

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MANO ROBÓTICA
CONTROLADA MEDIANTE UN GUANTE SENSORIZADO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

DIEGO IVÁN PILAQUINGA ABADIANO
diego20mc@hotmail.com

DIRECTOR: DR. LUIS CORRALES
luisco5049@yahoo.com

Quito, Julio 2009

DECLARACIÓN

Yo, Diego Iván Pilaquina Abadiano, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Diego Iván Pilaquina Abadiano

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diego Iván Pilaquina Abadiano, bajo mi supervisión.

Dr. Luis Corrales
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento más sincero a Dios por concederme la dicha de vivir; a mis padres, quienes son mi apoyo, luz y guía, quienes me brindaron con generosidad su amor mientras trabajaba en la elaboración de este trabajo de investigación. De igual forma doy las gracias a todas aquellas personas que fueron mi compañía y apoyo durante toda mi vida universitaria, quienes me enseñaron a formar mi carácter y ser cada vez mejor persona. A mis amigos/as, quienes estuvieron siempre allí en las buenas y en las malas, y en general a todas aquellas personas que se cruzaron en mi vida y que de una u otra forma contribuyeron a lograr mi objetivo. Además, gracias especiales al Dr. Luís Corrales, por haberme asesorado y dirigido sobre el contenido y el desarrollo de los temas del presente proyecto de titulación.

DEDICATORIA

El presente escrito lo dedico con todo mi amor a mis padres Martha y Ángel, a mi hermano Paúl y en un sentido muy especial a mi abuelita Magdalena.

CONTENIDO

| | Páginas |
|---------------------------|----------------|
| RESUMEN | i |
| PRESENTACIÓN | iii |

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES SOBRE LA MANO HUMANA

| | |
|--|----|
| 1.1 La mano humana y sus movimientos | 1 |
| 1.2 La robótica | 6 |
| 1.3 Robótica médica | 8 |
| 1.4 Manos robóticas | 16 |
| 1.5 Guantes sensorizados | 21 |

CAPÍTULO 2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MANO ROBÓTICA Y GUANTE SENSORIZADO

| | |
|--|----|
| 2.1 Diseño y construcción del guante sensorizado | 26 |
| 2.1.1 Arquitectura del sistema | 26 |
| 2.1.2 Guante | 27 |
| 2.1.3 Diseño del dispositivo fotoeléctrico sensor | 28 |
| 2.1.4 Ubicación de los dispositivos sensores en el guante | 29 |
| 2.1.5 Fuente de alimentación del guante sensorizado | 30 |
| 2.1.6 Acondicionamiento de los dispositivos sensores | 30 |
| 2.1.7 Selección de datos | 35 |
| 2.1.8 Microcontrolador PIC16F876A | 36 |
| 2.1.9 Interfaz RS-232 | 38 |
| 2.1.10 Circuito implementado en el guante sensorizado | 39 |
| 2.2 Diseño y construcción de la mano robótica | 41 |
| 2.2.1 Arquitectura del sistema | 41 |
| 2.2.2 Estructura mecánica | 42 |

| | |
|---|----|
| 2.2.3 Fuentes de alimentación de la mano robótica | 49 |
| 2.2.4 Sensores de posición | 51 |
| 2.2.5 Selección de datos | 53 |
| 2.2.6 Interfaz RS-232 | 53 |
| 2.2.7 Microcontroladores | 54 |
| 2.2.8 Aislamiento | 58 |
| 2.2.9 Etapa de salida | 59 |
| 2.2.10 Circuito de fuerza | 62 |
| 2.2.11 Actuadores | 63 |
| 2.2.12 Circuito implementado en al mano robótica | 65 |

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL

| | |
|--|-----|
| 3.1 Diseño del programa del PIC 16F876A (PIC1) utilizado en el guante sensorizado | 68 |
| 3.1.1 Programa principal del PIC1 | 68 |
| 3.1.2 Interrupción del PIC1 | 79 |
| 3.2 Diseño del programa del PIC 187F452 (PIC2) para el control de la mano robótica | 81 |
| 3.2.1 Programa principal del PIC2 | 82 |
| 3.2.2 Interrupción del PIC2 | 98 |
| 3.3 Diseño del programa del PIC 167F876A (PIC3) para generar PWM de salida | 101 |
| 3.3.1 Programa principal del PIC3 | 101 |
| 3.3.2 Interrupción del PIC3 | 103 |
| 3.4 Programa del PC | 106 |

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

| | |
|--|-----|
| 4.1 Posición inicial | 110 |
| 4.2 Comunicación guante – mano robótica | 111 |
| 4.3 Respuesta de los dedos al guante sensorizado | 111 |

| | | |
|-----|------------------------------------|-----|
| 4.4 | Envío de ordenes desde la PC | 114 |
| 4.5 | Prueba de posición angular | 116 |

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | | |
|-----|-----------------------|-----|
| 5.1 | Conclusiones | 129 |
| 5.2 | Recomendaciones | 131 |

| | |
|---|------------|
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 132 |
|---|------------|

ANEXOS

ANEXO A

MANUAL DE USUARIO

ANEXO B

ESQUEMÁTICOS Y CIRCUITOS IMPRESOS

ANEXO C

HOJA DEL CIRCUITO INTEGRADO CD4067BE

ANEXO D

HOJA DE DATOS DEL OPTOACOPLADOR 4N25

ANEXO E

HOJA DE DATOS DEL SENSOR SG-BC

ANEXO F

HOJA DE DATOS DEL CIRCUITO INTEGRADO MAX 232

ANEXO G

HOJA DE DATOS DEL LOS TRANSISTORES TIP110 Y TIP 127

RESUMEN

En este proyecto se diseña y se construye una mano robótica capaz de emular el movimiento de una mano humana, controlada por un guante sensorizado o por un computador.

El prototipo de captura de la posición de las articulaciones de los dedos tiene como base un guante al cual se le acoplaron quince sensores fotoeléctricos, uno en cada articulación que conforman los dedos de una mano humana. De tal manera que al doblar los dedos es posible medir el ángulo de flexión.

Se diseñó una mano mecánica antropomórfica provista de cinco dedos, con tres grados de libertad en cada uno, capaz de emular los movimientos de flexión de los dedos y con dimensiones muy parecidas a las de una mano humana. A esta mano se le acoplaron micro-motores DC para el movimiento de cada articulación y sensores de posición para el control de los movimientos.

El hardware de control está basado básicamente en tres microcontroladores, uno para el procesamiento de los datos del guante sensorizado y dos para el control de la mano robótica.

Las señales provenientes de los sensores del guante son seleccionadas mediante un barrido por medio de un multiplexor analógico cuya salida se conecta a un puerto de conversión A/D del microcontrolador del guante sensorizado. Estos valores se los relaciona con un ángulo y son enviados cuando el control de la mano robótica los requiere. La transmisión se la realiza mediante la interfaz RS-232 a una velocidad de 57600 baud/s.

Se determinó que el mejor algoritmo de control es un controlador tipo PID, el mismo que esta implementado en el microcontrolador encargado de controlar los movimientos de la mano robótica. Se implementó un controlador PID para cada articulación, siendo un total de quince. Este microcontrolador toma los valores transmitidos por el guante o por el computador, los compara con los valores de la posición de la mano robótica, ejecuta el algoritmo de control y el

resultado lo transmite utilizando la interfaz SPI hacia el tercer microcontrolador encargado de generar quince señales PWM para poder ser convertidas a análogas y así acondicionarlas a los voltajes requeridos por los actuadores.

Finalmente, se diseñó un software en el computador capaz de controlar la mano robótica. Para ello se utilizó el paquete computacional LabView 6.1.

Las pruebas realizadas mostraron que la diferencia entre el ángulo real de las articulaciones de los dedos y aquellas en las que se posiciona la mano robótica difieren con un error de aproximadamente $\pm 1.55\%$ cuando es controlado por el guante sensorizado y $\pm 0.46\%$ cuando es controlado por el computador.

PRESENTACIÓN

Tomar un objeto y manipularlo con las manos es una tarea sumamente sencilla, que parece natural, muy simple y sin ningún tipo de complicaciones ya que los seres humanos la realizan sin esfuerzo. El problema surge cuando se quiere otorgar esta misma habilidad a una máquina, tarea nada fácil de implementar. Pero actualmente hay muchas empresas que han dedicado muchos años de investigación para tratar de imitar los movimientos lo más exacto posible a una mano humana real.

El presente proyecto busca realizar el diseño de una mano robótica provista de 5 dedos cada uno con tres grados de libertad, controlados a través de un guante sensorizado o a través de un computador. El proyecto está estructurado de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se presentan los conceptos básicos de este proyecto, tales como la anatomía de una mano humana, los fundamentos básicos de la robótica, clasificación y las manos robóticas existentes.

El diseño y la construcción de esta mano robótica, el guante sensorizado, así como los circuitos eléctricos necesarios para darle la movilidad planteada, en otras palabras el hardware necesario será analizado en el Capítulo 2.

Una vez terminado el hardware necesario se necesita de un cerebro que permita interpretar las señales obtenidas de los sensores, procesarlas y decidir que acción se debe ejercer hacia los actuadores, estas se las realizan por medio de microcontroladores PIC, los cuales cuentan con programas de control que realizan todas las acciones antes mencionadas. Esto se analiza en el Capítulo 3, en el cual se muestran las diferentes subrutinas utilizadas en los programas de control, así como los diagramas de flujo de cada una de ellas.

Posteriormente, en el Capítulo 4 se muestran las pruebas del funcionamiento del conjunto mano robótica - guante sensor, con las debidas correcciones tanto

de hardware como de software para tener un diseño adecuado, buscando siempre llegar a los objetivos buscados.

Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las Conclusiones y Recomendaciones que se generan en el desarrollo de este proyecto con el fin de ayudar a futuras investigaciones.

En cuanto a los anexos, estos se componen de las siguientes partes:

En el Anexo A se encuentra toda la información de cómo poner en funcionamiento a la mano robótica, es decir el manual de usuario.

Todo lo que se refiere a los gráficos de los circuitos impresos con sus respectivos diagramas esquemáticos se encuentran en el Anexo B.

En el Anexo C se presentan las hojas de datos del circuito integrado CD4067BE.

Además, Anexo D se presentan las hojas de datos para el opto-acoplador 4N35.

En el Anexo F se presentan las hojas de datos del sensor SG-2BC.

Y por último, en el Anexo G se presentan las hojas de datos del transistor TIP110.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES SOBRE LA MANO HUMANA

El presente proyecto de titulación tiene como objetivo general, diseñar y construir una mano mecánica capaz de emular el movimiento de una mano humana, controlada por un guante sensorizado y por un computador.

En este capítulo se presentan los conceptos generales que intervienen en el desarrollo del proyecto, partiendo desde el estudio de la mano humana y sus destrezas, hacia los conceptos relacionados con la robótica, manos robóticas y guantes con sensores existentes.

1.1 LA MANO HUMANA Y SUS MOVIMIENTOS.

El estudio de la anatomía de la mano humana es muy amplio y complejo, debido a la cantidad de huesos que intervienen en ella. El presente proyecto requiere conocer los aspectos básicos de la estructura anatómica de la mano, así como sus movimientos. Por ello, a continuación se describen brevemente los mismos.

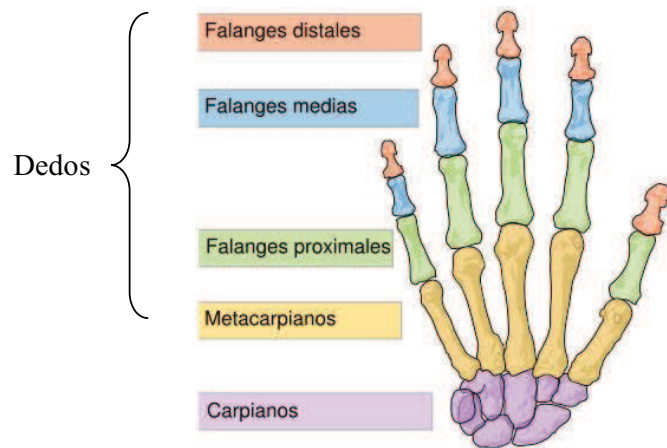
Las manos son dos importantes partes del cuerpo humano, prensiles y con cinco dedos cada una, localizadas en los extremos de los antebrazos. Abarcan desde la muñeca hasta la yema de los dedos en el ser humano. Son el principal órgano para la manipulación física del medio. La punta de los dedos contiene algunas de las zonas con más terminaciones nerviosas del cuerpo humano, son la principal fuente de información táctil sobre el entorno, por eso el sentido del tacto se asocia inmediatamente con las manos.

Como en los otros órganos pares (ojos, oídos, piernas), cada mano, está controlada por el hemisferio cerebral del lado contrario del cuerpo. Siempre hay un hemisferio cerebral dominante sobre el otro, el cual se encargará de actividades como la escritura manual, el manejo de los utensillos al alimentarse, entre otras. De esta forma, el individuo podrá ser zurdo, si la

predominancia es de la mano izquierda (siniestra) o diestro si es de la derecha (diestra); este es un rasgo personal de cada uno.

1.1.1 PARTES DE LA MANO HUMANA [1]

La mano humana se divide en tres regiones secundarias: carpo, metacarpo y dedos. En la Figura 1.1 se ilustra una gráfica con las partes de la mano humana.



Fuente: Scheme human hand bones-en.svg

Figura 1.1 Partes de la mano

1.1.1.1 CARPO

Lo forman 8 huesos cortos dispuestos en dos filas superpuestas entre sí. De afuera hacia adentro, la primera fila está constituida por los huesos escafoides, semilunar, piramidal y pisiforme, y la fila inferior, por los huesos: trapecio, trapezoide, hueso grande y hueso ganchoso.

El carpo se articula por arriba directamente con el radio e indirectamente con el cubito y por abajo, con los cinco metacarpianos.

1.1.1.2 METACARPO

Parte de la mano comprendida entre el carpo y los dedos, lo forman los huesos metacarpianos que presentan un cuerpo y dos extremidades. De afuera hacia

[1] TAPIA, Jorge. Anatomía Humana. Quito: Panorama S.A., Capítulo 5, 118p-130p

adentro se numeran del 1 al 5 y tienen la forma de huesos largos que se articulan proximalmente con el carpo y distalmente con las primeras falanges.

1.1.1.3 DEDOS

Son cada una de las prolongaciones que se encuentran en la mano. El nombre de los cinco dedos de fuera a dentro, con la palma hacia arriba son los siguientes: Pulgar, también conocido como “dedo gordo”; Índice, Corazón, también conocido como "dedo medio", "mayor" o "cordial"; Anular y Meñique también conocido como “dedo pequeño”.

El esqueleto de los dedos está constituido por las falanges, que pueden ser denominadas de las tres maneras: proximal, media y distal; primera, segunda y tercera y; falange, falangina y falangeta. Esto se lo puede observar en la Figura 1.2.



Fuente: Resurrection Health Care

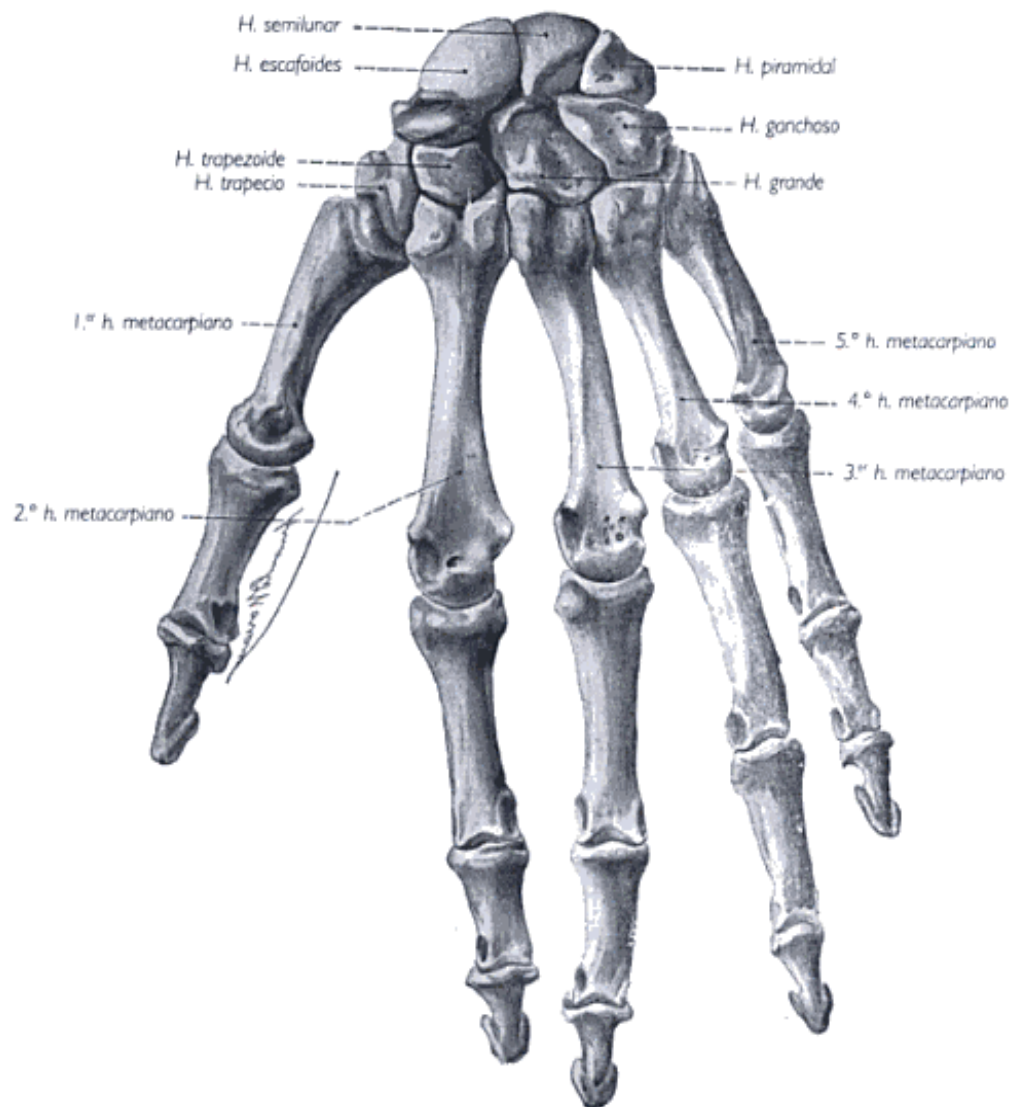
Figura 1.2 Anatomía del dedo humano

Existen tres falanges en los cuatro últimos dedos, y en el primer dedo o pulgar está ausente la falange media y solo presenta la proximal y distal.

Estas falanges se unen mediante articulaciones. El dedo humano está compuesto por tres articulaciones principales:

1. Articulación metacarpofalangeal (MCP): Que une la falange metacarpiana y la proximal de un dedo o pulgar.
2. Articulación interfalángica proximal (PIP): localizada entre las falanges media y proximal del dedo.
3. Articulación interfalángica distal (DIP): ubicada entre las falanges media y distal del dedo.

En la Figura 1.3 se puede observar con más detalle cada uno de los huesos que conforman la mano humana.

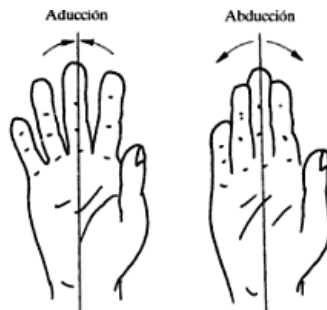


Fuente: ROUVIERE Henry, Anatomía Humana

Figura 1.3 Huesos de la mano humana

1.1.2 MOVIMIENTOS [2]

En cuanto a los movimientos de la mano, la articulación de la muñeca tiene dos grados de libertad y soporta la totalidad de cualquier esfuerzo que se realiza con la mano. Los dedos también tienen dos grados de libertad en su articulación con la palma, llamada también articulación metacarpofalangeal, ya que articula la falange proximal con el hueso metacarpiano. Un grado de libertad corresponde a los movimientos de abducción y adducción, movimientos laterales que permiten abrir los dedos, este movimiento es muy limitado. El otro grado de libertad corresponde al movimiento de flexión el cual es muy amplio. Las Figuras 1.4 y 1.5 ilustran los movimientos de los dedos.



Fuente: PALASTANGA Niguel, Anatomía y movimiento humano

Figura 1.4 Movimientos de adducción y abducción de los dedos



Fuente: PALASTANGA Niguel, Anatomía y movimiento humano

Figura 1.5 Movimiento de flexión de los dedos

El pulgar tiene una gran movilidad la cual es clave para el agarre de los objetos y, los otros cuatro dedos se mueven de manera limitada en sentido lateral aunque su capacidad de flexión, para abrir y cerrar la mano es muy buena. Esta capacidad de flexionar los dedos es muy importante para la habilidad de

[2] LAUREN BANKS, Jessica. Design and Control of an Anthropomorphic Robotic Finger with Multi-point Tactile Sensation. <<http://www.ai.mit.edu/research/abstracts/abstracts2001/humanoid-robotics/03banks.pdf>> [Consulta: Abril del 2008]

atrapar objetos y mantenerlos con seguridad. Las técnicas de agarre fueron clasificadas por Schlesinger en seis categorías distintas: agarre cilíndrico, de punta, de gancho, de palma, esférico y de lado, como es mostrado en la Figura 1.6.

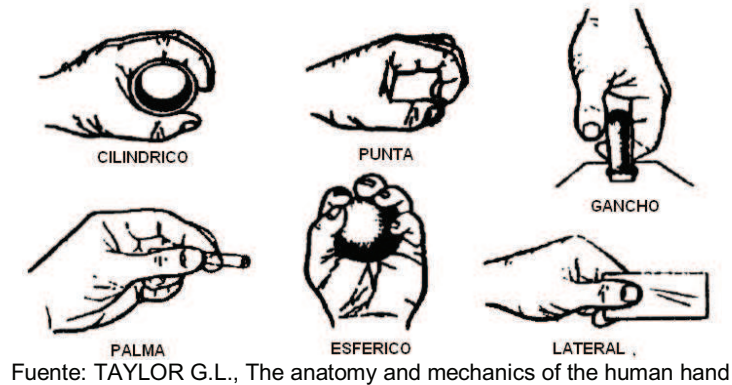


Figura 1.6 Configuraciones de agarre de la mano humana

1.2 LA ROBÓTICA

Se define como robótica a la ciencia encaminada a diseñar y construir aparatos y sistemas capaces de realizar tareas propias de un ser humano [3]. El término robótica se le atribuye a Isaac Asimov, así mismo este término procede de la palabra "robot" cuya definición adoptada por el Instituto Norteamericano de Robótica aceptada internacionalmente es: "Manipulador multifuncional y reprogramable, diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, mediante movimientos programados y variables que permiten llevar a cabo diversas tareas".

La palabra "robot" aparece por primera vez en 1921 en la obra teatral R.U.R (Rosum's Universal Robots) del novelista checo Karel Capek en cuyo idioma la palabra "robota" significa fuerza de trabajo o servidumbre. Desde entonces se ha empleado la palabra robot para referirse a una máquina que realiza trabajos para ayudar a las personas o efectúa tareas difíciles o desagradables para los humanos [3].

[3] OLLERO BATURONE, Aníbal. Robótica. Manipuladores y robots móviles. Marcombo S.A. Capítulo 1. 1p-3p

En el término robot confluyen las imágenes de máquinas para la realización de trabajos productivos y de imitación de movimientos y comportamientos de seres vivos. Los robots existentes en la actualidad son obras de ingeniería y, como tales, son diseñados para producir bienes y servicios o explotar recursos naturales.

En la actualidad, los avances tecnológicos y científicos no han permitido todavía construir un robot realmente inteligente, aunque existen esperanzas de que esto sea posible algún día. Hoy por hoy, una de las finalidades de la construcción de robots es su intervención en los procesos de fabricación. Estos robots, que no tienen forma humana en absoluto, son los encargados de realizar trabajos repetitivos en las cadenas de proceso de fabricación. En una fábrica sin robots, los trabajos antes mencionados los realizan técnicos especialistas en cadenas de producción. Con los robots, el técnico puede librarse de la rutina y el riesgo que sus labores acarrearán, con lo que la empresa gana en rapidez, calidad, precisión y seguridad del personal.

Como medida de protección para los seres humanos Isaac Asimov planteó los tres principios o leyes de la robótica [4]. Estas leyes son:

1. Un robot no debe dañar a un ser humano o, por su inacción, dejar que un ser humano sufra daño.
2. Un robot debe obedecer las órdenes que le son dadas por un ser humano, excepto si estas órdenes entran en conflicto con la Primera Ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia, hasta donde esta protección no entre en conflicto con la Primera o la Segunda Ley.

Estas leyes surgen por temor que el ser humano desarrollaría frente a unas máquinas que hipotéticamente pudieran rebelarse y alzarse contra sus creadores. En teoría, estas leyes serían programadas en el robot y de intentar

[4] Enciclopedia Universal Ilustrada Europeo-Americana, E. Calpe S.A. 1123p

siquiera desobedecer una de las leyes, el cerebro del robot resultaría dañado irreversiblemente y el robot dejaría de funcionar.

En un primer nivel no presenta ningún problema dotar a los robots con tales leyes, a fin de cuentas, son máquinas creadas por el hombre para su servicio. La complejidad reside en que el robot pueda distinguir cuáles son todas las situaciones que abarcan las tres leyes, o sea poder deducirlas en el momento.

1.3 ROBÓTICA MÉDICA [5]

Un campo que abarca la robótica es aquel que está destinado a la medicina, ya sea para reemplazar miembros perdidos, realizar delicados procedimientos quirúrgicos, dar terapias de neurorehabilitación para pacientes golpeados, ayudar a los niños con discapacidades en el aprendizaje, realizar un creciente número de tareas relacionadas con la salud.

De acuerdo al tipo de actividad que va a desempeñar el robot se puede dividirlos en: robots de rehabilitación, robots de rehabilitación asistida, robots quirúrgicos y también robots destinados al entrenamiento médico. A continuación se dará una breve explicación de cada uno de ellos.

1.3.1 ROBOTS DE REHABILITACIÓN

La más extensa utilización de la robótica para fines médicos ha sido en la rehabilitación, que incluye tradicionalmente robots asistentes, prótesis, ortosis y robots terapéuticos.

1.3.1.1 ROBOTS ASISTENTES

Actualmente están disponibles en el mercado un buen número de sistemas robóticos para asistencia a individuos con severas incapacidades. El más ampliamente usado es el Handy 1, el cual fue desarrollado por Topping en

[5] SPEICH, John. Medical Robotics. < <http://brl.ee.washington.edu/publications/rep178.pdf> > [Consulta: Abril del 2008]

1987. Este dispositivo da habilidad a las personas que tienen poca o ninguna movilidad manual para completar por si mismos tareas diarias como comer, beber, lavar, afeitarse y lavarse los dientes. La Figura 1.7 muestra el robot Handy 1.



Fuente: CASALS Alicia, Robótica y personas con discapacidad

Figura 1.7 Robot Handy 1

También se tiene el robot MANUS que es una silla de ruedas, en la cual, se monta un manipulador de propósito general, con seis GDL (Grados de Libertad) y dos dedos de agarre. También fue diseñada para asistir a personas con discapacidades en tareas completas de la vida diaria. Más de 100 personas han usado MANUS en sus hogares en Holanda, Francia y otros países. La Figura 1.8 muestra una ilustración de este robot.



Fuente: CASALS Alicia, Robótica y personas con discapacidad

Figura 1.8 Robot MANUS

El Raptor es una silla de rueda robótica con 4 DOF que permite a personas con discapacidades alimentarse ellos mismos y alcanzar objetos en el piso, sobre una mesa o sobre sus cabezas.

1.3.1.2 PRÓTESIS.

Una prótesis es un dispositivo mecánico que sustituye una parte perdida del cuerpo humano, estos son usualmente usados para proveer movilidad o habilidades de manipulación cuando un miembro es perdido. La Utah Arm es un computador controlado, una prótesis sobre el codo diseñada en la universidad de Utah en 1980, Hoy en día es utilizada comercialmente y es controlada usando realimentación con sensores de electromiografía⁶ que miden la respuesta de un músculo a la estimulación nerviosa. La misma empresa ha fabricado la prótesis de una mano con dos dedos que es controlada usando señales mioeléctricas (prótesis que sustituye a un músculo y tiene un funcionamiento eléctrico) del miembro remanente. Muchas industrias están diseñando actualmente manos robóticas con movimientos muy similares a la de humanos. Esta prótesis se la puede observar en la Figura 1.9.



Fuente: Revista electrónica "In Motion"

Figura 1.9 Prótesis Utah Arm

Las prótesis robóticas también pueden ser de miembros inferiores. En los laboratorios del MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) se está probando una prótesis de rodilla inteligente que permite a personas con amputaciones caminar y subir escaleras más natural adaptándose al movimiento de la rodilla. Un reto en el área de investigación de las prótesis es lograr el control de la acción que efectuó una prótesis por medio del cerebro humano. Uno de los logros es que la Universidad del Noroeste de Chicago ha diseñado una

⁶ Electromiografía. Técnica de diagnóstico médico consistente en un estudio neurofisiológico de la actividad bioeléctrica muscular.

interface pez-maquina que permite a un robot ser controlado por el cerebro de un pez. En el Centro Médico Universitario Duke, en Carolina del Norte, se ha desarrollado un sistema que usa electrodos implantados para medir las señales cerebrales en un mono, con los cuales se controla un brazo robótico que trata de alcanzar un poco de comida. Estas investigaciones pueden eventualmente conducir a una interface cerebro-máquina que pueda controlar prótesis.

1.3.1.3 ORTOSIS

Una ortosis es un mecanismo usado para asistir o ayudar a una junta, músculo o miembro débil o ineficiente. Se puede utilizar una ortosis para proveer estabilidad alrededor de una articulación o para promover el movimiento deseado y disuadir o limitar el movimiento no deseado de una articulación. Muchas ortosis utilizan tecnología robótica y ellas usualmente toman la forma de un esqueleto externo, un conjunto antropomórfico (con apariencia humana) muy poderoso que es llevado por el paciente. Estos poseen vínculos y articulaciones que corresponden a las de los seres humanos y actuadores que ayudan al paciente con el movimiento de sus extremidades o el levantamiento de cargas externas.

Un ejemplo de estos es el Wrist-Hand Orthosis (WHO) que usa actuadores con aleaciones que proveen la función de agarre para pacientes cuadripléjicos, que se presenta en la Figura 1.10.

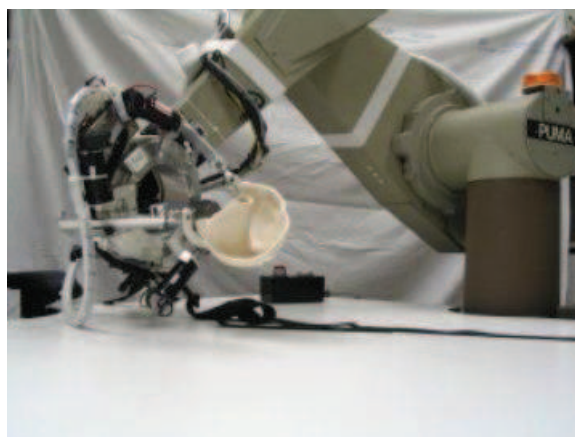


Fuente: Hanger Inc.

Figura 1.10 Ortesis Wrist-Hand

1.3.2 ROBOTS DE REHABILITACIÓN ASISTIDA

Los robots tienen la cualidad de ser herramientas valiosas para terapias de rehabilitación. Podrían mejorar las técnicas tradicionales de tratamiento por terapias de habilitación más precisas y consistentes, especialmente en las que se realizan movimientos de entrenamiento altamente repetitivos. Las nuevas técnicas de terapia pueden ser diseñadas usando dispositivos robóticos que pueden asistir y/o resistir activamente el movimiento del paciente. Los robots terapéuticos también pueden recolectar datos continuamente para poder ser usados en mediciones del progreso del paciente a lo largo del proceso de recuperación. Un ejemplo de este tipo de robots es el MIME (Mirror-Image Motion Enabler) el cual usa seis grados de libertad para interactuar con el miembro perjudicado. Este sistema puede operar en tres modos unilaterales y un modo bilateral. Los modos unilaterales son pasivos, en los cuales el paciente permanece pasivo o quieto cuando el robot mueve el miembro a lo largo de una ruta programada; asistencia activa, en la cual el paciente inicia los movimientos y el robot asiste y guía los movimientos a lo largo de una ruta programada; y, activo-forzado, en el cual el robot se resiste al movimiento del paciente a lo largo de la ruta. Este sistema fue usado en ensayos clínicos para comparar la diferencia entre la terapia tradicional y la asistida robóticamente en pacientes golpeados y los resultados mostraron grandes progresos en la terapia con robots que los tradicionales. La Figura 1.11 muestra el robot MIME.



Fuente:ZD Net

Figura 1.11 Robot MIME

1.3.3 ROBOTS QUIRÚRGICOS

En la última década, la cirugía y los robots han alcanzado un gran avance y hoy en día se los diseña para ser manipulados desde una nueva clase de sala de operación. Este nuevo ambiente incluye robots para cirugía local y telecirugía, telecomunicación audiovisual para telemedicina y teleconsulta, sistemas robóticos integrados con imágenes para computadores de cirugía mejorados y simuladores de realidad virtual mejorados para entrenamiento quirúrgico.

La reciente evolución de la cirugía robótica es el resultado de profunda investigación en el campo de la robótica y telerobótica durante las últimas cuatro décadas. Examinando la lista de fortalezas y debilidades de los seres humanos y robots en la Tabla 1.1 es evidente que la combinación en un solo sistema puede beneficiar el nivel de atención de salud entregada durante la cirugía.

Tabla 1.1 Fortalezas y debilidades de humanos vs. robots

| Característica | Humano | Calif | Robot | Calif |
|----------------------------|---|-------|---|-------|
| Coordinación | Visual/motriz limitada | - | Geométrica y altamente precisa | + |
| Destreza | Alta en el rango de información captada | + | Limitada por el número y tipo de sensores. El rango excede la percepción humana | + |
| Integración de información | Alto Nivel – Alta capacidad | + | Alto Nivel – limitado por algoritmos | - |
| | Bajo Nivel – Baja capacidad | - | Bajo Nivel – Alta capacidad | + |
| Adaptabilidad | Alta | + | Limitada por el diseño | - |
| Desempeño estable | Se degrada rápido en función del tiempo | - | Se degrada lentamente en función del tiempo | + |
| Escalabilidad | Relativamente limitado | - | Diseñado para exceder la capacidad humana | + |

| | | | | |
|----------------------|--|---|---|---|
| Esterilización | Aceptable | + | Aceptable | + |
| Precisión | Relativamente limitada | - | Diseñado para exceder la capacidad humana | + |
| Ocupación de espacio | Limitado al espacio del cuerpo | + | Normalmente excede el volumen necesario para reemplazar a un operador humano. | - |
| Exposición | Susceptible a la radiación e infección | - | No susceptible a los peligros ambientales | + |
| Especialidad | Genérica | + | No especializado | - |

Fuente: SPEICH John, Medical Robotics

Los robots quirúrgicos pueden ser clasificados en tres categorías. Clase I) Sistemas semiautónomos; clase II) sistemas guiados; y, clase III) Sistemas tele operados. Los brazos robóticos especiales han sido diseñados en una o más de estas categorías para reunir los requerimientos de varias especialidades quirúrgicas, incluyendo la neurología, ortopedia, urología, maxilofacial, cardiología y cirugía general. Cada disciplina de cirugía tiene requerimientos especiales dictados por la estructura anatómica y procedimientos quirúrgicos, que necesitan un diseño especial y configuración del sistema robótico.

