



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MECÁNICA – MECATRÓNICA

DISEÑO DE MANO CON UN MECANISMO HEXACICLOIDAL

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. EDUARDO GARIBAY CASTAÑEDA

TUTOR PRINCIPAL
DR. FRANCISCO CUENCA JIMÉNEZ FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Dorador González Jesús Manuel

Secretario: Dr. Rocha Cozatl Edmundo Gabriel

Vocal: Dr. Cuenca Jiménez Francisco

1^{er.} Suplente: M.I. Flores Luna Rosa Itzel

2^{d o.} Suplente: M.I. Diaz Montes Julio César

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Francisco Cuenca Jiménez

FIRMA

Dedico esta tesis:

A mis padres, por su amor y apoyo incondicional durante toda esta trayectoria académica. Por sus enseñanzas y por los valores que me han inculcado

A mi hermano, por su apoyo.

A mis amigos Jonathan, Ruben y Aura. Porque con ellos pase momentos muy agradables durante el desarrollo de este proyecto dentro del CDMIT.

A Marco Arturo Becerra, por todo el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

A Hugo Pedroza, por su amistad y apoyo durante los estudios de posgrado.

Agradezco al Dr. Francisco Cuenca Jiménez, por su valiosa dirección y apoyo para el desarrollo de esta tesis.

Agradezco a la profesora M.I. Rosa Itzel Flores, por su asesoramiento y excelentes consejos.

Agradezco al Dr. Jesús Manuel Dorador, por su apoyo para el desarrollo del proyecto.

A todos mis compañeros y amigos del Centro de diseño y manufactura.

Agradezco al CONACYT, por la beca brindada para poder realizar mis estudios de posgrado y el desarrollo de este proyecto.

Y en especial, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de continuar preparándome en la vida académica para el desarrollo de investigación en beneficio de la sociedad.

Índice general

INTRODUCCIÓN	VII
MOTIVACIÓN Y OBJETIVO	IX
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Mecanismos utilizados en prótesis de mano	1
1.1.1. Investigaciones recientes en diseños de manos	5
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. Biomecánica de la mano	10
2.2. Mecanismo bicicloidal	13
2.3. Relación angular entre engranes y eslabones	14
3. DISEÑO DEL MECANISMO	17
3.1. Especificaciones de diseño	18
3.2. Primera iteración	21
3.2.1. Ecuaciones de diseño	22
3.2.2. Síntesis del mecanismo	24
3.2.3. Diseño asistido por computadora del mecanismo	28
3.3. Segunda propuesta	30

3.3.1. Ecuaciones de diseño	31
3.3.2. Síntesis del mecanismo	36
3.3.3. Diseño asistido por computadora del mecanismo	38
3.3.4. Dedo anular, medio y meñique	39
3.4. Dedo pulgar	42
3.4.1. Ecuaciones de diseño	42
3.4.2. Síntesis del mecanismo	45
4. ANÁLISIS ESTÁTICO DEL MECANISMO	49
4.1. Resultados	58
5. SISTEMA DE ACTUACIÓN DEL MECANISMO	60
5.1. Motores de corriente directa	61
5.2. Micro-motorreductores	61
5.3. Servomotor	62
5.4. Motores a pasos	64
5.5. Selección del motor	65
6. SISTEMA ELECTRÓNICO	68
6.1. Circuito de encendido y apagado del motor	69
7. FABRICACIÓN	71
7.1. Impresión en la máquina de prototipos rápidos	71
7.2. Maquinado de los engranes	73
7.2.1. Corte por láser	73
7.2.2. Corte por chorro de agua	74
RESULTADOS Y PRUEBAS	76

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VI
CONCLUSIONES	82
RECOMENDACIONES	84
TRABAJO A FUTURO	85

INTRODUCCIÓN

En las prótesis de mano el mecanismo más utilizado es el de 4 barras. La razón principal para usarlo es porque mediante este tipo de mecanismo es posible generar una trayectoria específica que permita simular con mayor precisión la trayectoria del dedo humano en el movimiento de flexión (figura 1). Para lograr esto, no se utiliza un sólo mecanismo de 4 barras, en realidad se utiliza una serie de eslabones que pueden ser considerados como un conjunto de mecanismos de 4 barras.

