

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**CONSTRUCCIÓN DE UNA MANO ROBÓTICA, ENFOCADO AL
CONTROL DEL MOVIMIENTO DE LOS DEDOS**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
EN MECATRÓNICA**

AUTOR: HENRY PAUL POZO YACELGA

DIRECTOR: MSc. IVÁN IGLESIAS NAVARRO

IBARRA-ECUADOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del norte dentro del Proyecto Repositorio Digital Institucional determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la universidad.

Por medio del presente documento dejamos sentada nuestra voluntad de participar en este proyecto, para lo cual se pone a disposición la siguiente información:

DATOS DEL AUTOR	
CEDULA DE IDENTIDAD	100354230-3
APELLIDOS Y NOMBRES	POZO YACELGA HENRY PAÚL
DIRECCIÓN	JOSE MARIA CORDOVA 2-190 Y PANAMERICANA NORTE
E-MAIL	henrypaulp@hotmail.com
TELÉFONO MÓVIL	0996331273
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	CONSTRUCCIÓN DE UNA MANO ROBÓTICA, ENFOCADO AL CONTROL DEL MOVIMIENTO DE LOS DEDOS

AUTOR	POZO YACELGA HENRY PAÚL
FECHA	
PROGRAMA	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA	INGENIERO EN MECATRÓNICA
ASESOR	MSC. IVAN IGLESIAS NAVARRO

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

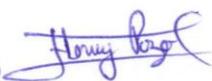
Yo, Henry Pozo con cédula de identidad Nro. 100354230-3, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

3. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 08 días del mes de noviembre de 2016

EL AUTOR:

(Firma) 

Nombre: Henry Paúl Pozo Yacelga

C.I 100354230-3



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Pozo Yacelga Henry Paúl con cédula de identidad Nro. 100354230-3, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la ley de propiedad intelectual del Ecuador, artículos 4, 5, 6, en calidad de autor del trabajo de grado denominado: "CONSTRUCCIÓN DE UNA MANO ROBÓTICA, ENFOCADO AL CONTROL DEL MOVIMIENTO DE LOS DEDOS", que ha sido desarrollada para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

.....

Pozo Yacelga Henry Paúl

C.I.: 100354230-3



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DECLARACIÓN

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, Noviembre de 2016.

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Henry Paúl Pozo Yacelga'. The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal dotted line.

Pozo Yacelga Henry Paúl

C.I.: 100354230-3



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

En calidad de Director del Trabajo de Grado “CONSTRUCCIÓN DE UNA MANO ROBÓTICA, ENFOCADO AL CONTROL DEL MOVIMIENTO DE LOS DEDOS”, presentado por el señor Henry Paul Pozo Yacelga, con cedula de identidad: 100354230-3, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el presente trabajo, se realizó en su totalidad bajo mi supervisión, para lo cual firmo en constancia.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'I' and 'N' followed by a circular flourish, positioned above a horizontal line.

Msc. Iván Iglesias Navarro

DIRECTOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi agradecimiento a todos aquellos que han aportado directa o indirectamente para la culminación este trabajo. Un agradecimiento especial a mis padres quienes han sido mi motivación diaria y me han brindado todo el apoyo necesario. Y a Dios que hace que todo sea posible.

A los docentes y demás personas que estuvieron presentes a lo largo de mi carrera, y principalmente a mi tutor Iván Iglesias quienes han sido una guía muy importante en la realización de este trabajo, a todos, mi inmenso agradecimiento.

Henry Pozo.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de manera muy especial a mis padres, por ser el pilar fundamental de mi carrera y de toda mi vida. Por haberme guiado siempre por el mejor camino con sus palabras de aliento y motivación, especialmente en esos momentos difíciles que se han presentado; sin su ayuda nada de esto hubiese sido posible. Un agradecimiento infinito desde el fondo de mi corazón.

Henry Pozo.

RESUMEN

El ser humano siempre está en busca del desarrollo, y uno de los principales avances de ello es la tecnología, en donde se pone bastante énfasis, pues esta se aplica en varios campos, que va desde el sector industrial, hasta el sector salud. Este último ha ayudado a varias personas, mejorando su calidad de vida y proporcionándoles una mejor adaptación a la sociedad.

La falta de inversión en el campo tecnológico en nuestro país, ha provocado un progreso lento en esta área, pues las empresas no se ven tan incentivadas a invertir en este campo. Aunque en los últimos tiempos se ha venido elaborando proyectos de este tipo, con el fin de acabar con este problema.

Nuestra carrera en la Universidad Técnica del Norte, aporta en gran medida al mejoramiento de la tecnología, esto es a nivel global, pues contribuye con proyectos y trabajos de toda índole, ya sea perfeccionando sistemas mecánicos industriales, o desarrollando nuevos sistemas electrónicos. En nuestra universidad no se observan trabajos de nivel biónico, es decir, proyectos como prótesis de partes del cuerpo humano, pero que pueden realizarse para así incentivar a otros estudiantes a que continúen con esta idea. Con esta iniciativa, se plantea la construcción de un prototipo de prótesis de mano robótica, la cual incluye el control del movimiento de los dedos y que realice las dos funciones básicas de una mano real, estas son: apertura y cierre total de los dedos y la formación de pinza entre el dedo pulgar y el dedo índice. Esta servirá como base para el desarrollo de futuros proyectos a nivel universitario.

ABSTRACT

Humans are always looking for development, and one of the major advances of this, is the technology, where considerable emphasis is placed, this is applied in various fields, from the industrial sector to the health sector. It has helped several people, improving their quality of life and providing a better adaptation to society.

The lack of investment in technology in our country, has generated slow progress in this area, insomuch as companies are not incentivized to invest in this field. Although in recent times, it has been developing such projects, in order to end this problem.

Our career at the North Technical University contributes greatly to the improvement of technology, this is a global level, it contributes to projects and works of all kinds, such as perfecting industrial mechanical systems, or developing new electronic systems. In our university we not work at bionic level, thus, projects like prosthetic body parts, but can be made in order to encourage other students to continue with this idea. With this initiative, the construction of a prototype prosthetic robotic hand, which includes controlling the movement of the fingers and to make the two basic functions of a real hand is raised, these are: opening and closing total of fingers and pincer formation between thumb and forefinger. This will serve as a basis for the development of future projects at university level.

ÍNDICE DE CONTENIDO

PORTADA.....	I
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN	II
CESIÓN DE DERECHOS	¡Error! Marcador no definido.
DECLARACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
CERTIFICACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTO	VIII
DEDICATORIA.....	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XXI
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPITULO I.....	5
1. MARCO TEÓRICO	5
1.1 INTRODUCCIÓN.....	5
1.2 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS REALIZADOS EN EL MUNDO	6
1.3 CARACTERÍSTICAS DE LA MANO HUMANA.....	14

1.4	MORFOLOGÍA Y ANATOMÍA DE LOS DEDOS	14
1.5	LA FACULTAD DE PRENSIÓN DE LA MANO	15
1.6	LOS TENDONES DE LOS MÚSCULOS FLEXORES DE LOS DEDOS.....	17
1.7	LAS ARTICULACIONES INTERFALÁNGICAS	18
1.8	EL PULGAR.....	19
1.8.1	La oposición del pulgar.....	20
1.9	PRÓTESIS	21
1.9.1	Prótesis de mano.....	21
1.9.2	Prótesis de mano en la actualidad.....	22
1.9.3	Materiales en las prótesis.....	24
1.9.4	Tipos de prótesis de miembro superior	28
1.9.5	Tipos de prótesis por el funcionamiento que poseen.....	30
1.10	DISEÑOS DE MANOS ROBÓTICAS	32
1.11	MECANISMOS UTILIZADOS EN DEDOS DE MANOS ROBOTICAS	38
1.11.1	Transmisión por poleas	39
1.11.2	Mecanismo de barras	40
1.11.3	Mecanismo con motor en cada juntura	40
1.12	DISPOSITIVOS UTILIZADOS EN MANOS ROBOTICAS	41
1.12.1	Microcontroladores	42
1.12.2	Servomotores y micro servomotores.....	43

1.12.3	Sensores de flexión.....	44
1.12.4	Batería LiPo	45
CAPITULO II.....		46
2.	DISEÑO Y MODELAMIENTO DE LA MANO ROBÓTICA.....	46
2.1.	ANÁLISIS DE LAS DIMENSIONES ESTÁNDAR DE UNA MANO HUMANA	46
2.2.	ALTERNATIVAS DE DISEÑO PRELIMINAR.....	47
2.2.1	Primera Alternativa	47
2.2.2	Segunda Alternativa.....	49
2.2.3	Selección de la Alternativa	50
2.3.	DISEÑO EN SISTEMA CAD DE LOS ELEMENTOS A UTILIZARSE.....	52
2.3.1	Soporte para el eje y los microservos.....	52
2.3.2	Platinas para sujeción de servomotores	53
2.3.3	Soporte para los hilos.....	54
2.3.4	Mecanismo de los dedos.....	54
2.3.5	Servomotores y Poleas.....	55
2.4.	CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE DE LA MANO ROBÓTICA	56
2.4.1.	Soporte para el eje y los microservos.....	56
2.4.2.	Platinas para sujeción de servomotores	57
2.4.3.	Soporte para los hilos.....	58
2.4.4.	Mecanismo de los dedos.....	58

2.4.5. Servomotores y Poleas.....	59
2.5. CÁLCULOS PARA ACCIONAMIENTO DE LOS DEDOS	59
2.5.1. Calculo de la constante del resorte de torsión	60
2.5.2. Cálculo del Momento de Fuerza generado en un dedo	62
2.6. ANÁLISIS ESTÁTICO DE FUERZAS EN SISTEMA CAD	64
2.6.1. Análisis del Dedo Pulgar	65
2.6.2. Análisis del Dedo Medio	67
2.7. DISPOSITIVOS A UTILIZARSE EN LA ESTRUCTURA GENERAL	69
2.7.1. Estructura Básica de la Mano Robótica	69
2.7.2. El Microcontrolador Atmega16	70
2.7.3. Servomotor	72
2.7.4. Guante Sensorizado	73
2.7.5. Sensores de Flexión (Sensor Flex)	74
2.7.6. Batería LiPo	74
CAPITULO III.....	76
3. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL	76
3.1 ESTUDIOS DE ESTRATEGIAS DE CONTROL APLICADAS EN MANOS ROBÓTICAS.....	76
3.1.1 Control de Lazo Abierto	77
3.1.2 Control de Lazo Cerrado.....	77

3.2	ELECCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL A UTILIZAR	78
3.3	DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL	80
3.3.1	Fuente etapa de control	80
3.3.2	Fuente de alimentación para los servomotores	81
3.3.3	Esquema de conexiones de los sensores	82
3.3.4	Esquema de conexiones del Microcontrolador	83
3.4	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA GENERAL	85
3.5	DESCRIPCION DEL PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR	90
	CAPITULO IV	100
4.	PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	100
4.1	COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS MOVIMIENTOS BÁSICOS DE LA MANO ROBÓTICA.	101
4.2	VERIFICACIÓN DEL MÉTODO DE CONTROL UTILIZADO	103
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
	CONCLUSIONES	108
	RECOMENDACIONES	109
	BIBLIOGRAFÍA	111
	ANEXOS	114
	ANEXO A: HOJAS DE DATOS	115
	ANEXO B: ESQUEMAS ELÉCTRICOS	122

ANEXO C: PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR	124
ANEXO D: MANUAL DE USUARIO	131
ANEXO E: PLANOS DE LA ESTRUCTURA	132
ANEXO F: HOJA DE DATOS DEL SENSOR DE FLEXIÓN	138
ANEXO G: FOTOGRAFÍAS	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Mano artificial desarrollada	7
Figura 1.2: La mano de Götz von Berlichingen.	8
Figura 1.3: Prótesis biónica I-Limb	13
Figura 1.4: Huesos de la mano humana.....	14
Figura 1.5: Arquitectura de la mano.....	15
Figura 1.6: Movimiento de los dedos en el cierre de la mano	16
Figura 1.7: Zona de pinzas	17
Figura 1.8: Posición de los tendones	17
Figura 1.9: Contracción de los dedos	18
Figura 1. 10: Articulaciones interfalángicas.....	19
Figura 1. 11: Movimiento del pulgar.....	20
Figura 1.12: Oposición del pulgar a los demás dedos	20
Figura 1.13: Prótesis de mano	22
Figura 1.14: Prótesis desarticulado de muñeca y transradial: 1) Mioeléctrica; 2) Mecánica; 3) Pasiva	29

Figura 1.15: Prótesis de desarticulado de codo y por encima de codo: Mioeléctrica.....	30
Figura 1.16: Prótesis Pasiva.....	31
Figura 1.17: Prótesis mecánica.....	31
Figura 1.18: Prótesis Mioeléctrica.....	32
Figura 1.19: Mano Belgrade/USC.....	33
Figura 1.20: Mano Stanford/JPL.....	34
Figura 1.21: Mano Utah/Mit Dextrous.....	35
Figura 1.22: Mano robot Matsuoka.....	35
Figura 1.23: Mano Robonaut.....	36
Figura 1.24: Mano DLR.....	37
Figura 1.25: Mano I-Limb Hand.....	37
Figura 1.26: Mano Shadow Dexterous C6M.....	38
Figura 1.27: a) Mecanismo de transmisión por poleas; b) Mano Shadow Dexterous utilizando el mecanismo.....	39
Figura 1.28: Mecanismo de barras rígidas en dedo mecánico.....	40
Figura 1.29: Mano robótica con micromotores en cada articulación de los dedos.....	41
Figura 1.31: Microcontroladores en sus diferentes tamaños.....	42
Figura 1.32: Posiciones del servomotor.....	43
Figura 1.33: Sensor de flexión.....	45
Figura 1.34: Batería LiPo.....	45
Figura 2.1: Medidas estándar de una mano humana.....	46
Figura 2.2: Tabla con las medidas de la mano humana.....	47
Figura 2.3: Diseño de primera alternativa.....	48

Figura 2.4: Mano robótica con hilos tensores.....	49
Figura 2.5: Servomotores con hilos.....	50
Figura 2.6: Servomotores anclados al servomotor principal.....	51
Figura 2.7: Soporte del eje.....	53
Figura 2.8: Sujeción de servomotores.....	53
Figura 2.9: Soporte hilos.....	54
Figura 2.10: Mecanismo de los dedos.....	55
Figura 2.11: Poleas sujetas a cada servomotor.....	56
Figura 2.12: Soporte de acero para el eje.....	57
Figura 2.13: Platinas de ajuste.....	57
Figura 2.14: Soporte hilos.....	58
Figura 2.15: Resortes en los dedos.....	58
Figura 2.16: Servomotores asegurados con poleas e hilos.....	59
Figura 2.17: Valores necesarios del resorte de torsión.....	60
Figura 2.18: Mallado de las piezas del pulgar en el sistema CAD.....	65
Figura 2.19: Esfuerzo de Von Mises en dedo pulgar.....	66
Figura 2.20: Deformaciones encontradas en las piezas del pulgar.....	67
Figura 2.21: Mallado de las piezas del dedo medio en el sistema CAD.....	68
Figura 2.22: Esfuerzo de Von Mises en dedo medio.....	68
Figura 2.23: Deformaciones encontradas en las piezas del pulgar.....	69
Figura 2.24: Estructura de la mano impresa en 3D.....	70
Figura 2.25: Servomotor HS-485HB.....	72
Figura 2.26: Microservomotor MG90S.....	73

Figura 2.27: Guante de nylon y poliuretano	74
Figura 2.28: Sensor de flexión.....	74
Figura 2.29: Batería LiPo	75
Figura 3.1: Esquema de sistema de control en lazo abierto.....	77
Figura 3.2: Esquema de sistema de control en lazo cerrado.....	78
Figura 3.3: Diagrama de estrategia de control en lazo abierto	79
Figura 3.4: Fuente alimentación microcontrolador y sensores.....	81
Figura 3.5: Esquema Fuente de Alimentación servomotores	82
Figura 3.6: Conexiones de sensores	82
Figura 3.7: Esquema Microcontrolador.....	83
Figura 3.8: a) Rutas del PCB del circuito, b) Vista en 3D del PCB	84
Figura 4.1: Comunicación serial con PC	100
Figura 4.2: Señales sin filtro para cada dedo.....	101
Figura 4.3: Tabla con valores de sensores.....	102
Figura 4.4: Señal de sensor del dedo medio	103
Figura 4.5: Señal del dedo pulgar con filtro	104
Figura 4.6: a) Medidas de flexión estándar para los dedos índice, anular y medio; b) Medidas de flexión estándar para el dedo pulgar	105
Figura 4.7: a) Medida del ángulo en dedos abiertos; b) Medida del ángulo con dedos flexionados; c) Toma de datos a través del puerto serial en la PC	106
Figura 4.8: Verificación de movimiento apertura dedos	106
Figura 4.9: Verificación de movimiento flexión dedo índice.....	107

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Fórmula para calcular la constante del resorte	60
Ecuación 2: Fórmula para calcular la fuerza del resorte.....	62
Ecuación 3: Fórmula para calcular el momento de fuerza del resorte.....	63

INTRODUCCIÓN GENERAL

En la actualidad existen procesos en donde las manos del hombre son un elemento indispensable para poder realizar actividades como el acabado de ciertos procesos, debido a la precisión y flexibilidad que éstas poseen, otras de las acciones de mayor importancia son el agarre de objetos, como una taza de café, apertura de una puerta, etc. De igual manera existen personas que por algún accidente o por una mala maniobra en sus actividades de trabajo, han perdido esta parte del cuerpo que es una de las más importantes.

Por tal motivo hoy en día existen dispositivos que ayudan a estas personas, como son las prótesis y en específico las de la mano, siendo ésta una de las más imprescindibles. Las prótesis para reemplazar extremidades son de difícil acceso para las personas que han sufrido una pérdida de este tipo, debido al costo de fabricación y más aún al precio en el mercado. Por lo que en nuestro país no existe un trabajo muy avanzado en el desarrollo de este tipo de dispositivos, lo cual hace pensar en la importancia de llevar a cabo una investigación en esta área.

En este proyecto se presenta el diseño, fabricación y evaluación de un prototipo de mano robótica que permita ayudar a las personas discapacitadas a volver a realizar sus actividades, destacando que se intenta reducir el costo de elaboración gracias a la utilización de materiales más económicos. Con esto, también se pretende que sirva como un instrumento de apoyo en el ámbito educativo, para posteriores investigaciones, sirviendo como base en el desarrollo de nuevos prototipos.

El proyecto consiste en diseñar un sistema que simule el movimiento de la mano, específicamente de los dedos, con el fin de establecer un prototipo que sirva de aporte a la comunidad. De esta manera también incentivar a otros compañeros a continuar con este tipo de investigaciones.

La construcción y el control del brazo robótico, contiene varios ítems importantes como el diseño en un sistema CAD de las diferentes piezas que conforman la mano robótica.

Posteriormente se realiza la construcción y ensamblaje de cada una de las partes diseñadas con el fin de adaptar los movimientos básicos de la mano, como son apertura y cierre de los dedos y giro de la muñeca.

Se implementa al sistema también un guante sensorizado, con el fin de simular los movimientos realizados por un usuario los que deben ser reproducidos en el brazo robótico construido. La simulación consiste en abrir y cerrar los dedos y realizar el giro de pronosupinación de la muñeca. Para la construcción de este sistema hubo una gran variedad y cantidad de materiales, de los cuales se eligieron los de mayor disponibilidad y acceso, así como los que se adaptaron de mejor manera al proyecto y los de menor costo económico.

En la actualidad se hace necesario desarrollar un sustituto que se aplique como prótesis de extremidades, en este caso de la mano. Se han llevado a cabo un gran número de investigaciones en diversas épocas, con el objetivo principal de ayudar a las personas que tienen esta discapacidad. Sin embargo, existen pocos trabajos relacionados con el diseño e implementación de prótesis de mano a nivel nacional, por lo que adquiere gran relevancia implementar una mano robótica, cumpliendo con las funciones principales, sin olvidar la apariencia antropomórfica, accediendo con ello a obtener un prototipo funcional para la manipulación de objetos.

El **objetivo general** del trabajo, consiste en construir una mano robótica implementando el control del movimiento de los dedos para lo cual se trazaron como **objetivos específicos**:

- Estudio del marco teórico relacionado con el diseño de manos robóticas.
- Determinar los parámetros necesarios para el diseño y construcción de la mano robótica

- Evaluar a través de la simulación el correcto funcionamiento de las articulaciones.
- Definir la estrategia de control adecuada.
- Comprobar el funcionamiento autónomo de la mano robótica.

Esta investigación presupone conocer la anatomía, fisiología, y mecánica del movimiento referente a la mano del ser humano, con la finalidad de obtener las bases sólidas correspondientes para establecer un diseño óptimo. Con lo que se dará inicio a plantear una metodología de diseño creativa, así como realizar los estudios cinemáticos correspondientes en un software para con ello tener un modelo tridimensional y analizando las posibles fallas que se pudieran generar, luego de aplicar las cargas generadas por los actuadores y el rozamiento de las piezas.

Estructura del trabajo:

Como último paso se elabora el informe final del trabajo de grado, que consta de cuatro capítulos. El primero trata del marco teórico, donde se mencionan antecedentes realizados en el mundo, los movimientos básicos de la mano humana, tipos de prótesis existentes y diseños de manos robóticas realizadas a lo largo de la historia, que servirá para fundamentar las bases del trabajo.

El segundo capítulo contiene el diseño y modelamiento de la mano robótica, donde se muestran los cálculos realizados y de igual manera el diseño en el programa CAD con su posterior elaboración de cada una de las piezas, con los demás materiales utilizados en el proyecto.

El capítulo tres consta de la implementación de la estrategia de control, donde se describe los parámetros necesarios para la elaboración del programa para el microcontrolador y los esquemas eléctricos utilizados para el accionamiento de los actuadores que realizan los movimientos del brazo robótico.

El capítulo cuarto describe las pruebas y análisis de resultados que se realizaron a la estructura general, para la verificación del funcionamiento óptimo y adecuado de la mano robótica.

Al final del documento se mencionan las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron al finalizar el proyecto de trabajo de grado, así como los anexos que fueron necesarios para el desarrollo del trabajo.

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 INTRODUCCIÓN

Algunos de los principales problemas y dificultades a los que se enfrentan las personas que sufren algún tipo de discapacidad, son el adaptarse a las actividades diarias que se presentan en el vivir de cada uno de ellos. Esto genera malestar y conflicto para adaptarse al entorno, pues muchas empresas los discriminan y se les niega la oportunidad de trabajar.

Este es un inconveniente que afecta a muchas personas en el territorio nacional. La atención a las personas con discapacidad en el Ecuador se ha caracterizado como en los problemas sociales, por ser de baja cobertura y deficiente calidad, asentada básicamente en las acciones del sector privado y en algunas instituciones del sector público que ha asumido su responsabilidad desde hace unas dos décadas.

Según datos encontrados en la página web del gobierno nacional, las estadísticas del año 2014, muestran que existen alrededor de 205.416 personas con algún tipo de discapacidad física. La intervención del Estado, de manera más sistematizada y técnica, se da en los últimos años por iniciativa del ex vicepresidente de la nación Lenin Moreno Garcés, siendo él uno de las personas afectadas y que motivó al gobierno actual a tomar más atención a este problema social.

Se han implementado leyes y normativas para las empresas públicas, donde se hace referencia a las personas con discapacidad, incluyéndolos en el entorno físico y laboral. De esta forma el país

se ha convertido en un referente latinoamericano en políticas de inclusión social, con los altos indicadores sobre el mejoramiento de la calidad de vida de éstas personas.

Observando estas iniciativas, se plantea el desarrollo del proyecto de prototipo de una prótesis de mano robótica, con el fin de motivar a la investigación de este tipo de trabajos a todos los miembros que forman parte de nuestra comunidad universitaria, y de la misma forma contribuir a la sociedad con una idea que además fomenta el desarrollo tecnológico.

El diseño de la mano robótica trata de cumplir con las dimensiones y los movimientos principales de una mano real, así, por ejemplo, la apertura y cierre de los dedos, y giro básico de la muñeca. De igual manera se utilizan materiales de bajo costo para que sea accesible a personas que lo necesiten. Se implementará también un sistema de control apto para simular todos los movimientos de la estructura general.

1.2 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS REALIZADOS EN EL MUNDO

Los cirujanos griegos y romanos ya utilizaban la pata de palo en los siglos VII-VI a. C, pero el inventor de lo más parecido a una prótesis actual fue el médico francés Ambroise Paré (figura 1.1). Trabajó en el Ejército como cirujano a partir de 1536, el sitio ideal para probar miembros artificiales porque muchos soldados sufrían amputaciones. Enseguida consiguió reproducir las funciones naturales de brazos y manos; una de las prótesis más sencillas que desarrolló fue una mano con un asa que permitía al amputado manejar la pluma de escribir. El doctor Paré ha pasado a la historia por un miembro artificial muy parecido a algunos revolucionarios que se desarrollan hoy; sorprende que se creara hace quinientos años: la mano de hierro de dedos móviles y muñeca articulada del caballero alemán de mediados del siglo XVI (figura 1.1). A partir de la Primera Guerra Mundial, la fabricación de prótesis se disparó. En Bélgica lograron en 1930 piernas de madera para miembros amputados por

encima de la rodilla que disponían de rótulas artificiales y mecanismos que facilitaban incluso el movimiento del pie (Francisco Cañizares, 2011).



Figura 1.1: Mano artificial desarrollada

Fuente: Francisco Cañizares, 2011

Prótesis en la Edad Media

Durante la Edad Media hubo pocos avances en protésica. Fue una época oscura en el que se produjo un estancamiento en casi todas las ramas del conocimiento. Los únicos hechos destacables, fueron la pata de palo y el gancho de mano que, sin embargo, estaban solo al alcance de los adinerados. Las prótesis para el resto eran poco funcionales y estaban más pensadas para disimular heridas o deformidades que para ser realmente útiles en el día a día (El Blog de la Salud, 2013).

Las prótesis y la guerra

Por una triste paradoja es en las guerras donde más avanzan disciplinas médicas como la cirugía o la protésica. Fue a golpe de batalla en las que el número de amputados se contaba por cientos cuando las prótesis empezaron a tener diseños que permitieran mayores movimientos.

Precisamente un cirujano del ejército fue el considerado padre de la cirugía y la protésica modernas. Se trata de Ambroise Paré, cirujano de las tropas del ejército francés, a partir de 1536. Paré se convirtió en un experto en la fabricación de miembros artificiales para soldados amputados. Quizás su invento más destacado sea una mano de hierro con muñeca articulada y dedos móviles diseñada para el alemán Götz von Berlichingen (figura 1.2). El pulgar se mantenía rígido mientras que la posición del resto de dedos podía fijarse mediante una serie de ruedas mecánicas, lo que permitía al poseedor de la mano agarrar objetos como plumas o espadas (El Blog de la Salud, 2013).



Figura 1.2: La mano de Götz von Berlichingen.

Fuente: Blog de la Salud, 2013

Con el tiempo la cirugía de amputación fue haciéndose más cuidadosa. A partir del siglo XIX ya no era necesario amputar a la altura del muslo si podía evitarse y hacerlo a la altura del tobillo. Se usaron materiales más ligeros, como el aluminio, para que las prótesis fueran más manejables. Las piernas artificiales se hicieron articulables, ganando en movilidad.

Biónica: La robótica aplicada al ser humano

Con la llegada de la biónica parece que nada, en la medicina, será imposible. Los aparatos biónicos mejoran o sustituyen las funciones normales del cuerpo humano abriéndose, de este modo, un amplio abanico de posibilidades.

La historia la podemos remontar al año 300 a.C. Sobre ese año encontramos la pierna artificial más antigua conocida. Es una pierna romana, de madera y bronce. Hasta hace pocos años, las piernas artificiales sólo llenaban el espacio existente entre el muñón y el suelo.

Desde los inicios de la historia humana, las personas discapacitadas a causa de las guerras, accidentes o bien de nacimiento, han utilizado partes del cuerpo artificiales para superar su discapacidad. Hasta el siglo XVI, a todas las personas que perdían una extremidad, la herida se les cerraba con mucho dolor y simplemente se les ofrecía una pierna de madera o un gancho de metal como sustituto. El cirujano francés Ambroise Paré (1510-1590) cambió esta situación al diseñar extremidades mecánicas para ayudar a los soldados discapacitados a recuperar una vida plena, en lugar de tener que arreglárselas como podían. Ambroise Paré fue cirujano de cuatro reyes de Francia y el creador de la cirugía y la ciencia anatómica. Asimismo, fue un gran inventor que diseñó prótesis muy avanzadas respecto a las que existían en su tiempo. Su obra maestra fue una mano artificial con dedos móviles accionados con engranajes, muelles y cierres.

Desde los comienzos de Ambroise, la tecnología de las extremidades protésicas -o artificiales- ha avanzado rápidamente. Los bioingenieros no sólo han creado extremidades biónicas que funcionan perfectamente, sino que también han conseguido restaurar las funciones del oído y el corazón con implantes electrónicos. Un médico austriaco, Ferdinand Alt inventó en 1906, un audífono rudimentario. Su diseño se mejoró al añadirle amplificadores de tubo de vacío, llegando a comercializarse los audífonos portátiles en el año 1923.

Unos ingenieros biomédicos de Escocia fabricaron el primer brazo protésico robótico en 1993. Ahora, los brazos biónicos se pueden controlar con precisión, siendo posible incluso, devolver el sentido del tacto. Los brazos protésicos estándar no están conectados a los nervios, por lo que resulta difícil controlarlos y usarlos. En cambio, los brazos biónicos se pueden controlar con el propio sistema nervioso del paciente. De esta forma, los nervios que van al brazo perdido son reconducidos al pecho, donde unos electrodos conectados al brazo biónico, pueden recibir los impulsos y utilizarlos para dirigir los movimientos del brazo. La fotografía se corresponde a un brazo biónico de última generación que consta de veinte pequeños motores para dotarlo de una precisión casi humana. Controlado todo él por impulsos nerviosos y con el extra de contar con sensores táctiles. Lo que parecía ciencia ficción hace no tantos años ahora se está haciendo realidad (Susana Oubiña Falcón, 2012).

Reseña histórica de las prótesis

Desde que la humanidad existe es conocida la riqueza y la utilidad de las manos. En la antigüedad solamente se podía sobrevivir con la ayuda de las manos porque con estas se procuraban los alimentos o empuñaban las armas contra sus enemigos.