1.3.3.1 ROBOTS QUIRÚRGICOS CLASE I

Similares a los robots industriales, el set de herramientas de un robot quirúrgico operado en modo semiautomático (clase I) es predefinido basado en una representación visual de la anatomía adquirida por un dispositivo de imagen y planeada antes de ser operada. Una vez que la ruta es definida, las localizaciones relativas de la estructura anatómica y el robot son registradas y el robot ejecuta la tarea usando comandos de posición sin ninguna intervención más allá de la establecida por el cirujano. Por obvias razones de seguridad, el cirujano puede parar la acción pero alterando la ruta requerida por ello se requiere replantear la operación. Los sistemas robóticos semiautomáticos son apropiados para procedimientos ortopédicos cirugía neurológica con estructuras anatómicas bien forzadas como tejidos duros y huesos o con tejidos como el cerebro, confinado por el cráneo.

1.3.3.2 ROBOTS QUIRÚRGICOS CLASE II

Los robots quirúrgicos pueden ser usados en sistemas guiados (Clase II) en casos donde una alta precisión es requerida, como: microcirugía, reconstrucción micro vascular, oftalmología y urología. El cirujano interactúa directamente con el brazo robótico y mueve la herramienta en el espacio. El brazo quirúrgico provee estabilidad y movimientos de precisión. Las fuerzas y torques aplicados en el sistema por la mano del cirujano son sensados y trasladados a un control de velocidad del robot.

1.3.3.3 ROBOTS QUIRÚRGICOS CLASE III

La arquitectura de los robots quirúrgicos teleoperados (Clase III) está formado por tres componentes fundamentales: consola de cirugía, brazos robóticos y sistema de visualización. El cirujano genera comandos de posición al robot mediante el movimiento de los dispositivos de entrada localizados en la consola del cirujano. Los comandos de posición son transferidos hacia el controlador de los brazos robóticos los cuales tienen actuadores para moverlos y herramientas quirúrgicas adecuadas. En algunos sistemas la realimentación de fuerza puede ser generada por actuadores añadidos a la entrada permiten al cirujano sentir las fuerzas entre la herramienta y el tejido.

1.3.4 ROBOTS DE ENTRENAMIENTO MÉDICO

En la actualidad existen maniqués robóticos para simular el entrenamiento médico, muy útiles para estudiantes con carreras afines a la medicina. Los maniqués permiten a los estudiantes realizar actividades de entrenamiento antes de tratar con un ser humano. Muchos de ellos tienen características electromecánicas controladas computacionalmente, incluyendo ojos que pueden abrir y cerrarse, brazos que se mueven, brazos y piernas que se hinchan y pulmones embebidos en el pecho que respiran ocasionalmente.

1.4 MANOS ROBÓTICAS [2]

Hay grandes esfuerzos en todo el mundo para mejorar la capacidad de manipulación de los robots, tratándose siempre de emular lo más perfectamente posible a la destreza de las manos. A continuación se muestra en orden cronológico algunos ejemplos de manos robóticas.

1.4.1 MANO BELGRADE/USC (1969)

La mano robótica Belgrado/USC fue diseñada por la University of Southern California y la University of Novi-Sad at Belgradetiene por ello su nombre. Tiene cuatros dedos, cada uno con tres ejes de juntas paralelas y un GDL (Grado de Libertad) que permite la flexión de todas las juntas de la unión. Esta configuración disminuye la destreza de la mano. Cada par de dedos adyacentes es manejado por un solo motor el cual actúa en los pares más próximos a los nudillos. Un sistema de conexión separada en cada dedo transmite la potencia a las juntas más distantes. Un mecanismo de brazo balanceado acopla dos pares de dedos mecánicamente. La mano es controlada usando una estrategia PD (proporcional derivativo) simple con un microcontrolador 332. Esta mano no posee sensores táctiles pero incorpora doce sensores de fuerza. La Figura 1.12 muestra esta mano robótica.



Fuente: USC Robotics Research Lab

Figura 1.12 Mano Belgrade/USC

[2] LAUREN BANKS, Jessica. Design and Control of an Anthropomorphic Robotic Finger with Multi-point Tactile Sensation. <<http://www.ai.mit.edu/research/abstracts/abstracts2001/humanoid-robotics/03banks.pdf>> [Consulta: Abril del 2008]

1.4.2 MANO STANDFORD/JPL (SALISBURY) (1981)

El sistema conecta cuatro cables de acero flexible con chaqueta de teflón que se originan desde un servo motor remotamente situado ensamblando a las juntas de cada uno de los tres dedos con 3 grados de libertad. De esta manera, la mano es capaz de adherir configuraciones de $N+1$ tendones, en los cuales, $N+1$ cables y motores son requeridos para N grados de libertad. Cada dedo tiene una doble junta en los nudillos la misma que provee 90° de inclinación y otro nudillo más distal con un rango de 135° . Aunque la modularidad de los dedos los hace simples de construir, la destreza es sacrificada porque los ejes de las juntas no tienen intersecciones. Además, el ensamblaje para manejarlo es torpe y los cables flexibles que se utilizan para su construcción son de limitada fiabilidad y capacidad de transmisión de potencia. El mecanismo sensor de la tensión del cable basado en calibradores de fuerza asegura un control exacto de fuerza en los dedos. La Figura 1.13 muestra la mano Standford/JPL.



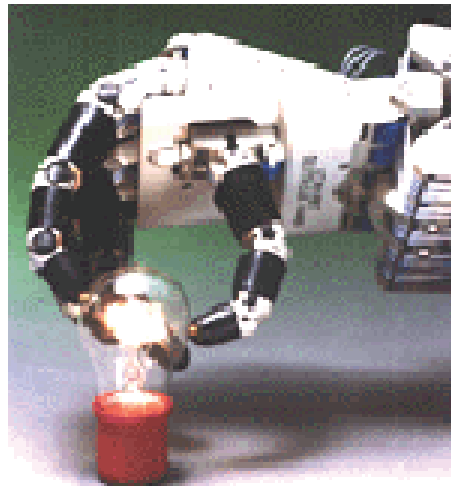
Fuente: Robotics Research Group

Figura 1.13 Mano Standford/JPL

1.4.3 MANO UTAH/MIT DEXTROUS (1982)

Esta mano posee dedos exteriormente paralelos con 4GDL, aunque con un diseño no antropomórfico desde los nudillos. La inclusión de tres dedos minimiza la dependencia de la fricción y añade un soporte redundante para las

tareas de manipulación. Cada dedo con N-GDL es controlado por 2N actuadores independientes y cables de tensión como tendones. Estos tendones son parte de un complejo sistema de manejo de cables proporcionado por 32 cilindros de vidrio neumáticos especialmente diseñados y válvulas de tubo tipo jet. Los sensores de rotación de efecto hall montados en cada junta de cada dedo transmiten la medida del ángulo de la junta. Aunque los dedos exhiben una alta ejecución dinámica, con yemas de fuerza para trabajo excesivo de 7 lb. y componentes de frecuencia que exceden los 20 Hz, su implementación es incómoda. La Figura 1.14 muestra la mano UTAH/MIT Dextrous.



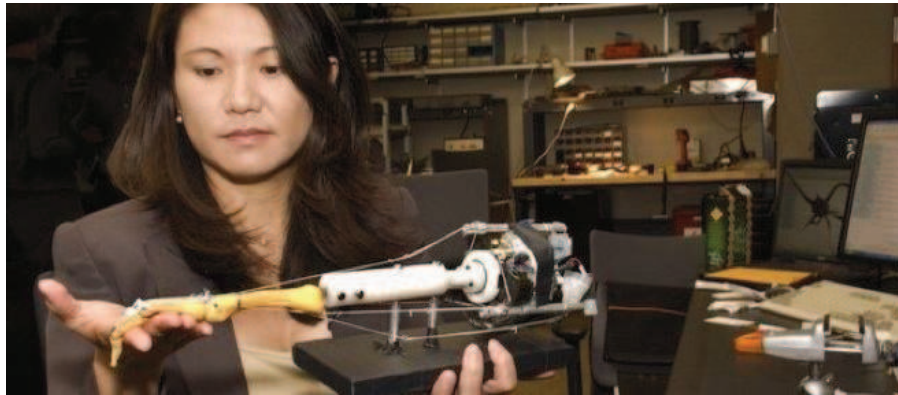
Fuente: Laboratoire de robotique de l'université Laval

Figura 1.14 Mano UTAH/MIT Dextrous

1.4.4 MANO ROBOT MATSUOKA (1995)

Esta mano robótica fue construida en el laboratorio de Inteligencia Artificial de MIT. Cada dedo esta compuesto de dos falanges y dos juntas articuladas. Estas articulaciones son controladas por un sistema cable/polea motor que imparte 2 GDL aparentes al dispositivo y es capaz de generar un torque equivalente a 0.5 lb en las yemas. La plataforma es autosuficiente aunque los motores de los dedos dan mucho peso y tamaño a la correspondiente mano. La fuerza y precisión reducidas de estos dedos es aceptable porque los

objetivos de la mano Matsuoka es la simulación de movimientos para manipulación. En la Figura 1.15 se puede observar la mano robot Matsuoka.



Fuente: Wired Science

Figura 1.15 Mano robot Matsuoka

1.4.5 MANO ROBONAUT (1999)

Esta mano robótica fue diseñada para combinar tamaño, cinemática y fuerza de la mano de un astronauta, está dividida en dos secciones. El set de trabajo para la manipulación diestra incluye dos dedos con 3-GDL; el set de agarre estable incluye dos dedos con 1-GDL. Un eje flexible de acero inoxidable acoplado a un motor DC sin escobillas alojado en el antebrazo transmite la potencia a cada uno de los dedos, las juntas de la base de los dedos permiten $\pm 25^\circ$ de desvío y 100° de declive. Las segundas y terceras articulaciones son directamente ligadas para cerrar con ángulos iguales. Los dedos de agarre tienen tres articulaciones de flexión que cierran con aproximadamente ángulos iguales sobre un rango de 90° . Debido a la geometría compleja de la mano, muchas de sus partes fueron moldeadas en aluminio directamente. Los sensores de posición absoluta están embebidos en cada articulación de la mano, encoders incrementales sobre los motores, celdas de carga y sensores táctiles proveen la realimentación de posición y fuerza para el control. La Figura 1.16 muestra la mano Robonaut.



Fuente: How Stuff Works

Figura 1.16 Mano Robonaut

1.4.6 MANO DLR (2000)

La mano DLR es una mano articulada multisensor con cuatro dedos, es controlada por un guante de datos. Está diseñada con actuadores lineales integrados en la palma y en la falange proximal que permiten manipular las articulaciones de los dedos. Cada dedo tiene una articulación de base de 2-GDL capaz de flexionar $\pm 45^\circ$ y $\pm 30^\circ$ de abducción/aducción, un nudillo de 1-GDL capaz de flexionar 115° y una articulación distal capaz de flexionar 110° . La articulación distal es manejada pasivamente debido al acoplamiento inter-articulaciones. El control de posición, fuerza y rigidez es llevado a cabo por el uso de un medidor de fuerza basado en sensores de torque, sensores ópticos de posición de las articulaciones y sensores táctiles. En la Figura 1.17 se puede observar la mano DLR.



Fuente: service-robots.org

Figura 1.17 Mano DLR

1.5 GUANTES SENSORIZADOS

Los primeros guantes electrónicos se crearon con la intención de reducir las limitaciones de los elementos periféricos de las computadoras, las cuales imponían en el uso de las manos. La realidad virtual es uno de los campos en donde más se utilizan guantes electrónicos, por ello la mayoría de guantes son diseñados para este fin, pero eso no implica que puedan ser usados para otras aplicaciones, en si vienen a constituir un periférico mas de entrada de datos.

En cuanto a su evolución, los primeros guantes empleaban elementos magnéticos muy precisos pero sensibles a objetos metálicos cercanos que provocaban la distorsión del campo y generaban errores. Posteriormente se diseñaron guantes que manejaban sonidos de alta frecuencia en triangulación, eran muy precisos pero deficientes ante los rebotes acústicos por las paredes y objetos cercanos. Luego aparecieron los guantes que funcionaban con principios fotoeléctricos (elementos sensibles a la luz), usando tubos flexibles con una fuente de luz en un extremo y una fotocelda en el otro, esto generó un método efectivo de control multidimensional. Luego, se empleó la fibra óptica donde cada fibra posee un emisor de luz al inicio y un sensor al final, de modo que se pueden determinar los giros por la intensidad de luz recibida. Posee bastante flexibilidad y portabilidad, pero la identificación de la posición deber realizarse con un rastreador adicional.

Hoy en día también se utilizan bandas resistivas flexibles con lo cual se facilita el sensado de datos obteniéndose una buena resolución sin un hardware complicado. Adicionalmente también se diseñaron exoesqueletos los cuales tienen una estructura mecánica paralela y sobrepuesta a la mano con rotores y sensores en cada articulación. Poseen una alta precisión por lo que se utilizan en aplicaciones delicadas [6].

A continuación se mencionan algunos guantes existentes en el mercado.

[6] Sensor fotoeléctrico aplicado al movimiento de las manos, Instituto Nacional de Rehabilitación, México. <<http://www.ejournal.unam.mx/cys/vol10-01/CYS10105.pdf>> [Consulta: Marzo del 2008]

1.5.1 GUANTE CYBERGLOVE [7]

El último guante sensorizado lanzado al mercado es el Caber Glove II el cual transforma el movimiento de las manos y dedos a un dato en tiempo real de cada junta. Posee la característica de tener una transmisión inalámbrica lo cual facilita el movimiento. Tiene 18 a 22 sensores resistivos flexibles, con una resolución menor a un grado, trabaja con tecnología inalámbrica de 2.4 GHz, usa una interface USB para receptor wireless. Entre sus usos se encuentra, la animación, captura de movimientos, realidad virtual, estudios biomecánicas y entrenamiento médico y militar. La Figura 1.18 muestra una fotografía de este guante.



Fuente: Immersion Corporation

Figura 1.18 Guante CyberGlove

1.5.2 GUANTE CYBERTOUCH [8]

Este es un guante que además de sensor el movimiento de los dedos y guantes, utiliza una realimentación dando una sensación táctil con objetos computacionales generados en 3D. Posee una realimentación vibro táctil que crea un ambiente mas realista a los usuarios. Consiste de seis actuadores vibro táctiles, uno en cada dedo y en la palma. Cada actuador puede ser programado individualmente para proveer el nivel de realimentación deseado. Los actuadores pueden generar pulsos, vibración sostenida o patrones de vibración personalizados. La comunicación se la realiza mediante una interfaz RS-232 con una velocidad máxima de 115.2 Kbaud. La Figura 1.19 muestra una fotografía de este guante.

[7] Guante CyberGlove.< http://www.immersion.com/3d/docs/cyberglovell_jul08v5-lr.pdf> [Consulta: Agosto del 2008]

[8] Guante CyberTouch <http://www.cyberglobesystem.com/pdf/cybertouch_bronchure_2008.pdf>[Consulta: Agosto del 2008]



Fuente: Immersion Corporation

Figura 1.19 Guante CyberTouch

1.5.3 GUANTE CYBERGRASP [9]

Este guante posee un sistema innovador de realimentación de fuerza para los dedos y la mano. Es un exoesqueleto que se lo monta sobre el guante CyberGlove y provee una realimentación de fuerza de agarre en cada dedo con relación a la palma. Con este sistema el usuario es capaz de sentir el tamaño y la forma de objetos generados en la computadora, en un mundo de realidad virtual. Las fuerzas de agarre son producidas por una serie de tendones enlazados a los dedos a través del exoesqueleto. Posee cinco actuadores, uno por cada dedo, los cuales pueden ser individualmente programados. A continuación, en la Figura 1.20 se muestra este tipo de guante.



Fuente: Immersion Corporation

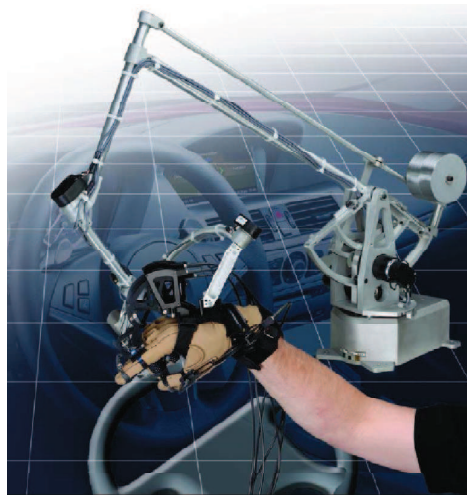
Figura 1.20 Sistema CyberGrasp

[9] Guante CyberGrasp.<http://www.cyberglobesystem.com/pdf/cybergrasp_bronchure_2008.pdf>[Consulta: Agosto del 2008]

1.5.4 GUANTE CYBERFORCE [10]

Este es un sistema que posee realimentación de fuerza, es muy utilizado en ambientes aeroespaciales, militares, automotriz y aplicaciones de simulación medica, ingeniería de diseño y prototipos virtuales.

Es un sistema que incluye 22 sensores los cuales se ubican en el guante mas un exoesqueleto que provee seis grados de libertad, tres que corresponden a la traslación y tres para la rotación de la mano, además la resolución de la posición es de 0.06mm. A continuación, se muestra en la Figura 1.21 este sistema.



Fuente: Immersion Corporation

Figura 1.21 Guante CyberForce

En este capítulo se ha estudiado la anatomía de la mano humana, se presentaron conceptos relacionados con la robótica y la importancia de ésta en la medicina. Además, se mostró los guantes con sensores existentes en el mercado y sus características.

A continuación en el siguiente capítulo se realizará el diseño del guante sensorizado, la mano robótica y los circuitos electrónicos necesarios para su funcionamiento.

[10] Guante CyberForce.<http://www.immersion.com/3d/docs/cyberforce_jul07v2-lr.pdf>[Consulta: Agosto del 2008]

CAPÍTULO 2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MANO ROBÓTICA Y GUANTE SENSORIZADO

Una vez entendidos los conceptos básicos necesarios para la realización de este proyecto, en este capítulo se describe la construcción tanto del guante sensorizado como de la mano robótica, así como todo el hardware necesario para realizar las tareas de control.

En un inicio se trató de construir sensores fotoeléctricos basados en la percepción de una fuente luminosa constante a través de un ducto elástico, con un LED en un extremo y una foto resistencia en el otro, pero, la implementación física en el guante era muy difícil e incómoda debido principalmente al espacio reducido que se tiene. Por lo tanto, se procedió a utilizar otro método mediante sensores infrarrojos de reflexión utilizados comúnmente en robots seguidores de línea. Su reducido tamaño y sencillez de acondicionamiento fueron factores claves para su selección.

Se utilizó conceptos muy generales en cuanto al diseño de la parte mecánica de la mano robótica, debido a que este proyecto está enfocado principalmente a las tareas y algoritmos de control de la misma.

Para el diseño de la mano robótica se tomó como punto de referencia a la mano humana tomando en cuenta los siguientes conceptos.

Debe ser auto-contenida; esto es, que la mano sea una pieza independiente. Debido a ello no posee tendones o elementos de transmisión externos a la propia mano. Además debe ser antropomorfa; esto es, debe tener la apariencia de una mano humana, se buscó un diseño con características antropomorfas. Por último las dimensiones deben ser lo más cercanas posibles a las de una mano humana.

Tomando en cuenta todos estos aspectos se procede a describir el diseño y la construcción de todo el hardware utilizado.

2.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL GUANTE SENSORIZADO

2.1.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El guante sensorizado es un elemento provisto con sensores fotoeléctricos, los cuales determinan la posición de las articulaciones de cada dedo de una mano diestra. Las señales de los sensores son acondicionadas, procesadas y transmitidas a través de una interface RS-232 cuando la etapa de control lo requiera.

El hardware está formado por un guante diestro flexible, sobre el cual son montados estratégicamente los sensores fotoeléctricos. Son en total 15 sensores fotoeléctricos cuya salida acondicionada es un valor analógico y el elemento de control, del cual se tratará posteriormente, posee 5 entradas para la conversión A/D (analógica-digital); por ello fue necesario incluir una etapa de selección de datos, con ello, mediante un barrido de lectura de los sensores, una de las 15 entradas es conectada a una única entrada analógica del elemento de control para su conversión A/D.

Una vez digitalizados los datos estos son procesados, almacenados y actualizados continuamente para ser transmitidos a través de una Interfase RS-232 cuando la etapa de control de la mano robótica los requiera.

En la Figura 2.1 se muestra un diagrama con la arquitectura del guante sensorizado.

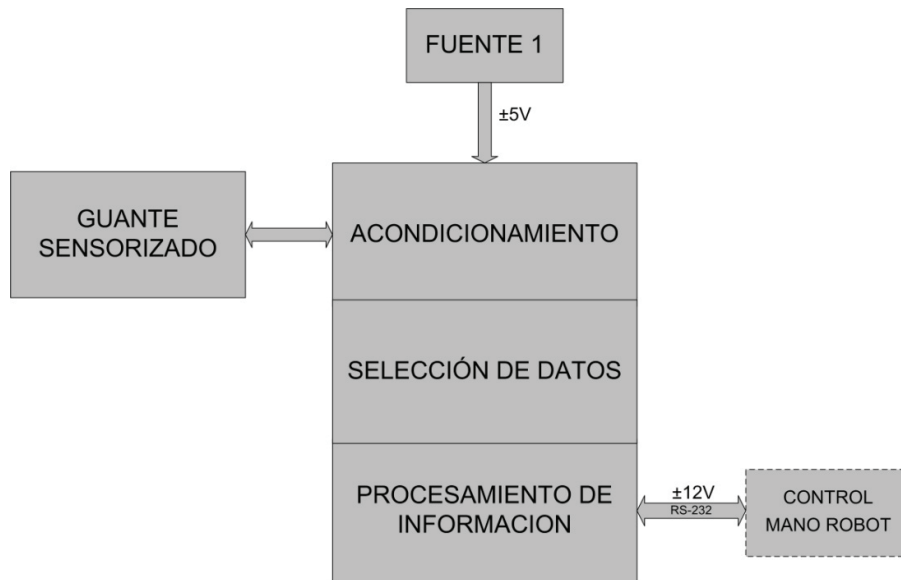


Figura 2.1 Arquitectura del guante sensorizado

2.1.2 GUANTE

Para el desarrollo del guante sensorizado se utilizó un guante diestro de la marca MerchPro modelo Wells Lamont #7707M, el cual está confeccionado con 60% de nylon y 40% de poliuretano en la palma; y, 96% de poliéster y 4% de Spandex en el dorso. Se eligió este tipo de guante debido a la flexibilidad que se requiere. Este guante se lo puede observar en la Figura 2.2.



Figura 2.2 Guante utilizado

2.1.3 DISEÑO DEL DISPOSITIVO FOTOELÉCTRICO SENSOR

El dispositivo fotoeléctrico sensor consta de un emisor-receptor de luz y un ducto elástico.

2.1.3.1 EMISOR-RECEPTOR DE LUZ

Se utilizó como dispositivo fotoeléctrico emisor-receptor de luz al circuito integrado SG2BC, el cual es un sensor óptico reflectivo; es decir, presenta una variación en su señal de salida por la menor o mayor reflexión de luz infrarroja emitida por una fuente de luz infrarroja constante. Su salida es de tipo transistor.

Para este proyecto se utilizan 15 sensores ópticos los cuales son ubicados estratégicamente en el guante sensor con el fin de sensor la flexión de cada una de las articulaciones. Cada uno de los sensores son conectados a una etapa de acondicionamiento.

2.1.3.2 DUCTO ELÁSTICO

Para el presente proyecto se utilizó un ducto elástico de color negro debido a que se requiere evitar cualquier interferencia externa hacia el dispositivo sensor, así como cualquier fuga de luz hacia el exterior. Debido a que la fuente luminosa es constante, las paredes del ducto incrementan o decrementan el número de rayos reflejados por las paredes hacia el receptor según el ángulo de flexión del ducto. Analizando las articulaciones de los dedos se llegó a la conclusión que la medida ideal del ducto es de 1 a 1.5 cm. Siendo un total de 15 unidades.

2.1.3.3 CONSTRUCCIÓN

Para la construcción se procede a cerrar un extremo del ducto elástico y en el otro extremo se procede a colocar el dispositivo emisor-receptor. Todos se adhirieron de una forma firme con el fin de evitar errores debido al movimiento

indebido de alguno de ellos. En la Figura 2.3 se muestra uno de los 15 dispositivos fotoeléctricos sensores.

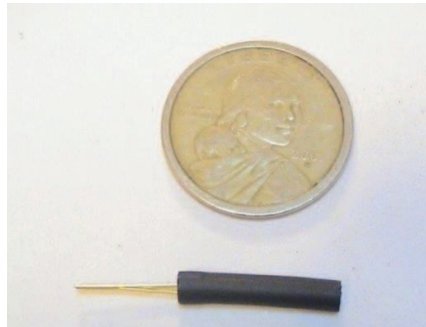


Figura 2.3 Sensor fotoeléctrico

2.1.4 UBICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS SENSORES EN EL GUANTE

La ubicación de los dispositivos sensores es de vital importancia, debido a que deben estar acordes con la ubicación de las articulaciones para poder sentir la flexión de las mismas.

La ubicación de los dispositivos fue realizada mediante marcas hechas en cada articulación con el guante insertado en la mano. Una vez seleccionada la ubicación se procedió a confeccionar en tela espacios diseñados para la inserción de los sensores a manera de bolsillos. La Figura 2.4 muestra la ubicación de los sensores en una mano diestra.



Figura 2.4 Ubicación de los sensores

2.1.5 FUENTE DE ALIMENTACIÓN DEL GUANTE SENSORIZADO

Se utiliza una fuente de alimentación bipolar externa. Para garantizar la estabilidad del voltaje y reducir el rizado que puede tener la fuente externa se optó por incluir circuitos reguladores para +5V y -5V, basado en los circuitos integrados reguladores 7805 y 7905 respectivamente. Debido a ello el voltaje de la fuente debe ser superior a $\pm 7V$ ya que este es el voltaje mínimo al que el regulador empieza a funcionar y menor de $\pm 40V$ ya que es el voltaje máximo permitido. Los valores de los capacitores (C1, C2, C3, C4, C5 y C6) de entrada y salida son sugeridos por el fabricante. La Figura 2.5 muestra el esquema de la fuente de alimentación para el circuito del guante sensorizado.

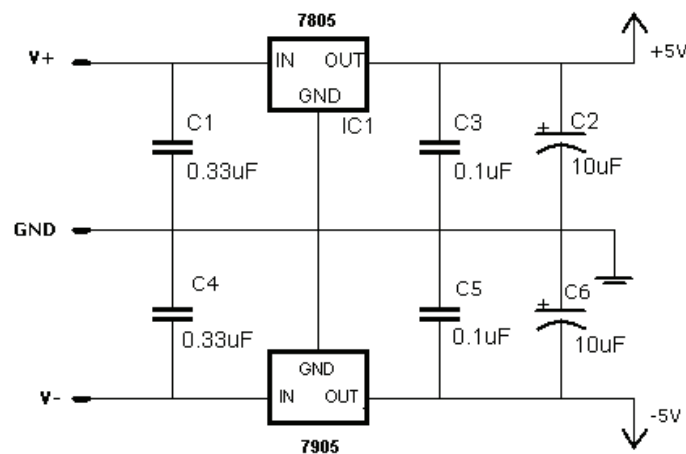


Figura 2.5 Circuito de la fuente de alimentación

2.1.6 ACONDICIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS SENSORES

Para el acondicionamiento de los dispositivos sensores se utilizó la estructura de un circuito básico de aislamiento por opto acoplador, basado en la configuración no inversora de la señal que ingresa hacia el receptor IR. Este esquema se lo puede observar en la Figura 2.6.

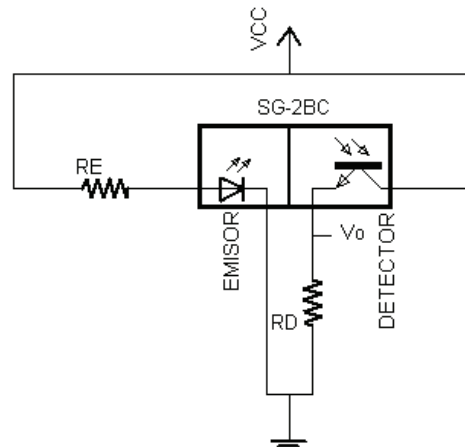


Figura 2.6 Conexión del sensor fotoeléctrico

Revisando las hojas de datos del dispositivo, para el diseño se tiene:

Circuito emisor:

$$V_{CC} = R_E I_{Led} + V_{Led}$$

Sea $V_{CC} = 5V$, $V_{Led} = 1.1V$, $I_{Led} = 20mA$

$$R_E = \frac{V_{CC} - V_{Led}}{I_{Led}} = \frac{5V - 1.1V}{20mA} = 195\Omega$$

Se escoge una resistencia estándar de $R_E = 200\Omega$. Con este valor la corriente que circula a través del led IR es de $I_{Led} = 19.5mA$

Circuito detector:

Sea, $V_{CC} = 5V$, $I_{Led} = 19.5mA$, $CTR = 3\%$, datos tomados de la hoja de datos del elemento en condiciones de máxima reflexión, entonces:

$$I_{RD} = I_{Led} \cdot CTR = 19.5mA \cdot 3\% = 0.58mA$$

$$R_D = \frac{V_{CC}}{I_{RD}} = \frac{5V}{0.58mA} = 8.6K\Omega$$

Para asegurar la saturación se escoge una resistencia estándar de $R_D = 10K\Omega$.

Sin embargo, la salida cada sensor tiene un rango de variación sumamente pequeño en el orden de los milivoltios. Por ello, la señal de salida de los sensores debe ser amplificada hasta llegar a niveles en los cuales pueda ser utilizable.

Cada sensor tiene un rango de salida diferente. Para una mejor identificación se procedió a numerar los sensores como muestra la Figura 2.7.

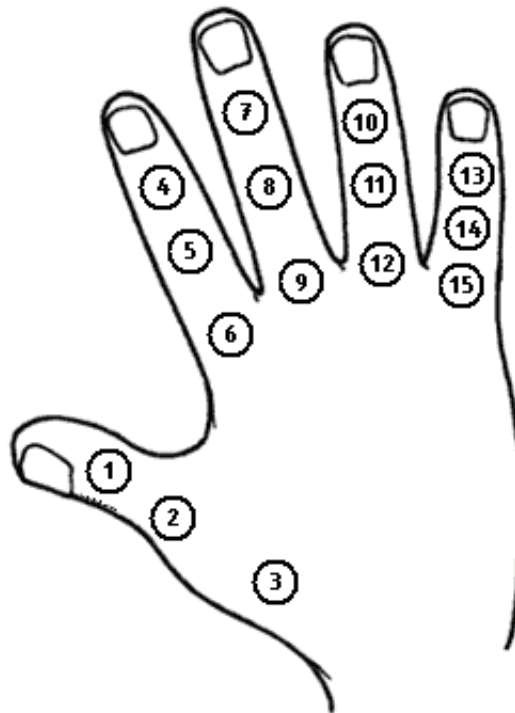


Figura 2.7 Identificación de los sensores.

De acuerdo a la Figura 2.7 se tomó para cada sensor cinco muestras del voltaje de salida máximo $V_{o_{max}}$; es decir, cuando la mano se encuentra totalmente flexionada. De la misma forma, se tomó para cada sensor cinco muestras del voltaje de salida mínimo $V_{o_{min}}$; es decir, cuando la mano se encuentra sin flexión. El motivo de tomar diez muestras para cada caso es determinar los valores de salida mínimos y máximos para cada sensor necesarios para el diseño de los circuitos de acondicionamiento. Los valores medidos son mostrados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Valores de voltaje máximos y mínimos de salida para cada sensor

| NÚMERO DE MUESTRAS | Vo min [mV] | | | | | | Vo max [mV] | | | | | |
|--------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Min | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Max |
| SENSOR 1 | 84 | 85 | 85 | 84 | 85 | 84 | 113 | 112 | 113 | 112 | 113 | 113 |
| SENSOR 2 | 89 | 90 | 89 | 89 | 90 | 89 | 127 | 126 | 126 | 126 | 127 | 127 |
| SENSOR 3 | 102 | 100 | 102 | 101 | 100 | 100 | 106 | 105 | 106 | 105 | 105 | 106 |
| SENSOR 4 | 115 | 114 | 114 | 115 | 115 | 114 | 120 | 120 | 119 | 120 | 119 | 120 |
| SENSOR 5 | 76 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 93 | 93 | 93 | 91 | 93 | 93 |
| SENSOR 6 | 66 | 65 | 64 | 65 | 65 | 64 | 76 | 76 | 74 | 75 | 76 | 76 |
| SENSOR 7 | 101 | 100 | 100 | 100 | 101 | 100 | 110 | 109 | 109 | 110 | 109 | 110 |
| SENSOR 8 | 123 | 122 | 122 | 121 | 121 | 121 | 139 | 139 | 140 | 139 | 139 | 140 |
| SENSOR 9 | 82 | 82 | 82 | 83 | 82 | 82 | 90 | 89 | 89 | 90 | 90 | 90 |
| SENSOR 10 | 114 | 114 | 115 | 114 | 114 | 114 | 116 | 116 | 117 | 116 | 116 | 117 |
| SENSOR 11 | 93 | 93 | 93 | 93 | 93 | 93 | 120 | 121 | 121 | 120 | 121 | 121 |
| SENSOR 12 | 65 | 64 | 64 | 65 | 65 | 64 | 92 | 92 | 91 | 91 | 92 | 92 |
| SENSOR 13 | 90 | 89 | 90 | 90 | 89 | 89 | 134 | 133 | 134 | 134 | 133 | 134 |
| SENSOR 14 | 67 | 68 | 67 | 67 | 68 | 67 | 80 | 80 | 80 | 81 | 80 | 81 |
| SENSOR 15 | 64 | 64 | 65 | 65 | 64 | 64 | 82 | 81 | 82 | 82 | 82 | 82 |

De la Tabla 2.1 se puede establecer que los valores de voltaje mínimos y máximos para cada articulación son diferentes. Por lo tanto, es necesario utilizar un circuito de acondicionamiento individual para cada sensor.

Para el diseño de los circuitos de acondicionamiento se tomó en cuenta un rango de voltaje de seguridad para cada sensor de 3mV por encima y por debajo de los valores $V_{o_{max}}$ y $V_{o_{min}}$ respectivamente. De esta forma, se diseñó un amplificador diferencial básico con seguidores de voltaje en sus entradas para acoplar impedancias. Este amplificador diferencial está basado en el amplificador operacional TL084 de tal manera que $V_{o_{min}}-3mV$ produzca en su salida 0V; y, $V_{o_{max}}+3mV$ produzca en su salida 5V. La Figura 2.8 muestra el esquema del amplificador diferencial utilizado para el acondicionamiento de cada sensor.

