



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO EN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

TEMA:

**CONSTRUCCIÓN DE UNA MANO ROBÓTICA, ENFOCADO AL CONTROL
DEL MOVIMIENTO DE LA MUÑECA.**

AUTOR: KATHERINE ANDREA CHAMORRO ERAZO

DIRECTOR: MSc. IVÁN IGLESIAS NAVARRO

IBARRA-ECUADOR

2016



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 IDENTIDAD	DE 100330685-7
APELLIDOS NOMBRES	Y CHAMORRO ERAZO KATHERINE ANDREA
DIRECCIÓN	EUSEBIO BORRERO 4-51 Y SUCRE
E-MAIL	katty-2705@hotmail.com
TELÉFONO MÓVIL	0988535952
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	CONSTRUCCIÓN DE UNA MANO ROBÓTICA, ENFOCADO AL CONTROL DEL MOVIMIENTO DE LA MUÑECA.

AUTOR	CHAMORRO ERAZO KATHERINE ANDREA
FECHA	08 DE NOVIEMBRE DE 2016
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, Katherine Chamorro con cédula de identidad Nro. 100330685-7, 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: Katherine Andrea Chamorro Erazo
C.I 100330685-7



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, Chamorro Erazo Katherine Andrea con cédula de identidad Nro. 100330685-7, 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 LA MUÑECA", 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.

A handwritten signature in blue ink, reading "Katherine Chamorro", is written over a horizontal line. Below the line is a dotted line.

Chamorro Erazo Katherine Andrea

C.I.: 100330685-7



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, reading "Katherine Chamorro", is written over a horizontal dotted line.

Chamorro Erazo Katherine Andrea

C.I.: 100330685-7



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 LA MUÑECA”, presentado por la Srta. Katherine Andrea Chamorro Erazo, con cedula de identidad: 100330685-7, 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.

Msc. Iván Iglesias Navarro

DIRECTOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

A Dios, porque sin él nada de esto sería posible.

A mi madre y hermano, por brindarme el apoyo constante para alcanzar mis metas.

Al Msc. Iván Iglesias por su apoyo y guía en el desarrollo del presente proyecto.

A la Universidad Técnica del Norte, especialmente a mi Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, y de manera exclusiva al personal docente quienes con sus conocimientos me prepararon para mi vida profesional.

Katherine Chamorro.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

A mi madre y hermano, por ser mi fuerza incondicional para la culminación de este trabajo, ya que sin su ayuda y motivación diaria nada de esto hubiese sido posible. Gracias por su apoyo a pesar de tantos obstáculos a lo largo de este tiempo.

Katherine Chamorro.

RESUMEN

La tecnología se ha desarrollado específicamente para el bienestar de la humanidad, ya sea en el campo industrial, de la salud, y otros; así se inventan cada día nuevos y mejores productos que benefician a las personas con discapacidad física, proporcionándoles una mejor calidad de vida. Actualmente, en el Ecuador se puede observar claramente un retraso en el acceso y desarrollo de tecnología con respecto a prótesis para personas con discapacidades. Esto se debe a la falta de empresas nacionales que inviertan en su producción, por tal motivo las personas que necesitan adquirir estos mecanismos se ven limitados a importar prótesis, las cuales dependiendo de su desarrollo tecnológico tienen costos excesivos.

Por tal motivo, se propone crear una mano robótica, de bajo costo, que permita realizar el movimiento de prono-supinación de la muñeca, lo cual puede servir como prototipo para futuras prótesis que puedan permitirle a las personas con discapacidad, desempeñar las actividades cotidianas de una manera funcional, brindándoles una mejor calidad de vida.

ABSTRACT

The technology has been developed specifically for the wellbeing of humanity, whether in the industrial field, health, and others; thus persons invent every day new and better products that benefit people with physical disabilities, providing a better quality of life. Currently, in Ecuador you can clearly notice a delay in access and technology development, regarding prosthesis for people with disabilities. This is due to the lack of national companies investing in production; for this reason people need to acquire these mechanisms, they are limited import prosthesis, which depending on its technological development have excessive costs.

Therefore, it is proposed to create a robotic hand, inexpensive, that allows for the movement of pronosupination wrist, which can serve as a prototype for future prosthesis that can allow people with disabilities to perform daily activities in a functional way, providing a better quality of life.

ÍNDICE GENERAL

PORTADA	I
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN.....	I
CESIÓN DE DERECHOS	¡Error! Marcador no definido.
DECLARACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
CERTIFICACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	X
ÍNDICE GENERAL.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
ÍNDICE DE ANEXOS	XXI
INTRODUCCIÓN.....	22
CAPITULO I.....	25
1. MARCO TEÓRICO	25
1.1 ANTECEDENTES	25
1.2 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS REALIZADOS EN EL MUNDO	26
1.3 LA ROBÓTICA APLICADA AL SER HUMANO: BIÓNICA	28

1.4 RESEÑA HISTÓRICA DE LAS PRÓTESIS.....	30
1.5 DISEÑO DE PRÓTESIS EN EL SIGLO XX.....	32
1.6 CARACTERÍSTICAS DE LA MANO HUMANA	33
1.7 TIPOS DE MOVIMIENTO DE LA MUÑECA	34
1.7.1 Definición de los movimientos de la muñeca	35
1.7.2 Movimientos pasivos de flexo- extensión.....	37
1.8 MÚSCULOS ENCARGADOS DEL MOVIMIENTO DE LA MUÑECA	38
1.9 AMPUTACIONES.....	39
1.10 PRÓTESIS	40
1.10.1 PRÓTESIS DE MANO	41
1.10.2 MATERIAL DE LA PRÓTESIS	41
1.10.3 Material termoplástico.....	42
1.10.4 La silicona y otros materiales similares	43
1.10.5 Metales	43
1.10.6 Acabado cosmético	45
1.11 TIPOS DE PRÓTESIS	46
1.11.1 Según nivel de amputación:.....	46
1.11.2 Según material constitutivo:.....	47
1.12 MANOS ROBÓTICAS	50
1.12.1 ANÁLISIS DE DISEÑOS DE MANOS ROBÓTICAS	50
- La mano Stanford/JPL (Salisbury, 1981).	50

- Mano Utah (Dextrous, 1982).....	51
- Mano robot (Matsuoka, 1995).....	52
- Mano Robonaut (1999)	52
- Mano DLR (2000).....	53
- I-Limb Hand (2003-2009)	54
- Mano Shadow (Dexterous C6M, 2009).....	55
1.13 Mecanismos utilizados en las manos robóticas.....	55
1.14 Sensores utilizados en las manos robóticas.....	56
1.14.1 Sensores ópticos.....	56
1.14.2 Sensores de inclinación o posición.....	57
1.14.2.1 EL GIROSCOPIO.....	57
1.14.2.2 EL ACELEROMETRO.....	58
1.15 Actuadores utilizados en las manos robóticas.....	59
1.15.1 SERVOMOTOR.....	59
1.15.2 FUNCIONAMIENTO DE UN SERVOMOTOR.....	60
1.16 CONTROLADOR.....	61
1.17 BATERÍA PARA PRÓTESIS.....	62
CAPITULO II.....	63
2. DISEÑO Y MODELAMIENTO DE LA MANO ROBÓTICA.....	63
2.1 ALTERNATIVAS DE DISEÑO PRELIMINAR.....	63
2.1.1 Accionamiento 1 para la muñeca.....	63

2.2 ANÁLISIS DE LAS DIMENSIONES ESTÁNDAR DE UNA MANO HUMANA	
.....	66
2.3 PARÁMETROS DEL DISEÑO	67
2.4 CÁLCULOS PARA LA MANO ROBÓTICA	67
2.5 DISEÑO DEL SISTEMA CAD DE LOS ELEMENTOS A UTILIZARSE	75
2.6 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS	78
2.7 CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE DE LA MANO ROBÓTICA	82
2.7.1 ANCLAJE DEL SERVOMOTOR	82
2.7.2 SOPORTE PARA EL EJE Y LOS MICROSERVOS	83
2.7.3 EJE DE ACERO INOXIDABLE	83
2.7.4 MUÑECA	84
2.8 DISPOSITIVOS A USAR	85
- SERVOMOTOR HS805BB	85
- ACELERÓMETRO MMA7361	86
- MICROCONTROLADOR ATMEGA16	87
- BATERIA TIPO LI-PO	88
- BATERIA RECARGABLE GP	89
- GUANTE	90
CAPITULO III	91
3. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL	91

3.1 ESTUDIOS DE ESTRATEGIAS DE CONTROL APLICADAS EN MANOS ROBÓTICAS.....	91
3.2 CONTROL DE LAZO CERRADO	91
3.3 CONTROL DE LAZO ABIERTO	92
3.4 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL A UTILIZAR	93
3.5. DISEÑO DE LA ESTRATEGIA	95
3.5.1. Circuito Eléctrico Fuente de Alimentación para el servomotor	95
3.5.2 Circuito Eléctrico Fuente de Alimentación para los sensores.....	96
3.5.3 Circuito Eléctrico de la Tarjeta de Control.....	97
3.5.4 Circuito Eléctrico del Sensor.....	98
3.6 LINEALIZACIÓN DEL SENSOR ACELERÓMETRO	99
3.7. FILTRO PARA ESTABILIZAR LA SEÑAL DEL SENSOR.....	102
3.8 DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE CONTROL	103
3.9 PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR	107
CAPITULO IV	120
4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	120
4.1 INTRODUCCIÓN.....	120
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	125
CONCLUSIONES.....	125
RECOMENDACIONES.....	127
- BIBLIOGRAFÍA	128

- ANEXOS.....	130
---------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Medidas de la mano humana	67
Tabla 2.2: Concentración de Esfuerzos.....	72
Tabla 3. 1: Datos del acelerómetro	100
Tabla 3. 2:Valores del sensor	100
Tabla 4. 1: Valores del servomotor sin filtro	121
Tabla 4. 2: Valores del servomotor con filtro	122
Tabla 4. 3: Valores del acelerómetro sin filtro	123
Tabla 4. 4: Valores del acelerómetro con filtro	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Mano de alt-Ruppin construida con hierro en el año 1400	30
Figura 1. 2: Primer brazo artificial móvil.....	31
Figura 1. 3: Prótesis de mano con pulgar móvil y gancho dividido sagitalmente	32
Figura 1. 4: Huesos de la mano humana	34
Figura 1. 5: Articulación de una muñeca.....	35
Figura 1. 6: Movimientos básicos de la muñeca	37
Figura 1. 7: Movimientos de flexo-extensión	38
Figura 1. 8: (a) Músculo encargado del movimiento de la muñeca (Borde posterior); (b) Músculo encargado del movimiento de la muñeca (Borde posterior).....	39
Figura 1. 9: Prótesis robótica	40
Figura 1. 10: Prótesis robótica de una mano	41
Figura 1. 11: Material termoplástico.....	42
Figura 1. 12: Material de silicona	43
Figura 1. 13: Mano metálica	44
Figura 1. 14 : Mano con acabado cosmético	45
Figura 1. 15: Prótesis Pasiva	47
Figura 1. 16: Prótesis Activa	48
Figura 1. 17: Prótesis Híbrida.....	48
Figura 1. 18: Prótesis Mioeléctrica	49
Figura 1. 19: Mano Stanford/JPL.....	51
Figura 1. 20: Mano Utah/Mit Dextrous.....	51
Figura 1. 21: Mano robot Matsuoka	52
Figura 1. 22: Mano robonaut	53

Figura 1. 23: Mano DLR	54
Figura 1. 24: Mano I-Limb Hand	54
Figura 1. 25: Mano Shadow Dexterous C6M	55
Figura 1. 26: Movimiento de la muñeca	56
Figura 1. 27: Sensor óptico	57
Figura 1. 28: Sistema óptico de una mano robótica	58
Figura 1. 29: Acelerómetro de 3 ejes	59
Figura 1. 30: Parte interna de un Servomotor	59
Figura 1. 31: Señales para controlar un servomotor	60
Figura 1. 32: Microcontrolador ATMEL.....	62
Figura 1. 33: Batería tipo lipo	62
Figura 2. 1: Alternativa de accionamiento 1.....	64
Figura 2. 2 Alternativa de accionamiento 2	64
Figura 2. 3 Alternativa de accionamiento 3	65
Figura 2. 4 Medidas estándar de una mano humana.....	66
Figura 2. 5 Eje de Acero	68
Figura 2. 6: a) Diagrama de fuerzas aplicadas	69
Figura 2. 6: b) Diagrama de Corte	69
Figura 2. 7 Diagrama de Momentos	70
Figura 2. 8 Servomotor base de 19Kg	76
Figura 2. 9: a) Soporte de acero al carbono b) Pestaña para centrar	77
Figura 2. 10: a) Rosca del eje de acero inoxidable	77
Figura 2. 11: a) Perno b) Rodelas de goma.....	78
Figura 2.12: a) Torques aplicados al eje	79

Figura 2. 13: a) Máximo tamaño de elemento de Mallado b) Máximo tamaño de elemento de Mallado	80
Figura 2. 14 Factor de seguridad	80
Figura 2. 15: a) Desplazamiento máximo b) Desplazamiento mínimo	81
Figura 2. 16 Representación de las tensiones de Von Misses	81
Figura 2. 17 Anclaje del servomotor de 19Kg	82
Figura 2. 18 Soporte de acero para el eje	83
Figura 2. 19 Eje de acero	84
Figura 2. 20: a) Piezas para la unión del antebrazo b) Pieza con orificio central	84
Figura 2. 21: c) Perno d) Estructura completa	85
Figura 2.22 Servomotor HS-805BB	86
Figura 2. 23: Ángulos de funcionamiento del servomotor	86
Figura 2. 24 Acelerómetro MMA7361	87
Figura 2. 25 Microcontrolador Atmega16	88
Figura 2. 26 Celdas de una batería tipo Lipo	89
Figura 2. 27 Batería tipo Lipo	89
Figura 2. 28 Batería GP Recargable	90
Figura 2. 29 Guante de Nylon-Poliuretano	90
Figura 3. 1 Diagrama de estrategia de control en lazo cerrado	92
Figura 3. 2 Diagrama de estrategia de control en lazo abierto	93
Figura 3. 3 Placa PCB	94
Figura 3. 4 Circuito Eléctrico Fuente de Alimentación	95
Figura 3. 5 Circuito Eléctrico de la Tarjeta de Control	96
Figura 3. 6 Tarjeta de control	97
Figura 3. 7 Circuito Eléctrico de la Tarjeta de Control	97

Figura 3. 8 Circuito Eléctrico Reset	98
Figura 3. 9 Circuito Eléctrico Acelerómetro	99
Figura 3. 10 Ecuación de la recta del sensor.....	101
Figura 3. 11 Señal del sensor sin filtro	102
Figura 3. 12 Señal del sensor con filtro	103
Figura 3. 13 Diagrama de flujo principal del sistema de control.....	104
Figura 3. 14 Diagrama de flujo de la subrutina de interrupción.....	105
Figura 4. 1 Señal del servomotor sin filtro.....	121
Figura 4. 2 Señal del servomotor con filtro.....	122
Figura 4. 3 Señal del acelerómetro sin filtro.....	123
Figura 4. 4 Señal del acelerómetro con filtro.....	124

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: DATASHEET SERVOMOTOR DE 19Kg	130
ANEXO 2: DATASHEET ACELÉROMETRO MMA7361	131
ANEXO 3: DATASHEET MICROCONTROLADOR ATMEGA16	133
ANEXO 4: TABLA DE DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL PCB DE LA PLACA DE CONTROL	135
ANEXO 5: ESQUEMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA.....	136
ANEXO 6: ESQUEMA DE CONEXIONES DE LA PLACA DE CONTROL DEL SENSOR.....	137
ANEXO 7: PLACA DE CONTROL	138
ANEXO 8: PLACA DE CONTROL DE SENSOR.....	138
ANEXO 9: CÓDIGO FINAL DE PROGRAMACIÓN	139
ANEXO 10: MANUAL DE USUARIO	145
ANEXO 11: PLANOS DE ESTRUCTURA.....	146
ANEXO 12: FOTOGRÁFICO	149

INTRODUCCIÓN

El proceso de desarrollo e innovación tecnológica se centra básicamente en la capacidad de alcanzar un esfuerzo mental que cumpla los objetivos planteados al inicio de cada proyecto. La biotecnología y la investigación van de la mano, produciendo dispositivos, materiales o sistemas que pretenden producir procesos que ayuden a mejorar la calidad de vida de los usuarios.

El gran número de personas que actualmente tienen alguna condición especial debido a varios factores como amputaciones o accidentes, ha motivado a la creación de prótesis, simulando el comportamiento inteligente de alguna extremidad, brindándoles ciertos beneficios a los usuarios. En nuestro país es difícil el acceso a prótesis que tengan un alto grado de tecnología.

Debido a esto se plantea crear un prototipo de una mano robótica que simule el movimiento de la muñeca, ya que ésta es indispensable al momento de realizar actividades cotidianas como por ejemplo trabajar en una computadora, girar la manija de una puerta o practicar algún deporte, y servirá de base para la creación de nuevas prótesis dentro de la institución, ya que ésta ha iniciado un proyecto de investigación en el área de desarrollo de prótesis mecatrónicas.

Como **objetivo general** se propone construir una mano robótica enfocada al control de los movimientos básicos de la muñeca y sus **objetivos específicos** son:

- Estudio del marco teórico relacionado con el diseño de manos robóticas.
- Determinar los parámetros necesarios para el diseño y construcción de la mano de un robot.
- Evaluar a través de la simulación el correcto funcionamiento de las articulaciones.

- Definir la estrategia de control.
- Comprobar el funcionamiento autónomo de la mano.

La construcción y el control de una mano robótica donde se simulen los movimientos básicos de flexo-extensión y Prono-supinación de la muñeca, se realizará de la siguiente manera:

Se iniciará creando un diseño en un sistema CAD de las diferentes piezas que conforman dicha mano, pretendiendo analizar cada elemento que se involucre directamente con el proyecto. A continuación, se procederá construir y ensamblar cada una de las partes diseñadas.

Para desarrollar el modelo deseado se deben encontrar ecuaciones de variables de posición y esfuerzos de las articulaciones en función del tiempo, esto se obtiene mediante un análisis estático.

También se pretende realizar la programación para el control de la mano robótica utilizando las herramientas de un software, lo que permitirá comprobar su correcto funcionamiento.

Además, se va elaborar un escrito de todo el procedimiento de la tesis tomando en cuenta que es un paso muy importante para lograr este proyecto.

Realizar una prótesis que reemplace a alguna de las extremidades que son parte de nuestro cuerpo, es un gran trabajo ya que demanda un enorme esfuerzo para satisfacer ciertas especificaciones como tamaño, peso, velocidad, torque, entre otros.

Con el diseño de las distintas piezas que tendrá la mano robótica se procederá a construirlo de un material que sea apto, accesible y de bajo costo, que cumpla con las características esenciales como son tamaño y masa, pero la parte fundamental de la mano será su control, ya que esto permitirá tener un movimiento dinámico exacto analizando su cinemática para cumplir con las especificaciones planteadas.

El presente trabajo está estructurado con cuatro capítulos, en el Capítulo I se describe el marco teórico en donde se encuentra la reseña histórica de las prótesis, los tipos de prótesis existentes y la morfología de la mano humana.

En el capítulo II se desarrolló el diseño y modelamiento de la mano robótica, en un sistema CAD, así como sus respectivos cálculos.

En el capítulo III se tendrá la implementación de la estrategia de control, es decir una de las partes fundamentales del proyecto como es su programación.

Y finalmente el Capítulo IV que es el diseño de la estrategia, es decir los sensores que controlan a la mano robótica, además de sus respectivas conclusiones, recomendaciones y anexos.

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen los parámetros teóricos que son necesarios conocer, antes de iniciar con la realización del proyecto. Los parámetros más importantes son:

1.1 ANTECEDENTES

El mayor inconveniente que tienen las personas con discapacidad son los desafíos sociales que pueden afectar claramente su autoestima, son víctimas de discriminación, lo que afecta su vida laboral ya que no todas las empresas brindan la posibilidad de demostrar sus capacidades y su productividad en la sociedad.

En Ecuador tenemos un total de 361,487 de personas que perdieron parcial o totalmente la movilidad de sus extremidades ya sean superiores o inferiores según un artículo del Diario Nacional La Hora. A continuación se destacan ciertos testimonios de personas con diferentes discapacidades:

En una publicación del Diario La Hora se puede encontrar estos testimonios: “Mi discapacidad física la adquirí hace unos 15 años en un accidente de moto, cuando era adolescente”, asegura Byron López, uno de las 361.487 personas con discapacidad que hay en el país, según el registro del Consejo Nacional de Igualdad de Discapacidades (Conadis, 2012). Oriundo del Guayas, asegura que, a pesar de la existencia de leyes a favor de este sector de la sociedad, aún persiste la discriminación.

En su caso, amputado de la pierna, tiene derecho el descuento del 50% en las tarifas de transporte, pero cuando quiso viajar de una provincia a otra no le fue concedido ese beneficio. De los testimonios recogidos, donde menos se respetan sus derechos son en el

transporte público. Sara Guzmán, en sillas de ruedas, asegura que muchos taxistas no le paran cuando se dan cuenta de su situación y lo mismo sucede con los buses de transporte urbano. “Hay muchos prejuicios sociales, nos rechazan de manera inconsciente”, asegura Guzmán.

Mientras que Carlos quien anda en muletas, asegura que ha sentido discriminación incluso en su propio trabajo. “A veces hacen bromas pesadas, le miran a uno de reojo como temiendo acercarse”, asegura Carlos.

El tema de accesibilidad a edificios y oficinas también les preocupa. Pocas edificaciones tienen rampas de acceso para discapacitados o baños especiales. López manifestó que esta realidad es más frecuente en ciudades pequeñas. “No todos los Municipios tienen buenos accesos, a pesar de que son la casa del pueblo. Hay muchos lugares donde la gente no respeta los parqueaderos destinados a discapacitados y se enojan si se les llama la atención”.

Con lo expuesto anteriormente nace la idea por parte de los estudiantes y de las autoridades de la Universidad para crear prótesis que beneficien a dichas personas, es decir, que esto sirva de prototipo para que surjan temas más complejos y se logre brindar ayuda por medio de la carrera de Mecatrónica a niños, jóvenes, adultos con discapacidad física.

1.2 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS REALIZADOS EN EL MUNDO

El avance tecnológico en la elaboración de prótesis para miembro superior, específicamente para la mano, ha generado un incremento en la calidad de vida de las personas que han sufrido amputaciones traumáticas al nivel de este órgano. Los usuarios pueden obtener una solución a su deficiencia funcional según sus necesidades específicas; de igual forma se consideran las características cosméticas que complementan la función. (Castellanos, 2010).

La sustitución por pérdida de miembros humanos por artefactos distintos a los naturales es una realidad desde hace más de dos mil años. Con el tiempo los inventos en los campos de la robótica, en particular de la biónica, han proporcionado al ser humano extremidades complementarias que cada día se perfeccionan (Arroyo, 2012).

El surgimiento de las grandes civilizaciones griegas, egipcias y romanas le comenzó a dar a la medicina un enfoque más científico y también tuvo un mayor desarrollo en la prótesis. En 1958 se encontró en Capúa, Italia una de las prótesis más antiguas. Esta prótesis romana con construida con centro de madera, una cobertura de bronce y ataduras de piel data de las guerras alrededor de 300 A.C. (Arroyo, 2012).

Después del renacimiento entre 1600 y 1800 con los avances y descubrimientos de la medicina se observaba un refinamiento en las prótesis volviéndose más funcionales. En los años 90's después de la primera guerra mundial se crea la asociación americana de prótesis y ortesis haciendo la contribución más grande de la historia en el desarrollo de prótesis. (Arroyo, 2012).

Pero fue hasta la segunda guerra mundial que el número de amputaciones aumento lo suficiente para darse cuenta que la tecnología de prótesis en ese momento no era adecuada ya que no había cambiado mucho desde 1800. Fue cuando se creó la conciencia que se necesitaban mejorar los estudios de para el desarrollo de prótesis utilizando lo último en medicina e ingeniería. (Arroyo, 2012).

Los materiales utilizados en la construcción mejoraron cuando diferentes compañías militares como Narthoup Aviation introdujo el uso de la resistencia térmica para los sockets y componentes estructurales. (Arroyo, 2012).

En los años 60's y 70's muchas universidades comienzan a crear programas de desarrollo de prótesis más avanzadas. Se Introduce el soporte hidráulico, las prótesis endoesqueleticas y

la piel sintética. En los años 80's se crea el pie safe que es uno de los pies que almacena energía. (Arroyo, 2012).

Desde la década de los 80's a la actualidad se han desarrollado prótesis especializadas para cada tipo de paciente y sus diferentes necesidades. En la rama de la biomédica el control micro eléctrico es más popular, esto es utilizar diferentes circuitos y sensores eléctricos para controlar los movimientos de la prótesis con el fin de lograr un movimiento más natural. (Arroyo, 2012).

1.3 LA ROBÓTICA APLICADA AL SER HUMANO: BIÓNICA

En la década de los años 70 se popularizaron las series de televisión “El hombre nuclear” y “La mujer biónica”, en las que los protagonistas habían perdido algunos de sus miembros y éstos fueron sustituidos por elementos artificiales que les permitían tener poderes sobrehumanos, tales como una gran fuerza y velocidad, visión y oído con mucho mayor alcance que el de cualquier ser humano. (Dorador, 2004).

