac{V_s L_T}{V_e} \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.3.4.1}$$

Siendo R_T la resistencia total entre extremos de la pista resistiva, R_l la resistencia entre el contacto deslizante y el extremo; la longitud extrema del potenciómetro, L_T .

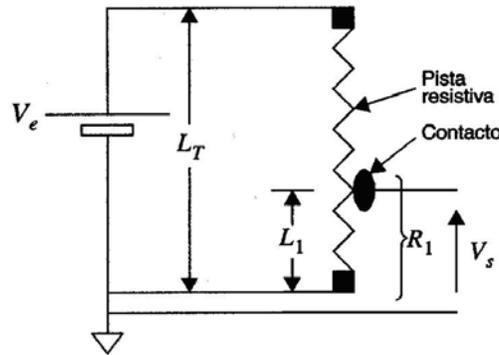


Figura 2.3.4.2. Se muestran los componentes de un potenciómetro lineal. Figura tomada de Ollero, Robótica, 2001

Para potenciómetros rotatorios el ángulo se obtiene como:

$$\theta_l = \frac{R_l \theta_T}{R_T} = \frac{V_s \theta_T}{V_e} \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.3.4.2}$$

Para construir físicamente las pistas resistivas se emplean películas de material resistivo: carbón, metal, cerámica conductora, plástico conductor, etc.

Existen también potenciómetros en los que la pista resistiva consiste en hilos de alta resistencia sobre aluminio anodizado. Empleando un hilo enrollado, la salida cambia en escalones al saltar de una espira a la otra. La resolución viene dada por la magnitud del escalón, tal como se ilustra en la figura 2.3.4.3:

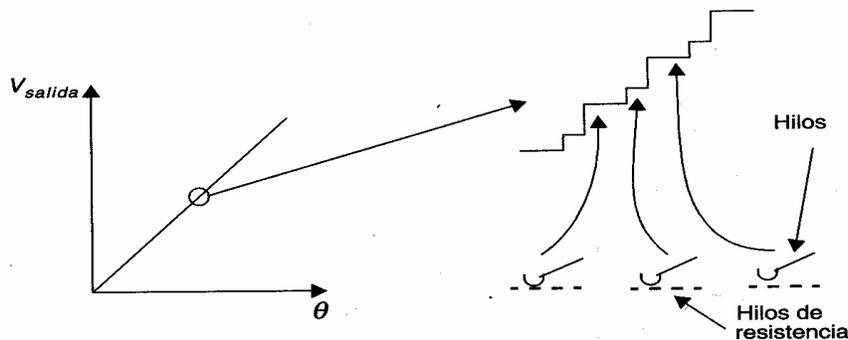


Figura 2.3.4.3. Resolución del potenciómetro, tomada de Ollero, Robótica, 2001

Conviene poner de manifiesto que las ecuaciones anteriores son correctas si no hay derivación de corriente en los contactos. Para evitar estas derivaciones suelen emplearse amplificadores de alta impedancia de entrada a la salida de los potenciómetros.

Otro aspecto de carácter práctico es la dificultad para medir giros de más de 300° en una vuelta debido a la necesidad de espacio para los contactos.

Los potenciómetros son sensores de relativamente bajo costo. Sin embargo, la precisión es limitada. En potenciómetros de calidad pueden conseguirse errores lineales del 0.1 %. En general, presentan problemas de fiabilidad debido a desgaste, fricciones, polvo, etcétera. Nótese también que la salida que suministran los potenciómetros convencionales es analógica, por lo que es necesario digitalizar la señal para aplicar control digital.

2.3.5 Teleoperación

Justo después de la Segunda Guerra Mundial, la investigación se enfocó hacia los manipuladores industriales y los robots emergieron lentamente. Al principio la atención se enfocó al desarrollo de robots dedicados a la producción de bienes. Estos robots realizaban tareas predictivas y repetitivas en un ambiente controlado. Trabajaban a altas velocidades y precisión, sin embargo realizaban tareas aburridas y poco amigables para el humano. Los principales motivos para la existencia de estos robots eran aumentar la eficiencia, confiabilidad, disponibilidad y calidad del producto. Al principio de los años setentas, el interés en otras aplicaciones creció, entonces aparecieron la teleoperación y la telemanipulación debido a situaciones particulares en las cuales resultaban ser peligrosas o incluso imposibles de ser ejecutadas directamente por operadores humanos [Stassen, *et al*, "Telemanipulation and telepresence", 1997]. Algunas áreas que destacan son las siguientes:

- Aplicaciones en el espacio u océano profundo.
- Plantas nucleoelectricas, celdas radioactivas y desecho de productos tóxicos.
- Operaciones militares, de la policía o de rescate.
- Telediagnóstico e inspección en ambientes peligrosos.
- Medicina: dispositivos de asistencia, prótesis, endoscopia para el tracto gastrointestinal, cirugía menos invasiva.

Conceptos

La telemanipulación está definida como la extensión de los sentidos humanos, y sus habilidades de manipulación, para acoplarlos a sensores y actuadores artificiales remotos. El término teleoperación puede ser empleado como sinónimo en un sentido genérico al referirse al control humano usando un dispositivo maestro-esclavo capaz de modificar posiciones. La telepresencia significa que un operador recibe información suficiente del robot teleoperado y su ambiente, mostrado en una forma suficiente y natural, casi como si el operador estuviese ahí [Sheridan, T.B. "Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control", 1992].

2.3.6 Conversión Analógico Digital

Conversión de señales analógicas a digitales [Bolton, Mecatrónica, 2001]

La conversión de señales analógicas a digitales implica la conversión de las primeras a palabras binarias. En la figura 2.3.6.1 se muestran los elementos básicos de la conversión analógica-digital.

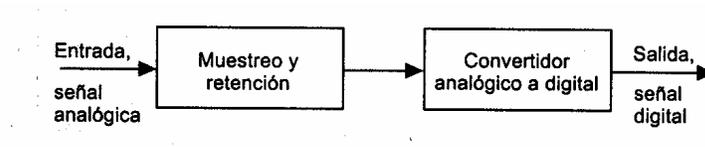


Figura 2.3.6.1. Conversión analógica digital. Tomada de Bolton, Mecatrónica, 2001

El procedimiento utilizado es un temporizador que proporciona al convertidor analógico a digital (CAD) impulsos de señal de duración regular y cada vez que éste recibe un impulso, muestrea la señal analógica. A continuación se utiliza una unidad de muestreo y retención para retener cada uno de los valores muestreados hasta que se produzca el siguiente impulso. La unidad de muestreo y retención es necesaria porque el convertidor analógico a digital requiere una cantidad finita de tiempo, conocido como tiempo de conversión, para convertir la señal analógica en una señal digital.

Cuando hay tres bits, existen $2^3 = 8$ posibles niveles de salida. Por lo tanto, dado que la salida del CAD para representar la entrada analógica sólo puede ser uno de estos ocho posibles niveles, existe un rango de entradas en las cuales la salida no cambia. Estos

ocho posibles niveles de salida se conocen como niveles de cuantización y la diferencia en el voltaje analógico entre dos niveles adyacentes se denomina intervalo de cuantización.

La longitud posible de la palabra determina la resolución del elemento, es decir, el mínimo cambio en la entrada que produce un cambio en la salida digital. El mínimo cambio en la salida digital es de un bit en la posición del menos significativo de la palabra, es decir, el bit que está en el extremo derecho. Por consiguiente, en una palabra con una longitud en bits la entrada analógica a escala total, V_{FS} , está dividida en 2^n piezas, por lo que el mínimo cambio detectable en la entrada, es decir, la resolución es $V_{FS} / 2^n$.