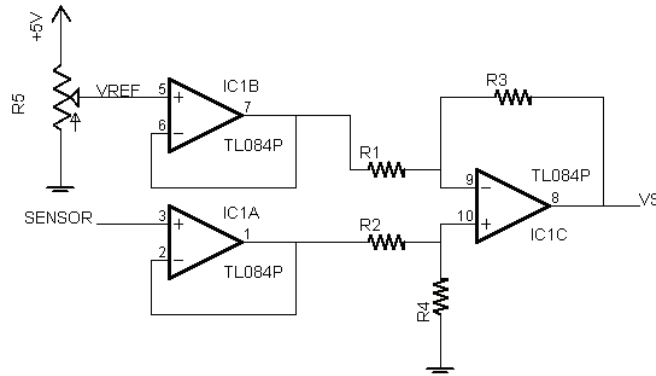


Figura 2.8 Esquema del amplificador diferencial

Como ejemplo de diseño se toma el sensor número 1. De acuerdo a la Tabla 2.1 el valor $V_{o_{min1}}$ más bajo para este sensor es 84mV y el valor $V_{o_{max1}}$ más elevado es 113mV. Para el diseño se tiene que:

$$V_{o_{min1}} = 84mV - 3mV = 81mV$$

$$V_{o_{max1}} = 113mV + 3mV = 116mV$$

La ganancia de voltaje de los circuitos seguidores de voltaje de entrada es unitaria. Si $R_i = R_1 = R_3$ y $R_f = R_2 = R_4$, para el amplificador diferencial de la Figura 2.8 se tiene:

$$V_{S1} = \frac{R_2}{R_1} (V_{O1} - V_{REF})$$

Para el diseño se tiene:

$$V_{REF} = V_{o_{min1}} = 81mV$$

Si $V_{O1} = V_{o_{min1}} = 81mV$, entonces cuando $V_{o_{min}} = 81mV$ se tiene:

$$V_{S1min} = \frac{R_2}{R_1} (0.081 - 0.081) = 0V$$

Si $V_{O1} = V_{o_{max1}} = 116mV$, entonces cuando $V_{o_{max}} = 116mV$ se tiene:

$$V_{S1max} = \frac{R_2}{R_1} (0.116V - 0.081V) = 5V$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 143$$

Si $R_1 = R_3 = 1K\Omega$, entonces $R_2 = R_4 = 143K\Omega$

Se eligen resistencias normalizadas $R_2 = R_4 = 150K\Omega$

La resistencia R5 es una resistencia de precisión de 1K que permite fijar los voltajes de referencia V_{REF} para cada amplificador diferencial.

El diseño para los demás sensores procede de la misma manera. Los valores de las resistencias de entrada R_i , de realimentación R_f y el valor del voltaje de referencia V_{REF} para los amplificadores diferenciales de cada sensor se los muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Valores de resistencias R_i , R_f y voltaje V_{REF} para los circuitos de acondicionamiento

| | R_i [K Ω] | R_f [K Ω] | V_{REF} [mV] |
|-----------|------------------------|------------------------|-------------------|
| SENSOR 1 | 1 | 150 | 81 |
| SENSOR 2 | 1 | 110 | 86 |
| SENSOR 3 | 1 | 390 | 97 |
| SENSOR 4 | 1 | 390 | 111 |
| SENSOR 5 | 1 | 200 | 72 |
| SENSOR 6 | 1 | 270 | 61 |
| SENSOR 7 | 1 | 300 | 97 |
| SENSOR 8 | 1 | 200 | 118 |
| SENSOR 9 | 1 | 360 | 79 |
| SENSOR 10 | 1 | 390 | 111 |
| SENSOR 11 | 1 | 150 | 90 |
| SENSOR 12 | 1 | 150 | 61 |
| SENSOR 13 | 1 | 100 | 86 |
| SENSOR 14 | 1 | 250 | 64 |
| SENSOR 15 | 1 | 200 | 61 |

2.1.7 SELECCIÓN DE DATOS

Los datos de los sensores son seleccionados en base a un barrido de la información proveniente de cada uno de ellos, esto se lo hace debido al número de sensores y a la disponibilidad reducida de entradas análogas en el microcontrolador.

Para realizar el barrido se utiliza un multiplexor análogo CD4067BE el cual en base a líneas de selección toma una de las 15 entradas y la transfiere a la salida. La salida del multiplexor se la conecta a una entrada analógica del microcontrolador PIC16F876A. Adicionalmente, las líneas de selección son manejadas por el microcontrolador.

La Figura 2.9 muestra el esquema de conexión del circuito integrado CD4067BE con el PIC16F876A

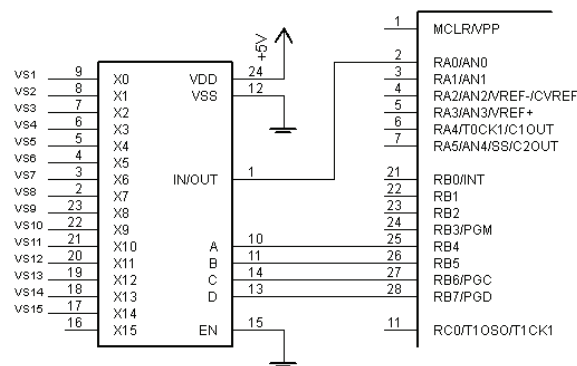


Figura 2.9 Esquema de conexión del CD4067BE con el PIC.

2.1.8 MICROCONTROLADOR PIC 16F876A

El microcontrolador PIC16F876A utilizado en esta etapa del proyecto, identificado posteriormente como PIC1, es fabricado por la empresa Microchip bajo la tecnología CMOS, por ello su funcionamiento requiere un bajo consumo de energía y además posee un amplio voltaje de funcionamiento de 2V a 5.5V lo cual le permite manejar dispositivos TTL. Se seleccionó este microcontrolador debido a sus características y la disponibilidad en el mercado. La Figura 2.10 muestra la distribución de pines del PIC16F876A.

Este microcontrolador está encargado de manejar las líneas de control del multiplexor análogo CD4067BE, para tomar así el dato de un sensor a la vez mediante el barrido continuo de todas las entradas, almacenarlo en su memoria y una vez que el dato es requerido, enviarlo al circuito de control de la mano robot.

28-Pin PDIP, SOIC, SSOP

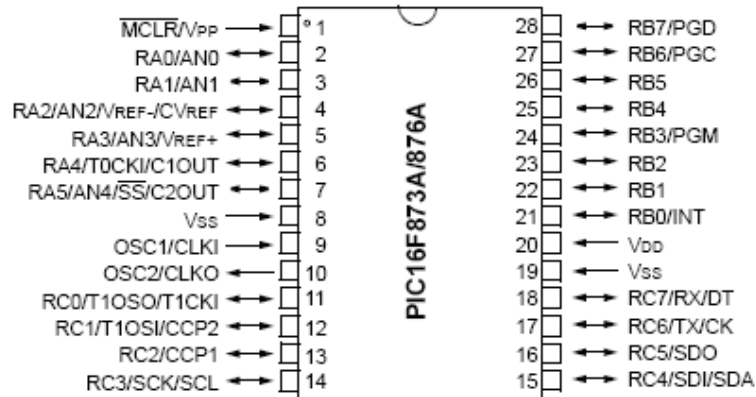


Figura 2.10 Microcontrolador PIC16F876A

La Tabla 2.3 muestra los recursos utilizados de este microcontrolador en esta etapa del proyecto.

Tabla 2.3 Recursos utilizados

| NOMBRE | PIN | DESIGNACION | FUNCION |
|-------------------------|-----|-------------|------------------------------------|
| Entrada análoga | | | |
| RA0 | 2 | ENTRADA | Entrada análoga de los sensores |
| Pulsador | | | |
| RB0/INT | 21 | ENTRADA | Encendido/apagado del módulo |
| LEDs | | | |
| RB1 | 22 | SALIDA | Led indicador encendido |
| RB2 | 23 | SALIDA | Led indicador apagado |
| Control del Multiplexor | | | |
| RB4 | 25 | SALIDA | Línea de control A del mux análogo |
| RB5 | 26 | SALIDA | Línea de control B del mux análogo |
| RB6/PGD | 27 | SALIDA | Línea de control C del mux análogo |
| RB7/PGC | 28 | SALIDA | Línea de control D del mux análogo |
| Comunicación serial | | | |
| RC6/TX | 17 | SALIDA | Línea de transmisión serial |
| RC7/RX | 17 | ENTRADA | Línea de recepción serial |

| Conexiones básicas | | | |
|--------------------|------|--------------|----------------------------|
| MCLR | 1 | ENTRADA | Reset del microcontrolador |
| VDD | 20 | ALIMENTACION | Alimentación positiva |
| VSS | 8,19 | ALIMENTACION | Referencia o tierra |
| OSC1 | 9 | ENTRADA | Oscilador |
| OSC2 | 10 | ENTRADA | Oscilador |

El microcontrolador requiere de un circuito básico para su funcionamiento, esto quiere decir que necesita de ciertos componentes como un circuito de reset (R1, R2, C1, RST), circuito oscilador (XTAL, C2, C3) y líneas de alimentación. Los valores de estos elementos son recomendados por el fabricante y se utilizó un oscilador de cuarzo con una frecuencia de oscilación de 20MHz, la máxima permitida para este microcontrolador. La Figura 2.11 muestra el circuito básico, necesario para el funcionamiento del microcontrolador.

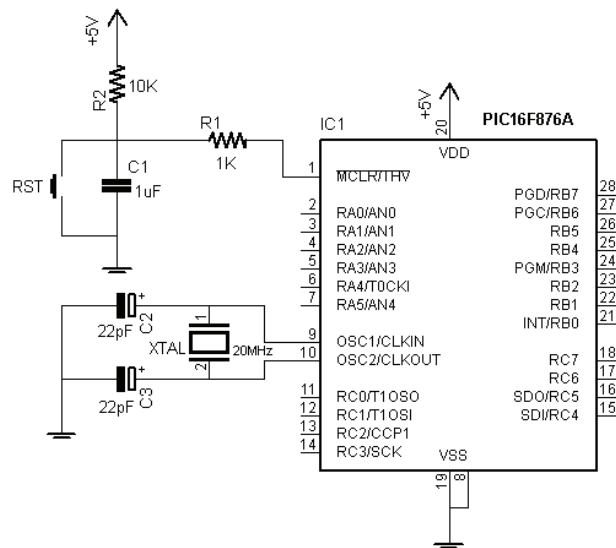


Figura 2.11 Circuito básico para la operación del microcontrolador

2.1.9 INTERFAZ RS-232

Es necesario un medio de transmisión para enviar la información de la posición de los sensores cuando el control de la mano robot lo requiere.

La información requerida por el circuito de control de la mano robot se la puede recibir desde el módulo del guante sensor o desde computador. La etapa de comunicación del circuito de control de la mano robótica está diseñada para intercambiar información con valores estándar fijados por la norma EIA/TIA232, con niveles de voltaje de $\pm 12V$. Por ello es necesario utilizar un circuito integrado que permita transformar los niveles de voltaje que maneja el microcontrolador a los establecidos por la norma EIA/TIA 232 y así intercambiar información sin problemas.

Para este fin, se utilizó el circuito integrado MAX232 el cual convierte los niveles de voltaje TTL/CMOS a niveles de voltaje EIA/TIA 232 y viceversa. Este circuito integrado convierte mediante capacitores los 5V que envía el PIC a -12V y los 12V que envía el control de la mano robot a 0V. La salida de este circuito se la conecta a un conector serial DB-9 macho.

En la Figura 2.12 se muestra la conexión del circuito integrado MAX232 con el microcontrolador PIC16F877A.

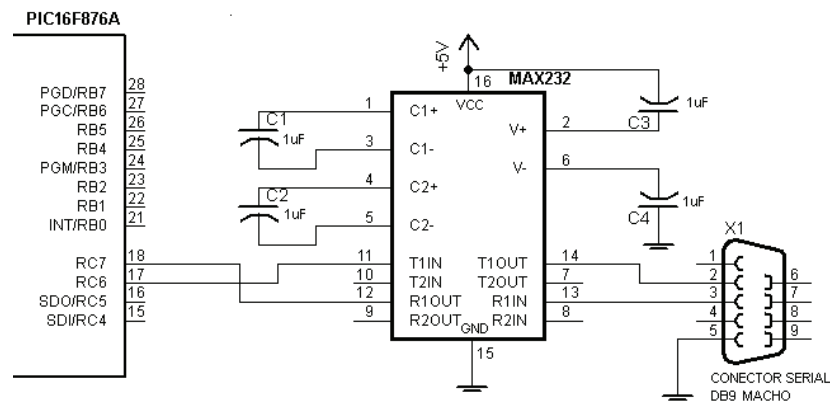


Figura 2.12 Esquema de conexión del MAX232 con el PIC

2.1.10 CIRCUITO IMPLEMENTADO EN EL GUANTE SENSORIZADO

Una vez diseñados todos los circuitos para la captura de datos y su transmisión desde el guante sensorizado; a continuación, la Figura 2.13 muestra el diagrama esquemático del circuito implementado en el guante sensorizado.

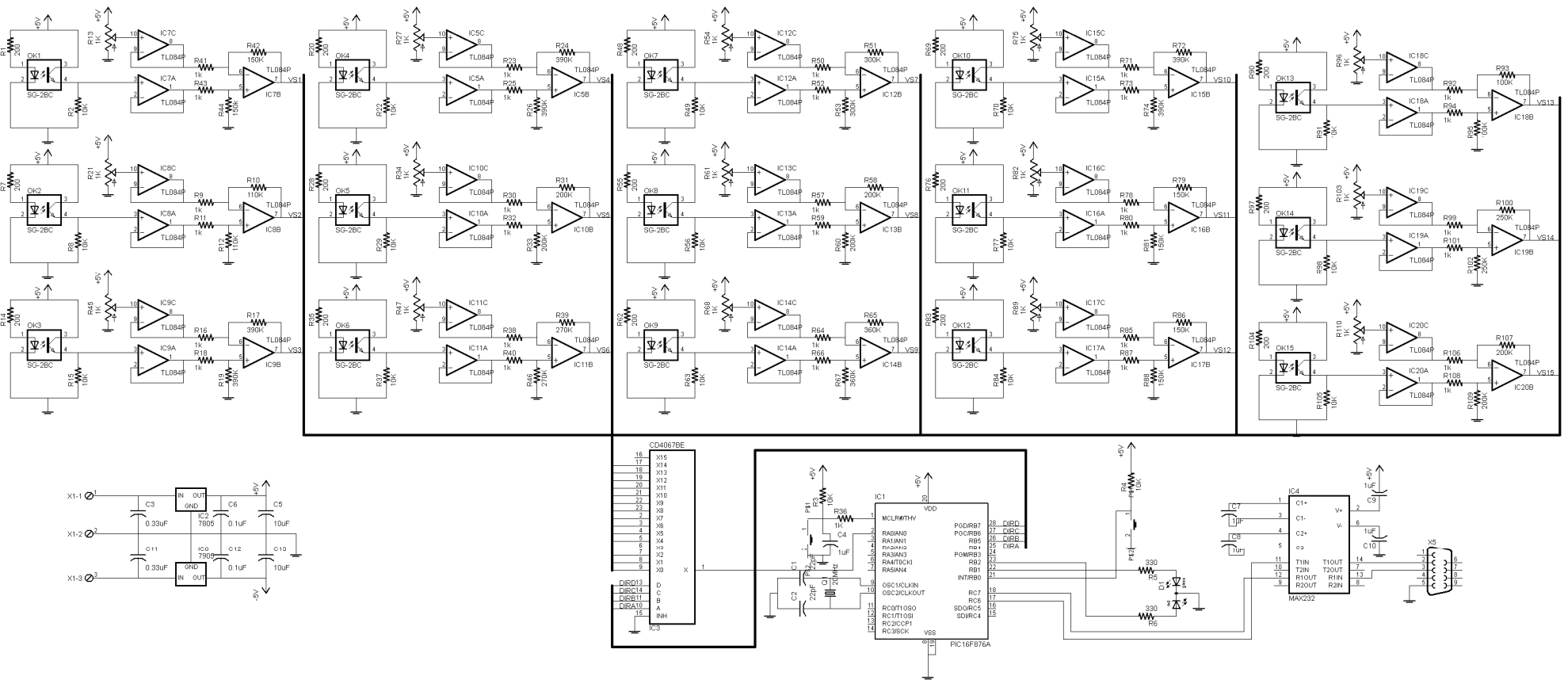


Figura 2.13 Diagrama esquemático del circuito implementado en el guante sensorizado

2.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MANO ROBÓTICA

2.2.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Una segunda parte de este proyecto de titulación corresponde a la mano robótica, la cual está formada por: una etapa de control y una etapa de fuerza las cuales se encuentran debidamente aisladas.

La primera de ellas, la etapa de control, se encarga de realizar todas las operaciones necesarias para el funcionamiento de la mano robótica, para lo cual toma los datos enviados por el guante sensorizado o por la PC a través de una interfaz RS-232, adquiere la señal de realimentación de los sensores de la mano robot, ejecuta el algoritmo de control y genera una señal de control tipo PWM, la cual posteriormente es filtrada para obtener una señal continua y ser enviada a la etapa de fuerza.

La segunda etapa corresponde al circuito de fuerza, el cual funciona con una fuente independiente. Esta etapa toma las señales enviadas por los filtros, los acondiciona y en base a éstos, maneja los actuadores de la mano robot. La Figura 2.14 muestra la arquitectura de la mano robótica.

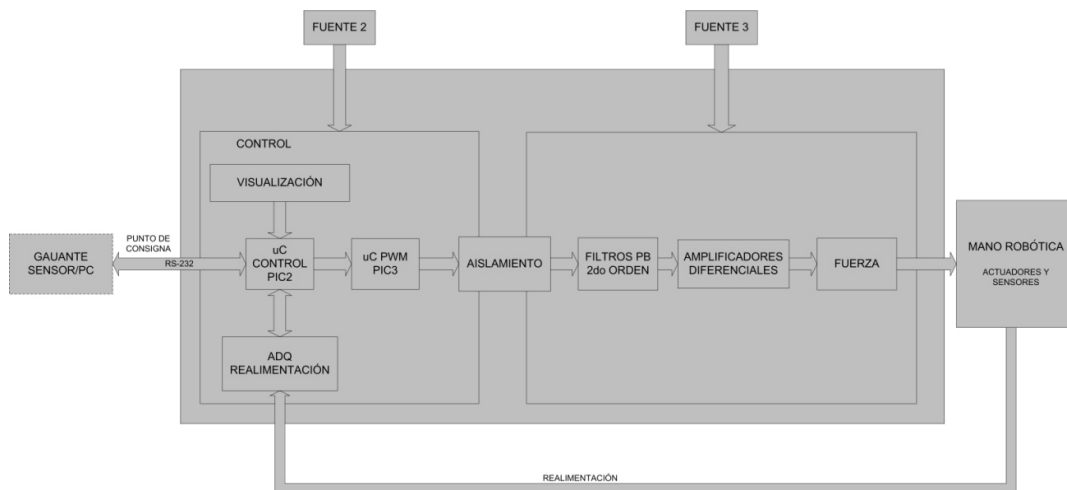


Figura 2.14 Arquitectura del sistema

2.2.2 ESTRUCTURA MECÁNICA

Para el diseño de la estructura mecánica de la mano robot se tomó en cuenta una limitación. Los dedos no pueden realizar los movimientos de adducción y abducción ya que la mecánica necesaria para realizar este tipo de movimientos es muy compleja.

La mano robótica diseñada tiene cinco dedos ubicados sobre una superficie plana la cual viene a ser la palma de la mano. Para el tamaño de los dedos se tomó como referencia el tamaño de una mano humana. Cada falange en la mano humana corresponde también a una falange en la mano robótica. Las falanges distales de los cinco dedos de la mano robótica son iguales, tienen la misma medida, su forma y dimensiones en mm. se las puede observar en la Figura 2.15.

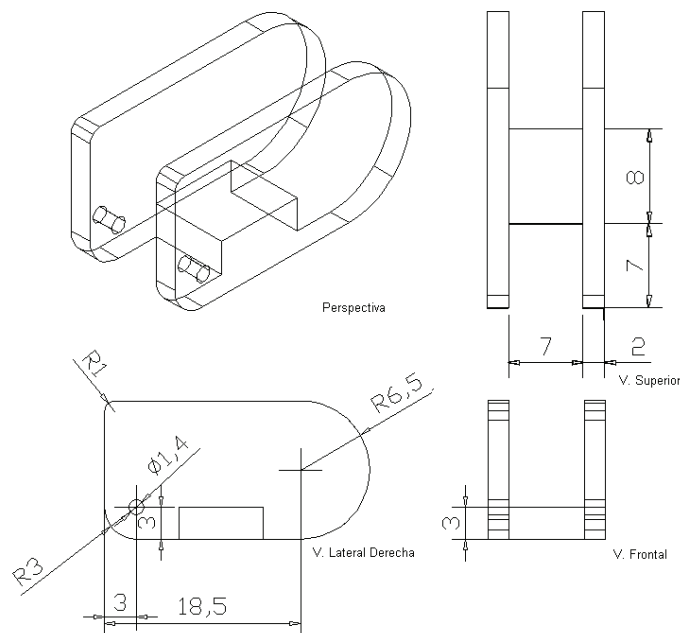


Figura 2.15 Falange distal utilizada en los dedos de la mano robótica

Así mismo, las falanges medias de los dedos: índice, medio, anular, meñique; así como la falange proximal del dedo meñique; y, la falange proximal y el metacarpo del dedo pulgar, todas son iguales. Su forma y dimensiones en mm.

se las puede observar en la Figura 2.16. Cabe recalcar que el dedo pulgar de la mano humana no tiene falange media.

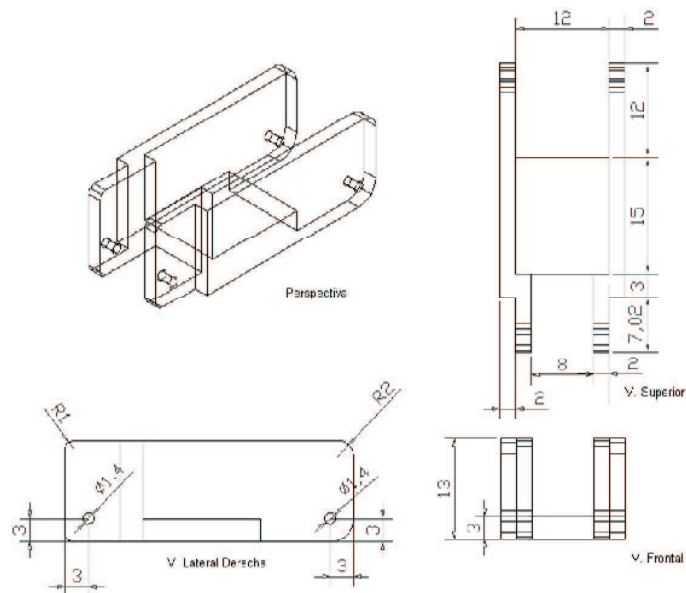


Figura 2.16 Falange media utilizada en los dedos de la mano robótica

Las falanges proximales de los dedos índice, medio y anular tienen diferentes dimensiones. Su forma y dimensiones en mm. para cada una de ellas se las puede observar en las Figuras 2.17, 2.18 y 2.19.

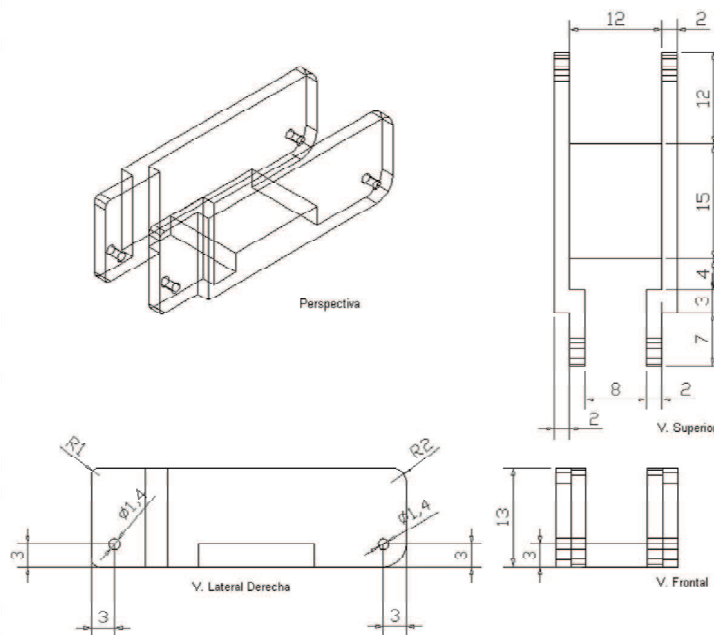


Figura 2.17 Falange proximal del dedo índice de la mano robótica

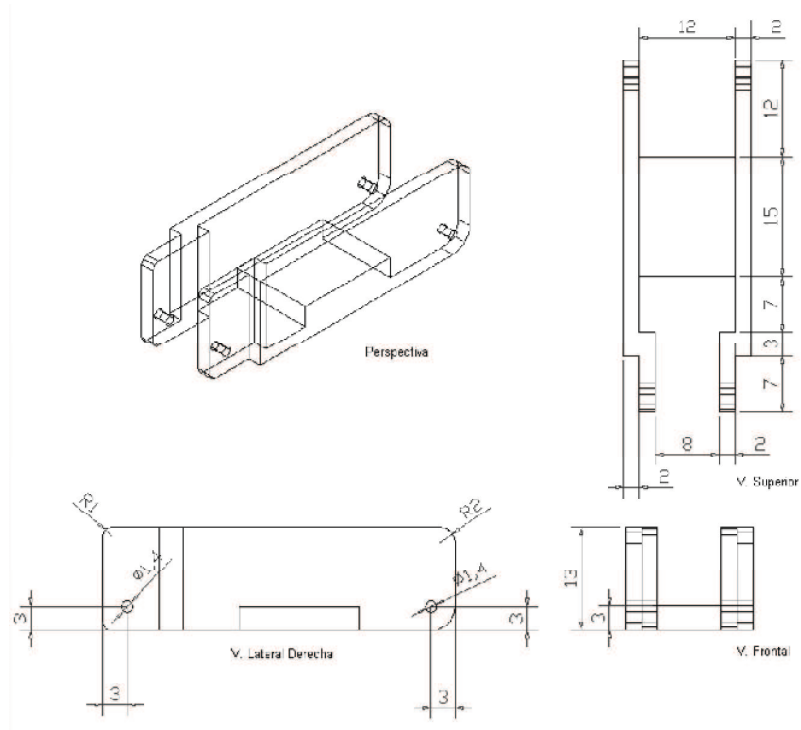


Figura 2.18 Falange proximal del dedo medio de la mano robótica

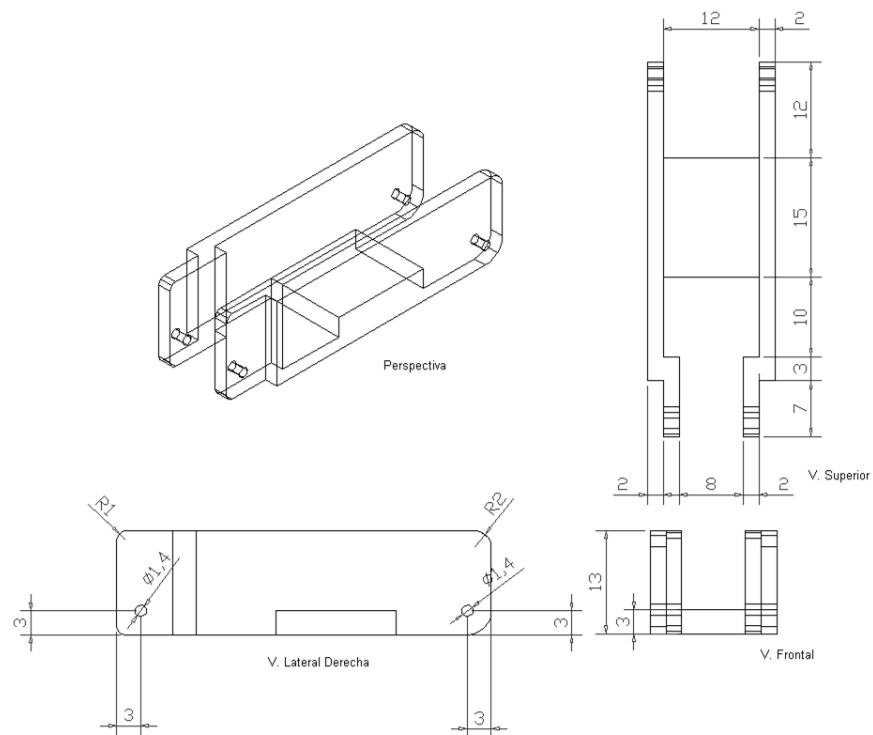


Figura 2.19 Falange proximal del dedo anular de la mano robótica

Para la conversión del movimiento rotacional del motor en lineal que permita el movimiento de flexión de los dedos se utilizó un sistema basado en un tornillo sin fin acoplado al eje de un motor para de esta manera permitir el movimiento de un piñón acoplado al eje de la articulación. Este sistema se lo muestra en la Figura 2.20.

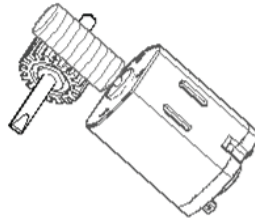


Figura 2.20 Sistema de conversión de movimiento

Se utilizó tornillos sin fin de acero de $\frac{1}{4}$ " de diámetro por $\frac{1}{2}$ " de largo. Además, se utilizó dos tipos de piñones con las mismas dimensiones pero de distinto material. En las articulaciones interfalángicas distales se utilizó piñones de plástico, mientras que en el resto de articulaciones se utilizó piñones de bronce, esto debido a que tienen que soportar una mayor cantidad de peso. Por ello, deben ser elaboradas de un material resistente para evitar el desgaste. Las dimensiones en mm. de los piñones utilizado son mostradas en la Figura 2.21.

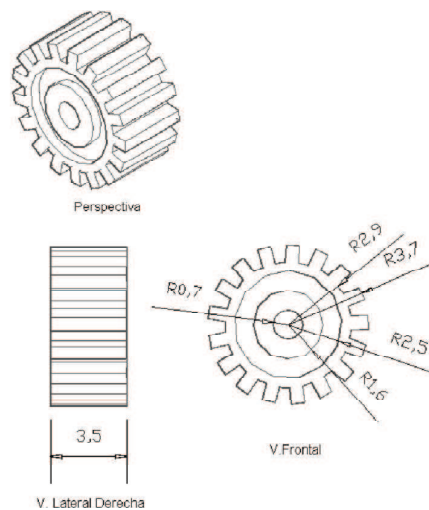


Figura 2.21 Piñón utilizado en las articulaciones de la mano robótica

Los ejes de las articulaciones poseen un biselado en un extremo para que de esta manera se puedan acoplar a los sensores de posición. La Figura 2.22 muestra los ejes utilizados en las articulaciones de la mano robótica, así como sus dimensiones en mm.

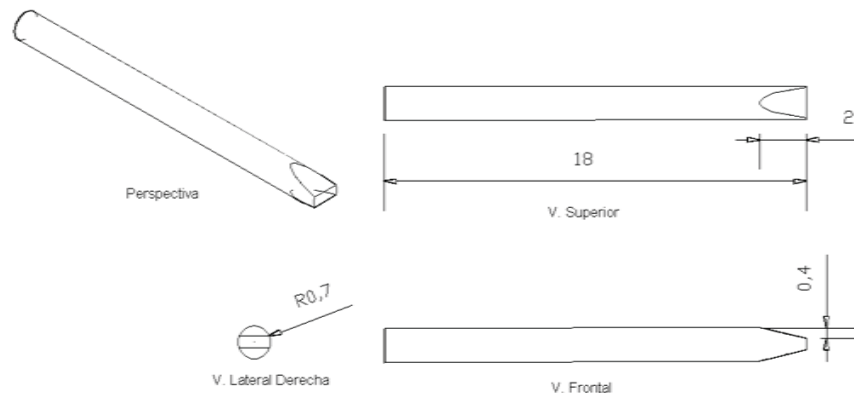


Figura 2.22 Eje utilizado en las articulaciones de la mano robótica

Cuatro de los cinco dedos se encuentran orientados de tal forma que sus grados de libertad permitan el movimiento de flexión de los dedos. Las falanges de los dedos están acopladas mediante articulaciones tipo bisagra, como se puede observar en la Figura 2.23.

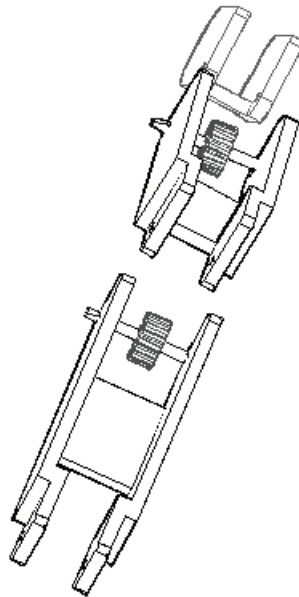


Figura 2.23 Articulaciones de la mano robótica

El quinto dedo, el pulgar, tiene la misma configuración de los otros cuatro, pero varía su posición respecto al plano de la mano. El dedo pulgar es un dedo especial, se lo utiliza especialmente para la prensión de objetos y para ello este dedo puede enfrentarse con cualquiera de los otros cuatro dedos (meñique, anular, corazón, índice), pero para lograr estas habilidades se debería incluir grados de libertad en la palma de la mano. Para compensar esto, se observa que la mano humana, partiendo de la posición plana y girando solamente el dedo pulgar hacia la palma, se aprecia que la base del pulgar se ubica bajo el dedo índice, y el plano de acción en el que se limita la flexión pasa entre el dedo meñique y anular. Para conservar esta configuración, se ubicó la base del pulgar bajo el dedo índice y se ubicó el plano de acción del dedo pulgar pasando entre el dedo meñique y anular, como se muestra en la Figura 2.24.

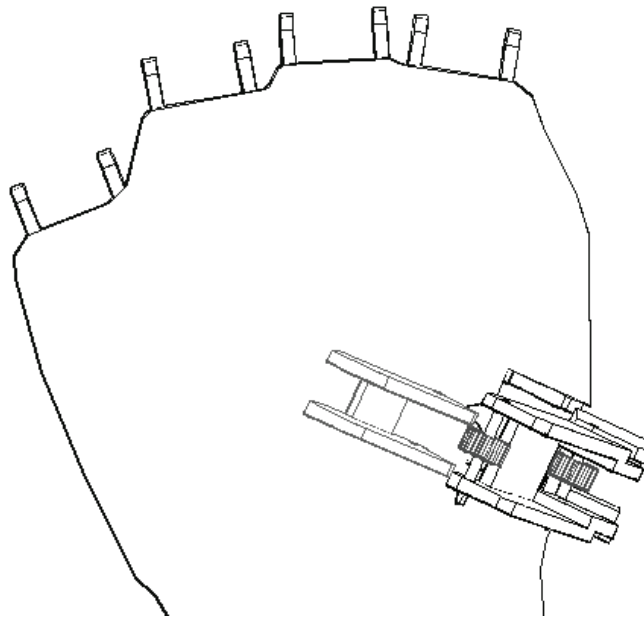


Figura 2.24 Orientación del dedo pulgar

En cuanto al material elegido se puede decir que se eligió el acrílico de 2mm de espesor debido a la facilidad para manipularse y además de su peso reducido. Toda la mano robótica se monta sobre una base metálica provista de dos grados de libertad los cuales no son controlados, esto es mostrado en la Figura 2.25.