La biónica es, de acuerdo a una definición dada en 1960 por Jack Steele, de la U.S. Air Force, el análisis del funcionamiento real de los sistemas vivos y, una vez descubiertos sus secretos, materializarlos en los aparatos. Esta definición nos podría indicar que el primer ingeniero biónico fue Leonardo Da Vinci, quien estudió los principios de funcionamiento de los seres vivos para aplicarlos en el diseño de máquinas. (Dorador, 2004).

Dado que las prótesis se utilizan para sustituir la extremidad pérdida de una persona, los principios de funcionamiento que se deben estudiar para reproducirlos son precisamente los que tiene dicha extremidad, por lo que el diseño de prótesis es inherentemente una actividad de la ingeniería biónica. Aunque también puede ser tratada desde otras ciencias. (Dorador, 2004).

Existen varias configuraciones de robots, de acuerdo al tipo de movimientos que pueden realizar. Los robots pueden ser “cartesianos”, es decir que se mueven en línea recta y su volumen de trabajo es un prisma rectangular, los robots “cilíndricos” que se utilizan principalmente para ensamble y su volumen de trabajo es un cilindro. (Dorador, 2004).

Los robots “esféricos” tienen un volumen de trabajo en forma de una esfera. Los robots industriales más atractivos y que más se conocen son los que simulan los movimientos de un brazo humano, por lo que se les conoce como “brazos articulados”, y sus aplicaciones son muy amplias debido a la facilidad que tienen para realizar movimientos complicados. (Dorador, 2004).

El brazo mecánico constituye la parte física, es decir, el conjunto de mecanismos y motores que forman el brazo. Este a su vez está controlado por medio de una computadora que mueve cada una de las articulaciones para llevar la mano del robot a los lugares deseados. (Dorador, 2004).

El robot cuenta con sensores que le indican a la computadora el estado del brazo mecánico, de manera que estas señales le indican la posición de las articulaciones. La unidad de potencia externa suministra de energía a los actuadores del robot. El órgano terminal es la herramienta que se fija al brazo para desarrollar una tarea específica. (Dorador, 2004).

El trasladar un manipulador industrial al uso directo por una persona para sustituir un miembro que le ha sido amputado no es sencillo. Aunque los principios de funcionamiento sean muy parecidos, hay que considerar aspectos adicionales, tales como el peso, el suministro de energía y la apariencia. (Dorador, 2004).

El avance en el diseño de las prótesis ha estado ligado directamente con el avance en el manejo de los materiales empleados por el hombre, así como el desarrollo tecnológico y el entendimiento de la biomecánica del cuerpo humano. (Dorador, 2004).

1.4 RESEÑA HISTÓRICA DE LAS PRÓTESIS

Una prótesis es un elemento desarrollado con el fin de mejorar o reemplazar una función, una parte o un miembro completo del cuerpo humano afectado, por lo tanto, una prótesis para el paciente y en particular para el amputado, también colabora con el desarrollo psicológico del mismo, creando una percepción de totalidad al recobrar movilidad y aspecto. (Dorador, 2004).

La primera prótesis de miembro superior registrada data del año 2000 a. C., fue encontrada en una momia egipcia; la prótesis estaba sujeta al antebrazo por medio de un cartucho adaptado al mismo. Con el manejo del hierro, el hombre pudo construir manos más resistentes y que pudieran ser empleadas para portar objetos pesados, tal es el caso del general romano Marcus Sergius, que durante la Segunda Guerra Púnica (218-202 a. C.) fabricó una mano de hierro para él, con la cual portaba su espada, ésta es la primera mano de hierro registrada. (Dorador, 2004).

En la búsqueda de mejoras en el año de 1400 se fabricó la mano de alt-Ruppin (figura 1.1) construida también en hierro, constaba de un pulgar rígido en oposición y dedos flexibles, los cuales eran flexionados pasivamente, éstos se podían fijar mediante un mecanismo de trinquete y además tenía una muñeca movable. (Dorador, 2004).



Figura 1.1: Mano de alt-Ruppin construida con hierro en el año 1400
Fuente: J. Dorador, 2004.

No es sino hasta el siglo XVI, que el diseño del mecanismo de las prótesis de miembro superior se ve mejorado considerablemente (figura 1.2), gracias al médico militar francés Ambroise Paré, quien desarrolló el primer brazo artificial móvil al nivel de codo, llamado “Le petit Loraine” el mecanismo era relativamente sencillo tomando en cuenta la época. (Dorador, 2004).

Los dedos podían abrirse o cerrarse presionándose además de que constaba de una palanca, por medio de la cual, el brazo podía realizar la flexión o extensión a nivel de codo. Esta prótesis fue realizada para un desarticulado de codo. (Dorador, 2004).

Paré también lanzó la primera mano estética de cuero, con lo que da un nuevo giro a la utilización de materiales para el diseño de prótesis de miembro superior. (Dorador, 2004).



Figura 1. 2: Primer brazo artificial móvil
Fuente: J. Dorador, 2004.

En el siglo XIX se emplean el cuero, los polímeros naturales y la madera en la fabricación de prótesis; los resortes contribuyen también al desarrollo de nuevos mecanismos para la fabricación de elementos de transmisión de la fuerza, para la sujeción. Entre las innovaciones más importantes al diseño de las prótesis de miembro superior, se encuentra la del alemán Peter Beil (figura 1.3). (Dorador, 2004).

El diseño de la mano cumple con el cierre y la apertura de los dedos, pero es controlada por los movimientos del tronco y hombro contra lateral, dando origen a las prótesis autopropulsadas. Más tarde el Conde Beafort da a conocer un brazo con flexión del codo activado al presionar una palanca contra el tórax, aprovechando también el hombro contra lateral como fuente de energía para los movimientos activos del codo y la mano. La mano constaba de un pulgar móvil utilizando un gancho dividido sagitalmente, parecido a los actuales ganchos Hook. (Dorador, 2004).



Figura 1. 3: Prótesis de mano con pulgar móvil y gancho dividido sagitalmente
Fuente: J. Dorador, 2004.

1.5 DISEÑO DE PRÓTESIS EN EL SIGLO XX

Gracias a los esfuerzos del médico francés Grippoulleau para el siglo XX, se cumplió el objetivo de que los amputados regresaran a su vida laboral, quien realizó diferentes accesorios que podían ser usados como unidad terminal, tales como anillos, ganchos y diversos instrumentos metálicos, que brindaban la capacidad de realizar trabajo de fuerza o de precisión. (Dorador, 2004).

En el año de 1912 Dorrance en Estados Unidos desarrolló el Hook, que es una unidad terminal que permite abrir activamente, mediante movimientos de la cintura escapular, además se cierra pasivamente por la acción de un tirante de goma. Casi al mismo tiempo fue

desarrollado en Alemania el gancho Fischer cuya ventaja principal era que poseía una mayor potencia y diversidad en los tipos de prensión y sujeción de los objetos. (Dorador, 2004).

El origen de las prótesis activadas por los músculos del muñón se da en Alemania gracias a Sauerbruch, el cual logra idear como conectar la musculatura flexora del antebrazo con el mecanismo de la mano artificial, 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. (Dorador, 2004).

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. (Dorador, 2004).

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. (Dorador, 2004).

En sus inicios, este tipo de prótesis solo era colocada para amputados de antebrazo, logrando una fuerza prensora de dos kilos. Actualmente las 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. Entre los países con mayor avance tecnológico e investigación sobre prótesis, se encuentran Alemania, Estados Unidos, Francia, Inglaterra y Japón. (Dorador, 2004).

1.6 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. (McGraw Hill, 2013.)

Está compuesta por 40 músculos (flexores y extensores), que se dividen en:

- 27 huesos distribuidos en 3 zonas (figura 1.4):

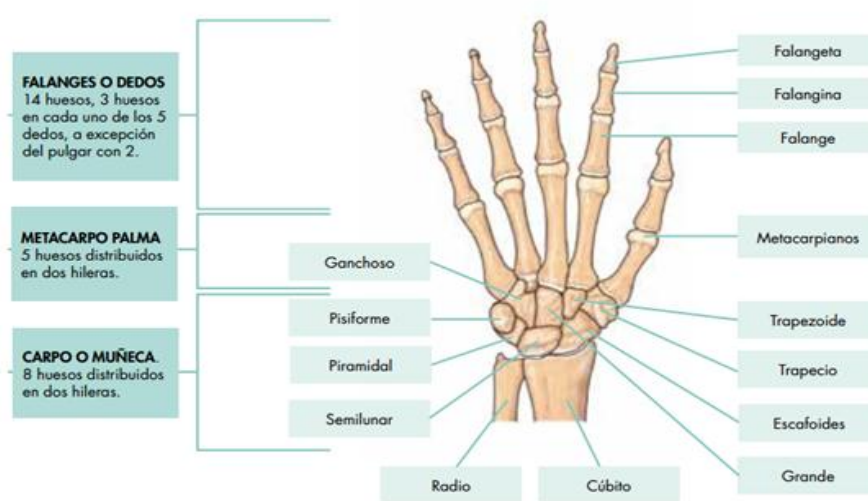


Figura 1. 4: Huesos de la mano humana
Fuente: (Morfología de manos y pies. McGraw Hill. 2006)

La muñeca tiene ocho huesos (los huesos carpianos), dispuestos en dos grupos de cuatro. Estos huesos encajan en una pequeña cavidad formada por los huesos del antebrazo el radio y el cúbito, si bien es de resaltar que el cúbito no se articula verdaderamente con ninguno de los huesos de la muñeca. Bajo la cara inferior del cúbito se encuentra el ligamento triangular de la muñeca, que sí se articula con los huesos. (McGraw Hill, 2013.)

1.7 TIPOS DE MOVIMIENTO DE LA MUÑECA

Según I. Kapandji, (Sexta Edición, 2006). La muñeca, articulación distal del miembro superior, permite que la mano adopte la posición óptima para la prensión. De hecho, el complejo articular de la muñeca posee dos grados de libertad. Con la pronosupinación, rotación del antebrazo sobre su eje longitudinal, que añade un tercer grado de libertad a la muñeca, la mano se puede orientar en cualquier ángulo para coger o sujetar un objeto.

El núcleo central de la muñeca es el carpo, conjunto compuesto por ocho pequeños huesos, que ha sido objeto en los últimos treinta años de muchos estudios por parte de los anatómicos, y de avances tecnológicos considerables. (I. Kapandji, 2006).

Asimismo, hay nociones totalmente renovadas, lo que permite entender mejor la compleja fisiología de este complejo articular desconcertante en el plano mecánico. Aunque el estudio y la comprensión de la muñeca están lejos de conseguirse. El complejo articular de la muñeca (figura 1.5) se compone en realidad de dos articulaciones, incluidas en el mismo conjunto funcional con la articulación radiocubital distal:

- La articulación radiocarpiana, que articula las filas de hueso proximal del carpo y la extremidad distal del radio.
- La articulación mediocarpiana, que articula entre ellas las dos filas de los huesos del carpo.

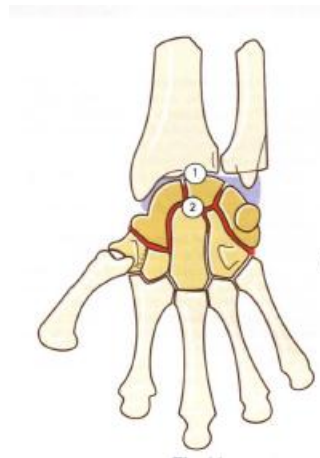


Figura 1. 5: Articulación de una muñeca
Fuente: I. Kapandji, (Sexta Edición, 2006).

1.7.1 Definición de los movimientos de la muñeca

Los movimientos de la muñeca se efectúan en torno a dos ejes, con la mano en posición anatómica, es decir en máxima supinación (figura 1.6):

- Un eje AA', transversal, perteneciente al plano frontal T. En torno a este eje se realizan los movimientos de flexo extensión en el plano sagital¹:
- **Flexión (flecha 1):** la cara anterior o palmar de la mano se aproxima a la cara anterior del antebrazo; extensión (flecha 2): la cara posterior o dorsal de la mano se aproxima a la cara posterior del antebrazo. Es preferible no utilizar los términos de flexión dorsal, en contradicción con los músculos extensores, y con mayor abundamiento, flexión palmar, ya que se trata de una tautología.²
- Un eje BB', anteroposterior, perteneciente al plano sagital S. En torno a este eje, en el plano frontal, se efectúan los movimientos de aducción-abducción, que algunos autores denominan de forma abusiva e imitando a los anglosajones, inclinación o desviación cubital o radial: aducción o inclinación cubital (flecha 3): la mano se aproxima al eje del cuerpo y su borde interno o borde cubital (el del meñique), forma con el borde interno del antebrazo, un ángulo obtuso abierto hacia dentro. (I. Kapandji, 2006).
- Abducción o inclinación radial (flecha 4): la mano se aleja del eje del cuerpo y su borde externo o borde radial (el del pulgar) forma, con el borde externo del antebrazo, un ángulo obtuso abierto hacia fuera.
- El movimiento de Abducción no es un movimiento funcional para los amputados, por tanto, se decidió no tomarlo en cuenta. Además, hasta la fecha no se ha reportado alguna prótesis mioeléctrica con este movimiento.
- En realidad, los movimientos naturales de la muñeca son movimientos combinados en torno a ejes oblicuos:

¹ **Plano Sagital:** Los planos sagitales, en anatomía, son aquellos planos perpendiculares al suelo y en ángulo recto con los planos frontales, que dividen al cuerpo en mitades izquierda y derecha

² **Tautología:** es una fórmula bien formada de un sistema de lógica proposicional que resulta verdadera para cualquier interpretación.

- Flexión/Aducción
- Extensión/Abducción

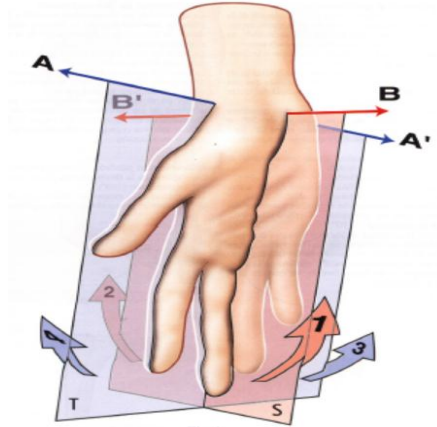


Figura 1. 6: Movimientos básicos de la muñeca
Fuente: I. Kapandji, (Sexta Edición, 2006).

1.7.2 Movimientos pasivos de flexo- extensión³

La amplitud de la flexión pasiva es mayor de 90° en pronación (100°). La amplitud de la extensión pasiva es mayor de 90° tanto en pronación como en supinación. Con el antebrazo en pronación, la posición de partida cero corresponde al borde cubital del tercer metacarpiano alineado con el eje del antebrazo distal.

Esta posición facilita la colocación del eje del goniómetro⁴ sobre el hueso grande proximal, es decir, el centro de rotación para el movimiento de la muñeca (figura 1.7). Las mediciones pueden realizarse colocando el goniómetro en el dorso de la muñeca o en el eje radial de la articulación.

⁴ **Goniómetro:** Instrumento que sirve para medir ángulos, usado en topografía, cristalografía, radiodifusión y otras ciencias y técnicas.

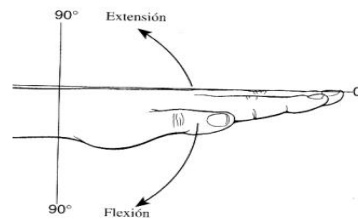


Figura 1. 7: Movimientos de flexo-extensión
Fuente: I. Kapandji, (Sexta Edición, 2006).

1.8 MÚSCULOS ENCARGADOS DEL MOVIMIENTO DE LA MUÑECA

Los tendones de los músculos motores de la muñeca: se trata de los músculos motores extrínsecos de los dedos y los motores de la muñeca, de los que sólo el músculo flexor cubital del carpo se inserta en un hueso de la hilera proximal del carpo, en el pisiforme. El músculo flexor radial del carpo 1, que, tras haber recorrido un canal especial y separado del conducto carpiano, bajo el ligamento anular anterior del carpo, se inserta en la cara anterior de la base del segundo metacarpiano, y de manera accesoria, en el trapecio y base del tercer metacarpiano. (Kapandji, 2006).

- El músculo palmar largo 2, menos potente, entremezcla sus fibras verticales con las fibras transversales del ligamento anular anterior del carpo y envía cuatro cintillas pre-tendinosas que se insertan en la cara profunda de la dermis de la palma de la mano.
- El músculo flexor cubital del carpo 3, que, tras haber pasado por delante de la apófisis estiloides cubital, se inserta en el polo superior del pisiforme, y de manera accesoria, en el ligamento anular, hueso ganchoso y el cuarto y quinto metacarpianos. En una visión posterior de la muñeca, en (figura 1.8 a), puede observarse:
- El músculo extensor cubital del carpo 4, que, tras pasar por detrás de la apófisis estiloides cubital, se inserta en la cara posterior del quinto metacarpiano.

• Los dos músculos extensores radiales del carpo, el corto 5 y el largo 6, que, tras haber recorrido la parte superior de la tabaquera anatómica, se insertan, el largo 6 en la base del segundo metacarpiano y el corto 5 en la base del tercer metacarpiano. En una visión del borde interno de la muñeca (figura 1.9b), se pueden observar los tendones:

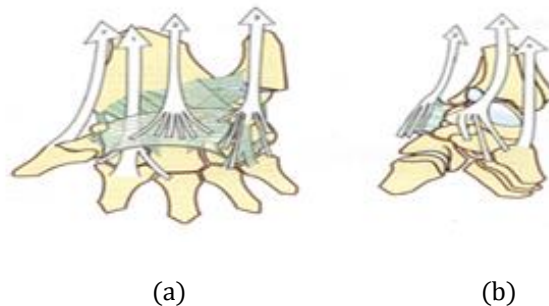


Figura 1. 8: (a) Músculo encargado del movimiento de la muñeca (Borde posterior); (b) Músculo encargado del movimiento de la muñeca (Borde posterior).

Fuente: I. Kapandji, (Sexta Edición, 2006).

Tanto los músculos radiales (extensores radiales del carpo) como los músculos largos del pulgar delimitan la apófisis estiloides radial. El tendón del músculo extensor largo del pulgar constituye el límite posterior de la tabaquera anatómica. Los tendones del músculo abductor largo y del músculo extensor corto del pulgar constituyen su límite anterior. (Kapandji, 2006).

1.9 AMPUTACIONES

Debido a diferentes circunstancias como accidentes o enfermedades existen las llamadas amputaciones que se definen en los siguientes párrafos.

- Una amputación es un procedimiento quirúrgico que consiste en la remoción, extirpación o resección de parte o la totalidad de una extremidad a través de una o más estructuras óseas, en forma perpendicular al eje longitudinal del miembro. Cuando se

efectúa a través de una interlínea articular en 2005 se denomina desarticulado según el Dr. Carlos Arce Fisiatra.

- Una amputación es la ausencia de un segmento corporal o parte de él por causa congénita o adquirida la cual puede ser resultado de un accidente o por necesidad de detener una enfermedad. Se considera una amputación ideal, aquella realizada por debajo de la articulación a una distancia considerada óptima según la articulación afectada. (S. Willar, H., L. Hopkins, H., S. Spackman, C. y otros (1998).

1.10 PRÓTESIS

Según el Instituto Nacional de la Salud (NIH) es un dispositivo diseñado para reemplazar una parte faltante del cuerpo o para hacer que una parte del cuerpo trabaje mejor. (figura 1.9). Una prótesis debe reemplazar un miembro del cuerpo dando casi la misma función que un miembro natural sea una pierna o un brazo indica Cerephi “Centro de Rehabilitación Física en el año 2013”.



Figura 1. 9: Prótesis robótica
Fuente: Cerephi, 2013.

1.10.1 PRÓTESIS DE MANO

"La mano es considerada como una extensión del cerebro humano al exterior" de allí su crucial función y su vital importancia indicó el filósofo alemán Kant. La mano humana no solo es un órgano que facilita nuestras actividades recreativas, laborales, y de comunicación en nuestra vida.

Es, además, un instrumento altamente especializado dotado de gran sensibilidad; a través del sentido del tacto las manos nos ayudan a explorar y percibir nuestro alrededor (figura 1.10).



Figura 1. 10: Prótesis robótica de una mano
Fuente: Empresa alemana Handprothese, 2009.

Al reemplazar una mano o brazo con una extremidad protésica se debe analizar que desea la persona amputada y si la prótesis es la correcta.

1.10.2 MATERIAL DE LA PRÓTESIS

La calidad de los materiales de la superficie de contacto influirá en la comodidad del encaje. Los materiales de la estructura afectarán la resistencia y el peso de la prótesis completa. Es importante recordar que ningún material o tipo de componente es el mejor para todos los individuos.

Cada individuo debe ser cuidadosamente evaluado en consideración de su estilo de vida, esperanzas 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 era espacial como titanio, fibra de carbón, y plásticos.

1.10.3 Material termoplástico

Las láminas termoplásticas se usan mucho en el campo de la protésica para fabricar conexiones protésicas y componentes estructurales (figura 1.11). Estos materiales están disponibles en láminas de varios grosores y colores. Los tipos más básicos son el polipropileno y polietileno. (Uellendahl, 1998).

El polipropileno (PP) es un plástico muy rígido para el que se han encontrado varios usos en protésica. La estructura de soporte de la conexión protésica suele fabricarse con polipropileno. El polietileno (PE) de baja densidad es un termoplástico blando y flexible que puede usarse para las conexiones protésicas. Una de las ventajas de estos y otros tipos de termoplástico es que se pueden remodelar. Ésta puede ser una gran ventaja cuando existe alguna zona de presión en el encaje. (Uellendahl, 1998).



Figura 1. 11: Material termoplástico
Fuente: Ortopedia Técnica López, 2014.

El material elegido se fabrica sobre un molde de yeso de la extremidad residual tras ser calentado en un horno a la temperatura necesaria para poder darle forma, generalmente alrededor de 300-400° Fahrenheit (149-204° centígrados). (Uellendahl, 1998).

1.10.4 La silicona y otros materiales similares

A lo largo de los años, se han encontrado más usos para la silicona en el campo de la protésica de extremidades. Ahora se usa como material de relleno para encajes, como sistema de suspensión del encaje de succión de silicona y es el material preferido para las reconstrucciones de mano cosméticas de gran calidad, por nombrar algunos usos.

Esto puede ser muy importante porque la fricción suele causar excoriaciones. El encaje de succión de silicona utiliza lo que podría llamarse un "calcetín" de silicona (figura 1.12) que se pone directamente sobre la piel y que incorpora una clavija de fijación en la parte inferior, fijando así el calcetín, y la persona amputada, a la prótesis. (Uellendahl, 1998).



Figura 1. 12: Material de silicona
Fuente: Touch bionics, 2016.

1.10.5 Metales

En protésica, los componentes metálicos suelen ser aquéllos fabricados por uno de los muchos distribuidores de componentes protésicos. Pueden ser rodillas (figura 1.13), manos,

brazos, tobillos, por nombrar algunos. Se pueden encontrar ejemplos de aluminio, acero inoxidable y titanio de estos componentes. El aluminio, en general, se considera como una alternativa más liviana que el acero. (Uellendahl, 1998).

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. El acero 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. (Uellendahl, 1998).

Al principio, las pequeñas unidades de rodilla que se usaban para las prótesis endoesqueléticas se hacían de acero. Aunque el material es bastante pesado, se necesita muy poco para elaborar estas rodillas. El titanio es una alternativa resistente y liviana. La desventaja es su elevado precio. (Uellendahl, 1998).



Figura 1. 13: Mano metálica
Fuente: Laura Lean/PA Wire, 2016

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. (Uellendahl, 1998).

1.10.6 Acabado cosmético

Las prótesis endoesqueléticas suelen estar revestidas de un material de espuma para que tengan la misma forma que la pierna sana. Las fundas de espuma están disponibles en poliuretano y polietileno. Pueden ser muy blandas, para prótesis por encima de la rodilla con funda de una sola pieza, o bastante sólidas, para prótesis por debajo de la rodilla y fundas cosméticas discontinuas por encima de la rodilla.

Estos materiales vienen en piezas extra grandes hechas a medida para conseguir una óptima apariencia cosmética. El material más tradicional y común para la funda cosmética es la media de nailon. Son parecidas a las espesas medias tipo liga (o de calcetín) que usan las mujeres. Recientemente se han lanzado al mercado pieles protésicas hechas a medida (o casi a medida (figura 1.14) que ofrecen un acabado más natural.

Las pieles protésicas tienen el mismo color que la piel de la persona y también pueden mostrar algunos detalles, como los vellos de la pierna. Estas pieles protésicas suelen estar hechas de un material parecido al látex. (Uellendahl, 1998).



Figura 1. 14 : Mano con acabado cosmético

Fuente: Touch bionics, 2016.

La ventaja de una piel hecha a medida es obviamente su apariencia más “real”. Los inconvenientes son: el aumento del costo, la mayor dificultad para hacer ajustes después de

terminar la prótesis. Y en el caso de articulaciones como la rodilla protésica de una prótesis por encima de rodilla o un tobillo ajustable a la altura del talón, la piel puede arrugarse o impedir un óptimo funcionamiento de los componentes subyacentes. (Uellendahl, 1998).

El material usado depende de la necesidad del beneficiado, debido a que se presentan distintas insuficiencias en el tejido afectado. Por ejemplo, el material metálico presenta buenas características mecánicas pero es muy difícil llegar a ser usado como material para prótesis de tejidos duros como el hueso. (Uellendahl, 1998).

