



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROTOTIPO DE PRÓTESIS MECATRÓNICA
DE ANTEBRAZO Y MANO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO**

**PRESENTAN:
CHRISTIAN JESÚS RADILLO MONTIEL
ALEJANDRO WALLS MAURER**

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



MÉXICO D.F.

FEBRERO 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE

ÍNDICE	1
1.- INTRODUCCIÓN	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
2.- PROBLEMA	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
3.- ANTECEDENTES DE PRÓTESIS	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
3.1 Diseño de Prótesis en el Siglo XX _____	Error! Bookmark not defined.
3.2 Investigaciones recientes en diseño de manos _____	Error! Bookmark not defined.
3.3 La función de la mano _____	Error! Bookmark not defined.
3.4 Sistemas Protésicos _____	Error! Bookmark not defined.
4.- OBJETIVOS	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
5.- HIPÓTESIS	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
6.- DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
6.1 Funciones _____	Error! Bookmark not defined.
6.2 Clientes potenciales _____	Error! Bookmark not defined.
6.3 Descripción física _____	Error! Bookmark not defined.
6.4 Control _____	Error! Bookmark not defined.
6.5 Especificaciones de diseño _____	Error! Bookmark not defined.
7.- DISEÑO CONCEPTUAL	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
7.1 Control _____	Error! Bookmark not defined.
7.2 Potencia _____	Error! Bookmark not defined.
7.3 Mecanismos _____	Error! Bookmark not defined.
7.4 Instrumentación _____	Error! Bookmark not defined.
7.5 Fijación _____	Error! Bookmark not defined.
8.- DISEÑO DE DETALLE	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
8.1 Mecánico _____	Error! Bookmark not defined.
8.1.1 Mecanismos _____	Error! Bookmark not defined.
8.1.2 Dimensiones _____	Error! Bookmark not defined.
8.1.3 Diseño asistido por computadora _____	Error! Bookmark not defined.
8.1.4 Análisis Cinemático _____	Error! Bookmark not defined.
8.1.5 Manufactura: _____	Error! Bookmark not defined.
8.2 Electrónico y control _____	Error! Bookmark not defined.
9.- PRUEBAS	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
10.- RESULTADOS	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
11.- CONCLUSIONES	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
11.1 Recomendaciones para trabajo futuro _____	Error! Bookmark not defined.
Anexo 1 Programa del controlador	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
Anexo 2 Programa de la Interfase	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
Bibliografía	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
Mediografía	<i>Error! Bookmark not defined.</i>

1.- INTRODUCCIÓN

Desde el año 2003, en el Centro de Diseño y Manufactura de la Facultad de Ingeniería se trabaja en un proyecto cuyo fin último es el de desarrollar una prótesis inteligente de miembro superior (antebrazo y mano) para gente que ha sufrido una amputación. El proyecto ha sido dividido en tres etapas.

En la primera etapa se diseñó un manipulador con dimensiones y peso similares a las de una prótesis de antebrazo el cual tuvo como objetivo realizar el movimiento de pronosupinación de codo, teniendo como prioridad la precisión y no la fuerza en la prensión.

A la par se diseñó una mano articulada en la cual se realizaron experimentos con alambres musculares, contruidos de una aleación de Níquel y Titanio llamada "Nitinol". La idea era generar el movimiento de las articulaciones haciendo pasar corriente eléctrica por estos alambres que tienen memoria de forma.

Actualmente se está desarrollando un brazo manipulador con características similares a las de una prótesis, en las cuales los movimientos serán realizados por medio de servomotores como actuadores, tanto para los movimientos de la muñeca como para los cuatro dedos independientes de los que constará. Las señales de control se darán por medio de señales mioeléctricas y por medio de voz. Las señales serán procesadas en un microprocesador para realizar los movimientos de los actuadores correspondientes.

Para la segunda etapa se pretende diseñar y construir una prótesis de precisión en la prensión, para lo cual se experimentará con polímeros electroactivos (PEA), donde se tratará de aprovechar la baja densidad y buenas propiedades electro-mecánicas que presenta este tipo de material.

Para la tercera etapa de desarrollo del proyecto se espera obtener el diseño de una prótesis de miembro superior actuada por medio de señales mioeléctricas y de voz, capaz de auto programarse para realizar actividades tanto de precisión como de fuerza. Esta prótesis será capaz de realizar las acciones de una prótesis mioeléctrica comercial, además de contar con movimientos separados en cuatro dedos, con lo cual tendrá una capacidad de actividades de precisión mayor. El socket con el cual se inserta la prótesis al muñón será auto ajustable para adaptarse a los cambios de dimensión que con el tiempo sufre el muñón.

Actualmente el proyecto se encuentra en la parte final de la primera etapa. Hasta el año 2006, se han desarrollado o se están desarrollando doce tesis de licenciatura y postgrado relacionadas con el proyecto. Estas tesis tienen los siguientes títulos:

Tesis terminadas:

"DISPOSITIVO PARA MANIPULACIÓN DIESTRA ROBOHAND", UPIITA, Instituto Politécnico Nacional, 2005

"ERGONOMÍA DE MIEMBRO SUPERIOR", Facultad de Ingeniería, UNAM., 2005

“DISEÑO, FABRICACIÓN Y PRUEBAS DE UN PROTOTIPO DE MANO PARA UNA PRÓTESIS DE MIEMBRO SUPERIOR”, Facultad de Ingeniería, UNAM., 2005

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BRAZO MECÁNICO APLICADO EN LA INVESTIGACIÓN DE PRÓTESIS”, UPIITA, Instituto Politécnico Nacional, 2003

“DISEÑO DE UN SOCKET AUTOAJUSTABLE PARA PRÓTESIS”, Facultad de Ingeniería, UNAM., 2006

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE SEÑALES MIOELÉCTRICAS”, Facultad de Ingeniería, UNAM., 2006

Tesis en desarrollo:

“DISEÑO DE UNA MANO MECATRÓNICA”

“DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE PRÓTESIS DE MIEMBRO SUPERIOR UTILIZANDO MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA”

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE BRAZO MECATRÓNICO”

“PROTOTIPO DE PRÓTESIS MECATRÓNICA DE MANO Y ANTEBRAZO”

“CONTROL DE UNA PRÓTESIS DE MIEMBRO SUPERIOR MEDIANTE LA VOZ UTILIZANDO UN DSP”

“DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE MIEMBRO SUPERIOR MECATRÓNICA”

En este trabajo de tesis se pretende desarrollar un nuevo prototipo de prótesis de antebrazo y mano para culminar con la primera etapa de este proyecto. La intención es utilizar aprendizajes que se hayan adquirido en los proyectos anteriores, y basándonos en ellos, proponer nuevas ideas que puedan enriquecerlo. Es por esto que varias de las tesis anteriores se citarán a lo largo del presente texto.

2.- PROBLEMA

A lo largo de toda la historia, algunas personas han sufrido la pérdida de alguna de sus extremidades ya sea por accidentes o por malformaciones genéticas. En cualquiera de los casos, la sustitución de dicho miembro por medio de prótesis siempre ha revestido un especial interés entre la comunidad científica de la época. Lógicamente, con el avance de la ciencia y la tecnología, en épocas recientes se ha presentado un avance excepcional. Otro factor importante que impulsó el desarrollo de estas prótesis fue la gran cantidad de mutilados y discapacitados que dejaron la segunda guerra mundial y las guerras de la segunda mitad del siglo veinte.

En nuestro país habita un gran número de gente carente de una o más extremidades debido principalmente a accidentes de trabajo, tránsito y demás descuidos. Muchos de ellos son aun jóvenes y/o económicamente activos por lo que requieren reincorporarse de nueva cuenta a la vida laboral y demás actividades dentro de su comunidad. Es por ello que existe una necesidad de brindar soluciones integrales que les permitan continuar con su vida.

En la actualidad existen varios tipos de prótesis. Sin embargo la mayoría sólo suple algunas de las funciones de un miembro sano, ya sean apariencia, algunos tipos de agarre, ciertos movimientos, etc. Pero ninguna resuelve la mayoría de los problemas en conjunto y de manera integral. Así, las prótesis estéticas son inútiles y las más útiles son antiestéticas.

Por otro lado, aquellas prótesis que más se acercan a un miembro real tanto en funcionalidad como en estética, tienen un costo muy elevado.

Dado lo anterior, existe la necesidad de desarrollar un prototipo que será la base para el desarrollo final de las prótesis alternativas requeridas por el mercado actual.

3.- ANTECEDENTES DE PRÓTESIS

El avance en el diseño de 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.

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.

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. En la búsqueda de mejoras en el año 1400 se fabricó la mano de *alt-Ruppin* 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 móvil. El empleo del hierro para la fabricación de manos era tan recurrente, que hasta *Goethe* da nombre a una de sus obras inspirado en el caballero germano *Götz von Berlichingen*, por su mano de hierro.



Ilustración 1 Mano de Hierro Götz von Berlichingen

No es sino hasta el siglo XVI, que el diseño del mecanismo de las prótesis de miembro superior se ve mejorado considerablemente, 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, los dedos podían abrirse o cerrarse presionando o traccionando, además de que tenía 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. *Paré* también propuso 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.

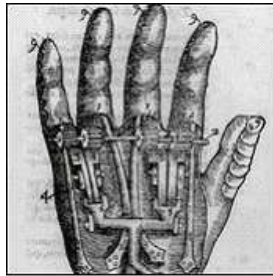


Ilustración 2 Le Petite Loraine

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 y para la sujeción. Entre las innovaciones más importantes al diseño de las prótesis de miembro superior, se encuentra la del alemán *Peter Beil*. 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. Otra modificación importante en el diseño de prótesis de miembro superior, fue la del escultor holandés *Van Petersen*, que logra el movimiento de flexo-extensión a nivel de codo con el sistema de autopropulsión. 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*.

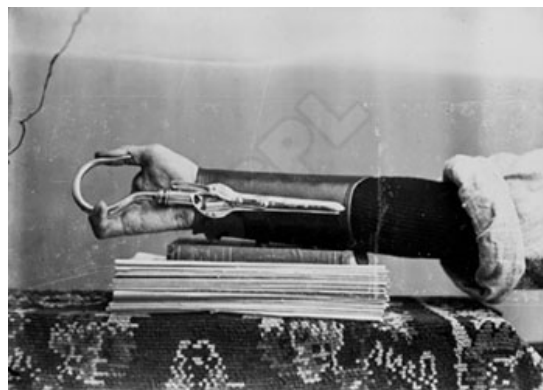


Ilustración 3 Brazo del tipo Conde Beafort

3.1 Diseño de Prótesis en el Siglo XX

Para el siglo XX, el objetivo de que los amputados regresaran a su vida laboral, es alcanzado gracias a los esfuerzos del médico francés *Gripoulleau*, 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.

En el año de 1912 Dorrance en Estados Unidos desarrolló el *Hook*, una unidad terminal que se puede abrir y cerrar activamente mediante movimientos de la cintura escapular y cerrar 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. Cinco años más tarde en Estados Unidos se fundó la "*American Limb Makers Association*", lo que produjo una revolución en los materiales empleados para la construcción de prótesis, volviéndose estos más ligeros y dúctiles. En esta época se generaliza la utilización de fibras sintéticas, polímeros y aleaciones de aluminio.

El origen de las prótesis activadas por los músculos del muñón se da en Alemania gracias a *Sauerbruch*, el cual logra idear cómo 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.

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. Uno de los sistemas protésicos de propulsión asistida es el neumático, el cual fue empleado de manera recurrente durante la crisis de dismelia en Alemania en 1962. Ésta brindaba la opción de que el paciente mantuviera la función táctil activa, gracias a las prótesis de terminal abierto, el cual es un sistema de fijación en el que el muñón asoma por el final de la prótesis.

Las prótesis con mando mioeléctrico comienzan a surgir en el año de 1960 en Rusia. Esta opción protésica funciona con pequeños potenciales extraídos durante la contracción de las masas musculares del muñón, siendo estos conducidos y amplificados para obtener el movimiento de la misma. En sus inicios, este tipo de prótesis sólo era colocada para amputados de antebrazo, logrando una fuerza prensora de dos kilos.

En 1962 surgen las prótesis de esqueleto cilíndrico, las cuales poseen un armazón formado por tubos metálicos o de diferentes materiales sintéticos, cubiertos de una sustancia esponjosa, logrando así una apariencia más cercana a la de un brazo sano. Esta prótesis se desarrolló en la Universidad de Münster, Alemania.

3.2 Investigaciones recientes en diseño de manos

La mano de *Canterbury*, desarrollada en 2003, utiliza eslabones mecánicos movidos directamente para actuar los dedos en forma similar a la mano humana. El movimiento directo de los eslabones se utiliza para reducir los problemas que presentan otros diseños de manos. Cada dedo de esta mano tiene 2.25 grados de libertad, la parte fraccionaria se debe al mecanismo para extender los dedos que es compartido por cuatro dedos.

Los dedos cuentan con sensores de presión en cada articulación y en la punta de los dedos, lo que hace que cada dedo tenga cuatro sensores de presión, dos motores de corriente directa, dos encoders y un sensor de efecto Hall. El pulgar tiene solo un motor y tres sensores de fuerza, mientras que la palma tiene las funciones de abrir todos los dedos y la rotación del pulgar, lo cual implica dos motores, dos encoders, dos sensores de efecto Hall y tres sensores de fuerza. Todo esto da un total de 91 cables, por lo que se requirió un sistema de control distribuido utilizando un PSoC (Partial State of Charge) de Semiconductores Cypress. Este microprocesador actualmente solo es capaz de controlar la posición y velocidad, mientras que la cinemática y comandos complejos se calculan en una computadora.

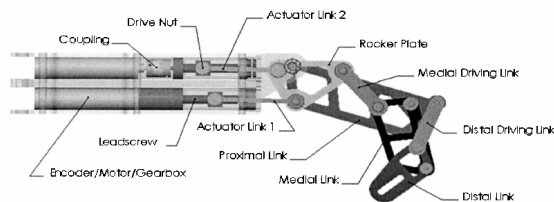


Ilustración 4 Mano de Canterbury

El manipulador desarrollado en 2003 en la Universidad de Reading, Inglaterra propone el uso de cables Bowden (chicotes) dirigidos a cada unión como el medio para actuar los dedos. Este diseño simplifica el control de la mano al eliminar el acoplamiento entre juntas y permite la traslación directa y precisa entre las juntas y los motores que mueven los cables. La cinemática de los dedos se simula con mayor precisión al permitir dos grados de libertad con el mismo centro de rotación en el nudillo más grande de la mano. Esta mano incluye sensores en las yemas de los dedos para incrementar la precisión en la sujeción.

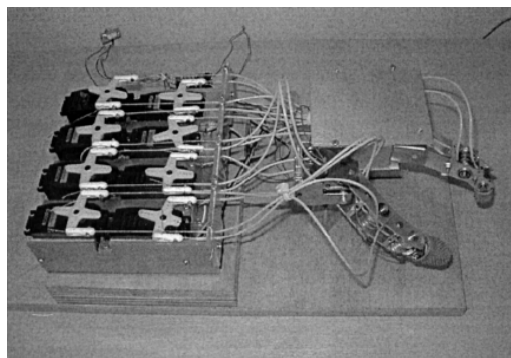


Ilustración 5 Prototipo de la Universidad de Reading

El manipulador antropomórfico teleoperado (MAT) diseñado en el departamento de ingeniería mecatrónica de la Facultad de Ingeniería cuenta con once grados de libertad, de los cuales cuatro están en el pulgar y tres en cada uno de sus otros tres dedos. Esta mano fue diseñada para teleoperación y no para una prótesis,

pero los principios utilizados se pueden extender al diseño de prótesis. La actuación de cada uno de los grados de libertad se realiza por medio de cables que funcionan como tendones, conectados a servomotores que no están montados sobre la mano, sino en un banco de actuadores.



Ilustración 6 Manipulador Antropomórfico Teleoperado diseñado en la UNAM

Actualmente las funciones de las prótesis de mano están limitadas al cierre y apertura, la diferencia entre éstas radican en el tipo de control que emplean. Entre los países con mayor avance tecnológico e investigación sobre prótesis, se encuentran Alemania, Estados Unidos, Francia, Inglaterra y Japón.

3.3 La función de la mano

La mano realiza principalmente dos funciones; la prensión y el tacto. El sentido del tacto desarrolla totalmente la capacidad de la mano. Sin éste nos sería imposible medir la fuerza prensora. Es importante mencionar que el dedo pulgar representa el miembro más importante de la mano, sin éste la capacidad de la mano se reduce hasta en un 40%.

Los principales tipos de prensión de la mano son de suma importancia, ya que la prótesis deberá ser diseñada para cumplirlos. Existen cuatro formas básicas de prensión de la mano, que combinadas cumplen con todos los movimientos realizados por ésta. Dichas formas de prensión son: prensión en pinza fina con la punta de los dedos, prensión en puño, gruesa o en superficie, prensión en gancho y prensión en llave.

3.4 Sistemas Protésicos

Toda prótesis artificial activa necesita una fuente de energía de donde tomar su fuerza; un sistema de transmisión de esta fuerza; un sistema de mando o acción y un dispositivo prensor. En la elección de las prótesis a utilizar desempeña un papel trascendental el nivel de amputación o el tipo de displasia de que se trate.

Las prótesis de propulsión asistida se utilizan cuando el paciente no tiene la fuerza necesaria para manejar una prótesis de propulsión muscular o cuando la energía necesaria para su manejo no guarda relación con la función desempeñada por la prótesis.

Prótesis Cosméticas. Son denominadas también prótesis pasivas, dado que solo cubren el aspecto estético, de donde toman su nombre. Para las prótesis cosméticas se emplean de manera recurrente tres materiales: PVC rígido, látex flexible o silicona. Estos materiales se caracterizan por ser más livianos y requieren menos mantenimiento porque tienen menos piezas móviles que otras opciones protésicas.

Prótesis Mecánicas. Las manos mecánicas son dispositivos que se utilizan con la función de apertura o cierre voluntario por medio de un arnés el cual se sujeta alrededor de los hombros, parte del pecho y parte del brazo controlado por el usuario. Su funcionamiento se basa en la extensión de una liga por medio del arnés para su apertura o cierre, y el cierre o apertura se efectúa solo con la relajación del músculo respectivamente gracias a un resorte y tener una fuerza de presión o pellizco. Estos elementos se recubren con un guante para dar una apariencia más estética, sin embargo se limita al agarre de objetos relativamente grandes y redondos ya que el guante estorba al querer sujetar objetos pequeños. Los elementos constitutivos de una prótesis mecánica se muestran en la Ilustración 7.