Mucho antes del comienzo de la era cristiana ya se sustituían las manos por diferentes procedimientos o artificios. La primera mano artificial, sujeta al antebrazo, fue encontrada en una momia egipcia 2000 años antes de Cristo.

En la segunda guerra Púnica (218-201 a. C.) el general romano Marcus Sergius perdió su mano derecha y se mandó a construir una de metal.

En 1501, Gotz Von Berlichingen ordenó que se le construyera una mano de hierro articulada para poder sujetar su espada, sin embargo, ésta era muy pesada y tenía que ser sujeta a la armadura. Los dedos y la muñeca de esta mano podían ser flexionados y extendidos pasivamente.

El primer brazo artificial móvil, aunque pasivamente, a nivel de codo fue construido por un cerrajero por encargo del médico militar francés Ambroise Paré. Los dedos de la prótesis podían abrirse o cerrarse presionando o haciendo tracción. Así mismo fue Ambroise Paré el que construyó la primera mano estética de cuero.

En 1818 Peter Beil, dentista de Berlín, lanzó la primera prótesis de antebrazo con dedos que podían abrirse y cerrarse mediante movimiento de tronco y del hombro contralateral. Con esta prótesis se edificó las actuales prótesis mioeléctricas autopropulsadas.

En 1844 el escultor holandés Van Petersen aplicó el sistema de Peter Beil a una prótesis de miembro superior para conseguir la flexo-extensión a nivel de codo.

En 1860, después de la guerra de Crimea, las prótesis de miembro superior experimentaron un nuevo y gran impulso gracias a los esfuerzos del conde Von Beaufort. Él aprovechaba también el hombro contra lateral como fuente de energía para los movimientos activos del codo y la mano. Von Beaufort inventó también una mano con pulgar móvil utilizando un gancho dividido sagitalmente similar a los actuales garfios Hook.

En 1856 Gripoulleau, médico francés, se dedicó a la fabricación de piezas intercambiables como ganchos, anillos, etc. Para facilitar la reincorporación de los amputados a sus antiguas ocupaciones.

Mientras tanto en Estados Unidos Dorrance desarrolló, en 1912, el famoso “Hook”, dispositivo capaz de abrir activamente por medio de movimientos de la cintura escapular y que se cierra pasivamente por la acción de un tirante de goma.

Casi simultáneamente se construyeron en Alemania el gancho de Fischer, que ofrecía como ventaja principal: el poseer una mayor potencia y diversidad en los tipos de prensión y sujeción de los objetos.

En 1917, F. F. Simpson fundó la “American Limb Makers Association”, en la que se unieron todos los fabricantes del ramo, existentes por aquel entonces en los Estados Unidos. Los materiales utilizados en la construcción de las prótesis comenzaron a partir de entonces a ser más ligeros, dúctiles y aparecieron entre otras las aleaciones de aluminio, las fibras sintéticas y los plásticos.

Tras la primera guerra mundial, todos los países se unieron en un esfuerzo común dirigido a la mejor rehabilitación del inválido. Las manos diseñadas entonces eran intercambiables según las diferentes ocupaciones (Alejandro Pedroza Meléndez, 2008).

Diseño de prótesis en el siglo XXI

El origen de las prótesis activadas por los músculos del muñón se da en Alemania gracias a Ferdinand Sauerbruch, el cual logra crear un mecanismo que permita flexionar las manos y asemejar un poco más a la mano real, mediante varillas de marfil que hacía pasar a través de túneles cutáneos, haciendo posible que la prótesis se moviera de forma activa debido a la contracción muscular. Es hasta 1946 cuando se crean sistemas de propulsión asistida, dando origen a las prótesis neumáticas y eléctricas.

Un sistema de propulsión asistida es aquel en el que el movimiento es activado por algún agente externo al cuerpo. Las prótesis con mando mioeléctrico, comienzan a surgir en el año de 1960 en Rusia. Esta opción protésica funciona con pequeños potenciales extraídos durante la contracción de las masas musculares del muñón, siendo estos conducidos y amplificados para obtener el movimiento de la misma. En sus inicios, este tipo de prótesis solo era colocada para amputados de antebrazo, logrando una fuerza prensora de dos kilos.

Actualmente la mayoría de funciones de las prótesis de mano están limitadas al cierre y apertura de la pinza, la diferencia entre éstas radica en el tipo de control que emplean, pero todas realizan básicamente las mismas actividades. Los países con mayor avance tecnológico e investigación sobre prótesis son Alemania, Estados Unidos, Francia e Inglaterra. Una mano biónica totalmente funcional (Figura 1.3), controlada con la mente y músculos del paciente al cual se le ha sido implantada, ha sido puesta en el mercado y ha contado con una muy buena aceptación debido a su alta eficiencia al momento de interactuar con el paciente. Este nuevo diseño conocido como I-Limb, fue inventado por el investigador escocés David Gow, pero diseñado y fabricado por la empresa Touch Bionics. La mano funciona con un sistema de control intuitivo que recoge las señales eléctricas que generan los músculos del miembro residual del paciente. Estas señales, llamadas mioeléctricas, son recogidas por electrodos que se colocan en la superficie de la piel y posteriormente son procesadas para que la mano se mueva (Francisco Javier Ortiz, 2013).



Figura 1.3: Prótesis biónica I-Limb

Fuente: Advanced Arm Dynamics, Inc., 2002

1.3 CARACTERÍSTICAS DE LA MANO HUMANA

Se puede entender que la mano humana es la extremidad superior más distal del miembro superior adaptadas esencialmente para facilitar los movimientos junto con los músculos y ligamentos insertados en los huesos. (Morfología de manos y pies, McGraw Hill, 2013.)

La mano se compone por 27 huesos distribuidos en 3 zonas (figura 1.4):



Figura 1.4: Huesos de la mano humana

Fuente: Tomás Bruzos, 2002

1.4 MORFOLOGÍA Y ANATOMÍA DE LOS DEDOS

La mano del hombre es una herramienta maravillosa, capaz de ejecutar innumerables acciones gracias a su función principal: la presión. La cual solo en el hombre tiene tal grado de perfección. Esto se debe a la disposición tan particular del pulgar, que se puede oponer a todos los demás dedos.

Desde el punto de vista fisiológico, la mano representa la extremidad efectora del miembro superior que constituye su soporte logístico y le permite adoptar la posición más favorable para una acción determinada. Sin embargo, la mano no es solo un órgano de ejecución, también es un receptor sensorial extremadamente sensible y preciso cuyos datos son imprescindibles para su propia acción (figura 1.5).

Y más que el pulgar pueda oponerse, lo relevante es la pareja mano-cerebro; el cerebro dirige a la mano, pero también la mano ha modificado el cerebro a través de sus experiencias mediante el tacto (A. I. Kapandji, Fisionomía Articular, 2006).



Figura 1.5: Arquitectura de la mano

Fuente: Bayard Presse, 2015

1.5 LA FACULTAD DE PRENSIÓN DE LA MANO

Esta facultad, la mano del hombre la debe a su arquitectura que le permite tanto una amplia apertura, como un cierre sobre si misma o en torno a un objeto.

Cuando está ampliamente abierta, la mano, en vista anterior, presenta su palma, continuación de la muñeca y articulada con los cinco dedos. En el centro, la palma esta hueca, lo que le permite alojar objetos más o menos voluminosos.

Cuando la mano se prepara para coger un objeto, los dedos disminuyen desde el dedo índice al dedo meñique (figura 1.6), mientras que el pulgar se extiende y se separa en abducción, gracias a la profundidad de su comisura.



Figura 1.6: Movimiento de los dedos en el cierre de la mano

Fuente: Bayard Presse, 2015

Los cinco dedos no tienen la misma relevancia en la utilización de la mano (figura1.7), que comporta tres partes: la zona del pulgar; la zona de las pinzas, compuesta por el dedo medio y principalmente el dedo índice; y la zona de los alcances, borde cubital de la mano, con los dedos anular y meñique (A. I. Kapandji, Fisionomía Articular, 2006).

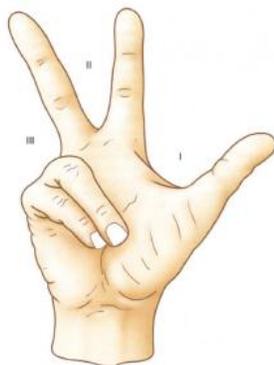


Figura 1.7: Zona de pinzas

Fuente: A. I. Kapandji, 2006

1.6 LOS TENDONES DE LOS MÚSCULOS FLEXORES DE LOS DEDOS

Los músculos flexores de los dedos, muy potentes y por lo tanto voluminosos, se localizan en el compartimiento anterior del antebrazo.

El tendón más superficial, el del músculo flexor superficial de los dedos se inserta en la segunda falange, es decir proximal a la inserción del tendón del músculo flexor profundo de los dedos.

Los tendones del músculo extensor de los dedos que convergen en la cara dorsal de la muñeca, están extremadamente solicitados hacia dentro hacia el borde cubital, debido al ángulo de distracción formado entre el metacarpiano y la primera falange, más acentuado en el caso del dedo índice y el dedo medio (figura 1.8).

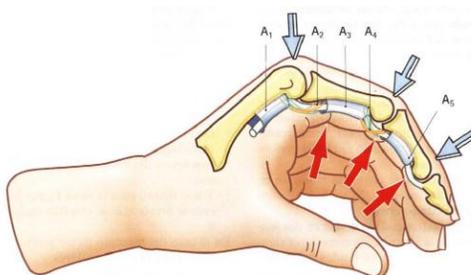


Figura 1.8: Posición de los tendones

Fuente: A. I. Kapandji, 2006

De esta forma, cuando el tendón se contrae al mismo tiempo que los músculos flexores, se produce el movimiento de encogimiento del dedo (figura 1.9). Esto si falange a falange debido a que cada uno de los músculos y tendones ubicados en los dedos, está encargado de cada una de ellas respectivamente (A. I. Kapandji, Fisionomía Articular, 2006).

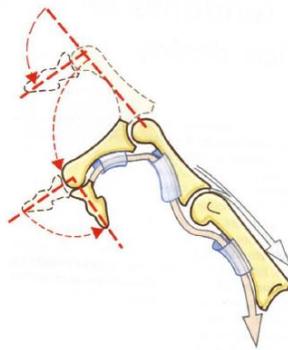


Figura 1.9: Contracción de los dedos

Fuente: A. I. Kapandji, 2006

1.7 LAS ARTICULACIONES INTERFALÁNGICAS

Las articulaciones interfalángicas son del tipo troclear¹, poseen un sólo grado de libertad. La cabeza de la falange tiene la forma de una polea y por lo tanto un solo eje transversal, en torno al cual se produce el movimiento de flexo extensión.

Por las mismas razones mecánicas que las articulaciones metacarpo falángicas, existe un fibrocartílagο glenoideo², que en la flexión desliza sobre la cara anterior de la falange proximal. En una visión lateral (figura 1.10), se puede distinguir, además de los ligamentos laterales, las

¹ **Troclear:** La palabra tróclea designa al extremo de un hueso o articulación con otro en forma de polea, que permite que el hueso adyacente pueda girar en el mismo plano.

² **Glenoideo:** Cavidad donde rota una articulación esférica.

expansiones del tendón extensor y los ligamentos falangoglenoideos (A. I. Kapandji, Fisionomía Articular, 2006).



Figura 1. 10: Articulaciones interfalángicas

Fuente: A. I. Kapandji, 2006

1.8 EL PULGAR

El pulgar ocupa una posición y desempeña una función aparte en la mano, puesto que es indispensable para realizar las pinzas pulgo-digitales con cada uno de los restantes dedos, y en particular con el dedo índice, y también para la constitución de una presa de fuerza con los otros cuatro dedos. También puede participar en acciones asociadas a las presas que conciernen a la propia mano. Sin el pulgar, la mano pierde la mayor parte de sus posibilidades.

El pulgar debe esta función eminente, por una parte, a su localización por delante tanto de la palma de la mano como de los otros dedos (figura 1.11) que le permite, en el movimiento de oposición, dirigirse hacia los otros dedos, de forma aislada o global, o separarse por el movimiento de contraoposición. Por otra parte, debe su función a la gran flexibilidad funcional que le proporciona la organización tan peculiar de su columna articular y de sus motores musculares (A. I. Kapandji, Fisionomía Articular, 2006).

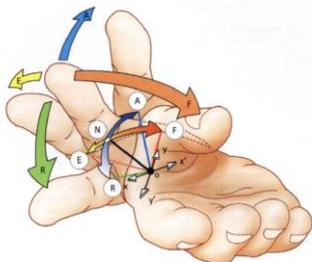


Figura 1. 11: Movimiento del pulgar

Fuente: A. I. Kapandji, 2006

1.8.1 La oposición del pulgar

La oposición del pulgar es la facultad para desplazar la yema del pulgar para contactar con él las yemas del resto de los cuatro dedos (figura 1.12) para realizar lo que se ha venido a considerar la pinza pulgo-digital; este movimiento representa lo esencial del valor funcional de la mano, su pérdida conlleva la práctica inutilidad de la mano, hasta el punto de que se realizan complejas intervenciones quirúrgicas con el objetivo de restaurar la citada pinza partiendo de los elementos restantes (A. I. Kapandji, Fisionomía Articular, 2006).



Figura 1.12: Oposición del pulgar a los demás dedos

Fuente: A. I. Kapandji, 2006

1.9 PRÓTESIS

Una prótesis es una herramienta que se utiliza para que una persona compense la pérdida de una parte de su cuerpo. Por ejemplo, luego de la amputación de una pierna, se puede colocar una pierna artificial, más conocida como prótesis. Esto permitirá que la persona pueda caminar.

La prótesis tiene como función principal, la de reemplazar un miembro del cuerpo, ejecutando casi la misma función que el miembro natural, ya sea parte o la totalidad de una extremidad superior o inferior (American Orthopaedic Foot & Ankle Society, 2016).

1.9.1 Prótesis de mano

Las amputaciones en miembros superiores, en particular las producidas por debajo del codo, resultan en una importante pérdida de funcionalidad en las personas afectadas. Las prótesis tradicionales de gancho y accionadas mediante movimientos del hombro, que han sustituido de manera más o menos satisfactoria la mano perdida en muchos amputados, están dejando paso gradualmente a otras soluciones más perfeccionadas: las prótesis mioeléctricas.

Existen en la actualidad diversos tipos de prótesis mioeléctricas de mano con prestaciones dispares (figura 1.13), desde las que únicamente realizan el movimiento de pinza para agarrar objetos, hasta las que rotan la muñeca y transmiten sensaciones relacionadas con frío o calor y con la presión ejercida. En todo caso, las prótesis mioeléctricas son muy caras y gran parte de los amputados no resultan buenos candidatos para ser usuarios de dichas prótesis



Figura 1.13: Prótesis de mano

Referencia: Orange Horizons Latina, 2015

1.9.2 Prótesis de mano en la actualidad

A pesar de que vemos cada día como se adaptan las prótesis a las situaciones de las personas que lo necesitan y los increíbles avances tecnológicos en el campo de la salud, seguimos viendo que la funcionalidad de las prótesis para miembros amputados sigue siendo muy limitada. Para que un miembro externo disponga de la fuerza suficiente para ser completamente operativo y nos proporcione una confianza total, necesitaremos avanzar hacia un escenario en el que se conecte la prótesis al cuerpo de una forma que no sea percibido como un elemento extraño. Un escenario que está por venir y por el que, a su espera, las personas que lo necesitan siguen dependiendo de sus cuidadores para realizar algunas tareas.

Investigadores del Hospital ortopédico nacional en Reino Unido han creado un implante que lo logra a través de un interfaz que une la prótesis con el endo esqueleto.

Con la técnica conocida como osteo-integración varios investigadores han implantado titanio en el hueso del brazo. Una vez el titanio logra permanecer en el cuerpo, está hecho el trabajo de base para lograr musculación e inervación de forma que pueda conseguirse el control motor de la prótesis de forma voluntaria. Con avances como este estamos cerca de ser biónicos como en el cine de ciencia ficción.

Actualmente, se ha podido demostrar que los materiales de construcción disponibles no son el factor limitante. Podemos observar como se ha logrado una prótesis flexible capaz de absorber fuerzas tan importantes como las que se derivan de una actividad deportiva olímpica. A pesar de ello entendemos que no es el implante ideal para la vida cotidiana de una persona amputada.

Las prótesis implantadas de piernas en los ensayos de los investigadores del Royal National, llamadas Prótesis Intraoseas Transcutáneas, para amputados. Han requerido la disección de parte del hueso de la pierna para acceder a un tejido blando y poroso que permite que crezca tejido alrededor de la inserción con la prótesis de modo que la estabiliza y la integra como una parte inseparable del propio cuerpo.

Los investigadores están demostrando con esta metodología que mimetizando los implantes logran mantener alejadas a las infecciones y el rechazo de las prótesis como elementos extraños al cuerpo se minimiza. (Juanjo Torres, 2016)

En un futuro no muy lejano, los robots podrán facilitarnos nuestro día a día, aunque para la realización de ciertas tareas deberán estar dotados de manos extraordinariamente desarrolladas, con un nivel elevado de destreza, fuerza y sensibilidad.

Uno de los equipos de científicos especializados en este campo, pertenecientes al Centro Científico E. Piaggio de la Universidad de Pisa y el Instituto Italiano de Tecnología de Génova, está trabajando en el diseño y desarrollo de mano robótica que revolucionará el ámbito de las prótesis inteligentes.

De construcción sencilla y sólida y con un precio considerablemente inferior a cualquier otra mano robótica, esta prótesis es capaz de reproducir casi todos los movimientos naturales de una

mano natural. La mayoría de las acciones relacionadas con el acto de agarrar se basan en objetos detenidos o fijos.

Es sólida, dócil y capaz de coger casi todo tipo de objetos mediante un único motor y su precio es de unos pocos cientos de dólares. Gracias a su sencillez y enorme versatilidad puede utilizarse fácilmente como mano robótica y como prótesis. Sus dedos son capaces de soportar un abuso físico considerable en forma, por ejemplo, de golpes y desarticulaciones.

Esta unión de rendimiento, solidez y asequibilidad, apuntó Antonio Bicchi, coordinador del Grupo de Investigación Robótica del Centro Científico E. Piaggio y científico sénior del Instituto Italiano de Tecnología, se ha logrado gracias a un diseño revolucionario.

“Las falanges cuentan con dos pares de cilindros adyacentes que simulan las articulaciones humanas”, explica. “Los dedos están conectados por articulaciones elásticas sin elementos de conexión mecánica del tipo de tuercas y tornillos que confieren una estructura elástica y sencilla a la mano”. (Centro Científico E. Piaggio, 2014)

1.9.3 Materiales en las prótesis

Los materiales de las prótesis deben ser analizados a fondo, ya que influirán en la resistencia y el peso de la estructura completa. Se debe tomar en cuenta que ningún material o componente es el mejor para todas las personas. Todo ser humano debe ser evaluado considerando su estilo de vida y características físicas. El protésico debe estar informado acerca de cómo trabajar con materiales tradicionales como madera, acero y cuero, así como también materiales de tipo espacial como titanio, fibra de carbón, y plásticos.

Los materiales más utilizados para prótesis, se presentan a continuación:

- **Polímeros naturales y mezclas de polímeros**

El uso de polímeros naturales sigue siendo una importante área de investigación, a pesar del gran desarrollo producido durante los últimos años en el campo de los polímeros biocompatibles y biodegradables de origen sintético. La ventaja de los polímeros de origen natural es que son más compatibles con el medio ambiente y se obtienen fácilmente y no son demasiados caros, además son fácilmente modificables químicamente. Se suele hacer una clasificación de estos polímeros basada en su estructura química:

- Polímeros de tipo proteínico: colágeno, gelatina, glicoproteína
- Polímeros de tipo carbohidrato: almidón, dextrina, quitina y ácido hialurónico.

La mayor parte de ellos pueden ser fabricados en forma de discos, films o microesferas, pero también se pueden unir covalentemente a fármacos.

En muchas ocasiones se emplean mezclas de polímeros. La mezcla puede ser compatible o incompatible, dependiendo de que, en el ámbito molecular, la distribución de ambos polímeros sea o no homogénea, produciéndose en este último caso, separación de fases. La mezcla resultante tiene unas características físicas diferentes de los polímeros originales, además estas propiedades se pueden modificar alterando la composición de la mezcla. Así, por ejemplo, se han estudiado mezclas de ácido polihidroxi-butírico con polianhídrido sebácico (PSA), observándose una liberación constante de fármaco durante un período comprendido entre dos semanas y varios meses. La velocidad de liberación aumenta con el contenido en PSA. Este hecho está relacionado con la mayor velocidad de degradación del PSA.

Las ventajas de estos sistemas son las siguientes: por una parte, se pueden mejorar las propiedades físicas y mecánicas del sistema, por otra parte, se pueden diseñar dispositivos cuya velocidad de liberación se mayor o menor sin más que alterar la composición.

- Metales comúnmente utilizados

En prótesis, los componentes metálicos suelen ser aquéllos fabricados por uno de los muchos distribuidores de componentes protésicos. Pueden ser rodillas, pilones, tobillos y rotadores, por nombrar algunos. Se pueden encontrar ejemplos de aluminio, acero inoxidable y titanio de estos componentes.

Aluminio: En general, se considera como una alternativa más liviana que el acero. No es tan duro, pero dependiendo de la aplicación, es lo suficientemente resistente como para cumplir los requisitos de diseño y superar las pruebas necesarias.

Acero: Éste es sin duda resistente, pero también relativamente pesado. Puesto que el acero es duro, se puede usar para fabricar pequeños componentes que pueden valerse más de la resistencia del material que de la geometría del diseño. Al principio, las pequeñas unidades de rodilla que se usaban para las prótesis se hacían de acero. Aunque el material es bastante pesado, se necesita muy poco para elaborar estas rodillas.

Titanio: Es una alternativa resistente y liviana. La desventaja es su elevado precio. Muchos de los componentes endoesqueléticos inicialmente diseñados de acero están ahora disponibles en titanio. Se deben tener en cuenta todas las ventajas y desventajas al escoger los componentes protésicos. Si no se eligen adecuadamente, los materiales más costosos, resistentes y livianos pueden no proporcionar ninguna ventaja discernible en comparación con las opciones menos exóticas (Escuela de Ingenierías Industriales – UVA, 2005).

- **Los Materiales Inteligentes.**

Hoy en día, el término “inteligente” se ha adoptado como un modo válido de calificar y describir una clase de materiales que presentan la capacidad de cambiar sus propiedades físicas (rigidez, viscosidad, forma, color, etc.) en presencia de un estímulo concreto.

Las principales características de este tipo de materiales son: de manera intrínseca presentan sensores de reconocimiento y medida de la intensidad del estímulo ante el que reaccionará el material. A su vez presentan “actuadores” intrínsecos, que responden ante dicho estímulo. Para controlar la respuesta de una forma predeterminada presentan mecanismos de control y selección de la respuesta. El tiempo de respuesta es corto. El sistema comienza a regresar a su estado original tan pronto como el estímulo cesa.

Entre estos materiales inteligentes, podemos hablar de los materiales con memoria de forma, el efecto de memoria de forma puede describirse como la capacidad de un material para cambiar la forma debido a la aplicación de un estímulo externo. Y dentro de estos, tenemos los polímeros con memoria de forma. El efecto está relacionado con la combinación de la estructura y la morfología del polímero junto con el proceso y tecnología de programación de inclusión de la forma empleado (Escuela de Ingenierías Industriales – UVA, 2005).

- **Nuevos Polímeros en Prótesis Fija**

Durante los últimos años, han aparecido como alternativa a la cerámica unos materiales con una composición básica similar a las clásicas resinas compuestas, es decir, una matriz orgánica y un relleno inorgánico. Algunos fabricantes los denominan cerómeros, como si fuera un material híbrido de cerámica y resina compuesta, mientras que otros los denominan poliglass o polividrio, compuestos de segunda generación, o nuevos polímeros.

Son ejemplos de estos nuevos materiales los sistemas Artglass (Heraeus Kulzer), Belleglass HP (Kerr) y Targis-Vectris (Ivoclar-Vivadent), etc. No existen estudios a largo plazo sobre estos materiales y su comportamiento clínico (Escuela de Ingenierías Industriales – UVA, 2005).

Fibra de Carbono: Es el desarrollo más reciente en el campo de los materiales compuestos siguiendo la idea de que uniendo fibras sintéticas con varias resinas, se pueden lograr materiales de baja densidad, muy resistentes y duraderos.

La fibra de carbono se desarrolló inicialmente para la industria espacial, pero ahora, al bajar de precio, se ha extendido a otros campos: la industria del transporte, aeronáutica, al deporte de alta competición y últimamente la encontramos hasta en carteras de bolsillo y relojes.

En la actualidad se la ha empleado para el desarrollo de prótesis de extremidades, debido a sus características relevantes, como: su resistencia, que es casi 3 veces superior a la del acero, y su densidad es 4,5 veces menor. En cuanto a módulo de elasticidad hay una amplia gama desde 240 hasta 400. Otras propiedades muy apreciables en la fibra de carbono son la resistencia a la corrosión, al fuego e inercia química y la conductividad eléctrica. Y ante variaciones de temperatura conserva su forma (Pascual Bolufer, 2015).

1.9.4 Tipos de prótesis de miembro superior

Desarticulado de muñeca y transradial

Las prótesis de desarticulado de muñeca están indicadas para pacientes que presenten amputación traumática o malformación congénita, exactamente en la articulación de la muñeca conservando los cóndilos del radio y cubito,

Esta prótesis se une a una mano mecánica y garfio ortopédico, el cual servirá para agarrar objetos. Las prótesis transradiales están indicadas para pacientes que hayan sufrido algún tipo de amputación por trauma o, en su defecto para pacientes que requieran su uso por sufrir de algún tipo de malformación congénita por debajo de la articulación del codo (Félix Gamarra Chávarry, 2005).

Los materiales utilizados en este tipo de prótesis son polipropileno color piel, resinas con fibras de alta tecnología las que se usan para disminuir el peso de la prótesis; y son similares para ambos casos, se puede observar en la figura 1.14.



Figura 1.14: Prótesis desarticulado de muñeca y transradial: 1) Mioeléctrica; 2) Mecánica; 3) Pasiva

Fuente: Julio Cesar Fuentes, 2005

Prótesis para desarticulado de codo y por encima de codo

Las prótesis de desarticulado de codo (figura 1.18) están indicadas para pacientes que hayan sufrido algún tipo de amputación traumática a nivel del cóndilo humeral o, en su defecto, para pacientes requieran su uso por sufrir de algún tipo de malformación congénita a ese nivel.

Asimismo, existen dispositivos que actúan como articulación de codo que permiten elevar el antebrazo a diferentes niveles.

Las prótesis arriba de codo (figura 1.15) están adaptadas para tipo de amputación traumática al nivel proximal medio o distal del humero.

Los componentes para este tipo de prótesis los encontramos desde los que son movidos por tracción de cables y también los que son activados por el principio mioeléctrico (Félix Gamarra Chávarry, 2005).



Figura 1.15: Prótesis de desarticulado de codo y por encima de codo: Mioeléctrica

Fuente: Julio Cesar Fuentes, 2005

1.9.5 Tipos de prótesis por el funcionamiento que poseen

- Pasivas

El objetivo es recuperar la imagen corporal. Es importante por:

- Motivo estético: simetría corporal (peso de la prótesis).
- Reinstauración del centro de gravedad: en niños evita la aparición de actitudes viciosas, como escoliosis o tortícolis.
- Función reguladora sobre los miembros inferiores, mediante el braceo.

Permite protetizar todos los niveles y amputaciones congénitas. Se coloca cuando no es posible la aplicación de una prótesis funcional, ver figura 1.16 (Julio Cesar Fuentes, 2005).



Figura 1.16: Prótesis Pasiva

Fuente: Carlos Arce, 2005

- Mecánicas

Se llaman así porque son impulsadas por tracción, y tiene su propia fuerza. Utilizan las contracciones producidas por el miembro contralateral, la escápula y el cuello.

Se controla mediante un sistema de cables de tracción en torno a una cincha escapular. Se acciona por el movimiento del muñón del brazo y de la escápula, por medio de 2 o 3 tirantes (figura 1.17). Es la única alternativa funcional a las prótesis mioeléctricas, cuando éstas no se pueden usar.



Figura 1.17: Prótesis mecánica

Fuente: Carlos Arce, 2005

- Mioeléctricas:

Utilizan el potencial eléctrico que los músculos generan con su contracción (figura 1.18).

Poseen electrodos de captación dentro del encaje, en contacto con los músculos implicados:

- Antebrazo: flexores y extensores de la mano.
- Brazo: bíceps y tríceps.
- Hombro: pectoral mayor, trapecio y deltoides.

La señal obtenida se amplifica con un sistema electrónico. Aprovechan la movilidad de los dedos residuales y el acromion, que accionan micro interruptores.

Se utilizan en malformaciones congénitas, como focomelia y amelia.

La alimentación del sistema se consigue mediante acumuladores recargables internos o externos.



Figura 1.18: Prótesis Mioeléctrica

Fuente: Enrique Sanz, 2013

1.10 DISEÑOS DE MANOS ROBÓTICAS

Desde años anteriores se vienen realizando proyectos de investigación, en varias del mundo para mejorar este tipo de trabajos, que ayudan enormemente al avance tecnológico y social. Todo

proyecto se realiza con el objetivo de figurar lo más exactamente posible el movimiento y destreza de las manos.

A continuación, se muestran cronológicamente algunos ejemplos de investigaciones realizadas a nivel mundial:

MANO BELGRADE/USC

Este modelo de mano robótica fue desarrollado en 1969 por la Universidad del Sur de California y por la Universidad NoviSad de Belgrado. Consiste en una mano conformada por cuatro dedos, de tres articulaciones de un grado de libertad, cada uno. Es accionada por dos motores, es decir que cada uno mueve un par de los dedos mencionados, y cada uno de ellos contiene un encoder, así como 23 sensores de presión distribuidos en toda la mano, figura 1.19 (G. A. Bekey, R. Tomovic, and I. Zeljkovic. 1990).

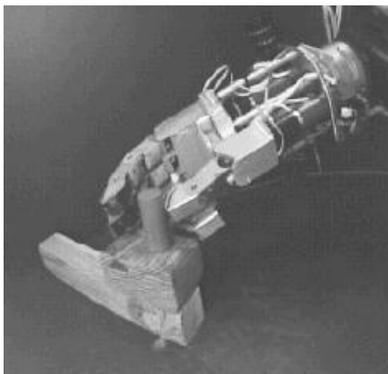


Figura 1.19: Mano Belgrade/USC

Fuente: G. A. Bekey, R. Tomovic, and I. Zeljkovic. 1990.