1.11 TIPOS DE PRÓTESIS

Éstas se han desarrollado con el fin de mejorar o reemplazar una función, una parte o un miembro completo del cuerpo humano afectado, por lo tanto, una prótesis para el paciente y en particular para el amputado, también colabora con el desarrollo psicológico del mismo, creando una percepción de totalidad al recobrar movilidad.

1.11.1 Según nivel de amputación:

Ottobock que es una empresa que fabrica prótesis explica que el nivel de amputación es la altura a la que se amputa la parte del cuerpo afectada. La amputación es determinante para elegir la prótesis adecuada además la determina el médico antes de la operación y depende del motivo de la amputación.

En intervenciones planeadas también se suele consultar a un técnico ortopédico para aclarar con él qué nivel de amputación es el adecuado para la posterior protetización. Los tipos de amputaciones son desarticulados (hombro, codo, muñeca), prótesis bajo codo, arriba de codo.

1.11.2 Según material constitutivo:

Pueden ser mecánicas (convencionales) - electrónicas - mioeléctrica - híbridas.

- Según su función pueden ser: **Pasivas (cosméticas)**

Estas prótesis tienen como función básica la estética o la cosmética (figura 1.15), es decir sirven para restablecer el aspecto exterior, en otras palabras, la imagen corporal. Además, deben satisfacer las necesidades y exigencias del paciente. (Arce, 2005).



Figura 1. 15: Prótesis Pasiva
Fuente: C. Arce, 2005.

- **Activas (funcionales)**

Se llaman activas porque son impulsadas por tracción, y tiene su propia fuerza. Utilizan sistemas de cables comandados por movimientos del hombro especialmente (figura 1.16). (Arce, 2005).



Figura 1. 16: Prótesis Activa
Fuente: C. Arce, 2005.

- **Prótesis híbrida: (fuerza propia + fuerza ajena)**

Combinación de sistemas de fuerza propia (corpórea) y de la fuerza ajena (extracorpórea). Una prótesis híbrida combina el poder corporal con el poder (mioeléctrico) en una sola prótesis. Puede utilizar un codo de control mecánico y un dispositivo terminal (garfio o mano figura 1.17) de control mioeléctrico o un codo controlado eléctricamente y un dispositivo terminal de control mecánico. (Arce, 2005).



Figura 1. 17: Prótesis Híbrida
Fuente: C. Arce, 2005.

- **Prótesis de brazo mioeléctrica:**

El desarrollo de estas prótesis ha constituido una experiencia interesante permitiendo profundizar en el área de las prótesis robóticas y elaborar propuestas innovadoras en ciertos

aspectos. Uno de ellos es la configuración cinemática versátil, compacta y sencilla, y otro la arquitectura distribuida y robusta, que cubre la necesidad de control de posición y fuerza. (Arce, 2005).

Son las denominadas prótesis activas de fuerza ajena debido a que tienen un control mioeléctrico, es decir, se utilizan potenciales eléctricos (microvoltios) detectables en la superficie de la piel cuando existe una contracción del músculo del muñón. Estos potenciales son recogidos por electrodos, amplificados y enviados como señales de control a los elementos funcionales. (Arce, 2005).

En la prótesis de antebrazo (figura. 1.18) se colocan los electrodos de tal forma que los que los extensores abren la mano y los flexores cierran la mano. En las prótesis de brazo los electrodos van colocados de tal modo que el tríceps abre la mano y el bíceps cierra la mano.



Figura 1. 18: Prótesis Mioeléctrica
Fuente: C. Arce, 2005.

También se caracterizan por tener un manejo sencillo ya que requiere que el usuario flexione sus músculos para operarla, a diferencia de las prótesis accionadas por el cuerpo que requieren el movimiento general del cuerpo, además tienen buena fuerza prensora y su función se asemeja más a la humana por su rendimiento y fuerza.

1.12 MANOS ROBÓTICAS

Una mano robótica es una herramienta que está destinada para cumplir múltiples propósitos, el más importante es simular partes del cuerpo, además de que sirven para cubrir las partes faltantes y lograr un equilibrio estético.

1.12.1 ANÁLISIS DE DISEÑOS DE MANOS ROBÓTICAS

Actualmente en el mundo existen muchos grupos de personas dedicadas a mejorar la capacidad de las manos robóticas, intentando simular exactamente los movimientos reales de éstas. A continuación, se detallan los diferentes tipos de diseños de manos robóticas:

- **La mano Stanford/JPL (Salisbury, 1981).**

El sistema de control conecta cuatro cables de acero flexible recubiertos de teflón que salen desde un servomotor en cada uno de los tres dedos con 3 grados de libertad (figura 1.19). De esta manera, la mano es capaz de adherir configuraciones de $N+1$ tendones, en los cuales, $N+1$ cables y motores son requeridos para N grados de libertad.

El ensamblaje para manejarlo es torpe y los cables flexibles que se utilizan para su construcción son de limitada fiabilidad y capacidad de transmisión de potencia. El sistema de tensión del cable, está basado en sensores de fuerza que aseguran un control exacto de fuerza en los dedos (USC Robotics Research Lab).

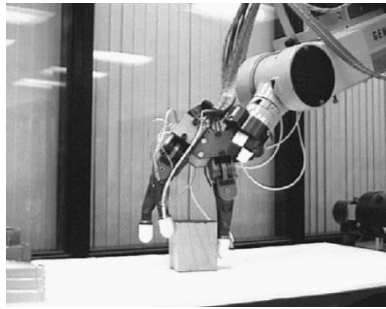


Figura 1. 19: Mano Stanford/JPL
Fuente: O. Brock, 2005.

- **Mano Utah (Dextrous, 1982).**

Esta mano posee dedos con 4GDL, aunque con un diseño no antropomórfico desde los nudillos (figura 1.20). La inclusión de tres dedos minimiza la dependencia de la fricción y añade un soporte redundante para las 18 tareas de manipulación. Cada dedo con N-GDL es controlado por 2N actuadores independientes y cables de tensión como tendones.

Estos tendones son parte de un complejo sistema de manejo de cables proporcionado por 32 cilindros de vidrio neumáticos especialmente diseñados y válvulas de tubo tipo jet. Para el control se utiliza los sensores de rotación de efecto hall montados en cada articulación de cada dedo transmiten la medida del ángulo de la articulación. Aunque los dedos permiten una elevada ejecución dinámica, con sensores de fuerza para trabajo excesivo de 7 Kg y componentes de frecuencia que exceden los 20 Hz, su implementación es compleja.



Figura 1. 20: Mano Utah/Mit Dextrous
Fuente: O. Brock, 2005.

- **Mano robot (Matsuoka, 1995).**

Esta mano robótica fue construida en el laboratorio de Inteligencia Artificial de MIT “Instituto Tecnológico de Massachusetts” (figura 1.21). Cada dedo está compuesto de dos falanges y dos juntas articuladas. Estas articulaciones son controladas por un sistema cable/polea motora que imparte 2 GDL al dispositivo y es capaz de generar un par equivalente a 0.22 Kg en las yemas. La fuerza y precisión reducidas de estos dedos son aceptables porque los objetivos de la mano Matsuoka es la simulación de movimientos para manipulación.

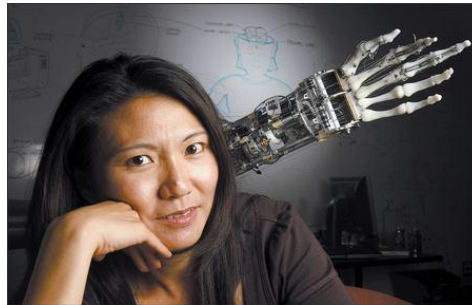


Figura 1. 21: Mano robot Matsuoka
Fuente: Wired Science, 2012.

- **Mano Robonaut (1999)**

Esta mano robótica fue diseñada para combinar tamaño, cinemática y fuerza de la mano de un astronauta. Por un lado, el set de trabajo para la manipulación diestra incluye dos dedos con 3-GDL; y por otro lado el set de agarre estable incluye dos dedos con 1-GDL (figura 1.22). Un eje flexible de acero inoxidable acoplado a un motor DC sin escobillas alojado en el antebrazo transmite la potencia a cada uno de los dedos.

Los dedos de agarre tienen tres articulaciones de flexión que cierran con aproximadamente ángulos iguales sobre un rango de 90°. Debido a la geometría compleja de la mano, muchas de sus partes fueron moldeadas en aluminio directamente. Los sensores de posición absoluta

están embebidos en cada articulación de la mano, encoders incrementales sobre los motores, celdas de carga y sensores táctiles proveen la realimentación de posición y fuerza para el control.

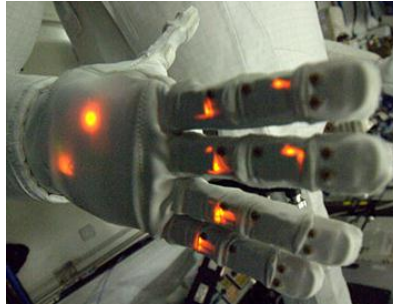


Figura 1. 22: Mano robonaut
Fuente: How Stuff Works, 2000.

- **Mano DLR (2000)**

La mano DLR es una mano articulada multisensor con cuatro dedos, controlada por un guante de datos. Está diseñada con actuadores lineales integrados en la palma y en la falange proximal que permiten manipular las articulaciones de los dedos (figura 1.23). Cada dedo tiene una articulación de base de 2-GDL capaz de flexionar $\pm 45^\circ$ y $\pm 30^\circ$ de abducción/aducción, un nudillo de 1-GDL capaz de flexionar 115° y una articulación distal capaz de flexionar 110° .

La articulación distal es manejada pasivamente debido al acoplamiento inter-articulaciones. El control de posición, fuerza y rigidez es llevado a cabo por un medidor de fuerza basado en sensores de par, sensores ópticos de posición de las articulaciones y sensores táctiles.



Figura 1. 23: Mano DLR

Fuente: DLR, Robotics and Mechatronics Center, 2016.

- I-Limb Hand (2003-2009)

Se trata de la prótesis biónica comercial más vendida. Desde la primera versión en 2003, más de 1000 pacientes la utilizan para tareas sencillas en su vida diaria. La última versión de 2009 tiene 5 dedos con 2-GDL cada uno. El sistema motor transmisión se integra en cada dedo (figura 1.24).

La novedad de la mano, es el sistema de sensores mioeléctricos. Se basa en dos electrodos que reciben cualquier mínimo impulso a través del muñón del paciente. Estas señales procedentes de los músculos que llegan al extremo del muñón, se amplifican y se reconocen. De esta manera con el software que la empresa facilita, se pueden crear y memorizar movimientos sencillos (dar la mano, coger una pelota, una jarra, el móvil, entre otros).

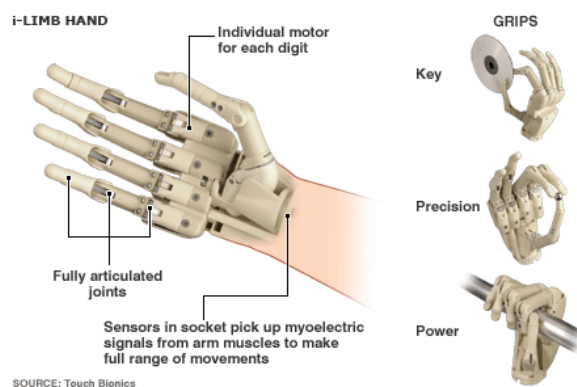


Figura 1. 24: Mano I-Limb Hand

Fuente: Touch bionics, 2008.

- **Mano Shadow (Dexterous C6M, 2009)**

Se trata de la mano robótica similar a la humana más avanzada actualmente. Pertenece a la compañía Robot Shadow Company y es la utilizada para realizar las investigaciones relativas al proyecto Handle (figura 1.25). Dispone de 24 grados de libertad, que intentan reproducir fielmente los movimientos y aspecto de una mano real.

Utiliza 20 motores de corriente continua para mover cada una de las articulaciones aplicados a un sistema de engranajes y un par tensores a modo de tendones que mueven cada dedo en uno u otro sentido. La comunicación se realiza desde un PC con una tarjeta parallel-to-CAN. Integra un microcontrolador PIC que gestiona la red local CAN bus. Cada motor lleva acoplado un sensor de fuerza y un sensor de giro de efecto hall. Ambas medidas son enviadas a través de CAN bus para poder realizar el control del sistema.



Figura 1. 25: Mano Shadow Dexterous C6M
Fuente: Robot Shadow Company, 2007.

En los siguientes numerales se exponen los principales elementos que forman parte del sistema de control de una mano robótica.

1.13 Mecanismos utilizados en las manos robóticas

Los mecanismos utilizados en la muñeca se basan casi siempre en actuadores debido al movimiento. A la muñeca le corresponden los siguientes movimientos: giro (*hand rotate*),

elevación (*wrist flex*) y desviación (*wrist rotate*) como lo muestra el modelo inferior, aunque cabe hacer notar que existen muñecas que no pueden realizar los tres tipos de movimiento (figura 1.28). (Daza, 2015).

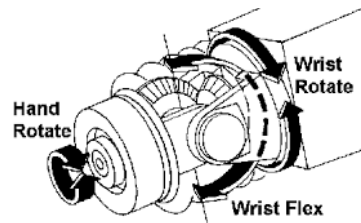


Figura 1. 26: Movimiento de la muñeca
Fuente: V. González, 2003.

1.14 Sensores utilizados en las manos robóticas

A lo largo del tiempo se han creado manos robóticas con diferentes sensores. A continuación, se destacan algunos de éstos:

1.14.1 Sensores ópticos

Estos sensores se basan en los principios de reflexión o absorción de la radiación infrarroja preferiblemente. Su función principal es detectar diferentes factores a través de un lente óptico. Mayoritariamente se utilizan como emisores *LEDs* de luz infrarroja a impulsos controlados por reloj y como receptores se utilizan fototransistores o fotodiodos. La señal de salida es en gran medida independiente de la iluminación ambiental, ya que la luz visible puede eliminarse fácilmente por filtración.

El sistema óptico de emisión y recepción (figura 1.27) es de muy bajo costo y de fácil implementación que se puede instalar en las articulaciones de la prótesis. (S. Pirozzi, 2009).

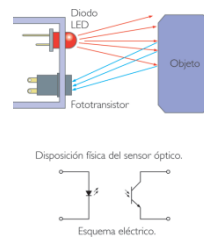


Figura 1. 27: Sensor óptico
Fuente: Guerra, 2012.

1.14.2 Sensores de inclinación o posición

Existen dos tipos de sensores mediante los cuales es posible obtener información sobre un ángulo de inclinación:

- a) **Sensores de medición directa:** Son aquellos que están diseñados para proporcionar información directa de la posición angular.
- b) **Sensores de medición indirecta:** Son aquellos cuya variable de medición no es necesariamente el ángulo de inclinación, si no, que mediante ciertos arreglos y acondicionamiento pueden brindar una posición angular. (SCM International, “Sensores de Inclinación”, 2008).

1.14.2.1 EL GIROSCOPIO

- a) El giroscopio (figura 1.28) es un dispositivo que permite conocer como varía un ángulo en el tiempo, mientras este se encuentra rotando (velocidad angular). Los giroscopios antiguamente por su tamaño, peso y carácter mecánico tenían limitadas aplicaciones, siendo esencialmente utilizados en aplicaciones militares. (SCM International, “Sensores de Inclinación”, 2008).



Figura 1. 28: Sistema óptico de una mano robótica
Fuente: Wired, (2012).

1.14.2.2 EL ACELEROMETRO

Los acelerómetros (figura 1.29) son dispositivos electromecánicos que detectan las fuerzas de aceleración, ya sea estática o dinámica. Las fuerzas estáticas incluyen la gravedad, mientras que las fuerzas dinámicas pueden incluir vibraciones y movimiento. Los acelerómetros pueden medir la aceleración en uno, dos o tres ejes.

Es un sensor que permite conocer la aceleración que se produce al realizarse un movimiento, a lo largo del eje en el cual se esté trabajando. Hay que tomar en cuenta que un acelerómetro no mide la aceleración de la gravedad en sí, sino, que mide una magnitud de aceleración en general. El acelerómetro incluye un modo de reposo que hace que sea ideal para la electrónica de mano que funcionan con baterías.

Una característica especial que presenta el acelerómetro es que puede ser utilizado también como un sensor de inclinación, para lo cual se usa la aceleración de la gravedad como un vector para determinar la orientación del objeto en el espacio. (Shertzelectronic, 2014).

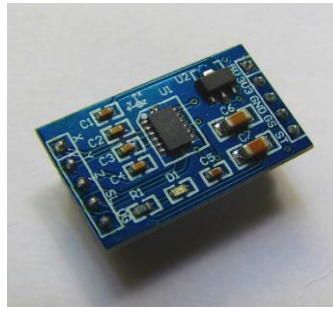


Figura 1. 29: Acelerómetro de 3ejes
Fuente: HetPro, (2016).

1.15 Actuadores utilizados en las manos robóticas

Uno de los principales actuadores en una mano robótica son los servomotores, que se detalla a continuación:

1.15.1 SERVOMOTOR

Un servomotor (figura 1.30) es un dispositivo pequeño capaz de mover su eje en posiciones angulares específicas dentro de su rango de operación y mantenerse estable en dicha posición, gracias a una señal de entrada de tipo cuadrada con ancho de pulso variable.

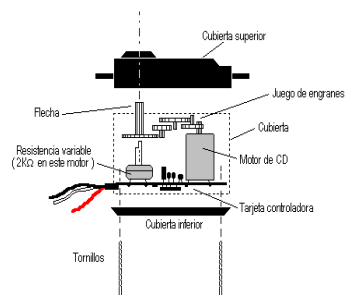


Figura 1. 30: Parte interna de un Servomotor
Fuente: C. Davis, (2016)

Estos dispositivos electromecánicos son los actuadores del sistema, permitirán el desplazamiento de los miembros del brazo robótico. Tienen un eje de rendimiento controlado.

Este puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada. Con tal de que una señal codificada exista en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje.

Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones cambia. Esta señal codificada es emitida por el microcontrolador en forma de PWM (modulación por ancho de pulso). En la práctica, se usan servos para posicionar superficies de control como el movimiento de palancas, pequeños ascensores y timones. Ellos también se usan en radio control, títeres, y por supuesto, en robots. (González, 2003).

1.15.2 FUNCIONAMIENTO DE UN SERVOMOTOR

Un servomotor estándar tiene un rango de funcionamiento de 0° a 180° , con una posición llamada neutra a 90° , pero este rango puede variar según el fabricante, pudiendo incluso llegar a 360° el rango completo. El limitante para estos rangos por lo general es el sistema mecánico o el tope del potenciómetro.

Con el fin de posicionar el servomotor se utiliza una señal cuadrada (figura 1.31), en la cual el ancho de pulso varía para dar la posición deseada. Normalmente la frecuencia de esta señal de control se establece en 50Hz (20ms).

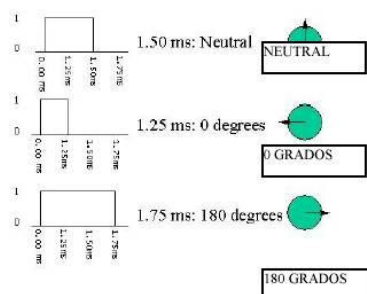


Figura 1. 31: Señales para controlar un servomotor
Fuente: V. González, 2003.

1.16 CONTROLADOR

Para comandar el sistema de las manos robóticas se utiliza microcontroladores. Estos microcontroladores son dispositivos que tienen un circuito integrado que cumple la función de una microcomputadora, es decir, dispone de una central de procesamiento (CPU), puertos de entrada y salida, unidades de memoria (RAM Y ROM), que están conectados entre sí. Existe gran variedad de microcontroladores (figura 1.32), de los cuales se pueden resaltar las siguientes características generales:

- Permiten la ejecución de instrucciones mediante la metodología 'pipeline' 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 bits.
- Los registros punteros X, Y y Z tienen capacidades de direccionamiento diferentes entre sí.
- Los registros 0 al 15 tienen diferentes capacidades de direccionamiento que los registros 16 al 31.
- Los registros de I/O 0 al 31 tienen distintas características que las posiciones 32 al 63.
- La instrucción CLR afecta los 'flag', mientras que la instrucción SER no lo hace, a pesar de que parecen ser instrucciones complementarias (dejar todos los bits en 1, y dejar todos los bits en 0 respectivamente).
- Los códigos de operación 0x95C8 y 0x9004 hacen exactamente lo mismo (LPM).



Figura 1. 32: Microcontrolador ATMEL
Fuente: EngineersGarage, (2012).

1.17 BATERÍA PARA PRÓTESIS

Se denomina batería eléctrica (figura 1.33), al dispositivo que consiste en una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en electricidad. Cada celda consta de un electrodo positivo, o ánodo y un electrodo negativo, o cátodo y electrolitos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos, facilitando que la corriente fluya fuera de la batería para llevar a cabo su función.

Las baterías vienen en muchas formas y tamaños, desde las celdas en miniatura que se utilizan en audífonos y relojes de pulsera, a los bancos de baterías del tamaño de las habitaciones que proporcionan energía de reserva a las centrales telefónicas y ordenadores de centros de datos. (Cardona, 2009).



Figura 1. 33: Batería tipo lipo
Fuente: BrikoGeek, (2016).

CAPITULO II

2. DISEÑO Y MODELAMIENTO DE LA MANO ROBÓTICA

En este capítulo se detallan y analizan las posibles alternativas y soluciones para el diseño de la primera prótesis además de la elección de la más óptima según su funcionamiento y estructura, los respectivos cálculos de los materiales a usar como lo son torques, pesos, esfuerzos, entre otros. El diseño realizado en el software Solid Works del modelo y alternativa a ejecutar.

2.1 ALTERNATIVAS DE DISEÑO PRELIMINAR

Se analizan diferentes tipos de accionamiento para la muñeca, para utilizar el sistema más óptimo, los cuáles se detallan a continuación:

2.1.1 Accionamiento 1 para la muñeca

Inicialmente se planteó implementar un diseño de transmisión de movimiento para la muñeca, en el cual los engranes están paralelos como se observa en la figura 2.1. La ventaja de este mecanismo es que se ejecutan los movimientos básicos de la muñeca. El inconveniente de este sistema es el espacio que se requiere para ubicar los diferentes elementos, lo cual sobrepasa las medidas estándar de una mano humana, siendo así una prótesis irreal lo que ocasionaría que el usuario no se sienta a gusto con ella.



Figura 2. 1: Alternativa de accionamiento 1
Fuente: Autor

2.1.2 Accionamiento 2 para la muñeca

El servomotor del accionamiento 1 va a estar anclado a la estructura del brazo, de tal forma que permitirá el movimiento de flexo-extensión, es decir de arriba hacia abajo. El servomotor del accionamiento 2 va a estar anclado al otro servomotor, de tal forma que permite el movimiento de prono-supinación, es decir el giro de lado a lado. Como se observa en la figura 2.2, la sujeción de los servomotores se realiza mediante un soporte que permita la unión entre los dos servos.

La desventaja de esta alternativa es su tamaño, ya que ocupa un espacio mayor a lo normal, ocasionando que las dimensiones de la muñeca no sean reales.

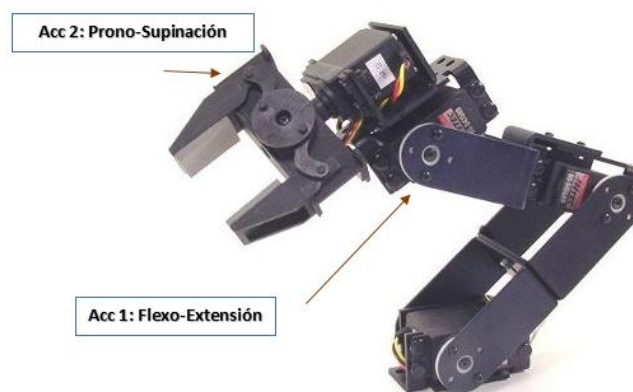


Figura 2. 2 Alternativa de accionamiento 2
Fuente: Autor

2.1.3 Accionamiento 3 para la muñeca

El servomotor que se encuentra anclado en el antebrazo es el principal elemento para el movimiento de pronosupinación de la muñeca, además de que en éste se concentrarán los microservos que permiten el movimiento de los dedos. En cada uno de los microservos estará sujeta una polea, por la cual pasan hilos de nylon, los cuales al girar permiten la inclinación de los dedos, teniendo una desventaja mínima.

También se implementa un sistema mecánico que consta de un perno por el cual cruzan arandelas de goma para ejecutar el movimiento de flexo extensión de la muñeca (figura 2.3).



Figura 2.3 Alternativa de accionamiento 3

Fuente: Autor

2.1.4 Elección de la alternativa

Se escogió la tercera alternativa, debido a que este accionamiento es el más recomendable y adecuado por las características que presenta, como su ubicación, su tamaño, y su funcionamiento.

Además, el sistema de control consta de un guante que simula el movimiento de la muñeca, dicho sistema es de fácil manipulación para el usuario y no presenta costos excesivos.

2.2 ANÁLISIS DE LAS DIMENSIONES ESTÁNDAR DE UNA MANO HUMANA

Según la Norma DIN 33 402 2° las medidas estándar de una mano humana deben tener semejanza con el tamaño del rostro, desde la quijada hasta la mitad de la frente como se observa en la figura 2.4.



Figura 2. 4 Medidas estándar de una mano humana
Fuente: D. Vertel, (2012).