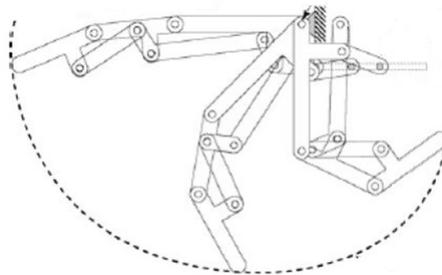


Figura 1: Mecanismo de 4 barras[1].

El mecanismo de 4 barras nos ofrece las siguientes características dentro de una prótesis de mano:

- Proporciona 1 GDL que ayuda a tener movimientos dependientes de las falanges.
- La fuerza de prensión se puede incrementar mediante un sistema de transmisión a la entrada, ubicada en la palma de la mano.

Con base en este conocimiento previo se decidió investigar qué otros tipos de mecanismos existen en la literatura que además de tener las características del mecanismo de 4 barras, presente alguna o algunas ventajas para su utilización en las prótesis de mano.

El presente trabajo tiene el propósito de mostrar el desarrollo del diseño de una mano utilizando un **mecanismo bicicloidal**. En el primer capítulo se describe el estado del arte de las prótesis de mano.

En el segundo capítulo se explica lo que es un mecanismo bicicloidal y los conceptos utilizados para realizar la síntesis.

En el tercer capítulo se describe el desarrollo seguido para el análisis del mecanismo bicicloidal. Se muestran las dos propuestas realizadas para el mecanismo que simula el movimiento de flexo-extensión de la mano.

En el cuarto capítulo se presenta el desarrollo del análisis estático del mecanismo. Se expone el par de torsión que se necesita en la entrada del mecanismo para una fuerza de prensión propuesta.

En el quinto capítulo se describe lo referente a la realización del movimiento de flexo-extensión del mecanismo utilizando actuadores. Se muestran cuales son los actuadores que se van a utilizar para dar movimiento al mecanismo, y la forma en como se va controlar el encendido y apagado de dichos actuadores para realizar el movimiento antes descrito.

En el sexto capítulo se explica la propuesta del circuito electrónico para controlar el movimiento de los motores y para realizar dos tipos de prensión.

En el séptimo capítulo se desarrolla la fabricación de las piezas para el prototipo de un dedo.

Por último se presenta el prototipo de un dedo, las recomendaciones, conclusiones y trabajo a futuro del proyecto desarrollado.

MOTIVACIÓN Y OBJETIVO

El **mecanismo bicicloidal** está basado en el principio de orientación de un cuerpo usando puntos cicloidales o puntos circulares (figura 2) con la característica de que el movimiento se genera en un punto del satélite de un tren planetario [2].

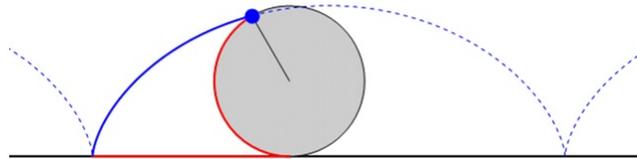


Figura 2: Movimiento cicloidal.

En la figura 3 se muestra una configuración del mecanismo bicicloidal. La descripción de la configuración presentada del mecanismo es la siguiente. El mecanismo está formado por 4 engranes planetarios y tres eslabones; los engranes 2, 3 y 4 están unidos a cada eslabón respectivamente, es decir, el engrane 2 se une al eslabón F formando un solo cuerpo. El movimiento del mecanismo se genera a partir del engrane 2; este engrane se mueve sobre el engrane 1 y transmite su movimiento al eslabón E que está unido al engrane 3 ya que estos dos engranes comparten el mismo eje, el engrane 4 se mueve sobre el engrane 3 y al realizarse este movimiento el eslabón G unido al engrane 4 se mueve, el engrane 1 es fijo.