MANO STANFORD/JPL

Desarrollada por Jet Propulsion Laboratory en 1981, presenta dos dedos y un pulgar oponente, cada uno de ellos con tres grados de libertad. La mano es actuada por 12 servomotores DC y sus

articulaciones son impulsadas por cuatro cables de acero flexible recubiertos de teflón que se salen desde cada motor a cada uno de los tres dedos. La estructura es bastante básica y los cables flexibles utilizados, son de limitada confiabilidad y transmisión de potencia. El sistema usado en los cables, está basado en sensores de fuerza que aseguran un control exacto de fuerza en los dedos, figura 1.20 (M. T. Mason and J. K. Salisbury, 1985).



Figura 1.20: Mano Stanford/JPL

Fuente: M. T. Mason and J. K. Salisbury, 1985.

MANO UTAH/MIT DEXTROUS

Propuesta por un grupo de investigación en agarre y manipulación de dedos en 1982, posee cuatro grados de libertad en cada uno de sus cuatro dedos incluyendo el pulgar. La construcción de la mano robótica es antropomórfica aun cuando el dedo pulgar permanece fijo en su posición. El sistema se ejecuta a través de un grupo de cables que funcionan como tendones y son accionados por un sistema de 32 cilindros independientes poliméricos y neumáticos. Además, posee sensores de fuerza y sensores de rotación acoplados en las articulaciones de los dedos, que emiten el ángulo que efectúan cada una de ellas. En la figura se muestra una imagen como referencia del modelo mencionado, figura 1.21 (Laboratorio de robotique de l'Université Laval, 1982).

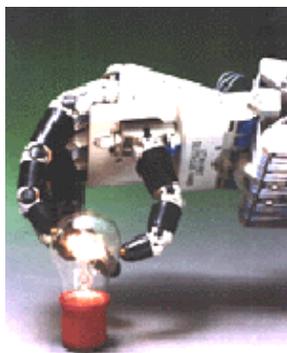


Figura 1.21: Mano Utah/Mit Dextrous

Fuente: Laboratorio de robotique de l'Université Laval, 1982

MANO ROBOT MATSUOKA

Este modelo de mano robótica fue construido en el laboratorio de Inteligencia Artificial de MIT en 1995. En este diseño todos los dedos están compuestos de dos falanges y dos juntas articuladas, las cuales son dirigidas por un sistema de cables, poleas y motores, proporcionando dos grados de libertad y un par equivalente a 0.22 Kg en las yemas de los dedos. La precisión y fuerza que generan estos dedos no son apreciables, ya que el propósito principal de esta mano es la simulación de movimientos para manipulación, figura 1.22 (Wired Science, 1995).



Figura 1.22: Mano robot Matsuoka

Fuente: Robert Greene, 2012

MANO ROBONAUT

Fue diseñada en 1999, la mano Robonaut está conformada por 5 dedos que en total proporcionan 12 grados de libertad a la mano y dos grados de libertad en la muñeca, Cada dedo es controlado por un eje flexible de acero inoxidable, que mueve las articulaciones, acoplado a un motor de corriente continua sin escobillas ubicado en el antebrazo, transmitiendo toda la potencia necesaria. Por otra parte, esta provista con 43 sensores de posición, encoders, celdas de carga y táctiles de fuerza respectivamente, cada sensor provee la retroalimentación necesaria para maximizar el control, figura 1.23 (Ron Diftler, 2010).

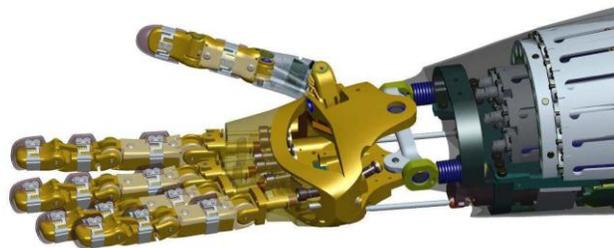


Figura 1.23: Mano Robonaut

Fuente: Ron Diftler, 2010

MANO DLR

Creada en el año 2000, esta es una mano multisensor, viene articulada con cuatro dedos y su control se da a través de un guante de datos. Su funcionamiento es posible por actuadores lineales constituidos en la palma y en la falange proximal para permitir la manipulación de las articulaciones de los dedos. Todos los dedos tienen en la base una articulación de dos grados de libertad, un nudillo de un grado de libertad 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 un medidor de fuerza basado en sensores de

par, sensores ópticos de posición de las articulaciones y sensores táctiles, figura 1.24 (J. Butterfass M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger, 2001).

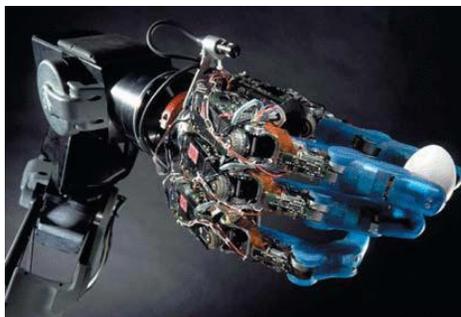


Figura 1.24: Mano DLR

Fuente: J. Butterfass M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger, 2001

MANO LIMB HAND

Este modelo es una prótesis biónica, y ha logrado ser la más vendida a nivel comercial. La primera versión apareció en 2003 y la última se estrenó en 2009, contiene cinco dedos con dos grados de libertad cada uno, accionados por mototransmisión. La principal novedad de este modelo, es el sistema de sensores mioelectrónico que funciona a través de dos electrodos que reciben hasta el más mínimo impulso del muñón de la persona que la utiliza. Todas las señales son procedentes de los músculos y son amplificadas para ser reconocidas. En la figura se muestran los movimientos que puede realizar ésta mano robótica, figura 1.25 (Touch Bionics, 2005).



Figura 1.25: Mano I-Limb Hand

Fuente: Touch Bionics, 2005.

MANO SHADOW DEXTEROUS C6M

Es la mano robótica avanzada que más semejante a la mano humana en la actualidad. Fue desarrollada por la compañía Robot Shadow y sirve como aporte relativo para las investigaciones del proyecto Handle. Todos sus dedos alcanzan los 24 grados de libertad, y representan lealmente cada movimiento y la forma de una mano real. Está accionada por 20 motores de corriente continua para mover cada una de las articulaciones que contienen un sistema de engranajes y cables tensores cumpliendo la función de tendones que mueven cada dedo en ambos sentidos. Cada motor funciona con un sensor de fuerza y un sensor de giro de efecto hall. Todas las medidas son enviadas a través de CAN bus a un PC para poder realizar el control del sistema, figura 1.26 (Burgos, C. Q., & Albán, O. A. V, 2010).



Figura 1.26: Mano Shadow Dexterous C6M

Fuente: Kinetica Artfair, 2011

1.11 MECANISMOS UTILIZADOS EN DEDOS DE MANOS ROBOTICAS

Para la transmisión de movimiento en las articulaciones de los dedos de manos robóticas y en algunas prótesis de mano, habitualmente se utilizan mecanismos que permitan la flexión o la tensión de las falanges en los dedos. Tomando en cuenta que un mecanismo, es un elemento que

transforma un movimiento y una fuerza de entrada en otra de salida. Entre estos mecanismos están la transmisión por poleas, la transmisión por barras y motores instalados en cada articulación.

1.11.1 Transmisión por poleas

En la transmisión por poleas, también conocido como sistemas de tendones, es el mecanismo mayormente utilizado en manos robóticas. En este sistema, las cuerdas de transmisión deben ir unidas en un punto fijo a las respectivas poleas, para así evitar deslizamientos y lograr que el movimiento se transmita. En la figura 1.27 se observa un esquema que permite observar el funcionamiento de este mecanismo y una aplicación de este tipo de transmisión en un dedo mecánico. La ventaja de este sistema de transmisión radica en la reducción del peso de la mano, además de que es fácil de implementar. El mecanismo funciona de la siguiente manera, cuando el eje de una máquina motriz (motor) gira, una polea que se encuentra enchavetada, atornillada o soldada, al mismo, también gira a la misma velocidad de rotación, y la velocidad tangencial en la periferia de la polea dependerá del radio de la misma. Esta polea puede transmitir, por fricción o a través de una correa o cuerda, su movimiento al eje de otro mecanismo receptor del movimiento (Montes, J. D., & González, J. D, 2009).

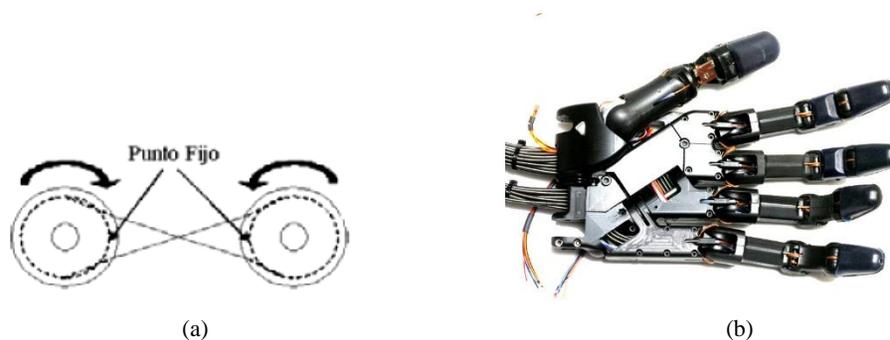


Figura 1.27: a) Mecanismo de transmisión por poleas; b) Mano Shadow Dextrous utilizando el mecanismo

Fuente: Shadow Project, 2009

1.11.2 Mecanismo de barras

Este tipo de mecanismo es muy utilizado para construir prótesis robóticas, consiste en la transmisión de movimientos a las falanges instalando barras conectadas a los mismos en una configuración adecuada, con este mecanismo se elimina el empleo de motores para dar movimiento a las articulaciones, aunque también se pueden adaptarlos y es fácil de manufacturar. En la figura 1.28 se muestra un mecanismo de barras sencillo de implementar pero que limita los movimientos, ya que la flexión se produce al tiempo en las 3 articulaciones (Montes, J. D., & González, J. D, 2009).

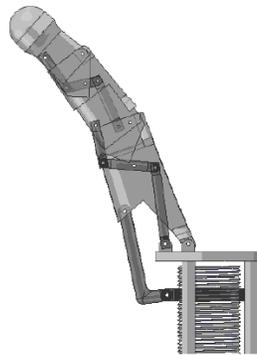


Figura 1.28: Mecanismo de barras rígidas en dedo mecánico

Fuente: Scientific Electronic Library Online, 2012

1.11.3 Mecanismo con motor en cada junta

En la actualidad es muy utilizado en las manos de robots. Consiste en ubicar motores pequeños o micromotores en cada una de las articulaciones rotacionales de una cadena cinemática, pero que conlleva a aumentar costos por el número de motores que se debe utilizar y además de incrementar el peso del mecanismo. Existen algunas variantes de este tipo de mecanismos: el primero en el cual las articulaciones son movidas a través de motores y un juego de engranajes que se encuentran

en las falanges de los dedos. El segundo donde todos los actuadores se integran en la base del dedo y desde aquí se mueve el cuerpo del dedo. Y el último que tiene un motor por dedo que mueve las dos articulaciones activas de cada uno de estos. En la figura 1.29 se muestra un dedo utilizando este sistema, donde se utiliza un micromotor para cada articulación de las falanges y un sistema de engrane para la ejecución del movimiento (Montes, J. D., & González, J. D, 2009).



Figura 1.29: Mano robótica con micromotores en cada articulación de los dedos

Referencia: Quinayás-Burgos, C. A., Muñoz-Añasco, M., 2009

1.12 DISPOSITIVOS UTILIZADOS EN MANOS ROBOTICAS

Para la construcción de estos prototipos, se utilizan una serie de elementos básicos y principales para poder realizar el control de movimiento y cada uno de los accionamientos requeridos. Estos elementos son microcontroladores, actuadores como motores o servomotores en nuestro caso, sensores como los de flexión y baterías para la fuente de energía.

A continuación, se detalla la información primordial de cada uno de estos dispositivos.

1.12.1 Microcontroladores

Explicado mediante términos sencillos, podemos definir a un microcontrolador como un circuito integrado (chip) que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora: CPU, memoria y unidades de E/S, es decir, se trata de una computadora completa en un solo circuito integrado. Su característica principal es su alto nivel de especialización y aplicación a diferentes sistemas electrónicos. Existen desde del tamaño de un sello de correos como se puede observar en la figura 1.30, aunque lo normal es que sean incluso más pequeños, ya que, lógicamente, forman parte del dispositivo que controlan (Gunther Gridling, Bettina Weiss, 2007).



Figura 1.30: Microcontroladores Atmel en sus diferentes tamaños

Fuente: Nutan Infotronics, 2013

Existen varias marcas de estos dispositivos, cada una con sus características destacadas.

Un ejemplo de estos, son los AVR que son una familia de microcontroladores RISC (Reduced Instruction Set Computer), del fabricante estadounidense Atmel. Y cuentan con bastantes aficionados debido a su diseño simple y la facilidad de programación.

Los microcontroladores AVR tienen una cañería ('pipeline' en inglés) con dos etapas (cargar y ejecutar), que les permite ejecutar la mayoría de las instrucciones en un ciclo de reloj, lo que los hace relativamente rápidos entre los microcontroladores de 8-bit. El set de instrucciones de los

AVR es más regular que la de la mayoría de los microcontroladores de 8-bit, por ejemplo, los PIC (Gunther Gridling, Bettina Weiss, 2007).

1.12.2 Servomotores y micro servomotores

Un servomotor es un motor eléctrico que consta con la capacidad de ser controlado, tanto en velocidad como en posición. Su eje no gira 360°, aunque ahora hay algunos que, si lo permiten como los motores normales, solo giran 180° hacia la izquierda o hacia la derecha (ida y retorno).

Este control de posición se realiza a través de una señal PWM desde un microcontrolador y depende de la frecuencia generada por el mismo, como se observa en la figura 1.31.

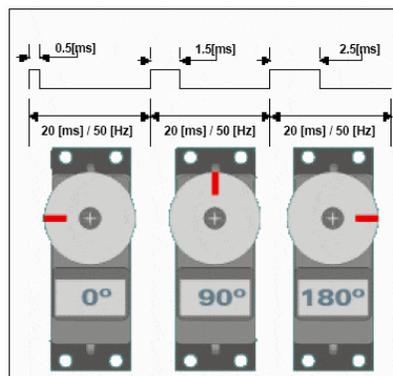


Figura 1.31: Posiciones del servomotor

Fuente: Autodesk, Inc., 2016

Gracias a esto, con los servomotores podemos crear toda clase movimientos de una forma controlada, por ejemplo, en robótica para el control del movimiento del brazo de un robot o en los sistemas de radio control.

La mayoría de los servomotores que se utilizan son de corriente continua, pero también existen en corriente alterna. Las características principales de un servomotor son el torque y la velocidad.

El torque es la fuerza capaz para hacer girar su eje y se suele expresar en Kg/cm. A mayor torque, mayor corriente de consumo del servo. Y la velocidad es la angular o de rotación (Víctor R. González, 2003).

Microservomotores

Un micro servomotor tiene el mismo funcionamiento que un servo normal, la diferencia radica en que estos tienen dimensiones reducidas, para poder adaptarse a otro tipo de aplicaciones. De igual manera el torque máximo que alcanzan disminuye, siendo de 5,7kg-cm el valor más alto que se ha conocido actualmente.

1.12.3 Sensores de flexión

Los sensores de flexión, son un tipo de sensor que al ser flexionados varían su resistencia. Ésta tecnología está patentada por Spectra Symbol.

La resistencia del sensor de flexión cambia cuando al ser flexionado las placas de metal que quedan en la parte de afuera de la curva del doblado, es decir cuando el texto que lleva queda en la parte de adentro (figura 1.32).

Estos sensores son muy fáciles de utilizar, pues básicamente son una resistencia que cambia su valor al momento de doblarlos. Si el sensor no es arqueado, la resistencia es aproximadamente de 10K, pero si se flexiona en una dirección alcanza hasta los 20K.

El conector del sensor tiene dos terminales con espaciado de 0.1" lo que hace que se pueda colocar fácilmente también en una protoboard (Saul Gausin, 2012).

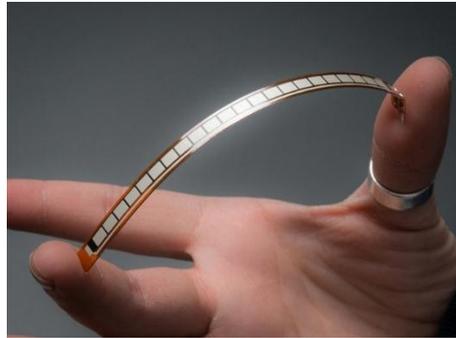


Figura 1.32: Sensor de flexión

Fuente: Adafruit, 2013

1.12.4 Batería LiPo

Las baterías LiPo (Litio y polímero) son un tipo de batería recargable que suelen utilizar los sistemas eléctricos de radiocontrol u otros dispositivos electrónicos.

Cuando las comparamos con las baterías de NiCd/NiMh, las baterías LiPo tienen 3 cosas importantes que hacen a estas baterías la elección perfecta. Son ligeras y se pueden hacer de casi cualquier forma y tamaño. Tienen gran capacidad lo que significa que tienen un montón de energía en un tamaño reducido.

Las baterías LiPo tienen una tasa de descarga alta para alimentar los sistemas eléctricos más exigentes, un ejemplo de estas se observa en la figura 1.34 (Erle Robotics, 2014).



Figura 1.33: Batería LiPo

Fuente: Erle Robotics, 2014

CAPITULO II

2. DISEÑO Y MODELAMIENTO DE LA MANO ROBÓTICA

En este capítulo se presentan diferentes alternativas de diseño, que se tomaron en cuenta para definir la mejor solución.

Se describen las características de cada alternativa, donde se analizaron las condiciones que se adaptan mejor a los requerimientos principales de funcionamiento, tales como: costo de materiales, complejidad de la estructura y facilidad de control.

De igual forma se describen los detalles de diseño, estos son materiales a utilizar y otros parámetros como cálculo de fuerzas, etc.

Además, se describe el uso del programa Solidworks como herramienta de ayuda para mejorar todos los parámetros mencionados.

2.1. ANÁLISIS DE LAS DIMENSIONES ESTÁNDAR DE UNA MANO HUMANA

Según la Norma DIN 33 402 2° las medidas estándar de una mano humana son (figura 2.1 y 2.2). Se describe de forma detallada las medidas promedio, en hombres y mujeres.

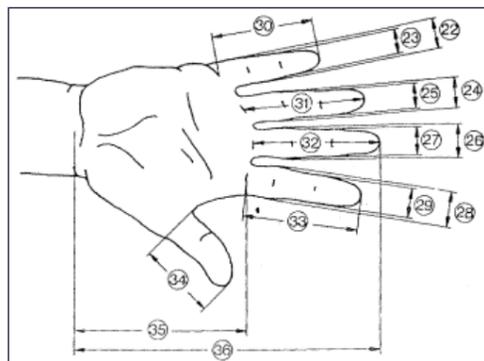


Figura 2.1: Medidas estándar de una mano humana

Fuente: José Luis Melo, 2002

Dimensiones En cm.		PERCENTIL					
		Hombres			Mujeres		
		5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
22	Ancho del meñique en la palma de la mano	1,8	1,7	1,8	1,2	1,5	1,7
23	Ancho del meñique próximo de la yema	1,4	1,5	1,7	1,1	1,3	1,5
24	Ancho del dedo anular en la palma de la mano	1,8	2,0	2,1	1,5	1,6	1,8
25	Ancho del dedeo anular próximo a la yema	1,5	1,7	1,9	1,3	1,4	1,6
26	Ancho del dedo mayor en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
27	Ancho del dedo mayor próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,4	1,5	1,7
28	Ancho del dedo índice en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
29	Ancho del dedo índice próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,3	1,5	1,7
30	Largo del dedo meñique	5,6	6,2	7,0	5,2	5,8	6,6
31	Largo del dedo anular	7,0	7,7	8,6	6,5	7,3	8,0
32	Largo del dedo mayor	7,5	8,3	9,2	6,9	7,7	8,5
33	Largo del dedo índice	6,8	7,5	8,3	6,2	6,9	7,6
34	Largo del dedo pulgar	6,0	6,7	7,6	5,2	6,0	6,9
35	Largo de la palma de la mano	10,1	10,9	11,7	9,1	10,0	10,8
36	Largo total de la mano	17,0	18,6	20,1	15,9	17,4	19,0

Figura 2.2: Tabla con las medidas de la mano humana

Fuente: José Luis Melo, 2002

Se tomó el valor de la figura 2.2, como referencia para comprobar que el tamaño cada una de las piezas de la estructura adquirida sea el adecuado. Esto con el fin de que el proyecto final, tenga un aspecto más realista y de esta forma sea un prototipo de prótesis.

2.2. ALTERNATIVAS DE DISEÑO PRELIMINAR

A continuación, se describen detalladamente cada una de las opciones que se plantearon antes de llegar a la selección final.

2.2.1 Primera Alternativa

En este caso, la idea se enfatiza en implementar micromotores en cada articulación de las falanges de los dedos para el control del movimiento. Siendo para este sistema, su ventaja

principal, la precisión del movimiento. Otra de las ventajas que se puede resaltar en esta alternativa, es la fuerza que podrían ejercer los dedos al momento de cerrar la mano.

La complejidad del control es la desventaja más relevante y muy importante a tomar en cuenta, ya que también habría que implementar varios sensores para controlar los límites de giro de los motores y el número de éstos sería alto, al menos diez. De esta manera se complica también la ubicación de los ya mencionados sensores y de cada micromotor en la estructura final por el tamaño, esto se puede observar en la figura presentada a continuación (figura 2.3), debido a que necesitan un accionamiento mecánico especial para realizar el movimiento requerido, en este caso el movimiento de cada dedo. Así mismo al implementar todas las características mencionadas, el tamaño de la mano aumenta considerablemente, con lo que la mano no tendría las dimensiones estándar de una mano humana.

Analizando todas estas condiciones, de igual manera otra desventaja que se puede apreciar es que incrementa el costo de materiales al necesitar más dispositivos para el control.

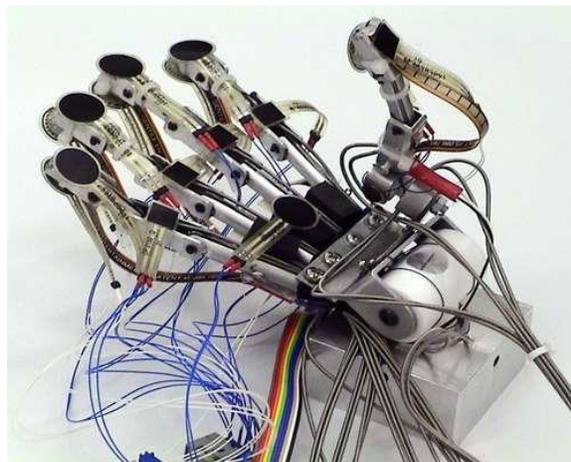


Figura 2.3: Diseño de primera alternativa

Fuente: Juan Antonio Gómez, José Luis Muñoz, 2011

2.2.2 Segunda Alternativa

En esta alternativa, se plantea utilizar tres servomotores para el movimiento de los dedos, dos de ellos son microservos y un servomotor normal, de los cuales uno de los microservos es para controlar el dedo pulgar y el otro el dedo índice. Por su parte el servomotor restante, se utiliza para controlar el movimiento de los tres dedos restantes. Esta es la mayor ventaja, ya que se utilizan menos actuadores y se facilita el control final de los mismos.

Todos los servomotores mencionados, ejecutan el movimiento de los dedos a través de hilos que están sujetos a ellos a través de poleas, para efectuar el movimiento. Los hilos pasan por el interior de cada uno de los dedos y están sujetos a un extremo para conseguir el movimiento, esto se puede apreciar de mejor manera en la figura 2.4.

Las piezas de la estructura deben ser diseñadas, de tal forma que los tres servomotores queden anclados al servomotor principal que efectúa el movimiento de la muñeca. Esto se realiza con el fin de aprovechar el espacio que existe en el antebrazo y que no afecten a otros elementos para el funcionamiento y que los hilos no se enreden con el accionamiento. Como podemos observar otra ventaja, es que se reduce el costo, al necesitar menos materiales para el desarrollo del proyecto. La desventaja en este caso es que disminuye la fuerza de agarre al momento de cerrar la mano.

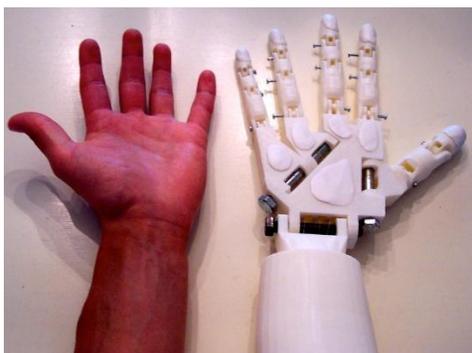


Figura 2.4: Mano robótica con hilos tensores

Fuente: Arduino, 2013

2.2.3 Selección de la Alternativa

Se decidió elegir la segunda alternativa al observar que tiene mayores ventajas en relación con la primera. Siendo la más importante de ellas, la facilidad de control. De esta forma se reduce considerablemente los costos finales de la estructura y se facilita la elección de un método de control más accesible. Así mismo, se reduce el tamaño de la mano final, dando un aspecto un tanto más realista al brazo robótico construido.

En la figura 2.5 y 2.6 tenemos una vista más apreciable de los servomotores con los hilos, anclados al servomotor principal, que está ubicado en la base del brazo robótico.



Figura 2.5: Servomotores con hilos

Fuente: Autor



Figura 2.6: Servomotores anclados al servomotor principal

Fuente: Autor

Con esta implementación se permite la unión de los dos accionamientos, que son el movimiento de los dedos y el giro de la muñeca, esto se traduce en apertura y cierre de la mano, y el movimiento de pronosupinación de la misma.

Luego para la selección de los materiales necesarios para todos los mecanismos a implementarse, se realizan los cálculos pertinentes, así como el análisis de los elementos electrónicos necesarios.

De esta manera también se decide implementar un guante sensorizado, con el fin de simular de manera más realista los movimientos de los dedos y la muñeca.

Dicho guante cuenta con tres sensores de flexión, es decir que cada uno controla cada servomotor y el dedo correspondiente a cada uno de los mismos. También se le implementa un acelerómetro para el movimiento de la muñeca.

2.3. DISEÑO EN SISTEMA CAD DE LOS ELEMENTOS A UTILIZARSE

Primeramente, se tomó un diseño de un prototipo base, el cuál fue creado en una impresora 3D. Dicha estructura necesitaba modificaciones para cumplir nuestros requerimientos, por lo que se realizaron cambios al diseño, creando uno totalmente nuevo y logrando así unir dos mecanismos en un solo sistema, que son el accionamiento de los dedos a través de tensores (hilos) y el giro de la muñeca al mismo tiempo; cabe mencionar que esta unión no se ha implementado en prototipos anteriores.

A continuación, se describe el desarrollo de cada una de las piezas que conformaran la mano robótica, realizadas en un sistema CAD.

Los planos de las piezas mencionadas, se encuentran en el Anexo E, al final del documento.

2.3.1 Soporte para el eje y los microservos

En la figura 2.7 se muestra un soporte de acero al carbono en color azul, que sirve de soporte para el eje y para los servomotores que están encargados del accionamiento de los dedos. Los servomotores están sujetos a este soporte mediante tornillos a las solapas sobresalientes que se pueden observar claramente en la figura ya mencionada. El ajuste es posible gracias a la implementación de platinas diseñadas específicamente, que se explican a continuación.

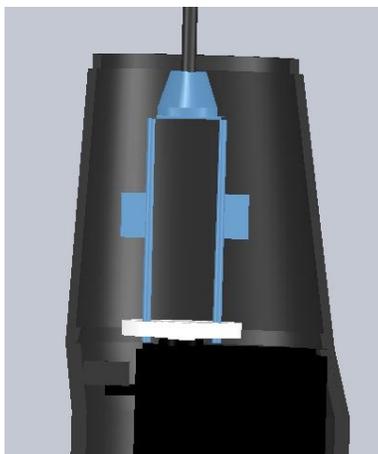


Figura 2.7: Soporte del eje

Fuente: Autor

2.3.2 Platinas para sujeción de servomotores

Se diseñaron platinas en base a las dimensiones de cada servomotor, por lo que están hechas de forma personalizada y se adaptan a la estructura sin afectar otros elementos, en la figura 2.8 se muestran en color rojo. La implementación se realiza con pernos ubicados de manera que no permitan el movimiento hacia los lados a cada servomotor.

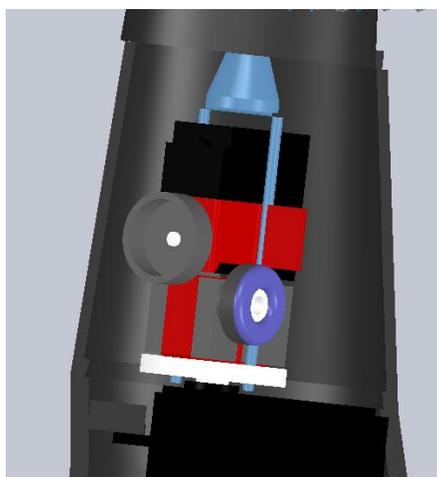


Figura 2.8: Sujeción de servomotores

Fuente: Autor

2.3.3 Soporte para los hilos

El soporte que se observa de color rojo en la (figura 2.9) estará encargado de guiar los hilos que atraviesan todo el sistema desde la base hasta los dedos, tiene agujeros en las aletas que se pueden observar en la figura mencionada, por la cual atraviesan los hilos. Esto es para evitar que se enreden los hilos tensores entre ellos, y también con las demás partes de la estructura.

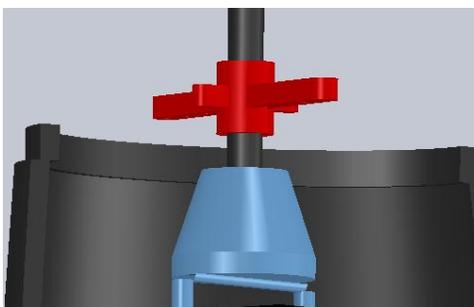


Figura 2.9: Soporte hilos

Fuente: Autor

2.3.4 Mecanismo de los dedos

El mecanismo de los dedos (figura 2.10) está conformado por hilos que pasan internamente a través de ellos, estos hacen la función de tendones y son movidos por los servomotores ubicados en la parte inferior del brazo. Adicionalmente se situará resortes en cada articulación, para facilitar la apertura y cierre de cada una de las falanges.