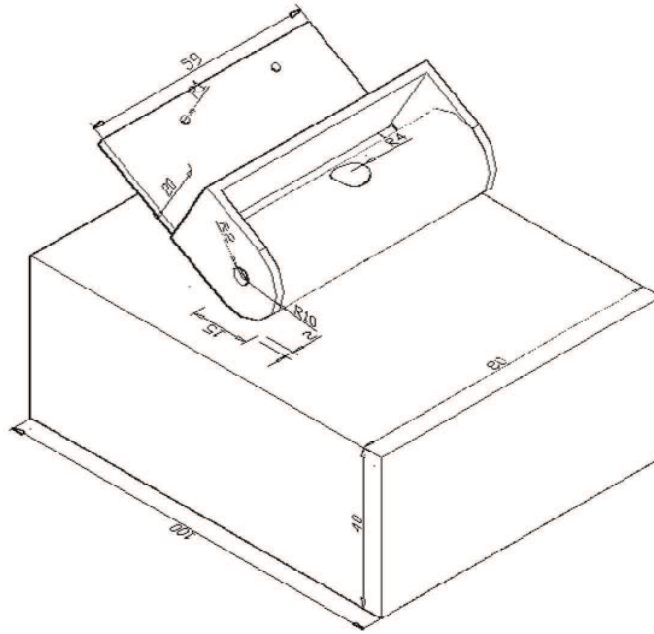


Figura 2.25 Base de la mano robótica, medidas en mm.

La Figura 2.26 muestra una ilustración de la estructura mecánica de la mano robótica.

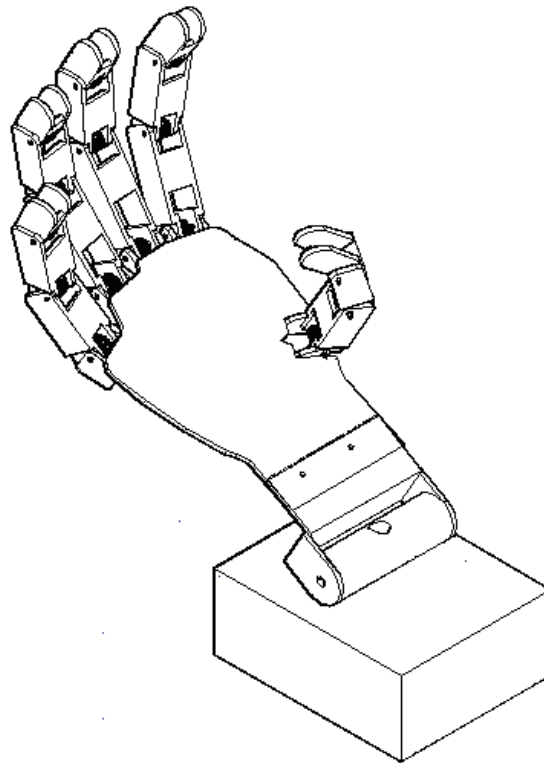


Figura 2.26 Estructura mecánica

2.2.3 FUENTES DE ALIMENTACIÓN DE LA MANO ROBÓTICA

En esta etapa del proyecto se utilizan dos fuentes de alimentación externas, la primera de ellas polariza a toda la etapa de control. Pero, se implementa un circuito regulador con el fin de mantener constante el voltaje de alimentación y eliminar el rizado; y, la segunda fuente alimenta a la etapa de potencia, ésta es una fuente que provee una elevada corriente.

2.2.3.1 FUENTE DE LA ETAPA DE CONTROL

Es una fuente cuya función principal es alimentar a la etapa de control de la mano robótica. El voltaje de entrada se lo obtiene a través de una fuente externa. Para garantizar la estabilidad del voltaje se optó por incluir un circuito regulador de 5V, basado en el circuito integrado regulador 7805. Por ello el voltaje de la fuente externa debe ser superior a 7V debido a que este es el voltaje mínimo al que el regulador empieza a funcionar y menor de 40V debido a que es el voltaje máximo que soporta este dispositivo. Los valores de los capacitores (C1, C2 y C3) de entrada y salida son sugeridos por el fabricante. La Figura 2.27 muestra la fuente de alimentación para la etapa de control de la mano robótica.

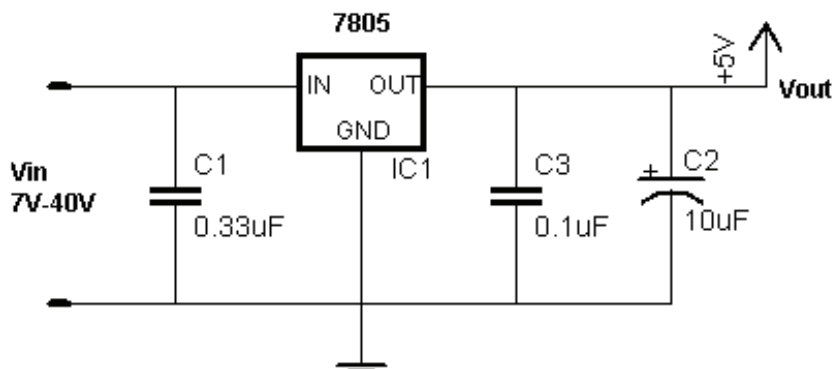


Figura 2.27 Circuito de la fuente para la etapa de control

2.2.3.2 FUENTE DE LA ETAPA DE FUERZA

La etapa de fuerza utiliza una fuente independiente a la etapa de control. Puede ser utilizada cualquier fuente DC bipolar externa capaz de suministrar una corriente de aproximadamente 3A. Esta fuente se conecta a un relé, el mismo que es accionado por una de las salidas del microcontrolador PIC18F452 a través del transistor 2N3904. Esto se lo realiza para que la fuente alimente al circuito únicamente cuando la etapa de control lo ordene. El diodo D1 evita la circulación de corriente inversa a través del transistor durante el apagado del relé. El circuito es mostrado en la Figura 2.28.

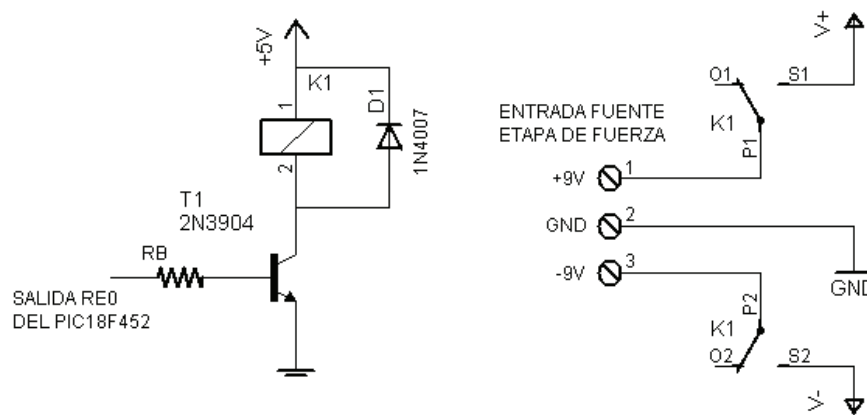


Figura 2.28 Entrada de la fuente para la etapa de fuerza

Del circuito de la Figura 2.28 se tiene que:

$$V_{CC} = R_{Relé} \cdot I_C + V_{CEsat}$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_{Relé}}$$

Adicionalmente se tiene:

$$V_B = R_B \cdot I_B + V_{BEsat}$$

$$R_B = \frac{V_B - V_{BEsat}}{I_B}$$

Siendo, $V_B = 5V$, $V_{CC} = 5V$, $R_{Relé} = 150\Omega$, $h_{FE} = 30$, $V_{BEsat} = 0,7V$ y $V_{CEsat} = 0.2V$, datos tomados de la hoja de datos del transistor para condiciones de saturación. Entonces:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_{Relé}} = \frac{5V - 0.1V}{150\Omega} = 33mA$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{33mA}{30} = 1.1mA$$

$$R_B = \frac{V_B - V_{BEsat}}{I_B} = \frac{5V - 0.7V}{1.1mA} = 3.9K\Omega$$

Se escoge una resistencia $R_B = 3.6K\Omega$ para asegurar la conmutación.

2.2.4 SENSORES DE POSICIÓN

La función principal de estos sensores, es identificar la posición en la cual se encuentran las articulaciones.

Debido al reducido espacio del cual se dispone, se optó por sensores potenciométricos, arreglados de tal forma que permitan ser ubicados en las articulaciones. La Figura 2.29 muestra los potenciómetros utilizados como sensores de posición.

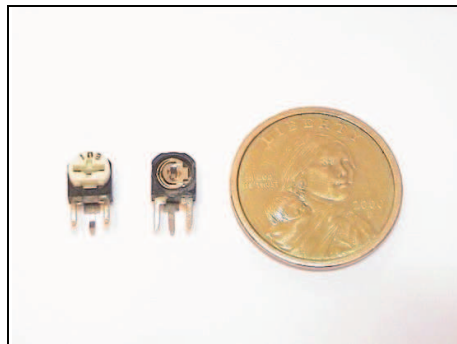


Figura 2.29 Sensores de posición

En cuanto a su ubicación, dos de ellos se encuentran ubicados en las articulaciones interfalángicas de cada dedo; esto es, uno entre la falange distal y media y otro entre la falange proximal y media; y, un tercer sensor se ubica en la articulación comprendida entre la falange proximal y la palma; siendo un total de quince sensores. La ubicación de los sensores para el dedo índice puede observarse en la Figura 2.30.

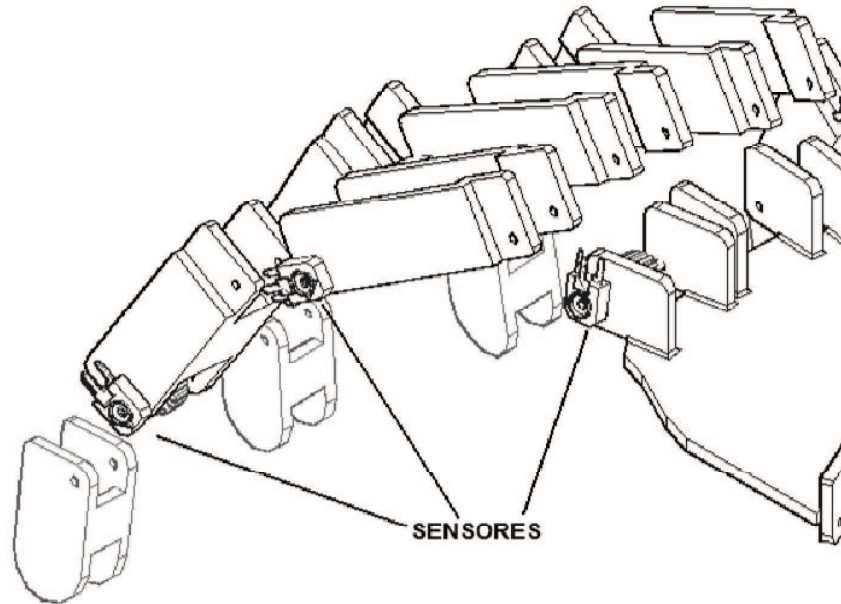


Figura 2.30 Ubicación de los sensores

2.2.4.1 CONEXIÓN

Los quince potenciómetros se polarizan con el voltaje de control, la parte variable de cada potenciómetro se conecta a una entrada del circuito selector, tal y como se muestra en el Figura 2.31.

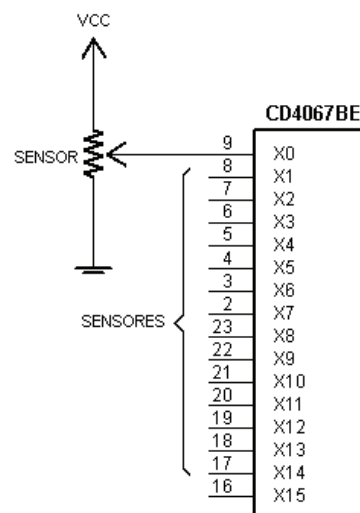


Figura 2.31 Conexión de los sensores con el CD4067BE

2.2.5 SELECCIÓN DE DATOS

Al igual que en la etapa del guante sensor, se utiliza un multiplexor análogo CD4067BE, debido al número de sensores existentes y las limitadas entradas análogas que posee el microcontrolador. Las líneas de datos para seleccionar una de las entradas, son manejadas por el microcontrolador. El esquema de conexión es mostrado en la Figura 2.32.

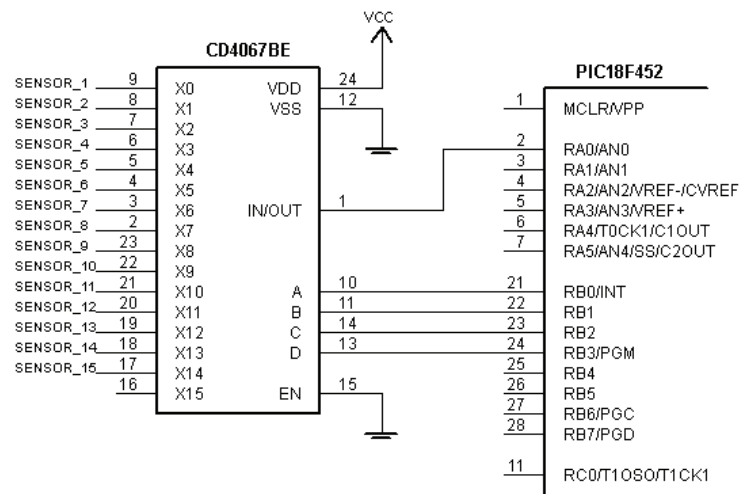


Figura 2.32 Conexión del CD4067BE con el PIC18F452

2.2.6 INTERFAZ RS-232

En esta etapa del proyecto se utiliza una interfaz serial debido a que los datos enviados por el guante sensor o por el computador son transmitidos mediante comunicación serial bajo la norma EIA/TIA232. Los datos corresponden a los valores de la posición de las articulaciones sensadas por el guante, los cuales vienen a ser el valor del punto de consigna (set point) en el lazo de control. Al igual que en la etapa del guante sensor se utiliza un circuito integrado MAX232 para convertir los valores TTL a valores fijados por la norma. La conexión es mostrada en La Figura 2.33.

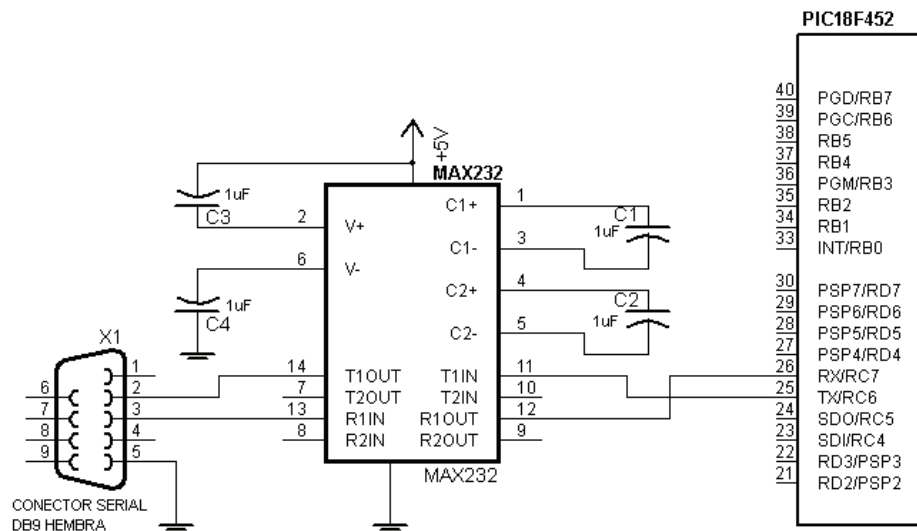


Figura 2.33 Conexión del MAX232 con el PIC18F452

2.2.7 MICROCONTROLADORES

En esta etapa del proyecto se utiliza dos microcontroladores. El primero de ellos es un PIC18F452 encargado del procesamiento de información; y, el segundo es un PIC16F876A utilizado en etapa de salida como generador de las señales PWM.

2.2.7.1 MICROCONTROLADOR PIC18F452

El microcontrolador PIC18F452, llamado posteriormente PIC2, es un microcontrolador de la empresa Microchip el cual se caracteriza por su robustez, sus características son similares a las del PIC16F876A, pero se seleccionó este microcontrolador debido a su cantidad de puertos de entrada/salida y sobre todo debido a que posee 32Kb de memoria de programa y 1536 bytes de memoria RAM, lo cual es requerido debido a lo extenso del programa de control, del cual se tratará posteriormente.

La Figura 2.34 muestra la distribución de pines de este microcontrolador.

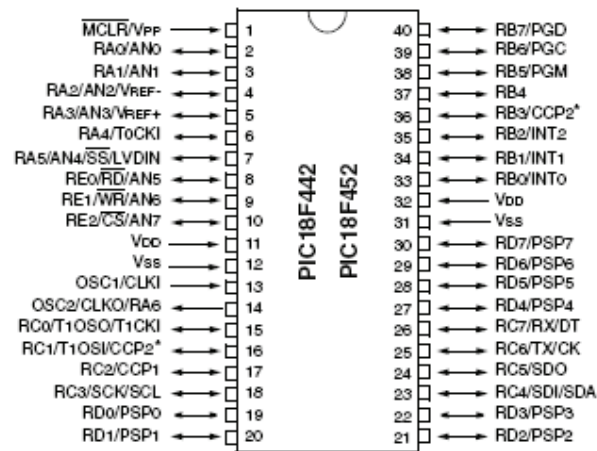


Figura 2.34 Microcontrolador PIC18F452

La función principal de este microcontrolador es la de realizar el algoritmo de control en base a los datos obtenidos a través de la comunicación serial RS-232, ya sea del guante sensor o de la PC, y los datos de realimentación que provienen de los sensores potenciométricos mediante el manejo de las líneas de selección del circuito integrado CD4067BE. Además, utiliza comunicación mediante la Interfaz Periférica Serial (SPI), para enviar los datos de control al microcontrolador PIC16F876A. Se encarga también de la visualización a través de un LCD de 16x2 y del manejo de LEDs indicadores y de pulsadores de selección.

Los recursos utilizados por este microcontrolador son mostrados en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Recursos utilizados

| NOMBRE | PIN | DESIGNACION | FUNCION |
|-----------------|-----|-------------|---------------------------------|
| Entrada análoga | | | |
| RA0 | 2 | ENTRADA | Entrada análoga de los sensores |
| Manejo LCD | | | |
| RA1 | 3 | SALIDA | Manejo del pin RS del LCD |
| RA2 | 4 | SALIDA | Manejo del pin E del LCD |
| RD4 | 27 | SALIDA | Terminal de datos D4 del LCD |
| RD5 | 28 | SALIDA | Terminal de datos D5 del LCD |

| | | | |
|---|-------|--------------|------------------------------------|
| RD6 | 29 | SALIDA | Terminal de datos D6 del LCD |
| RD7 | 30 | SALIDA | Terminal de datos D7 del LCD |
| Pulsadores | | | |
| RC0 | 15 | ENTRADA | Selección EXIT |
| RD0 | 19 | ENTRADA | Selección MODO |
| RD1 | 20 | ENTRADA | Selección ENTER |
| Control de alimentación para la etapa de salida | | | |
| RE0 | 8 | SALIDA | Control de relé para alimentación |
| LEDs | | | |
| RE1 | 9 | SALIDA | Led indicador ENCENDIDO |
| RE2 | 10 | SALIDA | Led Indicador STAND-BY |
| Comunicación serial | | | |
| RC6/TX | 25 | SALIDA | Línea de transmisión serial |
| RC7/RX | 26 | ENTRADA | Línea de recepción serial |
| Líneas de la Interfaz Periférica Serial (SPI) | | | |
| RC3/SCK | 18 | SALIDA | Señal de reloj SPI |
| RC4/SDI | 23 | ENTRADA | Entrada de datos SPI |
| RC5/SDO | 24 | SALIDA | Salida de datos SPI |
| Control del Multiplexor | | | |
| RBO | 33 | SALIDA | Línea de control A del Mux análogo |
| RB1 | 34 | SALIDA | Línea de control B del Mux análogo |
| RB2 | 35 | SALIDA | Línea de control C del Mux análogo |
| RB3 | 36 | SALIDA | Línea de control D del Mux análogo |
| Conexiones básicas | | | |
| MCLR | 1 | ENTRADA | Reset del microcontrolador |
| VDD | 11,32 | ALIMENTACION | Alimentacion positiva |
| VSS | 12,31 | ALIMENTACION | Referencia o tierra |
| OSC1 | 13 | ENTRADA | Oscilador |
| OSC2 | 14 | ENTRADA | Oscilador |

La configuración básica para el funcionamiento de este microcontrolador, así como los valores de los elementos, son las mismas que la expuesta en el numeral 2.1.8.

2.2.7.2 MICROCONTROLADOR 16F876A

El microcontrolador PIC16F876A, llamado posteriormente PIC3, es el encargado de recibir los datos enviados por el PIC18F452 como resultado del procesamiento, y en base a cada uno de ellos generar las 15 señales PWM necesarias para el control de los actuadores. Los datos son transferidos a través de la Interfaz Periférica Serial (SPI) del microcontrolador.

La Tabla 2.5 muestra los recursos utilizados por este microcontrolador.

Tabla 2.5 Recursos utilizados

| NOMBRE | PIN | DESIGNACION | FUNCION |
|---|-----|-------------|----------------------|
| Líneas de la Interfaz Periférica Serial (SPI) | | | |
| RC3/SCK | 14 | ENTRADA | Señal de reloj SPI |
| RC4/SDI | 15 | ENTRADA | Entrada de datos SPI |
| RC5/SDO | 16 | SALIDA | Salida de datos SPI |
| Salidas PWM | | | |
| RB0 | 21 | SALIDA | Salida PWM-0 |
| RB1 | 22 | SALIDA | Salida PWM-1 |
| RB2 | 23 | SALIDA | Salida PWM-2 |
| RB3 | 24 | SALIDA | Salida PWM-3 |
| RB4 | 25 | SALIDA | Salida PWM-4 |
| RB5 | 26 | SALIDA | Salida PWM-5 |
| RB6 | 27 | SALIDA | Salida PWM-6 |
| RB7 | 28 | SALIDA | Salida PWM-7 |
| RC0 | 11 | SALIDA | Salida PWM-8 |
| RC1 | 12 | SALIDA | Salida PWM-9 |
| RC2 | 13 | SALIDA | Salida PWM-10 |
| RC6 | 17 | SALIDA | Salida PWM-11 |
| RC7 | 18 | SALIDA | Salida PWM-12 |
| RA0 | 2 | SALIDA | Salida PWM-13 |
| RA1 | 3 | SALIDA | Salida PWM-14 |

| Conexiones básicas | | | |
|--------------------|-------|--------------|----------------------------|
| MCLR | 1 | ENTRADA | Reset del microcontrolador |
| VDD | 11,32 | ALIMENTACION | Alimentación positiva |
| VSS | 12,31 | ALIMENTACION | Referencia o tierra |
| OSC1 | 13 | ENTRADA | Oscilador |
| OSC2 | ,14 | ENTRADA | Oscilador |

De igual forma, la configuración básica para el funcionamiento de este microcontrolador, así como los valores de los elementos, son las mismas que la expuesta en el numeral 2.1.8.

2.2.8 AISLAMIENTO

Para evitar que cualquier señal de la etapa de potencia afecte el funcionamiento de la etapa de control, se decidió aislar la etapa de control de la etapa de salida mediante un circuito de aislamiento formado por opto-acopladores 4N25, los cuales se encuentran ubicados entre la salida del PIC3 y la etapa de filtrado. Se utilizó una configuración básica de un circuito de aislamiento, basado en una configuración no inversora de la señal que ingresa al opto-acoplador, tal como se muestra en la Figura 2.35.

Para una corriente $I_{LED} = 10mA$, la cual corresponde a la corriente de conmutación del fototransistor, se tiene:

$$V_{IN} = R_E \cdot I_{LED} + V_{LED}$$

Siendo $V_{IN} = 5V$, $V_{LED} = 2V$, $I_{LED} = 10mA$,

$$R_E = \frac{V_{IN} - V_{LED}}{I_{LED}} = \frac{5V - 2V}{10mA} = 300\Omega$$

Se escoge un valor normalizado de $R_E = 330\Omega$. Con este valor se tiene una corriente $I_{LED} = 9.1mA$.

Para el circuito detector se tiene $V_{CC} = 9V$, $I_{LED} = 9.1mA$, $CTR = 20\%$, datos tomados de la hoja de datos del elemento, entonces:

$$I_S = I_{LED} \cdot CTR = 9.1mA \cdot 20\% = 1.82mA$$

$$R_S = \frac{V_{CC}}{I_S} = \frac{9V}{1.82mA} = 4.9K\Omega$$

Para asegurar la saturación se escoge una resistencia estándar de

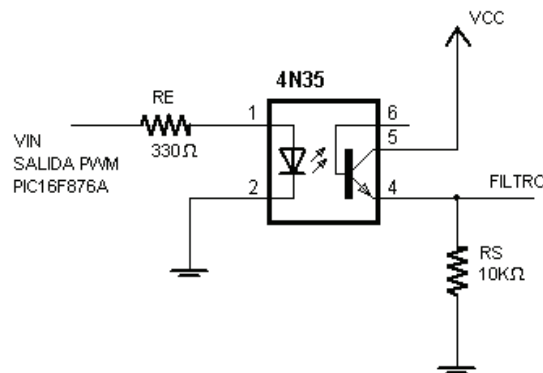


Figura 2.35 Circuito de aislamiento

2.2.9 ETAPA DE SALIDA

La etapa de salida está formado por filtros activos pasa bajos Butterworth de segundo orden cuya salida es acoplada a un amplificador diferencial. Ambos son implementados mediante amplificadores operacionales TL084.

Se utilizó este tipo de filtros debido a los buenos resultados obtenidos en prácticas realizadas y debido a su sencillez de armado. Estos filtros son acoplados en su entrada por medio de un circuito seguidor de voltaje y extraen el valor DC de cada salida PWM proporcionado por el PIC3, siendo un total de quince.

El amplificador diferencial toma la señal de salida del filtro y la convierte en un valor proporcional comprendido entre +9V y -9V, valores necesarios para manejar a los actuadores y producir una inversión de giro.

Para el diseño del filtro se tiene una frecuencia de corte $f_c = 500\text{Hz}$, la cual es la frecuencia PWM; para un filtro Butterworth de segundo orden, se tiene lo siguiente:

$$C1' = \frac{C1''}{2\pi \cdot f_c} \quad C2' = \frac{C2''}{2\pi \cdot f_c}$$

Para un filtro Butterworth de segundo orden los valores de $C1''$ y $C2''$ son: $C1'' = 1.414$ y $C2'' = 0.7071$

Por lo tanto:

$$C1' = \frac{1.414}{2\pi \cdot 500} \quad C2' = \frac{0.7071}{2\pi \cdot 500}$$

$$C1' = 4.5 \cdot 10^{-4} \quad C2' = 2.25 \cdot 10^{-4}$$

En donde:

$$C1 = \frac{C1'}{R} \quad y \quad C2 = \frac{C2'}{R}$$

Si $R=20\text{K}\Omega$, entonces:

$$C1 = 22.5\text{nF}, \text{ se tiene un valor estandar de } C1 = 22\text{nF}$$

$$C2 = 11.2\text{nF}, \text{ se tiene un valor estandar de } C1 = 10\text{nF}$$

La Figura 2.36 muestra el esquema del filtro activo utilizado en la etapa de salida.

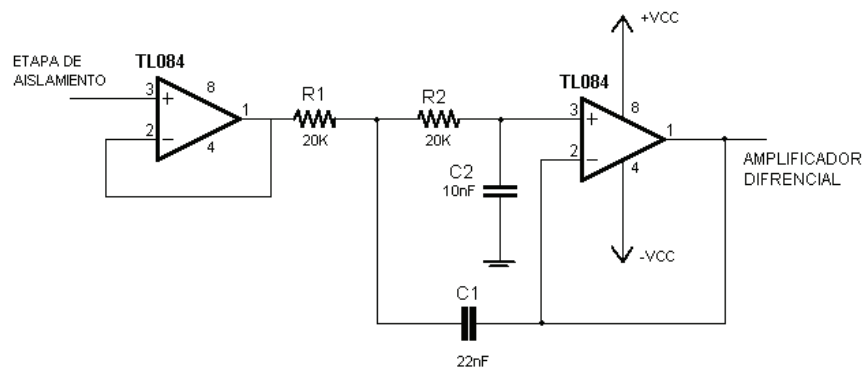


Figura 2.36 Filtro de salida

Para el diseño del amplificador diferencial es necesario un voltaje de referencia fijo de $V_{CC}/2$, para ello se utiliza un potenciómetro de $10K\Omega$ acoplado a un seguidor de voltaje.

Para el amplificador diferencial se tiene: $R1=R3$ y $R2=R4$

Se requiere que cuando $V_{IN} = 9V$, entonces $V_{OUT} = 9V$.

Por lo tanto:

$$V_{OUT} = \frac{R2}{R1} (V_{IN} - V_{REF})$$

$$\frac{R2}{R1} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN} - V_{REF}}$$

$$\frac{R2}{R1} = \frac{9V}{9V - 4.5V} = 2$$

$$R2 = 2 \cdot R1$$

Se escoge $R1=10K\Omega$ y $R2=20K\Omega$

Con estos valores si $V_{IN} = 0V$, entonces $V_{OUT} = -9V$.

La Figura 2.37 muestra el amplificador diferencial de salida con los valores de los elementos calculados.

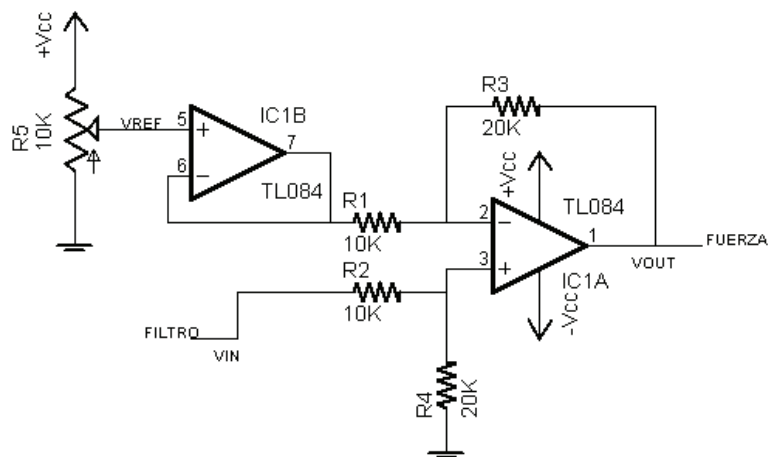


Figura 2.37 Amplificador diferencial de salida

2.2.10 CIRCUITO DE FUERZA

Para la etapa de fuerza se utiliza un transistor NPN TIP110 y un transistor PNP TIP127 por cada salida, conectados como muestra la Figura 2.38. De acuerdo con esta figura, Cuando $V_{in} = 0V$, ninguno de los transistores conduce puesto que sus bases están a un potencial de $0V$ respecto su referencia. Cuando $V_{in} = +V$, el transistor Q1 conduce, mientras que Q2 se encuentra en corte, produciendo en la salida un valor de $0 < V_{salida} \leq +V_{cc}$ dependiendo del voltaje de base V_B . Cuando $V_{in} = -V$ el transistor Q2 conduce, mientras que Q1 se encuentra en corte, como resultado se produce en la salida un valor de $-V_{cc} < V_{salida} \leq 0$. De esta manera en las terminales del motor se tienen voltajes positivos y negativos respecto a su referencia permitiendo de esta manera la inversión de giro.

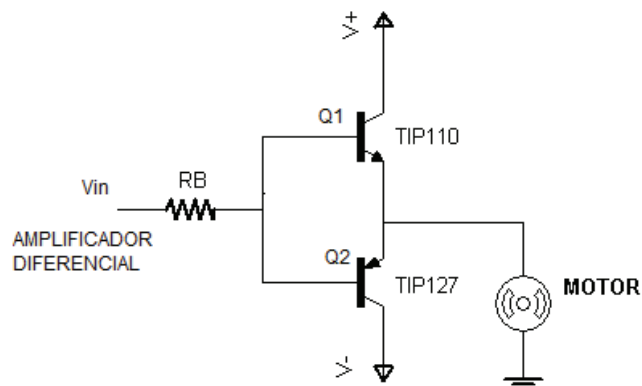


Figura 2.38 Circuito de fuerza

Para el cálculo de la resistencia de base R_B se tomó en cuenta las condiciones de saturación. En estas condiciones para los motores y transistores utilizados se tiene:

$$I_{Cmax} = 300mA, V_{BEsat} = 1.3V, V_{CEsat} = 1.4V, h_{FE} = 1500, V_{Bmax} = 9V$$

$$V_{Bmax} = R_B \cdot I_B + V_{BEsat} + V_{motor}$$

$$V_{motor} = V_{CC} - V_{CEsat} = 9V - 1.4V = 7.6V$$

$$I_B = \frac{I_{Cmax}}{h_{FE}} = \frac{0.3A}{1500} = 0.2mA$$

$$R_B = \frac{V_{Bmax} - V_{motor} - V_{BEsat}}{I_B}$$

$$R_B = \frac{9V - 7.6V - 1.3V}{0.2mA} = 500\Omega$$

Se escoge una resistencia normalizada $R_B = 470\Omega$

2.2.11 ACTUADORES

Los actuadores permiten el movimiento de los dedos de la mano robótica. De la misma manera, debido al reducido espacio del cual se dispone se utilizaron tres clases de motores DC. Los primeros, los más pequeños, se encuentran ubicados en las falanges medias y se encargan del movimiento de las falanges distales; los segundos, son de un tamaño similar a los primeros pero se encuentran acoplados a un juego de engranajes, se encuentran ubicados en las falanges proximales y se encargan del movimiento de las falanges medias; y, los terceros, los más grandes, también se encuentran acoplados a un juego de engranajes, están ubicados en la palma de la mano y se encargan del movimiento de las falanges proximales.

Los motores ubicados en las falanges medias son micromotores de DC FF-M20VA/PA cuyos valores nominales son:

- $V_{nom} = 6V$
- $n_{nom} = 11800 \text{ rpm}$
- $I_{nom} = 255mA$
- $T_{nom} = 0.18mNm$.

Los motores ubicados en las falanges proximales son micromotores de DC GM12 100:1, poseen un sistema de engranajes. Sus valores nominales son:

- $V_{nom} = 6V$
- $n_{nom} = 120rpm$

- $I_{nom} = 40mA$
- $T_{nom} = 70.6mNm$

Los motores ubicados en la palma de la mano son micromotores de DC GM20 24:1, de igual manera poseen un sistema de engranajes. Sus valores nominales son:

- $V_{nom} = 6V$
- $n_{nom} = 470rpm$
- $I_{nom} = 70mA$
- $T_{nom} = 95mNm$

Estos motores se los pueden observar en la Figura 2.39.

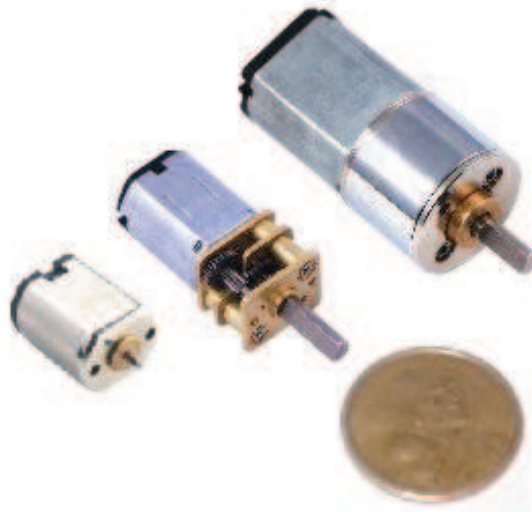


Figura 2.39 Motores de DC

Físicamente se encuentran ubicados sobre palma de la mano y las falanges proximal y media de los dedos. La ubicación de los motores se puede observar en la Figura 2.40.