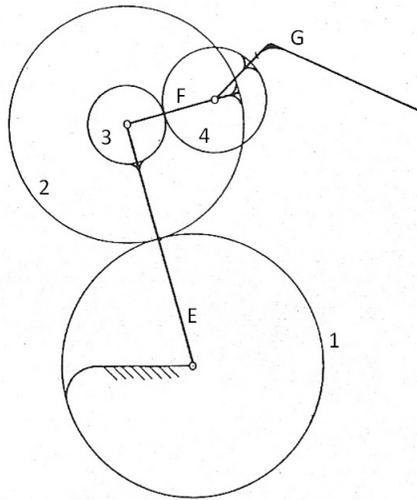


Figura 3: Mecanismo bicicloidal.

Las características de este mecanismo son [2]:

- Proporciona 2 GDL que ayuda a tener movimientos independientes de las falanges.
- La fuerza en la prensión se incrementa mediante engranes planetarios, ubicados en el mecanismo.
- Mediante la selección apropiada de los radios de paso de los engranes se puede lograr compactar el mecanismo.
- El diseño permite sustituir los engranes por bandas y poleas.

A partir de esto, el objetivo es explorar el comportamiento de una mano diseñada con un mecanismo bicicloidal. Para esto se realizarán los siguientes estudios.

1. Síntesis del mecanismo para obtener el seguimiento de la trayectoria que realiza un dedo al realizar la flexión.
2. Análisis estático del dedo para determinar el par de torsión a la entrada en relación a la fuerza de prensión ejercida.
3. Accionamiento del mecanismo para realizar dos de las cinco prensiones de la mano.

Capítulo 1

ANTECEDENTES

1.1. Mecanismos utilizados en prótesis de mano

Existen distintos modelos de prótesis de mano que van desde las pinzas mecánicas hasta las prótesis mioeléctricas, las cuales cuentan con mecanismos más complejos que realizan un movimiento más semejante al movimiento natural de la mano humana. En este capítulo se describen los mecanismos más destacados que se utilizan para generar el movimiento de flexión-extensión de los dedos y en algunos casos la oposición del pulgar, en algunos modelos para prótesis de mano.

Uno de los sistemas más antiguos y más ampliamente utilizados en el campo de las prótesis para lograr este movimiento de flexión-extensión en los dedos es mediante el uso de cables y poleas [3]. En la mayoría de los casos las poleas se encuentran ubicadas en las articulaciones (figura 1.1), sobre ellas pasa un cable que está fijo por uno de sus extremos en alguna falange, por lo general en la distal (la última), el otro extremo del cable está conectado a la salida del sistema de actuación o si es el caso al de reducción. Cuando es aplicada una carga, del sistema de actuación al cable, éste último se desliza a través de la polea y mueve la falange y por consecuencia la articulación del dedo.

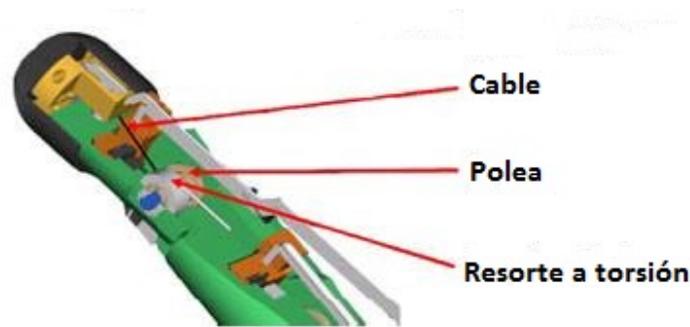
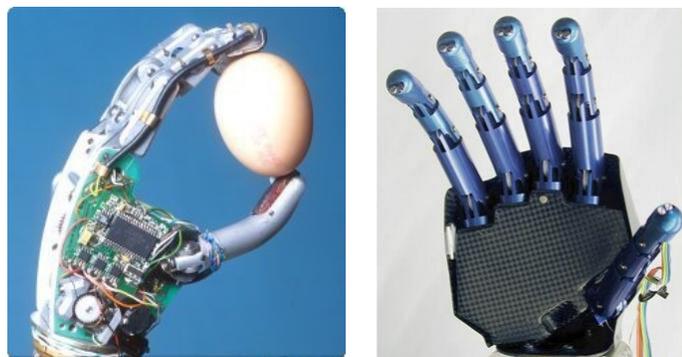


Figura 1.1: Mecanismo de polea en la mano RCH-1 [4].