Figura 2.10: Mecanismo de los dedos

Fuente: Autor

2.3.5 Servomotores y Poleas

Los servomotores son los encargados del movimiento de los dedos, a través de un mecanismo de poleas, en donde se enrollan los hilos tensores. Cada polea tiene una ranura alrededor y está fijada en el eje de cada servomotor, con el fin de que al girar se enrolle y desenrolle cada hilo, y de esa forma permita la flexión de los dedos hacia adentro y luego retorne a su posición inicial. En la figura 2.11 se pueden observar las poleas ubicadas en ambos microservalos y en el servomotor encargado de mover los tres dedos restantes, que por esta razón es de mayor potencia y su polea de mayor tamaño.

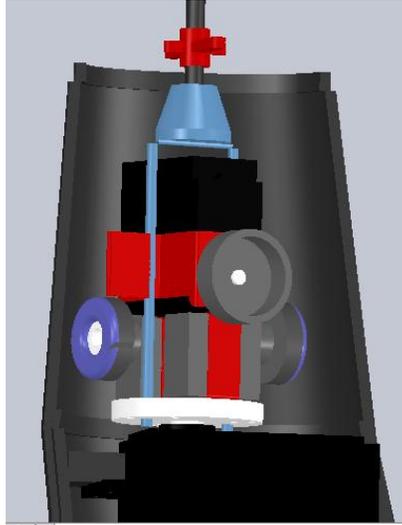


Figura 2.11: Poleas sujetas a cada servomotor

Fuente: Autor

2.4. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE DE LA MANO ROBÓTICA

A partir del prototipo diseñado y modelado en el sistema CAD, se empieza a ensamblar la mano robótica con los materiales antes mencionados.

El objetivo es probar el accionamiento del mecanismo implementado al sistema, a fin de verificar, mejorar y comprobar su funcionamiento final.

A continuación, se describe cada uno de los pasos realizados al momento de la construcción del brazo robótico:

2.4.1. Soporte para el eje y los microservos

Después de ubicar correctamente el servomotor, se creó un soporte de acero como se observa en la figura 2.12, para el eje y los microservos, los cuáles permitirán el movimiento de toda la

mano. Este soporte debe estar fijo y centrado junto con el servomotor para evitar desbalances al momento del giro de la muñeca.



Figura 2.12: Soporte de acero para el eje

Fuente: Autor

2.4.2. Platinas para sujeción de servomotores

Se diseñaron platinas de tol delgado, haciendo dobleces de tal forma que se adapten a cada uno de los servomotores, luego se dio el acabado pintándoles de color rojo (figura 2.13). Estos abrazan a los actuadores y se ajustan al eje base por medio de tornillos, para de esta forma evitar cualquier movimiento de abajo hacia arriba principalmente.



Figura 2.13: Platinas de ajuste

Fuente: Autor

2.4.3. Soporte para los hilos

Se decidió poner este soporte en vista de que los hilos tensores, que van desde los servomotores hacia cada uno de los dedos, corrían el peligro de enredarse entre sí y además había fricción con la estructura interna, reduciendo la eficacia del funcionamiento. La pieza contiene orificios individuales por donde pasa cada hilo, con una separación de un 1 mm entre cada uno de ellos (figura 2.14).

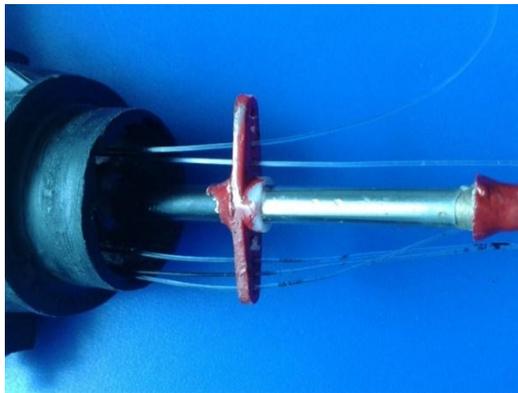


Figura 2.14: Soporte hilos

Fuente: Autor

2.4.4. Mecanismo de los dedos

Una vez que se terminó con los anteriores parámetros, se colocó resortes de torsión en cada articulación de los dedos de la mano robótica (figura 2.15). Esto con el fin de ayudar al retorno de movimiento de apertura de la mano. La adición de este mecanismo es una de las más relevantes, ya que se trata de una mejora al diseño que se tenía inicialmente.



Figura 2.15: Resortes en los dedos

Fuente: Autor

2.4.5. Servomotores y Poleas

En la figura 2.16, se puede observar las poleas sujetas a los servomotores, que de igual manera se ajustan con pequeños pernos. Esto ayudo a tener una referencia de posición de giro de los servomotores y así se obtuvo un accionamiento más confiable. Además de ayudar al torque y facilitar el movimiento de los dedos.



Figura 2.16: Servomotores asegurados con poleas e hilos

Fuente: Autor

2.5. CÁLCULOS PARA ACCIONAMIENTO DE LOS DEDOS

Se presenta a continuación los cálculos necesarios para el accionamiento principal de los dedos de la mano robótica, así como para la selección de materiales y dispositivos necesarios para el funcionamiento óptimo de esta alternativa.

Cabe mencionar que se decidió implementar resortes de torsión en cada articulación de los dedos, con la finalidad de ayudar al retorno a su posición inicial, en el momento de flexión de las falanges. Por esta razón es necesario realizar una serie de cálculos, para obtener la fuerza necesaria del motor para realizar el movimiento de cada dedo.

Primeramente, se debe calcular la fuerza generada por cada resorte en la articulación. Este proceso se presenta a continuación:

2.5.1. Calculo de la constante del resorte de torsión

La fórmula representada a continuación, se tomó de referencia de la página web de una empresa que se dedica a la fabricación de este tipo de elementos (ACXESS SPRING), en donde se detallan los valores de la fórmula de la siguiente manera:

$$k * 360^\circ = \frac{E * d^4}{10,8 * D * N}$$

Ecuación 1. Fórmula para calcular la constante del resorte

k = Constante del resorte

E = Constante de elasticidad del material del resorte

d = Diámetro del alambre del resorte

D = Diámetro medio del círculo central

N = Numero de vueltas del resorte

Se puede tomar como referencia la figura 2.17 para identificar las variables anteriores, para reconocer los datos de manera más apreciable:

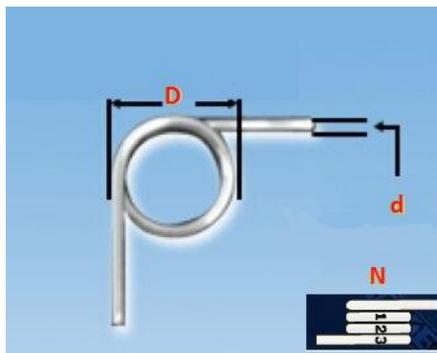


Figura 2.17: Valores necesarios del resorte de torsión

Fuente: Autor

Dimensiones del resorte de torsión utilizado

$$D = 4 \text{ mm} = 0,157 \text{ in}$$

$$d = 0,4 \text{ mm} = 0,0157 \text{ in}$$

$$N = 2$$

$$E = 28 \text{ psi} \times 10^6 \text{ (Constante elasticidad de Acero común para resorte)}$$

Una vez que se tomaron los datos necesarios para la formula, se reemplazan los valores recogidos del resorte de torsión utilizado en todas las articulaciones de los dedos, las medidas se tomaron con un calibrador o pie de rey. Las dimensiones de todos éstos son iguales para cada dedo y por esto se realiza un solo cálculo conjunto.

$$k * 360^\circ = \frac{28 \text{ psi} \times 10^6 * (0,0157 \text{ in})^4}{10,8 * 0,157 \text{ in} * 2}$$

$$k = 1,393 \times 10^{-3} \frac{\text{lb}}{\text{grado}}$$

El resultado de la formula está en el Sistema Inglés, por lo que es necesario cambiar a unidades del Sistema Internacional.

$$k = 6,196 \times 10^{-3} \frac{\text{N}}{\text{grado}}$$

De esta manera se obtiene la constante del resorte de torsión y seguimos con la siguiente etapa de cálculos. La cual se trata de calcular el momento de fuerza generado por cada resorte, es decir en cada articulación, en nuestro caso dos por cada dedo.

2.5.2. Cálculo del Momento de Fuerza generado en un dedo

Inicialmente, se realiza el cálculo de la fuerza generada por el resorte de torsión. El cual viene dado por la siguiente formula:

$$F = k * \emptyset$$

Ecuación 2: Fórmula para calcular la fuerza del resorte

Donde:

F = Fuerza generada por el resorte

k = Constante del resorte de torsión

\emptyset = Ángulo de presión del resorte

Se realiza el cálculo de dos fuerzas debido a que cada dedo contiene dos resortes.

El ángulo es diferente para cada resorte, debido a que cada articulación tiene diferente abertura, y por lo tanto el valor de las fuerzas cambiara en ambos casos.

$$F_1 = k * \emptyset_1 = 6,196x 10^{-3} \frac{N}{grado} * 80^\circ$$

$$F_2 = k * \emptyset_2 = 6,196x 10^{-3} \frac{N}{grado} * 100^\circ$$

$$F_1 = 0,495 N$$

$$F_2 = 0,619 N$$

Luego de calcular las fuerzas en cada resorte, es necesario calcular el momento de fuerza generado, ya que ejercen una torsión en el instante en que se realiza la flexión del dedo. Se realiza

el cálculo del momento generado por cada resorte y luego se suman ambos momentos para obtener el momento de fuerza total en cada dedo.

Se hizo el análisis de un solo dedo, en este caso el de dimensiones mayores para obtener una dimensión amplia del torque necesario.

$$M = F * l$$

Ecuación 3: Fórmula para calcular el momento de fuerza del resorte

Donde:

M = Momento generado por la fuerza del resorte

F = Fuerza generada por el resorte

l = Distancia de la fuerza con respecto al eje central de movimiento.

De igual forma se realiza dos veces el mismo cálculo, para los dos resortes ubicados en el dedo.

Obteniéndose:

$$M_1 = F_1 * l = 0,495N * (1,255cm)$$

$$M_2 = F_2 * l = 0,619N * (1,255cm)$$

$$M_1 = 6,212x 10^{-3} N.m \quad M_2 = 7,768x 10^{-3} N.m$$

El momento total es la suma de todos los momentos generados en un dedo, el cual hará identificar el torque necesario del motor.

$$M_T = M_1 + M_2 = 0,0139 N.m = 0,141 kg.cm$$

Con estos valores se determina que el valor del torque del microservo que en nuestro caso es de 2,5 kg.cm, supera ampliamente al necesario para el movimiento de cada uno de los dedos.

Cabe recalcar que en estos cálculos se ha despreciado factores externos que pueden afectar considerablemente al valor final. En estos factores se encuentran, fuerza de rozamiento de los materiales y fuerzas de tensión generadas en todas las secciones por las que atraviesan los cables.

Logramos determinar a través de pruebas que se realizaron con el prototipo, con un microservo de 1,2 kg.cm, que los dedos necesitan un torque mayor al obtenido mediante cálculos teóricos. Ya que, con este torque utilizado, los motores sufrieron daños en los engranajes plásticos internos de cada uno de ellos.

A partir de estos resultados se decidió implementar microservos con engranes metálicos y que generan los 2,5 kg.cm ya mencionados con anterioridad.

2.6. ANÁLISIS ESTÁTICO DE FUERZAS EN SISTEMA CAD

Se realizó el análisis de fuerzas, para verificar los esfuerzos que podrían intervenir en cada una de las piezas de la mano robótica. Esto se inició asumiendo que el torque de los servomotores se transfiere a las articulaciones de los dedos, sin ningún tipo de pérdidas en el sistema.

Se ignoraron las pérdidas producidas por tensión en el cable, fuerza de rozamiento en el cable y en las piezas que conforman los dedos. De igual manera se ignoró la fuerza de reacción ocasionada por cada uno de los resortes de torsión que se encuentran en las articulaciones de las falanges de cada dedo.

Primeramente, se empezó por analizar uno de los dedos que tienen un solo actuador independiente, en este caso fue el dedo pulgar. Se realizó el análisis para un solo dedo debido a que este funciona con un solo microservo al igual que el dedo índice.

2.6.1. Análisis del Dedo Pulgar

El proceso inicia con la asignación del material a cada una de las piezas que intervienen en el sistema mecánico a analizar. En este caso son las piezas construidas en plástico ABS y el acero inoxidable de los pasadores que se encuentran en las articulaciones. Las propiedades mecánicas de estos materiales fueron asignadas automáticamente por el programa, luego de que se seleccionaran de una lista que provee el software utilizado para este análisis.

De la misma manera se asignan las cargas que intervienen en el sistema, para el caso del dedo pulgar se tiene el torque del microservomotor que tiene 2,5 kg.cm, esto se debe transformar a unidades del SI, y obtenemos como valor 0,24N. Se determinó poner la mitad de esta magnitud a las dos articulaciones que intervienen en cada dedo, por lo que el torque en cada articulación utilizado en el software es de 0,12N.

Luego se realiza el mallado para las piezas mencionadas, esta acción se puede ver en la figura 2.18 que se presenta a continuación.

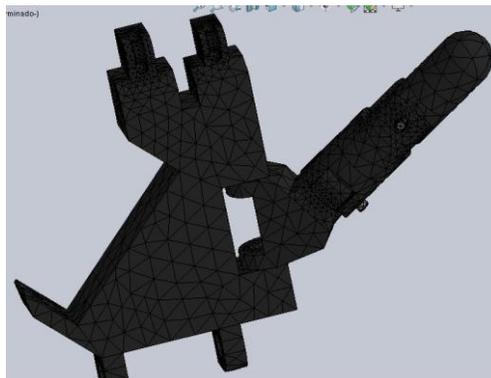


Figura 2.18: Mallado de las piezas del pulgar en el sistema CAD

Fuente: Autor

Luego de que el software ejecuta el mallado de las piezas, se inicia el análisis con las cargas designadas y realiza una serie de iteraciones antes de arrojar los resultados correspondientes, como esfuerzo de Von Mises y deformaciones que pueden sufrir las piezas.

En la figura 2.19 se puede observar las secciones donde se genera mayor esfuerzo según la escala de colores que está ubicada a la derecha de la imagen. En ésta se puede observar que el esfuerzo máximo generado es de 3,58MPa en las secciones donde se genera la torsión.

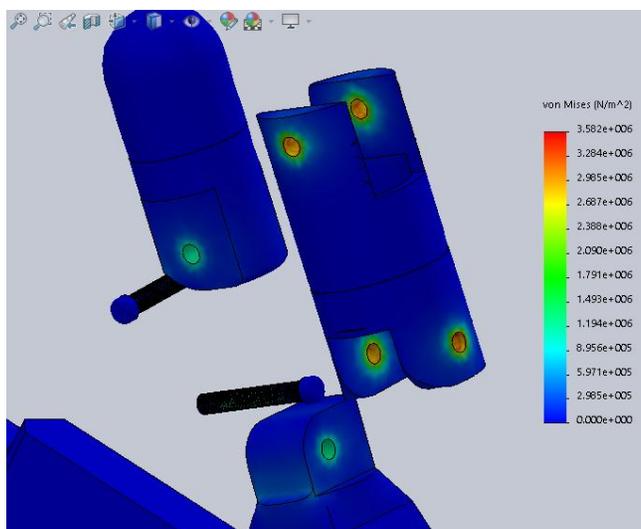


Figura 2.19: Esfuerzo de Von Mises en dedo pulgar

Fuente: Autor

En la figura 2.20 se muestra los desplazamientos generados en las piezas, de igual forma en una escala de colores donde se puede apreciar que la deformación máxima es de 0,0019 mm que se puede asumir como despreciable.

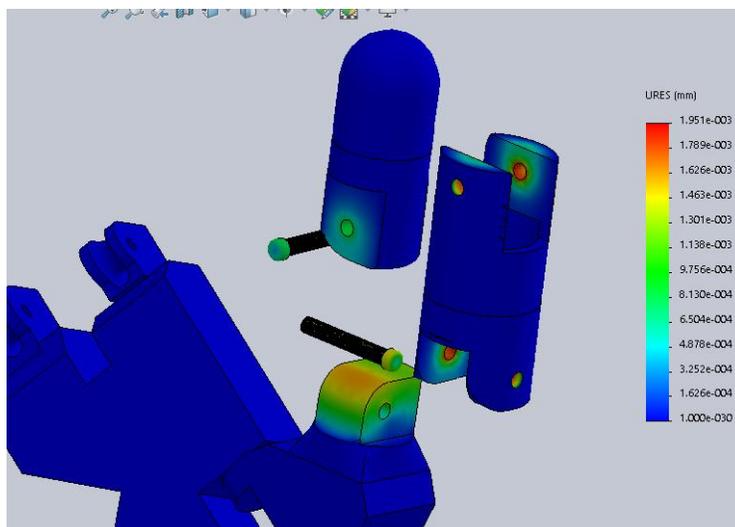


Figura 2.20: Deformaciones encontradas en las piezas del pulgar

Fuente: Autor

Lo que también se puede observar en estas imágenes es que existe una grieta de ruptura en las secciones donde las piezas tienen una sección más delgada. Cabe mencionar que el programa simula este problema luego de realizar un número alto de iteraciones, antes de mostrar estos resultados. Sin embargo, esto se podría evitar utilizando otro material más duro y resistente que el plástico ABS para elaborar las piezas.

2.6.2. Análisis del Dedo Medio

Al igual que en la sección anterior se decidió hacer el análisis de uno de los dedos debido a que todos tienen el mismo actuador para el accionamiento, en este caso es un servomotor de 5kg.cm que transformando a unidades internacionales genera un valor de 0,48N. Este valor se dividió para cada dedo y luego para cada articulación, y se obtiene una magnitud de 0,08N, que será el valor asignado para el análisis respectivo.

En la figura 2.21 se muestra el mallado realizado para las piezas respectivas.

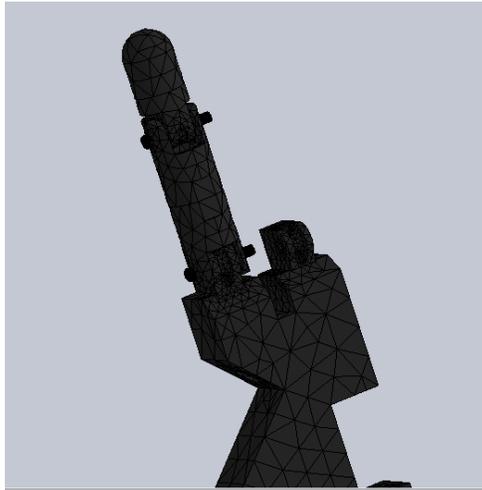


Figura 2.21: Mallado de las piezas del dedo medio en el sistema CAD

Fuente: Autor

El resultado que el software genera, establece un esfuerzo de Von Mises máximo de 11,28MPa que se forma en una pequeña sección del pasador que se encuentra en la articulación superior del miembro en cuestión. Sin embargo, lo más importante es el análisis de resistencia de las piezas y para este caso es muy bajo debido a que la magnitud del torque no es muy elevada.

La sección de color cian, muestra el valor máximo que se genera en las piezas y que según la escala que se muestra en la figura 2.22, se obtiene un valor de 2,82MPa.

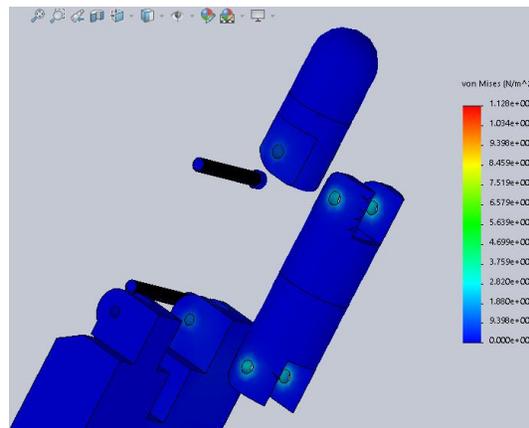


Figura 2.22: Esfuerzo de Von Mises en dedo medio

Fuente: Autor

De igual manera se presenta a continuación en la figura 2.23 las deformaciones que presentan las piezas luego de realizar un número alto de iteraciones por el sistema CAD. En esta imagen se puede observar una deformación máxima de 0,005mm, cantidad que se puede definir como despreciable, ya que no afecta de manera representativa a la estructura general.

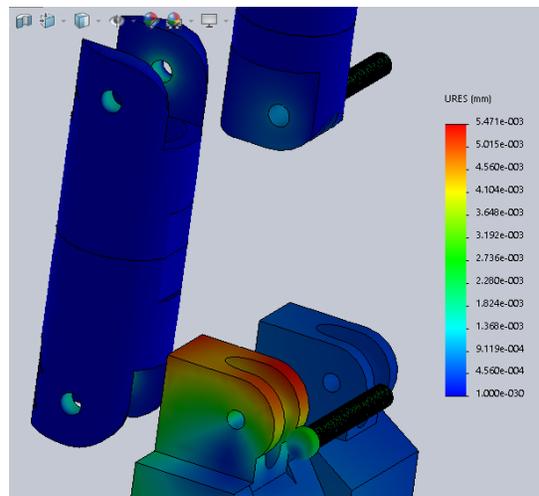


Figura 2.23: Deformaciones encontradas en las piezas del pulgar

Fuente: Autor

2.7. DISPOSITIVOS A UTILIZARSE EN LA ESTRUCTURA GENERAL

En esta sección se detallan los elementos utilizados para la construcción del brazo robótico, con sus respectivos datos técnicos, de acuerdo a los valores obtenidos a través de los cálculos realizados anteriormente.

2.7.1. Estructura Básica de la Mano Robótica

La estructura de la mano robótica está elaborada a través de una impresora 3-D, utilizando el plástico ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), que es el más común para estos procesos.

Además, el ABS es un plástico muy resistente a los golpes, por eso es uno de los más usados en ingeniería, industria e impresión 3D para prototipos. Las piezas de Lego están hechas en este tipo

de plástico. Aparte de su dureza y rigidez, es resistente a la abrasión y varios elementos químicos. Es soluble en acetona, no es biodegradable, pero sí les afecta la exposición a los rayos UV.

El ABS es bueno para pintar sobre él y también permite pegar piezas del mismo material con adhesivos. Existe una variedad de colores, desde crudo natural a plateados o dorados.

La estructura consta del antebrazo, donde se ubican los servomotores. La muñeca, que sirve de unión hacia la mano. Y la mano, que está constituida por dedos, divididos en falanges. Se debe mencionar que cada pieza tiene un canal hueco, por donde pasa el hilo de nylon, que sirve para el movimiento de los dedos (figura 2.24).

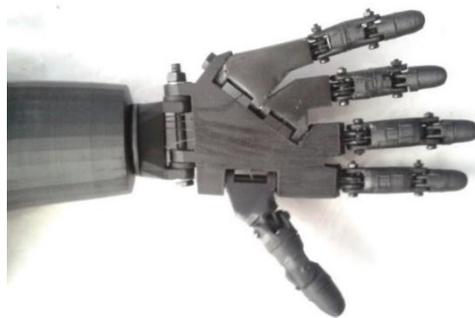


Figura 2.24: Estructura de la mano impresa en 3D

Fuente: Autor

2.7.2. El Microcontrolador Atmega16

Se decidió elegir este microcontrolador al ver que cumple con la mayoría de características necesarias para nuestro proyecto, las cuales se detallan a continuación:

- Microcontrolador AVR de 8 bit de alto rendimiento y bajo consumo.
- **Arquitectura RISC avanzada.**
 - 131 instrucciones. La mayoría de un simple ciclo de reloj de ejecución.
 - 32 x 8 registros de trabajo de propósito general.

- Capacidad de procesamiento de unos 16 MIPS a 16 MHz.
- Funcionamiento estático total.
- Multiplicador On-Chip de 2 ciclos
- **Memorias de programa y de datos no volátiles.**
 - 16K bytes de FLASH autoprogramable en sistema.
Resistencia: 1.000 ciclos de escritura / borrado.
 - Sección de código añadida opcional con bits de bloqueo independientes.
Programación en sistema con el programa añadido On-Chip.
Operación de lectura durante la escritura.
 - 512 bytes de EEPROM.
Resistencia: 100.000 ciclos de escritura / borrado.
 - 1K bytes de SRAM interna.
 - Bloqueo (cerradura) programable para la seguridad del software.
- **Características de los periféricos.**
 - Dos Timer/Contadores de 8 bits con prescaler separado y modo comparación.
 - Un Timer/Contador de 16 bits con prescaler separado, modo comparación y modo de captura.
 - Comparador analógico On-Chip.
 - Timer watchdog programable con oscilador separado On-Chip.
 - Interface serie SPI maestro/esclavo.
 - USART serie programable.
 - Contador en tiempo real con oscilador separado.

- ADC de 10 bit y 8 canales.
 - 8 canales de terminación simple
 - 7 canales diferenciales sólo en el encapsulado TQFP.
 - 2 canales diferenciales con ganancia programable a 1x, 10x o 200x.
- 4 canales de PWM.
- Interface serie de dos hilos orientada a byte.

La hoja técnica de datos del microcontrolador se puede observar en el Anexo A de este documento.

2.7.3. Servomotor

Dentro de nuestro sistema, estos elementos son los actuadores y permitirán el movimiento de los elementos del brazo robótico. Para el movimiento de los 3 dedos al mismo tiempo, se utilizó el servo HS-485HB (figura 2.25), el cual puede generar hasta 6kg-cm de torque con una alimentación máxima de 6 voltios.



Figura 2.25: Servomotor HS-485HB

Fuente: Robotzone, 2016

Para los dos dedos restantes se utilizaron dos microservisomotores, de la serie MG90S de la marca Tower Pro (figura 2.26). Su torque máximo alcanza 2.5kg-cm a 6 voltios de alimentación.



Figura 2.26: Microservomotor MG90S

Fuente: Tower Pro, 2014

Los datos técnicos de los servomotores, se pueden observar en el Anexo A al final de este documento.

2.7.4. Guante Sensorizado

Para el desarrollo del guante sensorizado, se utilizó un guante derecho de la marca Kimberly-Clark, modelo Jackson Safety G40 (figura 2.27). El guante está fabricado de un tejido de punto de nylon 24 % negro sin costuras, que provee comodidad, mejor ajuste, mayor destreza y transpiración al usuario. Esto se traduce en una mayor productividad y durabilidad para el usuario cuando se le compara con otros guantes de protección general. Las costuras en la punta de los dedos, son parte de las razones por las cuales, otros guantes de protección proveen menor destreza y comodidad al usuario.

Al mismo tiempo, tiene un recubrimiento de poliuretano 76%, que provee una capa con buena resistencia a la abrasión y rasgado, protección contra líquidos, agarre en seco-húmedo y durabilidad. El recubrimiento ofrece la misma sensibilidad táctil de un guante delgado, pero con la protección de un guante recubierto.



Figura 2.27: Guante de nylon y poliuretano

Fuente: Kimberly-Clark, 2015

2.7.5. Sensores de Flexión (Sensor Flex)

Se seleccionó un sensor de flexión sencillo de 4.4" de longitud que son 11.176 cm y se puede apreciar en la figura 2.28. Se implementaron 3 de estos sensores al guante que se mencionó en la sección anterior, a través de una costura adaptada en cada dedo.



Figura 2.28: Sensor de flexión

Fuente: Cosas de Ingeniería, 2015

2.7.6. Batería LiPo

Para nuestro sistema utilizamos una batería de la marca TURNIGY de 3 celdas, que cumple con las siguientes características: 12V, 3300mAh, y una tasa de descarga de 25-30C (figura 2.29).

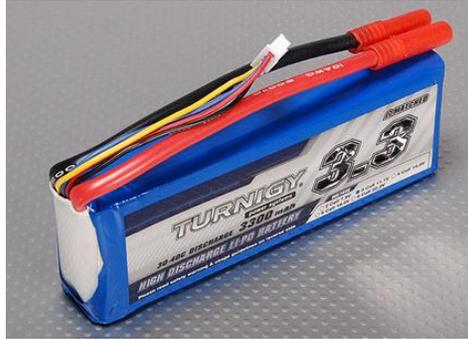


Figura 2.29: Batería LiPo

Fuente: Hobbyking, 2015

CAPITULO III

3. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL

A continuación, se describe detalladamente el sistema de control utilizado para la manipulación y ejecución del funcionamiento requerido de la mano robótica. Se presenta también la programación realizada para el microcontrolador, así como el diseño de las placas electrónicas que sirven para la conexión desde el guante sensorizado hacia los actuadores, que son los servomotores ubicados en la estructura.

Inicialmente se empezó por analizar las variantes de control más utilizadas para este tipo de investigación, para luego determinar la que se adapte de mejor manera a nuestro sistema.

Se hace una explicación general de cada uno de ellas y por qué se decidió utilizar la estrategia de control final. De igual manera se muestra el esquema eléctrico general, con sus dispositivos y planos de referencia.

3.1 ESTUDIOS DE ESTRATEGIAS DE CONTROL APLICADAS EN MANOS ROBÓTICAS

Recordemos que los automatismos y los robots son capaces de iniciar y detener procesos sin la intervención manual del usuario. Para ello necesitarán recibir información del exterior, procesarla y emitir una respuesta; en un automatismo dicha respuesta será siempre la misma, pero en aplicaciones robóticas podemos tener diferentes comportamientos según las circunstancias

Previamente, se efectuó el análisis de las dos estrategias de control existentes, como son: La primera estrategia de control en lazo abierto y la segunda estrategia de control en lazo cerrado.

3.1.1 Control de Lazo Abierto

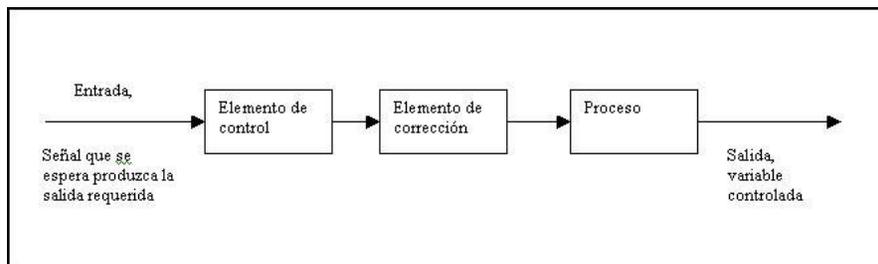


Figura 3.1: Esquema de sistema de control en lazo abierto

Fuente: Autor

Es aquel sistema en que solo actúa el proceso sobre la señal de entrada y da como resultado una señal de salida independiente de la señal de entrada. Esto significa que no hay retroalimentación hacia el controlador para que éste pueda ajustar la acción de control. Es decir, la señal de salida no se convierte en señal de entrada para el controlador.