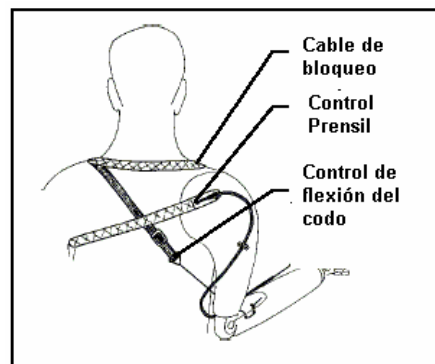


Ilustración 7 Mecanismo de funcionamiento de una prótesis mecánica

El tamaño de la prótesis y el número de ligas que se requiera dependiendo de la fuerza y el material para su fabricación varían de acuerdo a las necesidades de cada persona. Dado que estas prótesis son accionadas por el cuerpo, es necesario que el usuario posea al menos un movimiento general de: expansión del pecho, depresión y elevación del hombro, abducción y aducción escapular y flexión glenohumeral.

Prótesis Eléctricas. Estas prótesis usan motores eléctricos en el dispositivo terminal, muñeca o codo con una batería recargable. Éstas prótesis se controlan de varias formas, ya sea con un servo control, control con botón pulsador o botón con interruptor de arnés. En ciertas ocasiones se combinan éstas formas para su mejor funcionalidad.

Se usa un *socket* que es un dispositivo intermedio entre la prótesis y el muñón logrando la suspensión de éste por una succión. Es más costosa su adquisición y reparación, existiendo otras desventajas evidentes como son el cuidado a la exposición de un medio húmedo y el peso de la prótesis.

Prótesis Neumáticas. Estas prótesis eran accionadas por ácido carbónico comprimido, que proporcionaba una gran cantidad de energía, aunque también presentaba como inconveniente la complicación de sus aparatos accesorios y del riesgo del uso del ácido carbónico.

Prótesis Mioeléctricas. Las prótesis mioeléctricas son prótesis eléctricas controladas por medio de un poder externo mioeléctrico, estas prótesis son hoy en día el tipo de miembro artificial con más alto grado de rehabilitación. Sintetizan el mejor aspecto estético, tienen gran fuerza y velocidad de prensión, así como muchas posibilidades de combinación y ampliación.

El control mioeléctrico es probablemente el esquema de control más popular. Se basa en el concepto de que siempre que un músculo en el cuerpo se contrae o se flexiona, se produce una pequeña señal eléctrica (EMG) que es creada por la interacción química en el cuerpo. Esta señal es muy pequeña (5 a 20 μV) Un micro-voltio es una millonésima parte de un voltio. Para poner esto en perspectiva, una bombilla eléctrica típica usa 110 a 120 voltios, de forma que esta señal es un millón de veces más pequeña que la electricidad requerida para alimentar una bombilla eléctrica.

El uso de sensores llamados electrodos que entran en contacto con la superficie de la piel permite registrar la señal EMG. Una vez registrada, esta señal se amplifica y es procesada después por un controlador que conmuta los motores encendiéndolos y apagándolos en la mano, la muñeca o el codo para producir movimiento y funcionalidad.

Este tipo de prótesis tiene la ventaja de que sólo requieren que el usuario contraiga sus músculos para operarla, a diferencia de las prótesis accionadas por el cuerpo que requieren el movimiento general del cuerpo. Una prótesis controlada en forma mioeléctrica también elimina el arnés de suspensión usando una de las dos siguientes técnicas de suspensión: bloqueo de tejidos blandos-esqueleto o succión. Tienen como desventaja que usan un sistema de batería que requiere mantenimiento para su recarga, descarga, desecharla y reemplazarla eventualmente. Debido al peso del sistema de batería y de los motores eléctricos, las prótesis accionadas por electricidad tienden a ser más pesadas que otras opciones protésicas. Una prótesis accionada por electricidad proporciona un mayor nivel de tecnología, pero a un mayor costo.

Prótesis Híbridas. Una prótesis híbrida combina la acción del cuerpo con el accionamiento por electricidad en una sola prótesis. En su gran mayoría, las prótesis híbridas sirven para individuos que tienen amputaciones o deficiencias transmurales (arriba del codo) Las prótesis híbridas utilizan con frecuencia un codo accionado por el cuerpo y un dispositivo terminal controlado en forma mioeléctrica (gancho o mano).

4.- OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y fabricar un prototipo de prótesis de antebrazo y mano con movimiento controlado de muñeca y cinco dedos.

Objetivos Específicos

- Realizar el diseño y manufactura asistidos por computadora del prototipo.
- Realizar un diseño que se asemeje a un antebrazo y mano humanos.
- Especificar, diseñar e instalar motores y mecanismos para generar los movimientos.
- Diseñar e implementar el control de los movimientos.
- Buscar la mejor forma de operación a través de pruebas físicas del prototipo.
- Lograr la sujeción de objetos reales a través de las diferentes formas de prensión.
- Aportar ideas que pudieran llevar al desarrollo de una prótesis de bajo costo.
- Continuar con la investigación en desarrollo de prótesis inteligente del Departamento de Ingeniería Mecatrónica de la UNAM.
- Tomar como base los modelos realizados anteriormente para la elaboración de un nuevo prototipo.

5.- HIPÓTESIS

Se puede construir por medio de técnicas de diseño y manufactura asistida por computadora un prototipo de prótesis funcional controlada electrónicamente. Ésta debe brindar completa ergonomía y estética. Además, debe ser capaz de reemplazar a los prototipos existentes producto de las investigaciones realizadas dentro del departamento de Ingeniería Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería como una solución alternativa de bajo costo. Todo esto se hará utilizando el conocimiento adquirido en investigaciones anteriores como selección de materiales, sistemas de transmisión y metodologías de diseño para lograr la mejor configuración y poder ejecutar los movimientos fundamentales de sujeción y manipulación de objetos.

6.- DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO

6.1 Funciones

La intención de este dispositivo es sustituir las funciones del brazo y antebrazo. Las principales acciones que debe desempeñar el dispositivo son las básicas de una mano, a saber, agarrar objetos y hacer señales. Las cuatro principales formas de agarrar objetos son las siguientes:



Presión esférica Presión en puño Presión en gancho Presión en llave

Ilustración 1 Funciones de la mano

Además, existen la presión en pinza y la presión en trípode que son variaciones de la presión en puño y esférica, respectivamente. El objetivo de este prototipo es generar todos estos tipos de prensiones.

Por otro lado, las manos también son usadas para comunicarse mediante señales tales como números, saludos o simplemente para apuntar hacia algún lugar u objeto. Este tipo de movimientos también serán generados por el prototipo.

6.2 Clientes potenciales

Cualquier persona que carezca de antebrazo y mano podrá utilizar esta prótesis. Dado que este trabajo es solo un prototipo, las dimensiones ergonómicas que se usarán son las de un adulto mexicano del percentil 95, es decir, del percentil mayor. Este modelo se va a diseñar parametrizado, de manera que en un futuro se pueda hacer una mano izquierda y/o escalarlo a cualquier tamaño. Sin embargo, esto queda fuera del alcance de este proyecto.

6.3 Descripción física

Exterior

Este prototipo consistirá de un antebrazo y una mano. La mano constará de la palma con cinco dedos. La mano irá unida a un antebrazo que tenga movimiento de prono supinación. El antebrazo irá unido a una base para poder hacer dicho movimiento. En un futuro esta articulación deberá realizarse con un “socket” que se adapte al muñón. El diseño de este “socket” sale del alcance de este trabajo.

Interior

Internamente constará de cinco motores, una tarjeta de control, los mecanismos de transmisión del movimiento y todos los circuitos requeridos. Los cinco motores serán utilizados de la siguiente manera. Un motor compartido por el dedo anular y

meñique, un motor para cada uno de los otros tres dedos (pulgar, índice y medio) y un motor para el giro axial de la muñeca respecto del antebrazo (prono supinación).

6.4 Control

La adquisición de señales mioeléctricas sale del alcance de esta tesis por lo que el prototipo actuará en base a señales emitidas desde una computadora a través del puerto paralelo. Las señales serán procesadas por un microcontrolador que a su vez, emitirá señales de control para los cinco diferentes actuadores (motores). Posteriormente, este microcontrolador recibirá la retroalimentación de los sensores de presión y actuará en consecuencia.

6.5 Especificaciones de diseño

Mantenimiento

Este es un prototipo constará con una tapa fácil de desmontar tanto en el antebrazo como en la mano. Por otro lado, cualquier parte del prototipo se podrá desarmar fácilmente con herramienta básica. El objetivo es que no se pierda tiempo en ajustes y correcciones durante los experimentos. Se sugiere que la prótesis comercial selle herméticamente y no sea fácil de desacoplar con herramienta sencilla.

Manufactura y material

Las partes del prototipo se fabricarán mediante el método de prototipos rápidos, utilizando una máquina Dimension SST. El material a utilizarse es el termoplástico industrial ABS debido a su peso y resistencia, al contar con una densidad de 1050 Kg/m^3 y un módulo de Young de 2000 MPa . Con la selección de este material se evitarán algunos de los problemas que presentó el prototipo anterior, permitiendo un mejor uso, fabricación y desempeño del mismo.

Tamaño y peso

Las dimensiones antropomórficas del prototipo serán las del percentil 95 de un adulto mexicano. Dichas dimensiones fueron tomadas del trabajo de tesis "Ergonomía de miembro superior"¹. Aún con estas dimensiones se pretende obtener un peso total menor a 1 kg .

Riesgos potenciales

Debido a que el objetivo del prototipo en un futuro será reemplazar completamente una mano humana, éste se enfrentará a los riesgos naturales de cualquier ser humano con el medio ambiente, como por ejemplo temperaturas extremas, derrames de líquidos, golpes, etc.

¹ Santiago, Valenzuela, "Ergonomía de Miembro Superior", UNAM, 2005

7.- DISEÑO CONCEPTUAL

Una vez establecidas las especificaciones de diseño, se procede a la etapa de diseño conceptual. En esta fase se plantean soluciones a los problemas presentados en las especificaciones. Al final de esta fase se pretende tener un bosquejo general del producto que realice las funciones necesarias para dar servicio al usuario final. Para su realización se dividirán las especificaciones en los diferentes sistemas para lograr un mejor desarrollo de los mismos. Los sistemas que se tratan en esta sección son: control, potencia, mecanismos, instrumentación y fijación.

7.1 Control

Función

El sistema de control debe:

- Recibir las señales de entrada del tablero o computadora, así como de los diferentes sensores
- Procesar las señales
- Enviar las señales correspondientes a los diferentes motores o actuadores

El sistema de control es el responsable de recibir las órdenes del usuario, procesarlas, tomar decisiones de acuerdo a un programa y enviar las señales a los diferentes actuadores. Para este caso, en el que sólo habrá cinco motores, se propone un sistema de control con siete entradas y cinco salidas. Dada esta cantidad de entradas y salidas, y que el programa es sencillo, se pueden utilizar microcontroladores pequeños que son fundamentales por las restricciones de espacio y peso.

Descripción de las diferentes opciones

Controlador

- PIC
 - Familia de microcontroladores fabricados por Microchip divididos en categorías de 8 o 16 bits. Son capaces de almacenar información en memoria, manejar puertos, tener comunicación serial y paralela, y cuentan con múltiples capacidades de conversión de datos análogos a digitales
- GAL
 - Lógica de arreglos genéricos, por sus siglas en inglés (*Generic Array Logic*). Es un dispositivo fabricado por Lattice dentro de la familia de dispositivos E²CMOS PLD (combinación de procesos de alta velocidad con el menor requerimiento de voltaje con la habilidad de borrado electrónico) brindando rápidas soluciones a problemas críticos de sistemas lógicos. Estos dispositivos carecen de comunicación serial y paralela integrada, así como de convertidores analógico digital

- Memoria
 - Dispositivos fabricados por múltiples fabricantes clasificados por diferentes familias, con diferentes capacidades y velocidades de respuesta capaces de almacenar información y repetir un valor asignado. Carecen de comunicación serial y paralela, así como de convertidores analógico digital.

Tarjeta

- Usos múltiples

Esta tarjeta es muy útil como un instrumento para pruebas y experimentos ya que es muy versátil y permite explotar al máximo las diferentes funciones del microprocesador PIC. Esta tarjeta fue diseñada en el Departamento de Ingeniería Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería para fines didácticos y su uso es muy sencillo y amigable. La tarjeta mide 10 x 6 cm. lo cual es una limitante por el tamaño que ocupa, pero se espera que las nuevas versiones de ésta sean más pequeñas

- Específica

Esta tarjeta se tiene que diseñar para satisfacer las necesidades específicas del proyecto. El resultado es un elemento más compacto pero menos versátil. Esta opción requiere una inversión considerable de tiempo en su diseño, además de las pruebas para su correcto funcionamiento. El tamaño de la tarjeta se puede diseñar de acuerdo a los requerimientos de espacio.

Elección y justificación

Como este es un prototipo de pruebas, es importante tener flexibilidad en los componentes para poder hacer cambios o modificaciones sobre la marcha. Por otro lado, es necesario tener un controlador que sea fácil y rápido de programar y conectar. Por estos motivos, se optó por la tarjeta de usos múltiples con el microcontrolador PIC16F877. Esta tarjeta ya ha sido probada en otros proyectos y evitará la inversión de tiempo que hubiera sido necesario para diseñar y probar una nueva tarjeta, lo cual sale del alcance de este proyecto.

Los dispositivos electrónicos GAL y Memoria, fueron descartados como opciones dado que todas sus funciones pueden ser realizadas por un microcontrolador y no presentan ninguna ventaja frente a éste aparte del precio que, como se ha establecido, no se está tomando en cuenta para este proyecto experimental.

Debido a que esta tarjeta es grande, requeriría un diseño de la prótesis que se adaptara a ella. Por otro lado, dado que es un prototipo, es necesario tener un buen acceso a la tarjeta para hacer todas las pruebas y ajustes. Por estos motivos se decidió dejar todo el control fuera de la prótesis y únicamente alojar en ella los motores y cables.

7.2 Potencia

Función

El sistema de potencia es el encargado de generar el movimiento de las diferentes partes móviles respondiendo a las señales que envía el sistema de control. Debe ser confiable y tener la potencia requerida para tal efecto. Consta de:

- 4 motores para dedos
- 1 motor para antebrazo

Descripción de las diferentes opciones

Motores

- Servomotores

Estos motores tienen una gran precisión y se pueden controlar fácilmente. No requieren de otros elementos para verificar su posición, contrario a uno de corriente directa o de pulsos. Tienen movimientos suaves. El servomotor se alimenta con una señal a base de pulsos. Si se varía el ancho de pulso, el motor cambia de posición. Para cada ancho de pulso entre dos valores dados, existe una posición del servomotor. Esto es lo que los hace muy fáciles de controlar. Por ejemplo, en la Ilustración 2 Gráfica de pulsos para motores a pasos se muestran las gráficas de tres señales de pulsos con diferentes anchos. Cada una de ellas corresponde a un porcentaje de giro del motor. Estos motores sólo giran 180°.

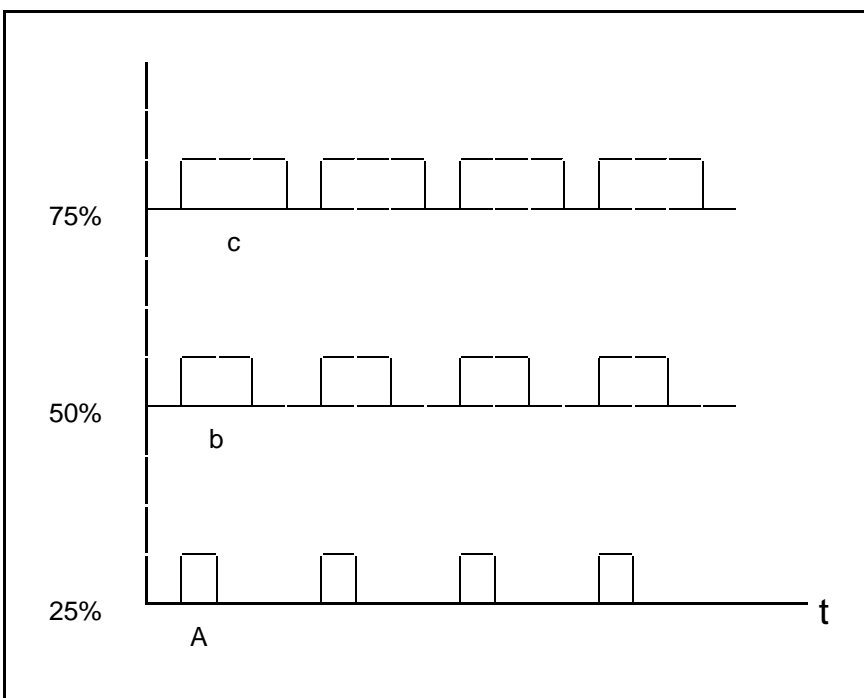


Ilustración 2 Gráfica de pulsos para motores a pasos

- Motores de pasos

En estos motores se conoce la posición a la perfección. Su funcionamiento consiste en dos o más bobinas que se energizan con diferentes combinaciones para hacer girar la flecha del motor. Por este motivo se le conoce como motor a pasos, y tiene un desplazamiento mínimo que no se puede reducir.

Estos motores tienen imanes permanentes sujetos al rotor (Ilustración 3) y un cierto número de bobinas excitadoras embobinadas en su estator (Ilustración 4). Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) deber ser externamente manejada por un controlador.



Ilustración 3 Imagen del rotor

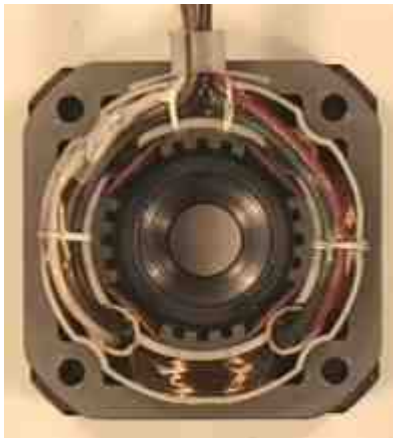


Ilustración 4 Imagen de un estator de 4 bobinas

Existen dos tipos de motores de pasos de imán permanente:

1. Bipolar: Estos tienen generalmente cuatro cables de salida (ver Ilustración 5). Necesitan cierta secuencia para ser controlados, debido a que requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento.
2. Unipolar: Estos motores suelen tener 5 o 6 cables de salida, dependiendo de su conexión interna (ver Ilustración 6). Funcionan como si tuvieran cuatro bobinas en vez de dos, lo que los hace más versátiles.