3. Diseño

El objetivo del proyecto es controlar un robot, para lo cual es necesario el diseño y construcción de un dispositivo capaz de transmitir señales de control provenientes del miembro superior de una persona hacia un robot con características y grados de libertad similares, con el fin de que el robot efectúe el mismo movimiento que la persona.

3.1 Especificaciones

Independientemente de la etapa de diseño en la que se encuentre el proyecto, las especificaciones de diseño servirán como referencia básica en todo momento. Las especificaciones son dinámicas, es decir, si en algún momento del desarrollo hay una buena razón para cambiar la especificación hay que hacerlo sin pensarlo. En la fase final del desarrollo del producto las especificaciones de diseño deberán estar en equilibrio con el diseño del producto incluso cuando las especificaciones podrán cambiarse.

Para las especificaciones de este proyecto se ha determinado que actualmente no hay un competidor nacional que podamos utilizar como referencia, razón por la cual se hará la comparación al dispositivo en desarrollo por la NASA llamado Robonauta (*Robonaut*). El cual es un robot antropomórfico teleoperado que pretende ejercer funciones de un “astronauta” humano. En la actualidad se opera a distancia por un operador, pero se pretende dar inteligencia artificial en un futuro. Sin embargo, el Robonauta ha tenido un numeroso equipo de colaboradores que han trabajado en las distintas áreas que implica un proyecto como el antes mencionado, razón por la cual, el presente proyecto pretende abarcar únicamente la parte del control que realice la interacción entre un operador y un robot antropomórfico.

3.1.1. **Medio ambiente.**- Se trabajará en un ambiente con condiciones típicas de la Ciudad de México, mientras que el Robonauta está diseñado para trabajar con las condiciones de presión y variaciones de temperatura que se experimentan en el espacio. Este proyecto estará en operación a temperatura ambiente.

3.1.2. **Vida en servicio.**- El Robonauta está en operación sólo en el tiempo que el vehículo espacial lo requiera, dependiendo de las necesidades de la NASA. El dispositivo

de este proyecto deberá trabajar alrededor de 12 horas en días hábiles y para lograr esta vida en servicio se deberá implementar un mantenimiento preventivo.

3.1.3. **Dimensiones.**- Al igual que en el proyecto de la *NASA*, el dispositivo propuesto deberá guardar las relaciones del brazo de un humano promedio, sin embargo para fines de realizar un modelo, se construirá un prototipo de menor tamaño.

3.1.4. **Peso.**- El Robonauta debió ser diseñado con cautela sobre este punto debido a que cada gramo que llega al espacio cuesta decenas de miles de dólares. En este proyecto el peso es una restricción para la carga de los motores que se emplearán.

3.1.5. **Materiales.**- El Robonauta tiene la necesidad de emplear materiales que resistan los cambios bruscos de temperatura que se experimentan en el espacio, además de que todos los dispositivos así como motores deben estar diseñados para trabajar en el vacío y gran parte de la protección que utiliza está dada por el traje espacial. En el proyecto a realizar se pretende emplear aluminio y plásticos.

3.1.6. **Procesos.**- El maquinado de precisión es esencial en las piezas de aluminio y acero utilizadas en el proyecto de la *NASA*. El proyecto en cuestión, emplearán piezas prefabricadas o en caso que se requiera, manufactura de piezas específicas en placas de aluminio.

3.1.7. **Escala de tiempo.**- Se han requerido años en el diseño del Robonauta, desde el 2001 hasta la fecha. Se propone asignar una semana para las especificaciones, dos meses para el diseño, un mes para la construcción, un mes para el desarrollo de programas, un mes de pruebas y otro mes para revisión.

3.1.8. **Capacidad de carga.**- El Robonauta está diseñado para levantar alrededor de 9.5kg. El proyecto en cuestión no levantará peso de algún objeto.

3.1.9. **Precisión.**- El dispositivo de la *NASA* reproduce fielmente los movimientos del operador en un rango cercano al 100%. Lo deseable para este proyecto es que alcance un porcentaje cercano a 100%, lo cual dependerá principalmente del control y los actuadores elegidos.

3.1.10. **Repetibilidad.**- El Robonauta tiene repetibilidad en el rango de 0-5 milímetros, sin embargo en este respecto, para este proyecto se evaluará 0-5 centímetros.

3.1.11. **Seguridad.**- El Robonauta es protegido contra el ambiente y requiere que cada componente funcione a la perfección. El proyecto considerará proteger de daños tanto al modelo funcional del robot y sus componentes, como al operador.

3.2. Diseño Conceptual

Se decidió estudiar los diferentes componentes del robot para integrar un dispositivo funcional con las características que las especificaciones indican.

Tabla 3.2.1 DIVISIÓN DE SISTEMAS

Sistema		Áreas	Elementos
Mecánico		Estructura de sostén y articulaciones	Piezas de plástico y aluminio prefabricadas
		Actuadores	
Electrónico	Instrumentación	Adquisición de datos	Sensores
	Control	Programación	Microcontroladores
	Energía eléctrica	Suministro de electricidad	Fuente de poder

3.2.1 Diagrama Conceptual de Sistemas

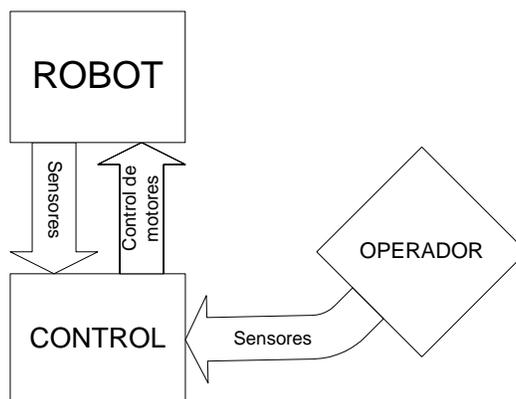


Figura 3.2.1. Se observan los tres sistemas básicos del campo de trabajo

3.2.2 Operador

El operador humano tendrá comunicación con los sistemas de control y del robot; de tal forma que el primero se comunicará a través de los sensores de posición angular implementados en el brazo del humano, mientras que el robot proveerá información visual al operador para la toma de decisiones.

3.2.3 Robot

Para efectos prácticos, se empleará LEGO[®] en la construcción del robot de configuración antropomórfica aunque con tres grados de libertad, no se modificarán componentes mecánicos ni la forma de las piezas, pero se le adicionarán sensores de posición angular en cada una de sus articulaciones. Las salidas del robot son información de posición angular captada y transmitida al “control” y sus entradas son señales de “encendido” y “sentido de giro” para cada motor.

3.2.4 Control

Las entradas del sistema de control son información de posiciones angulares provenientes tanto del operador como del robot; mientras que sus salidas son únicamente hacia el robot que le proporcionarán las señales de “encendido” y “sentido de giro” para cada motor. Estas salidas son el resultado del procesamiento de la información obtenida tanto del operador, como del robot. Se requiere controlar tres motores que mueven las respectivas articulaciones. Se ha elegido el microcontrolador PIC16F877 debido a los conocimientos que se tiene sobre él, además que sus características son las necesarias y suficientes para el proyecto. Considerando que tiene ocho canales de conversión analógico digital para los sensores y dos puertos de ocho bits digitales (TTL) que permiten el control de los motores, la programación es sencilla y puede adquirirse a bajo costo, por lo que este controlador es la mejor opción en la realización del proyecto.