En la figura 3.1, se muestran los elementos que componen este tipo de control.

Estos sistemas se caracterizan por:

- Ser sencillos y de fácil concepto.
- Su estabilidad no es completamente segura ante una perturbación.
- La salida no se compara con la entrada.
- La precisión depende de la previa calibración del sistema

3.1.2 Control de Lazo Cerrado

Son los sistemas en los que la acción de control está en función de la señal de salida. Los sistemas de circuito cerrado usan la retroalimentación desde un resultado final para ajustar la acción de control en consecuencia. El control en lazo cerrado es imprescindible cuando se da alguna de las siguientes circunstancias:

- Cuando un proceso no es posible de regular por el hombre.
- Una producción a gran escala que exige grandes instalaciones y el hombre no es capaz de manejar.
- Vigilar un proceso es especialmente difícil en algunos casos y requiere una atención que el hombre puede perder fácilmente por cansancio o despiste, con los consiguientes riesgos que ello pueda ocasionar al trabajador y al proceso.

Sus características principales son:

- Ser complejos, pero amplios en cantidad de parámetros.
- La salida se compara con la entrada y le afecta para el control del sistema.
- Ser más estable a perturbaciones y variaciones internas.

De igual manera en la figura 3.2 se muestran los elementos que conforman un sistema de control en lazo cerrado.

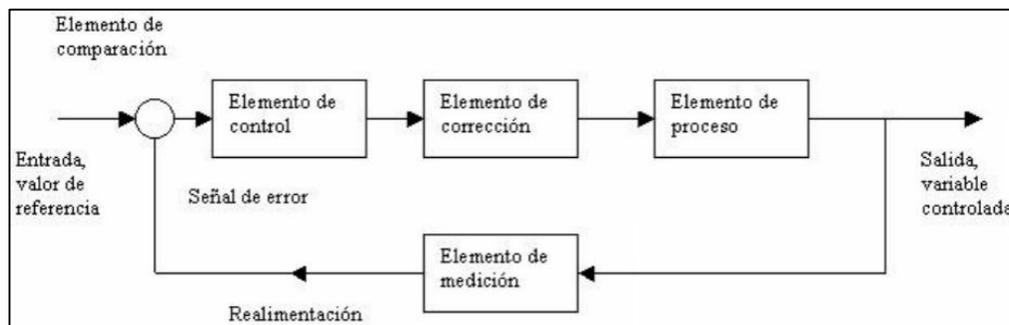


Figura 3.2: Esquema de sistema de control en lazo cerrado

Fuente: Autor

3.2 ELECCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL A UTILIZAR

De acuerdo a las características mostradas y analizadas, determinamos que el control de lazo abierto se adapta de mejor manera a nuestro proyecto, debido a que podemos ejecutar todas las

acciones requeridas y sin la utilización de recursos exagerados que pueden complicar el control final del prototipo.

Esto se vio evidenciado en que no es necesaria una corrección exacta de la posición y velocidad del movimiento de los actuadores. Ya que lo único que se necesita es el giro de 0° a 180° del servomotor, para que se efectúe el cierre y apertura de cada uno de los dedos.

De otra forma, la implementación de un control de lazo cerrado, hace necesaria la implementación de varios sensores, de posición o fuerza, y esto conlleva a la necesidad de incluir más dispositivos electrónicos. Lo cual no se podía realizar en el diseño, pues uno de los objetivos es que sea liviano y de fácil implementación para un posible paciente con este tipo de necesidad.

En la (figura 3.3) se muestra el diagrama general establecido para el funcionamiento del sistema.



Figura 3.3: Diagrama de estrategia de control en lazo abierto

Fuente: Autor

Los elementos principales para el accionamiento son: el Microcontrolador ATMEGA16 para el control total del programa, un Servomotor de 5kg.cm y dos microservos de 2.5kg-cm para el accionamiento de los dedos, tres sensores de flexión que darán lectura a los movimientos a ejecutarse y que estarán ubicados en el guante sensorizado.

El microcontrolador Atmega16 contiene toda la programación principal, por tal motivo es el elemento más esencial de todo el control a realizarse, ya que recibe las señales de los sensores y genera la orden para el funcionamiento de los actuadores, en este caso los tres motores ubicados dentro del brazo robótico.

El compilador utilizado para la programación es CodeVisionAVR, es un software bastante recomendable, ya que cuenta con un asistente para la configuración de puertos y las modalidades del microcontrolador a utilizarse.

Los sensores de flexión funcionan a través de señal analógica, dicho valor de señal varía dependiendo a la flexión que se determine según el dedo correspondiente. Por ende, se realiza la conversión analógica/digital con el puerto correspondiente del microcontrolador.

Los servomotores son los encargados de ejecutar cada uno de los movimientos de los dedos, una vez que se ha realizado la conversión de datos y el procesamiento de los mismos por el microcontrolador para generar la señal PWM indicada para cada motor.

Con todos los elementos indicados, en el desarrollo del prototipo se aplicó inicialmente un control en lazo abierto, el cual funcionó de una manera óptima. Luego se añadió un filtro digital para obtener una respuesta más estable de la señal de entrada de cada uno de los sensores.

3.3 DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL

A continuación, se presentan los distintos esquemas eléctricos que fueron necesarios y diseñados para la etapa de control del sistema.

3.3.1 Fuente etapa de control

El diseño de la fuente para la etapa de control fue necesario para evitar interrupciones y ruidos que se pueden generar en la etapa de potencia del circuito.

Este es un diseño general y común de una fuente de 5V que se puede apreciar en la figura 3.4, que está alimentada con una batería de 9v recargable a través del conector J9 que se observa en la imagen.

El diseño general de todas las fuentes realizadas se encuentran en el Anexo B del documento.

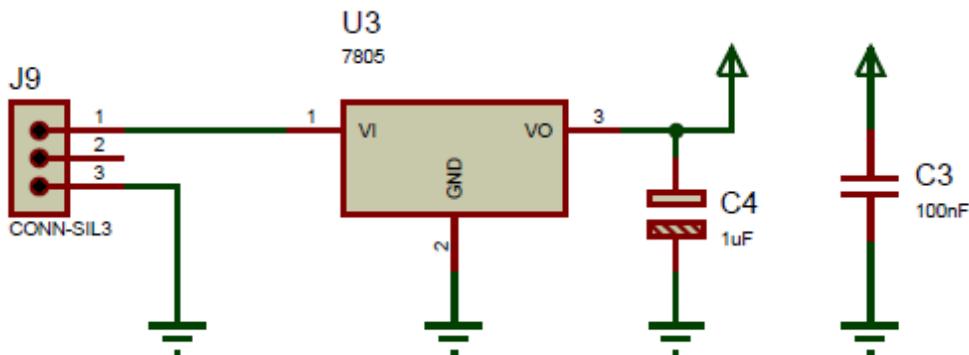


Figura 3.4: Fuente alimentación microcontrolador y sensores

Fuente: Autor

3.3.2 Fuente de alimentación para los servomotores

En la figura 3.5 se muestra el esquema de la fuente de alimentación utilizada para la energización de los servomotores. En la imagen, el conector J1 indica la entrada de la batería tipo LiPo de 12V y 3300 mAh; dicho conector consta de cuatro pines, ya que la batería tiene un socket de salida con el mismo número de pines. Debido a que todos los dispositivos electrónicos usados para el control funcionan a 5V, se hace necesario reducir el voltaje generado por la batería, sin afectar la corriente que ésta provee, pues ésta ayuda para el funcionamiento óptimo de los servomotores.

Para la reducción del voltaje se usa el regulador de voltaje LM338K, este elemento se implementó externamente para incluir un disipador de calor y un ventilador que ayudaran al enfriamiento del regulador, se conecta a J10 según se muestra en la figura.

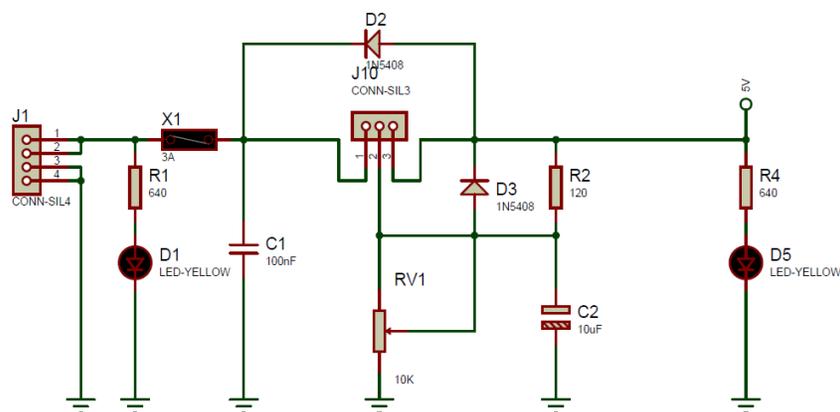


Figura 3.5: Esquema Fuente de Alimentación servomotores

Fuente: Autor

El circuito contiene también dos leds, que indican la conexión de la batería LiPo y muestra el encendido/apagado de la fuente respectivamente. Además, se implementaron capacitores que se usan como filtros, los diodos son necesarios para la protección contra corrientes contrarias. Contiene un potenciómetro de precisión para regular la salida en un voltaje que pase los 5V, esto para maximizar el torque de los servomotores, ya que, a mayor voltaje generan mayor potencia de trabajo.

3.3.3 Esquema de conexiones de los sensores

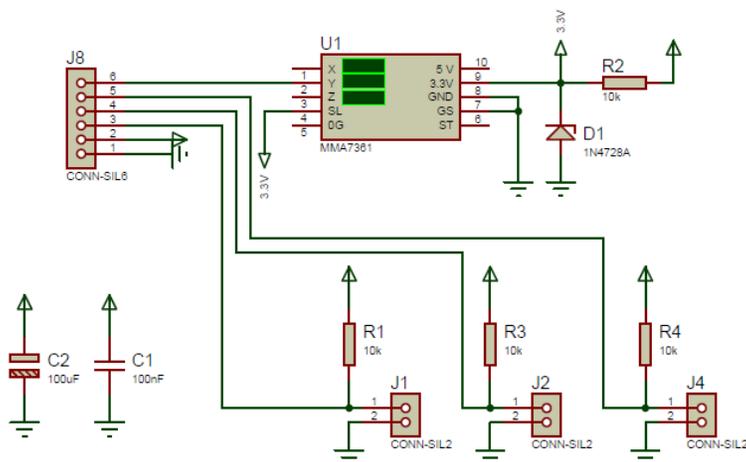


Figura 3.6: Conexiones de sensores

Fuente: Autor

Se trata de una pequeña tarjeta que se encarga de alimentar a todos los sensores utilizados en el prototipo (figura 3.6). Esta se encuentra ubicada en el guante sensorizado.

Los conectores J1, J2 y J4 están implementados para la conexión de los sensores de flexión, que están adheridos al guante y ubicados en el dedo pulgar, índice y medio respectivamente. Conociendo que éstos son de tipo resistivo, y de igual manera que su resistencia varía entre 10-20 $k\Omega$ dependiendo de la flexión generada en el guante, se debe realizar un divisor de voltaje con una resistencia de 10 $k\Omega$ cada uno, que varían la entrada de 5V con que se alimentan. La salida de cada divisor de voltaje, están conectadas al conector J8, que se dirige hacia el puerto analógico/digital del microcontrolador.

Los capacitores C1 y C2 sirven de filtros para evitar cualquier ruido que se puede generar en los cables y en el exterior.

3.3.4 Esquema de conexiones del Microcontrolador

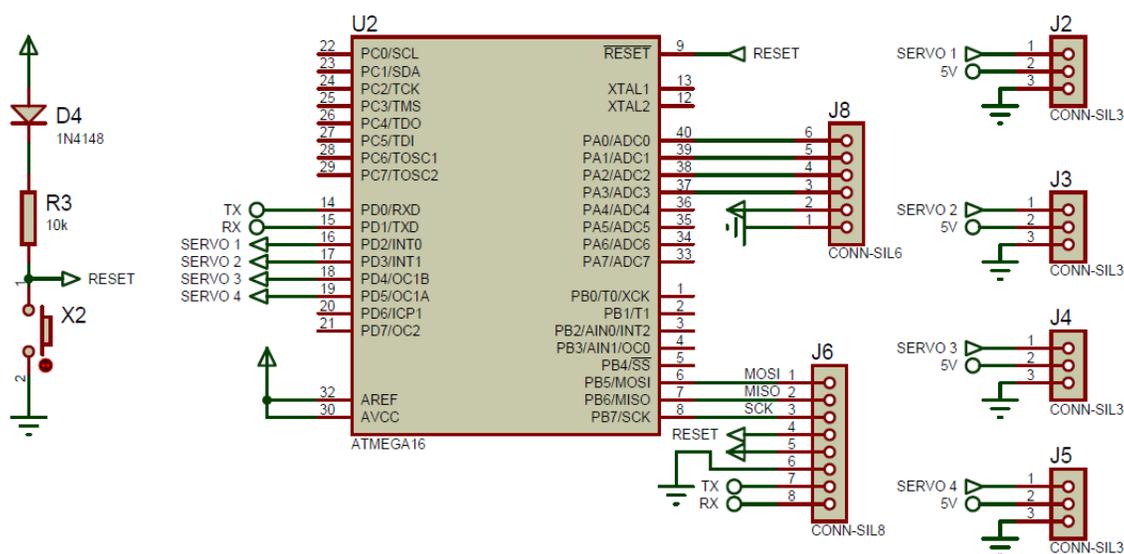


Figura 3.7: Esquema Microcontrolador

Fuente: Autor

Se muestran las conexiones realizadas y los pines utilizados para el microcontrolador ATmega16 de 40 pines en el cual se encuentra activado el puerto D como salida digital para los servomotores, y el puerto A como entrada analógica de los sensores (figura 3.8).

Los pines PA1, PA2 y PA3 se usan para la lectura de los sensores de flexión, que están conectados a J8 para el funcionamiento mencionado en la sección anterior.

Las salidas para los tres servomotores que controlan el movimiento de los dedos, son los pines PD1, PD2 y PD3. Estos están conectados a J2, J3 y J4 respectivamente.

El conector J6 es auxiliar para la grabación del microcontrolador desde la PC y la comunicación serial con la PC, que se utilizó en la calibración de datos de los sensores.

Una vez terminado el diseño de los esquemas eléctricos, se procede a dibujar las pistas necesarias para la colocación de los diferentes elementos electrónicos en el PCB del circuito. Esto se realizó a través del programa Proteus 8. El diseño final se observa en la figura 3.8.

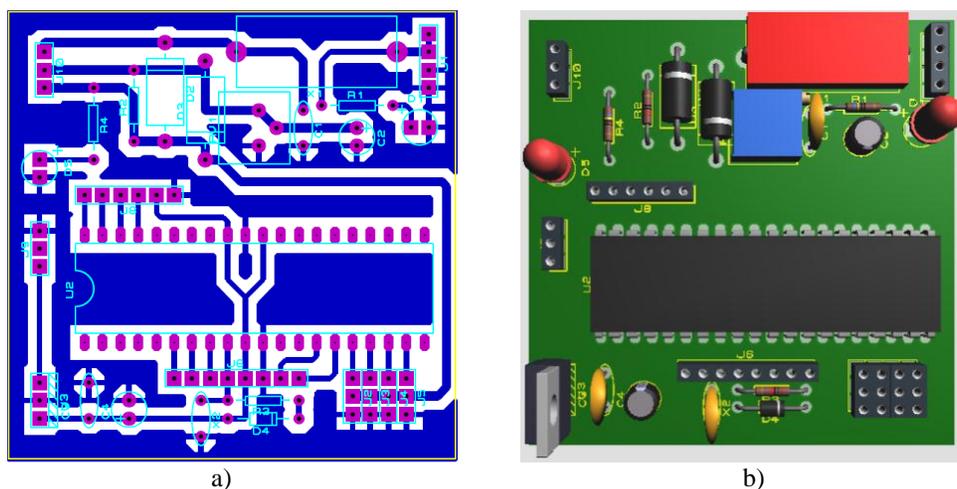
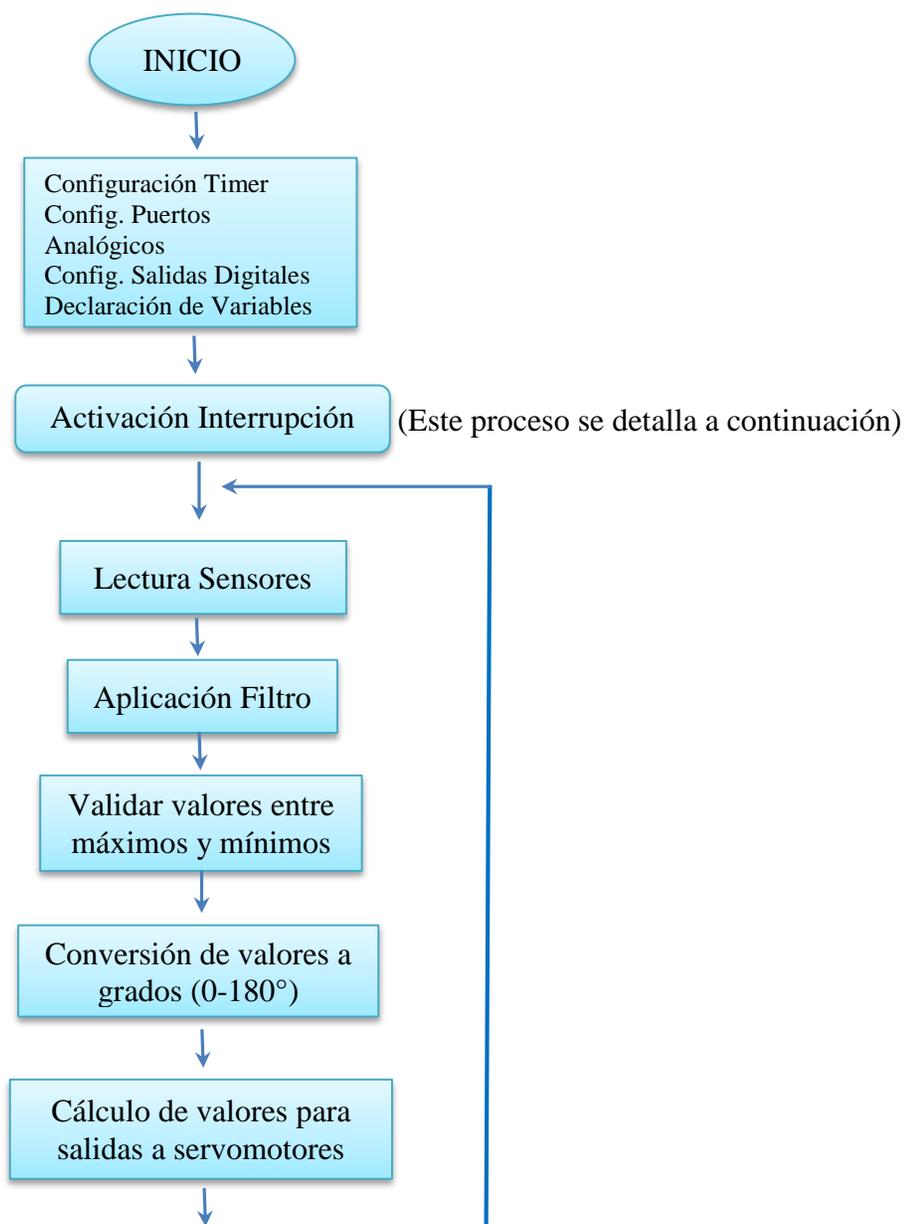


Figura 3.8: a) Rutas del PCB del circuito, b) Vista en 3D del PCB

Fuente: Autor

3.4 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA GENERAL

Antes de iniciar con la explicación del programa del microcontrolador, es necesario definir el diagrama de flujo del mismo, que servirá como guía para definir las variables a utilizar y las subrutinas necesarias para lograr el funcionamiento óptimo de todo el sistema. Enseguida se muestra el esquema y luego una descripción cada bloque del flujograma.



Configuración: El programa inicia con la configuración de los puertos de entrada y salida a utilizarse. De igual manera se hace con el timer que va a generar la señal PWM para el funcionamiento de los actuadores.

Para nuestro caso se inició configurando el puerto A, el cual contiene las entradas analógicas del microcontrolador. Esto fue necesario ya que todos los sensores trabajan con una señal de éste tipo.

Al mismo tiempo se activó el puerto D como salida, para la generación de los pulsos necesarios hacia los servomotores.

Se utilizó el timer 0, para los cálculos de la señal PWM de los actuadores. Este se lo configuro en modo interrupción para facilitar la programación.

Timer por Interrupción: Esta configuración nos indica que el microcontrolador va a ejecutar una acción, durante el conteo de tiempo que realiza el timer. Esta acción es la activación de las salidas digitales para la ejecución de movimientos a través de los servomotores.

Para realizar este proceso es necesario realizar una serie de cálculos, para obtener el ciclo de trabajo al que operan los servomotores. Este ciclo comprende un periodo de 20ms. Con un pulso alto que debe estar entre los 0.5ms a 2ms, para efectuar el giro de 0° a 180° del actuador.

En la hoja de datos del microcontrolador muestra la ecuación necesaria para establecer estos tiempos. Dicha fórmula se presenta a continuación:

$$T = \frac{1}{f_{CPU}} * (2^{resolucion\ timer} - TCNT0) * preescaler$$

Ecuación 4. Formula Registro Timer0

Nos propusimos obtener un periodo T de 0.02ms, con prescaler de 1, también se fijó la frecuencia del reloj en 8Mhz y la resolución del timer es de 8 bits.

De la ecuación anterior obtenemos que: $TCNT0 = 2^{resol.timer} - \frac{f_{CPU} * T}{prescaler}$

$$TCNT0 = 2^8 - \frac{8MHz * 0.02ms}{1}$$

$$TCNT0 = 96 = 0x60$$

Luego de realizar las pruebas al programa, se obtuvo que el timer nos genera un periodo de 0,035ms. Esto se debe a que se añadieron las instrucciones para el giro de los servomotores, y por ende aumenta el tiempo del ciclo.

El periodo final de 20ms, se logra después de 571 ciclos de conteo. Este valor fue obtenido de la siguiente manera:

$$\frac{20ms}{0,035ms} = 571,42$$

El ciclo útil de trabajo del servomotor entre 0.5ms y 2ms, se encuentra entre 14 y 50 ciclos de conteo.

$$\frac{0,5ms}{0,035ms} = 14,28 \qquad \frac{2ms}{0,035ms} = 53,14$$

Lectura de sensores: Aquí es donde inicia la adquisición de datos de los sensores, se escogió una frecuencia de 1KHz con el fin de obtener un mayor número de muestras y así mejorar la precisión de giro del servomotor, al momento de ejecutar el movimiento de los dedos en el guante sensorizado. Esto hará que el movimiento del brazo robótico también sea más prolijo.

Filtro digital: Se decidió utilizar un filtro, debido a que el sensor tenía una señal un tanto variable, por lo que se utilizó un filtro promediador. Un filtro de media móvil o filtro promediador es un

filtro con características de tipo "pasa bajo" y se utiliza principalmente para "suavizar" la señal y tratar de eliminar los cambios abruptos que puedan ocurrir en la señal. Mientras mayor sea el número de muestras con que se realiza el promedio, mayor será el "suavizado", pero si se utilizan muchas muestras, este tipo de filtro puede llegar a distorsionar la señal real. Se trata de un filtro de tipo IIR (Arduino fóruns, 2016).

Los filtros IIR necesitan un orden menor que los FIR para lograr la misma atenuación a cierta frecuencia, pero estos no siempre pueden llegar a ser estables y, además la respuesta de la fase no es lineal. Otra característica es que, para implementarlos se necesita guardar en memoria no sólo algunos valores de la entrada, si no también algunos de la salida, por lo que depende de salidas anteriores o pasadas (Arduino fóruns, 2016).

Para nuestro programa se utiliza dos números de muestras y se realiza dicho promedio, el cual se guarda en una nueva variable, así:

```
acumulador1=actual;  
acumulador2=anterior;  
acumulador3=(acumulador1-acumulador2) / 2;  
actual=acumulador3;
```

Para que el filtrado sea de mayor efectividad, se realiza este procedimiento 20 veces dentro de un ciclo, antes de actualizar la variable final.

Validación entre máximos y mínimos: Aquí se realiza una supresión de valores en cada extremo de la señal obtenida, con el fin de establecer un límite de giro de los servomotores.

Estos valores fueron adquiridos a través de la comunicación serial y fueron fijados, luego de realizar un análisis a dichos datos.

Conversión de valores a grados: En esta sección se realiza un cambio de escala de los valores y al mismo tiempo se cambia los valores analógicos a grados para el servomotor. Este proceso se realiza a través de la siguiente fórmula:

```
float map (float x, float in_min, float in_max, float out_min, float out_max)
{
  return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min;
}
```

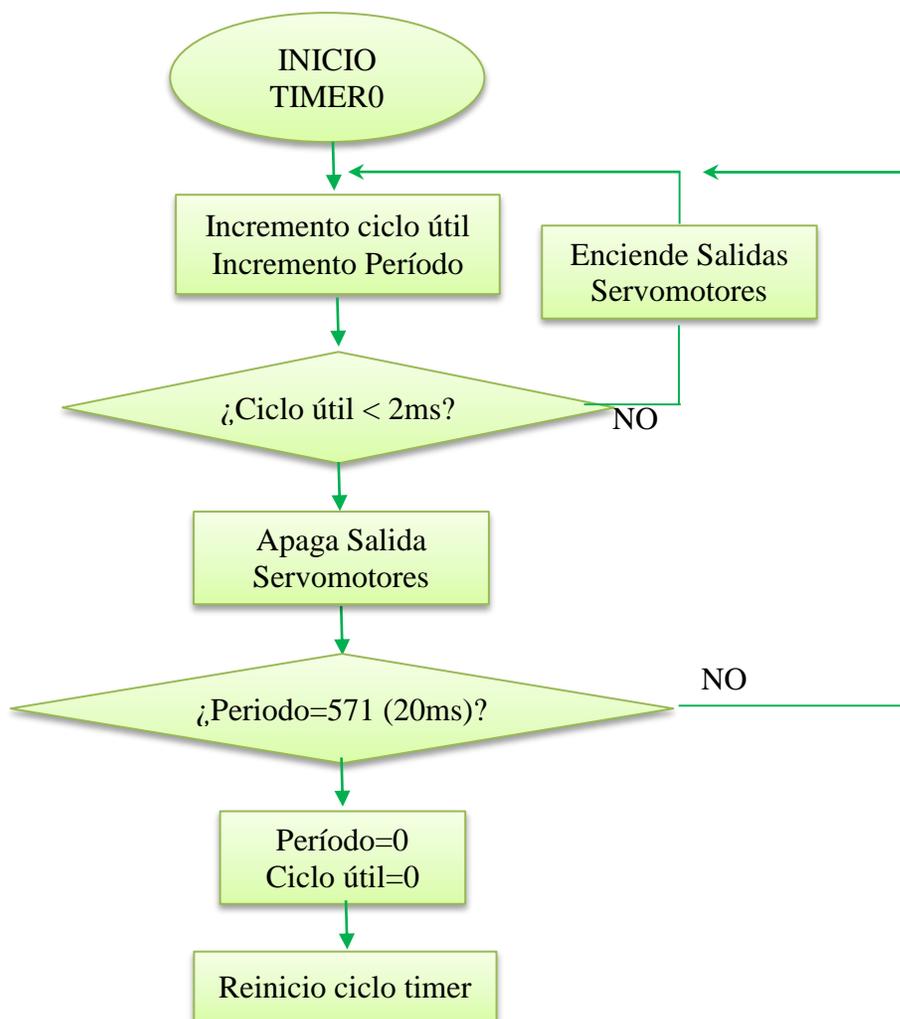
Esta ecuación se obtuvo de un artículo de Arduino. Dicha ecuación se conoce como función map, en la cual se ingresan los valores mínimo y máximo de entrada, y los valores mínimo y máximo a los cuales se quiere transformar.

Cálculo de valores para salidas a servomotores: En esta sección se transforma los grados obtenidos en la función anterior, a valores de conteo del timer. Para esto fue necesario encontrar el factor de conversión, de la siguiente manera:

$$\left(\frac{\text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}}{\text{Valor máximo giro}} * x\right) + \text{Valor mínimo} = \left(\frac{55 - 14}{180} * x\right) + 14$$

Se resta el valor máximo del valor mínimo del ciclo útil de trabajo del servomotor y se divide para valor máximo de giro, esto se multiplica por el valor a encontrar (x) y se suma el valor mínimo del ciclo útil de trabajo.

El siguiente diagrama de flujo describe la subrutina de Interrupción del timer:



3.5 DESCRIPCION DEL PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR

Una vez que se ha realizado la configuración necesaria del microcontrolador, es decir, previamente iniciar los puertos y modo de operación del timer. El programa arranca adquiriendo los datos de los sensores, a través del puerto analógico del controlador.

Después de adquiridos los datos analógicos, se realiza la conversión de los mismos a valores digitales, para poder procesar el ángulo requerido por cada servomotor. Esto se realiza

calculando el ancho de pulso de la señal PWM, antes de ser enviada a los actuadores mencionados.