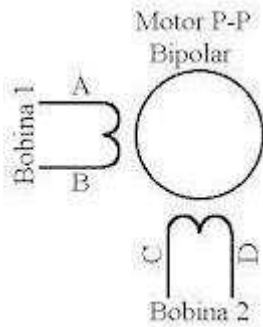


Ilustración 5 Motor bipolar

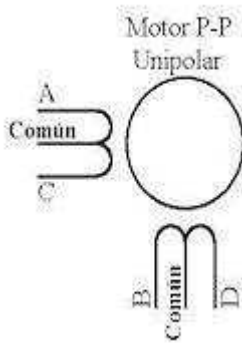


Ilustración 6 Motor unipolar

- Motor de corriente directa

Este motor tiene movimientos suaves y una gran potencia. No se puede conocer su posición directamente, por lo que requiere un sensor (encoder) para controlarlo.

Para funcionar, el motor de corriente directa consta de dos circuitos eléctricos distintos: el circuito de campo magnético y el circuito de la armadura.

El campo magnético generalmente es generado por un imán o un electroimán. Su función es permitir la transformación de energía eléctrica recibida por la armadura en energía mecánica entregada a través del eje. La energía eléctrica que recibe el campo se consume totalmente en la resistencia externa con la cual se regula la corriente del campo magnético. Es decir ninguna parte de la energía eléctrica recibida por el circuito del campo, es transformada en energía mecánica. El campo magnético actúa como una especie de catalizador que permite la transformación de energía en la armadura.

La armadura consiste de un grupo de embobinados alojados en el rotor y en un ingenioso dispositivo denominado colector mediante el cual se recibe corriente continua desde una fuente exterior y se convierte la correspondiente energía eléctrica en energía mecánica que se entrega a través del eje del motor.



Ilustración 7 Motor de corriente directa

Elección y justificación

El motor de corriente directa se eliminó en entrada por la dificultad para controlarlo. Esto redujo la selección a un servomotor o un motor de pasos. Sin embargo, dado que el movimiento del motor de pasos no es suave, se eligió utilizar un servomotor. Con este tipo de motor se podrá tener un mejor control y movimientos más suaves, parecidos a los de una mano real.

Las dimensiones de la mano imponen limitaciones de espacio, ya que se tienen que meter cuatro motores en la palma. Además, dado que en un futuro alguna persona va a portar la prótesis, se debe cuidar el peso. Por este motivo se escogieron motores comerciales conocidos como “nano-servos” que son muy pequeños y de muy bajo peso.

7.3 Mecanismos

Función

Los mecanismos instalados son los responsables de transmitir el movimiento generado por los motores a las diferentes partes móviles del prototipo.

Descripción de las diferentes opciones

- Banda/polea

Este sistema es buen transmisor de fuerza pero no de precisión dado que puede haber deslizamientos entra la banda y las poleas. Para evitar este deslizamiento, se pueden usar bandas dentadas.



Ilustración 8 Bandas de transmisión

- Cadena/estrella

Con estos sistemas se pueden transmitir adecuadamente tanto la fuerza como la precisión. Sin embargo es fácil que sufran desgaste tanto en la cadena como en las estrellas, lo que disminuye su precisión. Uno de sus puntos en contra es que pueden ser muy ruidosos y pesados.



Ilustración 9 Cadena de transmisión

- Engranés

La precisión de este sistema de transmisión es muy buena, sin embargo requiere de una gran precisión al momento de montarse. Sufren desgaste con el paso del tiempo lo que afecta su precisión y aumenta el ruido que generan.



Ilustración 10 Engranés

- 4 Barras

Este sistema también puede ser bueno en la transmisión de fuerza, aunque depende mucho de los materiales de los que estén hechas las barras. Además, requiere un muy buen diseño y precisión en la instalación para optimizar la transmisión de la fuerza y evitar auto-bloqueos en los puntos singulares.

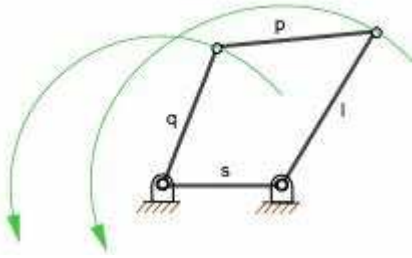


Ilustración 11 Mecanismo de cuatro barras

- Tendones unidireccionales

Por medio de este sistema no se puede transmitir muy bien la fuerza pero tiene una gran precisión y muy poco peso. Sin embargo, la transmisión es unidireccional, lo que implica que para poder regresar a una posición original se deben instalar resortes. Por lo tanto, para mantener una posición, los motores se deben mantener energizados, con el consecuente consumo de energía. Por otro lado, existe el riesgo de vencimiento de los resortes, lo que afectaría la precisión del motor.

- Tendones flexibles “Flexible Push Roads”

Este tipo de tendones está formado por dos piezas, (una cubierta externa y un tendón interno) ambos flexibles. Con dichos tendones se pueden obtener un movimiento lineal en ambas direcciones (empujar y jalar) con un solo dispositivo.

Este sistema permite un mejor desplazamiento en espacios pequeños con muy poco peso. Su uso es primordialmente dentro de la industria del aeromodelismo debido a su buena operación y su ligereza.



Ilustración 12 Tendones

- Pistones

Estos sistemas son muy buenos transmisores de fuerza pero son difíciles de controlar con precisión. Otro problema que pueden presentar es la fuga de su fluido de transmisión. Por otro lado requieren de un generador de aire comprimido o compresor y de mangueras que transporten dicho aire para generar el movimiento.



Ilustración 13 Pistón neumático

Elección y justificación

Para la elección del mejor mecanismo a utilizar, se evaluaron las siguientes características de las opciones antes mencionadas. Se presentan en orden de importancia para este caso específico:

- Espacio
- Confiabilidad
- Implementación
- Requerimientos adicionales
- Peso
- Fuerza
- Precisión
- Desgaste

El análisis se hizo a través de una matriz de decisión, primero tomando en cuenta estas 8 variables y luego se agregaron dos variables más que no son de mayor importancia dado que es un modelo experimental pero que se deberán tomar en cuenta en caso de que se pretenda comercializar este prototipo. Éstas son:

- Disponibilidad
- Costo

En ambos análisis (con y sin las variables de disponibilidad y costo) los mecanismos de transmisión mejor evaluados resultaron los engranes y los de banda o cadena.

		Cualidades										Promedio ponderado	
		5	4	4	3	2	2	2	1	1	1	Promedio total	Promedio Experimental
Mecanismos	Valor	Espacio	Confiabilidad	Implementación	Disponibilidad	Requerimientos Adicionales	Peso	Fuerza	Presición	Desgaste	Costo		
		4 barras	2	5	2	3	4	3	3	5	5	2	7.90
	Tendones	5	1	4	4	1	5	2	2	3	4	8.20	8.25
	Banda/Cadena	4	3	3	4	4	3	3	3	2	4	8.50	8.63
	Engranés	3	4	3	4	4	3	4	4	3	4	8.80	9.00
	Pistones	1	3	1	1	2	1	5	1	3	1	4.50	5.13

Matriz 1

La conclusión de esta matriz es que los mejores tipos de mecanismos serían un tendón, una banda o cadena, o bien, engranes.

Posteriormente se hizo una segunda matriz de decisión más específica tomando en cuenta las mismas variables pero con las diferentes opciones de engranes, bandas y cadenas. Las opciones que se evaluaron fueron las siguientes:

- Tendón unidireccional
- Tendón flexible
- Banda lisa
- Banda dentada
- Cadena
- Engrane recto
- Engrane helicoidal
- Sinfín-corona
- Engranés cónicos

En este caso, la banda dentada y los engranes tanto recto como cónico resultaron con mejor puntuación.

		Cualidades										Promedio ponderado	Promedio Experimental
		5	4	4	3	2	2	2	1	1	1		
Valor		Espacio	Confiabilidad	Implementación	Disponibilidad	Requerimientos Adicionales	Peso	Fuerza	Precisión	Desgaste	Costo		
Tendones, engranes, bandas, cadenas	Tendón unidireccional	5	2	2	5	1	5	1	2	5	5	8.20	7.75
	Tendón flexible	4	4	2	4	4	4	4	2	2	2	8.60	9.00
	Banda Lisa	4	1	5	5	3	5	1	1	1	5	8.40	8.00
	Banda Dentada	4	3	5	3	3	4	2	3	2	1	8.50	9.38
	Cadena	4	3	3	1	3	1	3	2	2	1	6.60	7.75
	Engrane Recto	2.5	3	4	4	4	3	3	4	3	4	8.35	8.44
	Engrane Helicoidal	2.5	4	4	2	4	3	4	5	3	4	8.45	9.31
	Sinfín-corona	2	5	2	2	2	2	5	5	4	3	7.40	8.13
	Engranes cónicos	2	3	1	2	2	2	3	4	5	3	5.80	6.13

Matriz 2

La conclusión de esta segunda matriz es que los mejores mecanismos para este prototipo serían los tendones flexibles. Por este motivo se escogió este mecanismo para el prototipo.

7.4 Instrumentación

Función

El sistema de instrumentación es el responsable de obtener la información del entorno a través de sensores para dar una retroalimentación al sistema y que éste pueda actuar en consecuencia.

Descripción de las diferentes opciones

- Sensor de posición

Sirve para conocer la posición exacta de cada uno de los motores.

- Sensor de tope

Sirve para saber el momento exacto en que el mecanismo llega a la posición final. Su desventaja es que mientras el mecanismo no llegue ahí, no se puede saber su posición exacta.

- Sensor de presión

Sirve para medir qué tanta fuerza se le aplica a cierto punto.

Elección y justificación

Dado que se escogieron servomotores para generar el movimiento, el sensor de posición no es necesario. Sin embargo, un sensor de presión es una buena ayuda para controlar la fuerza de los mecanismos de los dedos. Este sensor no será instalado en esta prótesis, sin embargo sí se recomienda para futuras mejoras de la misma. La articulación de prono supinación no usará ningún sensor.

7.5 Fijación

Función

El sistema de fijación es la forma en que las diferentes partes del prototipo son unidas unas con otras.

Descripción de las diferentes opciones

- Tornillos

Se usan tornillos y tuercas para fijar los elementos. Para esta opción, todos los elementos deben tener partes de fijación (argollas, soportes, etc.). En este caso, se le deben maquinar dichas partes al chasis del antebrazo y mano para poder fijar lo demás. Tiene la ventaja de que se puede armar y desarmar en cualquier momento. Su desventaja es que no se pueden cambiar las dimensiones o posiciones de los elementos que se van a fijar ya que no coincidirían con los puntos de fijación.

- Pijas

Similar a los tornillos pero las pijas sólo necesitan partes de fijación en una de las partes que se va a unir, ya que la pija entra directamente en el material de la otra parte. En este caso, las pijas se fijarían al material del chasis del antebrazo o mano y los demás elementos (motores, tarjeta, pila, etc.) deben tener partes de fijación. Su ventaja es que se pueden montar y desmontar en cualquier momento además de que se pueden cambiar las dimensiones y/o localizaciones de los dispositivos. Su desventaja es que dañan el material de chasis, al tener que perforarlo.

- Pegamento

Los elementos se fijan unos a otros por medio de pegamento. En este caso se deben considerar los diferentes materiales de las partes, así como la planicidad de las superficies que se van a pegar. La ventaja es que no es necesario agregar elementos de fijación a ningún dispositivo. Sin embargo, es difícil desmontarlos en cualquier momento

- Auto ajustable

El chasis del antebrazo y mano deben tener zonas en donde se fijen los demás elementos con la simple presión. La ventaja es la facilidad de montaje y

desmontaje. La desventaja es que no se pueden modificar las dimensiones y posiciones de los dispositivos. Por otro lado, requieren un maquinado muy preciso y pueden sufrir vencimiento después de cierto tiempo

Elección y justificación

Para este sistema se eligió el uso tanto de pijas como de tornillos y tuercas, debido a la facilidad de montaje y desmontaje, dado que es un prototipo de pruebas. En caso de que se llegue a un dispositivo final que se pueda comercializar y que no vaya a sufrir cambios, se recomienda el uso de pegamentos especiales por su ligereza.

8.- DISEÑO DE DETALLE

A partir de la documentación y modelos generados en el diseño conceptual, se requirió generar el diseño geométrico completo para poder abordar la fase de fabricación.

En esta fase es importante la generación del diseño digital completo que permita dar una fiel idea de cómo será nuestro prototipo. Pasando por el diseño de cada componente, en base a los análisis correspondientes, que nos permite asegurar la fabricación del nuevo prototipo. Para esto dividiremos nuestro sistema en mecánico y electrónico.

8.1 Mecánico

Dentro del sistema mecánico se cubrirán todas las características para permitir la completa realización del prototipo digital que nos permita asegurar su funcionalidad de cada elemento para concluir con la manufactura del mismo

8.1.1 Mecanismos

El mecanismo final implementado para todas las falanges con excepción del pulgar consta de un acomodo de poleas accionadas por el movimiento del servomotor actuador, transmitiendo el movimiento mediante “flexible pushroads” o chicotes flexibles entre las poleas como lo muestra la Ilustración 14.

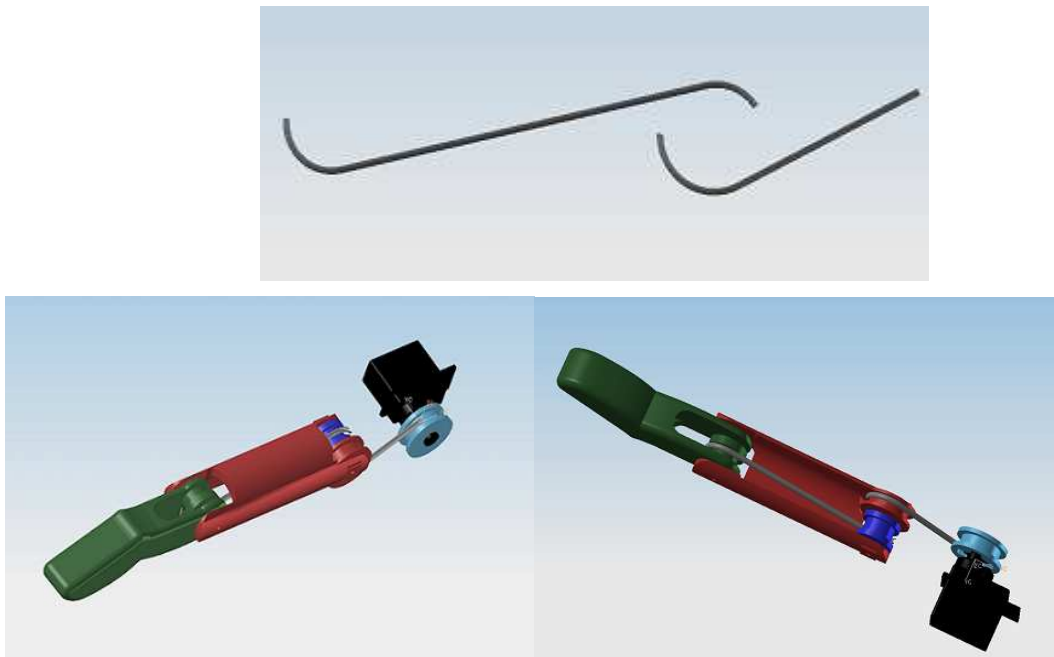


Ilustración 14 Mecanismos de falanges

Este arreglo permite obtener un movimiento en ambos sentidos, debido a que el chicote flexible permite empujar y jalar con la misma configuración.

Para el movimiento del pulgar se implementó un acoplamiento directo al servomotor actuador que se encarga de posicionarlo como se muestra en la Ilustración 15.



Ilustración 15 Mecanismo de pulgar

Finalmente para lograr el movimiento de prono-supinación del antebrazo, se implementó un doble mecanismo formado por una cadena aunada a un sinfín corona (Ilustración 16). La cadena fue utilizada con la finalidad de lograr un óptimo acomodo del servomotor actuador dentro del antebrazo. El mecanismo sinfín corona se utilizó para girar 90° el eje de rotación. Esto nos permite mantener la posición sin que el motor requiera mantenerse energizado. Para asegurar el movimiento de la articulación con mayor carga se utilizará un servomotor de tamaño mediano. El mecanismo completo con el motor se puede observar en la Ilustración 17.



Ilustración 16 Sinfín-corona

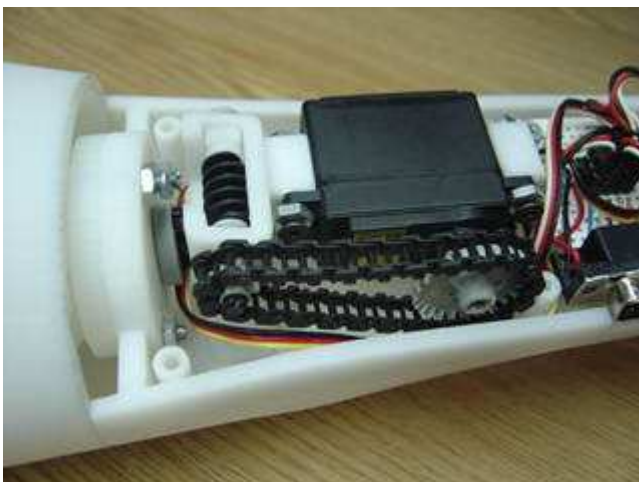


Ilustración 17 Mecanismo de antebrazo

8.1.2 Dimensiones

Como ya se mencionó, para la realización del prototipo se tomaron en cuenta las dimensiones de la mano del percentil 95 de mediciones antropométricas mexicanas, mismas que se muestran en la Tabla 1². Se utilizó el percentil 95 para le realización del prototipo, debido a que fue más sencillo realizar un modelo paramétrico a partir del límite máximo de dimensiones así como facilitar su ensamble.

Magnitud del codo a la muñeca	[cm.]	Anchura del Codo	[cm.]
Máximo	30.37	Máximo	6.61
Circunferencia del antebrazo	[cm.]	Circunferencia de la muñeca	[cm.]
Máximo	35.4	Máximo	19.5
Longitud de la mano	[cm.]	Longitud Palmar	[cm.]
Máximo	196	Máximo	115
Longitud de los dedos	[cm.]	Anchura palmar	[cm.]
Máximo	11.56	Máximo	8.77
Anchura de la mano	[cm.]	Proximal I Dedo pulgar	[cm.]
Máximo	11.19	Máximo	5.13
Proximal II Dedo índice	[cm.]	Proximal III Dedo medio	[cm.]
Máximo	6.02	Máximo	6.56

² Idem

Proximal IV Dedo anular	[cm.]	Proximal V Dedo meñique	[cm.]
Máximo	6.23	Máximo	5.21
Medial II Dedo índice	[cm.]	Medial III Dedo medio	[cm.]
Máximo	3.49	Máximo	4.18
Medial IV Dedo anular	[cm.]	Medial V Dedo meñique	[cm.]
Máximo	3.97	Máximo	3.51
Distal I Dedo pulgar	[cm.]	Distal II Dedo índice	[cm.]
Máximo	2.8	Máximo	2.8
Distal III Dedo medio	[cm.]	Distal IV Dedo anular	[cm.]
Máximo	3.2	Máximo	2.88
Distal V Dedo meñique	[cm.]		
Máximo	2.61		

Tabla 1 Dimensiones de la mano en el percentil 95

8.1.3 Diseño asistido por computadora

Para la realización del diseño del prototipo se realizó un diseño digital paramétrico utilizando el software NX3™.