En la siguiente tabla 2.1 se explica las medidas estándar de una mano humana con cada de uno de sus dedos:

Tabla 2.1 Medidas de la mano humana

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 dedo 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

2.3 PARÁMETROS DEL DISEÑO

Los criterios tomados en cuenta para la selección de materiales y desarrollo del diseño del prototipo de la mano robótica, se basan principalmente en costos, adaptación al paciente, facilidad de manejo, eficiencia al momento de su ejecución y su seguridad.

2.4 CÁLCULOS PARA LA MANO ROBÓTICA

Estos cálculos permitirán encontrar las medidas para diseñar y construir el eje que soportará a la estructura, es decir, su diámetro, así como su probabilidad de falla.

1. Decisiones de diseño para el eje

Se asume el factor de seguridad para el diseño.

$$1) F_S = 2$$

F_s . es el factor de seguridad para el diseño del eje de la mano robótica. Este factor mide la calidad del diseño, siempre es necesario tomarlo en cuenta para prever la probabilidad de una falla. Se suele escoger en base a la carga que va a soportar la pieza. (Robert L Norton, 2006).

Constante de la Resistencia a la fluencia del acero inoxidable. (Material del eje).

$$S_{yAceroInoxidable303} = 241Mpa$$

2. Geometría del eje

A continuación, se describen las distintas dimensiones del eje diseñado:

$l_{AC} = 160 \text{ mm}$ Distancia total del eje.

$l_{AB} = 80 \text{ mm}$ Distancia del cambio de sección.

$l_{BC} = 85 \text{ mm}$ Distancia desde el cambio de sección hasta el extremo del eje.

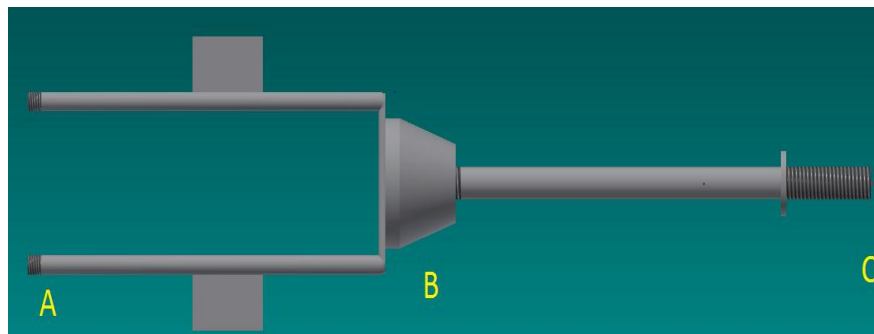


Figura 2. 5 Eje de Acero
Fuente: Autor

3. Análisis de cargas

3.1 Cargas y Reacciones

A través del software MDSolids se grafican los diagramas de cuerpo libre. En la figura 2.6, (a) se aplican las cargas que actúan en el eje. El diagrama de fuerzas cortantes que soportará

el eje se observa en la figura 2.6 (b) donde se muestran las reacciones que se generan al momento de aplicar la carga en el eje.

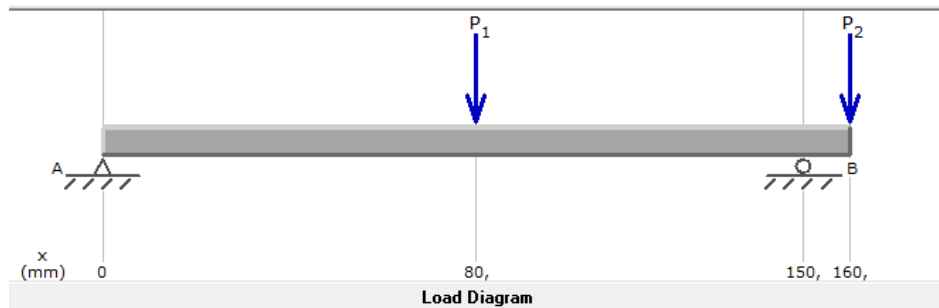


Figura 2. 6: a) Diagrama de fuerzas aplicadas
Fuente: Autor

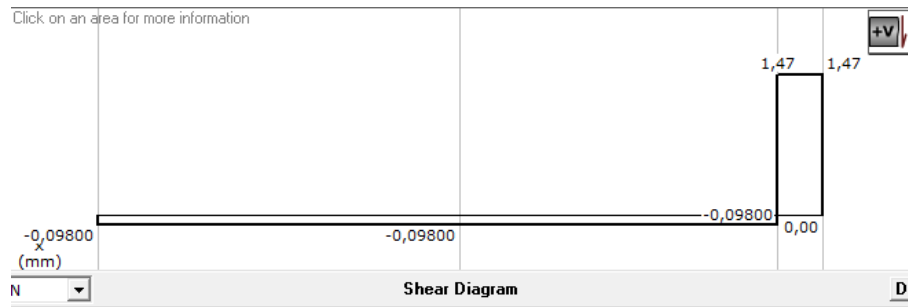


Figura 2. 7: b) Diagrama de Corte
Fuente: Autor

En la figura 2.7 se indica el diagrama de momentos que soportará el eje y su respectivo punto crítico, es decir donde se concentra la carga máxima.

Las reacciones en el punto A y B son:

$$R_A = 0,10 \text{ N}$$

$$R_B = 1,57 \text{ N}$$

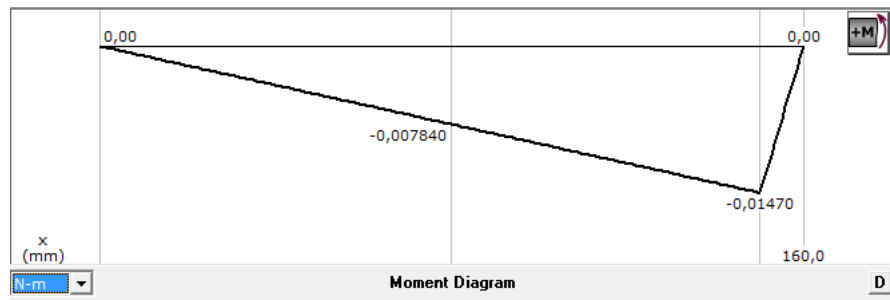


Figura 2. 8 Diagrama de Momentos
Fuente: Autor

4. Análisis de Esfuerzos

Es necesario calcular los diferentes esfuerzos que actúan en el eje, a fin de encontrar el punto crítico y el factor de seguridad que permiten analizar la vida útil de la estructura. En esta sección se calcularán los esfuerzos de flexión y de torsión respectivos en cada punto del eje.

4.1. Esfuerzo Normal

$$\sigma_A = 0$$

$$\sigma_B = \frac{32M_B}{\pi d^3}$$

Ecuación 2. Fórmula para calcular Esfuerzo Normal.

Dónde:

σ - Esfuerzo Normal de Flexión en cada punto.

M - Momento de cada punto del eje.

D - Diámetro a encontrar

$$\sigma_B = \frac{32(0,0078)N.m}{\pi d^3}$$

$$\sigma_B = \frac{0,25}{\pi d^3}$$

$$\sigma_B = \frac{0,079}{d^3}$$

$$\sigma_C = \frac{32M_B}{\pi d^3}$$

$$\sigma_C = \frac{32 (0,014)N.m}{\pi d^3}$$

$$\sigma_C = \frac{1,43}{d^3}$$

$$\sigma_D = 0$$

En conclusión, se tiene que el esfuerzo de flexión en el punto A y D = 0 debido a que no se tienen cargas en éstos puntos.

4.2. Esfuerzos Cortantes

$$\zeta_A = \zeta_B = \zeta_C = \frac{16T}{\pi d^3}$$

Ecuación 3. Fórmula para calcular Esfuerzo Cortante.

Dónde:

ζ = Esfuerzo Cortante en cada punto.

T=Momento Torsor de cada punto del eje.

d= Diámetro a encontrar

$$\zeta_A = \zeta_B = \zeta_C = \frac{16 (1,568)}{\pi d^3}$$

$$\zeta_A = \zeta_B = \zeta_C = \frac{7,99}{d^3}$$

Finalmente, se tiene que el esfuerzo de torsión es el mismo en los puntos A, B y C debido al torque que ejerce el servomotor en el eje. En la siguiente Tabla 2.2 se muestran los valores respectivos de la concentración de esfuerzo en flexión y en torsión.

Tabla 2.2: Concentración de Esfuerzos

PUNTO	FLEXIÓN σ/d^3	K_t	TORSIÓN ζ/d^3	K_{ts}
B	0,079	2,7(Hombro)	7,99	2,2 (Hombro)

Fuente: R. Norton, (2011).

Estos datos explican la concentración de esfuerzo dependiendo la forma del eje. (Robert L. Norton, 2011).

$$\sigma_{m\acute{a}x} = k_t \times \sigma_c$$

Ecuación 4. Fórmula para calcular Esfuerzo Máximo Normal.

Dónde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo Máximo de Flexión en cada punto.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 2,7 \times 1,43 = 3,86 N.m$$

$$\zeta_{m\acute{a}x} = k_{ts} \times \zeta_c$$

Ecuación 5. Fórmula para calcular Esfuerzo Máximo Cortante.

Dónde:

$\zeta_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo Máximo de Torsión en cada punto.

$$\zeta_{m\acute{a}x} = 2,2 \times 7,99 = 17,578/d^3$$

Con estos valores se puede proceder a calcular el Esfuerzo de Von Misses con la siguiente fórmula:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y + 3\zeta xy^2}$$

Ecuación 6. Fórmula para calcular Esfuerzo Von Misses.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y + 3\zeta xy^2}$$

$$\sigma' = \sqrt{(3,86)^2 + 3(17,578)^2} = 30,69/d^3$$

Con este dato podemos despejar d (diámetro) para encontrar el mismo.

Anteriormente se diseñó el eje en dos secciones con distintos materiales, por tal razón los cálculos están realizados con Acero Inoxidable y Acero al carbono que se explica a continuación:

5. Acero al Carbono (Material del eje)

$$S_y = 60\text{kpsi} = 413,685 \text{ Mpa}; n=2$$

Dónde S_y es la Resistencia a la Fatiga del material.

$$\sigma' = \frac{S_y}{n}$$

Ecuación 7. Fórmula para calcular Esfuerzo Von Misses.

$$\sigma' = \frac{30,69}{d^3}$$

$$\frac{30,69}{d^3} = \frac{413,685\text{Mpa}}{2}$$

$$d = 0,00529 \text{ m} = \mathbf{5,29 \text{ mm}}$$

Esta parte del eje se divide en dos secciones, es decir, se tiene cada eje con un diámetro respectivo de 2,64 mm.

Acero Inoxidable 303= 241 Mpa; n=2 (Material del eje)

$$\sigma' = \frac{S_y}{n}$$

$$\sigma' = \frac{30,69}{d^3}$$

$$\frac{30,69}{d^3} = \frac{241\text{Mpa}}{2}$$

$$d = 0,00633 \text{ m} = \mathbf{6,33 \text{ mm}}$$

Se realiza la relación de las dos ecuaciones para despejar el diámetro del eje en la sección más amplia, el cual es de 6,33mm. Con estos cálculos se puede concluir que los diámetros

están relativamente aproximados asumiendo un factor de seguridad. Como ya se conocen los diámetros se puede calcular el factor de seguridad (n) a continuación:

$$\sigma' = \frac{S_y}{n}$$

$$\sigma' = \frac{S_y}{n}$$

$$\sigma' = \frac{30,69}{0,0032^3}$$

$$\sigma' = \frac{30,69}{0,005^3}$$

$$\frac{30,69}{0,0032^3} = \frac{414\text{Mpa}}{n}$$

$$\frac{30,69}{0,005^3} = \frac{241\text{Mpa}}{n}$$

$$n = 0,44$$

$$n = 1,68$$

De acuerdo a los valores obtenidos el factor de seguridad de la sección del eje de acero inoxidable de 5mm, generó como resultado 1,68 lo que significa que abastece sin ningún inconveniente a la carga.

De acuerdo a los valores obtenidos el factor de seguridad de la sección del eje de 3,2mm es de 0,44 lo que significa que falta para abastecer la carga, pero se debe tener en cuenta que tiene 2 soportes, por ende, se duplicaría el factor de seguridad, es decir 0,88, aproximándose a un factor de seguridad estándar.

- **DIMENSIONAMIENTO DEL SERVOMOTOR**

Mediante el siguiente procedimiento se realiza el cálculo para encontrar el torque del servomotor:

$$T = L * p$$

Ecuación 8. Fórmula para calcular Torque.

Torque = T

Longitud = L = 20 cm de longitud de la mano robótica = 0,2 m

Peso Aproximado = p = 810 gramos (considerando toda la mano robótica con todos sus componentes).

Dónde:

$$p = 810 \text{ gramos} = 0,8 \text{ Kg}$$

$$p = 0,8 \text{ Kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$p = 7,84 \text{ N}$$

$$T = 0,2 \text{ m} \times 7,84 \text{ N}$$

$$T = \mathbf{1,568 \text{ N.m}}$$

Se seleccionó un servomotor de 19Kg sobredimensionando, para no presentar inconvenientes por circunstancias que se den a lo largo del desarrollo del proyecto.

2.5 DISEÑO DEL 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. Logrando así unir mecanismos en un solo sistema, cabe recalcar que esta unión no se ha implementado en prototipos anteriores, convirtiéndolo en un diseño innovador, que servirá de base para nuevas creaciones. Los planos de la estructura se encuentran en los anexos ubicados al final del documento.

A continuación, se describe el desarrollo de cada una de las piezas que conformaran la mano robótica, realizadas en un sistema CAD. Dichas piezas están elaboradas con las dimensiones reales de la estructura y de cada uno de los dispositivos a utilizarse.

a. ANCLAJE DEL SERVOMOTOR

En la parte inferior de la estructura inicial se insertó una solapa de plástico como se observa en la figura 2.8 para poder realizar el anclaje del servomotor, esto permitirá que el dispositivo se mantenga estable ya que es la base para el movimiento de todo el mecanismo.



Figura 2. 9 Servomotor base de 19Kg

b. SOPORTE PARA EL EJE Y LOS MICROSERVOS

Se describe el proceso de implementación, donde se utilizó un soporte de acero al carbono (figura 2.9, a) para el eje y los microservalos, éste soporte cumplirá la función de permitir el giro de todos los elementos insertados en la estructura. Además se incorporó una pestaña en el extremo de la estructura (figura 2.9, b), para centrar y fijar el servomotor.

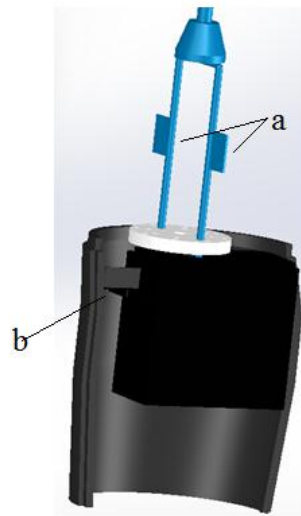


Figura 2. 10: a) Soporte de acero al carbono b) Pestaña para centrar
Fuente: Autor

c. EJE DE ACERO INOXIDABLE

El eje de acero inoxidable (figura 2.10) brindará mayor seguridad para evitar flexión en todo el sistema, además de centrar los mecanismos explicados anteriormente. Este eje posee roscas en los extremos (figura 2.10, a) que permiten una adaptación fácil para armar y desarmar.



Figura 2. 11: a) Rosca del eje de acero inoxidable
Fuente: Autor

d. MUÑECA

La articulación de la muñeca permitirá la unión del antebrazo con la mano, éste mecanismo está constituido por un perno (figura 2.11, a) para poder ser desarmado. Además, se colocaron rodela de goma en los extremos (figura 2.11, b) para poder generar fricción entre las piezas y de esta manera fijar el movimiento de flexo-extensión que será mecánico en este caso.

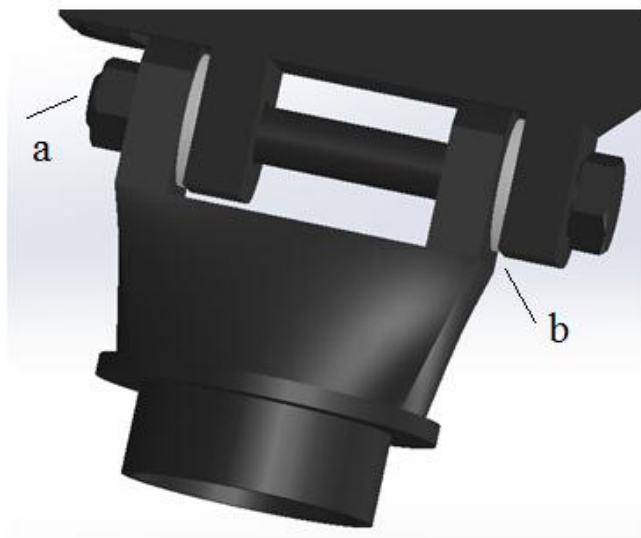


Figura 2. 12: a) Perno b) Rodelas de goma
Fuente: Autor

2.6 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Después de haber realizado el ensamblaje de cada una de las piezas de la mano robótica se procede a crear el mallado sólido tetraédrico (figura 2.12) de los modelos de piezas involucrados en el análisis.

Durante este proceso se realiza el análisis de elementos finitos, lo cual es indispensable y de mucha importancia porque de éste depende los resultados de la simulación.

El análisis de elementos finitos se aplicó al eje de acero que está anclado al eje del servomotor principal, que como ya conocemos su torque es de $1,86 \text{ N.m}^2$, este valor se adquiere luego de realizar la transformación del torque del servomotor cuya magnitud es de 19 Kg.cm (figura 2.12, a). Se debe tener en cuenta el tamaño y tolerancia de las piezas ensambladas.

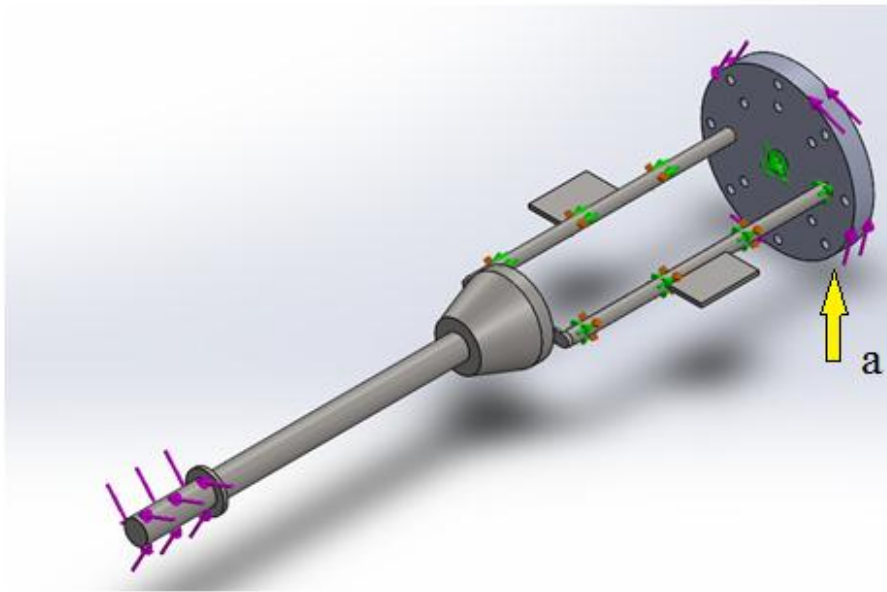


Figura 2.13: a) Torques aplicados al eje
Fuente: Autor

Una vez realizado el proceso correcto de mallado, el cual tiene $3,59 \text{ mm}$ como máximo tamaño de elemento y $0,72 \text{ mm}$ como mínimo tamaño de elemento (figura 2.13) se ejecuta el análisis de elementos finitos, es decir, su deformación, el factor de seguridad y las tensiones del esfuerzo de Von Misses.

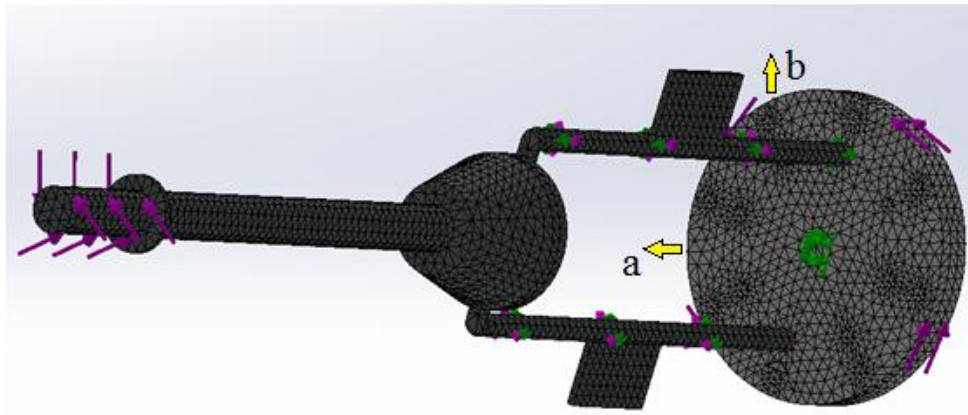


Figura 2.14: a) Máximo tamaño de elemento de Mallado b) Máximo tamaño de elemento de Mallado
Fuente: Autor

Aquí se muestra que el factor de seguridad del eje es de 1,8 como se observa en la figura 2.14 lo que significa que el eje abastece la carga aplicada y se aproxima a los cálculos realizados anteriormente.

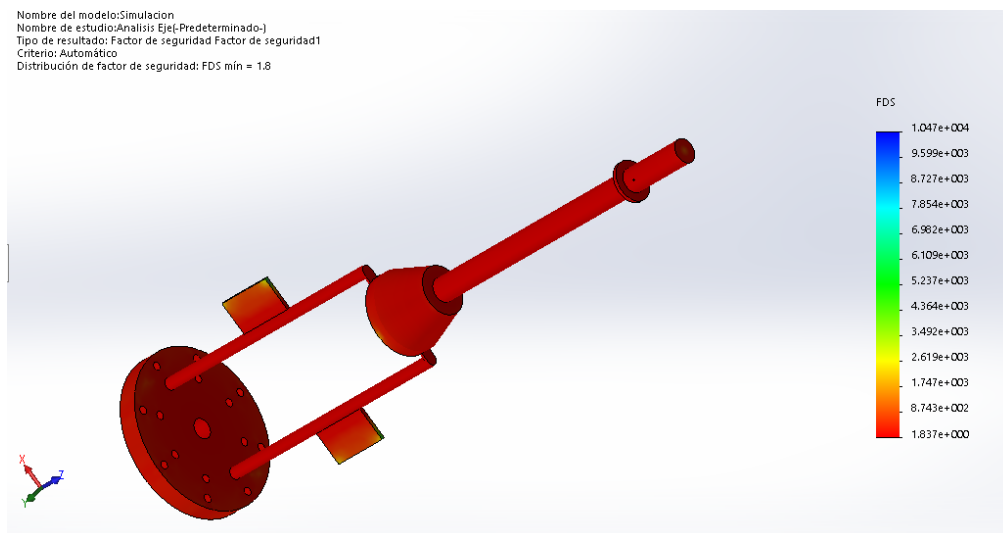


Figura 2.15 Factor de seguridad
Fuente: Autor

Además, se puede apreciar que el desplazamiento máximo es de 0,4288 mm en el disco que sujeta al eje (figura 2.15, a), es decir, que no se tendrá un desplazamiento mayor a un

milímetro. El desplazamiento mínimo es de 0,107 mm en el extremo del eje de acero inoxidable como se observa en la (figura 2.15, b).

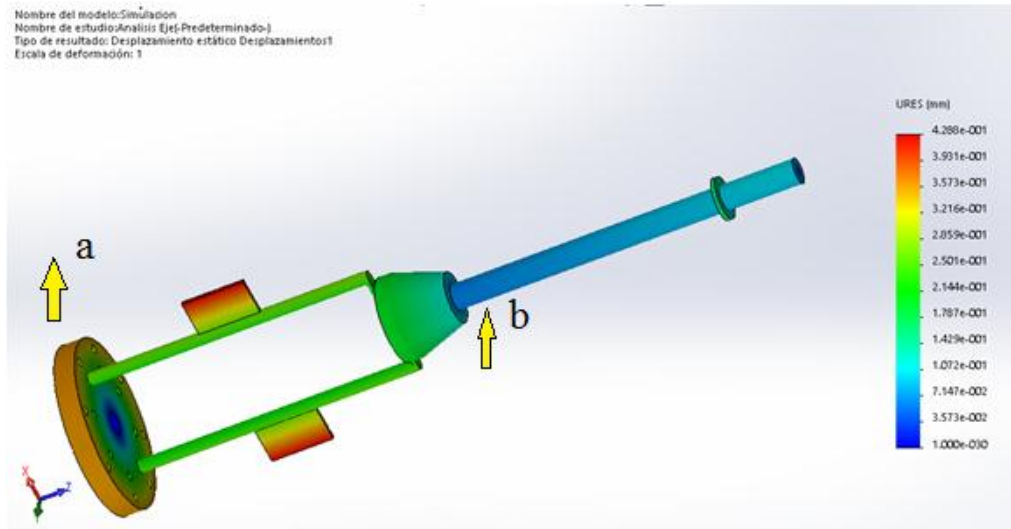


Figura 2. 16: a) Desplazamiento máximo, b) Desplazamiento mínimo

Fuente: Autor

En el estudio realizado al eje se tuvieron en cuenta para el análisis estructural las tensiones de Von Mises presente en el modelo. Las tensiones máximas se encontraron en la base del eje de acero inoxidable, es decir en la unión con el eje de acero al carbono. (Ver figura 2.16).