En seguida, se describe las partes de dicho programa de manera más detallada:

1. Configuración de datos generales

Se da una explicación de los valores esenciales para el inicio de programa:

```
#include <mega16a.h> //Añade el modelo del microcontrolador
#include <delay.h> //Añade librería de retardos
#include <iobits.h> //Librería de trabajo para instrucciones bit a bit
#include <stdio.h> //Añade funciones para envío de datos
#include <stdlib.h> //Librería para envío de datos por el puerto serial
```

Se define el pin AREF como referencia para el modulo análogo/digital.

```
// Voltage Reference: AREF pin
#define ADC_VREF_TYPE ((0<<REFS1) | (0<<REFS0) | (0<<ADLAR))
```

Se declaran variables para la lectura de los datos ingresados en el puerto analógico:

```
unsigned int mu_val,pu_val,in_val,me_val; //Variables de lectura analógica
```

Se declaran variables para el conteo del ciclo de trabajo para los servomotores:

```
const float mp2=14.0, mx2=50.0; //para 0,5 ms cambiar por 14 y para 2 ms cambiar por 50
```

Se declaran variables para almacenar la posición del servomotor de 0 a 180°:

```
float s0,s1,s2,s3; //Variables para posición de 0 a 180 grados
```

Se declaran variables auxiliares para filtro de señal de los sensores, esto es necesario ya que el filtro digital necesita de un valor anterior para el inicio del suavizado de la señal.

```
float anterior_s0=1;
float anterior_s1=1;
float anterior_s2=1;
float anterior_s3=1;
```

Variables auxiliares utilizadas posteriormente.

```
float factor_s2;
```

```
unsigned int i=0;
```

2. Configuración del timer y señales de los servomotores

Para este proceso necesitamos dos variables para el conteo del periodo y el conteo de ciclo de trabajo de cada servomotor. Se necesita establecer un periodo de 20ms y un ciclo de 0,5ms a 2ms que es el valor estándar para el funcionamiento óptimo de los servos.

```
static unsigned int periodo,duty;//Contadores periodo y ciclo útil
```

Vector que almacena los datos que salen hacia los servomotores a través del puerto digital. Se establece el número 14 como inicio, que indica que el ciclo útil empieza en 0,5ms.

```
static unsigned char salida[4]={14,14,14,14};//Vector de salida de datos
```

Se configura el timer0 del microcontrolador en modo interrupción:

```
// Timer 0 overflow interrupt service routine
interrupt [TIM0_OVF] void timer0_ovf_isr(void)
{
    periodo++;//incrementa periodo
    duty++; //incrementa ciclo útil
}
```

En esta parte se mantiene el pulso en alto del pin respectivo para cada servomotor y se mantiene así hasta que se cumple el ciclo de trabajo y por ende controla el ángulo de giro para cada uno de ellos.

```
if(duty<=salida[0]) //Pulso en alto para servo 1
{
    SETBIT(PORTD,2);
}
else
{
    CLRBIT(PORTD,2);
}

if(duty<=salida[1]) // Pulso en alto para servo 2
{
```

```

        SETBIT(PORTD,3);
    }
    else
    {
        CLRBIT(PORTD,3);
    }

    if(duty<=salida[2]) // Pulso en alto para servo 3
    {
        SETBIT(PORTD,4);
    }
    else
    {
        CLRBIT(PORTD,4);
    }

    if(duty<=salida[3]) // Pulso en alto para servo 4

    {
        SETBIT(PORTD,5);
    }
    else
    {
        CLRBIT(PORTD,5);
    }

```

Una vez que el conteo ha llegado a 571 se completa el periodo de funcionamiento del servomotor, este valor se determinó a través de pruebas. Con esto es necesario reiniciar el conteo para mantener el rango de operación de los servomotores.

```

if(periodo==571) //Conteo en 600 completa los 20ms
{
    periodo=0; //Reinicia periodo
    duty=0; //Reinicia ciclo útil
}

TCNT0=0x60; // Registro del timer para empezar conteo
// Interrupción cada 0,02ms
}

```

3. Conversión valores analógicos en digitales

La siguiente subrutina convierte los valores obtenidos por el puerto analógico en valores digitales, para que puedan ser utilizados en el resto del programa. Este proceso es realizado automáticamente por el microcontrolador.

```

unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)
{
    ADMUX=adc_input | ADC_VREF_TYPE;
    delay_us(10);
    ADCSRA|=(1<<ADSC);
    delay_us(100);
    while ((ADCSRA & (1<<ADIF))==0);
    ADCSRA|=(1<<ADIF);
    return ADCW;
}

```

4. Determinación del ángulo de giro

Esta subrutina transforma el valor de multiplicación para cambiar el valor dentro de 180° en otro valor para el timer de 14 a 50 para cumplir los 2ms máximos del ciclo de trabajo del servomotor.

```

void calcula_parametros()
{
    factor_s2=mx2-mp2; //factor de conversión
    factor_s2/=180.0;
}

```

La siguiente subrutina toma el valor de ángulo de giro y establece un valor máximo y mínimo, para el funcionamiento correcto del servomotor, eliminando ruidos y asegurando que no se exceda el límite de operación de cada actuador.

```

void calcula_movimiento()
{
    float acumulador;

    acumulador=factor_s2*s0;
    acumulador+=mp2;
    salida[3]=acumulador;

    acumulador=factor_s2*s1;
    acumulador+=mp2;
    salida[0]=acumulador;

    acumulador=factor_s2*s2;
    acumulador+=mp2;
    salida[1]=acumulador;
}

```

```

    acumulador=factor_s2*s3;
    acumulador+=mp2;
    salida[2]=acumulador;
}

```

5. Subrutina auxiliar

En esta sección del programa se leen los valores que llegan al puerto analógico y lo maximizan para controlar de mejor manera el giro de los servomotores. Se trata de una escala de datos para lograr el giro entre 0° y 180° con el valor correspondiente que se lee de cada sensor de flexión.

```

float map(unsigned int x, float x1, float y1, float x2, float y2)
{
    return (x - x1) * (y2 - x2) / (y1 - x1) + x2;
}

```

6. Lectura de datos y filtro

Esta subrutina lee todos los valores analógicos proporcionados por los sensores, en su respectivo canal al que están conectados.

```

void lectura()
{
    mu_val=read_adc(0);
    pu_val=read_adc(1);
    in_val=read_adc(2);
    me_val=read_adc(3);
}

```

La siguiente sección del programa, es un filtro digital IIR para la lectura de datos de los sensores. Esto se realizó con el fin de evitar valores que puedan generar ruido y que afecten de manera representativa el funcionamiento final de los servomotores.

Lo que hace la subrutina es tomar dos valores y calcula un promedio de los mismos hasta obtener un valor estable para enviar al servomotor.

```
unsigned int filtro(unsigned int actual, float anterior)
{
    float acumulador1,acumulador2,acumulador3;

    acumulador1=actual;
    acumulador2=(float)(anterior);
    acumulador3=(acumulador1-acumulador2)/2;
    acumulador3+=acumulador2;
    return actual=(unsigned int)(acumulador3);
}
```

7. Configuración Principal y ciclo infinito del programa

```
void main(void)
{
```

Configura los registros del puerto A como entrada y los demás puertos como salida respectivamente.

```
DDRA=0x00;//Puerto A entrada
PORTA=0x00;//Desactiva pull-up

DDRB=0xFF;
PORTB=0x00

DDRC=0xFF;
PORTC=0x00;

DDRD=0xFF;
PORTD=0x00;
```

Se llama la subrutina para determinar el factor de conversión de ángulo en valor para el ciclo de trabajo.

```
calcula_parametros();
```

Configuración del timer 0 en modo interrupción.

```

    TCCR0=(0<<WGM00) | (0<<COM01) | (0<<COM00) | (0<<WGM01) | (0<<CS02) | (0<<CS01) |
(1<<CS00);
    TCNT0=0x60;
    OCR0=0x00;

    // Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
    TIMSK=(0<<OCIE2) | (0<<TOIE2) | (0<<TICIE1) | (0<<OCIE1A) | (0<<OCIE1B) |
(0<<TOIE1) | (0<<OCIE0) | (1<<TOIE0);

```

Esta sección no es indispensable en el programa, debido a que es la encargada de activar la comunicación serial del microcontrolador con la PC. Esto se realizó de manera provisoria con el fin de obtener los datos que adquiriría el puerto analógico, y realizar las operaciones respectivas, como el filtro y validación de máximos y mínimos.

```

    // USART initialization
    // Communication Parameters: 8 Data, 1 Stop, No Parity
    // USART Receiver: Off
    // USART Transmitter: On
    // USART Mode: Asynchronous
    // USART Baud Rate: 9600

    UCSRA=(0<<RXC) | (0<<TXC) | (0<<UDRE) | (0<<FE) | (0<<DOR) | (0<<UPE) | (0<<U2X) |
(0<<MPCM);
    UCSRB=(0<<RXCIE) | (0<<TXCIE) | (0<<UDRIE) | (0<<RXEN) | (1<<TXEN) | (0<<UCSZ2) |
(0<<RXB8) | (0<<TXB8);
    UCSRC=(1<<URSEL) | (0<<UMSEL) | (0<<UPM1) | (0<<UPM0) | (0<<USBS) | (1<<UCSZ1) |
(1<<UCSZ0) | (0<<UCPOL);
    UBRRH=0x00;
    UBRRL=0x33;

```

Configura e inicializa el Puerto A como entrada analógica de datos.

```

    // ADC initialization
    // ADC Clock frequency: 1000,000 kHz
    // ADC Voltage Reference: AREF pin
    // ADC Auto Trigger Source: Free Running
    ADMUX=ADC_VREF_TYPE;
    ADCSRA=(1<<ADEN) | (0<<ADSC) | (1<<ADATE) | (0<<ADIF) | (0<<ADIE) | (0<<ADPS2) |
(1<<ADPS1) | (1<<ADPS0);
    SFIOR=(0<<ADTS2) | (0<<ADTS1) | (0<<ADTS0);

    // Global enable interrupts
    #asm("sei")

```

Aquí inicia el ciclo infinito de programa, donde se realizará todo el procesamiento general de toda la información.

```
while (1)
{
```

En esta parte se realiza la lectura de los datos y se le envía al filtro 20 veces consecutivas para asegurar un procesamiento óptimo de filtración.

```
for(i=0;i<20;i++)
{
    lectura();
    mu_val=filtro(mu_val,anterior_s0);
    anterior_s0=mu_val;

    pu_val=filtro(pu_val,anterior_s1);
    anterior_s1=pu_val;

    in_val=filtro(in_val,anterior_s2);
    anterior_s2=in_val;

    me_val=filtro(me_val,anterior_s3);
    anterior_s3=me_val;
}
```

En esta sección se discrimina valores máximos y mínimos de los sensores para asegurar el giro de máximo de 180° de cada servomotor.

```
if(mu_val<250)    mu_val=250;
if(mu_val>500)   mu_val=500;

if(pu_val<650)   pu_val=650;
if(pu_val>820)   pu_val=820;

if(in_val<650)   in_val=650;
if(in_val>850)   in_val=850;

if(me_val<650)   me_val=650;
if(me_val>850)   me_val=850;
```

Se transforman los valores de lectura analógica de los sensores en grados de giro para los servomotores.

```
s0=map(mu_val,250.0, 500.0, 180.0, 0.0);
s1=map(pu_val,650.0, 820.0, 0.0, 180.0);
s2=map(in_val,650.0, 850.0, 0.0, 180.0);
s3=map(me_val,650.0, 850.0, 0.0, 180.0);
```

Finalmente se realiza la conversión de grados a valor de timer para definir el ancho de pulso y ciclo de trabajo de los actuadores.

```
calcula_movimiento();  
delay_ms(20);
```

Con este comando se logra leer toda la información obtenida en el proceso y se envía al puerto serial para poder observar en la PC.

```
printf("A%03u%03u%03u%03u%03u%03u%03u%03u\n\r", (unsigned int) s0, (unsigned  
int)mu_val, (unsigned int) s1, (unsigned int)pu_val, (unsigned int) s2, (unsigned  
int)in_val, (unsigned int) s3, (unsigned int)me_val);  
  
    }  
}
```

El programa completo del microcontrolador se encuentra en el Anexo C, al final del texto.

Para evitar cualquier uso incorrecto del sistema, también se realizó un manual de operación, que se adjunta en el Anexo D de este documento.

CAPITULO IV

4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La etapa de prueba inició con la verificación de los datos recibidos a través del puerto analógico del microcontrolador. Esto se hizo a través de comunicación serial con la PC, con el fin de poder observar la información proporcionada por los sensores antes y después del procesamiento realizado por el programa. De igual manera se comprobó los valores generados para los servomotores y se verificó si estos eran los correctos.

En la figura 4.1 se observa la conexión del guante sensorizado con la tarjeta de control que contiene el microcontrolador, y luego se conecta a la PC a través de un puerto USB y un dispositivo adaptador USB a Serial/TTL.

Con esto se logró obtener los datos generados en el programa del microcontrolador.



Figura 4.1: Comunicación serial con PC

Fuente: Autor

4.1 COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS MOVIMIENTOS BÁSICOS DE LA MANO ROBÓTICA.

A través de la comunicación con la PC se obtuvieron una serie de datos, entre alrededor de 1000 muestras tomadas para cada sensor.

Con estos datos se realizó una gráfica de funcionamiento, en la que aparecen los valores máximos y mínimos generados por los sensores de flexión, en la ejecución de apertura y cierre de la mano.

Las gráficas de la figura 4.2, mostradas a continuación son de los valores obtenidos inicialmente, sin aplicar el filtro. En donde se observa de manera apreciable datos inesperados, con picos en alto y bajo en la curva de señal generada por cada sensor de flexión en su dedo respectivo.

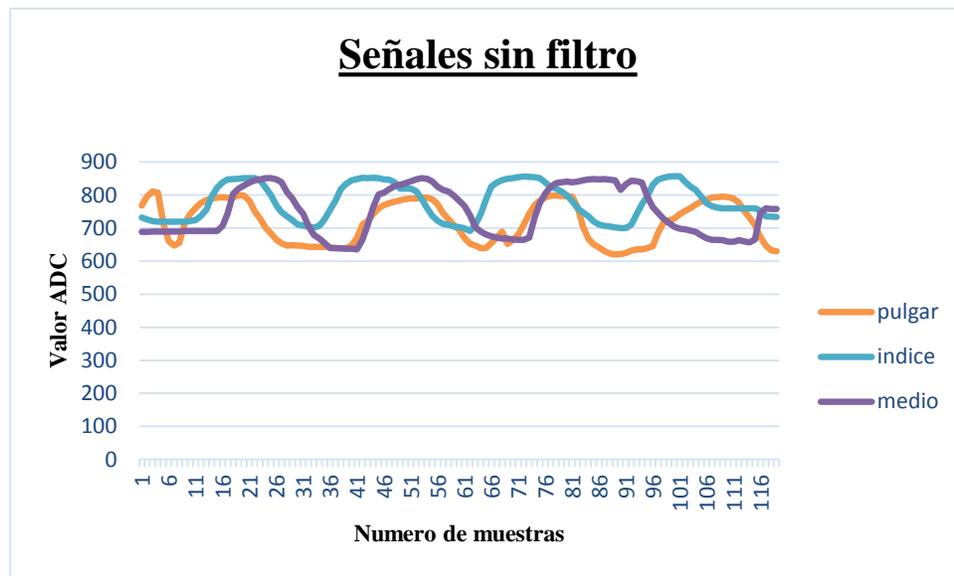


Figura 4.2: Señales sin filtro para cada dedo

Fuente: Autor

La gráfica mostrada en la figura 4.2, se genera de acuerdo a una serie de datos obtenidos a través de comunicación serial entre el microcontrolador y la PC. Estos datos se detallan a continuación en una tabla, con los valores más relevantes debido a que el número de muestras supera las cien.

Se debe mencionar que los números mostrados en la tabla (figura 4.3), son caracteres ASCII (Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información), entregado por la conversión analógica/digital del microcontrolador. Este valor va de 0 a 1023, donde se representa el voltaje de 0 a 5V respectivamente. Para nuestro proyecto, los valores comprenden entre 3V y 4V, por lo que los valores están entre 650 y 850.

	Voltaje (ASCII)									
Nro. de muestras	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Sensor pulgar	719	716	660	793	664	641	769	722	655	792
Sensor índice	732	724	850	708	848	819	699	850	782	700
Sensor medio	691	829	763	637	836	783	665	841	816	704

Figura 4.3: Tabla con valores de sensores

Fuente: Autor

Como se mencionó al inicio de esta sección, se puede observar en las gráficas que, en la curva de voltaje generada por los sensores, aparecen datos inesperados, que puede generar un mal funcionamiento a los actuadores. Por esta razón se decidió implementar un filtro digital en el programa del microcontrolador.

Con los valores que se tomaron de referencia, y al analizar las gráficas tomadas de los sensores, se decidió implementar un filtro suavizador IIR (Filtros de Impulso de Respuesta Infinita).

Estos filtros son llamados de respuesta infinita, porque el proceso de filtrado se realiza por medio de la evaluación de las ecuaciones de diferencias que regulan el sistema. Como la ecuación de

diferencias depende de las salidas anteriores del filtro, existe una dependencia de los infinitos estados anteriores de la variable de salida a la variable de salida actual. Con este proceso se eliminan valores pico en alto y bajo en la señal de entrada y se corrige el error experimentado inicialmente.

A continuación, se muestran las gráficas de las señales con filtro, figura 4.5.

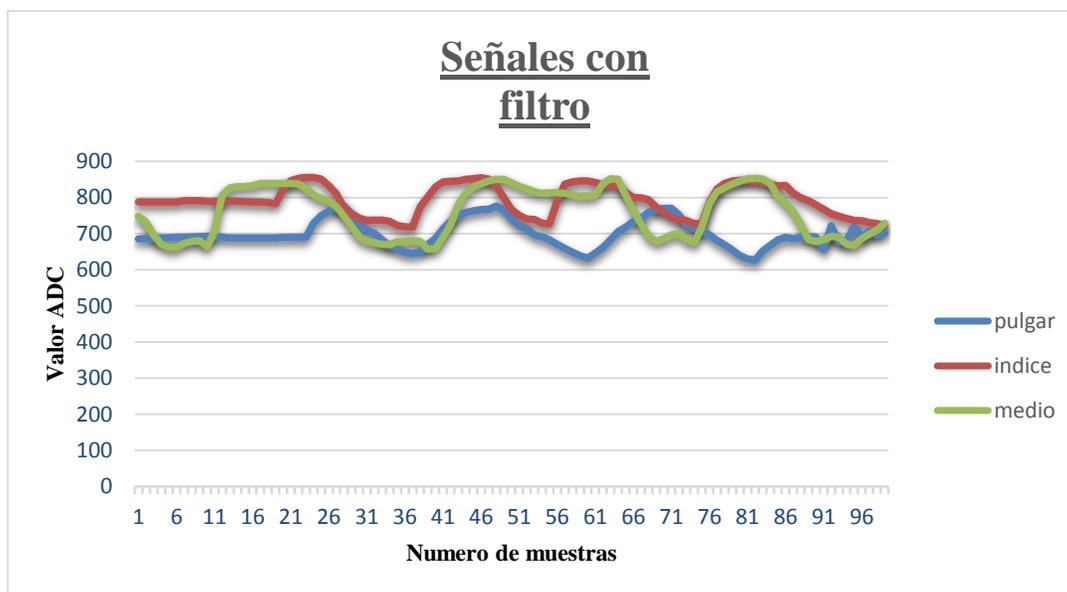


Figura 4.4: Señal de sensor del dedo medio

Fuente: Autor

Se puede apreciar claramente que se han eliminado los picos de señal, por lo que el funcionamiento de los servomotores también será más eficaz.

4.2 VERIFICACIÓN DEL MÉTODO DE CONTROL UTILIZADO

Para la verificación del método de control, se realiza una tabla con los valores obtenidos para cada sensor, de igual manera los ángulos obtenidos a través de mediciones que se

realizaron para la comprobación. Se puede establecer de acuerdo a estos valores, que cada sensor tiene diferente funcionamiento dependiendo de las dimensiones de los dedos en donde están ubicados, por lo tanto, cada servomotor que ejecuta el movimiento, será en diferente ángulo de giro. Esta tabla se puede observar en la figura 4.5.

Los valores de voltajes mínimos se tomarán como posición inicial de cada servomotor, es decir en esta posición el servomotor debe estar en 0° .

De igual manera con los voltajes máximos, se establecerá la posición máxima para cada servomotor, en este caso será 180° . Estos datos se transforman, en la sección respectiva del programa implementado para el microcontrolador.

Dedos	Pulgar	Índice	Medio	Valor ADC	Servo
Ángulos sensor ($^\circ$)	Ángulos estructura ($^\circ$)			ASCII	Ángulo ($^\circ$)
-20	0	0	0	650	50
-10	0	0	0	650	70
0	0	0	0	670	90
10	10	12	12	690	120
20	20	25	25	710	140
30	30	35	35	730	145
40	40	45	45	750	150
50	50	55	55	770	160
60	60	65	65	790	165
70	70	75	75	810	170
80	80	85	85	830	175
90	90	90	90	850	180

Figura 4.5: Señal del dedo pulgar con filtro

Fuente: Autor

Los valores iniciales para cada ángulo se tomaron de un artículo realizado por un médico fisioterapeuta de la Universidad Autónoma de México (UNAM). A continuación se muestran las medidas de ángulos estándar en las figuras 4.6 a) y b) respectivamente.

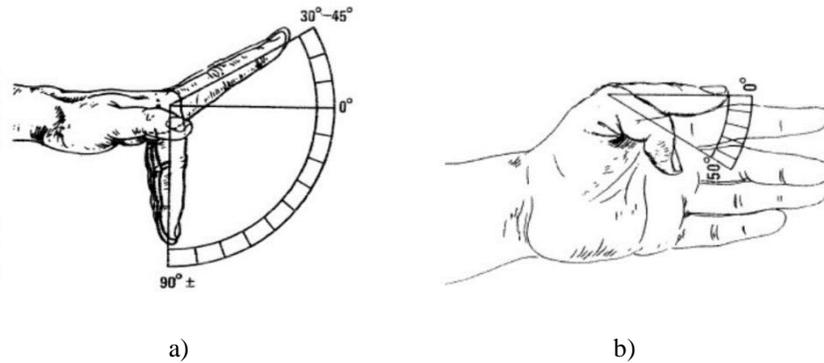


Figura 4.6: a) Medidas de flexión estándar para los dedos índice, anular y medio; b) Medidas de flexión estándar para el dedo pulgar

Fuente: Dr. Rommel Granados López, 2013

Los ángulos de la estructura se midieron con un graduador, para comprobar que el ángulo de entrada sea similar al de salida. Los valores del puerto Analógico/Digital y grados del servomotor, se obtuvieron a través de la comunicación serial.

En las figuras 4.7 a), b) y c); se muestra el proceso realizado para la toma de datos externos que se utilizaron en la tabla anterior.



a)



b)



c)

Figura 4.7: a) Medida del ángulo en dedos abiertos; b) Medida del ángulo con dedos flexionados; c) Toma de datos a través del puerto serial en la PC

Fuente: Autor

Una vez realizadas las mediciones respectivas, se procedió a verificar que el prototipo ejecute los movimientos deseados y generados por el guante sensorizado. Es decir que el guante y el brazo robótico, ejecuten la misma acción a la par.

Esto se realiza una vez que se han probado que los valores de los sensores son correctos, al igual que la señal de pulso para los servomotores.



Figura 4.8: Verificación de movimiento apertura dedos

Fuente: Autor



Figura 4.9: Verificación de movimiento flexión dedo índice

Fuente: Autor

De esta manera se concluye la verificación del funcionamiento total del proyecto, en vista de que cumple con todos los movimientos esperados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez que se han realizado todas las pruebas necesarias, analizando los resultados y experiencias adquiridas del trabajo práctico realizado, es posible definir las siguientes conclusiones y recomendaciones:

CONCLUSIONES

- El uso de un guante sensorizado que detecta los movimientos de flexión-extensión de los dedos facilitó la implementación de un control que permitió reproducir de manera adecuada estos movimientos.
- Para el desarrollo de este tipo de proyectos existe una gran variedad de parámetros, así como materiales físicos y electrónicos, por lo que se debe elegir los que tengan las características más convenientes y que se adapten de la mejor manera para cumplir el objetivo planteado. Un ejemplo de esto, son los sensores de flexión colocados en el guante, que son de gran tamaño en comparación con otros modelos. Por lo tanto, requieren de una ubicación exacta para obtener un mayor rango de variación de voltaje de salida, y así lograr una mejor apreciación de la posición de los dedos.
- La herramienta de software de diseño CAD SolidWorks que se utilizó para el análisis cinemático del sistema, posibilitó tener una visión clara de cómo afectan las cargas a la estructura, a través de una animación interactiva que muestra los valores de diseño más importantes, como Factor de seguridad, Esfuerzo de Von Mises y deformaciones o desplazamientos que se pueden generar en el sistema.

- La utilización de dos fuentes por separado para la etapa de control y la etapa de actuadores, mejoró considerablemente el funcionamiento de los servomotores, debido a que se eliminó fluctuaciones de voltaje que pueden hacer fallar tanto a los sensores de flexión, como al microcontrolador. Y de esta manera se obtuvo que los movimientos realizados por los dedos de la mano robótica, sean más uniformes.
- La estrategia de control utilizada cumple con normalidad el funcionamiento esperado ya que no se necesitó medir la precisión de la posición y fuerza de los dedos. Para obtener un modelo dinámico y de mayor precisión en el movimiento de los dedos de la mano robótica, se pudo utilizar un control en lazo cerrado, pero esto obligaría a utilizar más recursos y herramientas de software más avanzadas. Sin embargo, el método utilizado cumple con el funcionamiento planteado como objetivo.
- Dado que las señales de los sensores son analógicas lo cual aumenta la precisión, pero al mismo tiempo puede generar errores en el funcionamiento, fue necesario la inclusión un filtro para la eliminación de ruidos y errores generados inesperadamente.

RECOMENDACIONES

- Para obtener un menor número de muestras y menor tiempo en la obtención de datos, se recomienda utilizar una interfaz con mayor velocidad de transferencia que la comunicación serial. Se podría utilizar transmisión de datos por puerto paralelo o una interface USB.
- Para mejorar el proyecto desarrollado, se plantea la utilización de sensores de presión en los dedos de la mano robótica, de igual forma se puede utilizar otro tipo de sistema

mecánico para el movimiento de los dedos, aun cuando el sistema por hilos tensores es el más utilizado actualmente.

- Otra mejora que se puede implementar al proyecto, es la utilización de algún tipo de comunicación inalámbrica entre el guante sensorizado y la interfaz de control de movimiento. Esto lograría mayor independencia y libertad de movimiento del guante, y de igual manera del brazo robótico.
- Para el desarrollo de estos proyectos de investigación, es necesario encontrar los elementos necesarios de menor tamaño, de tal forma que se facilite la implementación y la movilidad de la mano robótica.
- Se recomienda desarrollar más trabajos y proyectos que ayuden a solucionar problemas sociales, y con mucha mayor importancia la de inclusión de personas discapacitadas en el entorno y la sociedad.
- Como una recomendación adicional, se plantea el uso de filtro analógico, antes que el digital, ya que de esta forma la señal será más limpia antes del ingreso al microcontrolador. Para lo cual se puede diseñar un circuito externo ya sea pasa-bajo o pasa-alto, que se encuentran en diferentes libros de electrónica. También se puede utilizar cualquiera de los esquemas planteados en la hoja de datos del sensor, que se encuentra en el Anexo F, de este documento.

BIBLIOGRAFÍA

- Norton R. (2009). *Diseño de maquinaria* (4ta ed.). México: McGraw-Hill.
- Mott, Robert L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* (4ta Ed.) México Prentice Hall Hispanoamérica S.A.
- A.I. Kapandji. (2006). *Fisiología Articular* (6ta ed.). Madrid: Editorial Medica Panamericana.
- Ogata, Katsuhiko (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. Tercera edición. Editorial Prentice Hall.
- A., M. (2000). *Principios de electrónica* (Sexta ed.). Madrid, España: McGraw Hill.
- Ruiz-Velasco Sánchez, Enrique (2013). *Educatrónica: innovación en el aprendizaje de las ciencias y la tecnología*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Barrientos, Antonio; Peñín, Luis Felipe; Balaguer, Carlos (2007). *Fundamentos de Robótica* (2da ed.). España: McGraw-Hill.
- Ferré Masip, Rafael. *Fabricación asistida por computador-CAM*. España: Marcombo.
- Gibilisco, Stan. (2010). *Manual portátil de electrónica*. México: McGraw-Hill.
- Kumar Saha, Subir (2010). *Introducción a la Robótica*. España: McGraw-Hill.
- Reyes Cortés, Fernando (2011). *Robótica: control de robots manipuladores*. México: Alfaomega Grupo Editor.
- F., T. (2002). *Robots y Sistemas Sensoriales* Segunda Edición. España: Prentice Hall.
- Miguel A. Arenas, José M. Palomares, Loïc Girard, Joaquín Olivares, José M. Castillo-Secilla (2011), *Diseño y Construcción de un Guante de Datos mediante Sensores de Flexibilidad y Acelerómetro*, Artículo científico.

- Ñeco García, Ramón P.; Reinoso García, Oscar; García Aracil, Nicolás (2013). *Apuntes de Sistemas de Control*. España: ECU.
- Bolton, William; Lomelí Díaz, Luz Ángeles; Grillo Giannetto, Marcelo (2013). *Mecatrónica: sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario* (5a. ed.). México: Alfaomega Grupo Editor.
- Pazmiño Cruzatti, Iván (2008). *Tiempo de investigar, investigación científica I: cómo hacer una tesis de grado*. Quito: EDITEKA.
- Diftler, M. A., Mehling, J. S., Abdallah, M. E., Radford, N. A., Bridgwater, L. B., Sanders, A. M., ... & Hargrave, B. K. (2011, May). *Robonaut 2-the first humanoid robot in space*. In Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference.
- S. C. Jacobsen, J. E. Wood, D. F. Knutti, and K. B. Biggers. (1984) “*The UTAH/MIT dexterous hand: Work in progress*”. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 3.
- G. A. Bekey, R. Tomovic, and I. Zeljkovic. (1990) *Control Architecture for the Belgrade/USC Hand*. Dextrous Robot Hands. SpringerVerlag, NY.
- J. Butterfass M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger, (2001) “*DLR-hand II: Next generation of a robot hand*”. IEEE International Conference on Robotics & Automation.
- Touch Bionics, (2009) “*I-Limb Hand*”, disponible en Internet en: www.touchbionics.com.
- Burgos, C. Q., & Albán, O. A. V. (2010). *Diseño y construcción de una prótesis robotica de mano funcional adaptada a varios agarres* (Doctoral dissertation, Tesis

de Maestría, Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Popayan, Colombia).