3.2.5 Sensores

Las opciones para solucionar la adquisición de información angular son: a) potenciómetros, b) *encoders* (incrementales y absolutos) y c) fototransistores, entre otros. Sin embargo, los potenciómetros tienen la característica de emitir una señal analógica, la

cual permitirá el muestreo de la posición a cada momento, haciendo la programación más sencilla. Los potenciómetros permiten la recolección de datos en cualquier momento, se ocupan menor número de entradas hacia el microprocesador, son de bajo costo, no es necesario manufacturar, se adaptan a espacios reducidos, no requieren de componentes adicionales como resistencias calculadas, no necesitan más de tres cables para su conexión, lo cual también reduce material y espacio. Los sensores en el operador requerirán de un exoesqueleto para su sostén, el cual se armará con MECCANO®. El mantenimiento se realiza cambiando la pieza completa, sólo requiere desconectar tres terminales y colocar la refacción. En el mercado están disponibles y son de bajo costo. Es por eso que para este proyecto se ha decidido emplear estos divisores de voltaje.

3.3 Diseño de detalle

3.3.1 Descripción del Problema

Se desea convertir el movimiento de una persona en algunas señales eléctricas para controlar un robot con características similares a la anatomía humana. El robot debe tener los elementos necesarios para moverse como lo haría la persona y para que se pueda conocer su posición a cada momento.

3.3.2 Control y fase de potencia

Microcontrolador

Para el control y procesamiento de información se eligió al **PIC16F877** (28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontroller) el cual es una unidad de procesamiento central (CPU) con 35 palabras de instrucción. Puede operar a 20 MHz de entrada de reloj y hasta 200ns por ciclo de instrucción. Tiene hasta 8kx14 palabras de memoria de programa FLASH, 368 x 8 bytes de memoria de acceso aleatorio (RAM), 256 x 8 bytes en memoria programable eléctricamente borrable (EEPROM). Es posible la comunicación serial (RS-232), tiene 5 puertos disponibles (A, B, C, D, E), funciona en niveles TTL, convertidor analógico digital en ocho canales, entre otras características útiles para el proyecto. Del manual *PIC16F877* se tomó la información y la figura 3.3.2.1 donde se aprecia el dispositivo de forma general.

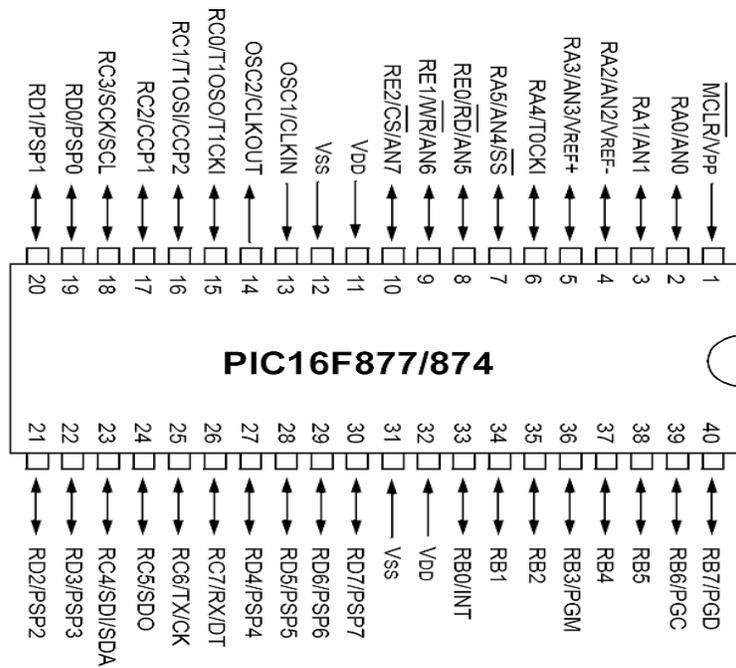


Figura 3.3.2.1. PIC16F877. Figura tomada del manual

Fase de Potencia

El dispositivo para controlar los motores, es el circuito integrado L293D de alto voltaje y alta corriente que posee cuatro canales que están diseñados para recibir señales TTL (*Transistor-Transistor Logic*) o DTL (*Diode-Transistor Logic*). Maneja cargas inductivas, tales como solenoides, motores a pasos y de corriente directa. Cuenta con una entrada de habilitación (*Enabled*) para dos canales. Cuenta con una entrada de poder aislada del circuito lógico de control que maneja distinto voltaje y corriente. Tiene además diodos internos como se ve en la figura 3.3.2.2.

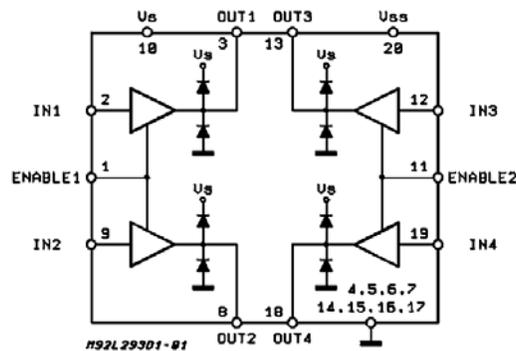


Figura 3.3.2.2. Esquemático del interior de circuito integrado L293D. Dibujo tomado de la hoja de especificaciones

3.3.3. Tabla de entradas y salidas

Las entradas y salidas se anotan con los respectivos nombres implementados en el PIC16F877.

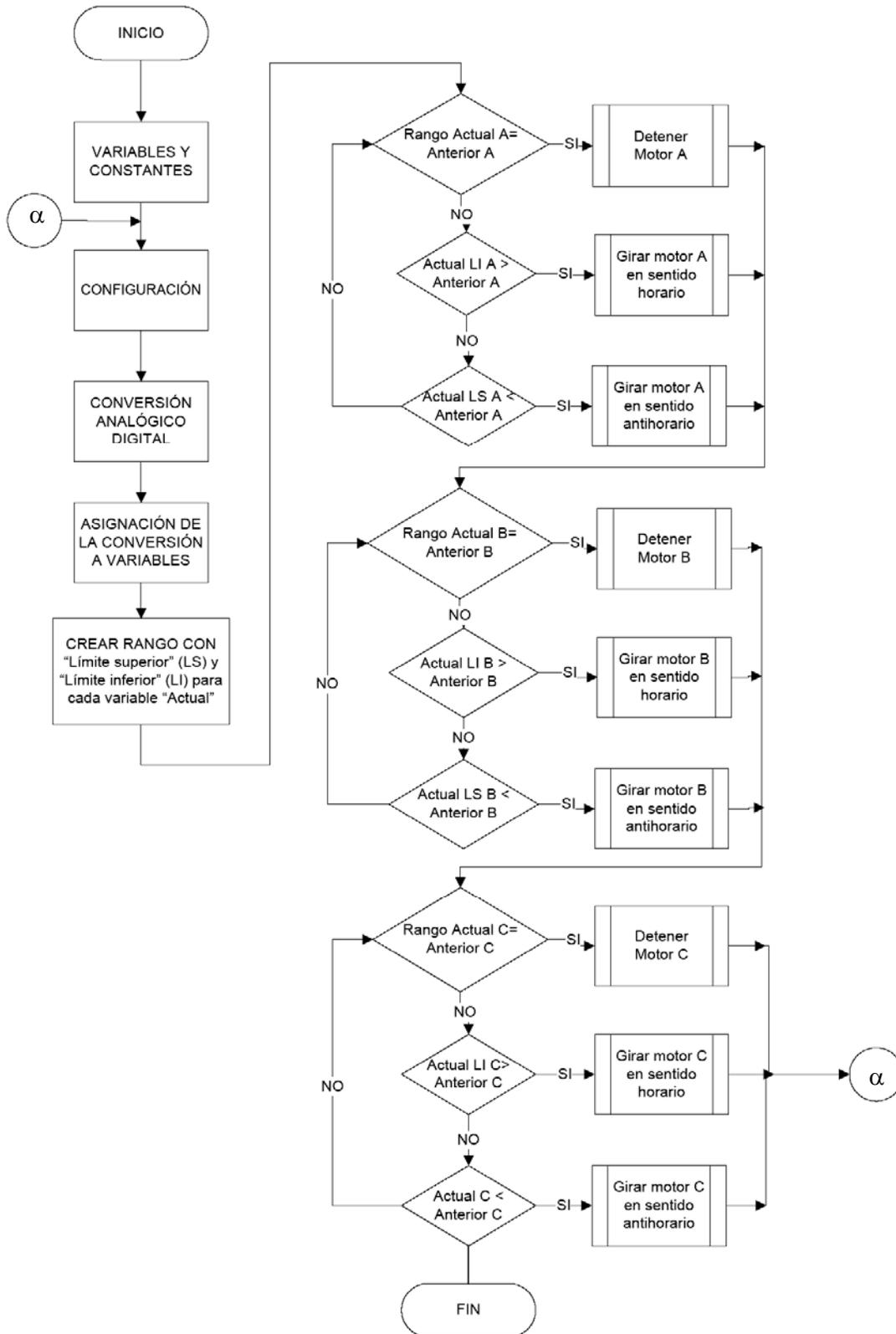
Tabla 3.3.3 1. Entradas/Salidas PIC16F877