Figura 2.40 Ubicación de motores

2.2.12 CIRCUITO IMPLEMENTADO EN LA MANO RÓBOTICA

Diseñados todos los circuitos que conforman tanto la etapa de control como la etapa de potencia, la Figura 2.41 muestra el diagrama esquemático del circuito implementado en la mano robótica.

En este capítulo se diseñó el hardware, tanto del guante sensorizado como de la mano robótica. También se realizó el diseño de los circuitos de acondicionamiento, control, comunicación y aislamiento del guante sensorizado y de la mano robótica. Además, se diseñaron todos los circuitos necesarios para la conversión D/A (Digital-Analógica) utilizando la técnica PWM, esto incluye los filtros activos, el amplificador diferencial y finalmente la etapa de potencia.

En el siguiente capítulo se diseñará todo el software de soporte de los microcontroladores 1, 2 y 3 para controlar el sistema. Además, se diseñará un software para el control de la mano robótica a través de la PC, para esto se utilizará el paquete computacional LabView 6.1.

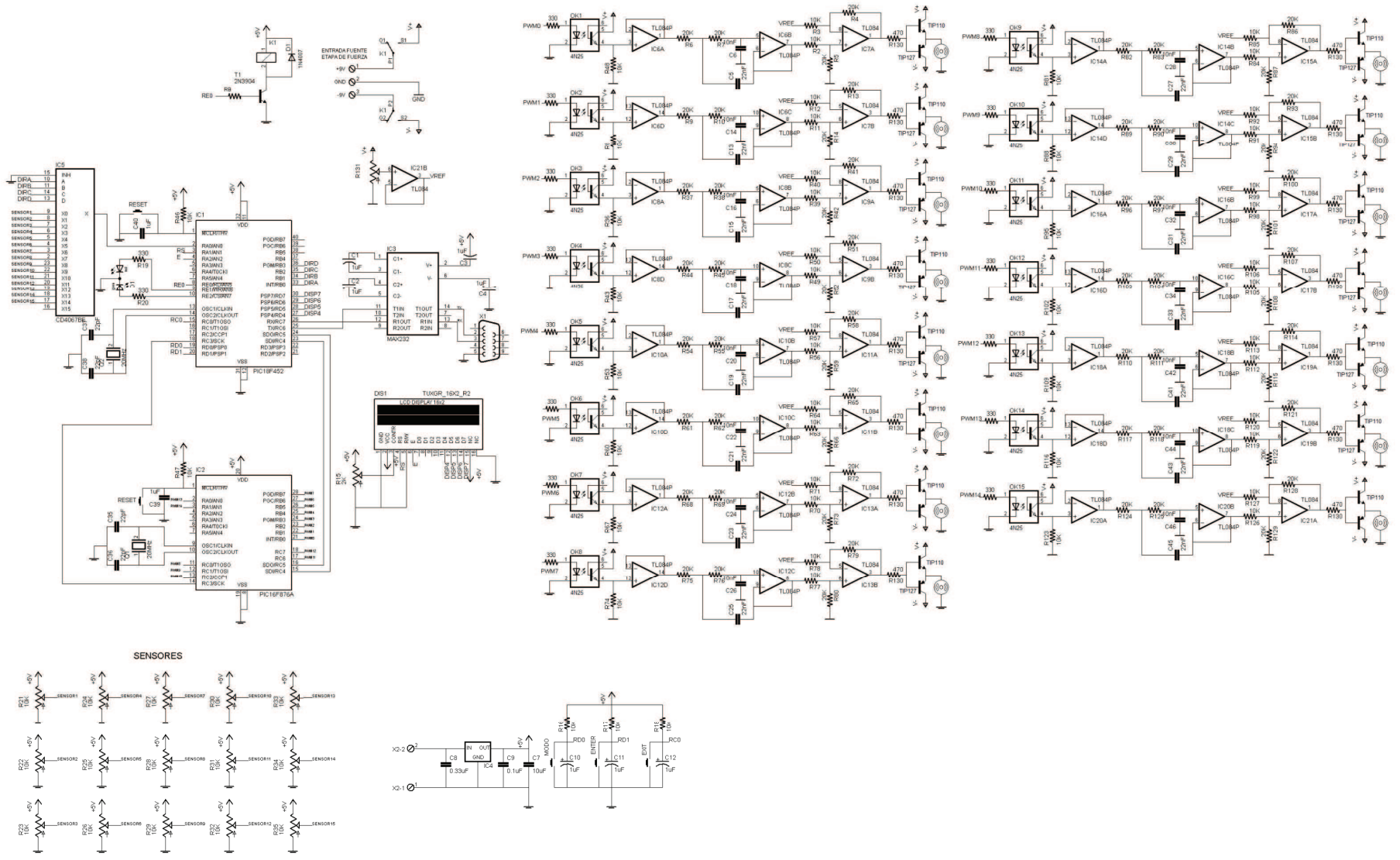


Figura 2.41. Diagrama esquemático del circuito implementado en la mano robótica

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL

Una vez diseñado todo el hardware necesario, en el presente capítulo se describen los requerimientos del software para alcanzar los objetivos planteados.

Todas las funciones a realizarse en el guante sensorizado son realizadas con la ayuda de un programa de control implementado en un microcontrolador PIC16F876A (PIC1).

El diseño de la mano requiere de un control de posición en lazo cerrado independiente para cada articulación de los dedos de la mano robótica. Inicialmente se pensó en utilizar un algoritmo de control simple ON/OFF, pero, como resultado se obtuvo un control torpe con movimientos de los dedos a manera de pasos. Por ello esta idea de control, aunque sencilla de implementar, fue descartada. Posteriormente se planteó el uso de un algoritmo de control tipo PI (Proporcional-Integral), el cual, una vez implementado, tuvo como resultado un movimiento de los dedos más uniforme, pero con un tiempo de establecimiento demasiado lento. Por ello, de igual manera, fue descartada su implementación. Para mejorar el tiempo de establecimiento se planteó como alternativa la implementación de un algoritmo de control de posición tipo PD (Proporcional-Derivativo) con el cual se mejoró el tiempo de establecimiento, con un movimiento de los dedos en forma uniforme, pero dadas las características del sistema se tenía un error de posición demasiado elevado. Así que fue descartada su implementación. Finalmente, se planteó un algoritmo de control tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) con el cual se mejoró notablemente el error de posición, el tiempo de establecimiento y un movimiento de los dedos en forma uniforme, de aquí que se seleccionó este algoritmo de control.

Para evitar cualquier tipo de complicación con el programa de control se prefirió utilizar dos microcontroladores, uno de ellos el PIC18F452 (PIC 2) encargado de las tareas de control y otro PIC16F876A (PIC 3) encargado de generar las

señales PWM necesarias para convertir los valores digitales que resultan de los algoritmos de control, en analógicos, necesarios para el manejo de los actuadores de la mano robótica.

El compilador utilizado en la elaboración de los programas de los PIC's 1 y 2 fue MicroCode Studio – PICBASIC PRO 2.46 de Mechanique, dicho compilador puede trabajar con instrucciones alto y bajo nivel (Basic y Ensamblador). Pero la función de generar 15 señales PWM independientes requiere ser realizada con un número reducido de instrucciones, para evitar conflictos con los contadores. Por ello, el programa de control del PIC3 fue implementado en lenguaje ensamblador a través del software MPLAB de Microchip.

Adicionalmente, para el control de la mano robótica a través del computador se utilizó una aplicación diseñada en LabView 6.1 que permite manipular el puerto serial ya que a través de éste se podrá interactuar con la mano robótica.

3.1 DISEÑO DEL PROGRAMA DEL PIC16F876A (PIC1) UTILIZADO EN EL GUANTE SENSORIZADO

El programa de control utilizado en el guante sensorizado es el encargado de seleccionar y procesar las señales acondicionadas enviadas por los sensores fotoeléctricos ubicados en el guante. Adicionalmente, el PIC1 ejecuta una rutina de calibración de cada uno de los sensores y transmite estos valores cuando el control de la mano robótica lo requiere.

3.1.1 PROGRAMA PRINCIPAL DEL PIC1

El programa principal en su primera etapa se encarga de declarar todas las variables y etiquetas que serán utilizadas en el programa, luego configura los puertos y registros; y, los limpia para evitar errores durante el programa. Una vez realizadas todas estas tareas el PIC espera hasta que la tecla de inicio sea presionada. Si la tecla de inicio ya fue presionada el PIC actualiza el valor de los LEDs, adquiere diez datos para cada uno de los sensores y realiza el promedio.

En la adquisición de datos es necesario seleccionar el dato deseado. Para ello, el PIC maneja las líneas de control del CD4067BE para conectar la entrada acondicionada del primer sensor a la entrada analógica AN0. Dicha señal es digitalizada por medio del conversor A/D del PIC y procesada para así determinar el ángulo de cada articulación. Una vez hecho esto, el PIC actualiza las líneas de control del CD4067BE para seleccionar el segundo dato y repetir el proceso hasta leer los 15 datos enviados por los sensores.

El PIC realiza todo este proceso en una forma continua mientras no se detecte un pulso en el botón de parada o una interrupción que le indique que debe transmitir los datos. Si el botón de parada es presionado, el PIC deja de leer las entradas, actualiza los LEDs y se encierra en un lazo infinito hasta que la tecla de inicio sea nuevamente presionada.

Para poder capturar los movimientos de los dedos de la mano es necesario interpretar los datos enviados por los sensores del guante y relacionarlos con los ángulos formados por cada una de las articulaciones de los dedos cuando éstos se flexionen. La forma de relacionar estos datos es mediante ecuaciones las cuales deben entregar como resultado un ángulo por cada valor enviado del sensor. Para encontrar estas ecuaciones es necesario crear tablas con un cierto número de datos tanto de ángulos como de valores enviados por los sensores cuando los dedos se encuentren en diferentes posiciones de flexión. Luego, con la ayuda de una regresión lineal se encontraran estas ecuaciones.

La mecánica de la mano humana es muy compleja y debido a que la mano robótica únicamente reproduce los movimientos de flexión de los dedos, se optó por utilizar la técnica experimental de agarre cilíndrico de la mano humana, la cual consiste en agarrar un cilindro permitiendo que la mano tome dicha forma. Este método de agarre permite la flexión de todos los dedos de la mano. La Figura 3.1 muestra la técnica de agarre cilíndrico.



Fuente: TAYLOR G.L., The anatomy and mechanics of the human hand

Figura 3.1 Técnica de agarre cilíndrico

Para aplicar esta técnica se construyeron cilindros con diámetros que varían desde 1cm hasta 10cm, permitiendo obtener diez posiciones de agarre cilíndrico. A éstas se suman dos más que son la posición inicial y final, donde la posición inicial será cuando la mano se encuentre sin flexión y la posición final cuando la mano se encuentra totalmente flexionada. Las posiciones intermedias son nombradas de acuerdo al diámetro del cilindro; esto es, la posición 1 corresponde al agarre con el cilindro de diámetro 1cm, la posición 2 corresponde al agarre con el cilindro de diámetro 2cm y así sucesivamente. Esto da un total de doce posiciones. Así mismo, el sensor 1 producirá un ángulo θ_1 , el sensor 2 producirá un ángulo θ_2 y así sucesivamente con los quince sensores. Como ejemplo, la Figura 3.2 muestra los ángulos de las articulaciones 4, 5 y 6 del dedo índice que corresponden a los ángulos θ_4 , θ_5 y θ_6 .

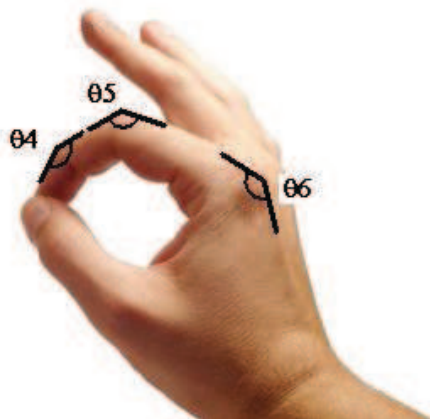


Figura 3.2 Ángulos para el dedo índice

Los valores de los ángulos fueron medidos físicamente en cada articulación de la mano sin el guante mediante un transportador. Las mediciones fueron realizadas para cada una de las posiciones mencionadas anteriormente. Posteriormente, con el guante puesto y con la ayuda de un LCD se observó el valor luego de ser

discretizado por el PIC para cada una de las doce posiciones. Los ángulos medidos para cada posición así como el valor de los sensores luego de ser discretizados son mostrados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores de ángulos y sensores

| | SENSORES | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Posición inicial | 29 | 19 | 80 | 72 | 33 | 55 | 45 | 41 | 59 | 60 | 15 | 28 | 18 | 43 | 25 |
| Posición 10 | 49 | 46 | 85 | 105 | 67 | 56 | 90 | 90 | 70 | 80 | 80 | 39 | 80 | 93 | 45 |
| Posición 9 | 65 | 70 | 98 | 115 | 90 | 59 | 107 | 100 | 71 | 78 | 95 | 49 | 95 | 110 | 50 |
| Posición 8 | 75 | 111 | 115 | 126 | 93 | 68 | 112 | 120 | 80 | 82 | 115 | 60 | 120 | 122 | 53 |
| Posición 7 | 114 | 121 | 119 | 137 | 100 | 85 | 125 | 123 | 94 | 82 | 130 | 86 | 127 | 132 | 65 |
| Posición 6 | 129 | 138 | 133 | 142 | 120 | 99 | 135 | 137 | 127 | 84 | 145 | 135 | 150 | 137 | 76 |
| Posición 5 | 167 | 166 | 139 | 151 | 140 | 119 | 139 | 155 | 132 | 85 | 155 | 155 | 168 | 144 | 109 |
| Posición 4 | 210 | 189 | 148 | 163 | 153 | 141 | 153 | 160 | 165 | 92 | 170 | 186 | 190 | 150 | 147 |
| Posición 3 | 219 | 200 | 158 | 165 | 160 | 185 | 180 | 165 | 170 | 99 | 220 | 200 | 225 | 185 | 190 |
| Posición 2 | 230 | 207 | 160 | 168 | 195 | 188 | 187 | 200 | 180 | 102 | 230 | 224 | 229 | 199 | 203 |
| Posición 1 | 233 | 217 | 168 | 173 | 207 | 195 | 189 | 214 | 191 | 104 | 235 | 232 | 235 | 203 | 208 |
| Posición final | 245 | 227 | 175 | 175 | 210 | 198 | 190 | 216 | 195 | 106 | 245 | 240 | 243 | 207 | 212 |
| | ÁNGULOS [°] | | | | | | | | | | | | | | |
| | θ1 | θ2 | θ3 | θ4 | θ5 | θ6 | θ7 | θ8 | θ9 | θ10 | θ11 | θ12 | θ13 | θ14 | θ15 |
| Posición inicial | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| Posición 10 | 173 | 172 | 175 | 165 | 165 | 178 | 162 | 155 | 177 | 167 | 155 | 176 | 168 | 154 | 177 |
| Posición 9 | 166 | 165 | 170 | 162 | 155 | 176 | 160 | 150 | 173 | 165 | 148 | 172 | 164 | 149 | 175 |
| Posición 8 | 164 | 153 | 165 | 158 | 150 | 173 | 157 | 145 | 170 | 160 | 143 | 168 | 160 | 142 | 172 |
| Posición 7 | 156 | 150 | 160 | 155 | 145 | 165 | 154 | 140 | 160 | 157 | 138 | 158 | 158 | 137 | 163 |
| Posición 6 | 152 | 145 | 154 | 150 | 135 | 158 | 149 | 134 | 145 | 154 | 133 | 144 | 155 | 133 | 157 |
| Posición 5 | 140 | 137 | 150 | 148 | 132 | 144 | 145 | 128 | 140 | 150 | 129 | 138 | 148 | 127 | 143 |
| Posición 4 | 130 | 130 | 146 | 145 | 122 | 132 | 140 | 122 | 123 | 142 | 120 | 125 | 145 | 119 | 133 |
| Posición 3 | 126 | 127 | 142 | 144 | 119 | 112 | 130 | 117 | 120 | 138 | 103 | 118 | 138 | 102 | 111 |
| Posición 2 | 123 | 125 | 140 | 142 | 98 | 104 | 128 | 98 | 107 | 134 | 99 | 106 | 135 | 98 | 103 |
| Posición 1 | 121 | 122 | 137 | 140 | 96 | 102 | 126 | 96 | 104 | 132 | 97 | 103 | 132 | 96 | 101 |
| Posición final | 119 | 118 | 135 | 140 | 94 | 100 | 125 | 95 | 102 | 130 | 95 | 100 | 132 | 94 | 99 |

Para visualizar la respuesta de los sensores se procede a graficar los valores de la Tabla 3.1. Las Figuras 3.3 a 3.17 muestran los valores discretizados para cada sensor para diferentes ángulos de flexión. En las gráficas se incluye una recta con su respectiva ecuación, la misma que resulta de la regresión lineal utilizando el método de regresión por mínimos cuadrados.

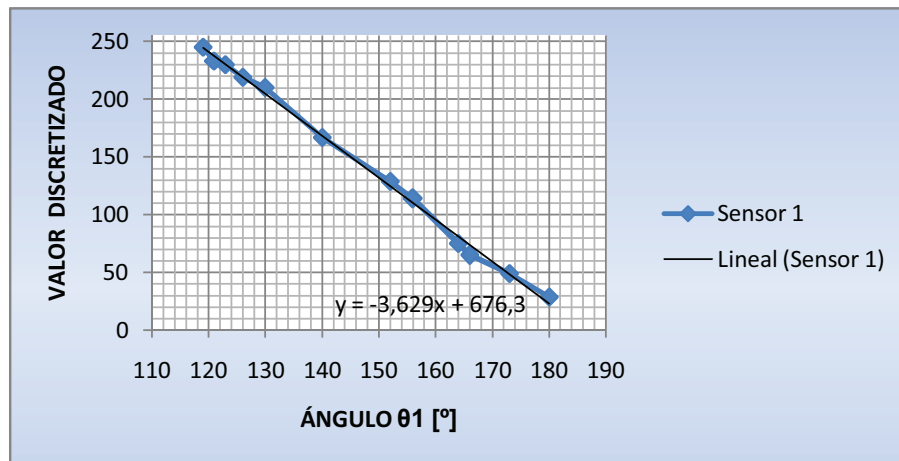


Figura 3.3 Valores del sensor 1 para diferentes ángulos de flexión

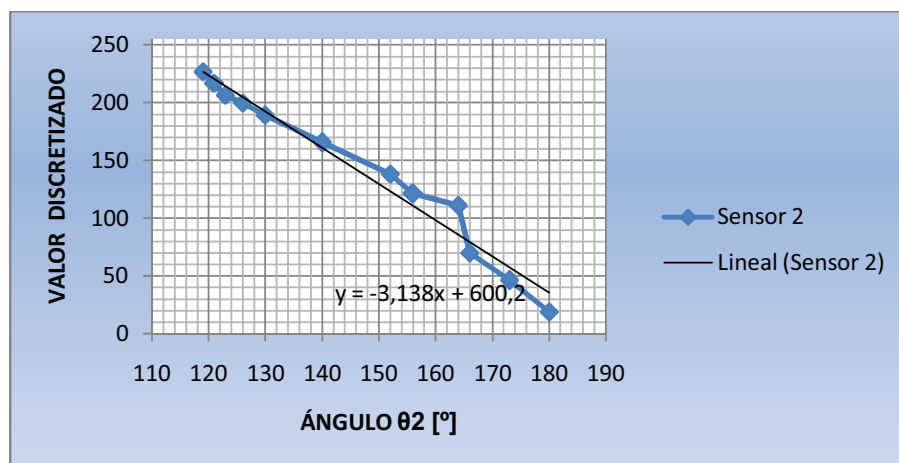


Figura 3.4 Valores del sensor 2 para diferentes ángulos de flexión

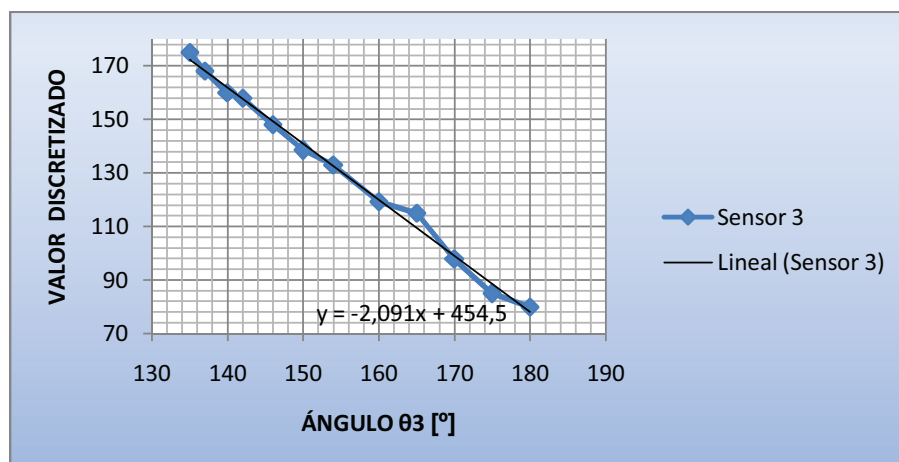


Figura 3.5 Valores del sensor 3 para diferentes ángulos de flexión

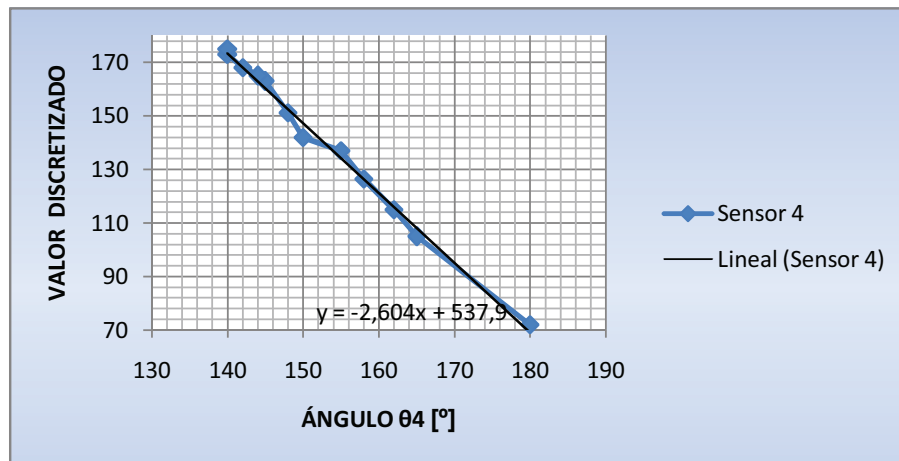


Figura 3.6 Valores del sensor 4 para diferentes ángulos de flexión

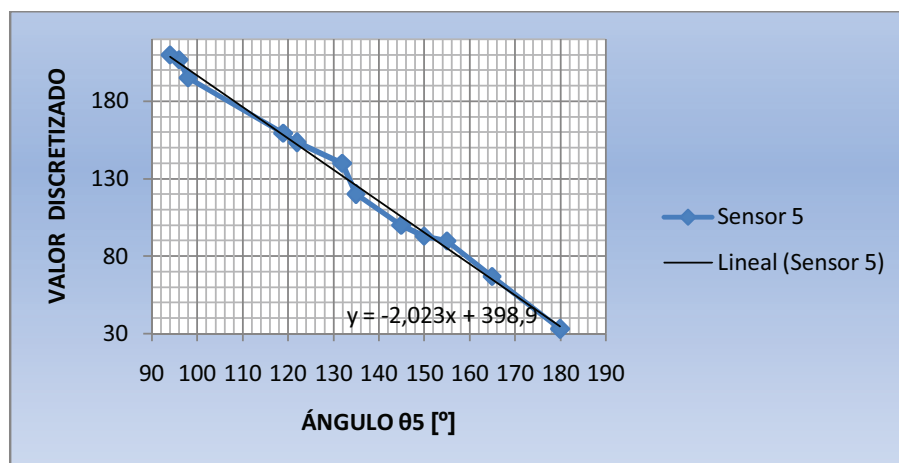


Figura 3.7 Valores del sensor 5 para diferentes ángulos de flexión

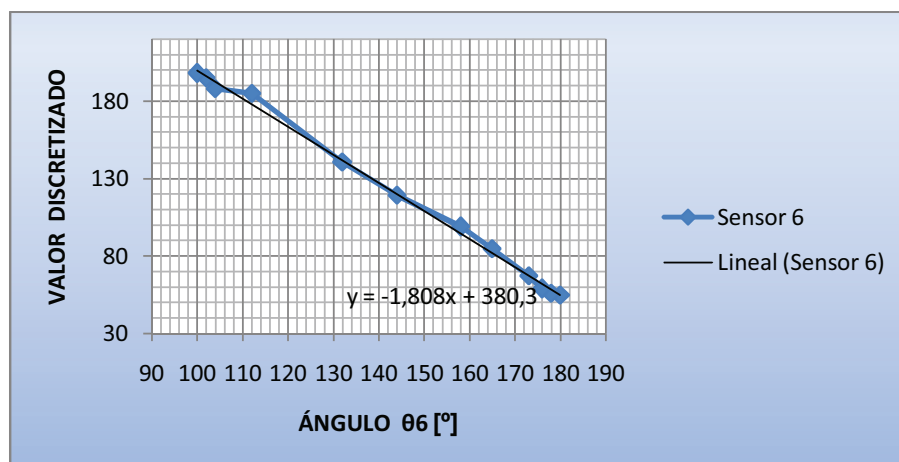


Figura 3.8 Valores del sensor 6 para diferentes ángulos de flexión

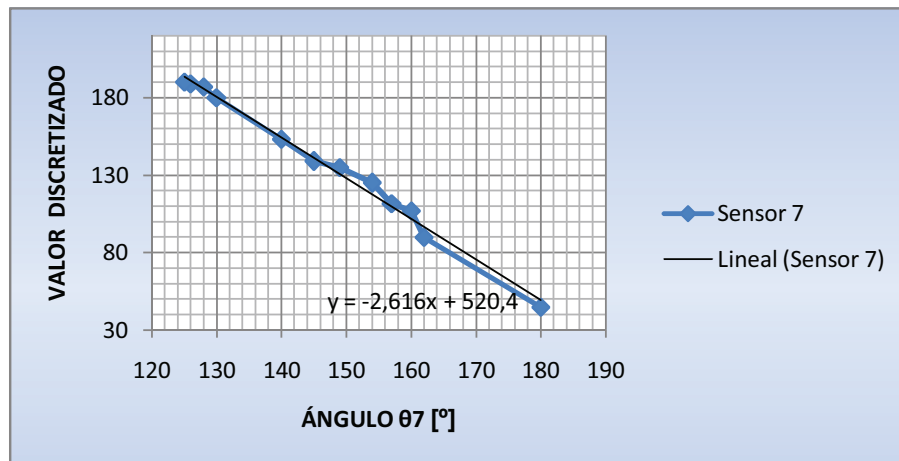


Figura 3.9 Valores del sensor 7 para diferentes ángulos de flexión

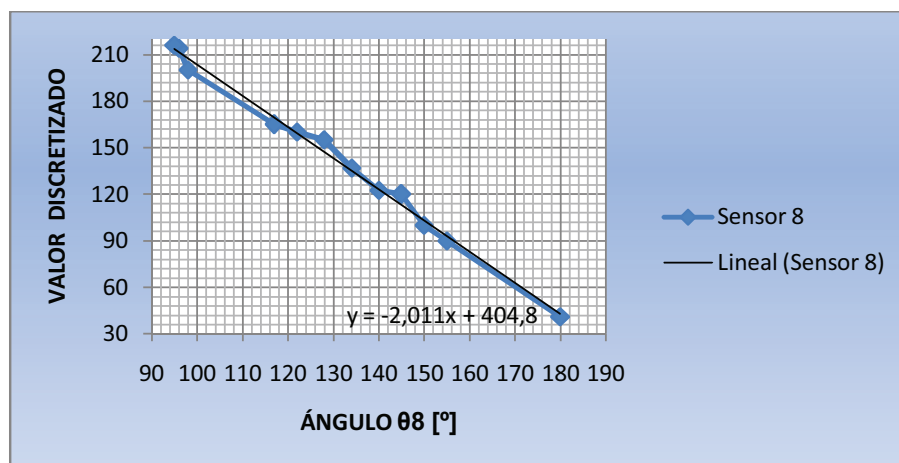


Figura 3.10 Valores del sensor 8 para diferentes ángulos de flexión

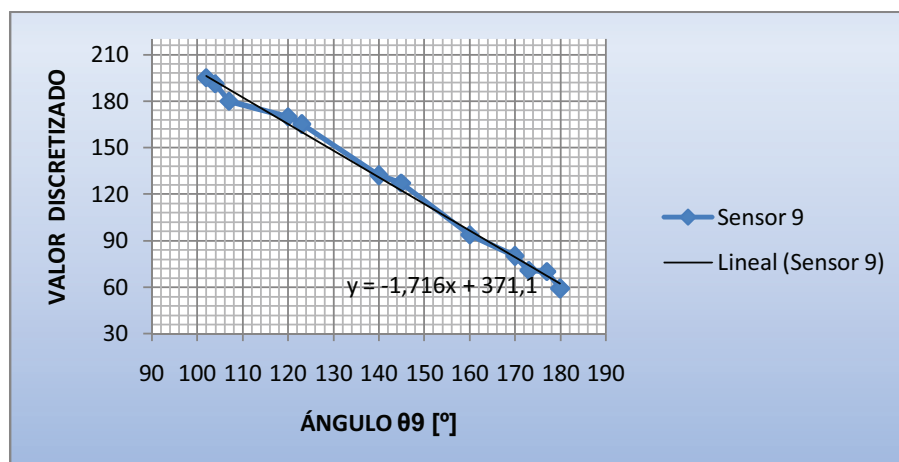


Figura 3.11 Valores del sensor 9 para diferentes ángulos de flexión

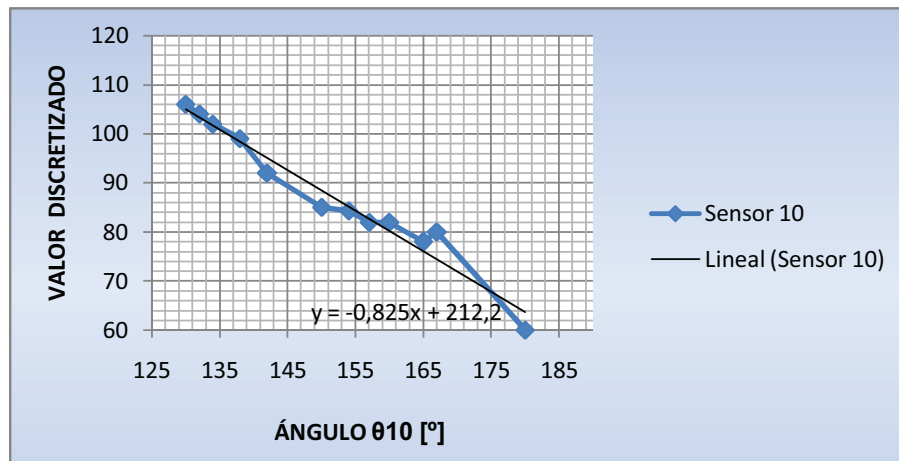


Figura 3.12 Valores del sensor 10 para diferentes ángulos de flexión

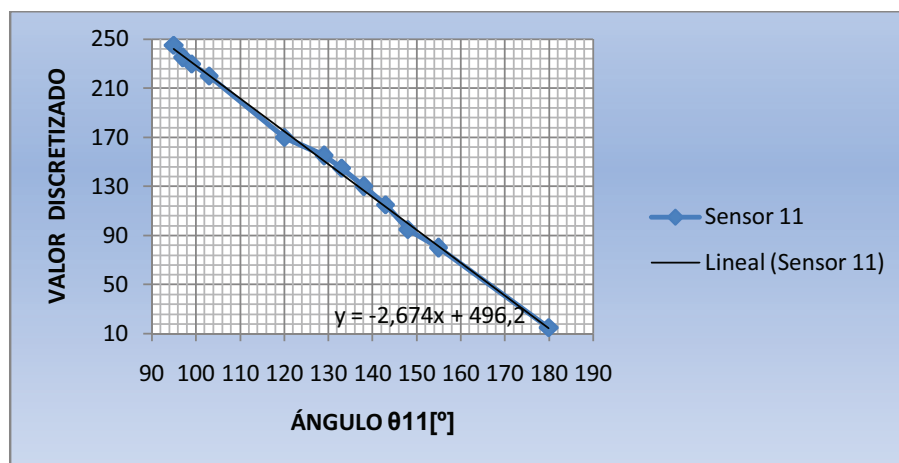


Figura 3.13 Valores del sensor 11 para diferentes ángulos de flexión

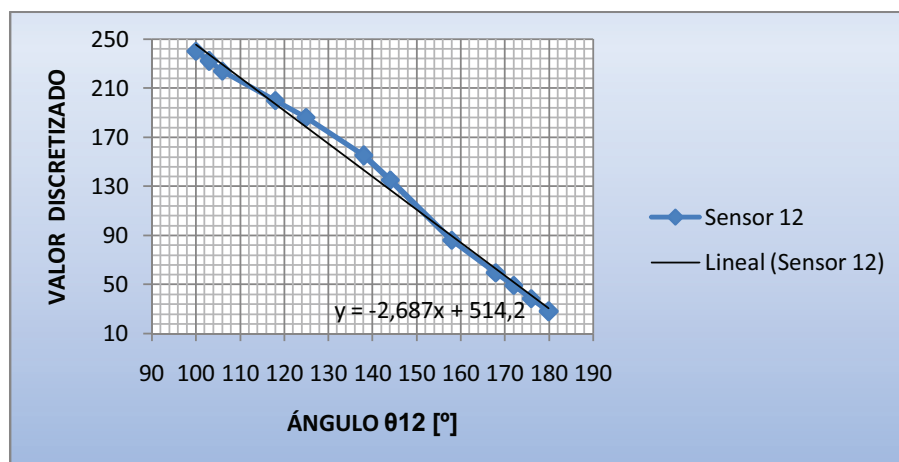


Figura 3.14 Valores del sensor 12 para diferentes ángulos de flexión

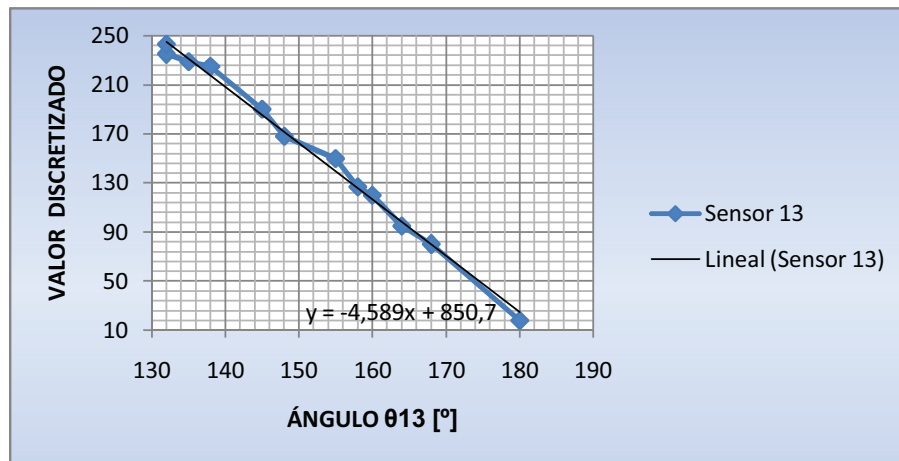


Figura 3.15 Valores del sensor 13 para diferentes ángulos de flexión

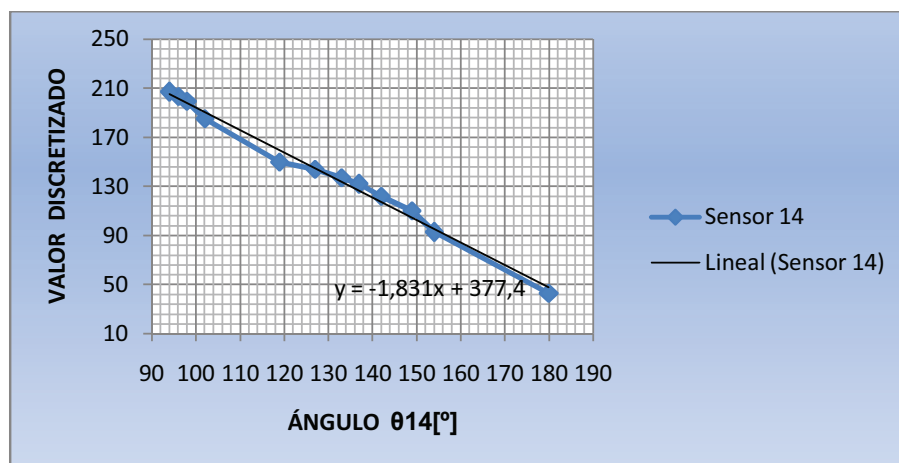


Figura 3.16 Valores del sensor 14 para diferentes ángulos de flexión

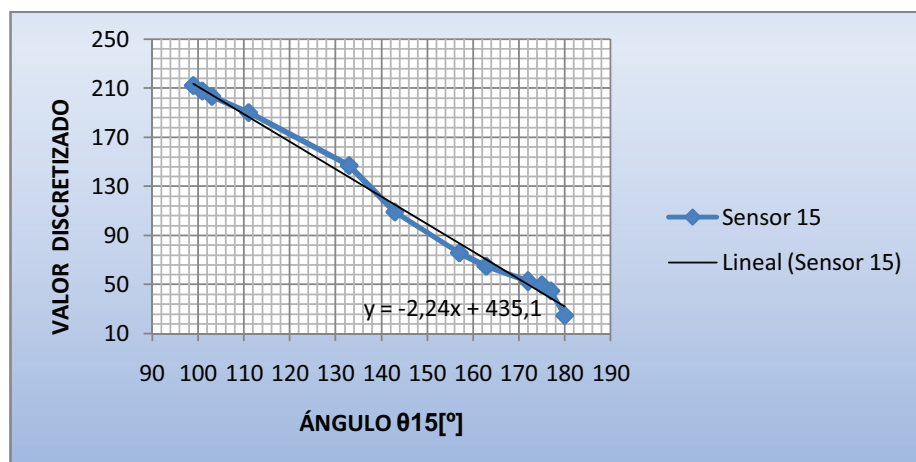


Figura 3.17 Valores del sensor 15 para diferentes ángulos de flexión

Las Figuras 3.3 a 3.17 muestran que la respuesta de los sensores es casi lineal.