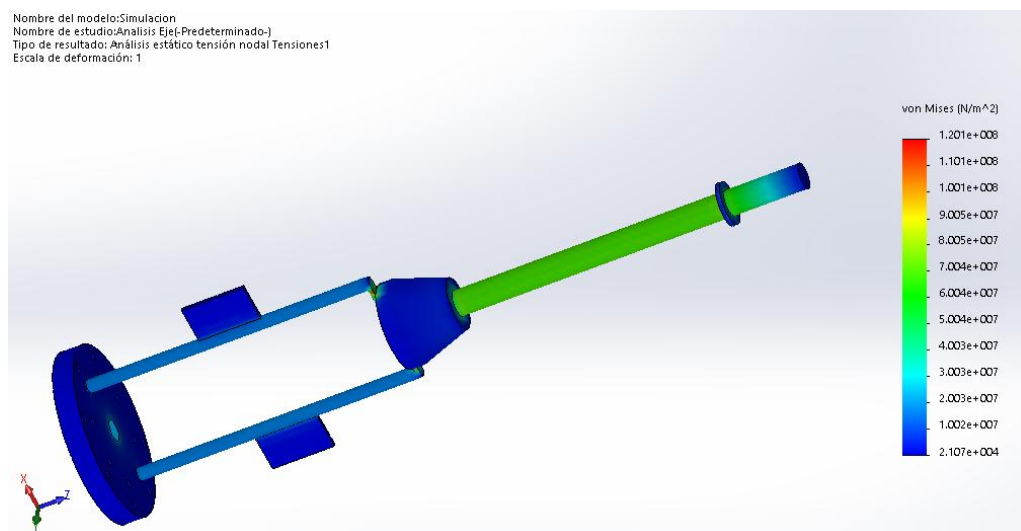


Figura 2. 17 Representación de las tensiones de Von Misses

Fuente: Autor

2.7 CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE DE LA MANO ROBÓTICA

A partir del prototipo diseñado que es de material de nylon y modificado en el sistema CAD, se empieza a construir la mano robótica con los materiales antes mencionados. Se pretende probar el accionamiento del sistema implementado, a fin de verificar, mejorar y comprobar su funcionamiento final.

En esta sección, se describe cada uno de los pasos realizados al momento de la construcción del sistema.

2.7.1 ANCLAJE DEL SERVOMOTOR

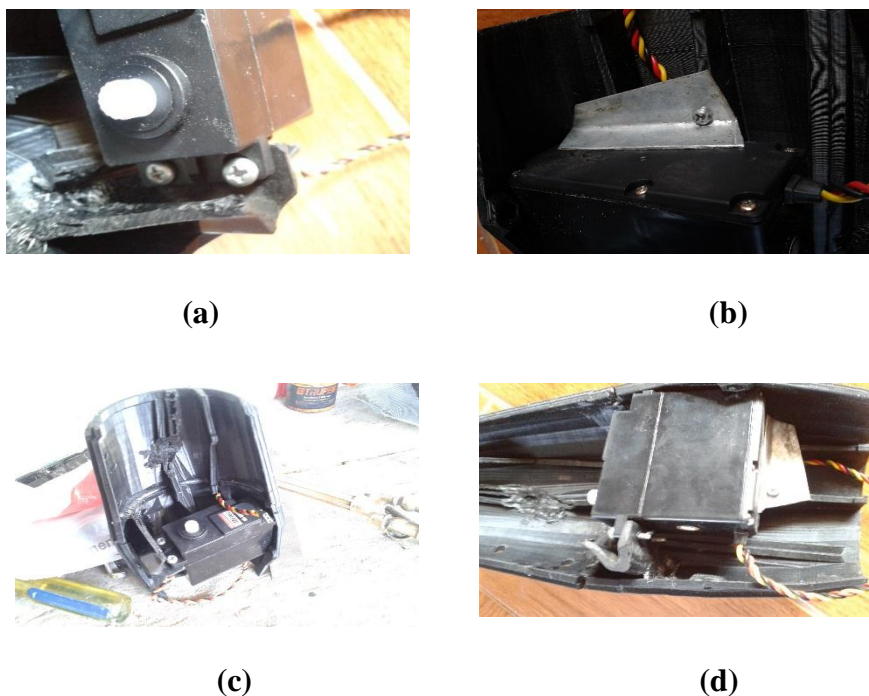


Figura 2. 18 Anclaje del servomotor de 19Kg
 a) Solapa inferior b) Pestaña c) Ubicación en el centro d) Vista General

Fuente: Autor

Se añadió una solapa en la parte inferior de la carcasa figura 2.17 (a) con el fin de que sirva de soporte de fijación al servomotor. Además, se añadió una pestaña en el extremo figura 2.17 (b) para darle estabilidad ha dicho elemento. Se trató de ubicar el servomotor

figura 2.17 (c) lo más centrado posible para equilibrar el movimiento de la estructura al momento de girar. Al final se muestra una vista general de esta sección, como se observa en la figura 2.17 (d).

2.7.2 SOPORTE PARA EL EJE Y LOS MICROSERVOS



Figura 2. 19 Soporte de acero para el eje
Fuente: Autor

Después de ubicar correctamente el servomotor, se creó un soporte de acero como se observa en la (figura 2.18) para el eje y los microservos, los cuáles permitirán el movimiento de toda la estructura. Este soporte debe estar fijo y centrado junto con el servomotor para evitar desbalances al momento del giro del sistema.

2.7.3 EJE DE ACERO INOXIDABLE



(a)



(b)



(c)

Figura 2. 20 Eje de acero**Fuente:** Autor

El eje de acero inoxidable figura 2.19 (a) (b), es creado específicamente para conectar entre sí los elementos de la estructura, es decir, permitir el giro de la muñeca sin afectar el giro de los dedos. Además, el eje consta de roscas en sus extremos para una fácil adaptación al momento de conformar la estructura. Con este elemento se obtiene mayor seguridad y estabilidad figura 2.19 (c) en el sistema.

2.7.4 MUÑECA



(a)



(b)

Figura 2. 21: a) Piezas para la unión del antebrazo b) Pieza con orificio central**Fuente:** Autor

Estas piezas tendrán la función de unir el antebrazo con la mano de la estructura, figura 2.20 (a), éste mecanismo está creado con un orificio central, el cual, sirve para que el eje se

encargue de pasar y girar figura 2.20 (b) todo el sistema. Además, constituido por un perno para poder ser desarmado como se observa en la figura 2.21 (c).

También se colocaron rodela de goma en los extremos, para poder generar fricción entre las piezas y de esta manera fijar el movimiento de flexo-extensión, el sistema unido casi completamente puede observarse en la figura 2.21 (d).



Figura 2. 22: c) Perno d) Estructura completa
Fuente: Autor

2.8 DISPOSITIVOS A USAR

Enseguida se detallan los elementos principales a utilizarse para este proyecto, los cuales fueron determinados después de haber realizado el análisis en base al marco teórico.

- **SERVOMOTOR HS805BB**

Este servomotor (figura 2.22) desata un increíble 343 onzas -pulgadas. de torque a seis voltios. Tiene rodamientos de bolas dobles, engranajes de nylon extra gruesos, pesados puente H y grandes dispositivos de salida que permiten al servomotor HS- 805BB manejar casi cualquier cosa.

Este servomotor funciona en varias configuraciones, rotación inversa, rotación de 180° y la rotación continua para aplicaciones de ruedas. Este servo puede operar 180° (figura 2.23) cuando se les da una señal de impulso que van desde 600microsegundos a 2400microsegundos. Los datos técnicos de este dispositivo se encuentran en el Anexo 1.



Figura 2.23 Servomotor HS-805BB
Fuente: Project Sentry Gun, (2015)

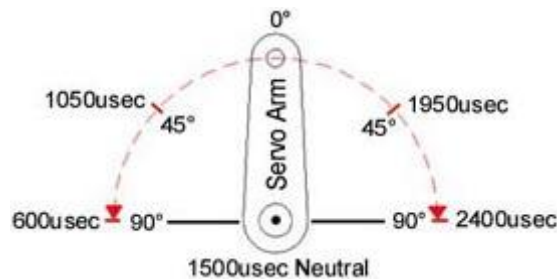


Figura 2. 24: Ángulos de funcionamiento del servomotor
Fuente: V. Gonzalez, (2003).

- ACELERÓMETRO MMA7361

Este sensor, como su nombre lo indica, puede medir la aceleración, en tres ejes: X, Y, Z, lo cual permite conocer tanto los desplazamientos del dispositivo, así como su posición, este tipo de dispositivos tienen un gran auge en estos días, en especial en los teléfonos celulares, iphone, cámaras digitales y computadoras como sensores de movimiento. Este módulo contiene un circuito integrado MMA7361 (figura 2.24) de superficie de la empresa Freescale,

las resistencias, capacitores necesarios y así como un led indicador, todo ya vienen integrado, el diseño es ultra compacto.

Por este motivo no es necesario acondicionar la señal por lo que irá conectado directamente al microcontrolador. Los datos técnicos de este dispositivo se encuentran en el Anexo 2.

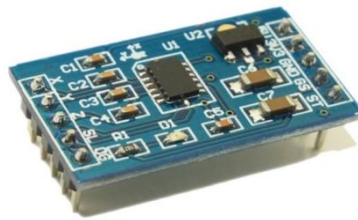


Figura 2. 25 Acelerómetro MMA7361
Fuente: HetPro, (2016).

Sus características principales es la sensibilidad seleccionable de 1.5g, 6g (GS), este dispositivo funciona con un voltaje de trabajo de 3.5V a 5V, y un consumo de 400uA. La señal de salida es analógica lo que permite una recopilación de datos más precisa. Otra de sus ventajas es la detección de caída libre de un cuerpo y sus dimensiones 28 x 17 x 10mm permiten su fácil adaptación.

- MICROCONTROLADOR ATMEGA16

Este dispositivo electrónico (figura 2.25) de 8 bits es de alto rendimiento y bajo consumo. Su memoria programable es de 16Kbytes de Flash lo que significa que tiene una resistencia de 1.000 ciclos de escritura / borra. Su memoria EEPROM es de 512 bytes, resistiendo 100.000 ciclos de escritura/borrado. Su SRAM interna es de 1K bytes. Otra de las características importantes es que permite la operación de lectura durante la escritura.



Figura 2. 26 Microcontrolador Atmega16

Fuente: EngineersGarage, (2012).

Cuenta con dos *Timer* que son controladores de 8 bits con *prescaler* separado y modo comparación, además de un *Timer* de 16 bits con las mismas características a diferencia de un modo de captura.

Las características especiales de este microcontrolador son *Reset de Power-on* y detección de *Brown-out* programable, Oscilador RC interno calibrado, Fuentes de interrupción externas e internas, 6 modos de descanso: Idle, reducción de ruido ADC, *Power-save*, *Power-down*, *Standby* y *Standby* extendido. Ver Anexo 3.

- BATERIA TIPO LI-PO

Estas baterías de polímero de litio almacenan mucha más carga que las baterías comunes, logrando que su ciclo de vida se alargue. Cada celda de una batería lipo proporciona 3,7 voltios, por lo tanto las hay con una celda (3,7 voltios), dos celdas (7,4 voltios), 3 celdas (11,1 voltios) y así sucesivamente además de que el número de celdas viene indicado por la letra "S" ejemplo: 2S dos celdas (figura 2.26).

Es muy importante que las celdas tengan sus voltajes lo más parecido posibles, porque al descargarse alguna celda lo hace más rápido que otras y entonces se tiene un desbalance, por eso tiene la otra conexión con un cable conectado a cada una de las celdas y así poder balancearlas durante la carga, tomando en cuenta que se requiere un cargador especial.

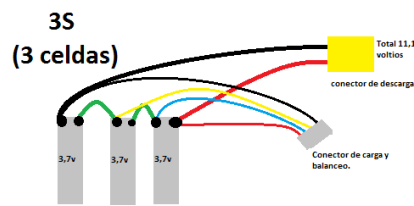


Figura 2. 27 Celdas de una batería tipo Lipo
Fuente: CrushBuildRC, (2015).

Uno de los parámetros que tiene una batería LIPO (figura 2.27) son los mah (miliamperios por hora) que es la energía capaz de almacenar.



Figura 2. 28 Batería tipo Lipo
Fuente: BrikoGeek, (2016).

- BATERIA RECARGABLE GP

Las baterías recargables usan reacciones electroquímicas que son eléctricamente reversibles, es decir:

- Cuando la reacción transcurre en un sentido, se agotan los materiales de la pila mientras se genera una corriente eléctrica.
- Para que la reacción transcurra en sentido inverso, es necesaria una corriente eléctrica para regenerar los materiales consumidos.

La batería empleada en el proyecto es de tipo alcalina de 9V, a 170 mAh (figura 2.28).



Figura 2. 29 Batería GP Recargable
Fuente: BrikoGeek, (2016).

- GUANTE

El tipo de guante escogido es de nylon-poliuretano. El guante está fabricado de un tejido de punto de nylon negro sin costuras, que provee comodidad, mejor ajuste, mayor destreza y respirabilidad al usuario, además de ocultar las manchas según su distribuidora Kimberly-Clark Professional. Esto se traduce en una mayor productividad y durabilidad para el usuario cuando se le compara con otros guantes, tales como el cuero y la carnaza.

El recubrimiento ofrece la misma sensibilidad táctil de un guante delgado, pero con la protección de un guante recubierto. Su Composición es de: Nylon: 24% Poliuretano: 76% como se observa en la figura 2.29. Una de sus principales aplicaciones es el ensamblaje electrónico por lo que se eligió este modelo.



Figura 2. 30 Guante de Nylon-Poliuretano
Fuente: Paar Industrial, (2016).

CAPITULO III

3. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL

En el presente capítulo se realizará la descripción detallada del procedimiento que se siguió para determinar la estrategia y el sistema de control más adecuado para que la mano robótica realice el movimiento de la muñeca en base a lo planteado. Para lo cual se realizó un análisis de los diferentes elementos electrónicos y eléctricos que permitan realizar el control del movimiento.

3.1 ESTUDIOS DE ESTRATEGIAS DE CONTROL APLICADAS EN MANOS ROBÓTICAS

Se realizó el análisis de dos estrategias de control:

La primera estrategia de control en lazo cerrado y la segunda estrategia de control en lazo abierto.

3.2 CONTROL DE LAZO CERRADO

Los lazos de control cerrado son aquellos en los que la señal de salida del sistema (variable controlada) tiene efecto directo sobre la acción de control (variable de control). Su retroalimentación se refiere a una operación que en presencia de perturbaciones tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia.

Esta reducción se logra manipulando alguna variable de entrada del sistema, siendo la magnitud de dicha variable de entrada función de la diferencia entre la variable de referencia y la salida del sistema. Por esta razón dentro del control en lazo cerrado (figura 3.1) se verificó varias estrategias que se derivaban del mismo, pero que no eran las más óptimas para

este caso particular porque requiere una mayor cantidad de recursos físicos y tiempo de implementación.

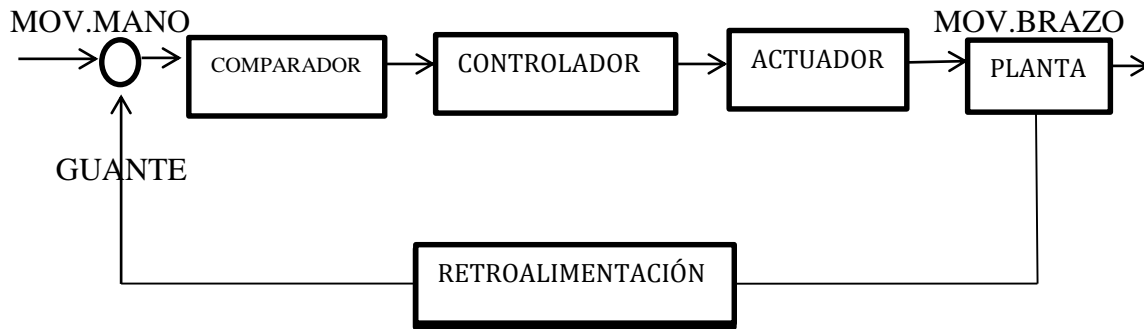


Figura 3. 1 Diagrama de estrategia de control en lazo cerrado

Fuente: Autor

3.3 CONTROL DE LAZO ABIERTO

Los lazos de control abierto son aquellos en los que la variable de salida (variable controlada) no tiene efecto sobre la acción de control (variable de control).

Entre sus características tenemos que:

- No se compara la salida del sistema con el valor deseado de la salida del sistema (referencia).
- Para cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fijada.
- La exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador.
- En presencia de perturbaciones estos sistemas de control no cumplen su función adecuadamente.

El control en lazo abierto suele aparecer en dispositivos con control secuencial, en el que no hay una regulación de variables, sino que se realizan una serie de operaciones de una manera determinada. Esa secuencia de operaciones puede venir impuesta por eventos (*event-driven*) o por tiempo (*timed driven*).

Mientras que el control en lazo abierto (figura 3.2) permite cumplir con los objetivos del proyecto utilizando menos recursos, por lo que se ha considerado que la estrategia más óptima es la de lazo abierto.

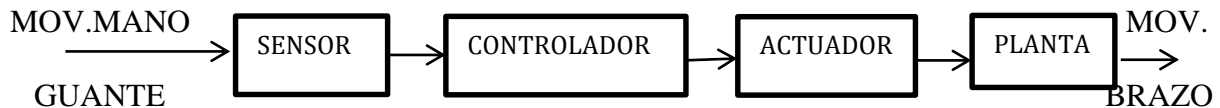


Figura 3. 2 Diagrama de estrategia de control en lazo abierto
Fuente: Autor

3.4 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL A UTILIZAR

El movimiento de Prono-Supinación de la muñeca puede ser controlado por un usuario a través de un sistema comprendido principalmente por un microcontrolador Atmega 16, un sensor acelerómetro, un servomotor y un guante. El usuario que desee controlar el giro de la muñeca deberá colocarse el guante en su mano y realizar el giro deseado.

En el guante está instalado el acelerómetro, para sensar el giro de la muñeca del usuario y enviar una señal análoga con este dato hasta el microcontrolador. El microcontrolador procesa la señal recibida del acelerómetro y la convierte en una señal PWM, la cual es enviada al servomotor instalado en la mano robótica y mediante ésta se le ordena el giro respectivo.

Para integrar todos los dispositivos mencionados anteriormente fue necesaria la implementación de un circuito de control en una placa PCB (figura 3.3), dentro de la cual constan las siguientes partes:

- Circuito del microcontrolador.
- Una fuente de alimentación con batería de 11,2V.
- Una fuente de alimentación con batería externa de 9V.

- Un circuito de regulación de voltaje para reducir el voltaje de la batería de 11,2V a 5V, para tener el voltaje correcto de alimentación de todos los dispositivos.
- Puntos para conexión del servomotor y el sensor acelerómetro. (Anexo 4).

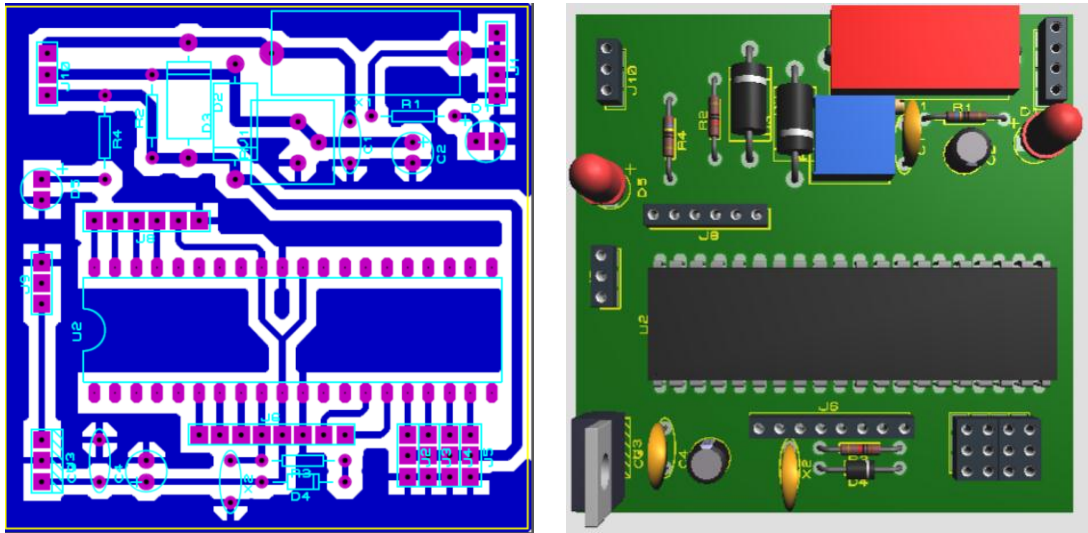


Figura 3. 3 Placa PCB
Fuente: Autor.

Dentro del prototipo a implementar se ha previsto los siguientes elementos que son los principales para ejecutar el proyecto:

- 1 Microcontrolador ATMEGA16
- 2 Servomotor de 19Kg
- 3 Acelerómetro MMA7361
- 4 Guante

El microcontrolador Atmega16 será indispensable debido a que es el dispositivo que concentra la programación de los comandos, recibirá las señales del sensor y controlará los elementos que permitirán el movimiento de la muñeca. El compilador usado para la

programación será *CodeVision*, software utilizado comúnmente para los microcontroladores AVR.

El servomotor es el actuador que permitirá el giro de la muñeca, controlado por pulsos provenientes del microcontrolador. Este estará ubicado en una posición fija central, alineado al eje. El acelerómetro es el sensor que permitirá obtener la señal analógica que indica la variación física del giro de la muñeca de la mano robótica. Este estará incorporado en un guante. El operador de la muñeca utilizará el guante para controlar el movimiento de la mano robótica.

En base a los elementos mencionados, en el desarrollo del prototipo se aplicó inicialmente un control en lazo abierto, el cual funcionó de una manera óptima. Y se añadió un filtro para estabilizar la señal que ordenaba el giro de la muñeca. Por esta razón se estableció que la mejor estrategia de control para el prototipo de la mano robótica es en lazo abierto.

3.5. DISEÑO DE LA ESTRATEGIA

3.5.1. Circuito Eléctrico Fuente de Alimentación para el servomotor

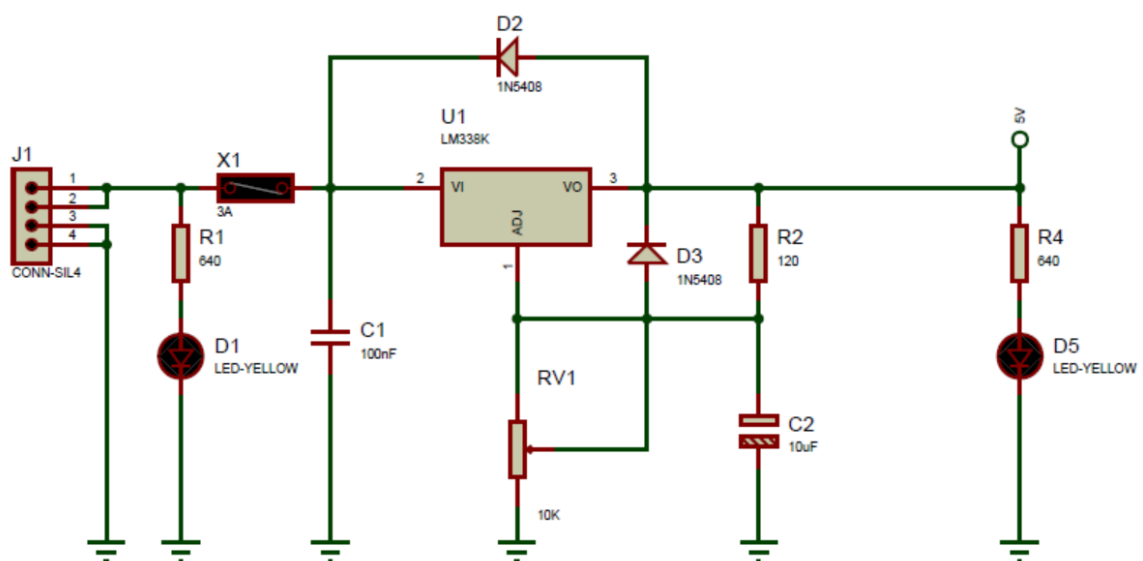


Figura 3. 4 Circuito Eléctrico Fuente de Alimentación
Fuente: Autor.

La batería usada es tipo Lipo de 11,1V a 3.3 A, la tarjeta de control trabaja con 5V al igual que los servomotores, por ende es necesario reducir el voltaje sin afectar la corriente que ésta nos provee. Para regular el voltaje se utilizó un regulador LM338 indicado en la figura 3.4, con sus diferentes componentes electrónicos. Cada elemento electrónico utilizado está en la figura con su respectivo valor o serie.

El circuito consta de terminales adecuados para la conexión de la batería, un led que indica la conexión de la batería y capacitores que se usaran como filtros. Los diodos son necesarios para la protección contra corrientes. El regulador de voltaje tiene a su vez un disipador de calor evitando que éste supere su temperatura límite de trabajo. El potenciómetro estará regulado tal que en los pines de salida proporcione un voltaje de 5.3V, los demás capacitores se usan para fijar el voltaje y por último se usa un led para mostrar el correcto funcionamiento de la regulación de voltaje. Los datos técnicos de los elementos se podrán encontrar en el Anexo 5.