Para la primera parte se tomó el perfil superior de una mano y antebrazo real para obtener una secuencia de puntos que mediante la adaptación de polinomios permitiera la parametrización del perfil completo. Con este primer diseño se logró un perfil capaz de ajustarse a las dimensiones de cualquier percentil de nuestra base de datos de dimensiones antropométricas como se puede apreciar en la Ilustración 18.

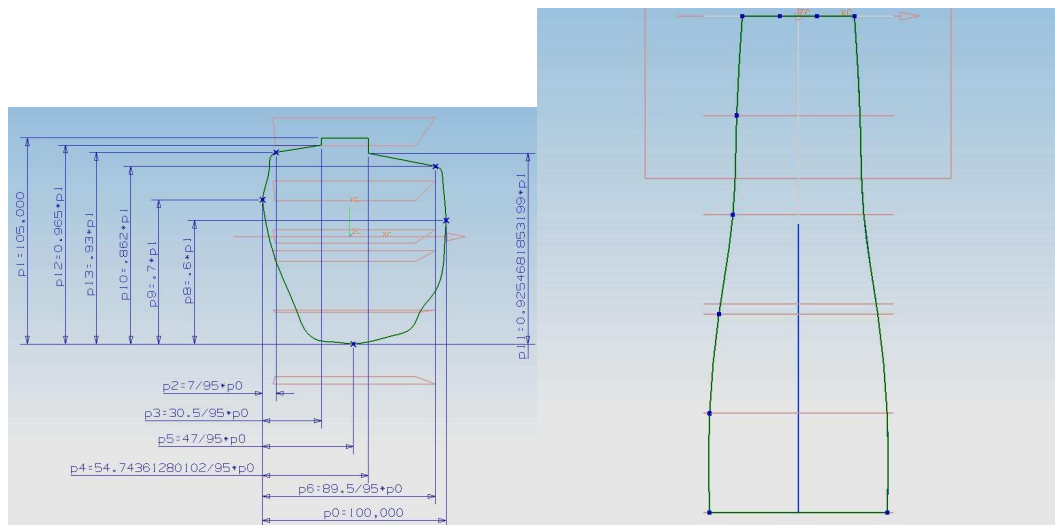


Ilustración 18 Perfiles de palma y antebrazo

A continuación se introdujeron al modelo paramétrico las dimensiones del percentil 95 para continuar con el diseño digital del sólido que conforma la palma y el antebrazo. En esta ocasión se obtuvieron diferentes puntos para conformar perfiles perpendiculares al perfil superior anteriormente logrado como se muestra en la Ilustración 19.

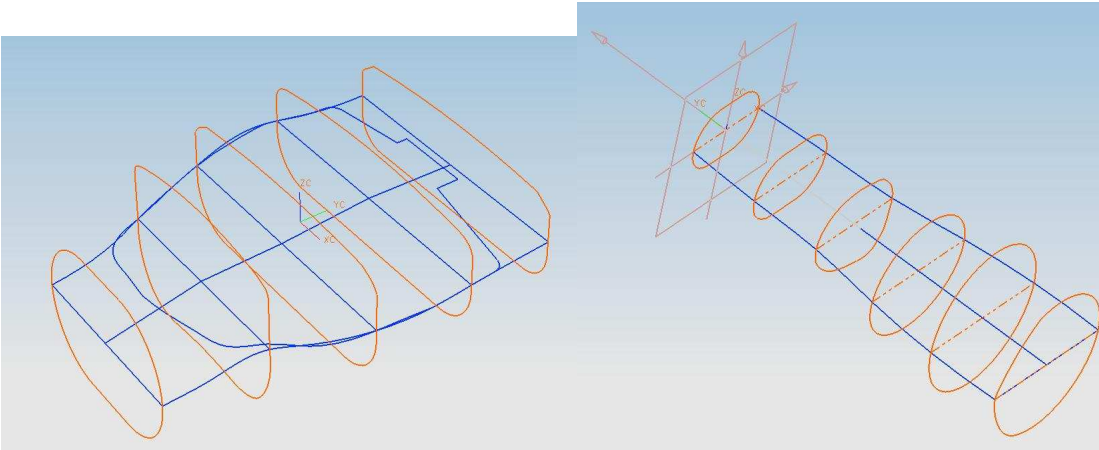


Ilustración 19 Perfiles perpendiculares de palma y antebrazo

Estos puntos se obtuvieron mediante mediciones con un calibrador vernier y posteriormente fueron editados mediante el software para lograr perfiles cerrados que representan diferentes cortes transversales a lo largo de la palma y antebrazo como se puede ver en la Ilustración 20.

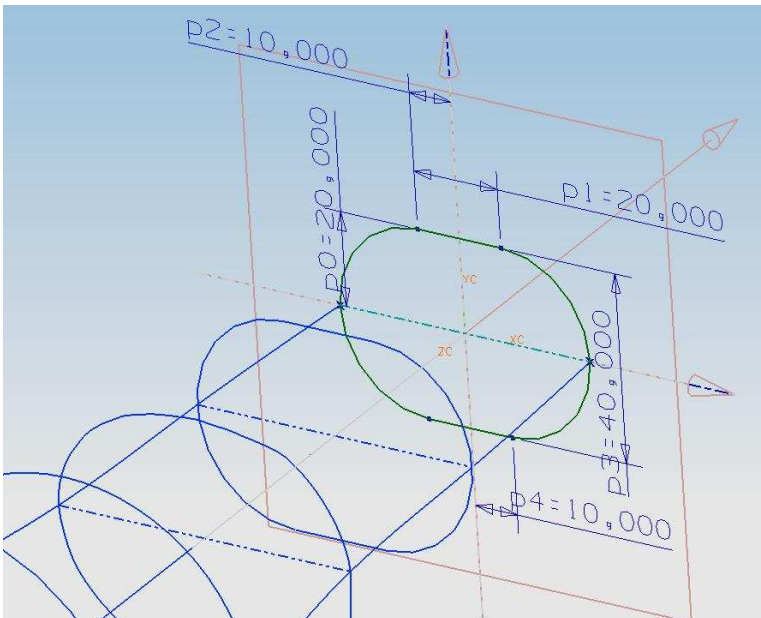


Ilustración 20 Perfiles cerrados de antebrazo

Posteriormente se realizó la operación “swept” o barrido mediante el software para lograr los sólidos que conforman la estructura de la palma y el antebrazo como se muestra en las Ilustración 21 e Ilustración 22.

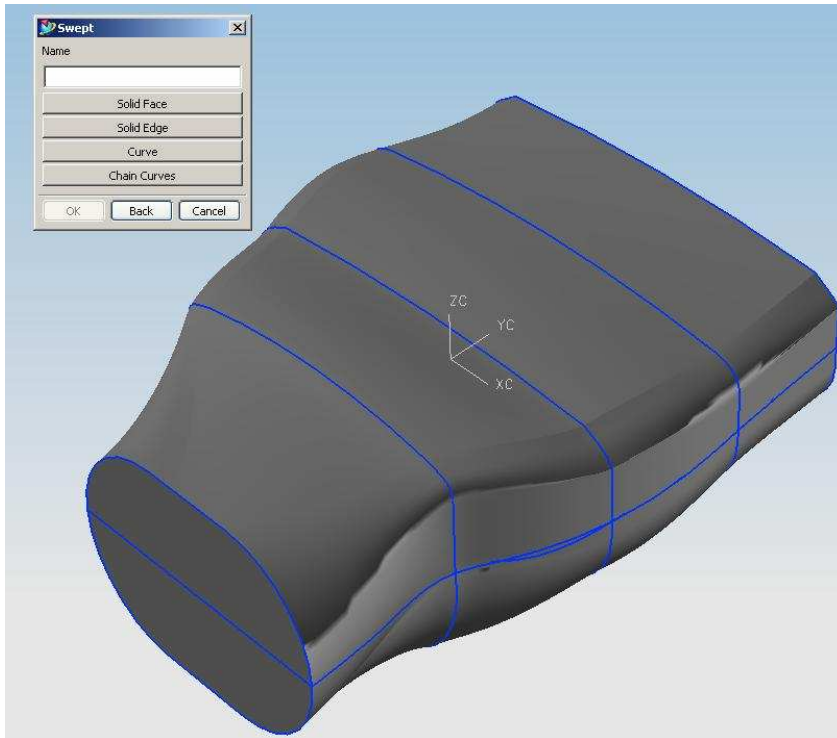


Ilustración 21 Superficie de la palma

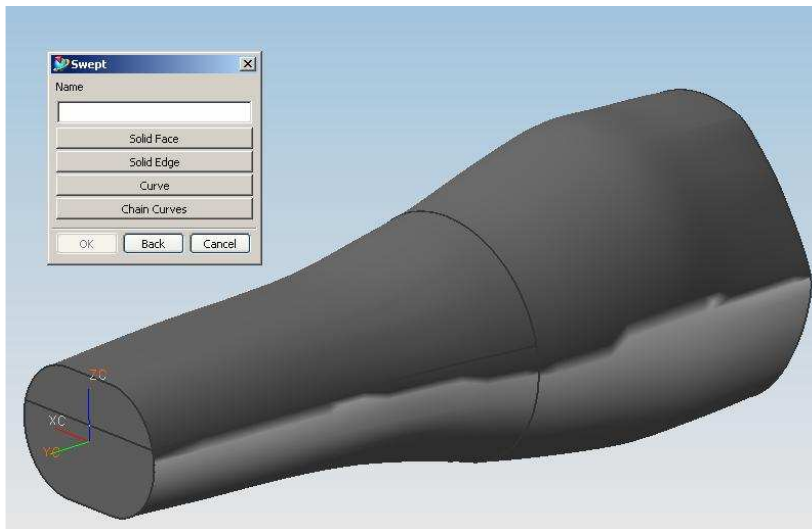


Ilustración 22 Superficie del antebrazo

Estas estructuras fueron seccionadas, la palma en dos partes (superior e inferior, Ilustración 23) y el antebrazo en tres partes (parte de conexión con el socket, y parte superior e inferior, Ilustración 24).

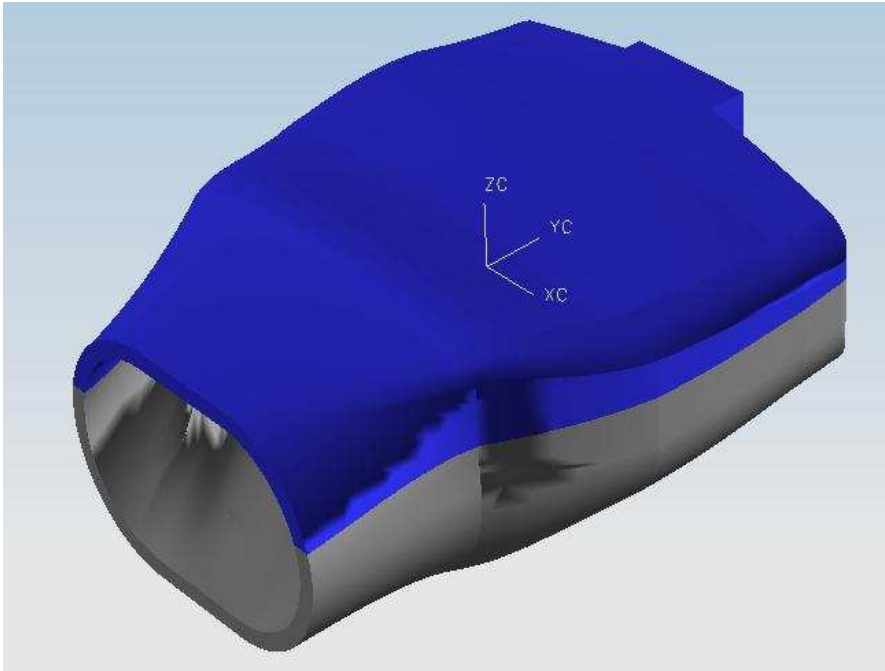


Ilustración 23 Partes de la palma

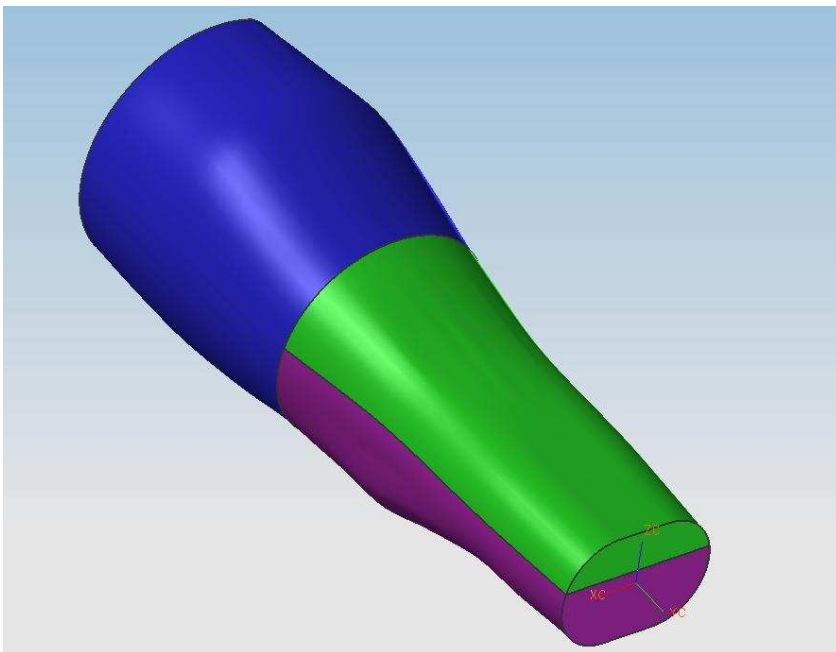


Ilustración 24 Partes del antebrazo

Para la parte de conexión del antebrazo con el muñón se creó una superficie con las características geométricas de un muñón. A ésta se le creó la contraparte

(*socket*) mediante una operación booleana para obtener la geometría deseada como se ve en la Ilustración 25.

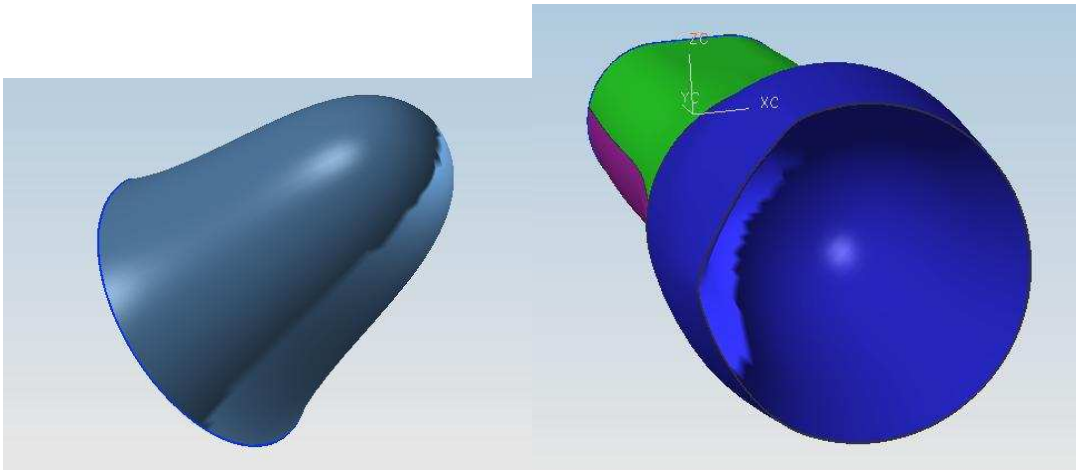


Ilustración 25 Dibujo de muñón y socket

Se continuó con la operación “*hollow*” o vaciado en todas las piezas para obtener las estructuras con el valor de grosor deseado. Valor obtenido por las propiedades mecánicas del material de fabricación.

Continuando con el diseño se implementó un balero para conectar las tres partes del antebrazo permitiendo un grado de libertad para lograr su rotación como se muestra en la Ilustración 26.

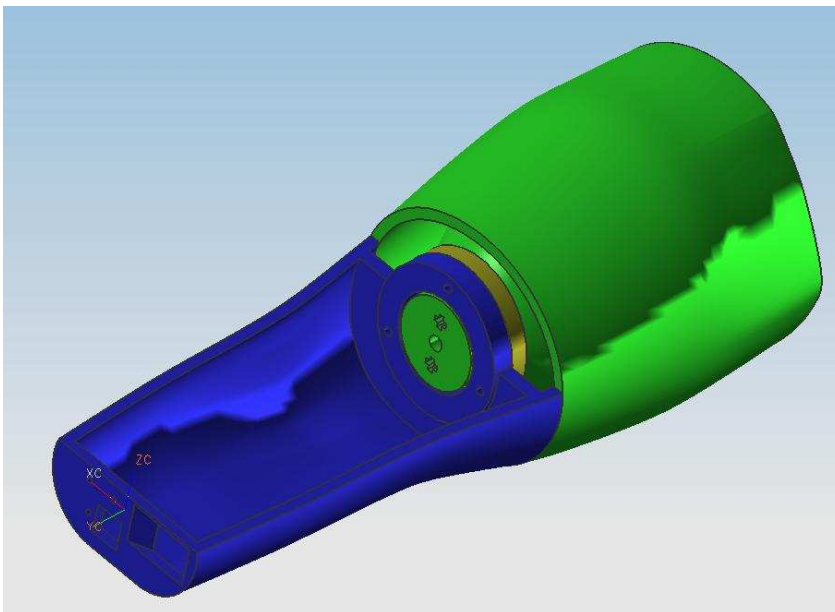


Ilustración 26 Balero de unión entre antebrazo y socket

De los motores seleccionados como actuadores se obtuvieron las dimensiones para lograr el mejor acomodo interno de los mismos dentro de la palma y el antebrazo permitiendo de esta manera la mejor transmisión de movimiento, para los cuales se creó un soporte de fijación para cada uno de ellos como se muestra en la Ilustración 27.