Alias	Ubicación	Tipo	Descripción
ADC canal 1	Puerto A <0>	I	SENSOR operador 1
ADC canal 2	Puerto A <1>		SENSOR robot 1
ADC canal 3	Puerto A <2>		SENSOR operador 2
ADC canal 4	Puerto A <3>		SENSOR robot 2
ADC canal 5	Puerto A <5>		SENSOR operador 3
ADC canal 6	Puerto E <0>		SENSOR robot 3
Motor 1	Puerto B <0>	O	MOTOR 1 <i>enabled</i>
	Puerto B <1>		MOTOR 1 <i>data</i>
Motor 2	Puerto B <2>		MOTOR 2 <i>enabled</i>
	Puerto B <3>		MOTOR 2 <i>data</i>
Motor 3	Puerto B <4>		MOTOR 3 <i>enabled</i>
	Puerto B <5>		MOTOR 3 <i>data</i>

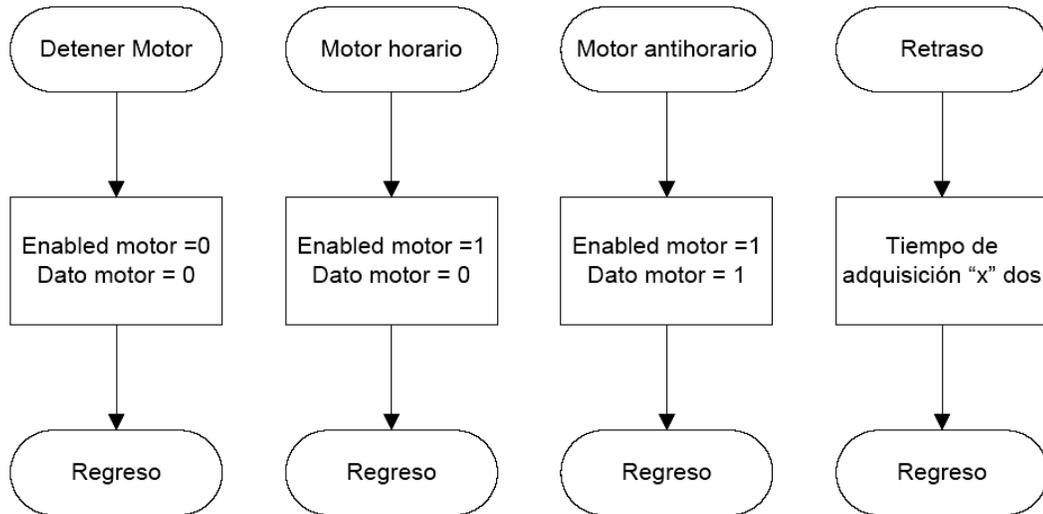
Las siglas *ADC* son del inglés *Analogic Digital Converter*, (convertidor analógico digital), mientras que *enabled* es el responsable de activar o desactivar al motor correspondiente y *data* es el encargado del sentido de giro del motor.

3.3.4. Diagramas de Flujo

Programa principal



Subrutinas



3.3.5 Diagramas de conexión

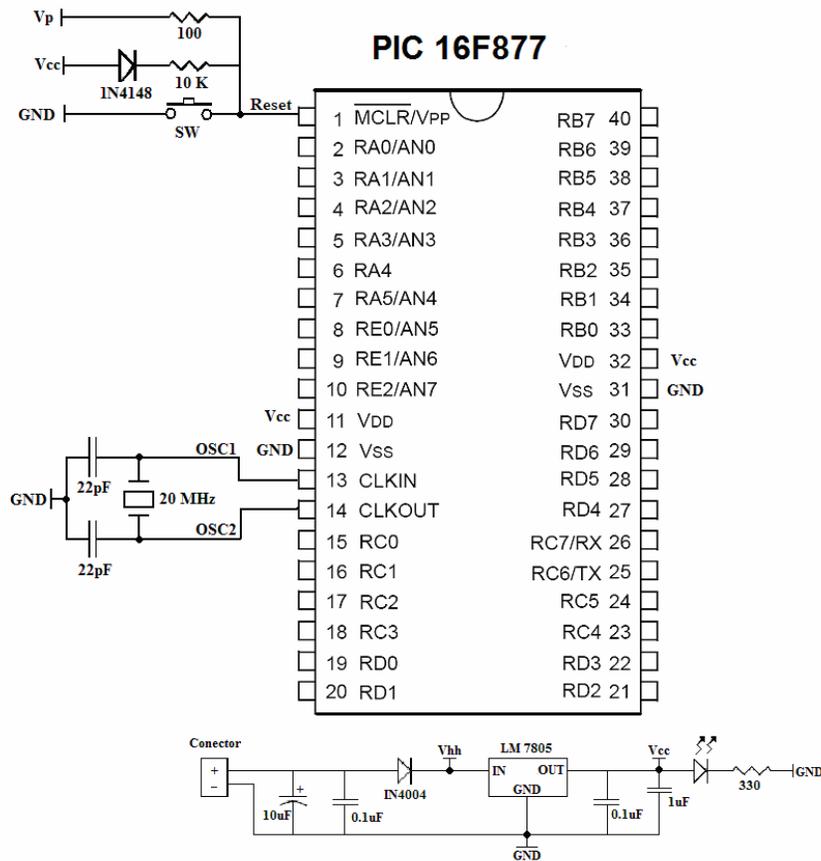


Figura 3.3.5.1. Conexión del Microprocesador a sus elementos básicos de operación