Puesto que los valores máximos y mínimos de cada sensor son relativamente variables dependiendo de la posición del guante, es necesario conocer el valor de la pendiente de la recta que gobierna la respuesta de cada sensor en función del ángulo de la articulación, para así poder obtener un valor de la posición angular en base un valor mínimo y un valor actual del sensor. Los valores de las pendientes para cada sensor se las obtiene de las ecuaciones mostradas en las Figuras 3.3 a 3.17 y son mostradas en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Valores absolutos de la pendiente para cada sensor

| NÚMERO DE SENSOR | PENDIENTE | NÚMERO DE SENSOR | PENDIENTE |
|------------------|-----------|------------------|-----------|
| #1 | 3,63 | #9 | 1,72 |
| #2 | 3,14 | #10 | 0,83 |
| #3 | 2,09 | #11 | 2,67 |
| #4 | 2,60 | #12 | 2,69 |
| #5 | 2,03 | #13 | 4,59 |
| #6 | 1,81 | #14 | 1,83 |
| #7 | 2,62 | #15 | 2,24 |
| #8 | 2,01 | | |

Conocidos el valor mínimo ($Valor_{min}$) y pendiente se puede calcular el ángulo de la articulación para un valor determinado de un sensor mediante la siguiente ecuación general.

$$\text{Ángulo} = 180 - \frac{Valor_{actual} - Valor_{min}}{Pendiente} \quad Ec. [3.1]$$

Donde:

$Valor_{actual}$ = Valor discretizado del sensor

$Valor_{min}$ = Valor discretizado del sensor con los dedos extendidos.

Pendiente = Pendiente del sensor

Esta ecuación fue implementada en el programa del microcontrolador, siendo una ecuación diferente para cada sensor puesto que las pendientes y los valores mínimos son diferentes.

La Figura 3.18 muestra el algoritmo del programa principal implementado en el PIC1.

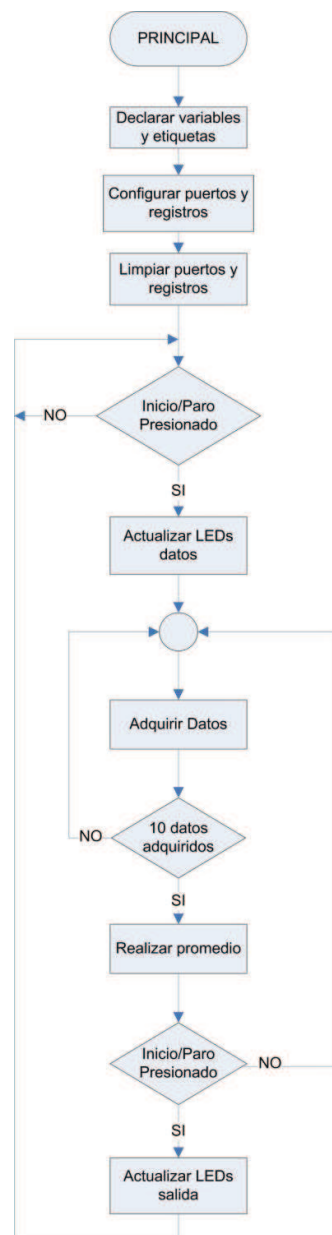


Figura 3.18 Algoritmo del programa principal PIC1

El algoritmo del programa principal del PIC1 se lo amplía a continuación en lenguaje estructurado.

Declarar variables y etiquetas

Declarar todas las variables que se van a usar en el programa.
Declarar todas las etiquetas que se utilizarán en el programa.

Fin tarea**Configurar registros y puertos**

Configurar los registros que se utilizarán en el programa
Configurar los puertos del PIC, como entradas o salidas

Fin tarea**Limpiar puertos y registros**

Limpiar todos los registros que se utilizarán en el programa
Establecer condiciones iniciales en los puertos

Fin tarea**Actualizar LEDs datos**

Encender LED indicador ON
Apagar LED indicador STAND/BY

Fin tarea**Adquirir datos**

Cargar dirección del sensor 1
Convertir el dato en la entrada AN0 en digital
Extraer un valor de ángulo del dato recibido

$$\text{Angulo} = 180 - \frac{\text{Valor}_{\text{actual}} - \text{Valor}_{\text{min}}}{\text{Pendiente}}; \text{ Ecuación Ec. [3.1]}$$

Almacenar dato
Repetir la tarea hasta obtener datos de los 15 sensores

Fin tarea**Realizar promedio**

Extraer el promedio de los diez datos adquiridos para cada sensor

Fin tarea**Actualizar LEDs Salida**

Encender LED indicador STAND/BY
Apagar LED indicador ON

Fin tarea**3.1.2 INTERRUPCIÓN DEL PIC1**

El PIC1 entra en una rutina de interrupción por recepción de datos del módulo USART cuando el control de la mano robótica envía un dato requiriendo verificar el estado del sistema guante sensorizado (ya sea encendido o Stand/By) o si requiere que sean transmitidos los datos procesados de los sensores o si recibe una orden para calibrar los sensores con los dedos extendidos.

Si el código recibido corresponde a la calibración con todos los dedos extendidos, entonces el programa espera hasta recibir un nuevo dato que le indica que debe empezar a capturar el estado de los sensores con los dedos extendidos. Captura estos datos y los almacena en la memoria para su procesamiento. Si el código recibido corresponde al estado del sistema guante sensorizado, el PIC1 transmite el código correspondiente para indicar si el programa de control del guante se encuentra en Stand/By o si ya se encuentra realizando las tareas de adquisición de datos. Si el código recibido corresponde a la transmisión de datos, entonces el PIC1 transmite en forma secuencial los valores porcentuales de todos de los sensores, desde el sensor 1 hasta el sensor 15. Una vez atendida la interrupción, el PIC1 regresa a realizar las tareas de adquisición de datos.

La Figura 3.19 muestra el algoritmo para la interrupción del PIC1.

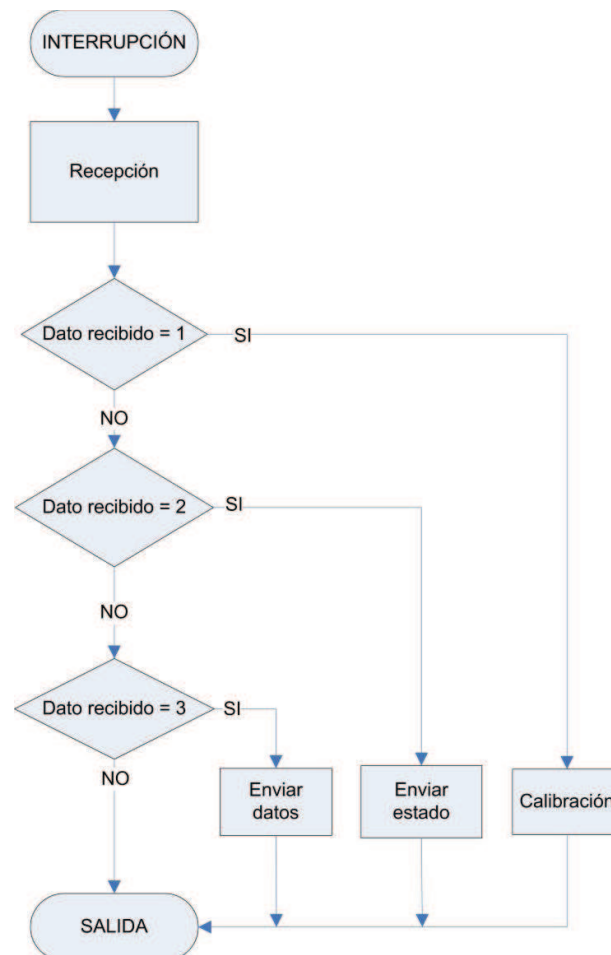


Figura 3.19 Algoritmo Programa de Interrupción PIC1

A continuación se detalla el algoritmo de interrupción del PIC1 en lenguaje estructurado.

Recepción

Limpiar la bandera de interrupción de recepción

Comparar el dato recibido para enviar datos o enviar el estado del guante

Fin tarea

Calibración

Cargar dirección del sensor 1

Convertir el dato en la entrada AN0 en digital

Almacenar dato como Valor min

Repetir la tarea hasta obtener datos de los 15 sensores

Fin Tarea

Enviar estado

Enviar el código de estado del guante (1 = ON o 0 = Stand-By) hasta confirmar su recepción

Fin tarea

Enviar Datos

Enviar dato 1

Enviar dato 2

Enviar dato 3

Enviar dato 4

Enviar dato 5

Enviar dato 6

Enviar dato 7

Enviar dato 8

Enviar dato 9

Enviar dato 10

Enviar dato 11

Enviar dato 12

Enviar dato 13

Enviar dato 14

Enviar dato 15

Confirmación de recepción

Fin tarea

3.2 DISEÑO DEL PROGRAMA DEL PIC18F452 (PIC 2) PARA EL CONTROL DE LA MANO ROBÓTICA

El programa de control del PIC2 es el encargado realizar el algoritmo de control necesario para el control de la mano robótica. Para ello se comunica con el guante sensorizado o con la PC para obtener los datos de punto de consigna

necesarios y adquirir los datos de realimentación que indican la posición de las articulaciones de la mano robótica. Una vez adquiridos los datos necesarios realiza el algoritmo de control y transmite el resultado del procesamiento al microcontrolador de salida PIC3. El programa de control interactúa con el exterior por medio de un LCD de 16x2 y también a través de teclas de selección.

Para la realización del algoritmo de control se necesitó de una biblioteca diseñada en lenguaje BASIC que permita realizar operaciones en punto flotante; es decir, operaciones con valores decimales, ya que el algoritmo de control así lo requiere. Se utilizó la librería fp18.bas la cual está diseñada para los microcontroladores PIC de la familia 18. Maneja números en punto flotante de 24bits, por medio de subrutinas realiza la conversión entre números enteros a flotantes y viceversa. Además, realiza operaciones básicas con números en punto flotante. Todas las variables en punto flotante que intervienen en la fórmula del algoritmo de control son de 24 bits y para ello son necesarios tres registros por cada variable (AARG0, AARG1, AEXP), por ello la necesidad de utilizar un microcontrolador con suficiente memoria de datos y de programa.

3.2.1 PROGRAMA PRINCIPAL DEL PIC2

El programa principal en su primera etapa se encarga de declarar todas las variables y etiquetas que serán utilizadas en el programa. Cabe recalcar que se necesitaron de tres registros para cada variable que interviene en la fórmula del algoritmo de control. Por ejemplo, para expresar el error actual en el controlador PID0, ERROR0 son necesarios los registros ERROR0_B0, ERROR0_B1 y ERROR0_EXP, los cuales en conjunto forman un dato en punto flotante.

Una vez declaradas todas las variables y etiquetas necesarias se procede a la configuración de puertos y registros, así como su limpieza y condiciones iniciales.

Posteriormente el programa espera un tiempo de inicio para el LCD, el mismo que maneja un bus de 4 bits. Luego se proceden a transformar las constantes del algoritmo de control a valores en punto flotante. Inmediatamente se muestra

una pantalla de bienvenida y espera la confirmación para ejecutar el algoritmo de control, el cual se explicará posteriormente, hasta que la mano robótica llegue a una posición inicial en el cual los valores de todas las articulaciones están al 50%. La Figura 3.20 ilustra la posición inicial de la mano robótica.

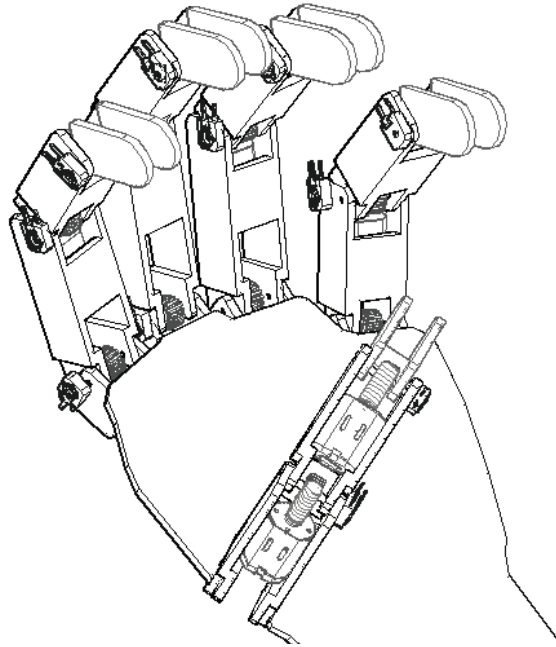


Figura 3.20 Posición inicial de la mano robótica

Finalmente se visualiza en el LCD un menú principal del programa, en el cual se pueden seleccionar dos modos de funcionamiento: MODO GUANTE y MODO PC, que se seleccionan a través del pulsador MODO y se acepta por medio de la tecla ENTER. Cuando alguno de los modos es seleccionado, el microcontrolador pasa a ejecutar las tareas de control hasta que una tecla de salida EXIT sea presionada.

La Figura 3.21 muestra el diagrama de flujo para el programa de control principal implementado en el PIC2

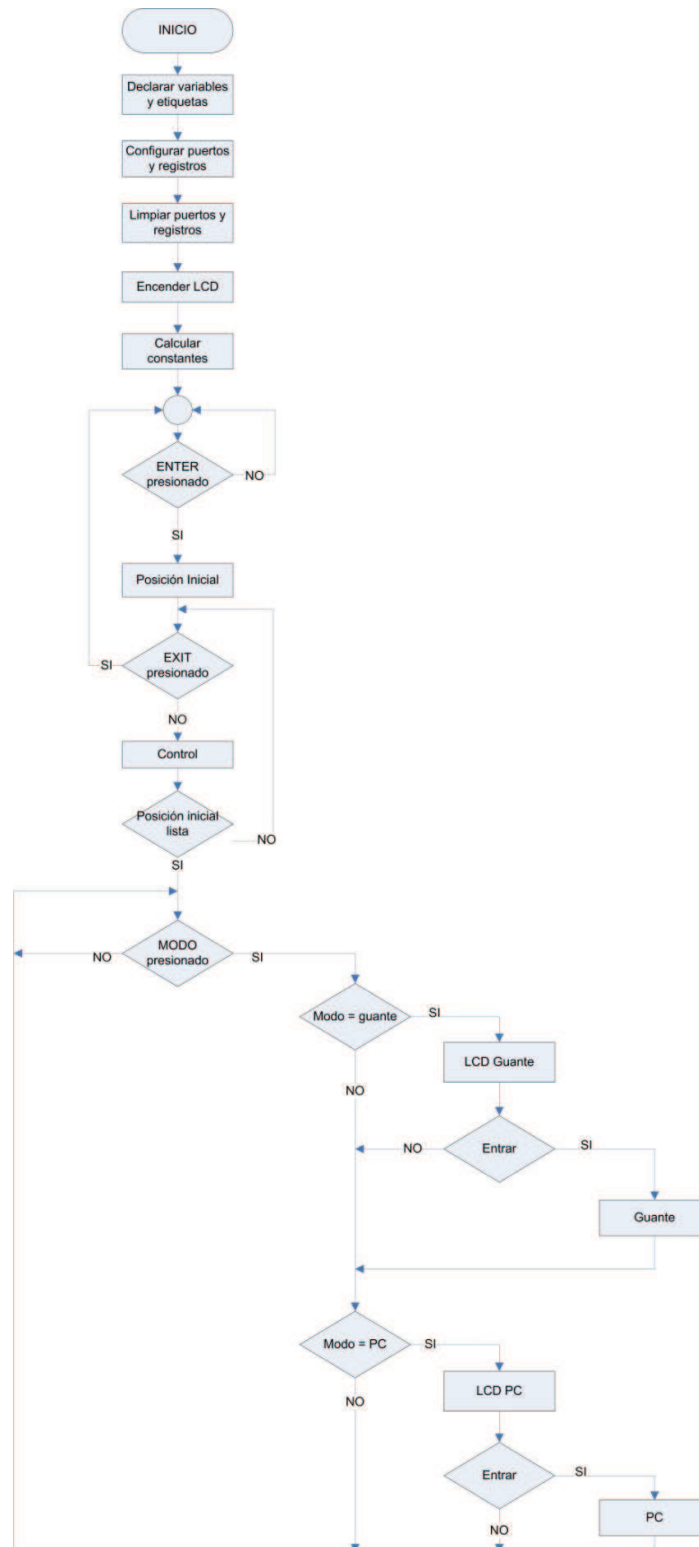


Figura 3.21 Algoritmo Programa Principal PIC2

El programa principal del PIC2 se describe a continuación en lenguaje estructurado.

Declarar variables y etiquetas

Declarar todas las variables que se van a usar en el programa.
Declarar todas las etiquetas que se utilizaran en el programa.

Fin tarea**Configurar registros y puertos**

Configurar los registros que se realizaran en el programa
Configurar los puertos del PIC, como entradas o salidas
Configurar el Timer0 para $t = 0.5$ segundos.

Fin tarea**Limpiar puertos y registros**

Limpiar todos los registros que se utilizaran en el programa
Establecer condiciones iniciales en los puertos

Fin tarea**Encender LCD**

Ejecutar proceso de encendido del LCD
Escribir en la primera línea del LCD "E.P.N."
Escribir en la segunda línea del LCD "MANO ROBOTICA"
Esperar 3 segundos
Escribir en la primera línea del LCD "PROYECTO DE"
Escribir en la segunda línea del LCD "TITULACION"
Esperar 3 segundos
Escribir en la primera línea del LCD "DIEGO IVAN"
Escribir en la segunda línea del LCD "PILAQUINGA"
Esperar 3 segundos
Escribir en la primera línea del LCD "ELECTRONICA Y"
Escribir en la segunda línea del LCD "CONTROL"
Esperar 3 segundos
Escribir en la primera línea del LCD "POSICION INICIAL"
Escribir en la segunda línea del LCD "PRESIONE ENTER"

Fin tarea**Calcular constantes**

Calcular T_M , K_{PX} , K_{IX} y K_{DX} en punto flotante
 $K_{1X} = K_{IX} * T_M / 2 + K_{PX} + K_{DX} / T_M$
 $K_{2X} = K_{IX} * T_M / 2 - K_{PX} - 2 * K_{DX} / T_M$
 $K_{3X} = K_{DX} / T_M$
Donde X es el número de controlador PID
Repetir tarea con los 15 controladores

Fin tarea**Posición inicial**

Cargar valores para articulaciones al 50%
Escribir en la primera línea del LCD "...EJECUTANDO..."
Escribir en la segunda línea del LCD "POSICIÓN INICIAL"

Fin tarea

Control

Ejecutar algoritmos de control hasta alcanzar la posición inicial.

Fin tarea**Menu**

Escribir en la primera línea del LCD "MENU PRINCIPAL"

Fin tarea**LCD Guante**

Escribir en la segunda línea del LCD "MODO GUANTE"

Fin tarea**Guante**

Ingreso a subrutina GUANTE

Fin tarea**LCD PC**

Escribir en la segunda línea del LCD "MODO PC"

Fin tarea**PC**

Ingreso a subrutina PC

Fin tarea**3.2.1.1 SUBRUTINA GUANTE**

La subrutina Guante se encarga de ordenar la calibración al programa de control del guante sensorizado y además ejecuta los algoritmos de control de la mano robótica para ser controlada a través del guante sensorizado.

Esta subrutina en un inicio realiza un chequeo de comunicación el cual indica si existe o no comunicación con el guante, y en el caso de existir comunicación solicita al control del guante sensorizado el estado del mismo. Si el guante está listo para transmitir datos entonces el programa ingresa en una rutina de calibración en la cual se ordena al programa de control del guante sensorizado la captura de los datos con los dedos extendidos. Posteriormente, al presionar la tecla ENTER el programa activa el Timer0, cuyo desbordamiento produce una interrupción utilizada para detectar si la salida de algún controlador se encuentra saturada; y, ejecuta las tareas de control. Para salir al menú principal se debe presionar la tecla EXIT. La Figura 3.22 muestra el diagrama de flujo de la subrutina Guante.

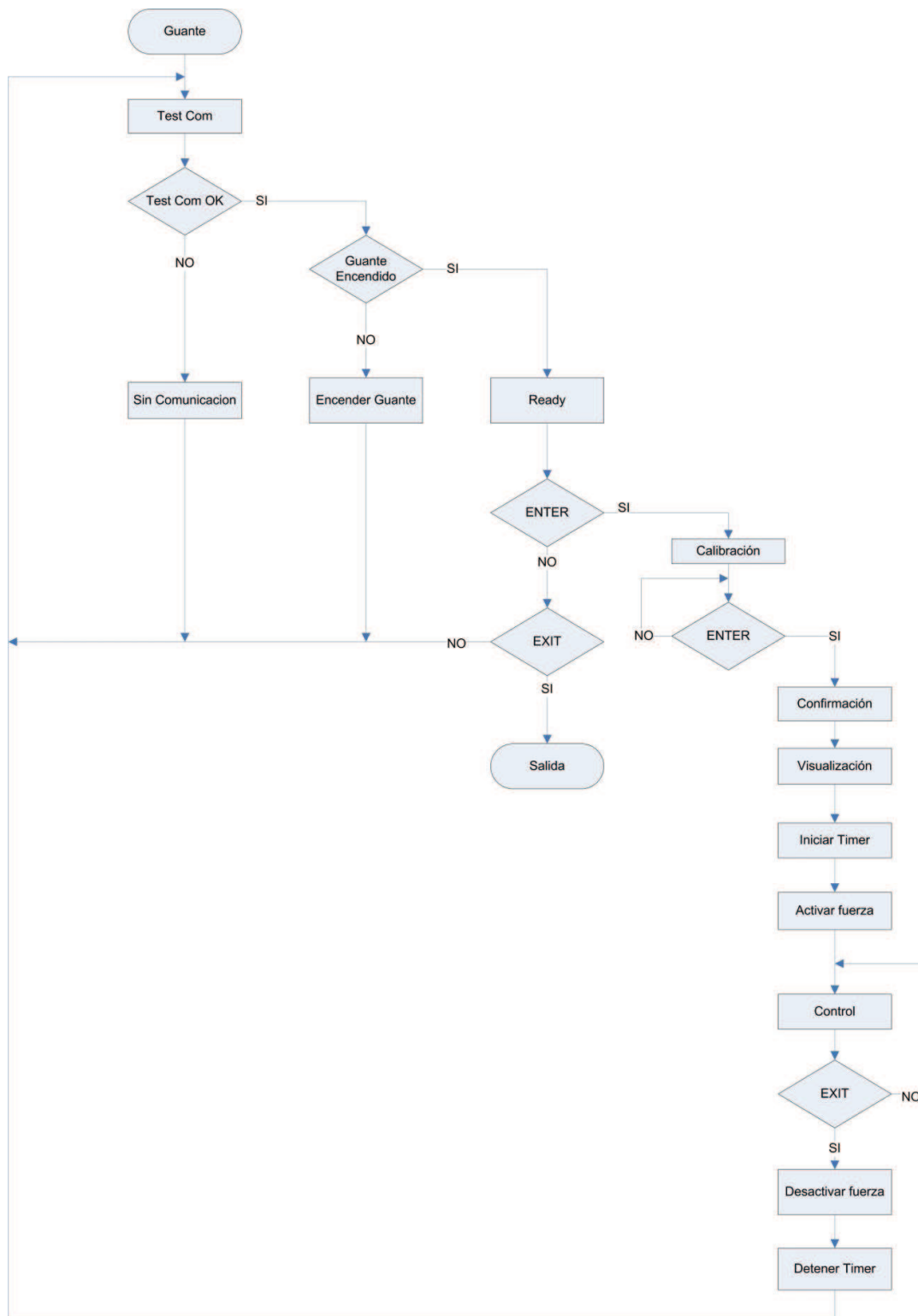


Figura 3.22 Algoritmo subrutina Guante

A continuación se describe el algoritmo de la subrutina guante en lenguaje estructurado.

Test Com

Enviar 2 al PIC1

Si el PIC1 responde 1

Bandera comunicación OK = 1

Bandera encender guante = 1

Si el PIC1 responde 0

Bandera comunicación OK = 1

Bandera ready = 1

Si el PIC1 no responde

Bandera sin comunicación = 0

Fin Tarea**Sin comunicación**

Escribir en la primera línea del LCD "MODO GUANTE"

Escribir en la segunda línea del LCD "SIN COMUNICACIÓN"

Borrar la segunda línea del LCD

Fin Tarea**Encender Guante**

Escribir en la primera línea del LCD "INICIAR GUANTE"

Escribir en la segunda línea del LCD "COMUNICACIÓN OK"

Fin Tarea**Ready**

Escribir en la primera del LCD "*****READY*****"

Escribir en la segunda línea del LCD "COMUNICACIÓN OK"

Fin Tarea**Calibración**

Escribir en la primera del LCD "CALIBRACION"

Escribir en la segunda línea del LCD "EXTENDER DEDOS"

Fin tarea**Confirmación**

Enviar 1 al PIC1

Escribir en la primera del LCD "CALIBRACION"

Escribir en la segunda línea del LCD "REALIZADA"

Esperar 1 segundo.

Fin tarea**Visualización**

Escribir en la primera del LCD "MODULO"

Escribir en la segunda línea del LCD "PREPARADO"

Fin Tarea**Iniciar Timer**

Activar el Timer0

Fin Tarea

Activar fuerza

Salida RE0=1

Fin Tarea**Control**

Escribir en la primera del LCD "CONTROLANDO"

Escribir en la segunda línea del LCD "MODO GUANTE"

Llamar a la subrutina control

Fin Tarea**Desactivar fuerza**

Salida RE0=0

Fin Tarea**Detener Timer**

Detener el Timer0

Fin Tarea**3.2.1.2 SUBROUTINA CONTROL**

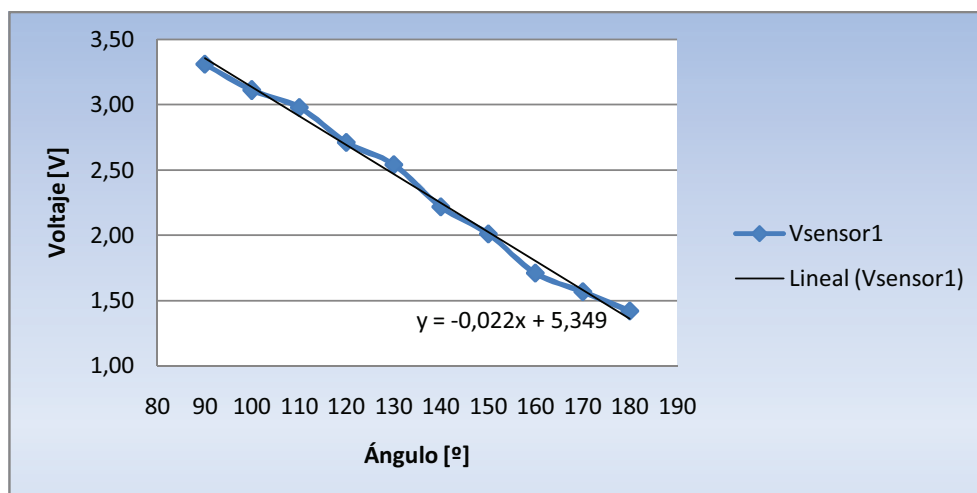
El algoritmo de control empieza con la adquisición de todos los valores de realimentación; es decir, los valores de la posición de cada una de las articulaciones de la mano robótica, para lo cual el PIC2 maneja las líneas de control del CD4067BE (multiplexor analógico) para transmitir el dato del primer sensor a la entrada RA0, realizar la conversión A/D y extraer el ángulo en el cual se encuentra la articulación. Posteriormente, el PIC2 actualiza las líneas de control para realizar la conversión A/D del segundo dato y realizar el mismo proceso, y así hasta lograr la conversión de los 15 sensores.

Para extraer el ángulo es necesario conocer la respuesta de los sensores ubicados en la mano robótica. Par ello, se midió el voltaje de salida en cada sensor para un ángulo determinado. Los sensores en la mano robótica fueron numerados de la misma forma que se lo hizo para el guante sensorizado. Todos los sensores tienen características mecánicas iguales. Por ello, es suficiente conocer la respuesta para uno de ellos. Como ejemplo se presenta en la Tabla 3.3 los valores medidos para diferentes ángulos en el sensor 1 de la mano robótica.

Tabla 3.3 Voltaje de salida del sensor 1 para diferentes ángulos de flexión

| ÁNGULO [°] | Vsensor [V] |
|---------------|----------------|
| 180 | 1,42 |
| 170 | 1,57 |
| 160 | 1,71 |
| 150 | 2,01 |
| 140 | 2,22 |
| 130 | 2,54 |
| 120 | 2,71 |
| 110 | 2,98 |
| 100 | 3,11 |
| 90 | 3,31 |

Estos valores son graficados y mostrados en la Figura 3.23.

**Figura 3.23** Voltaje de salida del sensor 1 para diferentes ángulos de flexión

La Figura 3.23 muestra que el sensor 1 de la mano robótica en este intervalo tiene una respuesta casi lineal.

Utilizando el método de regresión por mínimos cuadrados en Excel se obtiene la siguiente ecuación.

$$V_{sensor} = -0.022 \cdot \text{Ángulo} + 5.349$$

Entonces, la pendiente de la recta es 0.022. Conocidos el valor mínimo ($Valor_{min}$) y pendiente se puede calcular el ángulo de la articulación para un valor determinado mediante la siguiente ecuación general.

$$\text{Ángulo} = 180 - \frac{Valor_{actual} - Valor_{min}}{Pendiente} \quad Ec. [3.2]$$

Donde:

$Valor_{actual}$ = Valor discretizado del sensor

$Valor_{min}$ = Valor discretizado del sensor en la posición de 180°.

Pendiente = Pendiente del sensor

Esta ecuación fue implementada en el programa del microcontrolador, siendo una ecuación diferente para cada sensor puesto que las pendientes y los valores mínimos son diferentes.

En esta etapa el programa analiza los datos detectando cualquier posibilidad de roce entre los dedos, si los dedos tienden a toparse, entonces el programa deshabilita el movimiento de dichos dedos.

El PIC2 actúa como maestro y solicita al control del guante sensorizado (PIC1) los datos de posición de todos los sensores del guante, que vienen a ser los valores de punto de consigna, esto lo hace a través de la interfaz RS-232. Una vez adquiridos todos los valores necesarios, se calcula el error actual, el cual se obtiene de la diferencia de los valores de punto de consigna y realimentación de cada articulación y, finalmente, se ejecuta la rutina PIDX, para la cual primero deben ser desplazados los errores; es decir, que el error en el momento actual correspondería al penúltimo error en el siguiente ciclo y así sucesivamente. Adicionalmente, se necesita calcular un error actual, que es la diferencia de los valores de punto de consigna y realimentación para cada articulación y finalmente se ejecuta la fórmula del controlador tipo PID, en la cual se calcula un valor de control de salida.

La fórmula del controlador se la obtuvo mediante la discretización de la fórmula de un controlador PID en el dominio de la frecuencia. Un método para discretizar esta ecuación es utilizar el método de integración trapezoidal para la parte integral y el método de integración hacia adelante para la parte derivativa. Así se obtuvo:

$$PID(s) \Rightarrow \frac{u(s)}{e(s)} = Kp + \frac{Ki}{s} + Kd \cdot s \quad \text{Ec.[3.3]}$$

$$PID(z) \Rightarrow \frac{U(z)}{E(z)} = Kp + Ki \frac{Tm Z+1}{2 Z-1} + \frac{Kd Z-1}{Tm Z} \quad \text{Ec.[3.4]}$$

$$U = U1 + \frac{Ki \cdot Tm^2 + 2 \cdot Kp \cdot Tm + 2 \cdot Kd}{2 \cdot Tm} E + \frac{Ki \cdot Tm - 2 \cdot Kp \cdot Tm - 4 \cdot Kd}{2 \cdot Tm} E1 + \frac{Kd}{Tm} E2 \quad \text{Ec.[3.5]}$$

Agrupando esta última ecuación se tiene:

$$U = U1 + \left(\frac{Ki \cdot Tm}{2} + Kp + \frac{Kd}{Tm} \right) E + \left(\frac{Ki \cdot Tm}{2} - Kp - \frac{2 \cdot Kd}{Tm} \right) E1 + \frac{Kd}{Tm} E2 \quad \text{Ec.[3.6]}$$

Que es la ecuación del algoritmo de control tipo PID a ser implementado en el PIC2.