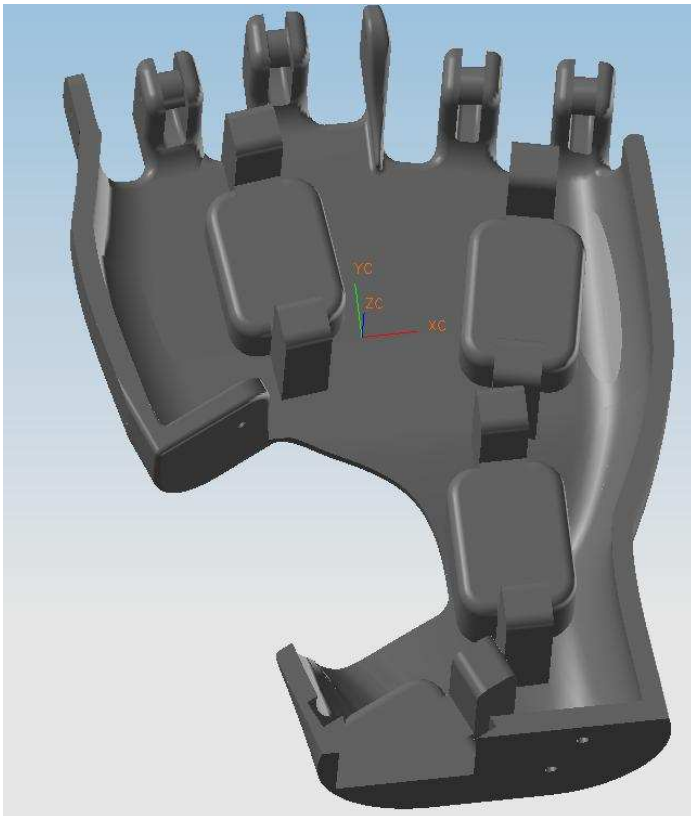


Ilustración 27 Soportes de motores en palma

Para el motor del antebrazo se implementó una base para cumplir con la transmisión seleccionada llegando a la siguiente configuración (ver Ilustración 28).

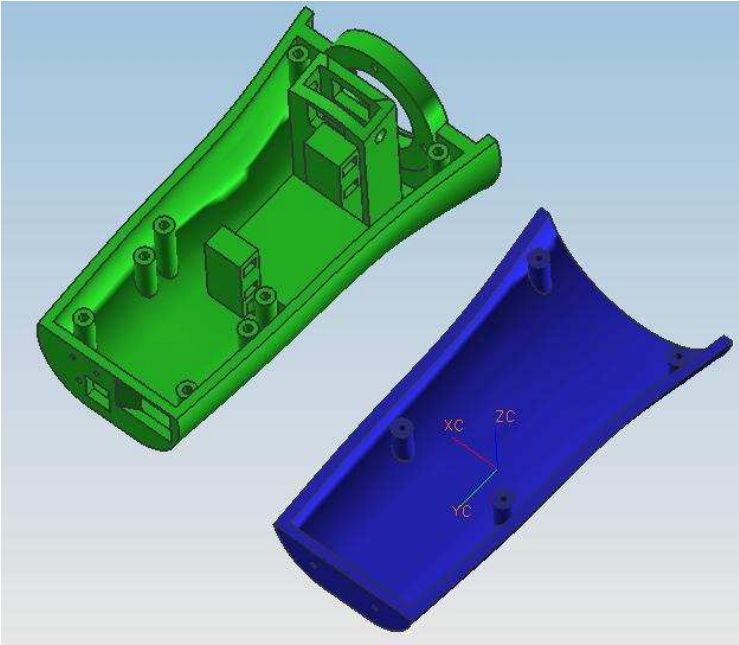


Ilustración 28 Base de motor en antebrazo

En el diseño de los dedos se realizó la misma metodología de imitar los perfiles de los dedos humanos. Para ello se copió el perfil de diferentes dedos reales obteniendo así un diseño paramétrico único para conformar la falange distal y medial en una sola pieza como se muestra en la Ilustración 29.

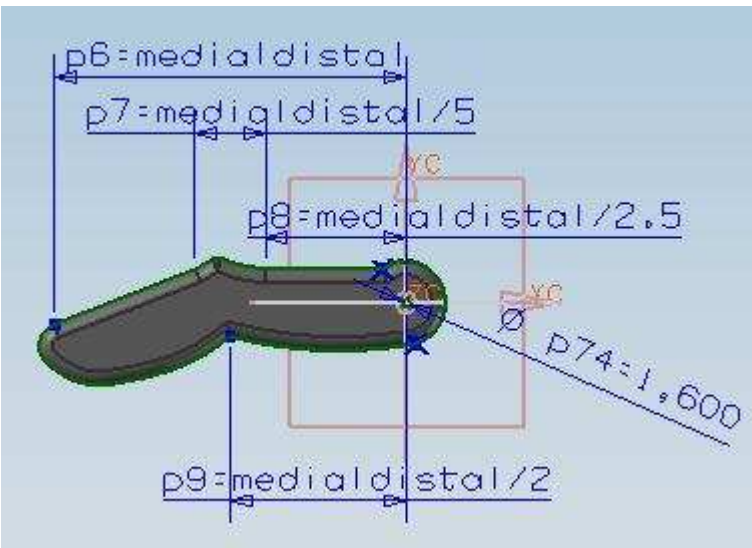


Ilustración 29 Falange medial y distal

Después de lograr el diseño paramétrico de la falange distal y medial capaz de adecuarse a las dimensiones de cualquier percentil se continuó con el diseño

digital de las falanges proximales. Se partió de un perfil elíptico que permitiera la implementación del sistema de transmisión seleccionado, así como la implementación de una sola pieza para la falange proximal del dedo anular y meñique. (Ver Ilustración 30)

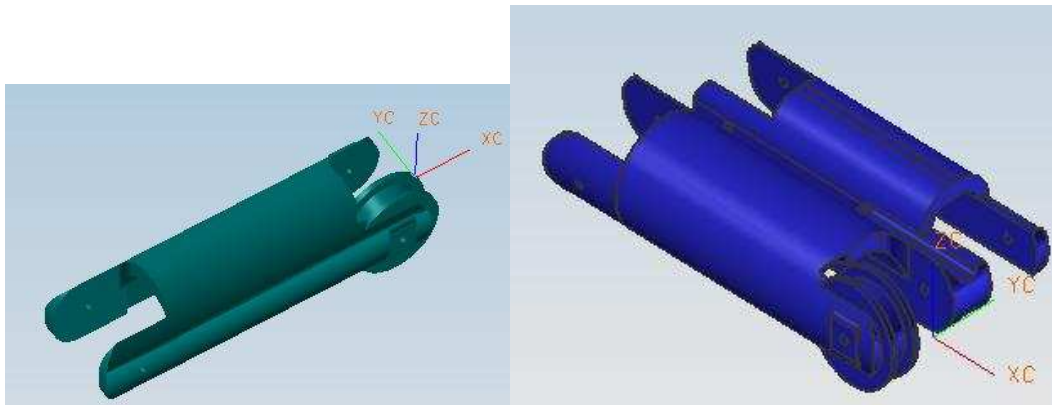


Ilustración 30 Falanges proximales

A continuación se diseñaron las poleas fijas necesarias para la transmisión (chicote). La Ilustración 31 muestra un dibujo de la polea.

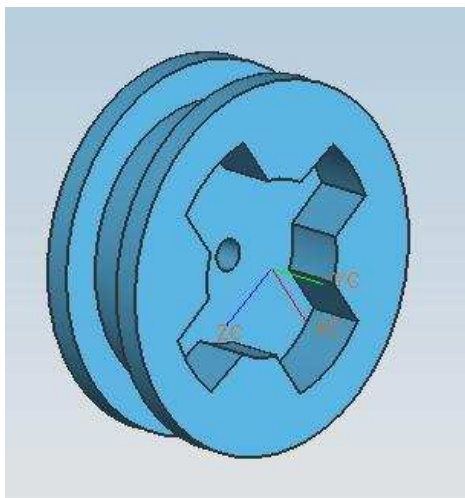


Ilustración 31 Polea

Para finalizar con el diseño de los dedos se realizó el diseño paramétrico digital del pulgar para lo cual se utilizó la misma técnica de barridos (*swept*) a través de perfiles obtenidos de un pulgar real. De esta manera se llegó a la configuración final que cumple con la dimensiones antropométricas del percentil a utilizar. Ilustración 32

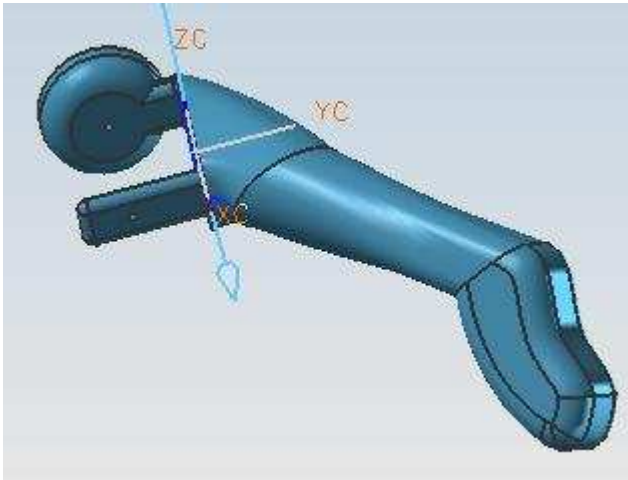


Ilustración 32 Dedo pulgar

Finalmente se juntaron todas las partes ya dibujadas en un solo ensamble, como se puede apreciar en la Ilustración 33

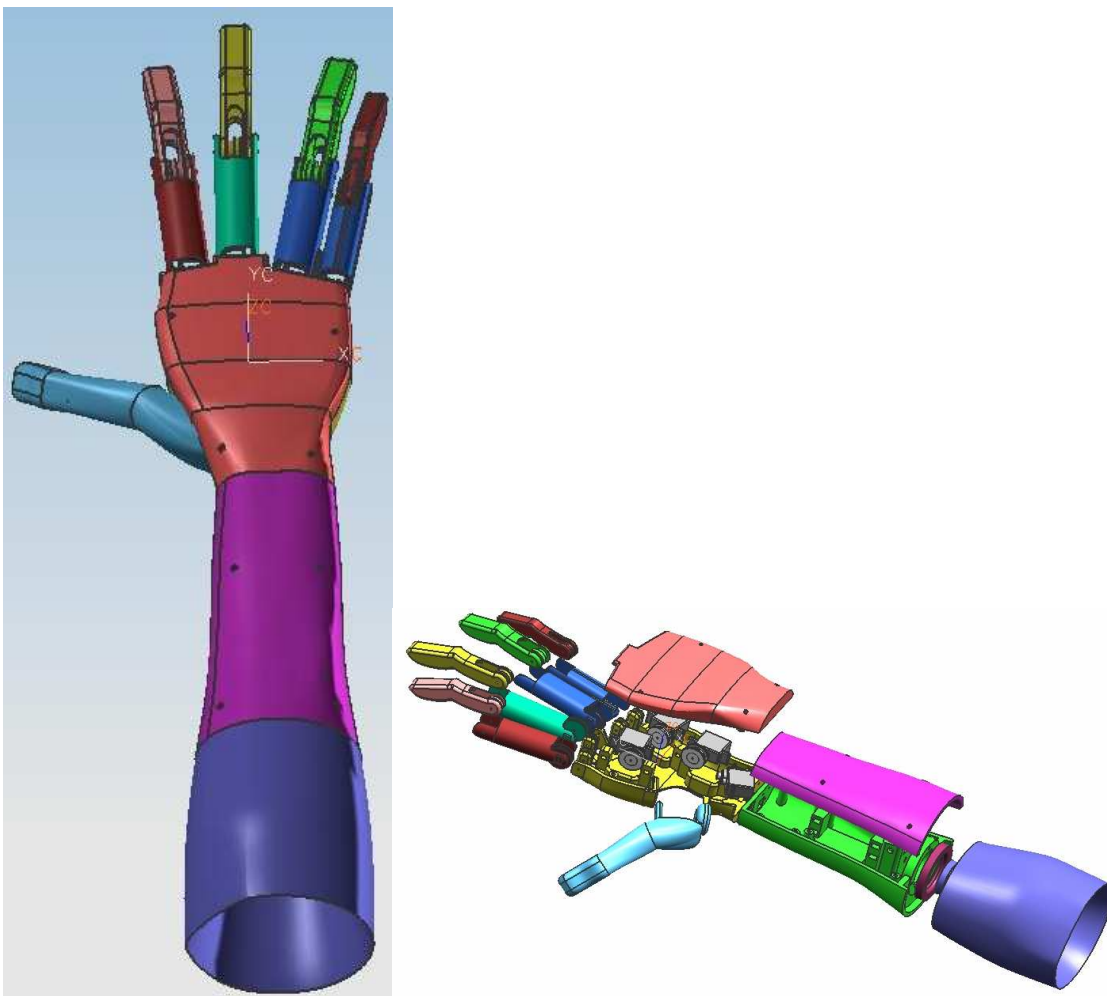


Ilustración 33 Ensamble y explosión de partes

8.1.4 Análisis Cinemático

Como se ha mencionado, un antecedente importante de este trabajo es la tesis "DISEÑO, FABRICACIÓN Y PRUEBAS DE UN PROTOTIPO DE MANO PARA UNA PRÓTESIS DE MIEMBRO SUPERIOR", Facultad de Ingeniería, UNAM., 2005. En dicho trabajo se hizo el análisis cinemático de los movimientos de la mano. Ese análisis será usado como base para este trabajo, dado que la cinemática es parecida. La principal diferencia es que este prototipo tiene un eslabón menos, lo que lo hace más sencillo. Esto se debe a que en el prototipo anterior, cada dedo constaba de tres partes: falanges proximal, medial y distal, con movimiento relativo entre ellas. Este prototipo únicamente cuenta con dos eslabones, dado que las falanges medial y distal son una sola pieza y no tienen movimiento relativo. De esta manera, el dedo se forma únicamente por dos eslabones: falange proximal y falange medial-distal. Otras diferencias que no afectan al análisis son los mecanismos de transmisión de potencia y las longitudes de los dedos. Esto último lo podemos afirmar dado que las dimensiones de este modelo surgen del percentil 95 de la mano humana. Las dimensiones del modelo de la tesis antes mencionada surgen de otro percentil de la mano humana. Esto implica que ambas dimensiones son proporcionales y por este motivo no se afecta el análisis cinemático.

El análisis cinemático se realizó únicamente en los dedos pulgar e índice ya que el movimiento de los otros dos dedos con movimiento independiente es igual al del índice. Por otro lado, y de manera independiente, estaremos analizando el movimiento de pronosupinación de la muñeca.

Anatomía de la Mano

La mano de los seres humanos está formada por 27 huesos. Ocho de ellos son los llamados huesos del carpo que son, junto con los dos huesos del antebrazo (radio y cúbito) los responsables del movimiento de pronosupinación. Éstos están situados en la parte anterior de la mano. En seguida, en la palma de la mano se encuentran los cinco huesos metacarpianos (uno para cada dedo). El pulgar por su parte está formado por dos falanges (proximal y distal), mientras que cada uno de los otros cuatro dedos de la mano están formados por tres huesos llamados falanges proximal, medial y distal.

Soluciones a la dinámica de la mano.

Muñeca

El movimiento de pronosupinación en este prototipo será ejecutado por una articulación rotativa de 180° cuyo eje será el antebrazo mismo. Por cuestiones de espacio, el motor y mecanismo de este movimiento se localizan en la parte más alejada de la muñeca, es decir, junto a la unión del prototipo con el muñón. El antebrazo y la palma de la mano están unidos sólidamente en este prototipo, creando así un solo eslabón.

Mano

Aunque existe cierta capacidad de movimiento entre los metacarpianos en la mano humana, éste es mínimo. Por este motivo se diseñó la palma de la mano de este prototipo como un solo eslabón junto con el antebrazo.