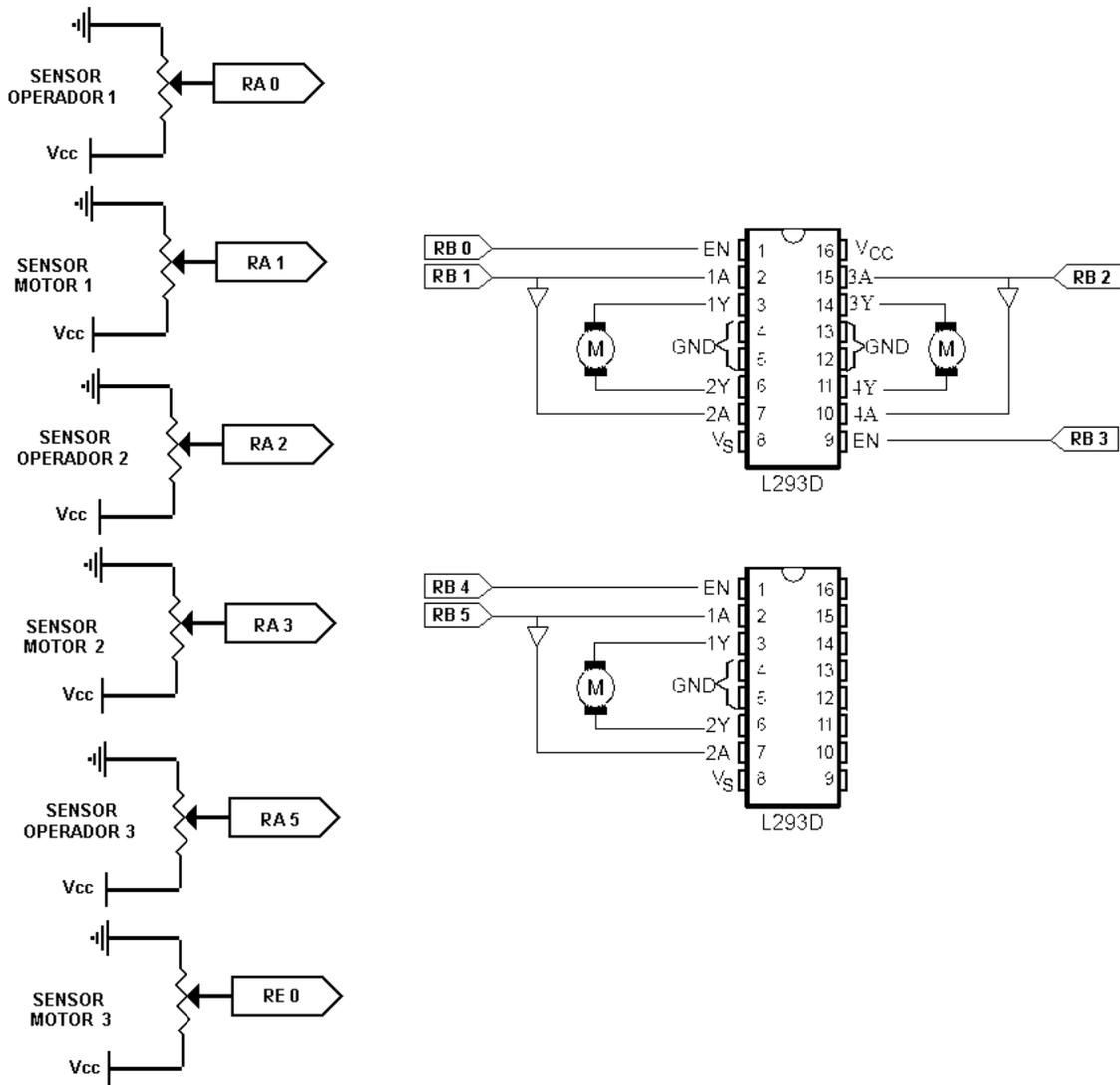


Figura 3.3.5.2. Conexiones de los potenciómetros a los canales de conversión analógico digital del PIC16F877. Señales para los motores del 1-3 con su fase de potencia.

3.3.6 Exoesqueleto

Es una estructura mecánica de sostén colocada en el exterior de alguna parte del cuerpo que no interfiere con su movimiento, en este caso en el brazo del operador se colocará un mecanismo como el que se muestra en la figura 3.3.6.1, el cual posee potenciómetros conectados en cada uno de los ejes de rotación. En el caso del hombro, se tienen dos potenciómetros porque ahí se concentran dos movimientos en diferentes ejes de rotación.

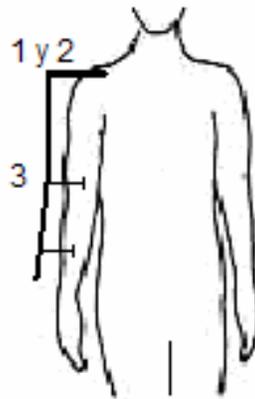


Figura 3.3.6.1. Los números indican los sensores ahí colocados, las líneas horizontales indican los sitios fijos al operador.

3.3.7 Descripción del Programa

Un potenciómetro capta el giro de la articulación y se trasmite al una entrada seleccionada del convertidor analógico-digital implementado en el PIC16F877, una vez que se convierta la señal en un número binario, el motor de cd se moverá en sentido horario o antihorario de acuerdo con las comparaciones programadas en dicho PIC.

En un principio el robot debe reconocer una posición conocida llamada “origen” o “HOME”, a partir de la cual se comenzarán los movimientos. La retroalimentación se obtiene de los potenciómetros acoplados al operador y los del robot.

4. Construcción

4.1 El robot

Se decidió que con las piezas prefabricadas de LEGO® se armó el modelo funcional empleando elementos mecánicos como engranes y tornillos sinfín, los cuales permitieron que las articulaciones no varíen su posición cuando a los motores se les quite el voltaje de alimentación. Así mismo, fue necesario reducir el peso de los elementos al mínimo para evitar sobrecarga de trabajo en los motores.