En algunos proyectos se ha optado por usar un sólo cable en cada dedo para lograr la flexión (conectado a la falange distal), eso trae como beneficio inmediato la disminución en el número de actuadores, aunque por otro lado se requiere de otro dispositivo que produzca la extensión del dedo, la tendencia para resolver este inconveniente es el uso de resortes a torsión ubicados en las articulaciones (figura 1.2), como es el caso de proyectos como *Cyberhand* [5], *RCH-1* [4] y *RTR II* [6] de la Scuola Superiore Sant' Anna y *Icub Hand* [7]. Se emplea este arreglo debido a la sencillez en su funcionamiento, alta flexibilidad y ligereza, sin embargo sus principales inconvenientes son que sólo puede utilizarse en tensión, sólo puede transmitir cargas relativamente pequeñas y se tiene que ajustar periódicamente la tensión en el cable. Además, se requiere que el sistema de actuación produzca un movimiento lineal, provocando con eso la utilización de un componente adicional que transforme el movimiento rotativo en lineal. El uso de este mecanismo de actuación presenta una característica que resulta sumamente útil para las manos protésicas, los dedos se pueden adaptar de mejor manera a la forma de los objetos logrando un mejor agarre.



a) Cyberhand [5]

b) RCH-1 [4]

Figura 1.2: Flexión utilizando solo un cable por dedo.

Otra forma de lograr el movimiento de los dedos es a través de cables en arreglo opuesto, es decir, un cable produce el movimiento en una dirección y otro cable lo produce en sentido contrario (figura 1.3).

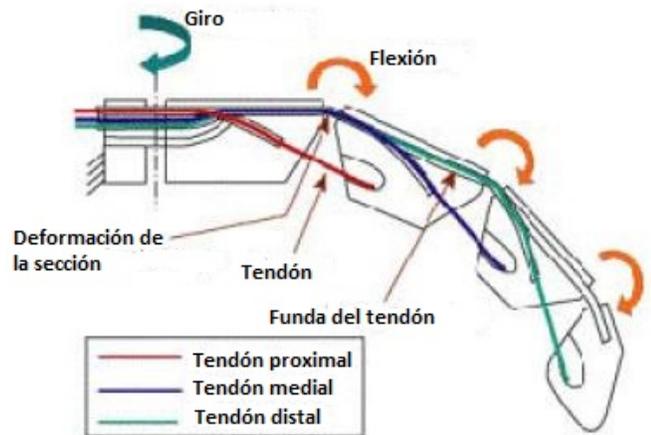


Figura 1.3: Mecanismo de cables en la mano UB Hand 3 [8].

La desventaja de esto, es que por lo general se requiere un actuador para cada cable, lo que provoca un aumento en la cantidad de actuadores. Este arreglo es usado en los proyectos *MANUS Hand*[9], *Blackfingers*[10] del Politécnico de Milano, *UB Hand 3*[8] desarrollado en la Universidad de Bologna y *Shadow Hand*[11] creado en Shadow Robot Company. Con este tipo de arreglo se logra controlar tanto la velocidad de flexión como de extensión de los dedos.



a) Shadow Hand[11].

b) UB Hand 3[8].

Figura 1.4: Flexión utilizando cables en arreglo opuesto.

También se ha logrado el movimiento de los dedos mediante mecanismos compuestos por barras, que es una secuencia cerrada de eslabones conectados por articulaciones, el más común y más fácil de analizar es el de 4 barras (figura 1.5).