Pulgar

El dedo pulgar, presenta una articulación esférica entre el metacarpiano y la palma de la mano. Posteriormente, entre las falanges se presenta una articulación simple cuyo rango de movimiento va de los 0 a los 90°. Por simplicidad en el diseño, la articulación esférica se reemplazó por una articulación cilíndrica. Por su parte, la articulación entre el metacarpiano y la falange proximal así como la articulación entre falanges se eliminaron, creando un dedo de una sola pieza. Esta pieza consta de tres vectores, a saber, metacarpiano, falange proximal y falange distal. Para describirla mejor, partiremos de un sistema de coordenadas cuyo origen está situado en el centro del eje de rotación de esta articulación. El eje X es paralelo al plano de la palma de la mano, el eje Y es paralelo al eje de rotación del pulgar y el eje Z es perpendicular a la palma. Ver Ilustración 34 e Ilustración 35

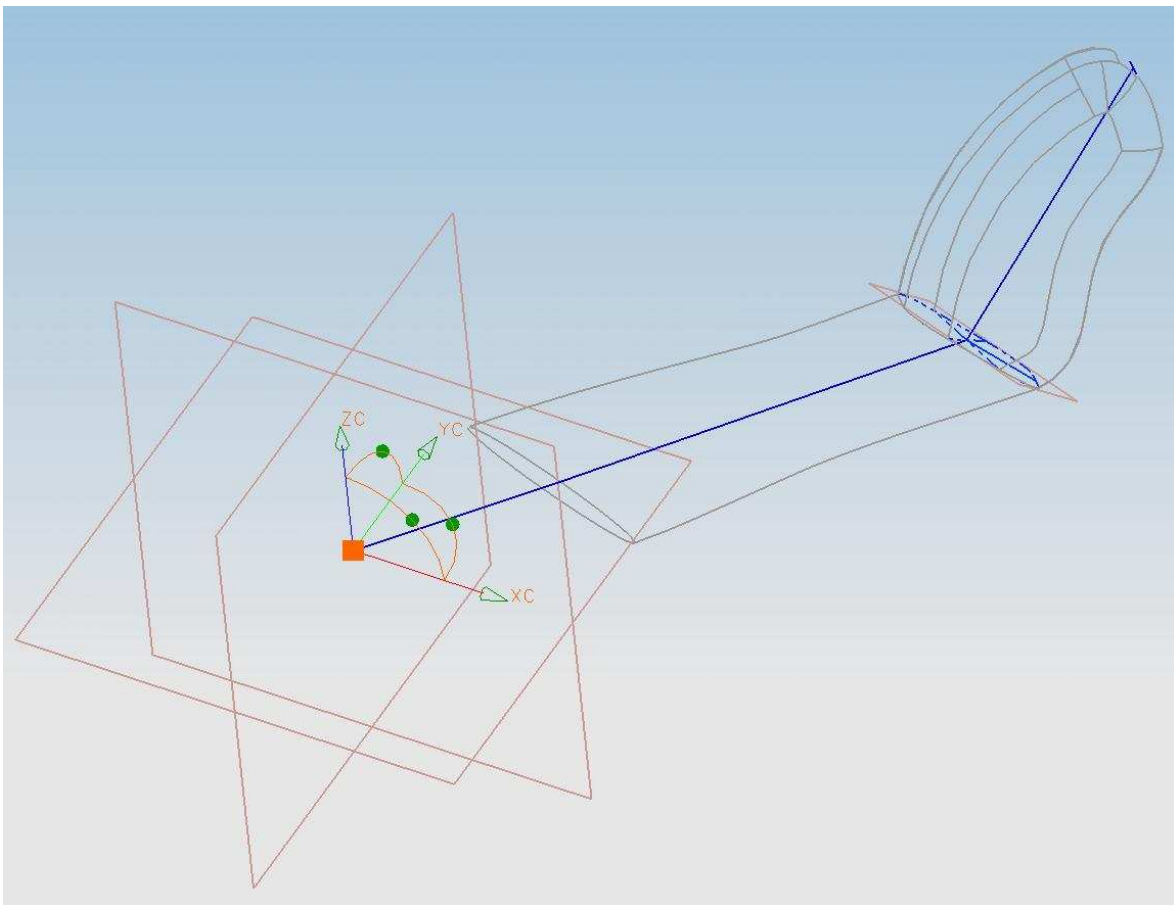


Ilustración 34 Ejes del pulgar

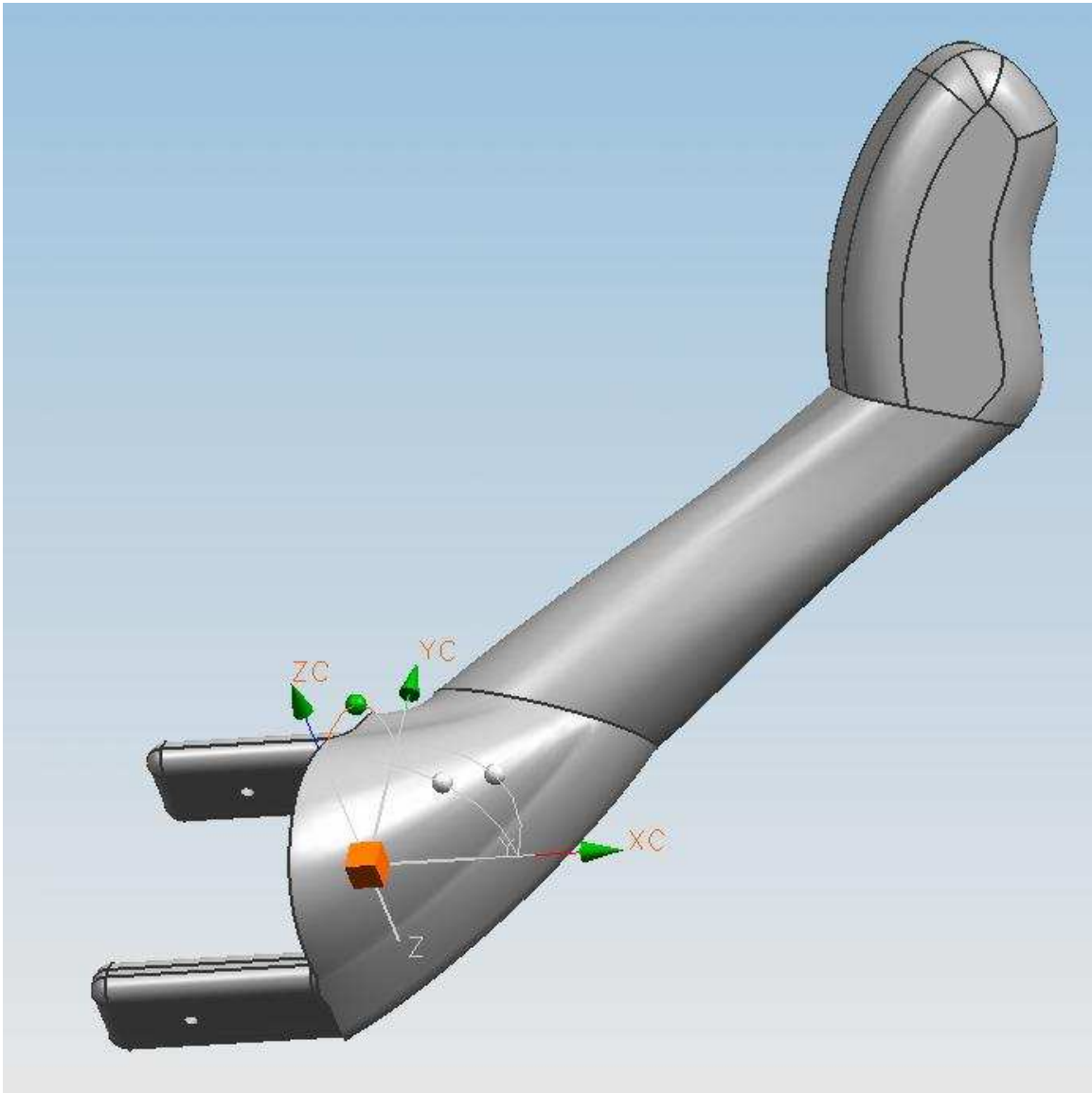


Ilustración 35 Ejes del pulgar

Los ángulos de estos vectores respecto de los planos formados por el sistema de coordenadas se muestran en la Tabla 2:

Falange	Plano XZ	Plano YZ	Plano XY
Metacarpiano	40,2	49.8	0
Proximal	42.4	46.4	8.3
Distal	46.8	14.6	40.5

Tabla 2 Ángulos del pulgar

Índice, medio, anular y meñique

El rango de movimiento de la articulación entre las falanges medial y distal va, en promedio de 0 a 60°. Para este prototipo se eliminó esta articulación mediante una sola pieza que representa ambas falanges a un ángulo entre sí de 22°. En el prototipo, la articulación entre las falanges medial y proximal está ligada por un sistema de poleas a la articulación entre el metacarpiano y la falange proximal en cada uno de los dedos. Estas dos articulaciones sí tienen movimiento respecto de la otra pero este es únicamente mecánico y no puede ser controlado por el sistema de control del prototipo. Por este motivo cada dedo se considera un solo eslabón. Además, como ya se mencionó, los dedos anular y meñique se han unido entre sí formando un solo eslabón. Por lo tanto, entre los cuatro dedos tenemos únicamente tres eslabones.

Finalmente podemos concluir que el prototipo consta de seis eslabones:

1. Unión con el muñón
2. Antebrazo-palma
3. Pulgar
4. Índice
5. Medio
6. Anular-meñique.

8.1.5 Manufactura:

Después de una serie de pruebas digitales de ensamble y movilidad de cada parte del diseño se realizó la exportación de cada pieza en formato estereo-litografía para el inicio de su fabricación utilizando la máquina de prototipos rápidos *Dimensión SST*.

Esta máquina permite obtener cualquier tipo de pieza en plástico ABS a partir de su diseño digital en CAD con extensión *stl*. La máquina se comporta como una impresora en tres dimensiones la cual requiere de un cartucho de material de soporte, que utiliza para generar estructuras auxiliares para permitir la colocación del material del segundo cartucho modelador en los lugares requeridos, teniendo como parámetros el tipo de estructura del material de los cartuchos ya sea completamente sólido o con huecos y la mejor tolerancia en el plano horizontal o vertical

Para su operación es necesario orientar las piezas para lograr el mejor desempeño mecánico y estético de las partes así como el mayor ahorro del cartucho de material de soporte.

Para esto se dividieron las jornadas de trabajo en cinco partes, cada una de ellas configurando el cartucho de soporte como hueco y cartucho modelador como sólido.

Durante la primera jornada se fabricaron los cuatro dedos completos. Para lograr una mayor tolerancia en el plano horizontal se utilizó el siguiente acomodo (Ilustración 36).

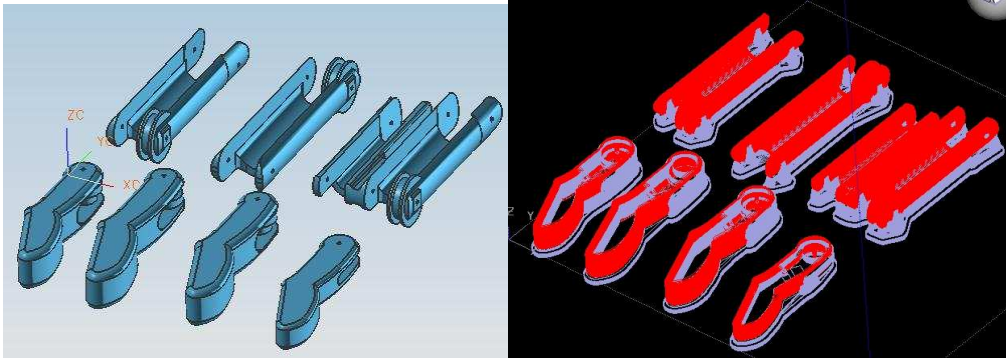


Ilustración 36 Disposición de dedos para manufactura

En la segunda sesión se realizaron la parte inferior de la palma y el pulgar con la siguiente orientación utilizando la mejor tolerancia en el plano horizontal (Ilustración 37).

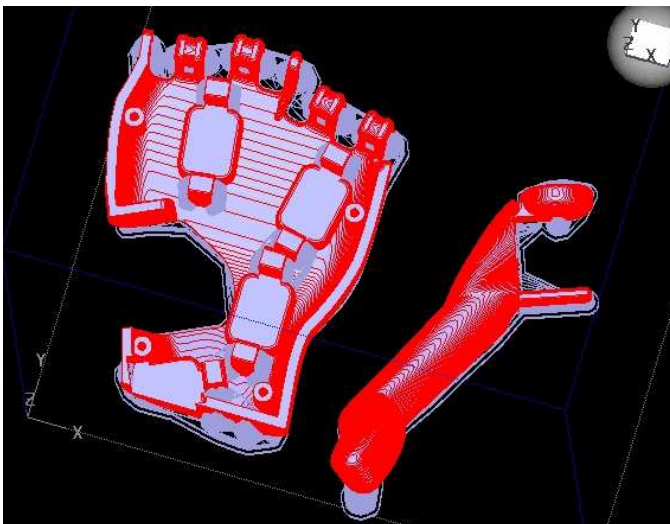


Ilustración 37 Base de palma y pulgar para manufactura

Durante la tercera jornada se realizaron la parte superior e inferior del antebrazo también con la mejor tolerancia en el plano horizontal. (Ilustración 38)

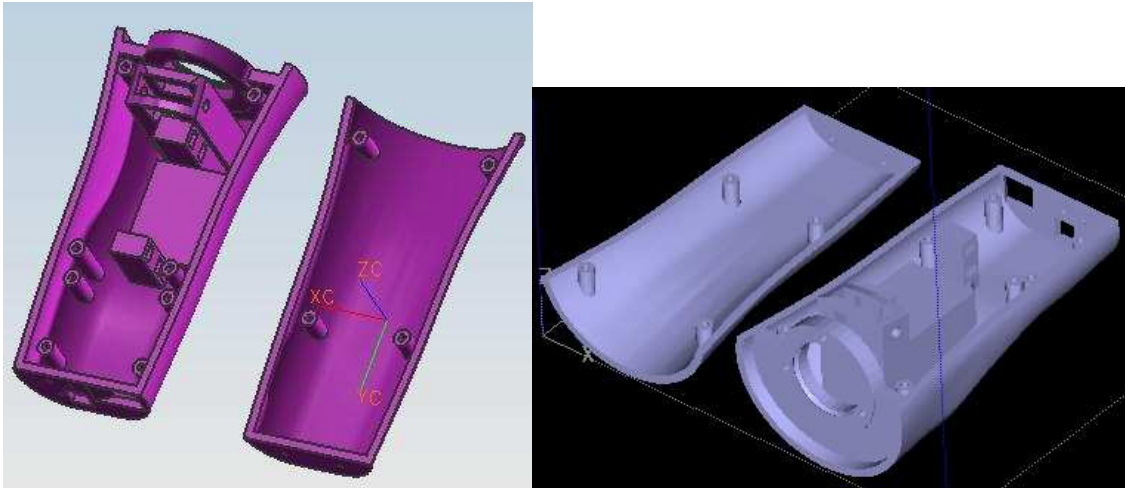


Ilustración 38 Antebrazo para manufactura

En la cuarta se realizó la parte del antebrazo con conexión para el socket junto con el anillo del balero, ambas con mejor tolerancia en el plano vertical para lograr un mejor desempeño al rodamiento. (Ilustración 39)

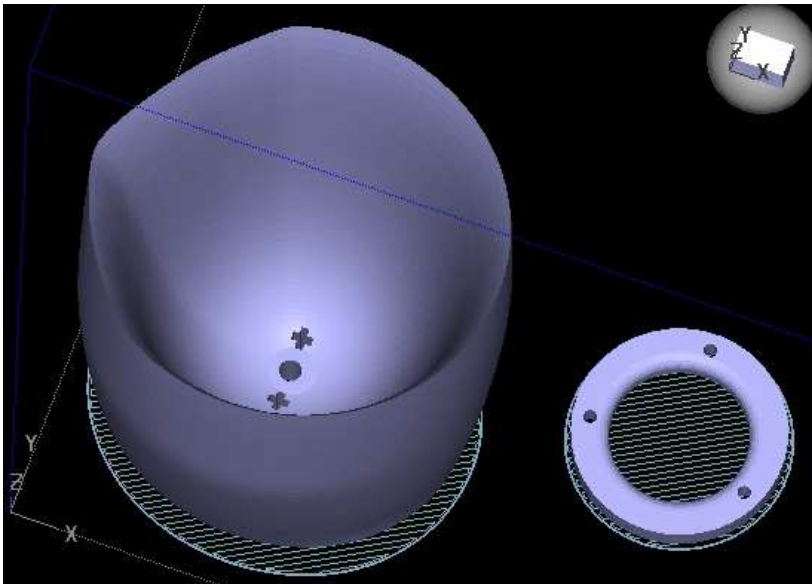


Ilustración 39 Socket para manufactura

Finalmente en la última jornada se construyeron las poleas utilizadas por los servomotores actuadores para la transmisión de movimiento con mejor tolerancia horizontal junto con la tapa superior de la palma. Ilustración 40

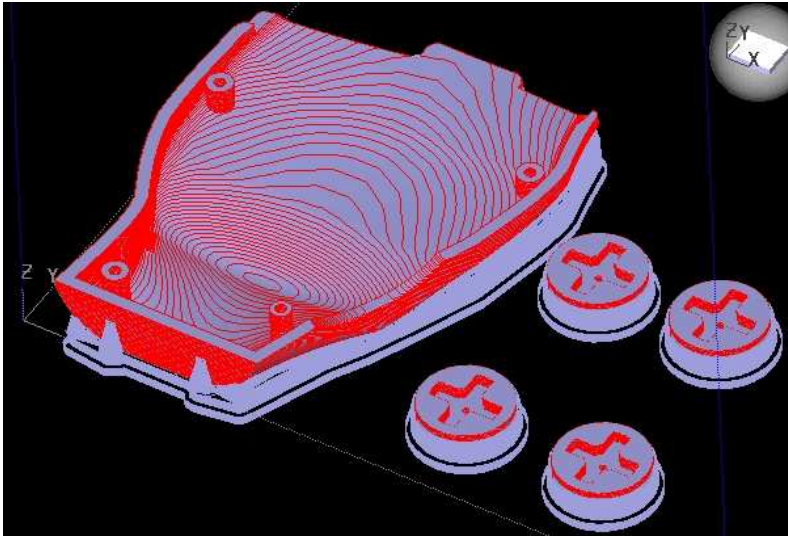


Ilustración 40 Tapa de palma y poleas para manufactura

8.2 Electrónico y control

Para permitir una mejor adaptación de futuras pruebas de diferentes sistemas de control en el prototipo, se decidió dejar fuera del ensamble al microcontrolador y la batería, sin embargo el diseño cuenta con el espacio suficiente para una batería de alimentación, así como los soportes para la fijación de una tarjeta de un microcontrolador PIC16F877 capaz de realizar todas las funciones deseadas con el menor espacio.

Para el sistema electrónico y de control externo, se utilizó un microcontrolador PIC16F877. Este microcontrolador fue montado sobre una tarjeta a la cual se le conectaron las siguientes entradas y se le obtuvieron las siguientes salidas:

I (entradas)	ba Mi	ba Mm	ba Ma	ba Mp	Ba Mb	bl	bD	S
--------------	-------	-------	-------	-------	-------	----	----	---

O (salidas)	Pwm Mi	Pwm Mm	Pwm Ma	Pwm Mp	Pwm Mb
-------------	--------	--------	--------	--------	--------

Donde:

ba Mi: Bit de activación del motor del dedo índice.

ba Mm: Bit de activación del motor del dedo medio.

ba Ma: Bit de activación del motor de los dedos anular y meñique .

ba Mp: Bit de activación del motor del dedo pulgar.

ba Mb: Bit de activación del motor del antebrazo.

bl: Bit de incremento

bD:Bit de decremento

S: Sensor de fuerza.

Pwm Mi: Ancho de pulso para el posicionamiento del motor del dedo índice.

Pwm Mm: Ancho de pulso para el posicionamiento del motor del dedo medio.

Pwm Ma: Ancho de pulso para el posicionamiento del motor de los dedos anular y meñique.

Pwm Mp: Ancho de pulso para el posicionamiento del motor del dedo pulgar.

Pwm Mb: Ancho de pulso para el posicionamiento del motor del antebrazo.

Para la generación de los bits de activación, de incremento y de decremento se creó una interfase con el puerto paralelo funcional para cualquier computadora mediante lenguaje Visual Basic 6.0 TM. En la Ilustración 41 se puede ver una imagen del programa de control (interfase) en la computadora. Para más detalle, consultar el código en el anexo 1.