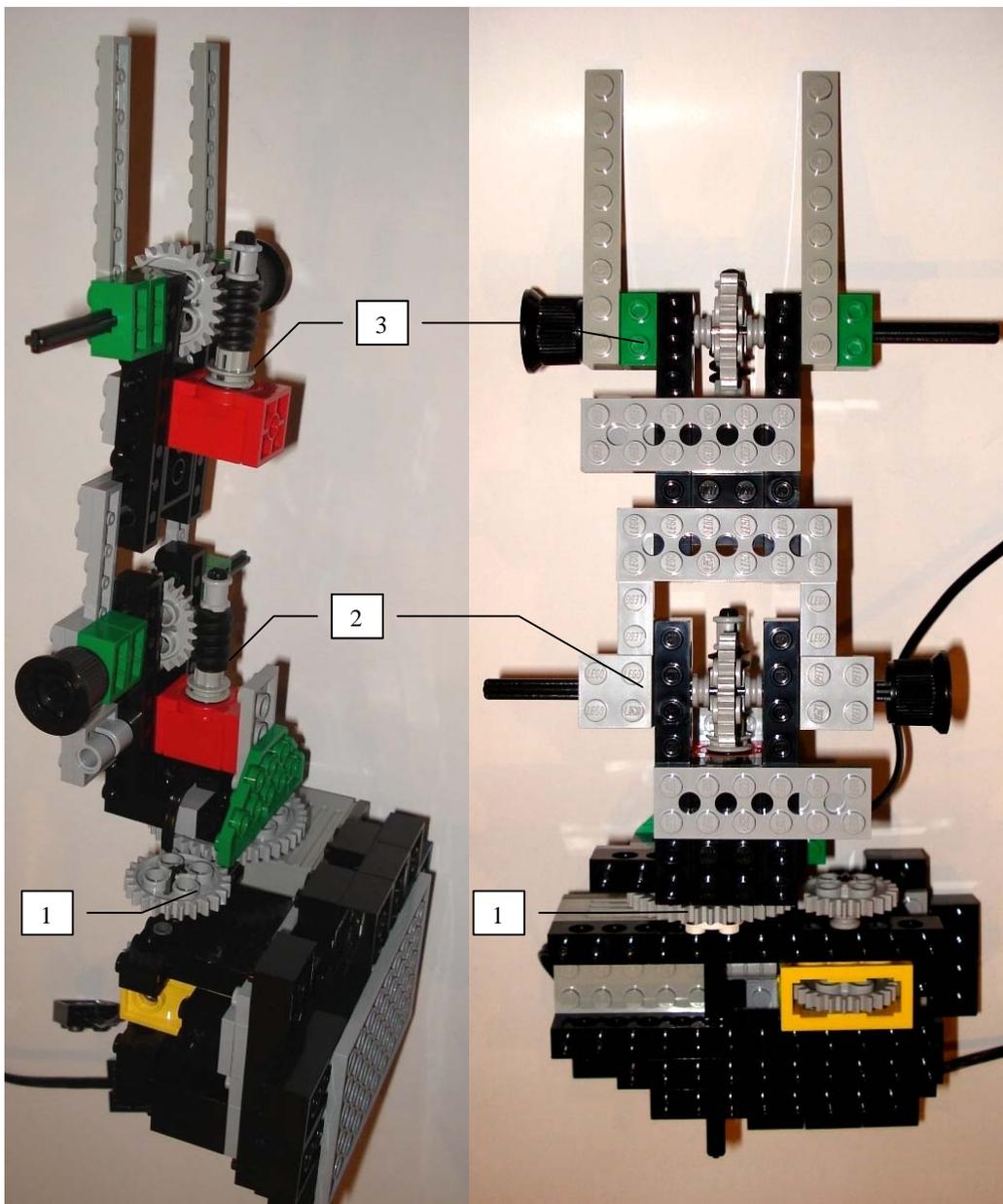


Figura 4.1.1 El modelo del robot, donde 1 corresponde a la “cadera”, 2 al “hombro” y 3 al “codo”

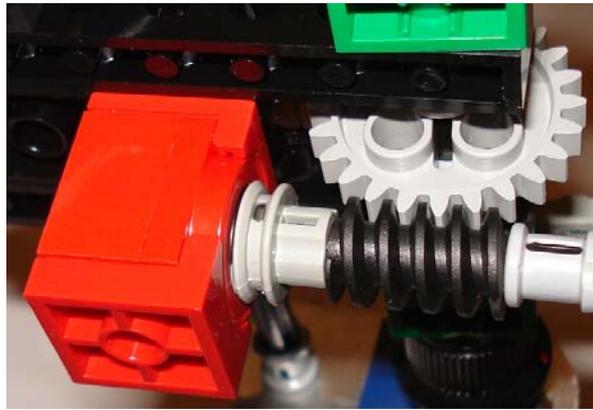


Figura 4.1.2 Se aprecia un tornillo sinfín corona con un micromotor de LEGO®, sistema empleado en las tres articulaciones

4.2 El exoesqueleto

Para colocar los sensores en el operador se requirió un mecanismo con los mismos grados de libertad que el robot armado con MECCANO® con los mismos sensores, con el fin de asegurar que los movimientos sean medidos con la mayor certeza posible y sin las variaciones entre distintos operadores. No obstante se tomaron medidas particulares de un sólo operador para las pruebas.

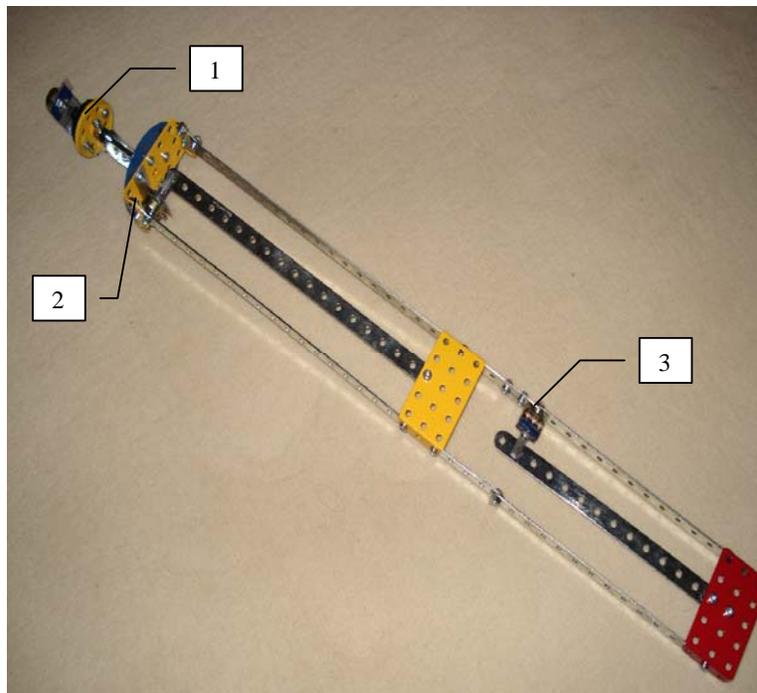


Figura 4.2.1 Exoesqueleto con sensores, donde 1 corresponde a la "cadera", 2 al "hombro" y 3 al "codo"



Figura 4.2.2 Articulación 1, mide la extensión posterior y flexión anterior del brazo desde el hombro.



Figura 4.2.3 Articulación 2, mide la aducción y abducción del brazo desde el hombro.

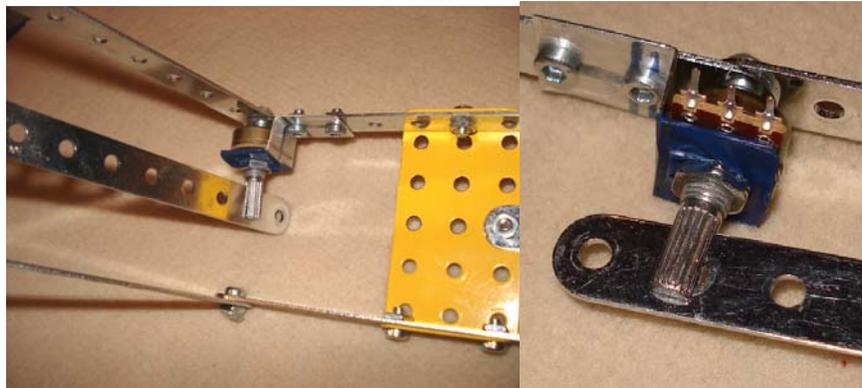


Figura 4.2.4 Articulación 3, mide la extensión y flexión del codo.

4.3 Los sensores

Como se ha visto en el exoesqueleto, los sensores son potenciómetros comerciales que miden entre 0 y 100 k Ω aproximadamente, los cuales son capaces de medir de 0 a 300° de posición angular, pero para los fines de este trabajo se decidió tomar sólo 180° para la articulación 1, 90° para la articulación 2 y 90° para la articulación 3. de tal forma que no será necesario dar la vuelta entera al potenciómetro debido a las restricciones de movimiento del robot *per se*.



Figura 4.3.1 Potenciómetro de 100 k Ω , soldado a sus respectivas terminales con su adaptación para el LEGO[®]

4.4 El control

La implementación electrónica del microprocesador PIC16F877 requirió el uso de cables y otros elementos electrónicos, además del respectivo programa que fue previamente diseñado, capaz de recolectar información y realizar las acciones correspondientes. Básicamente se programó en lenguaje “ensamblador” el diagrama de flujo que se puede consultar en el capítulo de Diseño.