3.5.2 Circuito Eléctrico Fuente de Alimentación para los sensores

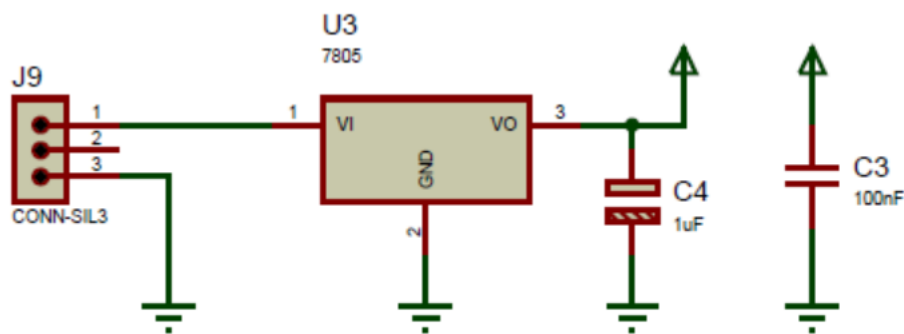


Figura 3. 5 Circuito Eléctrico de la Tarjeta de Control
Fuente: Autor.

La batería usada es una fuente recargable que se encarga de alimentar a los sensores, así como a la tarjeta de control del microcontrolador.

Como se observa, las fuentes de alimentación de potencia y de control están separadas, debido al consumo de corriente excesivo del servomotor. (Anexo 6).

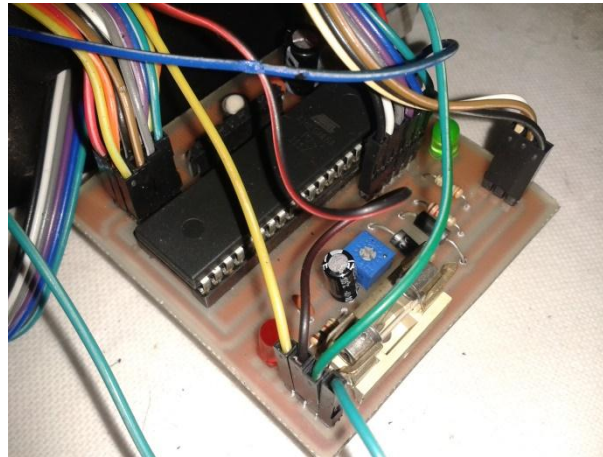


Figura 3. 6 Tarjeta de control
Fuente: Autor.

3.5.3 Circuito Eléctrico de la Tarjeta de Control

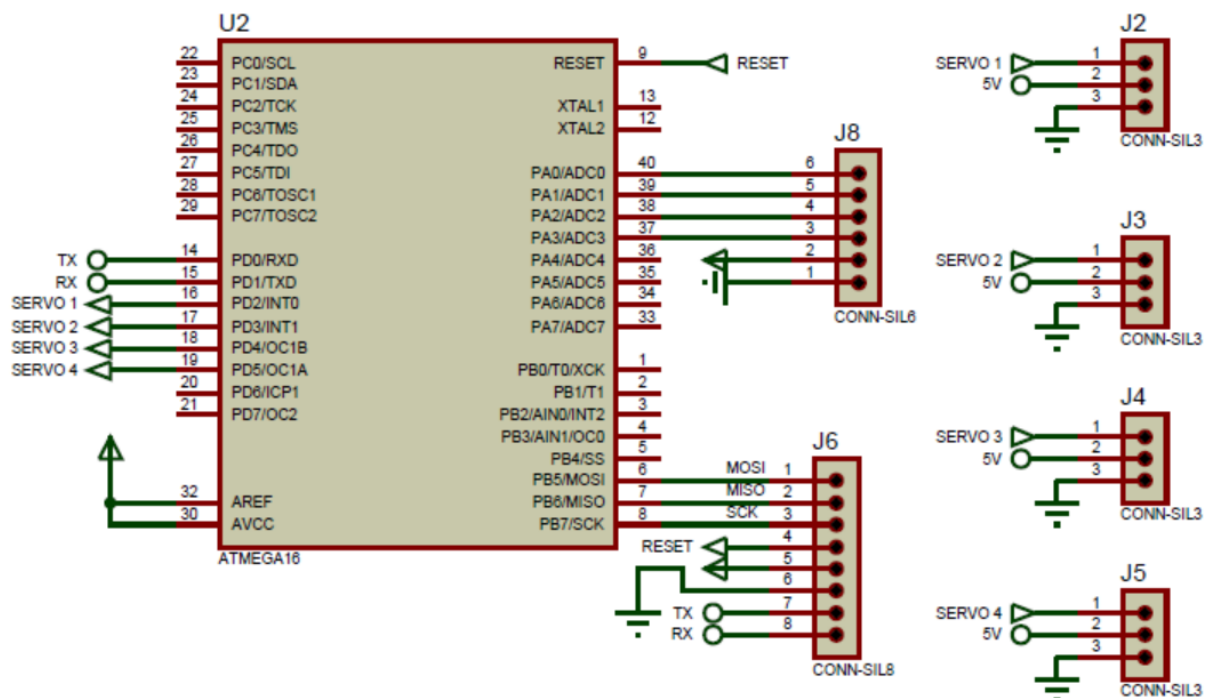


Figura 3. 7 Circuito Eléctrico de la Tarjeta de Control
Fuente: Autor.

EL microcontrolador usado es un ATmega16 de 40 pines de 8 bits en el cual se encuentra activado sus puertos de salida digital, entrada analógica y puertos de comunicación, la distribución de los pines y su respectiva conexión se muestra en la figura 3.7. La entrada analógica ADC0 se usa para la lectura del acelerómetro, sólo se lee un eje del sensor (eje Y), se selecciona este eje de acuerdo a la ubicación del sensor en la muñeca.

El servomotor que actúa en referencia a la señal de lectura está ubicado en la salida digital PD2 del microcontrolador. En la tarjeta de control se añade el circuito para el reset del sistema (figura 3.8), que será presionado dependiendo su necesidad. (Anexo 7).

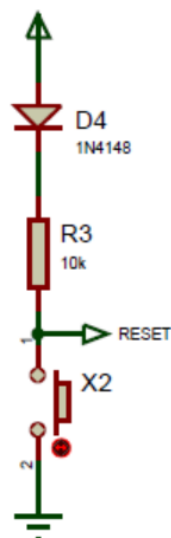


Figura 3. 8 Circuito Eléctrico Reset
Fuente: Autor.

3.5.4 Circuito Eléctrico del Sensor

Esta tarjeta se encarga de alimentar a los diferentes sensores usados en este proyecto, del sensor MMA7361 tomamos la señal analógica Y. Esta placa está alimentada a 5.3V, se realiza la regulación de voltaje mediante un diodo zener de 3.3V con una resistencia de 10k la

que alimenta al acelerómetro, los capacitores permiten establecer los 5,3V evitando que haya caídas de voltaje (figura 3.9).

El pin SL está conectado a 3.3V, el modo sleep (SL) permite reducir su consumo de potencia de manera considerable y apagar módulos no utilizados ahorrando potencia. El pin Gs se conecta a GND para una mayor sensibilidad ($\pm 1.5g$), no se trabajan con los ejes X y Z ya que basta con tener una lectura optima de la señal analógica Y como referencia a la inclinación del sensor. (Anexo 8).

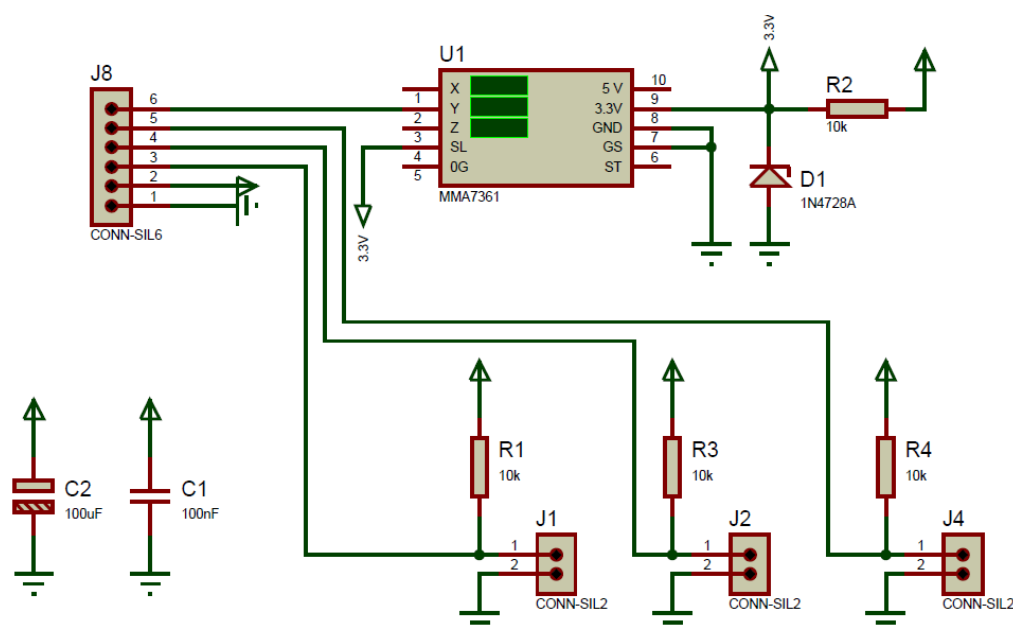


Figura 3. 9 Circuito Eléctrico Acelerómetro

Fuente: Autor.

3.6 LINEALIZACIÓN DEL SENSOR ACELERÓMETRO

Inicialmente se conoce que el acelerómetro funciona a 2,2V y a 3.6V, en este caso se utilizó la entrada de 3,3V ya que según los datos técnicos este es el valor óptimo de funcionamiento para el dispositivo. A continuación, se encuentra la Tabla 3.1 en la que se realiza la relación entre la posición del acelerómetro, es decir, su ángulo y su respectivo voltaje.

Tabla 3. 1: Datos del acelerómetro

Posición del Acelerómetro	Voltaje entregado del acelerómetro
0°	1,22V
90°	0,7V
-90°	2,20V
-45°	2,01V
45	0,8V

Para lograr la linealización de la señal del acelerómetro dentro del microcontrolador se utilizó la fórmula de la ecuación de la recta, de donde podemos obtener su pendiente, mediante la fórmula:

$$17) \quad m = \frac{y^2 - y^1}{x^2 - x^1}$$

Ecuación 9. Fórmula de la Pendiente de una recta.

En este caso, conocemos que (0° - 250) y (180° - 450) según los valores de inclinación del sensor que se observa en la Tabla 3.2. Estos son los valores que lee el puerto analógico del microcontrolador.

Tabla 3. 2: Valores del sensor

NÚMERO DE MUESTRAS (X)	VALORES ANALÓGICOS (Y)
0	250
10	276

20	290
30	301
40	331
50	360
60	390
70	406
80	424
90	441
100	450

En la figura 3.10 se muestra la gráfica de la recta correspondiente a las muestras tomadas, es necesario recalcar que tales datos están tomados de forma aleatoria debido a que se linealizó, con casi 200 muestras para obtener mayor exactitud.

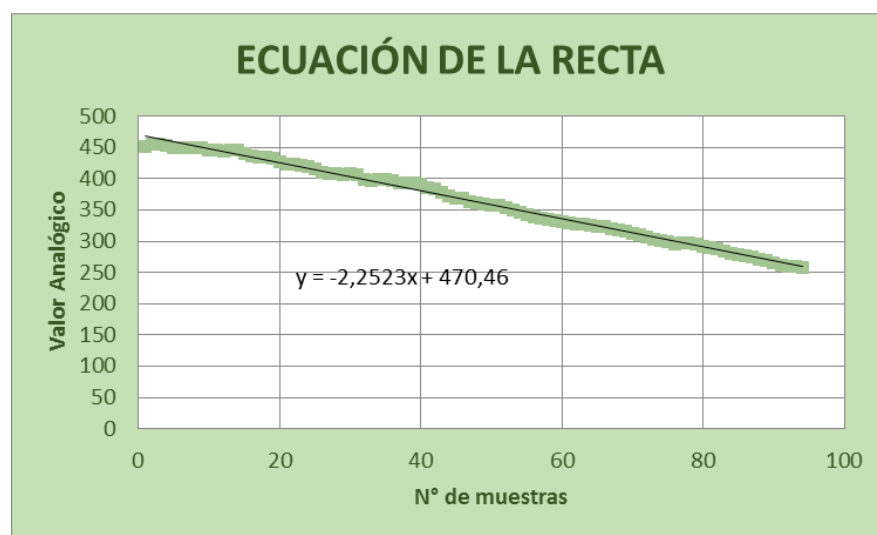


Figura 3. 10 Ecuación de la recta del sensor
Fuente: Autor.

Debido a que la señal del sensor tenía un ruido excesivo se encontró la necesidad de colocar un filtro digital para estabilizar dicha señal.

3.7. FILTRO PARA ESTABILIZAR LA SEÑAL DEL SENSOR

Un filtro sirve para atenuar las señales no deseadas, en este caso se utilizó un filtro analógico el cual es usado para señales de tiempo continuo. En la figura 3.11 se muestra la señal del sensor sin filtro, la cual fue obtenida ingresando los datos generados por el acelerómetro, en donde en el eje X se muestran los valores analógicos del sensor y en el eje Y, el número de muestras obtenidas.



Figura 3. 11 Señal del sensor sin filtro

Fuente: Autor.

En la figura 3.12 se muestra la señal del sensor con filtro IIR (Respuesta infinita al impulso). Mediante la utilización del filtro se consiguió atenuar la señal del sensor logrando evitar que el ruido provoque vibraciones en el servomotor.

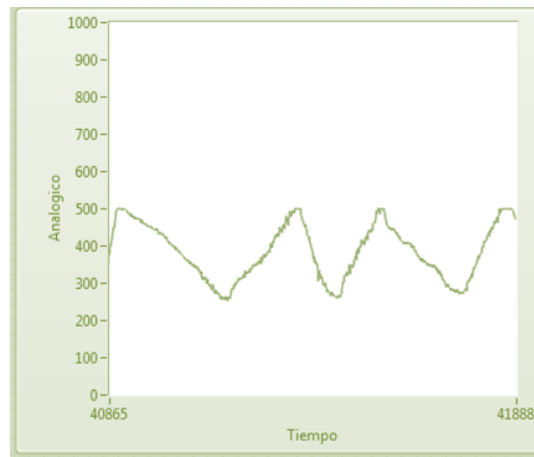


Figura 3. 12 Señal del sensor con filtro
Fuente: Autor.

3.8 DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE CONTROL

Se presenta los diagramas de flujo del sistema de control (figura 3.13) implementado en la mano robótica:

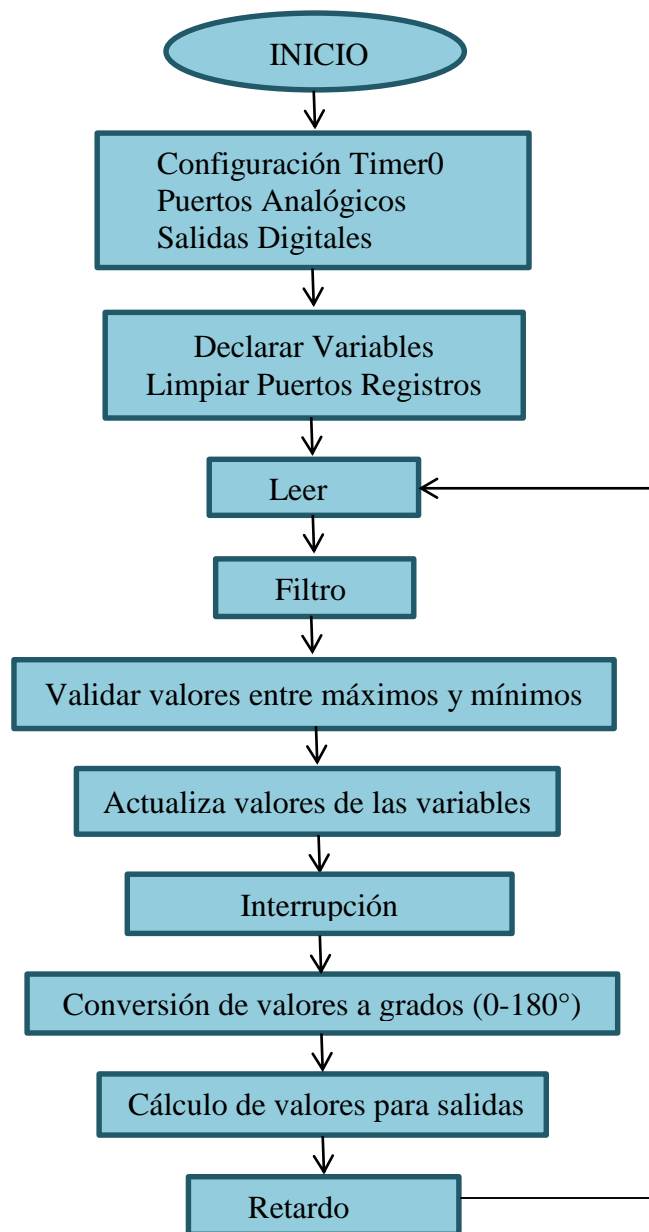


Figura 3. 13 Diagrama de flujo principal del sistema de control
Fuente: Autor.

Inicialmente se tiene la configuración de los puertos de entrada y salida, en donde el puerto ADC0 será la entrada del sensor y el puerto PD2 del microcontrolador servirá como salida digital que me entrega el PWM del servomotor, además se realiza la activación del TIMER0. El siguiente diagrama de flujo describe la subrutina de “Interrupción” (figura 3.14).

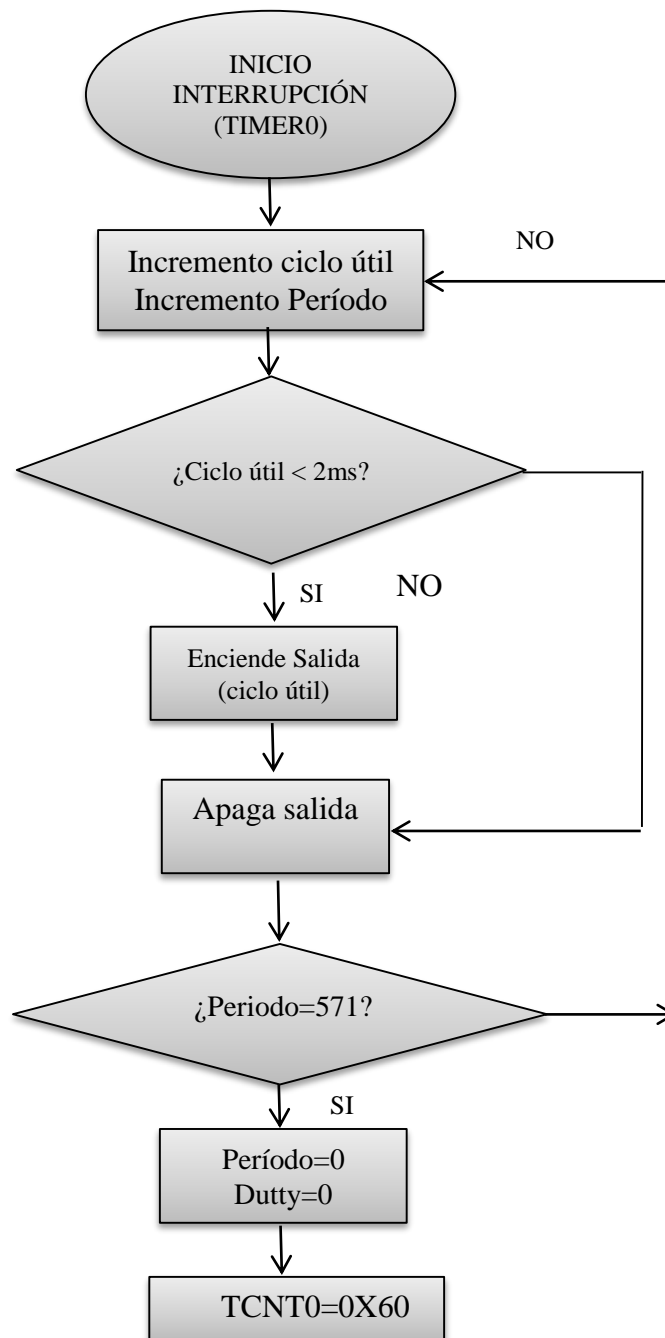


Figura 3. 14 Diagrama de flujo de la subrutina de interrupción
Fuente: Autor.

- **Timer0 por Interrupción**

El microcontrolador debe realizar una acción durante el ciclo de tiempo que ejecuta el *timer*, ésta salida sirve para ejecutar el movimiento del servomotor.

Mediante cálculos se determinó el ciclo de trabajo en el que opera el servomotor.

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 servomotor.

A continuación se presenta la fórmula que se obtiene de la hoja de datos del microcontrolador:

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

Se debe obtener un periodo T de 0.02ms, con *preescaler* de 1, además se fijó la frecuencia del reloj en 8Mhz y la resolución del *timer* es de 8 bits.

De la ecuación anterior se obtiene que:

$$TCNT0 = 2^{\text{resol.timer}} - \frac{f_{CPU} * T}{\text{preescaler}}$$

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

$$TCNT0 = 96 = 0x60$$

Después de realizar las pruebas al programa, se obtuvo que el *timer* 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 obtiene después de 571 ciclos de conteo. Este valor fue obtenido de la siguiente manera:

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

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

$$\frac{0,5\text{ms}}{0,035\text{ms}} = 14,28$$

$$\frac{2\text{ms}}{0,035\text{ms}} = 55,14$$

- 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, 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, 2016).

Actualmente en el programa se utilizan dos números de muestras y se realiza dicho promedio, el cual se guarda en una nueva variable.

3.9 PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR

El programa que contiene el microcontrolador para realizar el control de la muñeca de la mano robótica se lo realizó en el software "*CodeVisionAVR*".

El programa, básicamente, realiza el siguiente proceso:

- Adquiere los datos del acelerómetro, que están siendo ingresados a través de la entrada de conversión análoga/digital.
- Procesa la posición del acelerómetro y luego determinar el ángulo que debe girar la muñeca.

- Una vez obtenidos los datos del sensor se añade un filtro para reducir el ruido que se pueda producir.
- Actualiza los valores de las variables.
- Calcula el ancho de pulso de señal PWM que se enviará al servomotor
- Envía la señal PWM al servomotor a través de una salida digital.
- Repite el proceso de manera infinita.

En la siguiente sección se realizará la descripción de las partes de dicho programa de una manera más detallada:

1. Configuración de datos generales

En esta sección se le indica al software los datos tales como: tipo de microcontrolador, tipo de programa, frecuencia del reloj, tipo de memoria del modelo, capacidad de la memoria RAM externa, capacidad del Data Stack:

2. Configuración de datos de inicio del programa

Se configurará las librerías necesarias para el programa:

```
#include <mega16a.h> //Añade el modelo del microntrolador
#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 activa el módulo conversor análogo digital con el pin del voltaje de referencia:

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

Se declara y configura las variables a utilizar:

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

Valores de conteo para el ciclo útil del servomotor:

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

Variables donde se almacena la posición del servomotor de 0 a 180 grados.

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

Variables útiles para el filtro ya que necesita de un valor anterior del sensor, actualizando la posición final suavizando la señal.

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

Variable auxiliar para la posición del servomotor.

```
float factor_s2;
unsigned int i=0;
```

3. Configuración del Timer y de los servomotores (señal PWM)

En esta sección se describe el proceso que utiliza el microcontrolador para enviar la señal PWM para ordenar el giro del servomotor. La señal PWM es generada con del Timer0 y con la activación de la salida 0 del Puerto B. Inicialmente se realiza el incremento de los valores que se encuentren en las variables “periodo” y “duty” para establecer la duración de la señal PWM.

```
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
```

Configuración del timer0 del microcontrolador en modo de interrupciones:

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

El periodo máximo del servomotor está alrededor de los 20 ms, por tal razón se establece que el periodo de la onda PWM deberá estar próximo a ese valor, eso se consigue limitando el conteo de la interrupción hasta “571”, donde se completa el periodo de funcionamiento.

```
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
}
```

En la variable “salida[0]” se encuentra almacenado el valor del ciclo útil de la señal PWM y con las funciones “if” se consigue mantener activa la salida 0 del puerto B, para obtener el ancho de pulso necesario para que el servomotor gire el ángulo deseado.

```
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);
}

```

4. Lectura de la señal del acelerómetro

La señal que envía el acelerómetro con el dato del ángulo que debe girar el servomotor es analógica, por tal razón es necesario realizar su conversión a digital. Esta conversión se la realiza internamente en el microcontrolador con el siguiente código.

```

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;
}

```

5. Procesamiento del ángulo de giro

Una vez digitalizada la señal del ángulo, proveniente desde el acelerómetro, se debe procesarla para convertirla en el ancho del pulso de la onda que será enviada al servomotor para que este gire lo necesario. Para esto primeramente obtenemos el factor de conversión

que transforma el valor de multiplicación para convertir el valor dentro de 180°, es decir, de 14 a 50, cumpliendo los 2ms máximos del ciclo de trabajo del servomotor:

```
void calcula_parametros()
{

    factor_s2=mx2-mp2; //factor de conversión
    factor_s2/=180.0;
}
```

Una vez que se tiene el factor de conversión, en la siguiente subrutina se obtiene la conversión del dato del ángulo de giro, estableciendo un valor máximo y mínimo y lo almacenamos en la variable respectiva, logrando eliminar el ruido y limitando el giro de operación.

```
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;
}

```

6. Subrutina auxiliar

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.