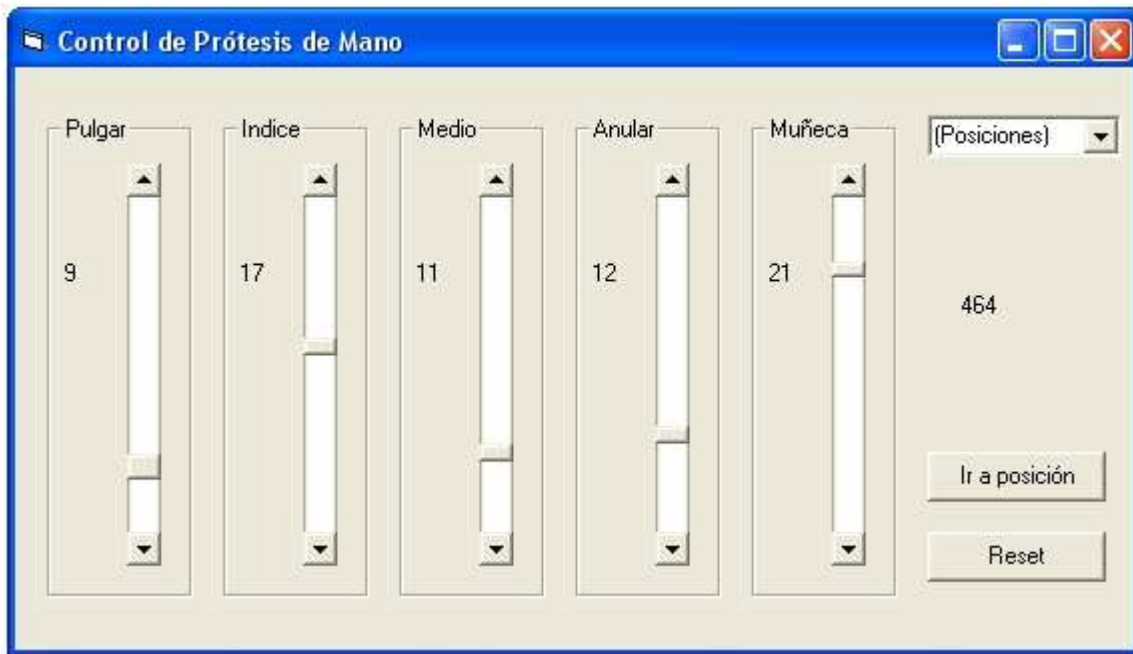


Ilustración 41 Imagen de la interfase de control

El sensor de fuerza fue configurado como interruptor utilizando el comparador LM358. La forma de conectarlo es la recomendada por el fabricante y se puede ver en la Ilustración 42.

Para la protección electrónica de cualquier sobre carga de ambos dispositivos (computadora y tarjeta del microcontrolador) se implementó un circuito mediante opto electrónica utilizando el opto acoplador 4N30. La conexión utilizada se puede ver en la Ilustración 43. Se usará un circuito de protección para cada bit de salida de la computadora así como para el sensor de fuerza.

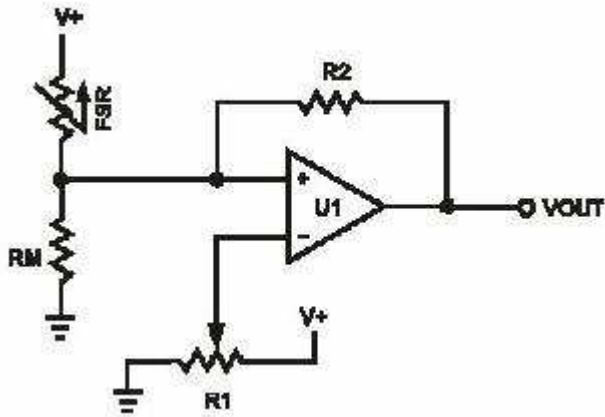


Ilustración 42 Conexiones para el sensor de presión

Donde:

$R1 = 10\text{ k}\Omega$

$R2 = 4.7\text{ k}\Omega$

$R_M = 4.7\text{ k}\Omega$

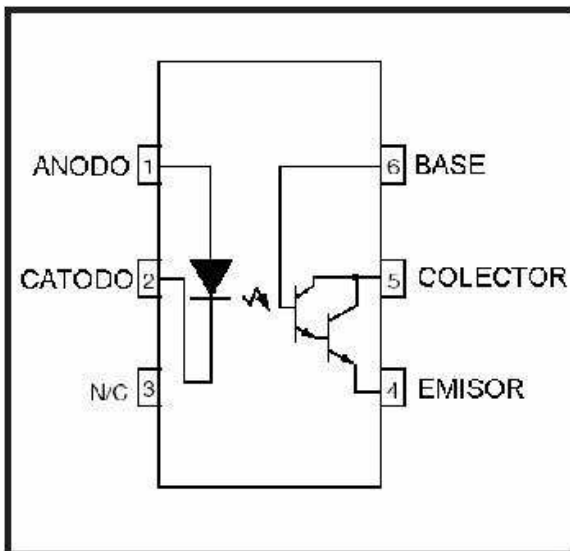


Ilustración 43 Optoacoplador 4N30

Para el control de los servomotores se usarán cinco canales de ancho de pulso independientes. Esto permite el control de todas las articulaciones utilizando el lenguaje más óptimo para su programación. Para mayor detalle, ver código en anexo 2. Este control se realizó mediante programación en lenguaje ensamblador.

9.- PRUEBAS

Para analizar el comportamiento funcional del prototipo, se llevaron a cabo diferentes pruebas, que a continuación se detallan. El movimiento de todas las articulaciones se logró mediante un sistema de pulsos generados manualmente utilizando push buttons. Para cada caso se tomaron videos y fotografías que se presentan a continuación junto con la descripción del movimiento.

- A) Movimiento independiente de cada dedo, (considerando el dedo meñique y anular como un mismo movimiento debido a su comportamiento real en la mano humana)

Para el movimiento independiente de cada dedo, se hizo una secuencia con la numeración del uno al cinco levantando cada uno de los dedos para mostrar su movilidad independiente de los demás dedos.



Ilustración 44 Señal de "OK"

La realización de esta prueba fue exitosa, debido a que se logró el movimiento independiente de todas las articulaciones, sin embargo, el tiempo de realización se pudo mejorar al utilizar otro sistema de operación de los movimientos, sustituyendo el sistema generador de pulsos mediante push buttons por otro sistema capaz de repetir las posiciones deseadas mediante el uso de la memoria del microcontrolador PIC utilizado.

- B) Movimiento de pronación y supinación

Para la comprobación del movimiento de pronación y supinación se filmó al prototipo simulando un saludo.



Ilustración 45 Mano cerrada

Esta prueba demostró la movilidad de la articulación. Sin embargo, también se demostró que la carrera del movimiento es limitada, debido a la configuración de su sistema de transmisión como se puede observar en la Ilustración 45.

C) Posición de sujeción

El movimiento de sujeción se divide en dos partes: sujeción fina y sujeción gruesa. La sujeción gruesa se demostró con el prototipo sujetando una botella de agua, y la sujeción fina se probó sujetando una pluma en la posición de escritura.

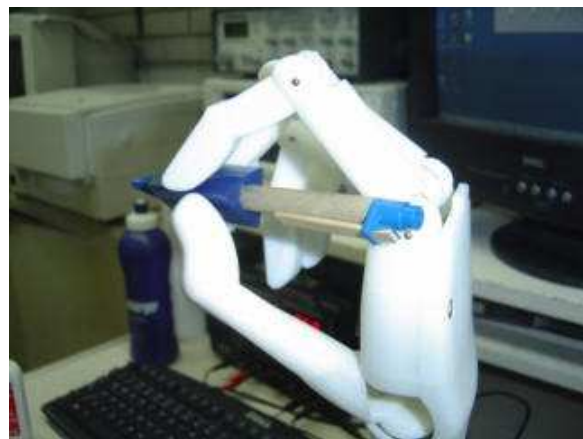


Ilustración 46 Sujeción de botella y lápiz

Se logró una perfecta sujeción en ambas pruebas, demostrando que la configuración del prototipo permite el sostener tanto objetos pequeños como grandes que pueden ser requeridos por el usuario.

D) Posición de llave

La posición de llave se comprobó tomando dos objetos distintos entre el índice y el pulgar: una llave y un disquete.



Ilustración 47 Sujeción de disco y llave

En estas pruebas se logró sostener los objetos. Dado que el material del que está hecho el prototipo es muy duro, los materiales igual de duros que se pretenden sujetar tienden a resbalarse. Por este motivo se sugiere el uso de un guante de látex u otro material elástico que permita un agarre más firme.

E) Posición de puño

Para esta posición se generó la secuencia de movimiento de la palma abierta hasta llegar a puño cerrado. En esta prueba se logró el posicionamiento deseado, sin embargo, no se logró el cierre total de las articulaciones, al tratarse del movimiento que requiere mayor torque de los servomotores.

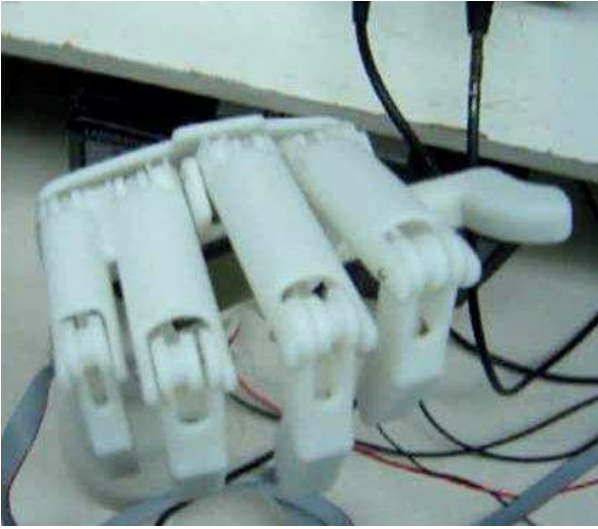


Ilustración 48 Posición de puño

F) Posición de reposo natural

Finalmente para la posición de reposo se hizo el ajuste en el ensamble para que su posición inicial imite la posición real en reposo de la mano humana. Este ajuste permite al ahorro de energía del prototipo. Además, se logra el objetivo de presentar una estética natural en reposo.



Ilustración 49 Posición de reposo

10.- RESULTADOS

Tabla de tiempos logrados durante las pruebas de movimientos expresadas en segundos:

Tipo de movimiento	Descripción	Tiempo [s]
Carrera completa	Índice	9
Carrera completa	Medio	8
Carrera completa	Anular-meñique	7
Carrera completa	Pulgar	5
Movimiento de pronación	Carrera de 20 grados	1.5
Movimiento de supinación	Carrera de 20 grados	4
Sujeción de cilindro	Movimiento de todos los dedos en conjunto	9
Sujeción de pinza	Movimiento de todos los dedos en conjunto	9.5
Posición de puño	Movimiento de todos los dedos en conjunto	6

Se hicieron varias pruebas con el mismo movimiento y se observó que los tiempos en los recorridos no son constantes. Esto se debe a que la forma de operación fue manual, utilizando el sistema de operación de botones. Esto genera una respuesta variable debido a la operación del sistema. Mediante un sistema de operación automática con memoria de las posiciones se puede reducir considerablemente la variabilidad de los tiempos, así como los tiempos mismos.

11.- CONCLUSIONES

Se logró construir un prototipo funcional de prótesis de miembro superior con movimiento controlado de muñeca y cinco dedos.

El modelo se construyó mediante técnicas de diseño asistido por computadora, utilizando medidas antropométricas reales. Esto dio como resultado un diseño con formas muy apegadas a la realidad.

Los motores y mecanismos especificados cumplen con su función parcialmente. Existen algunas mejoras que se pueden hacer para mejorar la operación del prototipo. Dichas mejoras se enlistan mas adelante.

El lazo de control que se diseñó e implementó, dio como resultado un buen funcionamiento y control de los motores del prototipo.

Se obtuvo una forma de operación adecuada a través de pruebas físicas con el prototipo. Ésta puede ser mejorada a través de más pruebas y mejores ajustes en los mecanismos y sistemas de transmisión.

Se logró sujetar objetos diversos tales como una pluma, un cilindro, un disco y una llave entre otros.

El diseño y manufactura del prototipo se realizó con un enfoque de bajo costo. Esto será importante en un futuro cuando se quiera comercializar la prótesis.

Utilizar un material ligero y resistente como el ABS permitió superar funcionalidades logradas anteriormente evitando completamente fracturas durante el ensamblado y pruebas físicas.

La modelación de partes utilizando una herramienta paramétrica, permitirá generar prótesis completas de cualquier percentil a través de un diseño maestro habilitando una producción de cualquier percentil.

Los trabajos predecesores a este modelo fueron de gran utilidad para su elaboración. A su vez, este prototipo generó grandes aportaciones para el continuo desarrollo de prótesis, todo esto dentro del proyecto “Desarrollo de Prótesis Inteligentes” del Departamento de Ingeniería Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería.

11.1 Recomendaciones para trabajo futuro

Sustituir el motor actuador que proporciona el movimiento de cada articulación por uno de mayor capacidad.

Reemplazar la reducción del sinfín – corona del movimiento del antebrazo o muñeca para lograr el movimiento de prono supinación por otro mecanismo que no tenga una reducción de revoluciones.

Agregar topes físicos que limiten la carrera del desplazamiento de los chicotes (push roads) los cuales proporcionarían un máximo desplazamiento de los eslabones que conforman las falanges logrando un mejor desempeño.

Colocar los chicotes flexibles (*flexible push road*) con sus cubiertas originales (parte externa). Las cubiertas deben ir fijas de manera que sujeten el chicote y éste no tenga deformaciones en su trayectoria de desplazamiento. Esto permitirá obtener un mejor desempeño en el movimiento final de las articulaciones, solucionando errores encontrados en la pérdida de desplazamiento debido a flexiones internas no deseadas.

Probar con diferentes tipos de motores actuadores que proporcionen un mayor torque manteniendo dimensiones que permitan situarlos dentro de las cavidades internas del diseño.

Implementar diferentes sistemas de control que permitan una operación estable, repetible, flexible y de mayor comodidad para posibles usuarios finales. Tales como reconocimiento de voz, manual y control mioeléctrico.

Estudiar el comportamiento del movimiento que se obtiene con diferentes grosores de chicote (*flexible push road*) para terminar de evaluar su desempeño, así como evaluar su comportamiento utilizando ambos elementos originales completos sin ninguna modificación como la realizada en este prototipo.

Evaluar diferentes alternativas de manufactura, tales como materiales alternativos en máquinas de prototipos rápidos que permitan extender aún más la durabilidad lograda.

Implementar un sistema de fijación para su incorporación a un socket de acuerdo al tipo de control que el usuario final requiera.

Colocar un guante con cubierta de látex que incremente su estética al proporcionarle un color y textura de piel, mismo que protegerá e incrementará el tiempo de vida de la prótesis.

Seleccionar un mejor sistema de alimentación, que proporcione la energía necesaria para que por lo menos permita operar al prototipo en un día de rutina cotidiana, manteniendo un bajo peso, utilizando materiales reciclables y recargables.

Calibrar adecuadamente la señal del sensor de presión para obtener diferentes fuerzas de agarre.

Anexo 1 Programa del controlador

Código de programación para controlador

Por medio de este programa se realiza el control de los 5 servomotores que generan el movimiento de los dedos y el antebrazo. Este movimiento se logra mediante la combinación de dos señales. Primero se escoge cual de los cinco motores se desea mover. Posteriormente se indica el sentido de giro. Para lograrlo, se ocuparán cinco bits de salida del puerto B (*PORTB*, del 0 al 4). Adicionalmente, se ocupan siete bits del puerto D (*PORTD*) como bits de entrada. Cinco de estos bits (0 al 4) son señales para escoger el motor que se va a mover. Los otros dos bits (6 y 7) indicarán el sentido de giro que se desea del motor elegido previamente. Adicionalmente, este programa cuenta con un retardo o “*delay*” que se usa para dar tiempo a los motores de generar el movimiento solicitado antes de recibir una nueva señal.

```
;PROGRAMA QUE CONTROLA SERVOMOTORES
```

```
    ERRORLEVEL      -302
    INCLUDE          "P16F877.INC"
```

```
;REGISTROS DE RAM GENERAL
```

```
    CBLOCK          0X20
                    BANDERA
                    TEMP
                    CUENTA
                    W_RESP
                    S_RESP
                    PWM1
                    PWM2
                    PWM3
                    PWM4
                    PWM5
                    TMP0
                    TMP1
                    TMP2
```

```
    ENDC
```

```
#DEFINE DEDO1      PORTB,0      ;SALIDA DEDOPPULGAR
#DEFINE DEDO2      PORTB,1      ;SALIDA DEDOINDICE
#DEFINE DEDO3      PORTB,2      ;SALIDA DEDOMEDIO
#DEFINE DEDO4      PORTB,3      ;SALIDA DEDOANULAR
#DEFINE BRAZO      PORTB,4      ;SALIDA BRAZO
#DEFINE BOTON1     PORTD,0      ;BOTON DEDO1
#DEFINE BOTON2     PORTD,1      ;BOTON DEDO2
#DEFINE BOTON3     PORTD,2      ;BOTON DEDO3
#DEFINE BOTON4     PORTD,3      ;BOTON DEDO4
#DEFINE BOTONB     PORTD,4      ;BOTON BRAZO
#DEFINE BOTONI     PORTD,6      ;BOTON INCREMENTO
#DEFINE BOTOND     PORTD,7      ;BOTON DECREMENTO
```

```
;CONSTANTES
```

```
MAX      EQU      .200      ;MAX = 200 ms
MAXP     EQU      .19       ;MS
```

```
MIND EQU .7 ;ms
MINB EQU .5 ;ms
```

```
;ORGANIZACIÓN DE PROGRAMA
```

```
ORG 0X00
GOTO INI
ORG 0X04
GOTO INT
```

```
;CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA
```

```
INI BSF STATUS,RP0 ;CAMBIO A BANCO1
CLRF TRISB ;PORTB SALIDA
CLRF TRISC ;PORTC SALIDA
MOVLW B'11111111'
MOVWF TRISD ;PORTD ENTRADA
BSF PIE1,TMR2IE ;PERMISO DE INTERR POR TMR2
BCF STATUS,RP0 ;CAMBIO AL BANCO 0
CLRF CUENTA ;REG DE CONTEO DE EVENTOS
```

```
;INICIA VALOR DE CICLO DE TRABAJO
```

```
MOVLW MAXP ;CARGA MIND EN ACUMULADOR
MOVWF PWM1 ;MUEVE EL ACUM AL PW1
MOVLW MIND ;W = MIND
MOVWF PWM2 ;PWM2 = MIND
MOVLW MIND ;W= MIND
MOVWF PWM3 ;PWM3 = MIND
MOVLW MIND ;W= MIND
MOVWF PWM4 ;PWM4 = MIND
MOVLW MINB ;W= MINB
MOVWF PWM5 ;PWM5 = MINB
```

```
;ENCIENDE SALIDAS DE PWMs
```

```
BSF DEDO1
BSF DEDO2
BSF DEDO3
BSF DEDO4
BSF BRAZO
```

```
;INICIACION DEL TIMER2
```

```
MOVLW .131 ; W = 131 ms
MOVWF TMR2 ;TMR2 = 131
MOVLW B'00000001' ;POSTESCALA 1:1, PRESCALA 1:4
MOVWF T2CON
```

```
;CONFIGURACION DE INTERRUPCIONES
```

```
BSF INTCON,GIE ;PERMISO GLOBAL DE INTERRUPCION
BSF INTCON,PEIE ; INTERRUPCIÓN POR PERIFERICO
BCF INTCON,RBIE ; INTERRUPCIÓN NEGADO POR PORTB
BCF PIR1,TMR2IF ;REPONE BANDERA
BSF T2CON,TMR2ON ;ENCIENDE TIMER 2
```

```
;PROGRAMA GENERAL
```

```
CALL DELAY ;RETARDO
```