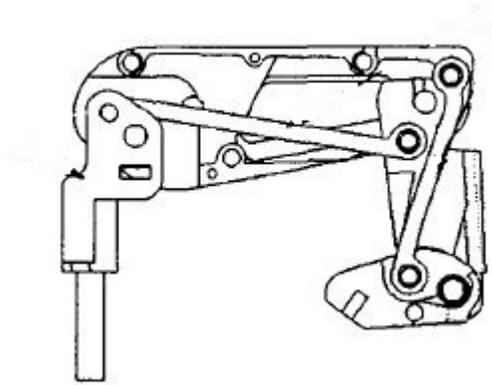
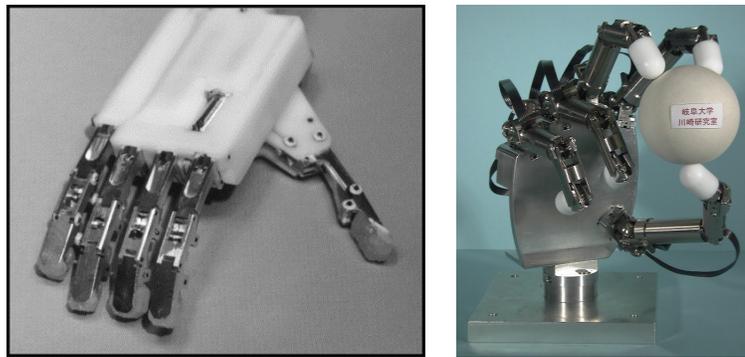


Figura 1.5: Mecanismo de 4 barras en la mano Robonaut [12].

La razón principal para usarlos es porque mediante este mecanismo se puede lograr generar una trayectoria específica para uno o más puntos del mecanismo y esto se puede utilizar para lograr la trayectoria deseada en alguna de las falanges y así simular la trayectoria del dedo humano en un movimiento de flexión, además se logra buena precisión en los movimientos con mecanismos sencillos que pueden ser fabricados de una amplia variedad de materiales. Desafortunadamente este mecanismo genera movimientos sobre un plano y si no se realiza un buen diseño el mecanismo puede tener posiciones de bloqueo [3]. En las prótesis de mano no se utiliza un solo mecanismo de este tipo para lograr el movimiento de los dedos, realmente se utiliza una serie de eslabones que pueden ser considerados como un conjunto de mecanismos de 4 barras.

Los proyectos en los cuales alguno de los dedos es movido por mecanismos de barras son *Goldfinger* [13] desarrollado ya hace algunos años en la Universidad de Clemson, *HIT/DLR Hand* [14] del Centro Alemán con el Instituto de Tecnología de Harbin, *Oxford Hand*[15], *Robonaut Hand*[16] de la NASA, *TBM Hand*[17] desarrollado en la Universidad de Toronto, *Southampton-Remedi Hand*[18] de la Universidad de Southampton, *Centri*[19] comercializado por la empresa que lleva el mismo nombre y *Gifu Hand*[20] de la Universidad de Gifu en Japón. A diferencia de lo que pasa con los cables, los mecanismos de barras pueden funcionar cuando son alimentados con movimientos tanto circulares como rectos.



a) TBM Hand[17].

b) Gifu Hand[20].

Figura 1.6: Flexión utilizando mecanismos de 4 barras.

1.1.1. Investigaciones recientes en diseños de manos

La mano KNU (2008) diseñada por Jun-Uk, Dong-Hyung y Yun-Jung [21] tiene las siguientes tres características funcionales: la primera, los cuatro dedos se adaptan a la forma de los cuerpos y cuentan con un mecanismo de bloqueo al realizar la prensión (figura 1.7); la segunda, para cada uno de los dedos las tres falanges se pueden flexionar independientemente para tomar un objeto con diferentes puntos de contacto; y la tercera, el pulgar también cuenta con sus tres falanges las cuales se pueden adaptar a los objetos como en el caso de los otros dedos y se puede realizar el movimiento de abducción-aducción. Adicionalmente, el número de motores está limitado a sólo dos por cada par de dedos, y están sobre la palma.