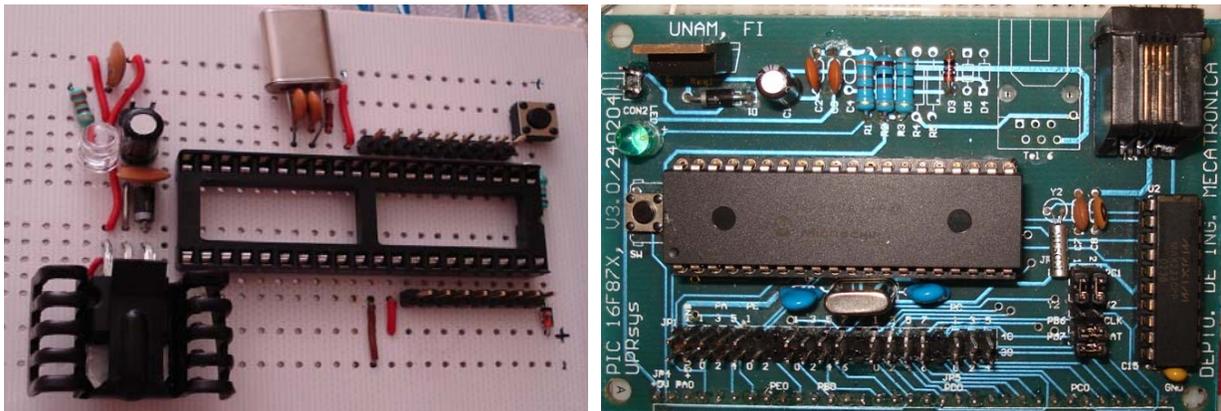


Figura 4.4.1 Fotos de una tarjeta de trabajo para PIC16F877 con sus respectivos elementos

5. Resultados

La implementación del modelo de robot antropomórfico con tres articulaciones rotacionales funciona con un motor de LEGO[®] por cada una de ellas. La posición de origen del robot está referida a la posición anatómica humana, pero rotada a 90° con respecto al plano horizontal.

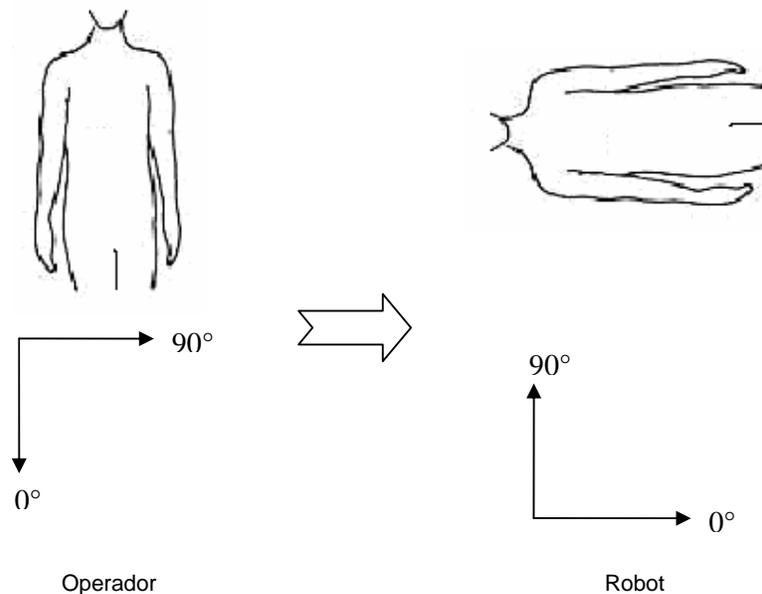


Figura 5.1 Ejemplo del cambio de la posición de referencia.

Los motores del robot se mueven con los comandos que le envía el microprocesador PIC16F877 después de convertir las señales analógicas provenientes de los potenciómetros acoplados al mecanismo del exoesqueleto colocado en el operador, el cual al realizar flexión anterior del brazo a 90° con respecto a la posición anatómica, gira el Motor 1 para colocar a la Articulación 1 en 90° con respecto a su posición de origen y si el operador deja el brazo en un ángulo de 45°, el motor correspondiente se mueve hasta lograr la posición de 45°; de esta forma, la posición angular en el robot depende de la que tenga el operador en un momento dado, variando $\pm 10^\circ$. Lo mismo ocurre con la abducción y aducción del brazo, donde el robot mueve su Motor 2 para alcanzar la posición deseada. Y por último, en la flexión y extensión del antebrazo, el robot mueve el Motor 3; las últimas dos articulaciones logran posicionarse con una precisión mayor, alrededor de 1 a 3 grados. Sin embargo, la precisión total del dispositivo es de ± 5 cm. El origen de estos errores es el movimiento entre los engranes que no ajustan en su totalidad. Y también se debe a la adaptación de los potenciómetros al LEGO[®], provocando un desplazamiento entre las piezas.

El tiempo que tarda el robot en llegar a la posición que se ha marcado por el operador, varía de acuerdo a la velocidad del motor correspondiente, ocasionando un retraso entre el movimiento del operador y el del robot.

La respuesta de los potenciómetros es adecuada y rápida. Lograron obtener la información para las posiciones requeridas y ayudó a que la velocidad de los actuadores fuese lenta, para evitar periodos de transición prolongados, evitando así movimientos indeseados que afectan la estructura del modelo.

En la siguiente figura se observan los eslabones del mecanismo del operador etiquetados como A, B y C. De la misma forma a, b y c que corresponden a los del robot en la posición de origen o inicial, que se ha copiado, si es que el robot estaba en otra orientación espacial.

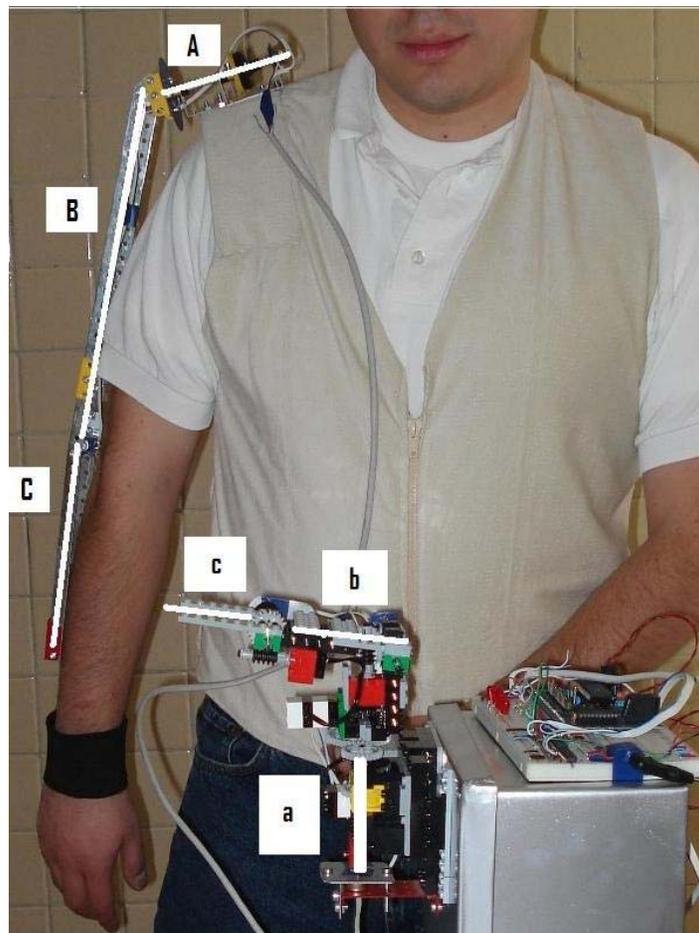


Figura 5.2 Se observan las referencias del operador con el robot

En esta otra imagen se aprecia que se ha movido el robot junto con el operador luego de copiar el movimiento con los motores correspondientes. Las referencias son las mismas.