- Donde:
- Kp = Constante proporcional
 - Ki = Constante integral
 - Kd = Constante derivativa
 - Tm = Tiempo de muestreo
 - U = Valor actual de la señal de control
 - U1 = Valor anterior de la señal de control
 - E = Error actual
 - E1 = Penúltimo error al momento actual
 - E2 = Antepenúltimo error al momento actual

La ecuación Ec.[3.6] se la puede expresar de la siguiente manera.

$$U = U1 + K1 \cdot E + K2 \cdot E1 + K3 \cdot E2 \quad \text{Ec.[3.7]}$$

Las constantes K1, K2 y K3 son calculados al inicio del programa mediante operaciones en punto flotante.

Los valores de las constantes K_p , K_i y K_d fueron seleccionados en base a pruebas de ensayo y error hasta obtener resultados satisfactorios. A continuación se describe la forma como se procedió a determinar estas constantes.

- a. Con todas las constantes iguales a cero, se comienza con el regulador P y se aumentó su ganancia K_p hasta que la respuesta a los cambios del punto de consigna fueron rápidos, pero sin oscilación.
- b. Se incrementó el valor de K_d hasta el valor máximo para el cual la respuesta no era oscilatoria, sin un sobreimpulso considerable.
- c. Se incrementó el valor de K_i para aumentar la rapidez de respuesta y eliminar el error de posición.

Este procedimiento se realizó para cada articulación, obteniéndose las constantes que son mostradas en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Valores de las constantes K_p , K_i y K_d para cada articulación

| ARTICULACIÓN | K_p | K_i | K_d |
|--------------|-------|-------|-------|
| #1 | 100 | 90 | 30 |
| #2 | 2000 | 500 | 100 |
| #3 | 1500 | 1000 | 100 |
| #4 | 100 | 150 | 30 |
| #5 | 2000 | 1000 | 200 |
| #6 | 1500 | 1000 | 200 |
| #7 | 250 | 150 | 70 |
| #8 | 2000 | 1000 | 200 |
| #9 | 1500 | 200 | 100 |
| #10 | 150 | 400 | 20 |
| #11 | 2000 | 700 | 150 |
| #12 | 2000 | 500 | 200 |
| #13 | 200 | 350 | 50 |

| | | | |
|-----|------|-----|-----|
| #14 | 2000 | 700 | 150 |
| #15 | 2000 | 500 | 200 |

El tiempo de muestreo T_m , corresponde al tiempo que le toma al PIC2 realizar toda la tarea de control, desde la adquisición del valor de realimentación hasta el envío de resultados al PIC3, lo cual es aproximadamente 3 ms.

Los datos obtenidos como resultado de todo el proceso anterior son convertidos de flotantes a enteros y son almacenados en los registros OUTX. Cabe resaltar que estos registros son del tipo WORD; es decir, registros de 16bits. Por lo tanto la salida del algoritmo de control es un número entre 0 y 65535, donde los valores positivos están entre 0 y 32767; y, los valores negativos, entre 65535 y 32768. Para evitar cualquier confusión, se suma un valor de 32768 a las salidas OUTX, con ello los valores positivos están entre 32768 y 65535; y, los valores negativos están entre 0 y 32767.

La estructura del programa de control del PIC3 requiere que los datos sean un número entre 0 y 50, por ello antes de ser enviados los datos se establece una relación directamente proporcional entre ellos, es decir:

$$PWMX = OUTX \frac{65535}{50}$$

$$PWMX = \frac{OUTX}{1310}$$

Donde: OUTX Son el resultado del algoritmo de control del PDX
 PWMX Son los valores a ser transmitidos al PIC3
 Siendo X un numero entre 1 y 15

Una vez realizadas estas operaciones matemáticas, los datos son enviados al PIC3 por medio de la interfaz SPI (Interfaz Periférica Serial) del PIC2.

La Figura 3.24 muestra el diagrama de flujo de la subrutina control.

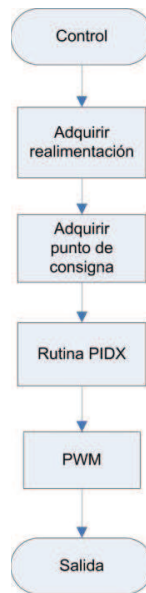


Figura 3.24 Algoritmo Subrutina Control

A continuación se detalla la subrutina en lenguaje estructurado.

Adquirir realimentación

Cargar dirección de dato 1
 Convertir el dato en la entrada AN0 en digital
 Extraer un valor porcentual del dato recibido
 Almacenar dato
 Repetir la tarea hasta obtener los 15 datos
 Comparar si los dedos tienden a toparse
 Si tienden a toparse inhibir movimientos

Fin Tarea

Adquirir punto de consigna

Comparar si se ejecuta la subrutina GUANTE o la subrutina CONTROL
 Si se ejecuta la subrutina GUANTE
 Enviar 4 al PIC1
 Recibir los 15 datos
 Confirmar recepción
 Si los datos no son recibidos
 Desplegar en el LCD "ERROR DE COMUNICACION"
 Esperar hasta que EXIT sea presionado

Fin Tarea

Rutina PIDX

Desplazar error anterior
 Desplazar error actual
 Calcular error actual
 Desplazar salida anterior
 $Aux1X = E * K1X$, es decir $Aux1X = E * (KI * TM / 2 + KP + 2KD)$
 $Aux2X = E1 * K2X$, es decir $Aux2X = E1 * (KI * TM / 2 - KP - 2KD / TM)$
 $Aux3X = E2 * K3X$, es decir $Aux3X = E2 * (KD / TM)$

$OUTX = OUT1X + Aux1X + Aux2X + Aux3X$, es decir $OUTX = OUT1X + E*(KI*TM/2 + KP + 2KD) + E1*(KI*TM/2 - KP - 2KD/TM) + E2*(KD/TM)$
 $OUTX = OUTX + 32767$. Ecuación: Ec.[3.4]
 Donde X es el número de controlador PD
 Repetir la tarea con los 15 controladores

Fin Tarea

PWM

$PWMX = OUTX/1310$
 Transmitir los valores PWMX al PIC3

Fin Tarea

3.2.1.3 SUBROUTINA PC

El segundo modo de funcionamiento del PIC2 lo hace por medio de la subrutina PC, en la cual se ejecutan los algoritmos de control de la mano robótica para ser controlada a través del computador.

En un inicio el PIC2, a través del LCD, notifica al usuario que ha ingresado a esta subrutina y que se encuentra listo para ejecutar las tareas de control.

Esta subrutina es en cierto modo similar a la subrutina guante salvo que los valores de punto de consigna son enviados por el computador. Esta vez el PIC2 actúa como dispositivo esclavo y tiene que recibir necesariamente todos los valores enviados por el dispositivo maestro, en este caso la PC. Por ello solo para esta subrutina se activa una interrupción para la recepción de datos.

Posteriormente el PIC2 entra en un lazo del cual solo se puede salir presionando la tecla EXIT. En este lazo el PIC2 ejecuta el algoritmo de control PID, el cual es el mismo que el implementado en la subrutina guante, con la única diferencia que los datos del punto de consigna son recibidos desde el computador por medio de una interrupción. Cuando la tecla EXIT es presionada el programa desactiva la interrupción por recepción de datos y regresa al menú principal.

La Figura 3.25 muestra el diagrama de flujo para el programa implementado en la subrutina PC.

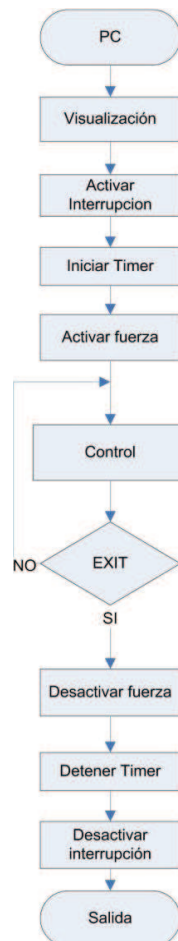


Figura 3.25 Algoritmo subrutina PC

A continuación se detalla se describe el algoritmo de la subrutina guante en lenguaje estructurado.

Visualización

Escribir en la primera del LCD “CONTROLANDO”

Escribir en la segunda línea del LCD “MODO PC”

Fin Tarea

Activar interrupción

Activar la interrupción por recepción de datos

Borrar la bandera de interrupción

Fin tarea

Iniciar Timer

Activar el Timer0

Fin Tarea

Activar fuerza

Salida RE0=1

Fin Tarea

Control

Escribir en la primera del LCD "CONTROLANDO"
 Escribir en la segunda línea del LCD "MODO PC"
 Llamar a la subrutina control

Fin Tarea**Desactivar fuerza**

Salida RE0=0

Fin Tarea**Detener Timer**

Detener el Timer0

Fin Tarea**Desactivar interrupción**

Desactivar interrupción por recepción de datos

Fin Tarea**3.2.2 INTERRUPCIÓN DEL PIC2**

El programa de interrupción del PIC2 se utiliza cuando ocurren dos eventos. El primero de ellos, para la recepción de datos cuando el programa se encuentra ejecutando los algoritmos de control en MODO PC y se activa la interrupción por recepción de datos; y, el segundo evento, para determinar cada cierto tiempo si algún controlador se encuentra saturado cuando el programa se encuentra ejecutando la subrutina control, a través del desbordamiento del Timer0.

Si ocurre la interrupción por recepción de datos del módulo USART entonces, en un inicio la PC le alerta al PIC2 que va a realizar una transmisión de datos, si el PIC2 se encuentra listo entonces éste envía un código indicándole a la PC que se encuentra listo para recibir los datos, es entonces cuando todos los datos de punto de consigna son transmitidos por la PC y recibidos por el PIC2. Si en un tiempo de 50ms los datos no han sido recibidos completamente, entonces, el programa lo toma como un error en la comunicación, deteniendo las tareas de control y entrando a un lazo infinito del cual solo se puede salir al menú principal por medio de la tecla EXIT.

Si ocurre la interrupción por desbordamiento del Timer0; entonces, el programa en un inicio baja la bandera de la interrupción correspondiente y carga

nuevamente los valores en el Timer0 para un tiempo $t = 0.5$ segundos. Posteriormente, el programa compara la salida actual de cada controlador con la salida que tenían los mismos en el anterior desbordamiento del Timer0. Si los dos valores son iguales al valor máximo (65535) o al valor mínimo (0) del controlador; entonces, el programa interpreta esto como la saturación en la salida de un controlador y actualiza el valor PWM para producir una salida de 0V en el actuador correspondiente.

La Figura 3.26 muestra el diagrama de flujo para la interrupción implementada en el PIC2.

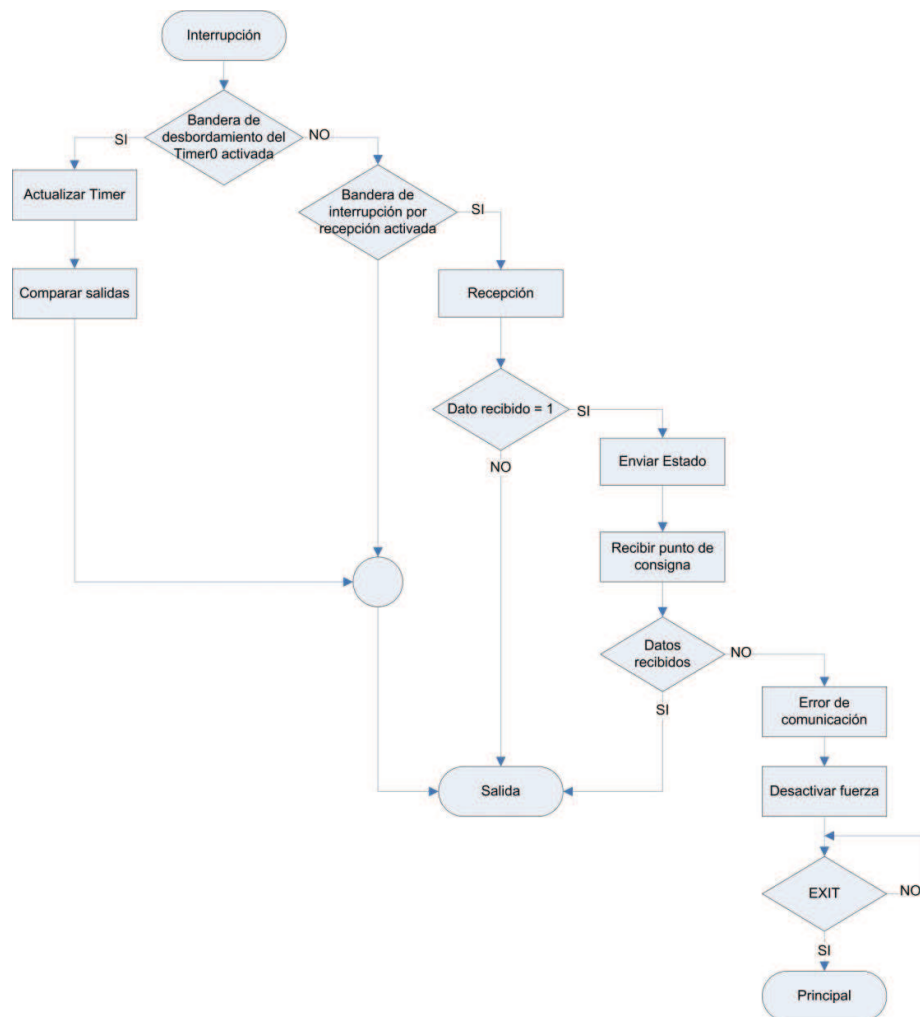


Figura 3.26 Algoritmo Programa de Interrupción del PIC2

A continuación se detalla este algoritmo en lenguaje estructurado.

Actualizar Timer

Bajar la bandera de interrupción del Timer0.

Cargar los valores en el Timer0 para $t = 0.5$ segundos.

Fin Tarea**Comparar salidas**

Comparar el valor actual del sensor 1 con el valor en la interrupción anterior

Si el valor anterior es igual al error actual y es igual a 65535

Actualizar PWM para voltaje en el motor1 igual a 0V

Si el valor anterior es igual al error actual y es igual a 0

Actualizar PWM para voltaje en el motor1 igual a 0V

Repetir tarea con los quince sensores

Fin Tarea**Recepción**

Bajar bandera de interrupción por recepción

Fin Tarea**Enviar estado**

Transmitir #2 indicando a la PC que está listo para recibir datos

Fin Tarea**Recibir punto de consigna**

Recibir dato 1

Recibir dato 2

Recibir dato 3

Recibir dato 4

Recibir dato 5

Recibir dato 6

Recibir dato 7

Recibir dato 8

Recibir dato 9

Recibir dato 10

Recibir dato 11

Recibir dato 12

Recibir dato 13

Recibir dato 14

Recibir dato 15

Confirmar recepción

Fin Tarea**Error de comunicación**

Escribir en la primera línea del LCD "ERROR DE"

Escribir en la segunda línea del LCD "COMUNICACION"

Transmitir al PIC3 valores PWM para salidas igual a 0V

Desactivar interrupción por recepción

Fin Tarea**Desactivar fuerza**

Salida RE0=0

Fin Tarea

3.3 DISEÑO DEL PROGRAMA DEL PIC16F876A (PIC 3) PARA GENERAR PWM DE SALIDA

El microcontrolador PIC16F876A utilizado en el circuito de la mano robótica recibe los valores enviados por el PIC2 y en base a ellos, genera 15 señales PWM independientes a una frecuencia de 500Hz cada una. Estas señales constituyen las salidas de los controladores, posteriormente son filtradas para obtener su componente continua logrando así una conversión D/A por PWM.

El PIC3 utiliza el modulo SPI (Interfaz Periférica Serial) para realizar la comunicación con el PIC2, donde el PIC2 es el dispositivo maestro y el PIC3 es el dispositivo esclavo. La comunicación es utilizada para recibir los datos que son el resultado del algoritmo de control y en base a ellos generar una señal PWM proporcional a sus valores.

3.3.1 PROGRAMA PRINCIPAL DEL PIC3

En un principio el programa carga los valores iniciales para cada PWM. El programa está diseñado para aceptar valores entre 0 y 50 esto implica una señal PWM con una resolución de 6 bits. De los valores anteriormente mencionados, 0 genera una señal PWM con una relación de trabajo del 0% y 50 que genera una señal PWM con una relación de trabajo del 100%. Estas señales luego de ser filtradas y tratadas producirán en los actuadores voltajes de -5V y 5V respectivamente. De acuerdo con esto, se establece como condición inicial todas las variables $PWMX = 25$, con ello las salidas de todos los actuadores están a 0V.

El programa de control se encuentra permanentemente esperando por un dato, cuando la bandera de recepción indica que un dato ha sido recibido el programa recibe todos los datos y nuevamente entra en un lazo hasta que un nuevo dato haya sido recibido.

La Figura 3.27 muestra el algoritmo del programa principal del PIC3.

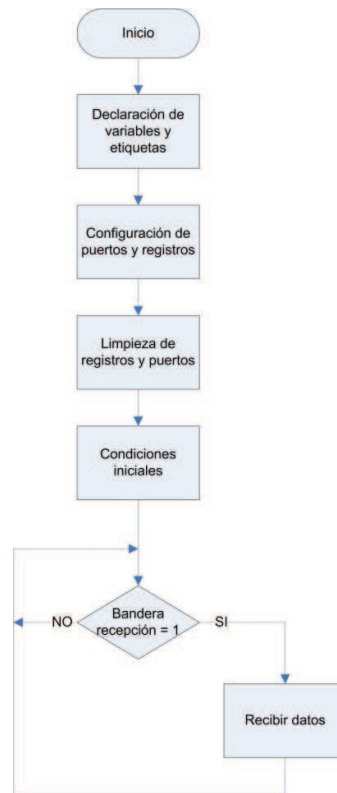


Figura 3.27 Algoritmo Programa Principal PIC3

Este programa se detalla a continuación en lenguaje estructurado.

Declaración de variables y etiquetas

Declarar todas las variables que se van a usar en el programa.

Declarar todas las etiquetas que se utilizarán en el programa.

Fin tarea

Configuración de registros y puertos

Configurar los registros que se realizarán en el programa

Configurar los puertos del PIC, como entradas o salidas

Fin tarea

Limpieza de puertos y registros

Limpiar todos los registros que se utilizarán en el programa

Establecer condiciones iniciales en los puertos

Fin tarea

Condiciones iniciales

Cargar condiciones iniciales:

PWM0 = 25

PWM1 = 25

PWM2 = 25

PWM3 = 25

PWM4 = 25
PWM5 = 25
PWM6 = 25
PWM7 = 25
PWM8 = 25
PWM9 = 25
PWM10 = 25
PWM11 = 25
PWM12 = 25
PWM13 = 25
PWM14 = 25

Fin Tarea

Recibir Datos

Recibir dato 1
Recibir dato 2
Recibir dato 3
Recibir dato 4
Recibir dato 5
Recibir dato 6
Recibir dato 7
Recibir dato 8
Recibir dato 9
Recibir dato 10
Recibir dato 11
Recibir dato 12
Recibir dato 13
Recibir dato 14
Recibir dato 15
Confirmar recepción

Fin Tarea

3.3.2 INTERRUPCIÓN DEL PIC3

El programa de interrupción del PIC3 se utiliza únicamente para generar las 15 señales PWM; por ello, si existe una interrupción, esta se deberá al desbordamiento del timer 2, el cual se encarga de contar y comparar valores para producir 15 salidas PWM de 500Hz.

El PIC 3 actualiza los valores de las salidas PWM0-PWM15 en un número de 50 veces por ciclo, esto quiere decir que cada 40µs el programa compara los valores para producir una variación en la señal de salida. En la Figura 3.28 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo de interrupción del PIC3.

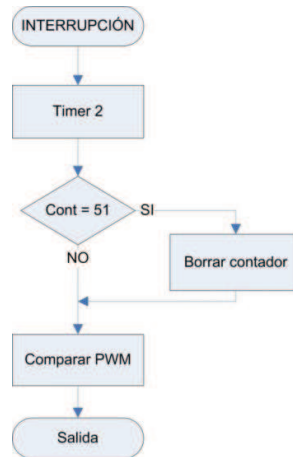


Figura 3.28 Algoritmo de interrupción del PIC3

Este algoritmo de interrupción se detalla a continuación.

Timer 2

Limpiar la bandera de interrupción de desbordamiento del Timer 2
 Cargar valores para Timer2 para $t=40\mu s$
 Incrementar contador

Fin Tarea

Borrar contador1

Contador=0

Fin Tarea

Comparar PWM

Si $PWM0 \leq \text{contador}$
 $RB0 = 1$

Si $PWM0 > \text{contador}$
 $RB0 = 0$

Si $PWM1 \leq \text{contador}$
 $RB1 = 1$

Si $PWM1 > \text{contador}$
 $RB1 = 0$

Si $PWM2 \leq \text{contador}$
 $RB2 = 1$

Si $PWM2 > \text{contador}$
 $RB2 = 0$

Si $PWM3 \leq \text{contador}$
 $RB3 = 1$

Si $PWM3 > \text{contador}$
 $RB3 = 0$

Si $PWM4 \leq \text{contador}$
RB4 = 1
Si $PWM4 > \text{contador}$
RB4 = 0

Si $PWM5 \leq \text{contador}$
RB5 = 1
Si $PWM5 > \text{contador}$
RB5 = 0

Si $PWM6 \leq \text{contador}$
RB6 = 1
Si $PWM6 > \text{contador}$
RB6 = 0

Si $PWM7 \leq \text{contador}$
RB7 = 1
Si $PWM7 > \text{contador}$
RB7 = 0

Si $PWM8 \leq \text{contador}$
RC0 = 1
Si $PWM8 > \text{contador}$
RC0 = 0

Si $PWM9 \leq \text{contador}$
RC1 = 1
Si $PWM9 > \text{contador}$
RC1 = 0

Si $PWM10 \leq \text{contador}$
RC2 = 1
Si $PWM10 > \text{contador}$
RC2 = 0

Si $PWM11 \leq \text{contador}$
RC6 = 1
Si $PWM11 > \text{contador}$
RC6 = 0

Si $PWM12 \leq \text{contador}$
RC7 = 1
Si $PWM12 > \text{contador}$
RC7 = 0

Si $PWM13 \leq \text{contador}$
RA0 = 1
Si $PWM13 > \text{contador}$
RA0 = 0

Si $PWM14 \leq \text{contador}$

RA1 = 1

Si $PWM14 > \text{contador}$

RA1 = 0

Fin tarea

3.4 PROGRAMA DEL PC

El programa de alto nivel esta implementado en la PC, el mismo que responde a órdenes directas de un operador humano. Este programa en si sustituye la tarea que realiza el guante sensorizado. Este software fue desarrollado en LabView 6.1

En la pantalla se presentan las teclas y entradas de datos asociados con la operación de la mano robótica. Se dispone de una entrada de datos en cada articulación y el valor a ser ingresado en cada una de ellas corresponde a un valor entre 90° y 180° , donde 90° corresponde a una articulación flexionada y 180° corresponde a una articulación extendida. La interfaz virtual se muestra en la Figura 3.29.



Figura 3.29 Pantalla de control del PC

El programa envía al control de la mano robótica los datos ingresados en la interfaz virtual solamente cuando la tecla ENVIAR es presionada.

Cabe resaltar que para la transmisión de datos la PC actúa como dispositivo maestro y el control de la mano robótica como dispositivo esclavo. Para transmitir los datos el maestro le alerta al esclavo que realizará una transmisión y una vez que el esclavo confirma que está listo, entonces el maestro envía los 15 datos. Si la comunicación es correcta se despliega en la parte inferior izquierda de la pantalla un cuadro de texto indicando que no existen problemas en la comunicación. Pero, si por cualquier motivo se produce un error en la comunicación, entonces se despliega en el mismo cuadro de texto un mensaje indicando que ha ocurrido un error en la comunicación. Estos mensajes se los muestra la Figura 3.30.

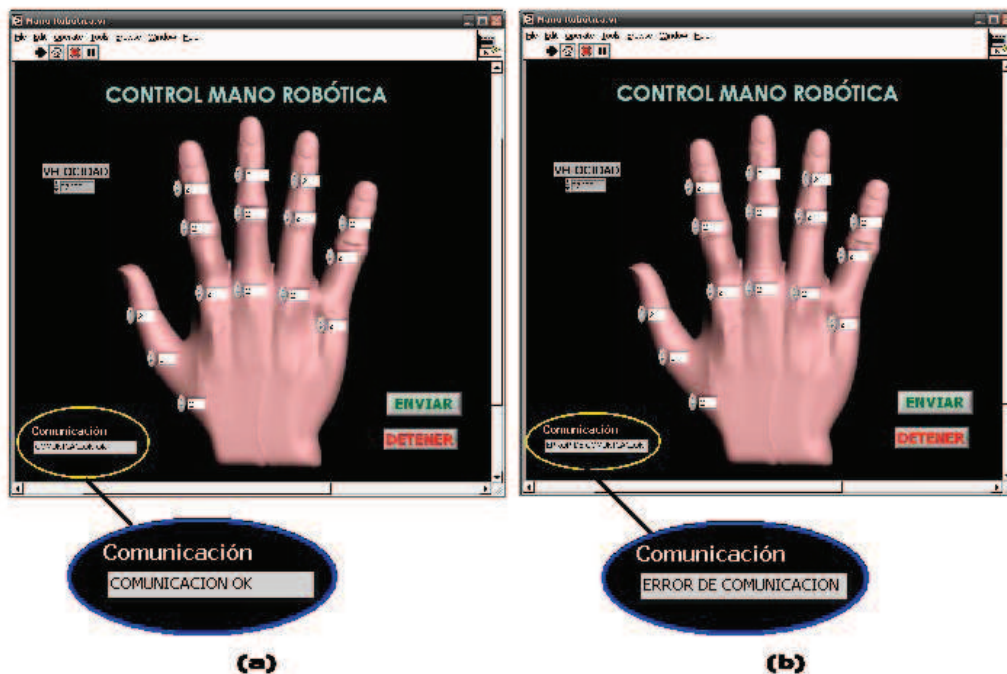


Figura 3.30 Mensajes de estado de la comunicación. a) Comunicación sin problemas. b) Error en la comunicación.

La Figura 3.31 muestra el diagrama de flujo del programa implementado en la PC.

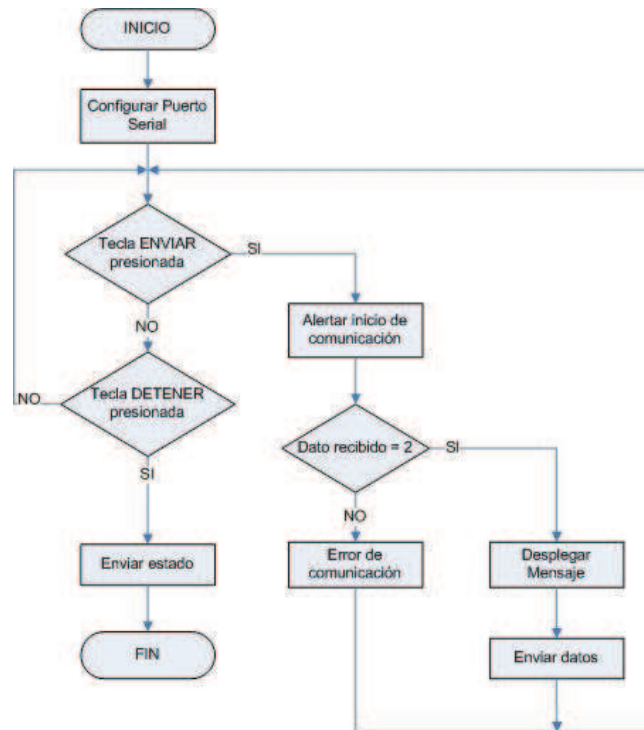


Figura 3.31 Algoritmo del programa implementado en la PC

A continuación se detalla este algoritmo en lenguaje estructurado.

Configurar puerto serial

Configurar el puerto serial para transmisión a través del puerto COM1, velocidad de 57,6 Kbaud/s, 8 bits de datos, 1 bit de parada, sin bit de paridad.

Fin Tarea

Alertar inicio de comunicación

Enviar 1 al control de la mano robótica.

Fin Tarea

Error de comunicación

Desplegar en la pantalla de estado de comunicación “ERROR DE COMUNICACIÓN”.

Fin Tarea

Desplegar mensaje

Desplegar en la pantalla de estado de comunicación “COMUNICACIÓN OK”.

Fin Tarea

Enviar datos

Enviar los 15 datos ingresados en la pantalla de control.

Fin Tarea

Enviar estado

Enviar 3 al control de la mano robótica.

Fin Tarea

En este capítulo se diseñó el software para el microcontrolador PIC16F876A (PIC1), encargado del control del guante sensorizado. El software del microcontrolador fue diseñado tal que pueda monitorear las señales de los quince sensores y la información obtenida pueda ser enviada al control de la mano robótica a una velocidad de 57.6 Kbaud/s, con 8 bits de datos, un bit de parada y sin bit de paridad.

También se diseñó el software de control de los microcontroladores PIC18F452 (PIC2) y PIC16F876A (PIC3), encargados del control de la mano robótica y generación de las señales PWM de salida respectivamente. Se determinó que el mejor algoritmo de control a implementarse en el PIC2 es un controlador tipo PID. Además, para la transmisión de información entre el PIC2 y el PIC3 se utilizó la interfaz de comunicación SPI. Y, se determinó que la forma más eficiente de programar el PIC 3 para generar las quince señales PWM independientes es en lenguaje ensamblador.

Finalmente, se diseñó un software en la PC capaz controlar la mano robótica. Para ello se utilizó el paquete computacional LabView 6.1.

En el siguiente capítulo se realizarán las pruebas del prototipo diseñado.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

A fin de determinar si la mano robótica satisface los objetivos planteados es necesario someterla a una serie de pruebas con el propósito de observar su comportamiento ante diferentes circunstancias. Además, se realizaron pruebas para determinar los errores en los ángulos de las articulaciones de la mano robótica.

Por ello se realizaron las siguientes pruebas:

4.1 POSICIÓN INICIAL

En la prueba de posición inicial se buscó determinar la correcta ejecución del algoritmo encargado de este propósito. En la Figura 4.1 la mano robótica adopta la posición mostrada en la Figura 3.4 en la cual los motores colocan todas las articulaciones al 50% de su movilidad.



Figura 4.1 Posición inicial

4.2 COMUNICACIÓN GUANTE - MANO ROBÓTICA

Se comprobó la validez de la comunicación entre el guante sensorizado y la mano robótica desplegando un mensaje de error en el LCD cuando por alguna circunstancia la comunicación es interrumpida inhabilitando cualquier acción de control de la mano robótica. Es mensaje se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4.2 LCD mostrando un error en la comunicación.

4.3 RESPUESTA DE LOS DEDOS AL GUANTE SENSORIZADO

En esta prueba se busco determinar la respuesta de los dedos de la mano robótica ante diferentes posiciones de los dedos de la mano usando el guante sensorizado.

Para determinar la movilidad de cada uno de los dedos primero se procedió a verificar su movilidad en forma independiente. Las Figuras 4.3 a 4.7 muestran la movilidad para cada dedo.



Figura 4.3 Movimiento del dedo meñique



Figura 4.4 Movimiento del dedo anular



Figura 4.5 Movimiento del dedo medio



Figura 4.6 Movimiento del dedo índice



Figura 4.7 Movimiento del dedo pulgar

Posteriormente se procedió a probar todo el funcionamiento en conjunto especialmente aquellos movimientos en los cuales los dedos pulgar, meñique y anular tienden a toparse entre sí, mostrando que el programa de control evita estas acciones. Esto se muestra en la Figura 4.8.



Figura 4.8 Movimiento de todos los dedos

4.4 ENVÍO DE ÓRDENES DESDE LA PC

La mano robótica cuenta con una interfaz de usuario que permite ser controlada desde el computador. Primero se comprobó la validez de la comunicación robot-PC y si ésta por algún motivo es interrumpida, se despliega un mensaje de ERROR, con lo cual se inhibe el funcionamiento de la mano robótica. La Figura 4.9 muestra la pantalla de control desplegando un mensaje de error.



Figura 4.9 Pantalla mostrando un error en la comunicación

Posteriormente se verificó el modo de funcionamiento desde la PC ante diferentes valores en cada articulación.



Figura 4.10 Funcionamiento desde la PC

4.5 PRUEBA DE POSICIÓN ANGULAR

Esta prueba consiste en determinar la exactitud con la cual la mano robótica se posiciona en un ángulo determinado. Para facilitar la identificación de las articulaciones se las procede a numerar como muestra la Figura 4.11.

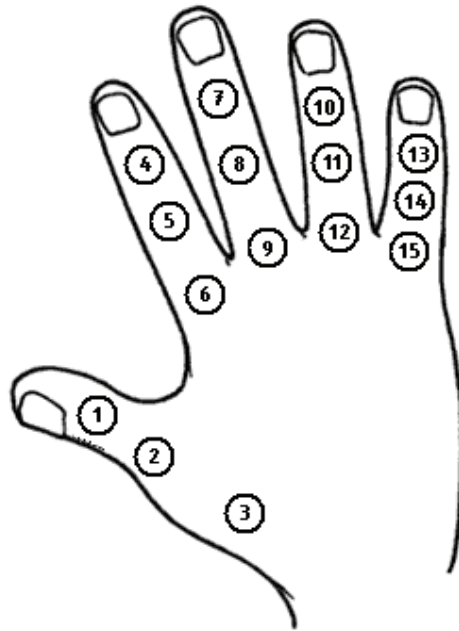


Figura 4.11 Numeración de las articulaciones

De acuerdo a la Figura 4.11 se tiene para el dedo pulgar las siguientes articulaciones:

1. Articulación 1. Articulación interfalángica distal del dedo pulgar.
2. Articulación 2. Articulación metacarpofalangeal del dedo pulgar.
3. Articulación 3. Articulación basal del pulgar, formada entre el trapecio y el hueso del metacarpo del pulgar.

Para el dedo índice se tienen los ángulos:

4. Articulación 4. Articulación interfalángica distal del dedo índice.
5. Articulación 5. Articulación interfalángica proximal del dedo índice.
6. Articulación 6. Articulación metacarpofalangeal del dedo índice.

Para el dedo medio se tienen los ángulos:

7. Articulación 7. Articulación interfalángica distal del dedo medio.
8. Articulación 8. Articulación interfalángica proximal del dedo medio.
9. Articulación 9. Articulación metacarpofalangeal del dedo medio.

Para el dedo anular se tienen los ángulos:

10. Articulación 10. Articulación interfalángica distal del dedo anular.
11. Articulación 11. Articulación interfalángica proximal del dedo anular.
12. Articulación 12. Articulación metacarpofalangeal del dedo anular.

Para el dedo meñique se tienen los ángulos:

13. Articulación 13. Articulación interfalángica distal del dedo anular.
14. Articulación 14. Articulación interfalángica proximal del dedo anular.
15. Articulación 15. Articulación metacarpofalangeal del dedo anular.

Esta prueba de posición angular puede ser dividida en dos partes. La primera utilizando el guante sensorizado como mecanismo de control y la segunda utilizando el computador. A continuación se detallan estas pruebas realizadas.

4.5.1 PRUEBA DE POSICIÓN ANGULAR UTILIZANDO EL GUANTE SENSORIZADO COMO MEDIO DE CONTROL

En esta prueba se utilizó el guante sensorizado como medio de control para la mano robótica. Los ángulos fueron medidos físicamente tanto en la mano humana como en mano robótica mediante el uso de un transportador, el mismo que tiene una resolución de 1°.