- Montes, J. D., & González, J. D. (2009). *Mecanismos de transmisión y actuadores utilizados en prótesis de mano*.
- Quinayás-Burgos, C. A., Muñoz-Añasco, M., Vivas-Albán, Ó. A., & Gaviria-López, C. A. (2010). Diseño y construcción de la prótesis robótica de mano UC-1. *Ingeniería y Universidad*, 14(2).
- Gadre, D. V. (2000). *Programming and customizing the AVR microcontroller*. McGraw-Hill Professional.
- Mazidi, M. A., Naimi, S., & Naimi, S. (2010). *AVR microcontroller and embedded systems: using assembly and C*. Prentice Hall Press.
- Barrett, S. F., & Pack, D. J. (2007). *Atmel AVR microcontroller primer: Programming and interfacing*. Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems.
- ATMEL, (2014) Microcontrolador ATMEGA16 Datasheet, EEUU. Disponible en: <https://www.atmel.com/images/doc2466.pdf>
- Texas Instruments, (2013), LM338K Datasheet, EEUU, Disponible en: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm338.pdf>

ANEXOS

ANEXO A: HOJAS DE DATOS

Features

- High-performance, Low-power Atmel® AVR® 8-bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 131 Powerful Instructions – Most Single-clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 16 MIPS Throughput at 16 MHz
 - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory segments
 - 16 Kbytes of In-System Self-programmable Flash program memory
 - 512 Bytes EEPROM
 - 1 Kbyte Internal SRAM
 - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C⁽¹⁾
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
 - In-System Programming by On-chip Boot Program
 - True Read-While-Write Operation
 - Programming Lock for Software Security
- JTAG (IEEE std. 1149.1 Compliant) Interface
 - Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
 - Extensive On-chip Debug Support
 - Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits through the JTAG Interface
- Peripheral Features
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescalers and Compare Modes
 - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Four PWM Channels
 - 8-channel, 10-bit ADC
 - 8 Single-ended Channels
 - 7 Differential Channels in TQFP Package Only
 - 2 Differential Channels with Programmable Gain at 1x, 10x, or 200x
 - Byte-oriented Two-wire Serial Interface
 - Programmable Serial USART
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
- Special Microcontroller Features
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
 - Internal Calibrated RC Oscillator
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby and Extended Standby
- I/O and Packages
 - 32 Programmable I/O Lines
 - 40-pin PDIP, 44-lead TQFP, and 44-pad QFN/MLF
- Operating Voltages
 - 2.7V - 5.5V for ATmega16L
 - 4.5V - 5.5V for ATmega16
- Speed Grades
 - 0 - 8 MHz for ATmega16L
 - 0 - 16 MHz for ATmega16
- Power Consumption @ 1 MHz, 3V, and 25°C for ATmega16L
 - Active: 1.1 mA
 - Idle Mode: 0.35 mA
 - Power-down Mode: < 1 µA



8-bit AVR[®]
Microcontroller
with 16K Bytes
In-System
Programmable
Flash

ATmega16
ATmega16L

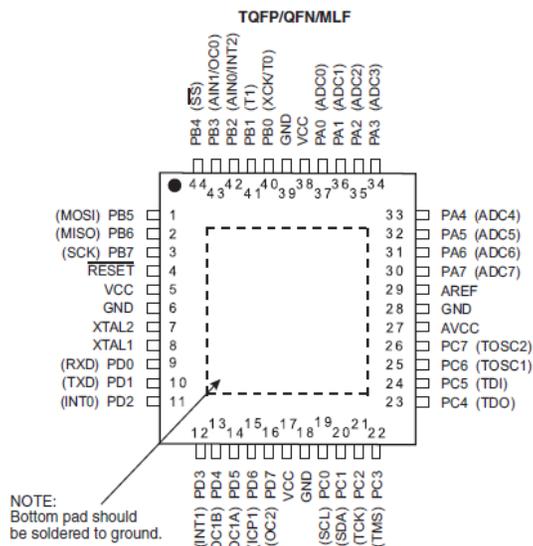
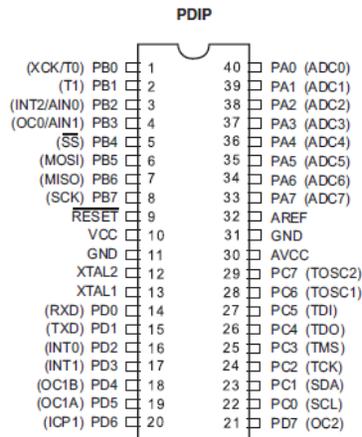
Rev. 2466T-AVR-07/10



ATmega16(L)

Pin Configurations

Figure 1. Pinout ATmega16



Disclaimer

Typical values contained in this datasheet are based on simulations and characterization of other AVR microcontrollers manufactured on the same process technology. Min and Max values will be available after the device is characterized.



LM138/LM338 5-Amp Adjustable Regulators

Check for Samples: [LM138](#), [LM338](#)

FEATURES

- Specified 7A Peak Output Current
- Specified 5A Output Current
- Adjustable Output Down to 1.2V
- Specified Thermal Regulation
- Current Limit Constant with Temperature
- P* Product Enhancement Tested
- Output is Short-Circuit Protected

APPLICATIONS

- Adjustable Power Supplies
- Constant Current Regulators
- Battery Chargers

DESCRIPTION

The LM138 series of adjustable 3-terminal positive voltage regulators is capable of supplying in excess of 5A over a 1.2V to 32V output range. They are exceptionally easy to use and require only 2 resistors to set the output voltage. Careful circuit design has resulted in outstanding load and line regulation—comparable to many commercial power supplies. The LM138 family is supplied in a standard 3-lead transistor package.

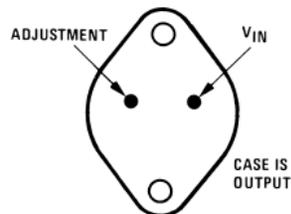
A unique feature of the LM138 family is time-dependent current limiting. The current limit circuitry allows peak currents of up to 12A to be drawn from the regulator for short periods of time. This allows the LM138 to be used with heavy transient loads and speeds start-up under full-load conditions. Under sustained loading conditions, the current limit decreases to a safe value protecting the regulator. Also included on the chip are thermal overload protection and safe area protection for the power transistor. Overload protection remains functional even if the adjustment pin is accidentally disconnected.

Normally, no capacitors are needed unless the device is situated more than 6 inches from the input filter capacitors in which case an input bypass is needed. An output capacitor can be added to improve transient response, while bypassing the adjustment pin will increase the regulator's ripple rejection.

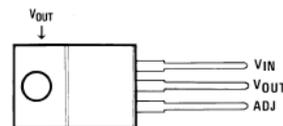
Besides replacing fixed regulators or discrete designs, the LM138 is useful in a wide variety of other applications. Since the regulator is "floating" and sees only the input-to-output differential voltage, supplies of several hundred volts can be regulated as long as the maximum input to output differential is not exceeded, i.e., do not short-circuit output to ground. The part numbers in the LM138 series which have a K suffix are packaged in a standard Steel TO-3 package, while those with a T suffix are packaged in a TO-220 plastic package. The LM138 is rated for $-55^{\circ}\text{C} \leq T_J \leq +150^{\circ}\text{C}$, and the LM338 is rated for $0^{\circ}\text{C} \leq T_J \leq +125^{\circ}\text{C}$.

Connection Diagram

Connection Diagrams



**Figure 1. (TO-3) Metal Can Package
Bottom View
See Package Number NDS0002A**



**Figure 2. (TO-220) Plastic Package
Front View
See Package Number NDE0003B**



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet. All trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1998–2013, Texas Instruments Incorporated

LM138, LM338



SNVS771B –MAY 1998–REVISED APRIL 2013

www.ti.com



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.

Absolute Maximum Ratings ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

Power Dissipation	Internally limited
Input/Output Voltage Differential	+40V, -0.3V
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Lead Temperature	
TO-3 Package (Soldering, 10 seconds)	300°C
TO-220 Package (Soldering, 4 seconds)	260°C
ESD Tolerance	TBD

- (1) Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is intended to be functional, but do not ensure specific performance limits. For ensured specifications and test conditions, see the Electrical Characteristics.
- (2) Refer to RETS138K drawing for military specifications of LM138K.
- (3) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the TI Sales Office/ Distributors for availability and specifications.

Operating Temperature Range

LM138	-55°C ≤ T _J ≤ +150°C
LM338	0°C ≤ T _J ≤ +125°C

Electrical Characteristics

Specifications with standard type face are for T_J = 25°C, and those with **boldface type** apply over **full Operating Temperature Range**. Unless otherwise specified, V_{IN} - V_{OUT} = 5V; and I_{OUT} = 10 mA. ⁽¹⁾

Symbol	Parameter	Conditions	LM138			Units
			Min	Typ	Max	
V _{REF}	Reference Voltage	3V ≤ (V _{IN} - V _{OUT}) ≤ 35V, 10 mA ≤ I _{OUT} ≤ 5A, P ≤ 50W	1.19	1.24	1.29	V
V _{RLINE}	Line Regulation	3V ≤ (V _{IN} - V _{OUT}) ≤ 35V ⁽²⁾		0.005	0.01	%/V
				0.02	0.04	%/V
V _{RLOAD}	Load Regulation	10 mA ≤ I _{OUT} ≤ 5A ⁽²⁾		0.1	0.3	%
				0.3	0.6	%
	Thermal Regulation	20 ms Pulse		0.002	0.01	%/W
I _{ADJ}	Adjustment Pin Current			45	100	μA
ΔI _{ADJ}	Adjustment Pin Current Change	10 mA ≤ I _{OUT} ≤ 5A, 3V ≤ (V _{IN} - V _{OUT}) ≤ 35V		0.2	5	μA
ΔV _{R/T}	Temperature Stability	T _{MIN} ≤ T _J ≤ T _{MAX}		1		%
I _{LOAD(Min)}	Minimum Load Current	V _{IN} - V _{OUT} = 35V		3.5	5	mA
I _{CL}	Current Limit	V _{IN} - V _{OUT} ≤ 10V		5	8	A
			DC	7	12	A
			0.5 ms Peak		1	1
		V _{IN} - V _{OUT} = 30V				
V _N	RMS Output Noise, % of V _{OUT}	10 Hz ≤ f ≤ 10 kHz		0.003		%
ΔV _R /ΔV _{IN}	Ripple Rejection Ratio	V _{OUT} = 10V, f = 120 Hz, C _{ADJ} = 0 μF		60		dB
		V _{OUT} = 10V, f = 120 Hz, C _{ADJ} = 10 μF		60	75	dB
	Long-Term Stability	T _J = 125°C, 1000 Hrs		0.3	1	%
θ _{JC}	Thermal Resistance, Junction to Case	NDS Package			1	°C/W

- (1) These specifications are applicable for power dissipations up to 50W for the TO-3 (NDS) package and 25W for the TO-220 (NDE) package. Power dissipation is specified at these values up to 15V input-output differential. Above 15V differential, power dissipation will be limited by internal protection circuitry. All limits (i.e., the numbers in the Min. and Max. columns) are specified to TI's AOQL (Average Outgoing Quality Level).
- (2) Regulation is measured at a constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to heating effects are covered under the specifications for thermal regulation.

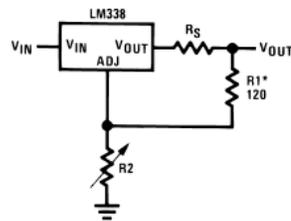


Figure 16. Regulator with Line Resistance in Output Lead

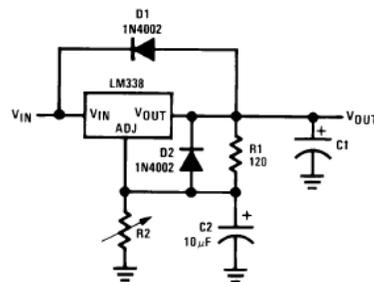
With the TO-3 package, it is easy to minimize the resistance from the case to the set resistor, by using 2 separate leads to the case. The ground of R2 can be returned near the ground of the load to provide remote ground sensing and improve load regulation.

PROTECTION DIODES

When external capacitors are used with *any* IC regulator it is sometimes necessary to add protection diodes to prevent the capacitors from discharging through low current points into the regulator. Most 20 μF capacitors have low enough internal series resistance to deliver 20A spikes when shorted. Although the surge is short, there is enough energy to damage parts of the IC.

When an output capacitor is connected to a regulator and the input is shorted, the output capacitor will discharge into the output of the regulator. The discharge current depends on the value of the capacitor, the output voltage of the regulator, and the rate of decrease of V_{IN} . In the LM138 this discharge path is through a large junction that is able to sustain 25A surge with no problem. This is not true of other types of positive regulators. For output capacitors of 100 μF or less at output of 15V or less, there is no need to use diodes.

The bypass capacitor on the adjustment terminal can discharge through a low current junction. Discharge occurs when *either* the input or output is shorted. Internal to the LM138 is a 50 Ω resistor which limits the peak discharge current. No protection is needed for output voltages of 25V or less and 10 μF capacitance. Figure 17 shows an LM138 with protection diodes included for use with outputs greater than 25V and high values of output capacitance.



D1 protects against C1
D2 protects against C2

$$V_{\text{OUT}} = 1.25V \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{\text{ADJ}} R_2$$

Figure 17. Regulator with Protection Diodes

HS-485HB Servo

MAXIMUM TORQUE ➔ **83.3 oz-in.**

MAXIMUM SPEED ➔ **0.18 sec/60°**

The HS-485HB servo is one of the best deals going. Nearly 84 oz-in. of power for under \$17. We use this servo for all types of robotic applications. HS-485HB updates the very popular HS-475HB by adding more torque and greater speed. With a top ball bearing, heavy duty, high impact Karbonite™ gears and high performance circuitry, the HS-485HB offers lots of torque and features excellent centering and resolution.

Note: The HS-485HB servo spline is slightly oversized and will be a very snug fit into broached servo accessories. After installed the first time, later assembly will be easier.

Share with friends!

694

Uses C1 Standard Spline
A1 B1 **C1** D1

[Click for more information](#)

Price: **\$16.99**
Part: **33485S**
Status: ➔ **Out of Stock**
Rotation: 90° Rotation (Stock) ▾
Direction: Clockwise (Stock) ▾
Qty: 1 ▾

➔ Analog Servo

Detailed Specifications

Control System: +Pulse Width Control 1500usec Neutral
Required Pulse: 3-5 Volt Peak to Peak Square Wave
Operating Voltage: 4.8-6.0 Volts
Operating Temperature Range: -20 to +60 Degree C
Operating Speed (4.8V): 0.22sec/60° at no load
Operating Speed (6.0V): 0.18sec/60° at no load
Stall Torque (4.8V): 66.6 oz/in. (4.8kg.cm)
Stall Torque (6.0V): 83.3 oz/in. (6.0kg.cm)
Operating Angle: 45 Deg. one side pulse traveling 400usec
Continuous Rotation Modifiable: Yes
Direction: Clockwise/Pulse Traveling 1500 to 1900usec
Current Drain (4.8V): 8mA/idle and 150mA no load operating
Current Drain (6.0V): 8.8mA/idle and 180mA no load operating
Dead Band Width: 8usec
Motor Type: 3 Pole Ferrite Motor
Potentiometer Drive: Indirect Drive
Bearing Type: Top Ball Bearing, Lower Bushing
Gear Type: Karbonite Gears
Connector Wire Length: 11.81" (300mm)
Dimensions: See Schematic
Weight: 1.59oz (45g)

General Servo Information

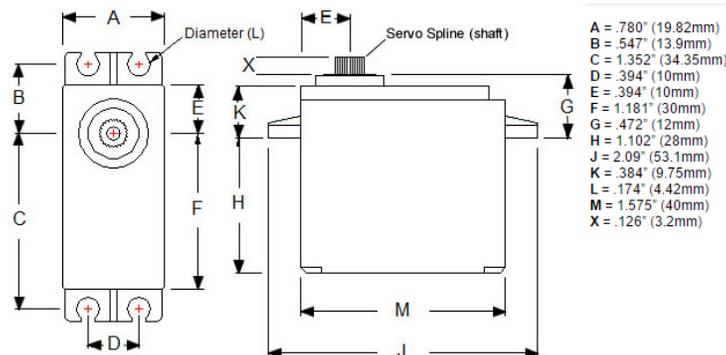
[What is a servo?](#) [Rotation direction](#)
[How servos work](#) [Connector types](#)
[What servo to use](#) [180° rotation](#)
[Servo power & speed](#) [Continuous rotation](#)

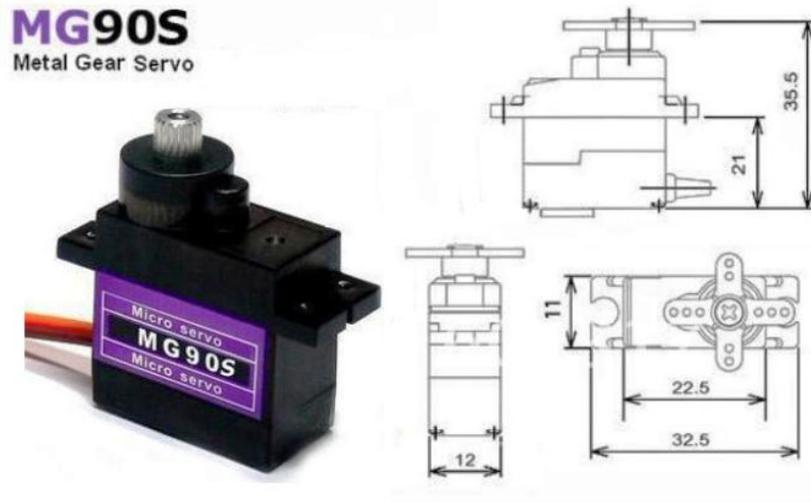
0°
1050usec 45°
1950usec 45°
600usec 90° 2400usec 90°
1500usec Neutral



Ball Bearings & Karbonite™ gears

This servo can operate 180° when given a pulse signal ranging from 600usec to 2400usec. Since most R/C controllers cannot generate this wide of signal range, you will need to purchase our [servo stretcher](#) for 180° operation.





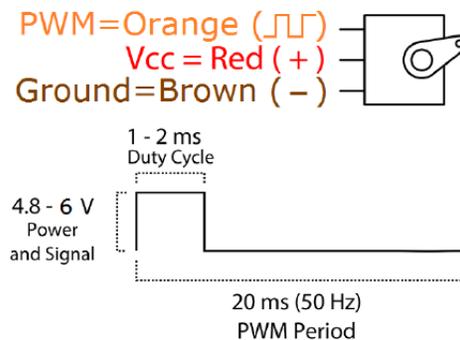
MG90S servo, Metal gear with one bearing

Tiny and lightweight with high output power, this tiny servo is perfect for RC Airplane, Helicopter, Quadcopter or Robot. This servo has *metal gears* for added strength and durability.

Servo can rotate approximately 180 degrees (90 in each direction), and works just like the standard kinds but *smaller*. You can use any servo code, hardware or library to control these servos. Good for beginners who want to make stuff move without building a motor controller with feedback & gear box, especially since it will fit in small places. It comes with a 3 horns (arms) and hardware.

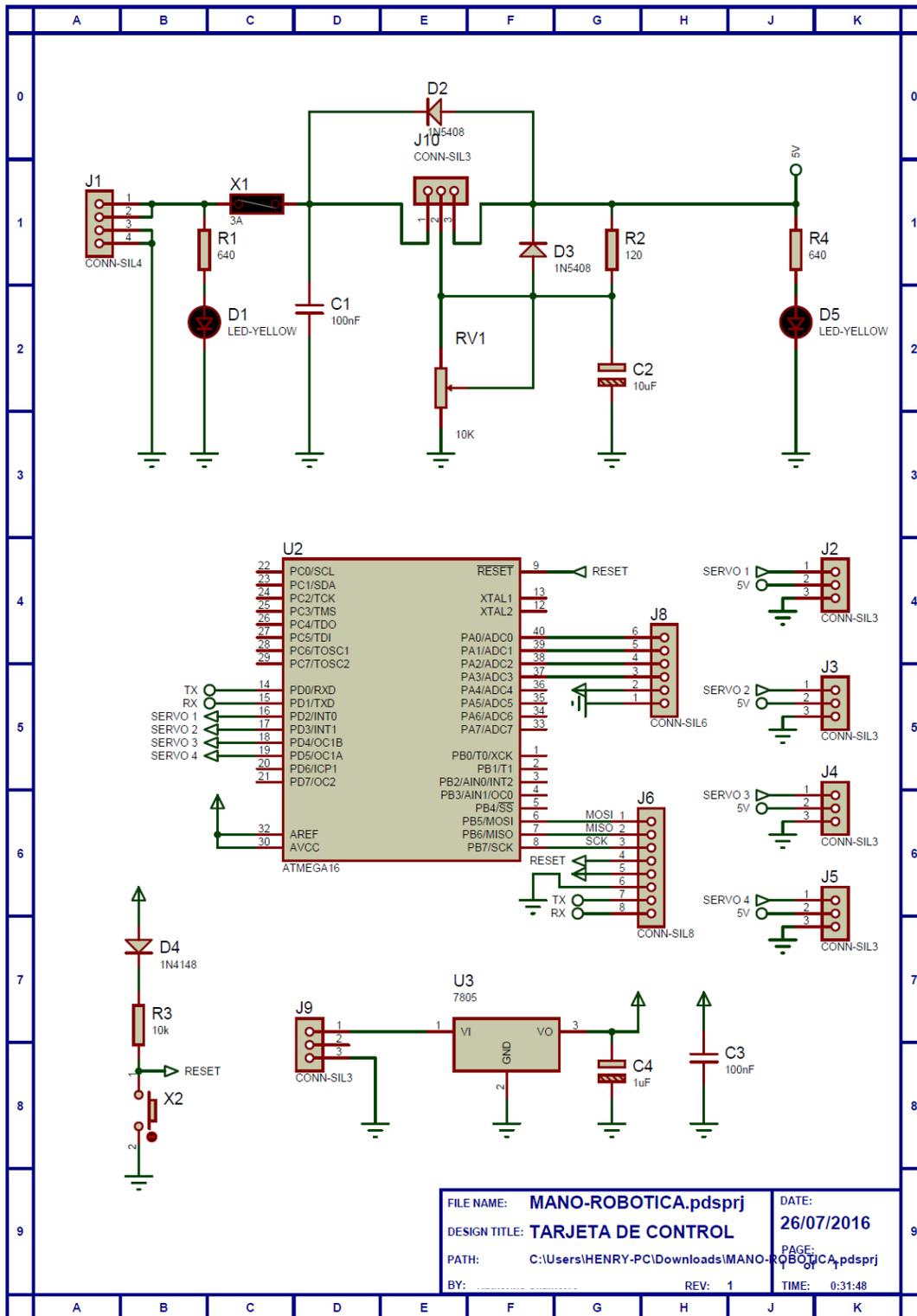
Specifications

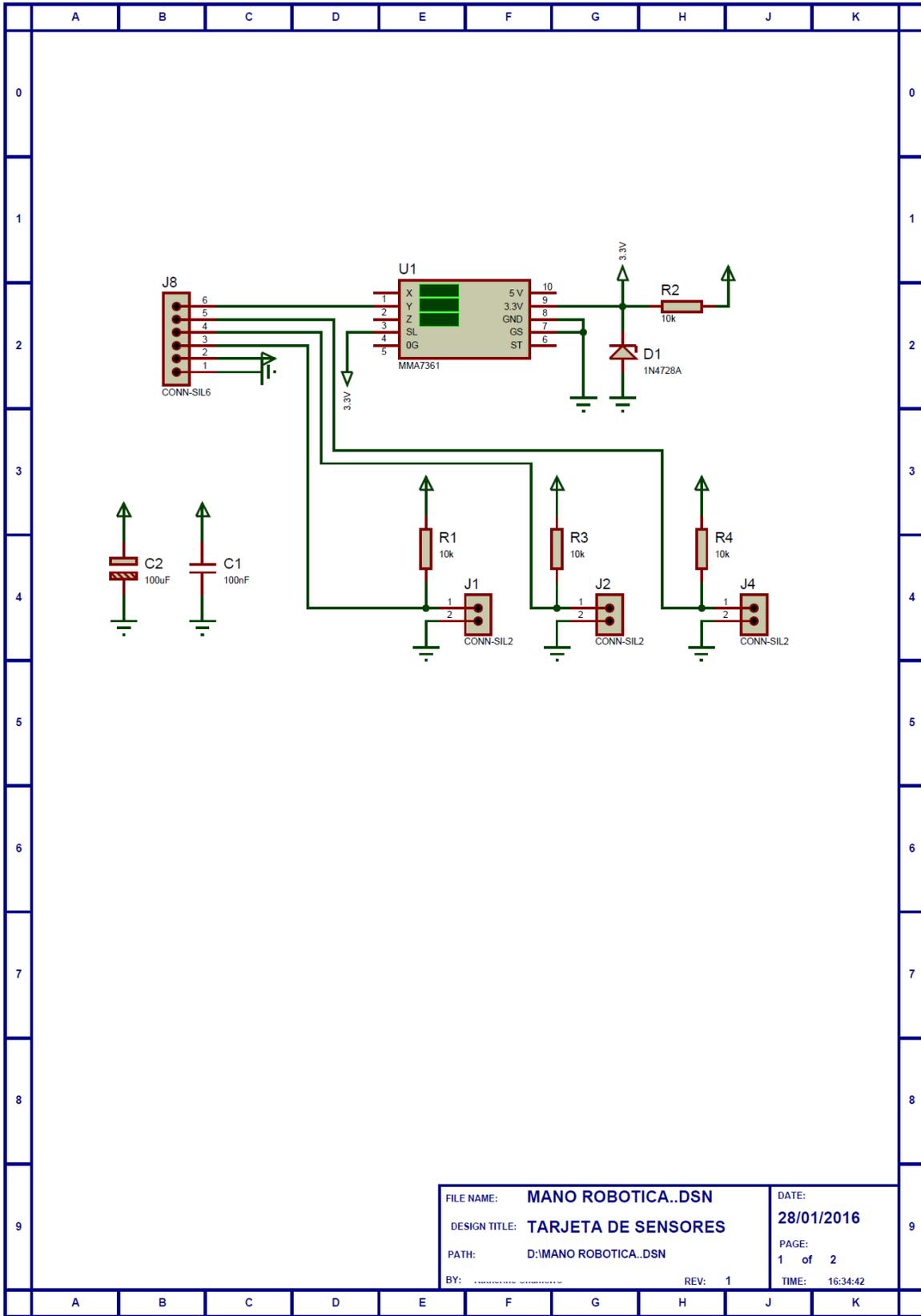
- Weight: 13.4 g
- Dimension: 22.5 x 12 x 35.5 mm approx.
- Stall torque: 1.8 kgf·cm (4.8 V), 2.2 kgf·cm (6 V)
- Operating speed: 0.1 s/60 degree (4.8 V), 0.08 s/60 degree (6 V)
- Operating voltage: 4.8 V - 6.0 V
- Dead band width: 5 μ s



Position "0" (1.5 ms pulse) is middle, "90" (~2 ms pulse) is all the way to the right, "-90" (~1 ms pulse) is all the way to the left.