```

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

```

7. Envío de la señal de salida y filtro

En esta sección se realiza la configuración necesaria para leer los valores analógicos enviados por el sensor a su respectivo canal.

```

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

```

Como se menciona anteriormente, fue necesaria la implementación de un filtro digital para reducir el ruido de la señal analógica del acelerómetro que ingresa al microcontrolador. Por esto, se describe la implementación del filtro IIR. Esta subrutina consiste en tomar dos valores y realizar 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);
}
```

8. 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 a 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 programación no es indispensable, 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")

```

En esta sección se inicia el ciclo infinito de programa, en donde se ejecutará todo el procesamiento general de toda la información.

```

while (1)
{

```

Aquí 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;
}
```

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);
```

Por último, 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\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);
```

```
}
```

```
}
```

Finalmente, este es el código que nos permite girar la muñeca de la mano robótica.

CAPITULO IV

4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Dentro del proceso de implementación de la mano robótica se realizaron pruebas de movimiento de cada uno de los componentes y se verificó su correcto funcionamiento. En los siguientes párrafos se describen las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en cada una de ellas.

Además, se realizó el desarrollo del programa para el microcontrolador detallado anteriormente. Una vez integrado todas las partes se procedió a realizar las respectivas pruebas de funcionamiento de todo el sistema.

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

La prueba consistía en que una persona usara el guante y realizara diferentes giros de la muñeca, estos movimientos debían ser replicados por la mano robótica.

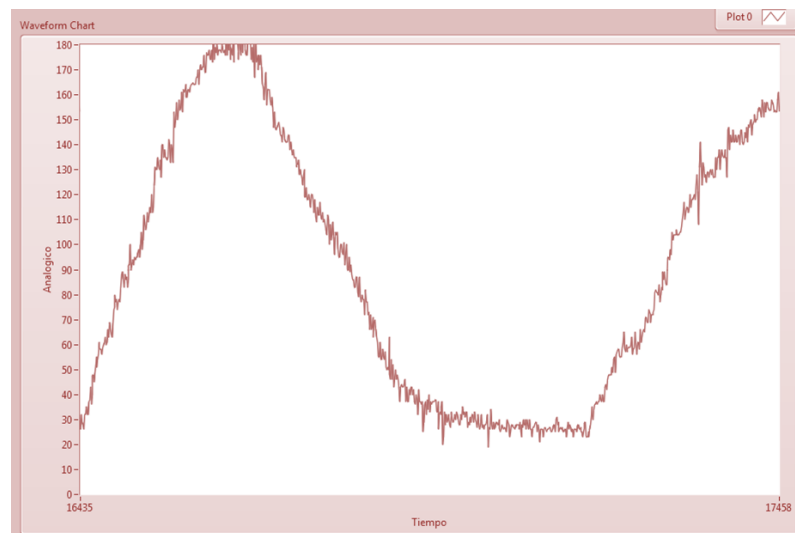
4.2.1 PRUEBA AL SERVOMOTOR

- a) **Sin filtro:** El servomotor presentaba vibración ocasionando distorsión en el movimiento. Se detallan los valores aleatorios presentados en la siguiente tabla 4.1:

Tabla 4. 1: Valores del servomotor sin filtro

	VALORES DEL SERVOMOTOR SIN FILTRO									
Nro. de muestras	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Grados (0-180°)	119	145	62	179	145	35	36	54	171	167

Fuente: Autor.

**Figura 4. 1** Señal del servomotor sin filtro

Fuente: Autor.

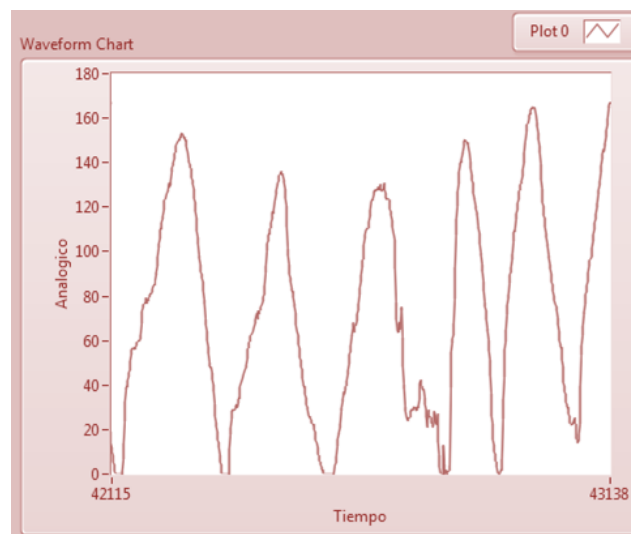
Como se observa en la figura 4.1 se entiende que la respuesta del servomotor también depende de la entrada analógica que proporciona el sensor acelerómetro por lo que se generan los picos máximos y mínimos que se encuentran a lo largo de la curva de respuesta.

El filtro se aplica solo a la entrada analógica por lo que, si dicha entrada no contiene un filtro, desestabiliza la respuesta del servomotor.

- b) Con Filtro:** El servomotor ya no presenta vibración permitiendo el correcto funcionamiento del sistema. Se presentan los valores aleatorios presentados en la siguiente tabla 4.2:

Tabla 4. 2: Valores del servomotor con filtro

	VALORES DEL SERVOMOTOR CON FILTRO									
Nro. de muestras	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Grados (0-180°)	37	112	169	66	128	118	38	130	76	20

Fuente: Autor.**Figura 4. 2** Señal del servomotor con filtro**Fuente:** Autor.

Como se observa en la figura 4.2 se entiende que la respuesta del servomotor es más lineal, es decir, no se presentan los picos observados anteriormente. Se comprueba que el filtro corrige tanto a la señal de entrada como la de salida, aunque el filtro solo se aplica a la señal de entrada proporcionada por el acelerómetro.

4.2.2 PRUEBA AL ACELERÓMETRO

- a) **Sin Filtro:** Inicialmente se encontró que el sensor enviaba ruido que provocaba que la mano robótica presentara vibraciones, siendo el problema más significativo. Luego, se exponen las muestras aleatorias obtenidas (Tabla 4.3).

Tabla 4. 3: Valores del acelerómetro sin filtro

		VALORES DEL ACELERÓMETRO SIN FILTRO									
Nro. de muestras		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Valores Analógicos		250	327	330	450	227	304	352	430	232	345

Fuente: Autor.

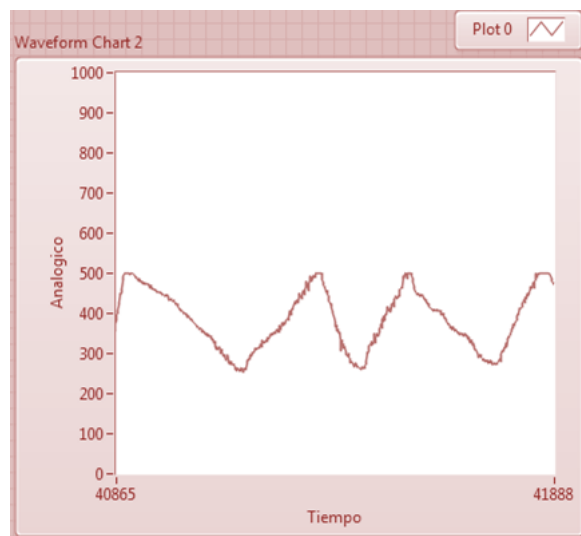


Figura 4. 3 Señal del acelerómetro sin filtro

Fuente: Autor.

En la figura 4.3 se observa que la señal tiene valores inesperados, por lo que es indispensable añadir un filtro a la señal, para que el acelerómetro brinde una respuesta más estable.

- b) **Con Filtro:** El sensor acelerómetro mejoró notablemente su señal, es decir, se puede obtener valores con mayor precisión, permitiendo un procesamiento de datos más efectivo y en tiempo real (Tabla 4.4).

Tabla 4. 4: Valores del acelerómetro con filtro

		VALORES DEL ACELERÓMETRO CON FILTRO									
Nro. de muestras		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Valores Analógicos		370	462	275	376	388	221	451	289	345	423

Fuente: Autor.

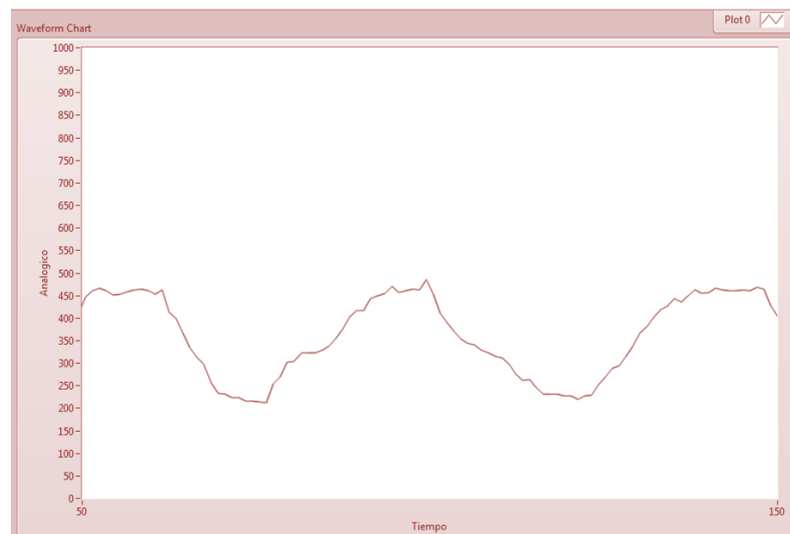


Figura 4. 4 Señal del acelerómetro con filtro

Fuente: Autor.

En la figura 4.4 se observa que la señal de respuesta del acelerómetro es más estable, por lo tanto, la señal de salida es proporcional a la misma. Como resultado de estas pruebas se concluyó que el tiempo de respuesta que entrega el sistema de control de la mano robótica es real, y que el desplazamiento angular observado es el deseado, haciendo parecer que el movimiento de la mano del usuario y de la mano robótica es simultáneo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez finalizado el proyecto se presenta las siguientes conclusiones de todo el desarrollo, así como también algunas recomendaciones:

CONCLUSIONES

- El desarrollo del prototipo de la mano robótica, enfocada al control de los movimientos básicos de la muñeca se realizó mediante un guante sensorizado el cuál le da una interface al usuario, que le permitirá trabajar de manera fácil y sencilla, de tal manera que pueda realizar un control, sin que esto sea un proceso confuso y complicado. Para el proyecto, la utilización del guante permitió obtener el movimiento deseado sin ningún problema para el usuario.
- Una vez terminada la implementación del proyecto se concluyó que para el desarrollo de proyectos existe una gran gama de productos, de los cuales se debe escoger los que tengas las características más convenientes para cumplir con el objetivo y para que se integren entre ellos, para este proyecto en particular se buscó un sensor pequeño de tal manera que se pueda colocar en el guante sin que afecte al usuario o pierda estética, el microcontrolador tiene las características necesarias y suficientes para realizar todas las funciones de procesamiento, adquisición de datos y envío de señales, y el servomotor es de un tamaño adecuado para estar dentro del brazo robótico y soportar una carga superior a la estimada.
- Para conocer los resultados del análisis cinemático de la estructura tales como el desplazamiento, deformaciones, factor de seguridad y el esfuerzo de Von Mises, se

empleó un software de diseño CAD que cumplía los requerimientos deseados, por ende, se utilizó *SolidWorks*.

- Dentro de las partes fundamentales del proyecto estaba elegir una fuente eléctrica que permita darle a la mano robótica la capacidad suficiente para alimentar a los servomotores, que tenga una amplia vida útil, que no tenga la necesidad de realizar cargas repetitivas, es decir que tenga un alto nivel de descarga. Por tal razón se adquirió una batería tipo Lipo, y se añadió una fuente de alimentación para el microcontrolador y el sensor, las cuales permiten el correcto funcionamiento del prototipo.
- Con cada una de las pruebas realizadas se comprobó los movimientos respectivos de la muñeca de la mano robótica, con lo cual se concluye que la estrategia de control implementada es la adecuada, debido a que el margen de error es mínimo.
- Una vez realizadas las pruebas con el sensor acelerómetro se determinó que es importante realizar un tratamiento a la señal análoga que este envía con los datos del ángulo para obtener mejores resultados en el procesamiento de dicha señal. Para este proyecto se implementó la linealización de la señal del sensor de manera digital y se obtuvo los resultados óptimos para el control.

RECOMENDACIONES

- En vista de que la tecnología avanza constantemente, siendo una de las principales características la reducción del tamaño de los componentes se recomienda que los nuevos proyectos utilicen dispositivos cada vez más modernos de tal manera que por su tamaño sean fácilmente adaptables a sistemas permitiendo al usuario transportarse sin ningún inconveniente.
- Este proyecto proporciona la pauta inicial para el desarrollo de nuevos prototipos de prótesis enfocados a mejorar la calidad de vida de las personas con características diferentes, por lo que se recomienda que, en base a este proyecto, se desarrollen futuras investigaciones y trabajos.
- Se recomienda la utilización de un amplificador para filtrar la señal analógica del sensor antes de que sea procesada por el microcontrolador, para evitar ruidos o vibraciones.
- Para futuros proyectos se puede utilizar otros métodos de comunicación, ya sean éstos inalámbricos, para realizar un mejor control, logrando así que el prototipo tenga mayor alcance.

- BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- ROSSANO, V. (2013). *Conceptos Fundamentales y Práctica Profesional PROTEUS*. Buenos Aires: Fox Andina. Primera Edición.
- SIERRA, A. (2014). *Aprendiendo App Inventor*. New York: Bohodon Ediciones. Primera Edición.
- ARBOLEDAS, D. (2010). *Electrónica Básica*. Madrid: StarBoock Editorial. Primera Edición.
- KAPANDJI, A. (2006). *Fisiología Articular*. Madrid. Editorial Médica Panamericana. Sexta Edición.
- MOTT, ROBERT. (2006). *Diseño de elementos de Máquinas*. México: Editorial Pearson. Cuarta edición.
- NORTON, ROBERT. (2009). *Diseño de Maquinaria*. México: Editorial Litrográfica Ingramex. Cuarta Edición.
- OLLERO, A. *Robótica, Manipuladores y robots móviles*. Editorial Marcombo S.A
- SADIKU, M. N. (2007). *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*. México: Litográfica Ingramex, S.A. de C.V.
- BOLTON, W. (2010). *Mecatrónica* (4 ed.). Edinburgh Gate: Alfaomega.
- NASHELSKY BOYLESTAD. (2008). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. (8va Ed.). México: Pearson S.A

TESIS

- Pilaquina Abadiano. I. (2009). *Diseño y Construcción de una mano robótica mediante un guante sensorizado*. (Tesis inédita de Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Quito, ECU.
- Pozo Espín. D. (2010). *Diseño y construcción de una plataforma didáctica para medir ángulos de inclinación usando sensores inerciales como acelerómetro y giroscopio*. (Tesis inédita de Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Quito, ECU.
- Quinayás Burgos. C. (2010). *Diseño y construcción de una prótesis robótica de mano funcional adaptada a varios agarres*. (Tesis inédita de Ingeniería). Universidad del Cauca, Popayán.

- Aguilar Pérez. L. (2011). *Optimización de la geometría de una prótesis de miembro superior*. (Tesis inédita de Ingeniería). Instituto Politécnico Nacional, México. D.F.

LINKOGRAFÍA

- Silva Castellanos, C. (2010). Diseño mecánico y cosmético de una prótesis parcial de mano. Bogotá, Colombia. Disponible en:
http://www.bvs.sld.cu/revistas/ibi/vol30_1_11/ibi03111.htm
- 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>
- Dorador Gonzalez, J. (2004). Robótica y prótesis Inteligentes. México. Disponible en:
http://www.revista.unam.mx/vol.6/num1/art01/art01_enero.pdf
- Cardona I. (2011). Fuentes de Energía, pilas y Baterías. Colombia. Disponible:
<http://es.scribd.com/doc/63469428/5-Fuentes-de-Energia-Pilas-y-Baterias#scribd>
- Lic. Melo, J. L. (2005). Ergonomía Editorial Journal. Buenos Aires. Disponible en:
<https://ergonomia-y-cibernetica.wikispaces.com/file/view/Antropometria+y+Ergonomia.pdf>
- 5HERTZELECTRONICA. (2014). ABC del Acelerómetro. México, Nuevo León. Disponible en: <http://5hertz.com/tutoriales/?p=228>

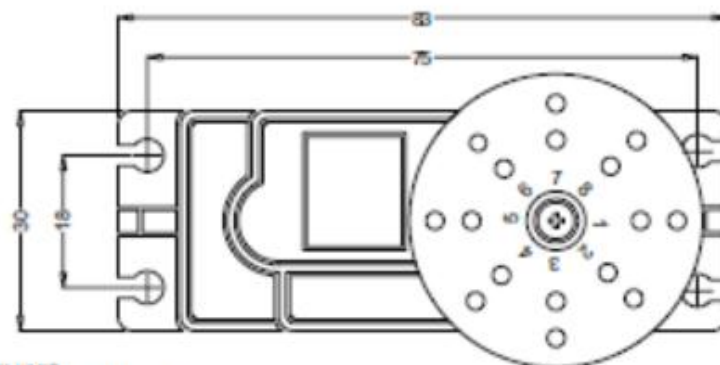
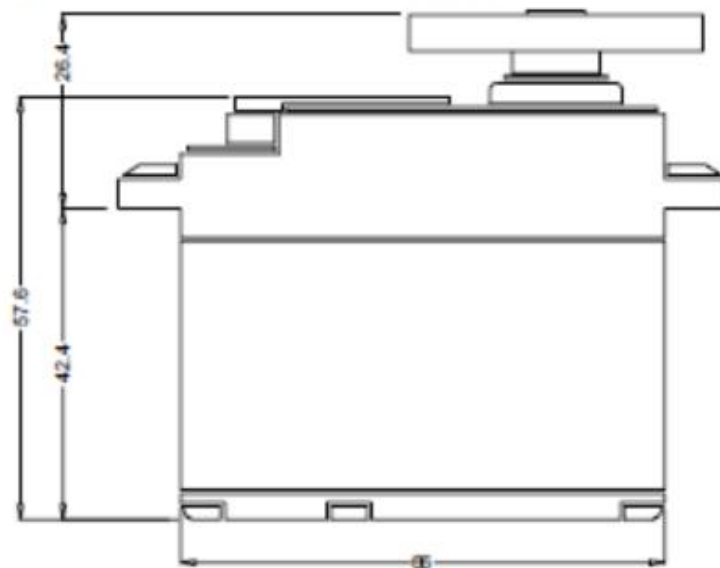
- ANEXOS

ANEXO 1: DATASHEET SERVOMOTOR DE 19Kg

ANNOUNCED SPECIFICATION OF HS-805BB+ MEGA 1/4 SCALE SERVO

1. TECHNICAL VALUES

CONTROL SYSTEM	: +PULSE WIDTH CONTROL 1500usec NEUTRAL	
OPERATING VOLTAGE RANGE	: 4.8V TO 6.0V	
OPERATING TEMPERATURE RANGE	: -20 TO +60°C	
TEST VOLTAGE	: AT 4.8V	AT 6.0V
OPERATING SPEED	: 0.19sec/60° AT NO LOAD	0.14sec/60° AT NO LOAD
STALL TORQUE	: 19.8kg cm(274.96oz.in)	24.7(343.01oz.in)
OPERATING ANGLE	: 45°ONE SIDE PULSE TRAVELING 400usec	
DIRECTION	: CLOCK WISE/PULSE TRAVELING 1500 TO 1900usec	
CURRENT DRAIN	: 8mA/IDLE AND 700mA/NO LOAD RUNNING	
DEAD BAND WIDTH	: 8usec	
CONNECTOR WIRE LENGTH	: 300mm(11.81in)	
DIMENSIONS	: 66x30x57.6mm(2.59x1.18x1.29in)	
WEIGHT	: 152g(5.36oz)	



2. FEATURES

3-POLE FERRITE MOTOR
LONG LIFE POTENTIOMETER
DUAL BALL BEARING
INDIRECT POTENTIOMETER DRIVE
WATER & DUST TIGHT

3. APPLICATIONS

GIANT SCALE AIRCRAFT
1/4 SCALE CARS
LARGE SCALE BOATS

ANEXO 2: DATASHEET ACELÉROMETRO MMA7361

Freescale Semiconductor
Technical Data

Document Number: MMA7361L
Rev 0, 04/2008



**±1.5g, ±6g Three Axis Low-g
Micromachined Accelerometer**

The MMA7361L is a low power, low profile capacitive micromachined accelerometer featuring signal conditioning, a 1-pole low pass filter, temperature compensation, self test, Dg-Detect which detects linear freefall, and g-Select which allows for the selection between 2 sensitivities. Zero-g offset and sensitivity are factory set and require no external devices. The MMA7361L includes a Sleep Mode that makes it ideal for handheld battery powered electronics.

Features

- 3mm x 5mm x 1.0mm LGA-14 Package
- Low Current Consumption: 400 µA
- Sleep Mode: 3 µA
- Low Voltage Operation: 2.2 V – 3.6 V
- High Sensitivity (800 mV/g @ 1.5g)
- Selectable Sensitivity (±1.5g, ±6g)
- Fast Turn On Time (0.5 ms Enable Response Time)
- Self Test for Freefall Detect Diagnosis
- Dg-Detect for Freefall Protection
- Signal Conditioning with Low Pass Filter
- Robust Design, High Shocks Survivability
- RoHS Compliant
- Environmentally Preferred Product
- Low Cost

Typical Applications

- 3D Gaming: Tilt and Motion Sensing, Event Recorder
- HDD MP3 Player: Freefall Detection
- Laptop PC: Freefall Detection, Anti-Theft
- Cell Phone: Image Stability, Text Scroll, Motion Dialing, E-Compass
- Pedometer: Motion Sensing
- PDA: Text Scroll
- Navigation and Dead Reckoning: E-Compass Tilt Compensation
- Robotics: Motion Sensing

ORDERING INFORMATION				
Part Number	Temperature Range	Package Drawing	Package	Shipping
MMA7361LT	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	Tray
MMA7361LR1	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	7" Tape & Reel
MMA7361LR2	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	13" Tape & Reel

MMA7361L

MMA7361L: XYZ AXIS
ACCELEROMETER
±1.5g, ±6g

Bottom View



14 LEAD
LGA
CASE 1977-01

Top View

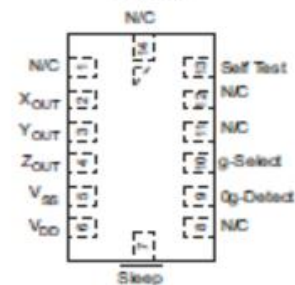


Figure 1. Pin Connections

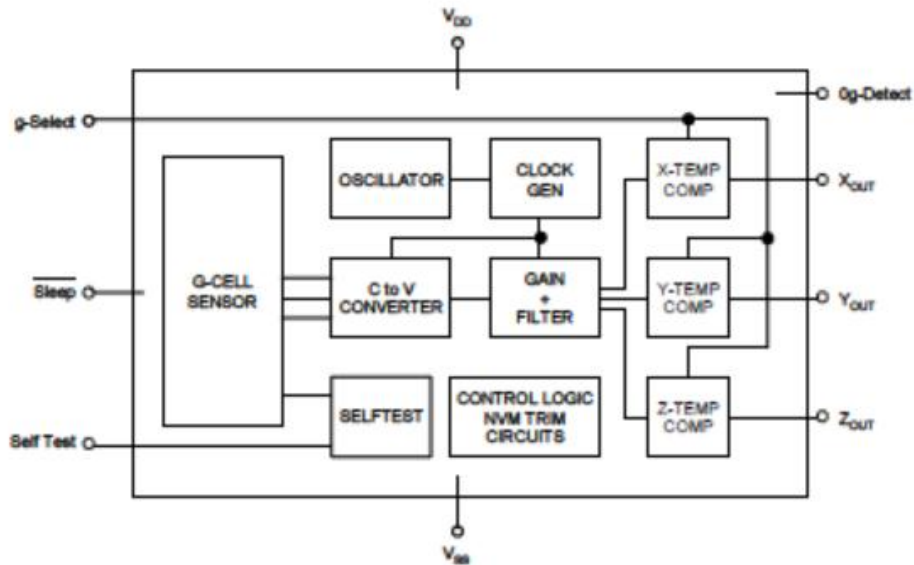


Figure 2. Simplified Accelerometer Functional Block Diagram

Table 1. Maximum Ratings

(Maximum ratings are the limits to which the device can be exposed without causing permanent damage.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Acceleration (all axis)	a_{max}	± 5000	g
Supply Voltage	V_{DD}	-0.3 to +3.6	V
Drop Test ⁽¹⁾	D_{drop}	1.8	m
Storage Temperature Range	T_{stg}	-40 to +125	°C

1. Dropped onto concrete surface from any axis.

ELECTROSTATIC DISCHARGE (ESD)

WARNING: This device is sensitive to electrostatic discharge.

Although the Freescale accelerometer contains internal 2000 V ESD protection circuitry, extra precaution must be taken by the user to protect the chip from ESD. A charge of over 2000 volts can accumulate on the human body or associated test equipment. A charge of this magnitude can

alter the performance or cause failure of the chip. When handling the accelerometer, proper ESD precautions should be followed to avoid exposing the device to discharges which may be detrimental to its performance.