Para realizar esta prueba se utilizó la técnica de agarre cilíndrico de la mano y se tomó en cuenta las doce posiciones que fueron utilizadas para el diseño del software de control del guante sensorizado, donde la posición mínima o inicial es cuando la mano se encuentra sin flexión; y, la posición máxima o final cuando

los dedos se encuentran completamente flexionados. Las posiciones intermedias se nombraron de acuerdo al diámetro del cilindro; es decir la posición 1 corresponderá al agarre con el cilindro de diámetro 1, la posición 2 corresponderá al agarre con el cilindro de diámetro 2 y así sucesivamente.

A continuación se presenta un ejemplo de cómo se procedió con las pruebas para la medición de los ángulos de cada una de las articulaciones, para esto se utilizó como referencia el cilindro de diámetro 7 que corresponde a la posición 7.

Con el guante sensorizado puesto se agarra el cilindro, se detiene el control y se miden los ángulos de la mano robótica para esa posición. Luego, se tomó el mismo cilindro sin el guante y se obtuvieron los valores físicos (reales) de los ángulos de las articulaciones de la mano humana para esa posición.

En la Tabla 4.1 se presentan las mediciones realizadas en cada una de las quince articulaciones en la mano robótica.

Tabla 4.1 Cuadro de valores medidos para las quince articulaciones de la mano robótica

| | ARTICULACIÓN [°] | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | $\theta 1$ | $\theta 2$ | $\theta 3$ | $\theta 4$ | $\theta 5$ | $\theta 6$ | $\theta 7$ | $\theta 8$ | $\theta 9$ | $\theta 10$ | $\theta 11$ | $\theta 12$ | $\theta 13$ | $\theta 14$ | $\theta 15$ |
| Posición inicial | 177 | 179 | 178 | 178 | 179 | 177 | 176 | 178 | 176 | 177 | 177 | 178 | 177 | 175 | 176 |
| Posición 10 | 170 | 175 | 177 | 168 | 163 | 179 | 163 | 160 | 176 | 166 | 154 | 175 | 169 | 153 | 175 |
| Posición 9 | 168 | 163 | 171 | 165 | 154 | 177 | 161 | 155 | 172 | 164 | 149 | 171 | 166 | 150 | 173 |
| Posición 8 | 159 | 160 | 163 | 157 | 152 | 174 | 155 | 143 | 169 | 161 | 147 | 169 | 163 | 139 | 170 |
| Posición 7 | 158 | 148 | 158 | 154 | 141 | 172 | 152 | 139 | 162 | 158 | 139 | 157 | 157 | 138 | 165 |
| Posición 6 | 150 | 138 | 155 | 152 | 133 | 157 | 151 | 132 | 144 | 155 | 134 | 142 | 153 | 130 | 155 |
| Posición 5 | 135 | 136 | 152 | 146 | 125 | 143 | 146 | 130 | 142 | 149 | 128 | 137 | 149 | 129 | 140 |
| Posición 4 | 129 | 134 | 145 | 142 | 120 | 130 | 142 | 126 | 125 | 148 | 122 | 124 | 138 | 120 | 131 |
| Posición 3 | 128 | 128 | 141 | 141 | 117 | 115 | 132 | 120 | 124 | 140 | 105 | 120 | 136 | 105 | 112 |
| Posición 2 | 125 | 127 | 139 | 139 | 100 | 107 | 131 | 97 | 109 | 133 | 100 | 108 | 133 | 102 | 110 |
| Posición 1 | 122 | 123 | 136 | 137 | 97 | 105 | 130 | 94 | 105 | 131 | 98 | 105 | 131 | 98 | 100 |
| Posición final | 120 | 120 | 133 | 136 | 95 | 102 | 124 | 92 | 103 | 129 | 96 | 102 | 129 | 95 | 97 |

La Tabla 4.2 muestra los valores medidos en cada articulación de la mano humana sin el guante, estos valores vienen a constituir los valores reales.

Tabla 4.2 Cuadro de valores medidos para las quince articulaciones de la mano humana sin el guante

| | ÁNGULOS [°] | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | θ1 | θ2 | θ3 | θ4 | θ5 | θ6 | θ7 | θ8 | θ9 | θ10 | θ11 | θ12 | θ13 | θ14 | θ15 |
| Posición inicial | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| Posición 10 | 173 | 172 | 175 | 165 | 165 | 178 | 162 | 155 | 177 | 167 | 155 | 176 | 168 | 154 | 177 |
| Posición 9 | 166 | 165 | 170 | 162 | 155 | 176 | 160 | 150 | 173 | 165 | 148 | 172 | 164 | 149 | 175 |
| Posición 8 | 164 | 153 | 165 | 158 | 150 | 173 | 157 | 145 | 170 | 160 | 143 | 168 | 160 | 142 | 172 |
| Posición 7 | 156 | 150 | 160 | 155 | 145 | 165 | 154 | 140 | 160 | 157 | 138 | 158 | 158 | 137 | 163 |
| Posición 6 | 152 | 145 | 154 | 150 | 135 | 158 | 149 | 134 | 145 | 154 | 133 | 144 | 155 | 133 | 157 |
| Posición 5 | 140 | 137 | 150 | 148 | 132 | 144 | 145 | 128 | 140 | 150 | 129 | 138 | 148 | 127 | 143 |
| Posición 4 | 130 | 130 | 146 | 145 | 122 | 132 | 140 | 122 | 123 | 142 | 120 | 125 | 145 | 119 | 133 |
| Posición 3 | 126 | 127 | 142 | 144 | 119 | 112 | 130 | 117 | 120 | 138 | 103 | 118 | 138 | 102 | 111 |
| Posición 2 | 123 | 125 | 140 | 142 | 98 | 104 | 128 | 98 | 107 | 134 | 99 | 106 | 135 | 98 | 103 |
| Posición 1 | 121 | 122 | 137 | 140 | 96 | 102 | 126 | 96 | 104 | 132 | 97 | 103 | 132 | 96 | 101 |
| Posición final | 119 | 118 | 135 | 140 | 94 | 100 | 125 | 95 | 102 | 130 | 95 | 100 | 132 | 94 | 99 |

De acuerdo a la Tablas 4.1 y 4.2 se calcularon los siguientes errores:

$$Error\ Relativo = Valor\ Real - Valor\ Medido$$

$$Error\ Absoluto = \frac{Valor\ Real - Valor\ Medido}{Valor\ Real}$$

$$Error\ Porcentual = Error\ Absoluto \cdot 100 = Error\ \%$$

La Tabla 4.3 muestra el error relativo para cada valor medido en las quince articulaciones; y, la Tabla 4.4 muestra el error absoluto porcentual para dichos valores.

Tabla 4.3 Error relativo para los ángulos medidos en cada articulación

| | ARTICULACION [°] | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Posición inicial | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 3 | 4 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 5 | 4 |
| Posición 10 | 3 | -3 | -2 | -3 | 2 | -1 | -1 | -5 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 2 |
| Posición 9 | -2 | 2 | -1 | -3 | 1 | -1 | -1 | -5 | 1 | 1 | -1 | 1 | -2 | -1 | 2 |
| Posición 8 | 5 | -7 | 2 | 1 | -2 | -1 | 2 | 2 | 1 | -1 | -4 | -1 | -3 | 3 | 2 |
| Posición 7 | -2 | 2 | 2 | 1 | 4 | -7 | 2 | 1 | -2 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -2 |
| Posición 6 | 2 | 7 | -1 | -2 | 2 | 1 | -2 | 2 | 1 | -1 | -1 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| Posición 5 | 5 | 1 | -2 | 2 | 7 | 1 | -1 | -2 | -2 | 1 | 1 | 1 | -1 | -2 | 3 |
| Posición 4 | 1 | -4 | 1 | 3 | 2 | 2 | -2 | -4 | -2 | -6 | -2 | 1 | 7 | -1 | 2 |
| Posición 3 | -2 | -1 | 1 | 3 | 2 | -3 | -2 | -3 | -4 | -2 | -2 | -2 | 2 | -3 | -1 |
| Posición 2 | -2 | -2 | 1 | 3 | -2 | -3 | -3 | 1 | -2 | 1 | -1 | -2 | 2 | -4 | -7 |
| Posición 1 | -1 | -1 | 1 | 3 | -1 | -3 | -4 | 2 | -1 | 1 | -1 | -2 | 1 | -2 | 1 |
| Posición final | -1 | -2 | 2 | 4 | -1 | -2 | 1 | 3 | -1 | 1 | -1 | -2 | 3 | -1 | 2 |

Tabla 4.4 Error absoluto porcentual para valores medidos.

| | ARTICULACION [%] | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Posición inicial | 1,67 | 0,56 | 1,11 | 1,11 | 0,56 | 1,67 | 2,22 | 1,11 | 2,22 | 1,67 | 1,67 | 1,11 | 1,67 | 2,78 | 2,22 |
| Posición 10 | 1,73 | 1,74 | 1,14 | 1,82 | 1,21 | 0,56 | 0,62 | 3,23 | 0,56 | 0,60 | 0,65 | 0,57 | 0,60 | 0,65 | 1,13 |
| Posición 9 | 1,20 | 1,21 | 0,59 | 1,85 | 0,65 | 0,57 | 0,63 | 3,33 | 0,58 | 0,61 | 0,68 | 0,58 | 1,22 | 0,67 | 1,14 |
| Posición 8 | 3,05 | 4,58 | 1,21 | 0,63 | 1,33 | 0,58 | 1,27 | 1,38 | 0,59 | 0,63 | 2,80 | 0,60 | 1,88 | 2,11 | 1,16 |
| Posición 7 | 1,28 | 1,33 | 1,25 | 0,65 | 2,76 | 4,24 | 1,30 | 0,71 | 1,25 | 0,64 | 0,72 | 0,63 | 0,63 | 0,73 | 1,23 |
| Posición 6 | 1,32 | 4,83 | 0,65 | 1,33 | 1,48 | 0,63 | 1,34 | 1,49 | 0,69 | 0,65 | 0,75 | 1,39 | 1,29 | 2,26 | 1,27 |
| Posición 5 | 3,57 | 0,73 | 1,33 | 1,35 | 5,30 | 0,69 | 0,69 | 1,56 | 1,43 | 0,67 | 0,78 | 0,72 | 0,68 | 1,57 | 2,10 |
| Posición 4 | 0,77 | 3,08 | 0,68 | 2,07 | 1,64 | 1,52 | 1,43 | 3,28 | 1,63 | 4,23 | 1,67 | 0,80 | 4,83 | 0,84 | 1,50 |
| Posición 3 | 1,59 | 0,79 | 0,70 | 2,08 | 1,68 | 2,68 | 1,54 | 2,56 | 3,33 | 1,45 | 1,94 | 1,69 | 1,45 | 2,94 | 0,90 |
| Posición 2 | 1,63 | 1,60 | 0,71 | 2,11 | 2,04 | 2,88 | 2,34 | 1,02 | 1,87 | 0,75 | 1,01 | 1,89 | 1,48 | 4,08 | 6,80 |
| Posición 1 | 0,83 | 0,82 | 0,73 | 2,14 | 1,04 | 2,94 | 3,17 | 2,08 | 0,96 | 0,76 | 1,03 | 1,94 | 0,76 | 2,08 | 0,99 |
| Posición final | 0,84 | 1,69 | 1,48 | 2,86 | 1,06 | 2,00 | 0,80 | 3,16 | 0,98 | 0,77 | 1,05 | 2,00 | 2,27 | 1,06 | 2,02 |

Posteriormente se procede a calcular el promedio del error absoluto para cada articulación con la siguiente ecuación:

$$\text{Promedio de error absoluto} = \frac{\sum \text{Errores absolutos}}{\text{Número de errores absolutos}}$$

A continuación, en la Tabla 4.5 se muestra el promedio del error absoluto para cada articulación.

Tabla 4.5 Error absoluto porcentual para cada articulación.

| | Error Absoluto [%] |
|-----------------|--------------------|
| Articulación 1 | 1,62 |
| Articulación 2 | 1,91 |
| Articulación 3 | 0,97 |
| Articulación 4 | 1,67 |
| Articulación 5 | 1,73 |
| Articulación 6 | 1,75 |
| Articulación 7 | 1,45 |
| Articulación 8 | 2,08 |
| Articulación 9 | 1,34 |
| Articulación 10 | 1,12 |
| Articulación 11 | 1,23 |
| Articulación 12 | 1,16 |
| Articulación 13 | 1,56 |
| Articulación 14 | 1,82 |
| Articulación 15 | 1,87 |

La Tabla 4.5 muestra los errores existentes en cada articulación de la mano robótica cuando ésta es controlada mediante el guante sensorizado, mostrando el desempeño de cada articulación. El error absoluto promedio de todo el sistema se lo obtiene realizando un promedio de los errores absolutos de cada articulación, así se tiene:

$$\text{Promedio de error absoluto} = \frac{\sum \text{Errores Absolutos}}{\text{Número de articulaciones}}$$

$$\text{Promedio de error absoluto} = \frac{23,27}{15}$$

$$\text{Promedio de error absoluto} = \mathbf{1.55\%}$$

Si se hace una referencia con una mano humana se puede decir que la mano está formada por varios músculos que le permiten tener un rango de variación al agarrar un objeto; es decir, los músculos le permiten agarrar el mismo objeto

tanto suavemente como rígidamente sin causar daño alguno sobre éste. Por ello, los errores obtenidos se pueden considerar aceptables, cumpliendo con el objetivo de emular en una mano robótica los movimientos capturados por un guante con sensores.

4.5.2 PRUEBA DE POSICIÓN ANGULAR UTILIZANDO EL COMPUTADOR COMO MEDIO DE CONTROL

En esta segunda prueba realizada se utilizó la computadora como medio de control para la mano robótica.

Se puede decir que el objetivo de esta prueba es medir el error de posición que posee únicamente la mano robótica, puesto que los valores de los ángulos son enviados directamente desde el computador sin pasar por etapas de acondicionamiento, ni realizar ningún tipo de procesamiento en los mismos.

Todas las articulaciones de la mano robótica están diseñadas para moverse hasta un ángulo de 90°. Por ello en esta prueba se procedió a enviar desde el computador valores de ángulos para cada articulación, entre los 90° que corresponde a la posición de máxima flexión, hasta los 180° cuando la mano se encuentra sin flexión. Los valores intermedios fueron enviados en intervalos de 5°.

Una vez enviados los datos al control de la mano robótica se procedió a medir físicamente estos ángulos en la mano robótica.

En la Tabla 4.6 se presentan las mediciones realizadas en cada una de las quince articulaciones, de acuerdo a esto se calcularon los siguientes errores:

$$\text{Error Relativo} = \text{Valor Real} - \text{Valor Medido}$$

$$\text{Error Absoluto} = \frac{\text{Valor Real} - \text{Valor Medido}}{\text{Valor Real}}$$

$$Error\ Porcentual = Error\ Absoluto \cdot 100 = Error\ \%$$

Como ejemplo de cálculo se toma como referencia la articulación 1 en la posición de 180°. Para este ángulo se tienen los siguientes errores:

$$Error\ Relativo = Valor\ Real - Valor\ Medido = 180^\circ - 179^\circ = 1^\circ$$

$$Error\ Absoluto = \frac{Valor\ Real - Valor\ Medido}{Valor\ Real} = \frac{180^\circ - 179^\circ}{180^\circ} = 0.0056$$

$$Error\ Porcentual = Error\ Absoluto \cdot 100 = 0.0056 \cdot 100 = 0.56\%$$

Para los demás ángulos se procede de la misma forma.

Posteriormente se procede a calcular el promedio del error absoluto para cada articulación con la siguiente ecuación:

$$Promedio\ de\ error\ absoluto = \frac{\sum Errores\ absolutos}{Número\ de\ errores\ absolutos}$$

Como ejemplo se tiene para la articulación 1:

$$Promedio\ de\ error\ absoluto = \frac{0.0633}{19} = 0.0033 = 0.33\%$$

Para las demás articulaciones se procede de la misma forma.

En la Tabla 4.7 se muestra el error relativo para cada medición realizada en las quince articulaciones, en la Tabla 4.8 se muestra el error porcentual de dichas mediciones ; y, en la Tabla 4.9, se muestra el promedio del error absoluto para cada articulación.

NÚMERO DE ARTICULACIÓN

| | #1 | #2 | #3 | #4 | #5 | #6 | #7 | #8 | #9 | #10 | #11 | #12 | #13 | #14 | #15 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 180 | 179 | 178 | 178 | 178 | 178 | 177 | 177 | 178 | 179 | 179 | 177 | 180 | 177 | 177 | 180 |
| 175 | 175 | 174 | 174 | 175 | 176 | 174 | 175 | 174 | 175 | 175 | 174 | 175 | 175 | 174 | 175 |
| 170 | 170 | 169 | 170 | 170 | 170 | 169 | 170 | 171 | 170 | 170 | 171 | 170 | 170 | 171 | 170 |
| 165 | 165 | 164 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 | 166 | 165 | 165 | 166 | 164 | 165 | 166 | 165 |
| 160 | 160 | 159 | 161 | 160 | 160 | 161 | 160 | 161 | 161 | 160 | 161 | 159 | 160 | 160 | 159 |
| 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 157 | 156 | 155 | 156 | 155 | 156 | 155 | 155 | 155 | 154 |
| 150 | 150 | 150 | 151 | 150 | 151 | 149 | 151 | 150 | 151 | 150 | 150 | 149 | 150 | 150 | 149 |
| 145 | 144 | 145 | 144 | 145 | 146 | 143 | 146 | 145 | 146 | 145 | 146 | 145 | 144 | 144 | 144 |
| 140 | 139 | 140 | 140 | 141 | 141 | 140 | 141 | 140 | 141 | 140 | 140 | 140 | 139 | 141 | 138 |
| 135 | 134 | 135 | 135 | 136 | 136 | 134 | 136 | 135 | 135 | 135 | 135 | 136 | 134 | 135 | 134 |
| 130 | 129 | 129 | 130 | 131 | 130 | 130 | 131 | 130 | 130 | 129 | 130 | 130 | 129 | 130 | 129 |
| 125 | 124 | 124 | 125 | 126 | 125 | 125 | 125 | 125 | 125 | 124 | 125 | 125 | 124 | 125 | 124 |
| 120 | 119 | 119 | 121 | 120 | 120 | 121 | 120 | 119 | 120 | 119 | 120 | 120 | 119 | 120 | 120 |
| 115 | 114 | 114 | 116 | 115 | 115 | 116 | 115 | 114 | 115 | 114 | 115 | 114 | 114 | 115 | 115 |
| 110 | 109 | 109 | 111 | 110 | 109 | 110 | 110 | 109 | 110 | 109 | 109 | 109 | 110 | 110 | 110 |
| 105 | 105 | 105 | 106 | 105 | 104 | 105 | 105 | 104 | 104 | 104 | 106 | 105 | 105 | 104 | 105 |
| 100 | 100 | 100 | 101 | 100 | 99 | 99 | 100 | 99 | 99 | 100 | 101 | 101 | 100 | 99 | 100 |
| 95 | 95 | 94 | 96 | 94 | 95 | 96 | 95 | 94 | 94 | 95 | 95 | 95 | 95 | 96 | 95 |
| 90 | 90 | 91 | 92 | 89 | 91 | 93 | 92 | 90 | 89 | 90 | 92 | 91 | 92 | 92 | 90 |

Tabla 4.6 Cuadro de medidas para las quince articulaciones

NÚMERO DE ARTICULACIÓN

| | #1 | #2 | #3 | #4 | #5 | #6 | #7 | #8 | #9 | #10 | #11 | #12 | #13 | #14 | #15 |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 180 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 0 | 3 | 3 | 0 |
| 175 | 0 | 1 | 1 | 0 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 170 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 |
| 165 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | -1 | 1 | 0 | -1 | 0 |
| 160 | 0 | 1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | -1 | 0 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 155 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 150 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | 1 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 145 | 1 | 0 | 1 | 0 | -1 | 2 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 140 | 1 | 0 | 0 | -1 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | -1 | 2 |
| 135 | 1 | 0 | 0 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 1 | 0 | 1 |
| 130 | 1 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 125 | 1 | 1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 120 | 1 | 1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 115 | 1 | 1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 110 | 1 | 1 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 105 | 0 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 100 | 0 | 0 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | -1 | -1 | 0 | 1 | 0 |
| 95 | 0 | 1 | -1 | 1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 |
| 90 | 0 | -1 | -2 | 1 | -1 | -3 | -2 | 0 | 1 | 0 | -2 | -1 | -2 | -2 | 0 |

Tabla 4.7 Error relativo para ángulos medidos en cada articulación

NÚMERO DE ARTICULACIÓN

| | #1 | #2 | #3 | #4 | #5 | #6 | #7 | #8 | #9 | #10 | #11 | #12 | #13 | #14 | #15 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 180 | 0,56 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,67 | 1,67 | 1,11 | 0,56 | 0,56 | 1,67 | 0,00 | 1,67 | 1,67 | 0,00 |
| 175 | 0,00 | 0,57 | 0,57 | 0,00 | 0,57 | 0,57 | 0,00 | 0,57 | 0,00 | 0,00 | 0,57 | 0,00 | 0,00 | 0,57 | 0,00 |
| 170 | 0,00 | 0,59 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,59 | 0,00 | 0,59 | 0,00 | 0,00 | 0,59 | 0,00 | 0,00 | 0,59 | 0,00 |
| 165 | 0,00 | 0,61 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,61 | 0,00 | 0,00 | 0,61 | 0,61 | 0,00 | 0,61 | 0,00 |
| 160 | 0,00 | 0,63 | 0,63 | 0,00 | 0,00 | 0,63 | 0,00 | 0,63 | 0,63 | 0,00 | 0,63 | 0,63 | 0,00 | 0,00 | 0,63 |
| 155 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,29 | 0,65 | 0,00 | 0,65 | 0,00 | 0,65 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,65 |
| 150 | 0,00 | 0,00 | 0,67 | 0,00 | 0,67 | 0,67 | 0,67 | 0,00 | 0,67 | 0,00 | 0,00 | 0,67 | 0,00 | 0,00 | 0,67 |
| 145 | 0,69 | 0,00 | 0,69 | 0,00 | 0,69 | 1,38 | 0,69 | 0,00 | 0,69 | 0,00 | 0,69 | 0,00 | 0,69 | 0,69 | 0,69 |
| 140 | 0,71 | 0,00 | 0,00 | 0,71 | 0,71 | 0,00 | 0,71 | 0,00 | 0,71 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,71 | 0,71 | 1,43 |
| 135 | 0,74 | 0,00 | 0,00 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,74 | 0,74 | 0,00 | 0,74 |
| 130 | 0,77 | 0,77 | 0,00 | 0,77 | 0,00 | 0,00 | 0,77 | 0,00 | 0,00 | 0,77 | 0,00 | 0,00 | 0,77 | 0,00 | 0,77 |
| 125 | 0,80 | 0,80 | 0,00 | 0,80 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,80 | 0,00 | 0,00 | 0,80 | 0,00 | 0,80 |
| 120 | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 0,00 | 0,00 | 0,83 | 0,00 | 0,83 | 0,00 | 0,83 | 0,00 | 0,00 | 0,83 | 0,00 | 0,00 |
| 115 | 0,87 | 0,87 | 0,87 | 0,00 | 0,00 | 0,87 | 0,00 | 0,87 | 0,00 | 0,87 | 0,00 | 0,87 | 0,87 | 0,00 | 0,00 |
| 110 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,00 | 0,91 | 0,00 | 0,00 | 0,91 | 0,00 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 105 | 0,00 | 0,00 | 0,95 | 0,00 | 0,95 | 0,00 | 0,00 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,00 | 0,00 | 0,95 | 0,00 |
| 100 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| 95 | 0,00 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 0,00 | 1,05 | 0,00 | 1,05 | 1,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,05 | 0,00 |
| 90 | 0,00 | 1,11 | 2,22 | 1,11 | 1,11 | 3,33 | 2,22 | 0,00 | 1,11 | 0,00 | 2,22 | 1,11 | 2,22 | 2,22 | 0,00 |

Tabla 4.8 Error absoluto porcentual para ángulos medidos en cada articulación

Tabla 4.9 Error absoluto promedio para cada articulación expresado en porcentaje

| | ERROR |
|-----------------|-------|
| ARTICULACIÓN 1 | 0,36 |
| ARTICULACIÓN 2 | 0,52 |
| ARTICULACIÓN 3 | 0,61 |
| ARTICULACIÓN 4 | 0,33 |
| ARTICULACIÓN 5 | 0,45 |
| ARTICULACIÓN 6 | 0,77 |
| ARTICULACIÓN 7 | 0,43 |
| ARTICULACIÓN 8 | 0,48 |
| ARTICULACIÓN 9 | 0,42 |
| ARTICULACIÓN 10 | 0,30 |
| ARTICULACIÓN 11 | 0,55 |
| ARTICULACIÓN 12 | 0,34 |
| ARTICULACIÓN 13 | 0,49 |
| ARTICULACIÓN 14 | 0,53 |
| ARTICULACIÓN 15 | 0,34 |

La Tabla 4.9 muestra los errores existentes en cada articulación de la mano robótica cuando ésta es controlada a través del computador. Los valores ingresados por el computador no tienen que pasar por ninguna etapa de acondicionamiento y se los transmite directamente al control de la mano robótica. Por ello los errores mostrados corresponden únicamente a los existentes en las articulaciones de la mano robótica ya que aquí no se incluyen los errores de posición que ocasiona el guante sensorizado.

El error absoluto promedio de todo el sistema se lo obtiene realizando un promedio de los errores absolutos de cada articulación, así se tiene:

$$\text{Promedio de error absoluto} = \frac{\sum \text{Errores Absolutos}}{\text{Número de articulaciones}}$$

$$\text{Promedio de error absoluto} = \frac{6.91}{15}$$

$$\text{Promedio de error absoluto} = \mathbf{0.46\%}$$

Esto demuestra que la mano robótica puede posicionarse con un error promedio de 0.46%. Cabe recalcar que este error únicamente corresponde al posicionamiento de la mano robótica.

Si bien es cierto no existe una norma que establezca el máximo error permitido en sistemas robóticos, ya que esto depende de la aplicación; documentos consultados¹² afirman que para aplicaciones no críticas un error de posición de 0.46% es considerado como satisfactorio.

Una vez realizadas las pruebas correspondientes para verificar el funcionamiento del sistema diseñado y construido, se pueden determinar las conclusiones y recomendaciones que surgieron del presente proyecto.

¹² - Raúl Suárez, Máximo Roa, Jordi Cornella; Grasp quality measures, Spain, March 2006

- Aaron M. Dollar, Robert D. Howe; Joint coupling design of underactuated grippers; ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference; September 10-13, 2006, Philadelphia, Pennsylvania, USA

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De las pruebas realizadas, los resultados y las experiencias obtenidas del trabajo práctico realizado, es posible extraer las conclusiones y recomendaciones siguientes:

5.1 CONCLUSIONES

- Las pruebas mostraron que la mano robótica se mueve con tres grados de libertad por dedo imitando los movimientos de flexión de la mano humana, por lo tanto se puede concluir que el sistema construido logra el control de la mano robótica por medio de un guante sensorizado o por medio del computador.
- Se diseñó y construyó un guante sensorizado que permite detectar y medir la flexión de los dedos, pero no su movimiento de adducción/abducción. Sin embargo, de las pruebas realizadas se pudo concluir que este movimiento no es muy utilizado y de acuerdo a como se diseñó la mano de este proyecto, no es necesario.
- Los sensores de posición ubicados en el guante presentan un rango de variación de voltaje en su salida en función de la posición de las articulaciones en el orden de los milivoltios. Por ello, requiere de una ubicación exacta para obtener un mayor rango de variación en su salida, que permita lograr una mejor apreciación en la posición de la articulación.
- La cantidad de motores utilizados en la mano robótica hace que los requerimientos del sistema en cuanto a potencia sean elevados. Debido a esto; y, para evitar interferencias con la etapa de control se utilizó como solución una fuente de alimentación externa e independiente.

- Las técnicas de control basadas en la cinemática directa e inversa darían una mayor precisión en la posición de las articulaciones, pero esto obligaría el uso de más herramientas de software y un mayor estudio de la dinámica del sistema. Sin embargo, el algoritmo de control basado en un PID logra buenos resultados sin requerir de una mayor inversión económica en cuanto a licencias de software y tiempo de ejecución.
- Una de las pruebas realizadas para la mano robótica hace una comparación de la posición respecto a la mano humana, de la cual se obtiene un error promedio de 1.55%, éste puede ser considerado aceptable tomando en cuenta que el objetivo del proyecto es emular en una mano robótica los movimientos capturados por un guante con sensores
- Al utilizar el guante como medio de control, la señal debe pasar por diferentes etapas de procesamiento hasta llegar al control de la mano robótica, lo cual produce un incremento en el error. Por ello, si se requiere determinar únicamente el error existente en la mano robótica se debe utilizar el computador como medio de control, puesto que los valores de los ángulos son enviados directamente desde el computador hasta el control eliminando así el error introducido por el guante sensorizado.
- La segunda prueba realizada para la mano robótica hace una comparación con un valor determinado enviado por el computador, de la cual se obtiene un error promedio de 0.46% que si bien es cierto no está establecido por una norma, de acuerdo a documentos consultados es considerado como aceptable.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para obtener un tiempo de muestreo más corto se recomienda utilizar una interfaz con una mayor velocidad de transferencia de datos, ya que la comunicación serial en cierto modo puede ser considerada como lenta. Podría ser utilizando la transmisión de datos por el puerto paralelo, una interfase USB 2.0 o el puerto IEEE 1394 (fire-wire).
- Como mejora del proyecto desarrollado se plantea, para futuros proyectos, la implementación de un sistema que le permita a la mano robótica simular la sensación de tacto que posee una mano humana, con ello se podrían realizar tareas de agarre.
- Además, para futuros proyectos, se podría utilizar un medio de transmisión inalámbrico entre el guante sensorizado o la PC y la mano robótica, a fin de ganar mayor libertad e independencia.
- Adicionalmente, se recomienda la investigación para poder reproducir movimientos desarrollados en el computador con algoritmos más complejos, tales como la cinemática directa e inversa, para que el computador sea el que envíe las señales de posicionamiento a los motores.
- En la realización de los proyectos de titulación, especialmente en aquellos relacionados con la robótica, es notoria la necesidad de conocimientos de mecánica, ya que son éstos los que incrementan el tiempo de ejecución del proyecto, pues, se ingresa a un campo totalmente desconocido y muchas veces las soluciones planteadas no necesariamente son las que satisfacen mejor el problema. Por lo tanto, es recomendable para nuestra carrera incluir una materia optativa que haga relación a sistemas mecánicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TAPIA PUENTE, Jorge; Anatomía Humana. Editorial Panorama S.A. Capítulo VI; 118p-130p
- [2] LAUREN BANKS, Jessica. Design and Control of an Anthropomorphic Robotic Finger with Multi-point Tactile Sensation. <http://www.ai.mit.edu/research/abstracts/abstracts2001/humanoid-robotics/03banks.pdf> Fecha de consulta: Abril del 2008. Diseño de un dedo robótico antropomórfico planar con dos grados de libertad con sensación táctil.
- [3] OLLERO BATURONE, Aníbal. Robótica, manipuladores y robots móviles. Editorial Marcombo S.A. Capítulo 1; 1p-3p
- [4] Enciclopedia Universal Ilustrada Europeo-Americana, Editorial Espasa Calpe S.A. Página 1123
- [5] SPEICH, John. Medical Robotics. <http://brl.ee.washington.edu/publications/rep178.pdf> Fecha de consulta: Abril del 2008. Descripción del uso de robots en la medicina.
- [6] Sensor fotoeléctrico aplicado al movimiento de las manos, Instituto Nacional de Rehabilitación, México. <http://www.ejournal.unam.mx/cys/vol10-01/CYS10105.pdf>. Fecha de consulta: Marzo del 2008 Descripción de la construcción de un guante para interpretación del lenguaje por señas.
- [7] Guante CyberGlove. http://www.immersion.com/3d/docs/cyberglovell_jul08v5-lr.pdf Fecha de consulta: Agosto del 2008. Datos técnicos del guante CyberGlove
- [8] Guante CyberTouch http://www.cyberglobesystem.com/pdf/cybertouch_bronchure_2008.pdf Fecha de consulta: Agosto del 2008. Datos técnicos del guante CyberTouch

- [9] Guante CyberGrasp
http://www.cyberglobesystem.com/pdf/cybergrasp_bronchure_2008.pdf Fecha de consulta: Agosto del 2008. Datos técnicos del guante CyberGrasp
- [10] Guante CyberForce.
http://www.immersion.com/3d/docs/cyberforce_jul07v2-lr.pdf. Fecha de consulta: Febrero del 2008. Datos técnicos del guante CyberForce
- [11] COUGHLIN, Robert; DRISCOLL, Frederik. Circuitos lineales y amplificadores operacionales, Filtros Activos, Editorial Prentice Hall, Segunda Edición, Capítulo 11
- [12] Mano Artificial Inteligente MAI, Universidad Politécnica de Cataluña, España. iocnet.upc.edu/usuarios/raulsuarez/papers/ja03-POSTER.pdf. Fecha de consulta: Febrero del 2008. Descripción de la mano artificial inteligente creada en la Universidad Politécnica de Cataluña
- [13] AVILES, Oscar. Dedos para “Grippers” robóticos.
<http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/152897-102.pdf> Fecha de consulta Marzo del 2008. Diseño de un prototipo de dedo robótico antropomórfico.
- [14] SUAREZ, Raúl. Presión de objetos en robotica.
<http://webdiis.unizar.es/~neira/docs/RSuarez-CEDI2007.pdf> Fecha de consulta: Marzo del 2008. Investigación sobre presión y manipulación diestra de objetos mediante robots.
- [15] SUAREZ, Raúl; ROA Máximo, CORNELLA, Jordi . Grasp quality measures. España. Fecha de consulta: Febrero 2009.
<https://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/316/1/Roa.pdf>. Calidad en las mediciones realizadas en tareas de agarre.
- [16] DOLLAR, Aaron; HOWE, Robert. Joint coupling design of underactuated grippers. ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference September 10-13, 2006, Philadelphia, Pennsylvania, USA.

<http://biorobotics.harvard.edu/pubs/DollarIDETC2006.pdf>. Fecha de consulta: Febrero del 2009. Análisis de juntas en manos robóticas donde el ambiente y la posición no son bien conocidas.

[17] CECARRELLI, Marco; NAVA, Néstor; JUAREGUI, Juan; PARADA, Jorge; CARBONE, Giuseppe. Diseño y experimentación de un dedo articulado antropomorfo con un grado de libertad para una mano robótica. http://www.uned.es/ribim/volumenes/Vol8N2Julio_2004/V8N2A02%20Ceccarelli.pdf. Fecha de consulta: Mayo 2008. Diseño de un dedo con un grado de libertad y estudio de técnicas de agarre.

[18] <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/157680/TI/CD4067BE.html> Especificaciones técnicas del multiplexor analógico CD4067BE.

[19] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30292c.pdf>. Manual del microcontrolador PIC16F877A.

[20] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39564c.pdf>. Manual del microcontrolador PIC18F452.

[21] http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/320/271333_DS.pdf. Especificaciones técnicas del sensor reflectivo SG2BC.

[22] <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/1/02eaf26hw3iyllihwd498scu5a7y.pdf>. Especificaciones técnicas del transistor TIP110.

[23] http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/T/L/0/8/TL084.shtml. Especificaciones técnicas del amplificador operacional TL084.

[24] http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/M/A/X/2/MAX232.shtml Especificaciones técnicas del driver MAX232.