ANEXO B: ESQUEMAS ELÉCTRICOS





FILE NAME:	MANO ROBOTICA..DSN	DATE:	28/01/2016
DESIGN TITLE:	TARJETA DE SENSORES	PAGE:	1 of 2
PATH:	D:\MANO ROBOTICA..DSN	TIME:	16:34:42
BY:		REV:	1

ANEXO C: PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR

```

#include <mega16a.h>
#include <delay.h>
#include <iobits.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

// Voltage Reference: AREF pin
#define ADC_VREF_TYPE ((0<<REFS1) | (0<<REFS0) | (0<<ADLAR))

static unsigned int mu_val,pu_val,in_val,me_val;

const float mp2=14,mx2=50; //para ,5 ms cambiar por 15 y para
2 ms cambiar por 60

float s0,s1,s2,s3;
float anterior_s0=1;
float anterior_s1=1;
float anterior_s2=1;
float anterior_s3=1;

float anterior=0;

float factor_s2;
unsigned int i=0;
unsigned char buffer_tx[10]; //comunicacion

// Declare your global variables here
static unsigned int periodo,duty;
static unsigned char salida[4]={14,14,14,14};

// Timer 0 overflow interrupt service routine
interrupt [TIM0_OVF] void timer0_ovf_isr(void)
{

    periodo++;
    duty++;

    if(duty<=salida[0]) //Controlo de cuanto es el pulso en alto
    {
        SETBIT(PORTB,0);
    }
}

```

```

else
{
    CLRBIT(PORTB,0);
}

if(duty<=salida[1]) //Controlo de cuanto es el pulso en alto
{
    SETBIT(PORTB,1);
}
else
{
    CLRBIT(PORTB,1);
}

if(duty<=salida[2]) //Controlo de cuanto es el pulso en alto
{
    SETBIT(PORTB,2);
}
else
{
    CLRBIT(PORTB,2);
}

if(duty<=salida[3]) //Controlo de cuanto es el pulso en alto
{
    SETBIT(PORTD,5);
}
else
{
    CLRBIT(PORTD,5);
}

if(periodo==571) //allegar a 600 completa los 20ms
{
    periodo=0;
    duty=0;
}
// Reinicia el valor de timer
// Interupcion cada 0,02ms
TCNT0=0x60;
}

// Read the AD conversion result

```

```

unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)
{
    ADMUX=adc_input | ADC_VREF_TYPE;
    delay_us(10);
    ADCSRA|=(1<<ADSC);
    delay_us(100);
    while ((ADCSRA & (1<<ADIF))==0);
    ADCSRA|=(1<<ADIF);
    return ADCW;
}

void calcula_parametros()
{
    factor_s2=mx2-mp2; //es el factor de conversión
    factor_s2/=180.0;
}

void calcula_movimiento()
{
    //todo esto es para el servo Grande
    float acumulador;

    acumulador=factor_s2*s0; // se guarda en
    acumulador+=mp2; //
    salida[3]=acumulador;

    acumulador=factor_s2*s1; // se guarda en
    acumulador+=mp2;
    salida[0]=acumulador;

    acumulador=factor_s2*s2; // se guarda en
    acumulador+=mp2;
    salida[1]=acumulador;

    acumulador=factor_s2*s3; // se guarda en
    acumulador+=mp2;
    salida[2]=acumulador;
}

float map(unsigned int x, float x1,float y1, float x2, float y2)
{
    float y=0,aux1,aux2,aux3,aux4;
    aux1=(x-x1);
    aux2=(y2-y1);

```

```

    aux3=(x2-x1);
    aux4=(aux1*aux2);
    y=aux4/aux3;
    return y;
}

void lectura()
{
    mu_val=read_adc(0);
    pu_val=read_adc(1);
    in_val=read_adc(2);
    me_val=read_adc(3);
}

unsigned int filtro(unsigned int actual, float anterior)
{
    float acumulador1,acumulador2,acumulador3;

    acumulador1=actual;
    acumulador2=(float)(anterior);
    acumulador3=(acumulador1-acumulador2)/2; //aquí se aplica filtro
iir (50/100)=1/2
    acumulador3+=acumulador2;
    return actual=(unsigned int)(acumulador3);
}

void main(void)
{
    DDRA=0x00;
    PORTA=0x00;

    DDRB=0xFF;
    PORTB=0x00;

    DDRC=0xFF;
    PORTC=0x00;

    DDRD=0xFF;
    PORTD=0x00;

    calcula_parametros();
}

```

```

// Timer/Counter 0 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 8000,000 kHz
// Mode: Normal top=0xFF
// OCO output: Disconnected
// Timer Period: 0,02 ms
TCCR0=(0<<WGM00) | (0<<COM01) | (0<<COM00) | (0<<WGM01) |
(0<<CS02) | (0<<CS01) | (1<<CS00);
TCNT0=0x60;
OCR0=0x00;

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=(0<<OCIE2) | (0<<TOIE2) | (0<<TICIE1) | (0<<OCIE1A) |
(0<<OCIE1B) | (0<<TOIE1) | (0<<OCIE0) | (1<<TOIE0);

// USART initialization
// Communication Parameters: 8 Data, 1 Stop, No Parity
// USART Receiver: Off
// USART Transmitter: On
// USART Mode: Asynchronous
// USART Baud Rate: 9600
UCSRA=(0<<RXC) | (0<<TXC) | (0<<UDRE) | (0<<FE) | (0<<DOR) |
(0<<UPE) | (0<<U2X) | (0<<MPCM);
UCSRB=(0<<RXCIE) | (0<<TXCIE) | (0<<UDRIE) | (0<<RXEN) | (1<<TXEN)
| (0<<UCSZ2) | (0<<RXB8) | (0<<TXB8);
UCSRC=(1<<URSEL) | (0<<UMSEL) | (0<<UPM1) | (0<<UPM0) |
(0<<USBS) | (1<<UCSZ1) | (1<<UCSZ0) | (0<<UCPOL);
UBRRH=0x00;
UBRRL=0x33;

// ADC initialization
// ADC Clock frequency: 1000,000 kHz
// ADC Voltage Reference: AREF pin
// ADC Auto Trigger Source: Free Running
ADMUX=ADC_VREF_TYPE;
ADCSRA=(1<<ADEN) | (0<<ADSC) | (1<<ADATE) | (0<<ADIF) | (0<<ADIE)
| (0<<ADPS2) | (1<<ADPS1) | (1<<ADPS0);
SFIOR=(0<<ADTS2) | (0<<ADTS1) | (0<<ADTS0);

// Global enable interrupts
#asm("sei")

```

```

while (1)
{
    for(i=0; i<30; i++)
    {
        lectura();
        mu_val=filtro(mu_val,anterior_s0);
        anterior_s0=mu_val;

        pu_val=filtro(pu_val,anterior_s1);
        anterior_s1=pu_val;

        in_val=filtro(in_val,anterior_s2);
        anterior_s2=in_val;

        me_val=filtro(me_val,anterior_s3);
        anterior_s3=me_val;

    }

    if(mu_val<250) mu_val=250;
    if(mu_val>450) mu_val=450;

    if(pu_val<540) pu_val=540;
    if(pu_val>760) pu_val=760;

    if(in_val<640) in_val=640;
    if(in_val>820) in_val=820;

    if(me_val<660) me_val=660;
    if(me_val>820) me_val=820;

    s0=map(mu_val,250.0, 450.0, 0.0, 180.0);
    s1=map(pu_val,540.0, 760.0, 0.0, 180.0);
    s2=map(in_val,640.0, 820.0, 0.0, 180.0);
    s3=map(me_val,660.0, 820.0, 0.0, 180.0);

    if(s0<1)    s0=1;
    if(s0>180)  s0=180;

    s0=filtro((unsigned int)s0,anterior);
    anterior=s0;

    calcula_movimiento();

```

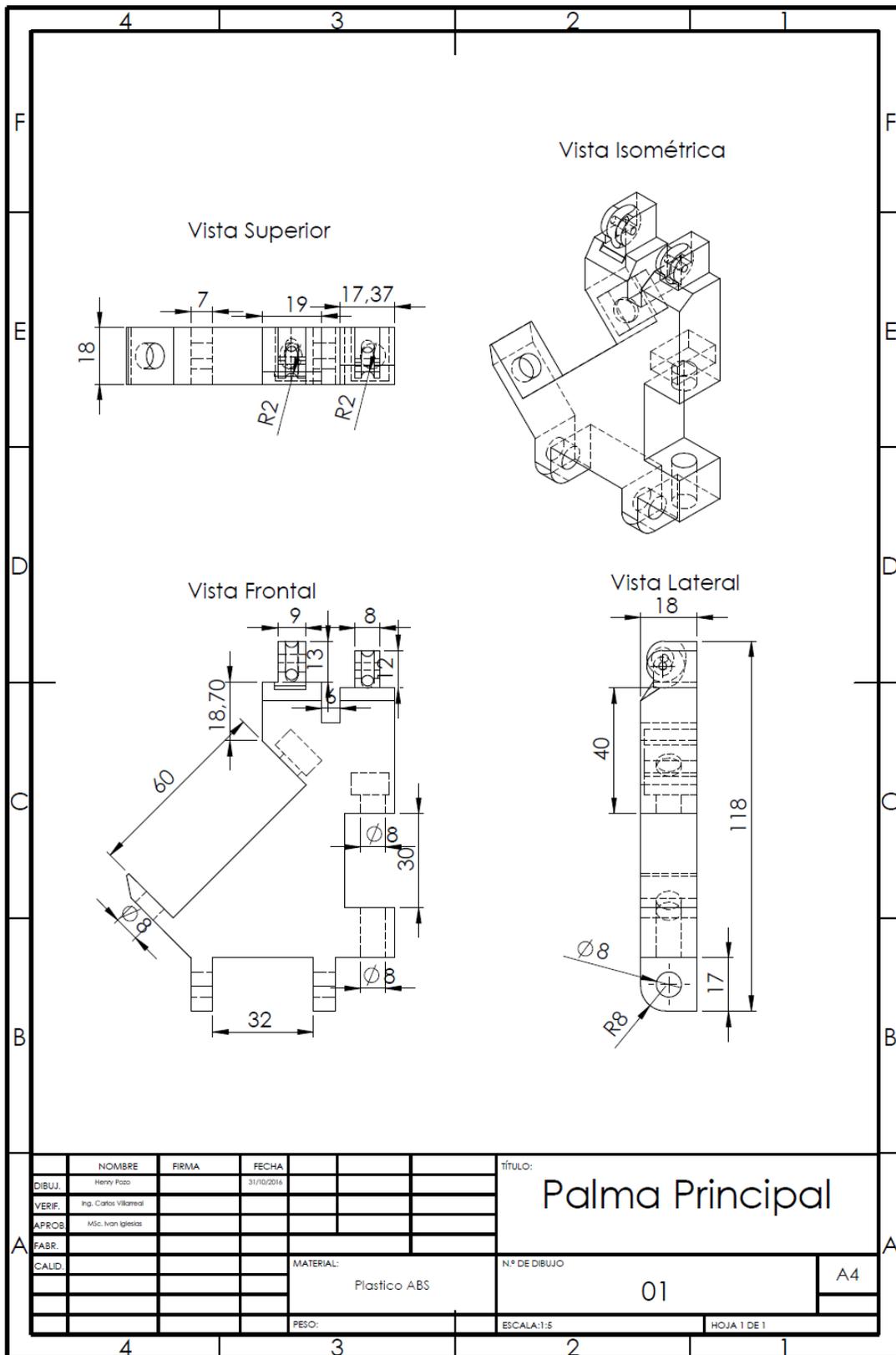
```
    delay_ms(10);  
  }  
}
```

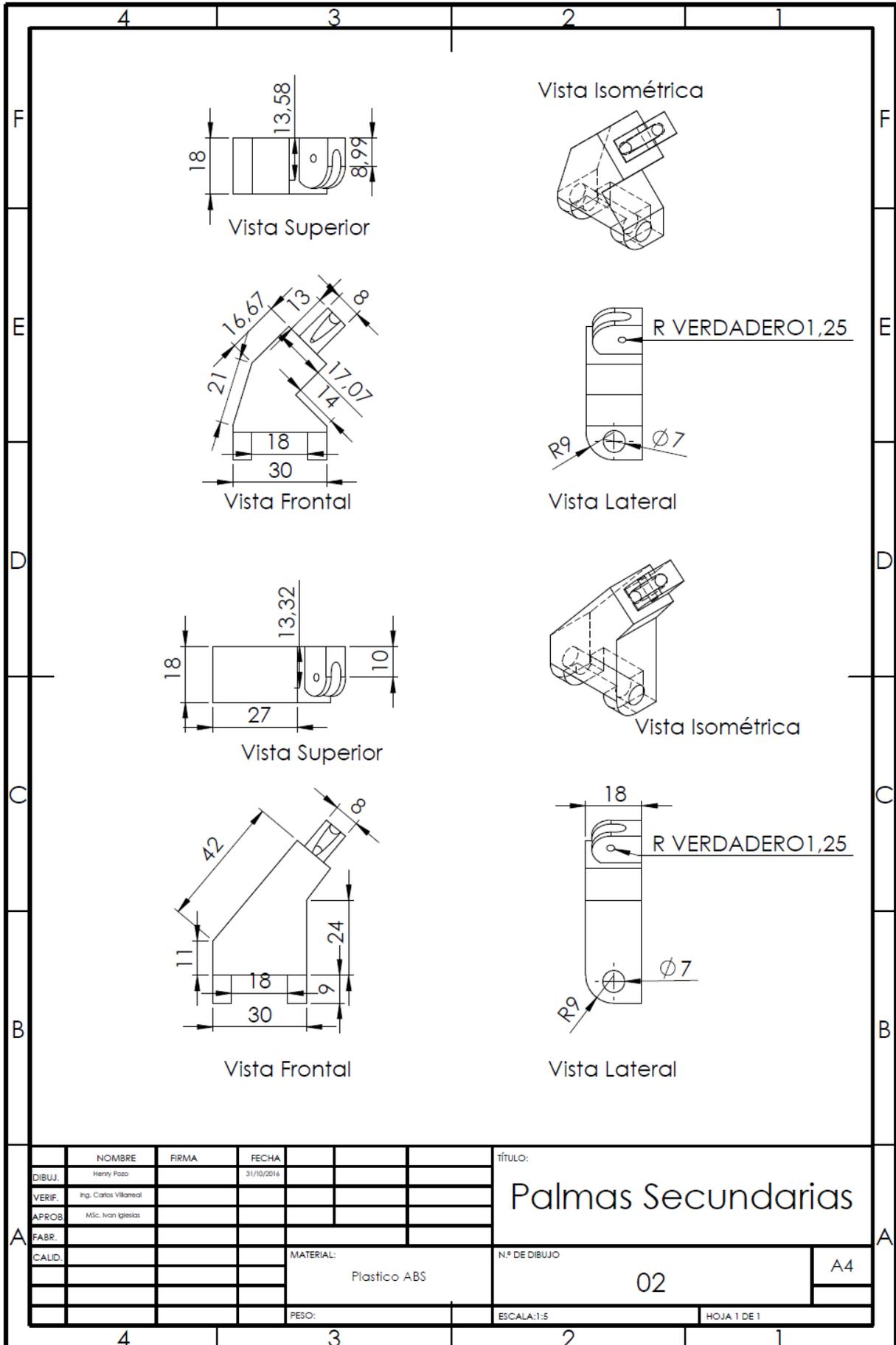
ANEXO D: MANUAL DE USUARIO

INSTRUCCIONES DE USO DE LA MANO ROBÓTICA

- 1.** Verificar la conexión de los cables de los servomotores hacia la caja de control. En caso de que no estén conectados, colocar los cables en el orden correcto para evitar quemar los actuadores.
- 2.** Comprobar que la tarjeta de sensores esté conectada hacia la caja de control. De no estar conectada, de igual forma ubicar los cables en el orden correcto para no quemar los sensores.
- 3.** Colocarse el guante sensorizado en la mano derecha, evitando que los cables que se dirigen hacia la caja de control, se desconecten. Ajustar las bandas de velcro para evitar el movimiento de los sensores de flexión.
- 4.** Levantar la estructura del brazo robótico, para simular los movimientos de giro de la muñeca y de movimientos de los dedos, evitando que la mano golpee con algún obstáculo.
- 5.** Finalmente efectuar los movimientos deseados con el guante y visualizar el funcionamiento del prototipo.

ANEXO E: PLANOS DE LA ESTRUCTURA



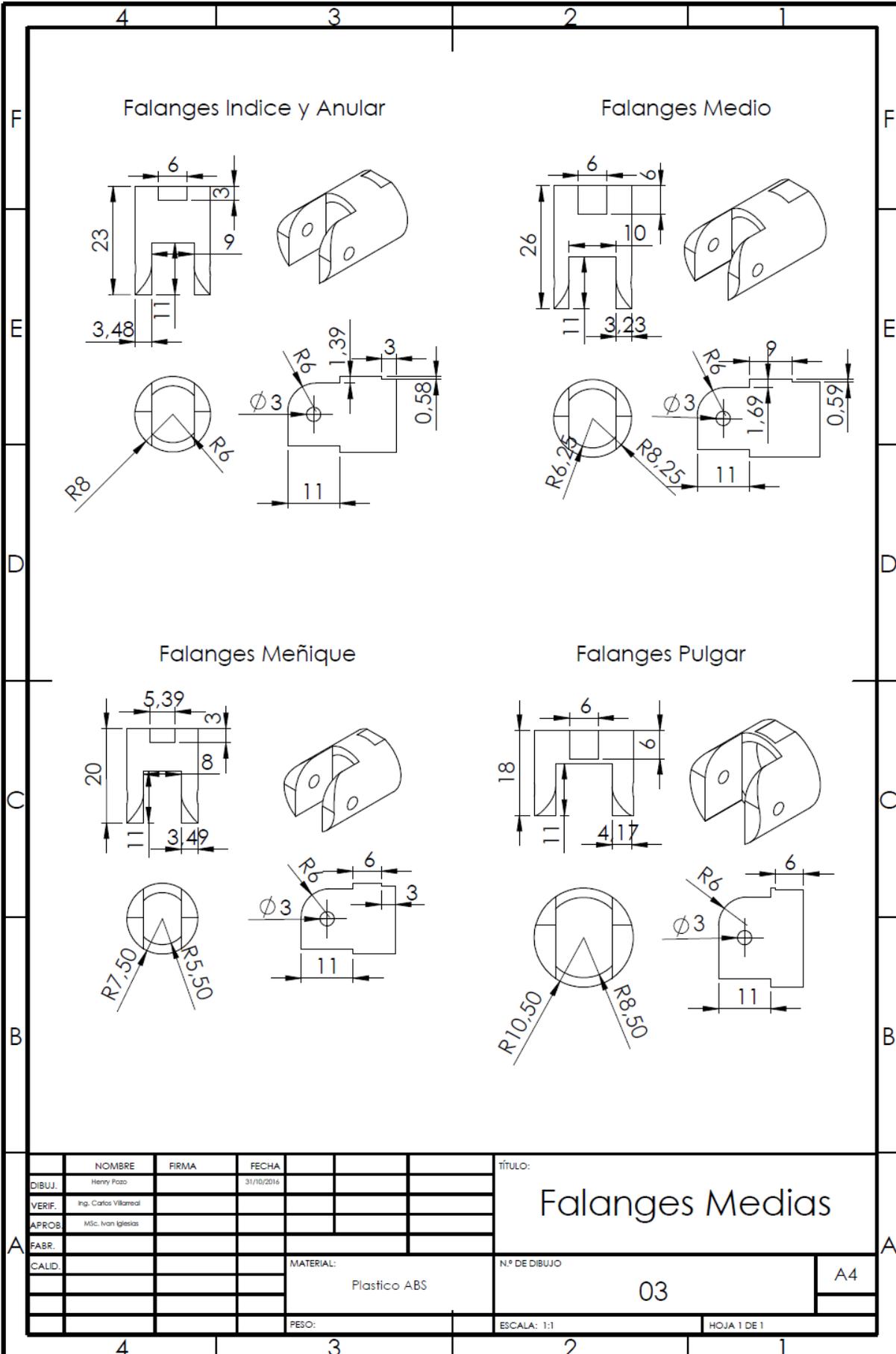


	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Henry Pozo		31/10/2016
VERIF.	Ing. Carlos Villareal		
APROB.	MSc. Ivan Iglesias		
FABR.			
CALID.			

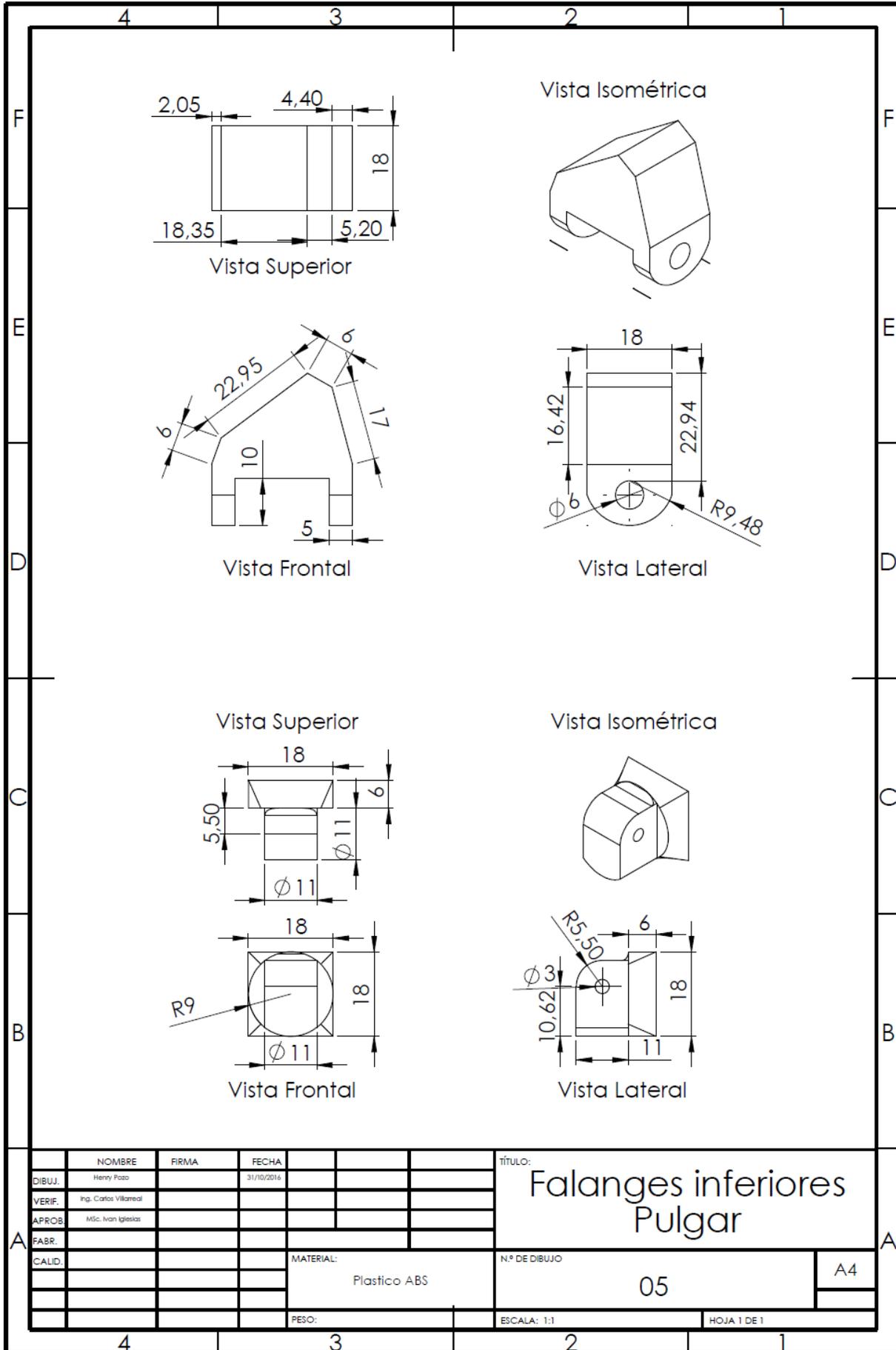
TÍTULO:	Palmas Secundarias	
Nº DE DIBUJO	02	A4
ESCALA:1:5		HOJA 1 DE 1

MATERIAL: Plastico ABS

PESO:

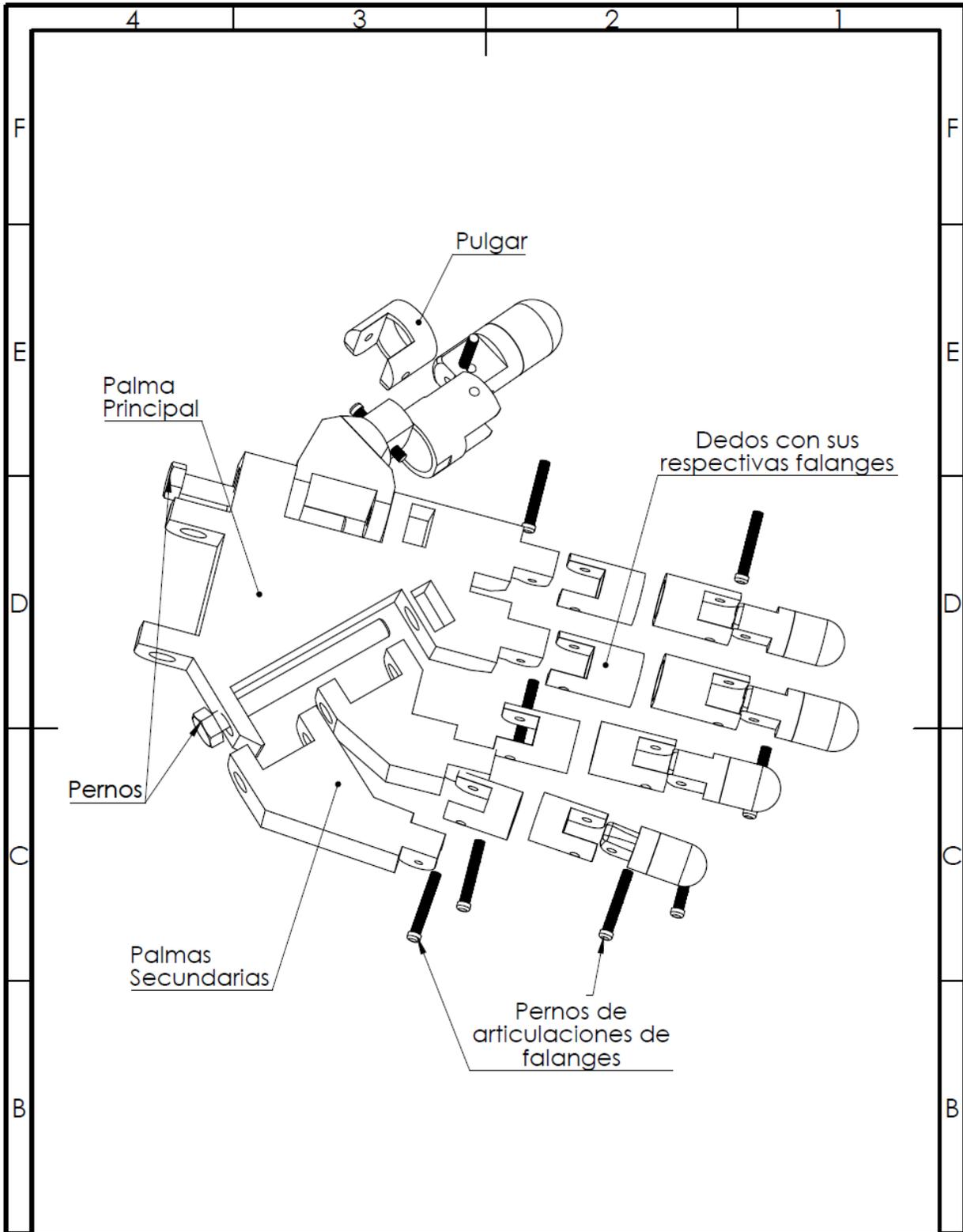


				TÍTULO:	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	Falanges Medias	
DIBUJ.	Henry Pozo		31/10/2016		
VERIF.	Ing. Carlos Villarreal				
APROB.	MSc. Ivan Iglesias				
FABR.					
CALID.			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	A4
			Plastico ABS	03	
			PESO:	ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1



	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Henry Pozo		31/10/2016
VERIF.	Ing. Carlos Villarreal		
APROB.	Msc. Ivan Iglesias		
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:	Falanges inferiores Pulgar	
N.º DE DIBUJO	05	A4
PESO:	Plastico ABS	
ESCALA:	1:1	HOJA 1 DE 1



	NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:	
DIBUJ.	Henry Pozo		31/10/2014		Vista Explosionada	
VERIF.	Ing. Carlos Villarreal					
APROB.	MSc. Ivan Iglesias					
FABR.						
CALID.				MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	A4
				Plastico ABS	06	
				PESO:	ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 1

ANEXO F: HOJA DE DATOS DEL SENSOR DE FLEXIÓN



FLEX SENSOR FS

Special Edition Length

Features

- Angle Displacement Measurement
- Bends and Flexes physically with motion device
- Possible Uses
 - Robotics
 - Gaming (Virtual Motion)
 - Medical Devices
 - Computer Peripherals
 - Musical Instruments
 - Physical Therapy
- Simple Construction
- Low Profile

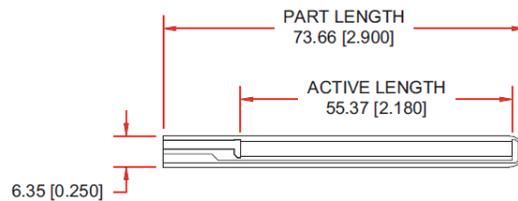
Mechanical Specifications

- Life Cycle: >1 million
- Height: $\leq 0.43\text{mm}$ (0.017")
- Temperature Range: -35°C to $+80^{\circ}\text{C}$

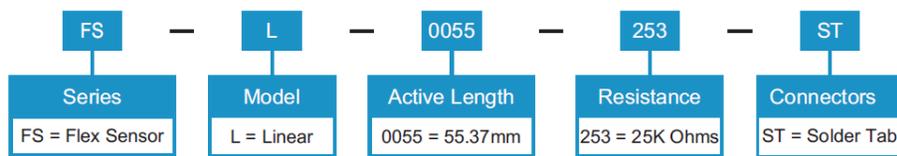
Electrical Specifications

- Flat Resistance: 25K Ohms
- Resistance Tolerance: $\pm 30\%$
- Bend Resistance Range: 45K to 125K Ohms (depending on bend radius)
- Power Rating : 0.50 Watts continuous. 1 Watt Peak

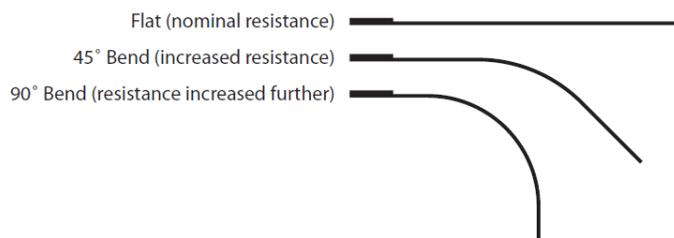
Dimensional Diagram - Stock Flex Sensor



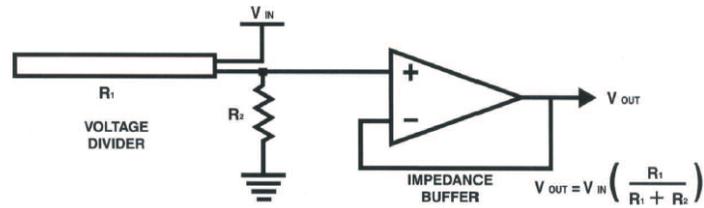
How to Order - Stock Flex Sensor



How It Works



Schematics

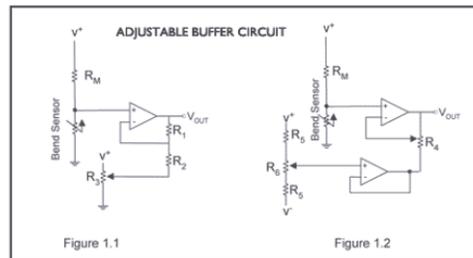
BASIC FLEX SENSOR CIRCUIT:

Following are notes from the ITP Flex Sensor Workshop

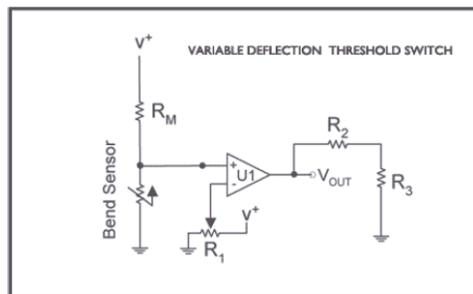
"The impedance buffer in the [Basic Flex Sensor Circuit] (above) is a single sided operational amplifier, used with these sensors because the low bias current of the op amp reduces error due to source impedance of the flex sensor as voltage divider. Suggested op amps are the LM358 or LM324."

"You can also test your flex sensor using the simplest circuit, and skip the op amp."

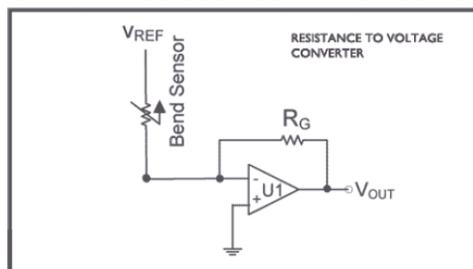
"**Adjustable Buffer** - a potentiometer can be added to the circuit to adjust the sensitivity range."



"**Variable Deflection Threshold Switch** - an op amp is used and outputs either high or low depending on the voltage of the inverting input. In this way you can use the flex sensor as a switch without going through a microcontroller."



"**Resistance to Voltage Converter** - use the sensor as the input of a resistance to voltage converter using a dual sided supply op-amp. A negative reference voltage will give a positive output. Should be used in situations when you want output at a low degree of bending."



ANEXO G: FOTOGRAFÍAS