ANEXO 3: DATASHEET MICROCONTROLADOR ATMEGA16

Features

- High-performance, Low-power Atmel® AVR® 8-bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 131 Powerful Instructions – Most Single-clock Cycle Execution
 - 32 × 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
 - 612 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
 - 2 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**

Summary

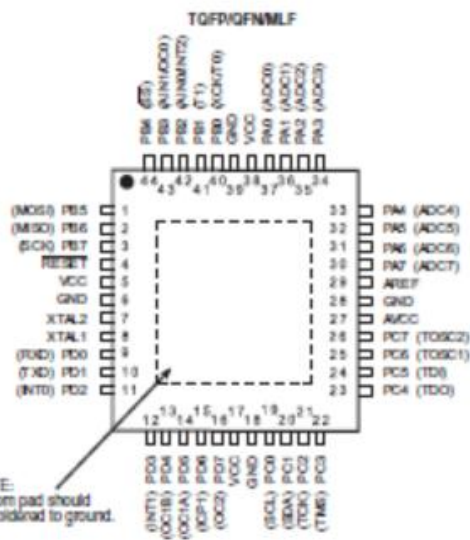
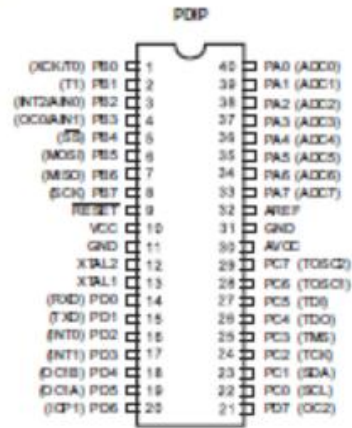
Rev. 2466TS-AVRS-07/10





Pin Configurations

Figure 1. Pinout ATmega16



Disclaimer

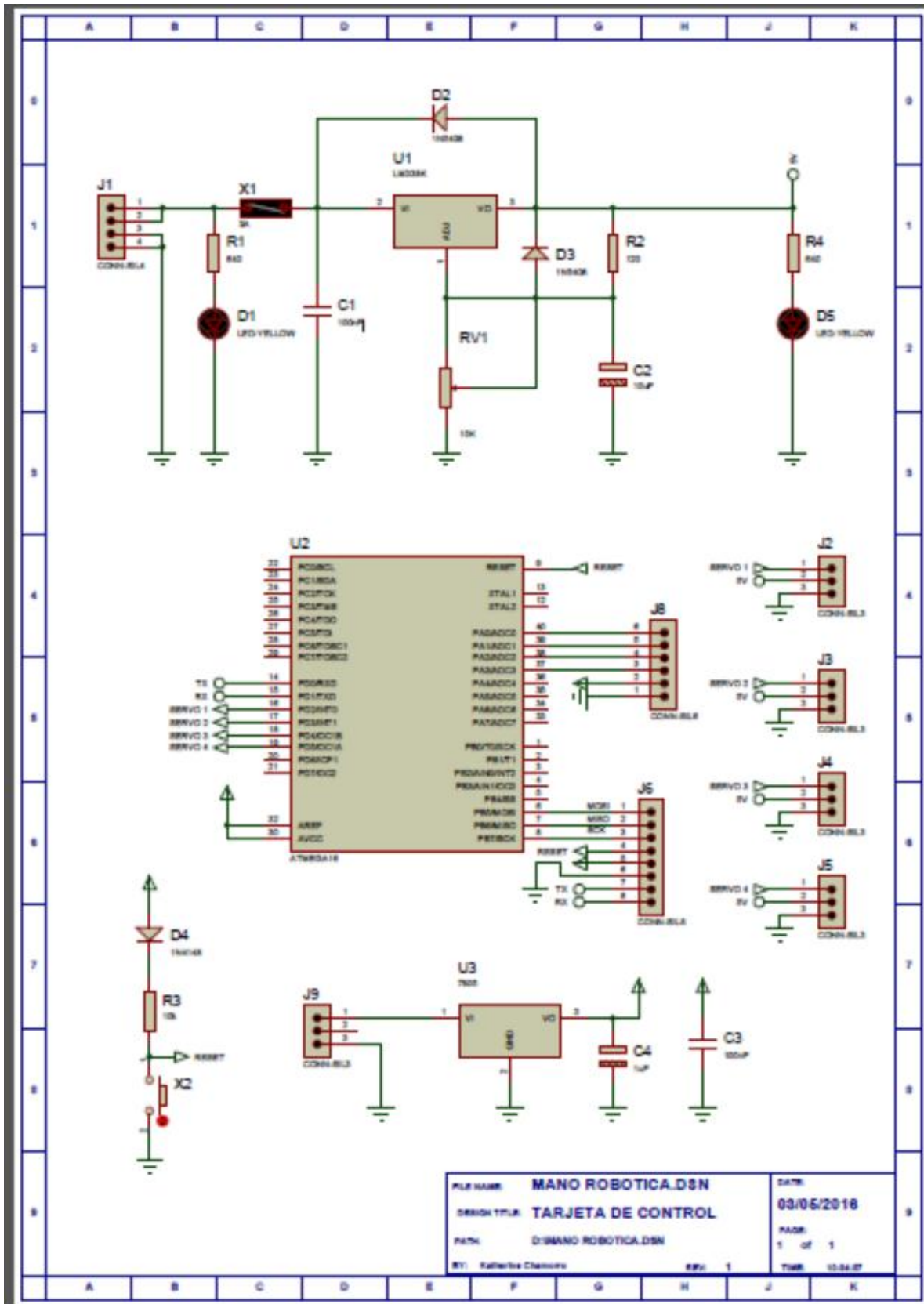
Typical values contained in this datasheet are based on simulations and characterization of other AVR microcontrollers manufactured on the same process technology. Min and Max values will be available after the device is characterized.

ANEXO 4: TABLA DE DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL PCB DE LA PLACA DE CONTROL

Tabla 1. Descripción de elementos utilizados en el PCB de la placa de control

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
R1	640 Ω
R2	120 Ω
R3	10 k Ω
R4	640 Ω
D1, D5	Diodo Led
D2, D3	Diodo 1N5408
D4	Diodo 1N4148
C1, C3	100 nf
C2	10 uf
U1	LM338K
RV1	Potenciómetro Lineal 10 k Ω
X2	Botón para reset
J1	
2 Fuente de Alimentación	Conectores para fuente de alimentación
Servomotor	Conector de 3 pines para manejo de servomotores
Acelerómetro	Conector de 6 pines para el acelerómetro
Microcontrolador Atmega16	Socket de 40 pines

ANEXO 5: ESQUEMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA



ANEXO 6: ESQUEMA DE CONEXIONES DE LA PLACA DE CONTROL DEL SENSOR

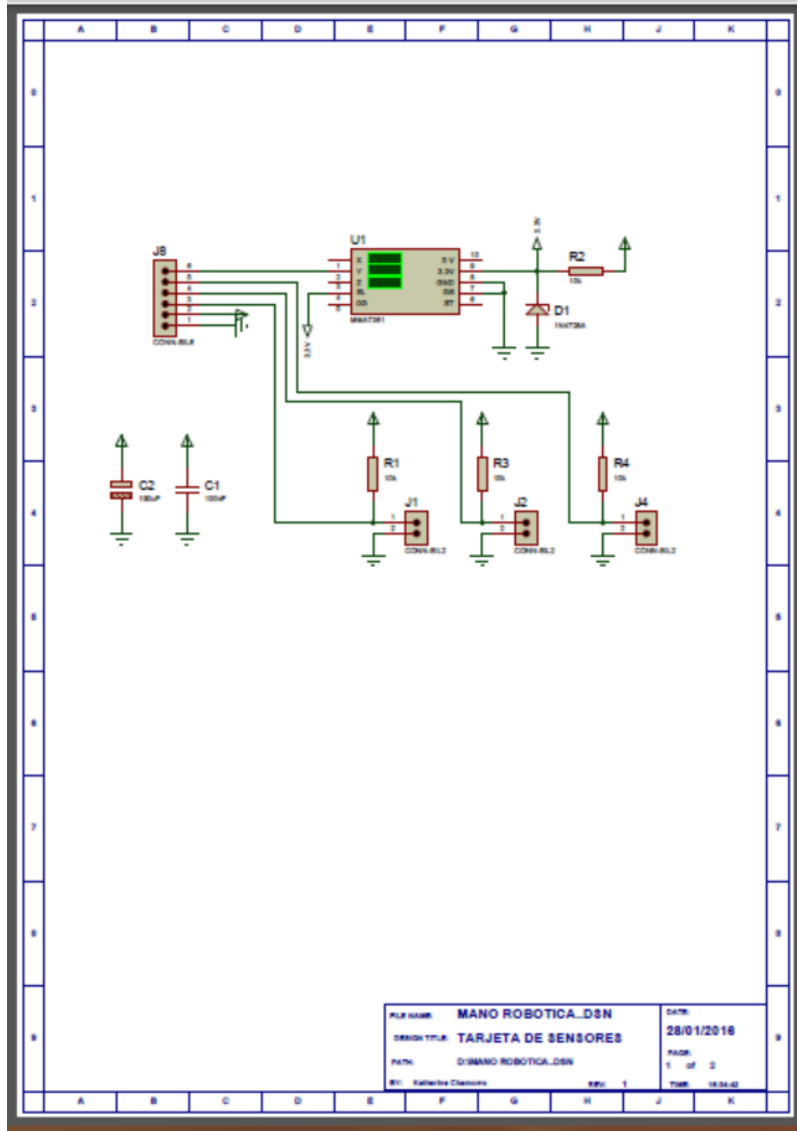
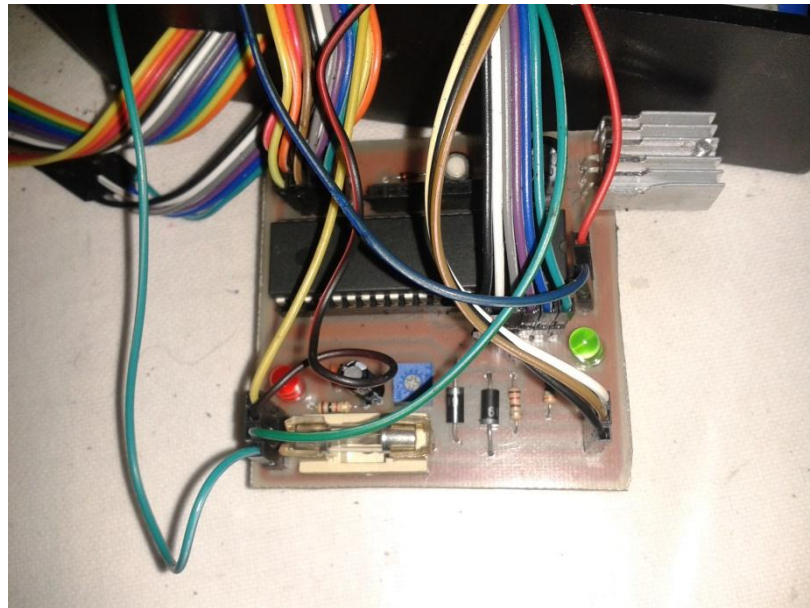


Tabla 2. Descripción de elementos utilizados en el PCB de la placa del sensor

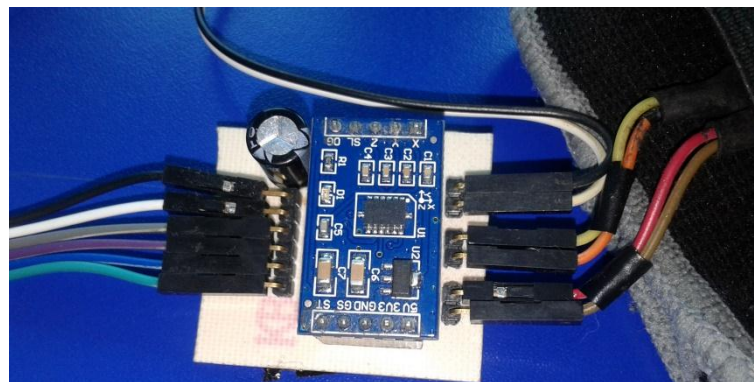
ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
R1, R2, R3,R4	10 k Ω
C1	100nF
C2	100uF

J8	Conector de 6 pines para el acelerómetro
U1	MMA7361
D1	1N4728A
J1,J2,J4	Pines para sensores

ANEXO 7: PLACA DE CONTROL



ANEXO 8: PLACA DE CONTROL DE SENSOR



ANEXO 9: CÓDIGO FINAL DE PROGRAMACIÓN

```

#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
    // OC0 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;
    }
}

```



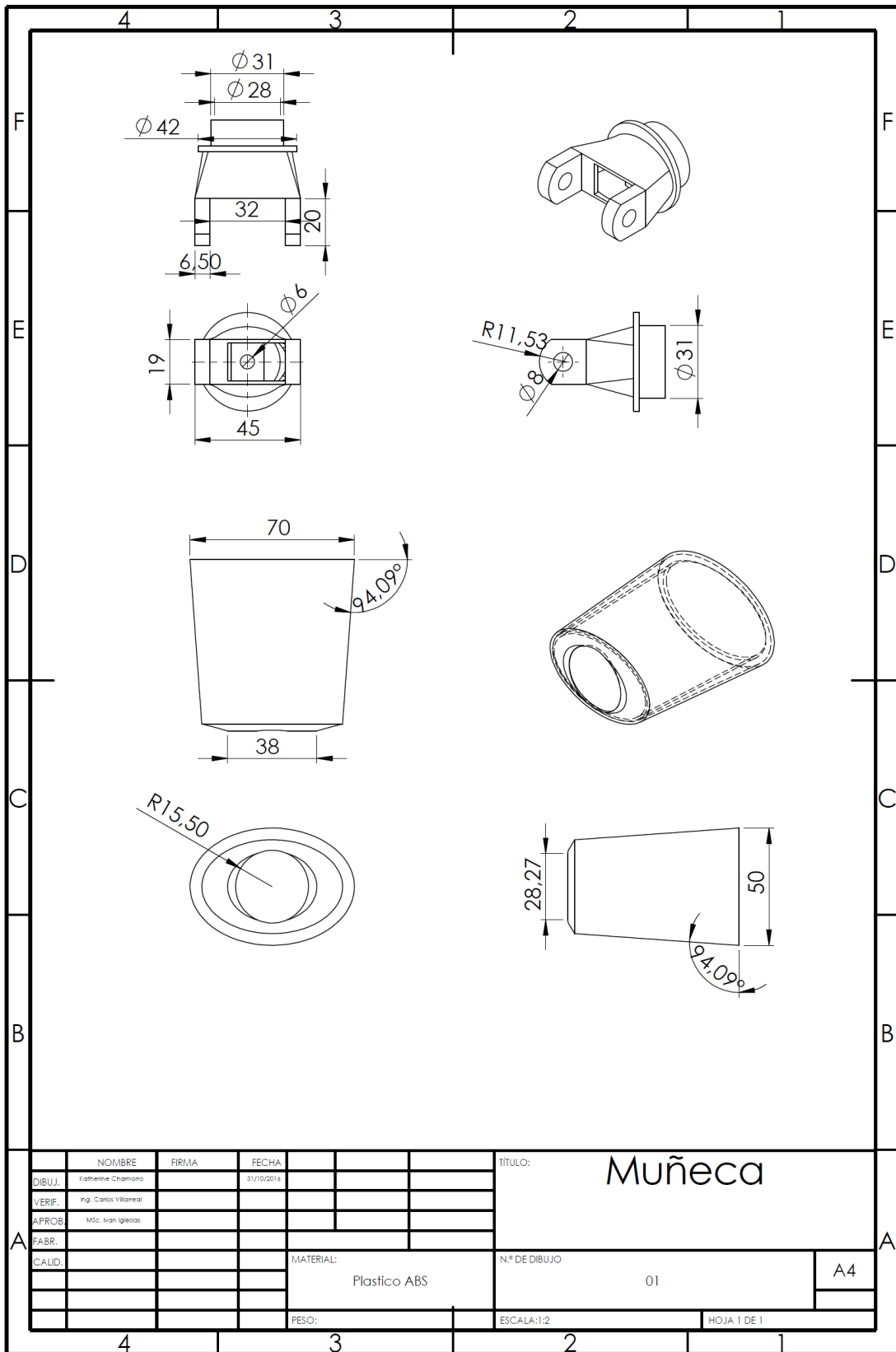
```
    }  
    if(mu_val<250) mu_val=250;  
    if(mu_val>450) mu_val=450;  
  
    if(pu_val<540) pu_val=540;  
    if(pu_val>760) pu_val=760;  
  
    if(in_val<640) in_val=640;  
    if(in_val>820) in_val=820;  
  
    if(me_val<660) me_val=660;  
    if(me_val>820) me_val=820;  
  
    s0=map(mu_val,250.0, 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);  
}
```

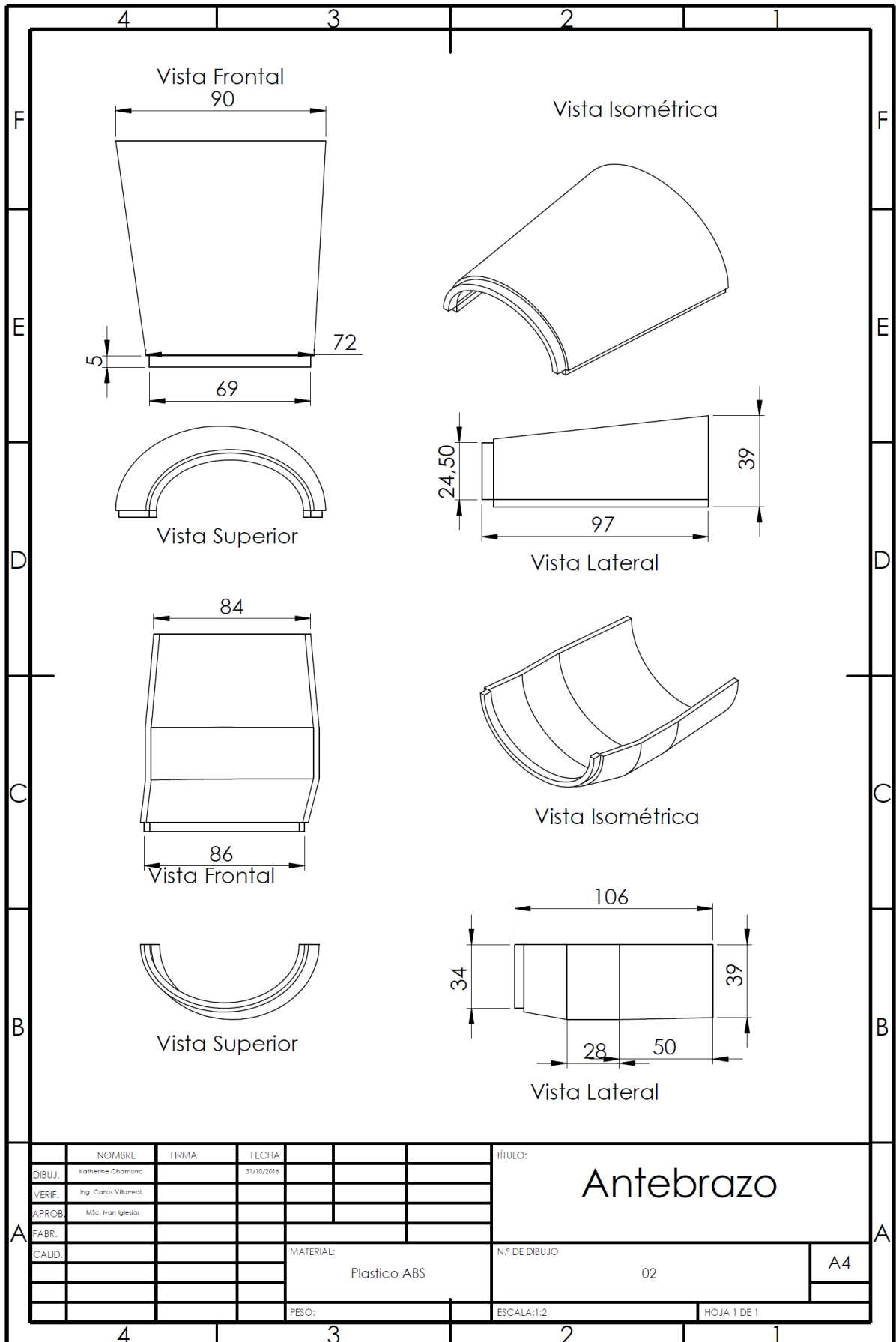
ANEXO 10: MANUAL DE USUARIO

A continuación, se detalla el procedimiento que deberá realizar la persona que vaya a utilizar este prototipo:

1. Verificar que no exista ninguna desconexión en el cableado del sistema.
2. Verificar que el interruptor de la caja de control se encuentre en posición de apagado.
3. Colocarse el guante en la mano derecha, evitando movimientos bruscos que provoquen algún tipo de desconexión o daño.
4. Encender la caja de control colocando el interruptor en la posición de encendido.
5. Realizar los movimientos programados de la mano robótica.
6. En caso de querer retirarse el guante o al terminar el experimento, primeramente, verificar que la caja de control se encuentre apagada.
7. Retirarse el guante de manera cuidadosa protegiendo los dispositivos y el cableado.

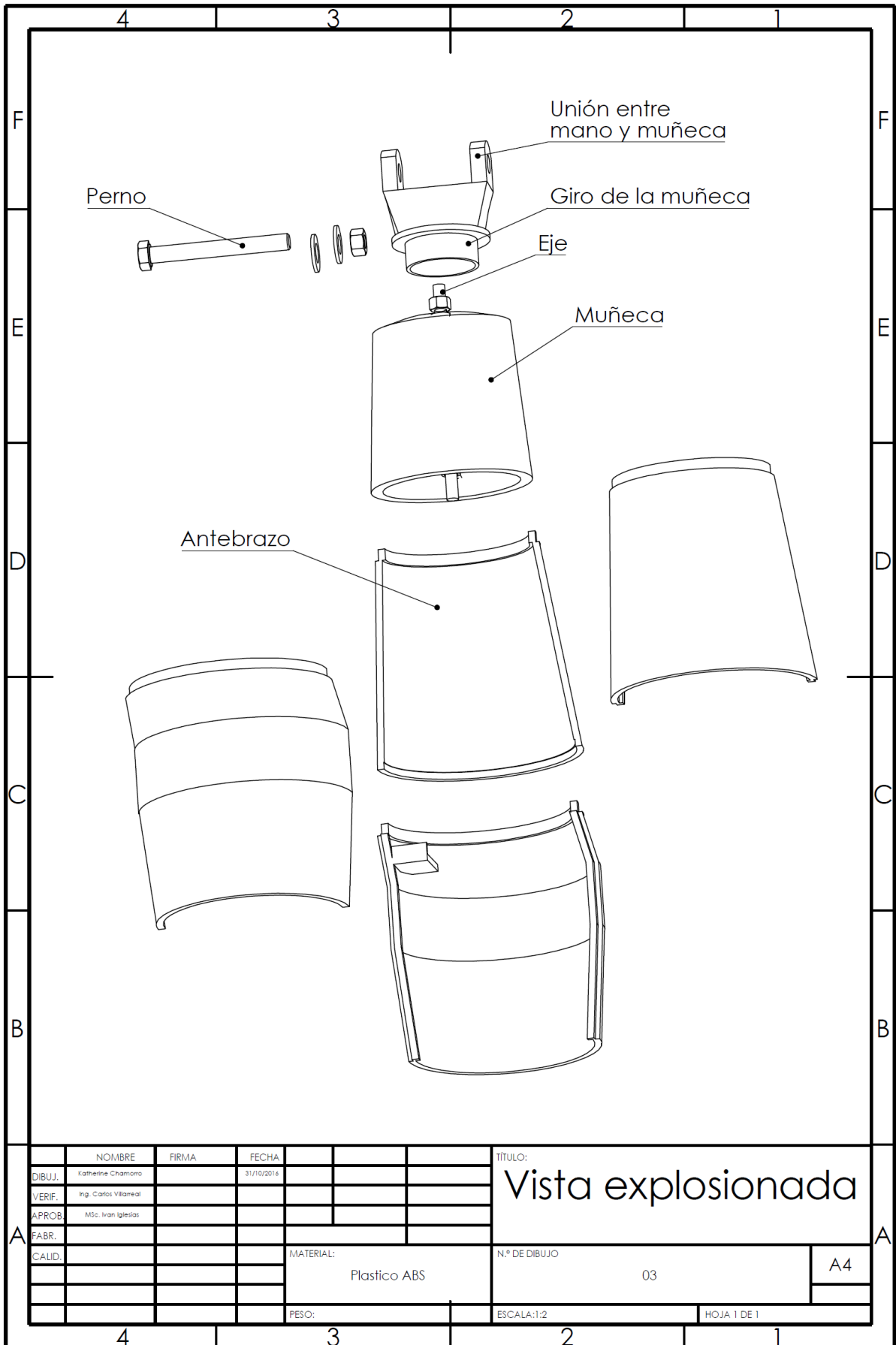
ANEXO 11: PLANOS DE ESTRUCTURA





	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Katherine Chamorro		31/10/2014
VERIF.	Ing. Carlos Villareal		
APROB.	MSc. Iván Iglesias		
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:	Antebrazo	
N.º DE DIBUJO	02	A4
MATERIAL:	Plastico ABS	
PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1



	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Katherine Chamorro		31/10/2014
VERIF.	Ing. Carlos Villanreal		
APROB.	MSc. Ivan Iglesias		
FABR.			
CAUID.			

TÍTULO:
Vista explosionada

MATERIAL:	Plastico ABS	N.º DE DIBUJO	03	A4
PESO:		ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1

ANEXO 12: FOTOGRÁFICO