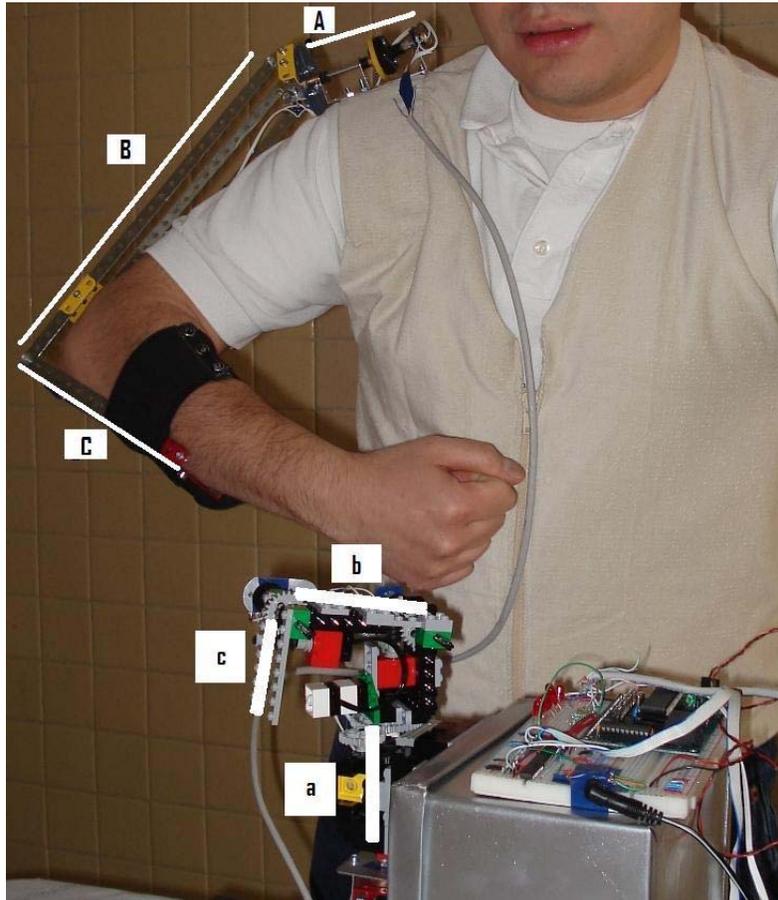


Figura 5.3 Se ilustra el cambio de una posición imitada por el robot

El movimiento que se imita por el robot es el último registrado en el operador, lo cual indica que no posee memoria capaz de “recordar” posiciones intermedias.

6. Conclusiones

A partir del trabajo realizado, se encontraron inconvenientes al trabajar con elementos desprendibles como es el LEGO[®], en la realización del modelo de robot de tres grados de libertad, sin embargo es didáctico y muy flexible.

La realización de un robot teleoperado resulta útil, tanto para realizar trabajos a distancia como para programar más rápido un manipulador. Además con los modelos propuestos en este trabajo se puede comprobar que el control con potenciómetros es sencillo de implementar y es de bajo costo.

En la actualidad existen en el mercado manipuladores con los grados de libertad de un brazo humano, los cuales tienen un control complejo, pero poco accesible para cualquier persona, lo que hace a la teleoperación, propuesta en el presente trabajo, una herramienta flexible en el manejo de estas máquinas.

Por otra parte, el rediseño de estos manipuladores podría ser un campo de investigación, porque en ocasiones son demasiado grandes y pesados para el trabajo limitado que realizan, es decir, se tendría que evaluar el costo beneficio.

Ya se había mencionado, pero se hace hincapié en la propuesta de programar robots por este medio, en otras palabras, se podría hacer que la captura de datos lograda por el exoesqueleto y el robot, se empleen para grabar posiciones de éste y posteriormente reproducirlas sin necesidad de la presencia del estímulo del operador.

Como parte del trabajo había la posibilidad de hacer una interfaz gráfica que dibujara las posiciones del robot a cada momento en una computadora, sin embargo por la falta de tiempo, este trabajo se puede implementar posteriormente.

Se podría mejorar el diseño del robot presentado en este trabajo, colocando todo el peso en la base y así se reducirían considerablemente las inercias o las posiciones singulares que afectan a los actuadores y a los elementos de sostén. Incluso se pueden revalorar el tipo de actuadores empleados para mejorar la resolución de los movimientos e incrementar la fuerza del robot. Se sugiere el empleo de micromotores de alto torque en adición a usar músculos neumáticos para aumentar la fuerza y precisión.

El mecanismo propuesto para el exoesqueleto con los sensores, cumplió con el objetivo de captar información de una persona y transferirla a un robot, sin embargo este prototipo fue fabricado con piezas de formas y tamaños predeterminados, pero se podría fabricar con aluminio u otro metal que conserve su forma, que sea ligero y que no pierda rigidez al hacerse láminas delgadas y largas como este exoesqueleto.

7. Referencias

1. Vertut J., Coiffet P., Robots; Teleoperation, evolution technologies, Editions Hermes, Paris, 1985.
2. Gough, V and Whitehall, S. (1962), "Universal tyre test machine," *Proc.9th Int. Technology Congr. FISITA*, pp. 117–137.
3. NSSDC Master Catalog Display: Spacecraft, Página electrónica consultada en septiembre de 2006, disponible en <<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/tmp/1970-095A.html>>
4. Sandia National Laboratories Albuquerque, SMART MACHINES: The Robotics Revolution, A quarterly research & development journal, Volume 2, no. 2, 2000
5. Cagliani, M.A. Historia de los robots, página electrónica consultada en septiembre de 2006, disponible en < <http://www.saber.golwen.com.ar/hrobot.htm>>
6. NASA. USA. 2006, "Robonaut" Disponible en Internet <<http://robonaut.jsc.nasa.gov/>> consultado en Marzo de 2006
7. Fisher W., Price C., Space Station Freedom External Maintenance Task Team. NASNJSC Pub., 1990.
8. Jacobsen S. et al., "Design of the Utah/MIT dextrous hand," in Proc. 1986 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, San Francisco, Apr. 7-10, 1986.
9. Nordin, M. Frankel, V.H. Biomécanica básica del sistema musculoesquelético. McGraw Hill-Interamericana, 3ª Ed. España, 2001. Cap. 12 y 13
10. Moore, K. Anatomía humana con orientación clínica. Panamericana, 3ª Ed. España, 1993.
11. Ollero, A. Robotica, Manipuladores y robots móviles. Marcombo, España, 2001. pp 168-178
12. Schilling, R., Fundamentals of robotics, Analysis and control. Prentice Hall, United States, 1990. pp 261
13. Bolton, W. "Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en ingeniería mecánica y eléctrica." Ed. Alfaomega, México, 2001
14. Stassen, H.G., Smets GJ.F. "Telemanipulation and telepresence" Elsevier Science Ltd. Control Eng. Practice, Vol. 5, No. 3, pp. 363-374, 1997
15. Sheridan, T.B. "Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control". MIT Press, Cambridge, M.A., 393 p. 1992
16. SGS-Thompson, Microelectronics. Push-Pull four channel driver with diodes L293D, Italia, 1996
17. Microchip Technology Inc. PIC16F87X Datasheet . Estados Unidos, 2001
18. Capek, K. Robots Universales de Rossum, Checoslovaquia, 1920
19. J. P. Muirhead, *Origin and Progress of the Mechanical Inventions of James Watt*, London, 1854
20. Devol, G. Dual-armed multi-axes program controlled manipulators, United States Patent, 1975