	MOVLW MOVWF	B'00000000' PORTB	
MAIN	BTFSC GOTO	BOTON1 MAIN1	;PRUEBA COMO ESTA EL BOTON1 ;SI ESTA ACTIVADO VE A MAN1
DED2	BTFSC GOTO	BOTON2 MAIN2	;PRUEBA COMO ESTA EL BOTON2 ;SI ESTA ACTIVADO VE A MAIN2
DED3	BTFSC GOTO	BOTON3 MAIN3	;PRUEBA COMO ESTA EL BOTON3 ;SI ESTA ACTIVADO VE A MAIN3
DED4	BTFSC GOTO	BOTON4 MAIN4	;PRUEBA COMO ESTA EL BOTON4 ;SI ESTA ACTIVADO VE A MAIN4
BRAZ	BTFSC GOTO GOTO	BOTONB MAINB MAIN	;PRUEBA COMO ESTA EL BOTONB ;SI ESTA ACTIVADO VE A MAIN5 ;NO ESTA ACTIVADO VE A MAIN
MAIN1	BTFSS GOTO MOVF XORLW BTFSC GOTO MOVLW SUBWF GOTO	BOTONI MAIND1 PWM1,W MIND STATUS,Z MAIN .1 PWM1,F HOLDI	;PRUEBA COMO ESTA BOTONI ;NO ESTA ACTIVADO VE A MAINA1 ;SI ESTA ACTIVADO W = PW1 ;VALE 7? ; VE A MAIN ;PONGO 1 EN ACUMULADOR ;INCREMENTO PWM1 DE 1 EN 1 ;VE A HOLDI
MAIND1	BTFSS GOTO MOVF XORLW BTFSC GOTO MOVLW ADDWF GOTO	BOTOND MAIN PWM1,W MAXP STATUS,Z MAIN .1 PWM1,F HOLDD	;ESTA ACTIVADO EL BOTOND? ;NO VE A MAIN ;SI ESTA ACTIVADO PWM1= W ;VALE 19? ;VE A MAIN ;PONGO 1 EN ACUMULADOR ;DECREMENTO PWM1 DE 1 EN 1 ;VE A HOLDD
MAIN2	BTFSS GOTO MOVF XORLW BTFSC GOTO MOVLW ADDWF GOTO	BOTONI MAIND2 PWM2,W MAX STATUS,Z MAIN .1 PWM2,F HOLDI	;PRUEBA COMO ESTA BOTONI ;NO ESTA ACTIVADO VE A MAINA2 ;SI ESTA PWM2 = W ;VALE 200? ;VE A MAIN ;PONGO 1 EN ACUMULADOR ;INCREMENTO PWM2 DE 1 EN 1 ;VE A HOLDI
MAIND2	BTFSS GOTO MOVF XORLW BTFSC GOTO MOVLW	BOTOND MAIN PWM2,W MIND STATUS, Z MAIN .1	;ESTA ACTIVADO EL BOTOND? ;NO VE A MAIN ;SI ESTA ACTIVADO PWM2 = W ;VALE MIND? ;VE A MAIN ;PONGO 1 EN ACUMULADOR

	SUBWF GOTO	PWM2,F HOLDD	;DECREMENTO PWM2 DE 1 EN 1 ;VE A HOLDD
MAINI3	BTFSS GOTO MOVF XORLW BTFSC GOTO MOVLW ADDWF GOTO	BOTONI MAIND3 PWM3,W MAX STATUS,Z MAIN .1 PWM3,F HOLDI	;PRUEBA COMO ESTA BOTONI ;NO ESTA ACTIVADO VE A MAINA3 ;SI ESTA ACTIVADO PWM3 = W ;VALE 200? ;VE A MAIN ;PONGO 1 EN ACUMULADOR ;INCREMENTO PWM3 DE 1 EN 1 ;VE A HOLDI
MAIND3	BTFSS GOTO MOVF XORLW BTFSC GOTO MOVLW SUBWF GOTO	BOTOND MAIN PWM3,W MIND STATUS, Z MAIN .1 PWM3,F HOLDD	;ESTA ACTIVADO EL BOTOND? ;NO VE A MAIN ;SI ESTA ACTIVADO PWM3 = W ;VALE MIND? ;VE A MAIN ;PONGO 1 EN ACUMULADOR ;DECREMENTO PWM3 DE 1 EN 1 ;VE A HOLDD
MAINI4	BTFSS GOTO MOVF XORLW BTFSC GOTO MOVLW ADDWF GOTO	BOTONI MAIND4 PWM4,W MAX STATUS,Z MAIN .1 PWM4,F HOLDI	;PRUEBA COMO ESTA BOTONI ;NO ESTA ACTIVADO VE A MAINA4 ;SI ESTA ACTIVADO PWM4 = W ;W VALE 200? ;SALTA SI W ES DIF DE 200 ;VE A MAIN ;PONGO 1 EN ACUMULADOR ;INCREMENTO PWM4 DE 1 EN 1 ;VE A HOLDI
MAIND4	BTFSS GOTO MOVF XORLW BTFSC GOTO MOVLW SUBWF GOTO	BOTOND MAIN PWM4,W MIND STATUS, Z MAIN .1 PWM4,F HOLDD	;ESTA ACTIVADO EL BOTOND? ;NO VE A MAIN ;SI ESTA ACTIVADO PWM4 = W ;VALE MIND? ;VE A MAIN ;PONGO 1 EN ACUMULADOR ;DECREMENTO PWM4 DE 1 EN 1 ;VE A HOLDD
MAINIB	BTFSS GOTO MOVF XORLW BTFSC GOTO MOVLW ADDWF GOTO	BOTONI MAINDB PWM5,W MAX STATUS,Z MAIN .1 PWM5,F HOLDI	;PRUEBA COMO ESTA BOTONI ;NO ESTA ACTIVADO VE A MAINA5 ;SI ESTA ACTIVADO PWM4 = W ;W VALE 200? ;SALTA SI W ES DIF DE 200 ;VE A MAIN ;PONGO 1 EN ACUMULADOR ;INCREMENTO PWM5 DE 1 EN 1 ;VE A HOLDI
MAINDB	BTFSS GOTO MOVF	BOTOND MAIN PWM5,W	;ESTA ACTIVADO EL BOTOND? ;NO VE A MAIN ;SI ESTA ACTIVADO PWM5 = W

	XORLW BTFSC GOTO MOVLW SUBWF GOTO	MINB STATUS, Z MAIN .1 PWM5,F HOLDD	;VALE MINB? ;VE A MAIN ;PONGO 1 EN ACUMULADOR ;DECREMENTO PWM5 DE 1 EN 1 ;VE A HOLDD
HOLDI	BTFSC GOTO GOTO	BOTONI HOLDI MAIN	;CHECA SI ESTA ACTIVADO BOTONI ;SI ESTA ACTIVADO VE A HOLDI ;SI NO ESTA ACTIVADO VE A MAIN
HOLDD	BTFSC GOTO GOTO	BOTOND HOLDD MAIN	;CHECA SI ESTA ACTIVADO BOTOND ;SI ESTA ACTIVADO VE A HOLDD ;SI NO ESTA ACTIVADO VE A MAIN
INT	MOVWF MOVF MOVWF	W_RESP STATUS,W S_RESP	;RESPALDO DE W ;W = STATUS ;RESPALDO DE STATUS
TEMPO	MOVLW MOVWF BCF INCF MOVF XORWF BTFSS GOTO BCF	.131 TMR2 PIR1,TMR2IF CUENTA,F CUENTA,W PWM1,W STATUS,Z PRE2 DEDO1	;[(255-131)*4]/200ns ;TMR2 = .131 ;CUENTA = CUENTA + 1 ;W = CUENTA ;PWM1 == CUENTA? ;VE A PRE2 ;PONGO DEDO1 EN CERO
PRE2	MOVF XORWF BTFSS GOTO BCF	CUENTA,W PWM2,W STATUS,Z PRE3 DEDO2	;W = CUENTA ;PWM1 == CUENTA? ;VE A PRE3 ;PONGO DEDO2 EN CERO
PRE3	MOVF XORWF BTFSS GOTO BCF	CUENTA,W PWM3,W STATUS,Z PRE4 DEDO3	;W=CUENTA ;PWM1 == CUENTA? ;VE A PRE4 ;PONGO DEDO3 EN 0
PRE4	MOVF XORWF BTFSS GOTO BCF	CUENTA,W PWM4,W STATUS,Z PREB DEDO4	;W=CUENTA ;PWM1 == CUENTA? ;VE A AQUI ;PONGO DEDO4 EN 0
PREB	MOVF XORWF BTFSS GOTO BCF	CUENTA,W PWM5,W STATUS,Z AQUI BRAZO	;W=CUENTA ;PWM1 == CUENTA? ;VE A AQUI ;PONGO BRAZO EN 0
AQUI	MOVF XORLW BTFSS	CUENTA,W MAX STATUS,Z	;W= CUENTA ;CUENTA LLEGO AL MAXIMO?

	GOTO	VOLVER	;VE A VOLVER
	BSF	DED01	;PONGO EN 1 DEDO1
	BSF	DED02	;PONGO EN 1 DEDO2
	BSF	DED03	;PONGO EN 1 DEDO3
	BSF	DED04	;PONGO EN 1 DEDO4
	BSF	BRAZO	;PONGO EN 1 BRAZO
	CLRF	CUENTA	;LIMPIO CUENTA
VOLVER	MOVF	S_RESP,W	;W = RESPALDO DE STATUS
	MOVWF	STATUS	;RECUPERA SU VALOR STATUS
	MOVF	W_RESP,W	;W RECUPERA SU VALOR PREVIO
	RETFIE		
DELAY	MOVLW	.10	;W= 10
	MOVWF	TMP2	;TMP2 = 10
	CLRF	TMP0	;TMP0 = 0
	CLRF	TMP1	;TMP1 = 0
CICLO	DECFSZ	TMP1,F	;DECREMENTO EL TMP1 Y TMP1= 0?
	GOTO	CICLO	;NO, VE A AQUI2
	DECFSZ	TMP0,F	;SI, DECREMENTO EL TMP0 Y TMP0 = 0?
	GOTO	CICLO	;NO, VE A AQUI2
	DECFSZ	TMP2,F	;SI, DECREMENTO EL TMP2 Y TMP2=0?
	GOTO	CICLO	;NO, VE A AQUI2
	RETURN		;SI, REGRESA
END			;FIN

Anexo 2 Programa de la Interfase

Código de programación para programa de control en Visual Basic

Por medio de este programa se envían las señales de entrada al controlador desde una computadora común. Para esto se diseñó una interfase de *Windows* en la que hay cinco barras de desplazamiento. Cada una de ellas sirve para mover cada uno de los motores. El usuario solo tiene que establecer el punto donde quiere que lleguen cada uno de los motores y dar *clíc* en el botón de “Ir a posición”. Adicionalmente, cuenta con un botón de *Reset* para reestablecer los valores iniciales. Por último, existe una caja de opciones de las cuales se puede escoger una posición previamente definida. Dando *clíc* en el botón de “Ir a posición”, el prototipo se moverá a la posición seleccionada automáticamente.

```
Option Explicit
```

```
Private i As Integer
```

```
Private Sub cmdMover_Click()
```

```
    intPosicion = lstPosiciones.ListIndex
```

```
    Select Case intPosicion
```

```
        Case 0                                'puño
```

```
            Call Puno
```

```
        Case 1                                'uno
```

```
            Call Uno
```

```
        Case 2                                'dos
```

```
            Call Dos
```

```
        Case 3                                'tres
```

```
            Call Tres
```

```
        Case 4                                'cuatro
```

```
            Call Cuatro
```

```
        Case 5                                'cinco
```

```
            Call Cinco
```

```
    End Select
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdReset_Click()
```

```
    Call Form_Load
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
    Out &H378, 0
```

```
    acumMuneca = 5
```

```
    acumPulgar = 7
```

```
    acumIndice = 7
```

```
    acumMedio = 7
```

```
    acumAnular = 7
```

```
    scbMuneca.Value = 25
```

```
scbPulgar.Value = 19
scbIndice.Value = 25
scbMedio.Value = 25
scbAnular.Value = 25
```

```
Timer1.Enabled = False
Timer2.Enabled = False
```

```
End Sub
```

```
Private Sub scbPulgar_Change()
```

```
intPulgar = (26 - scbPulgar.Value)
lblPulgar.Caption = intPulgar
```

```
Call Pulgar
```

```
End Sub
```

```
Private Sub scbIndice_Change()
```

```
intIndice = (32 - scbIndice.Value)
lblIndice.Caption = intIndice
```

```
Call Indice
```

```
End Sub
```

```
Private Sub scbMedio_Change()
```

```
intMedio = (32 - scbMedio.Value)
lblMedio.Caption = intMedio
```

```
Call Medio
```

```
End Sub
```

```
Private Sub scbAnular_Change()
```

```
intAnular = (32 - scbAnular.Value)
lblAnular.Caption = intAnular
```

```
Call Anular
```

```
End Sub
```

```
Private Sub scbMuneca_Change()
```

```
intMuneca = (30 - scbMuneca.Value)
lblMuneca.Caption = intMuneca
```

Call Muneca

End Sub

Private Sub Pulgar()

Salida = 1

```
While (acumPulgar > intPulgar)
    Salida = Salida + 64
    acumPulgar = acumPulgar - 1
    Timer1.Enabled = True
Wend
```

Wend

```
While (acumPulgar < intPulgar)
    Salida = Salida + 32
    acumPulgar = acumPulgar + 1
    Timer1.Enabled = True
Wend
```

Wend

End Sub

Private Sub Indice()

Salida = 2

```
While (acumIndice > intIndice)
    Salida = Salida + 64
    acumIndice = acumIndice - 1
    Timer1.Enabled = True
Wend
```

Wend

```
While (acumIndice < intIndice)
    Salida = Salida + 32
    acumIndice = acumIndice + 1
    Timer1.Enabled = True
Wend
```

Wend

End Sub

Private Sub Medio()

Salida = 4

```
While (acumMedio > intMedio)
    Salida = Salida + 64
    acumMedio = acumMedio - 1
    Timer1.Enabled = True
Wend
```

Wend

```
While (acumMedio < intMedio)
    Salida = Salida + 32
    acumMedio = acumMedio + 1
Wend
```

```

        Timer1.Enabled = True
    Wend

End Sub

Private Sub Anular()

    Salida = 8

    While (acumAnular > intAnular)
        Salida = Salida + 64
        acumAnular = acumAnular - 1
        Timer1.Enabled = True
    Wend

    While (acumAnular < intAnular)
        Salida = Salida + 32
        acumAnular = acumAnular + 1
        Timer1.Enabled = True
    Wend

End Sub

Private Sub Muneca()

    Salida = 16

    While (acumMuneca > intMuneca)
        Salida = Salida + 64
        acumMuneca = acumMuneca - 1
        Timer1.Enabled = True
    Wend

    While (acumMuneca < intMuneca)
        Salida = Salida + 32
        acumMuneca = acumMuneca + 1
        Timer1.Enabled = True
    Wend

End Sub

Private Sub Timer1_Timer()

    Out &H378, Salida
    lblSalida.Caption = Salida

    If Salida > 64 Then
        Salida = Salida - 64
    Else
        Salida = Salida - 32
    End If

    Timer2.Enabled = True

```

```

        Timer1.Enabled = False
    End Sub

Private Sub Timer2_Timer()

    Out &H378, Salida
    lblSalida.Caption = Salida
    Timer2.Enabled = False

End Sub

Private Sub Mover()

    For i = 5 To 25
        If acumMuneca <> intMuneca Then
            Call Muneca
        End If
        If acumPulgar <> intPulgar Then
            Call Pulgar
        End If
        If acumIndice <> intIndice Then
            Call Indice
        End If
        If acumMedio <> intMedio Then
            Call Medio
        End If
        If acumAnular <> intAnular Then
            Call Anular
        End If

        scbMuneca.Value = 30 - acumMuneca
        scbPulgar.Value = 26 - acumPulgar
        scbIndice.Value = 32 - acumIndice
        scbMedio.Value = 32 - acumMedio
        scbAnular.Value = 32 - acumAnular
    Next i

End Sub

Private Sub Puno()

    intPulgar = 7
    intIndice = 7
    intMedio = 7
    intAnular = 7

    Call Mover

End Sub

Private Sub Uno()

```

```
intPulgar = 7  
intIndice = 25  
intMedio = 7  
intAnular = 7
```

```
Call Mover
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Dos()
```

```
intPulgar = 7  
intIndice = 25  
intMedio = 25  
intAnular = 7
```

```
Call Mover
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Tres()
```

```
intPulgar = 25  
intIndice = 25  
intMedio = 25  
intAnular = 7
```

```
Call Mover
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Cuatro()
```

```
intPulgar = 7  
intIndice = 25  
intMedio = 25  
intAnular = 25
```

```
Call Mover
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Cinco()
```

```
intPulgar = 25  
intIndice = 25  
intMedio = 25  
intAnular = 25
```

```
Call Mover
```

```
End Sub
```

Bibliografía

Flores, Juárez, Castillo, Dorador, "Actualidad y Tendencias en el Diseño de Prótesis de Miembro Superior", UNAM, 2004

Rios, Roether, "Diseño, Fabricación y Pruebas de un Prototipo de Mano para una Prótesis de Miembro Superior", UNAM, 2005

Santiago, Valenzuela, "Ergonomía de Miembro Superior", UNAM, 2005

Mediografía

Consultas realizadas en el año 2006

<http://www.latticesemi.com/products/cpldsp/d/gal.cfm>

http://www.microchip.com/stellent/idcplg/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1335&dDocName=en010241

<http://www.todorobot.com.ar/informacion/tutorial%20stepper/stepper-tutorial.htm>

<http://alek.pucp.edu.pe/cursos/pregrado/iee215/introduccion/introduccion.htm>