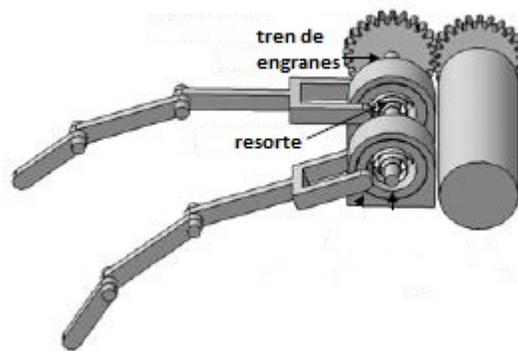


Figura 1.7: Mecanismo de accionamiento y bloqueo de los dedos de la mano KNU [21].

El mecanismo para realizar lo antes descrito está basado en un resorte (figura 1.7). En este mecanismo, un resorte torsional se adapta al movimiento relativo de los dedos cuando se toma un objeto con forma irregular. El diseño de los dedos está basado en un mecanismo de 7 barras (figura 1.8), cada uno de ellos cuenta con las tres falanges y tiene 3 grados de libertad cada uno, por otro lado el pulgar tiene cuatro grados de libertad.

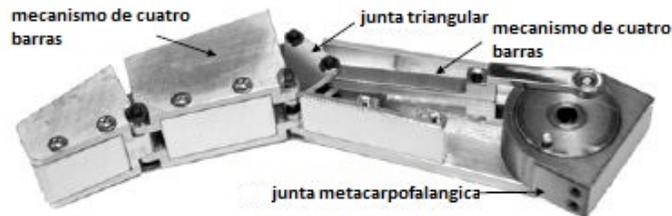


Figura 1.8: Dedo de la mano KNU [21].

El diseño de la mano robótica con tres dedos accionados por medio de tendones realizada por Sung-Yoon, Sung-kyun Kang, Myoung-Jun Lee y Inhyuk [22], se caracteriza por utilizar tendones para su accionamiento. La mano consiste en el pulgar, el índice y el medio, cada uno con cuatro grados de libertad. La flexión del dedo se realiza al jalar un cable usando un motor de corriente directa. Cuando la falange proximal se mueve mediante la tensión del cable, la falange medial-distal se mueve simultáneamente por medio de un eslabón unido al mecanismo. La extensión del dedo se realiza por la deformación de un resorte.

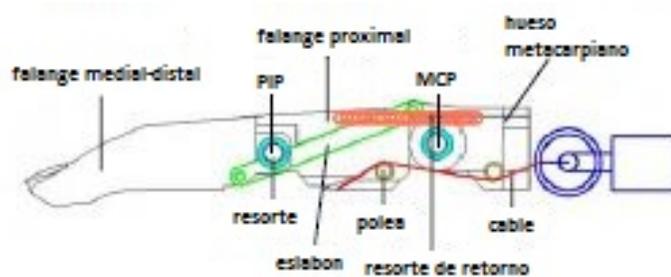


Figura 1.9: Dedo índice y medio [22].

La mano **Cyberhand** [5] cuenta con 16 grados de libertad y solo 4 motores que mueven 5 dedos subactuados basados en el mecanismo de Hirose's. La principal ventaja de este mecanismo en las manos protésicas (donde hay restricciones de talla y peso previniendo el uso de muchos actuadores), es el uso de un tendón simple (conectado a un actuador) en cada una de las falanges de cada dedo para que al entrar en contacto con el objeto que se toma, se obtenga un agarre estable.

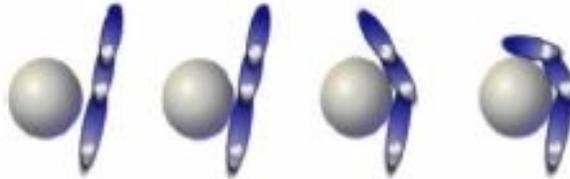


Figura 1.10: Dedo sobreactuado basado en el dedo de Hirose's [5].

De acuerdo a los tres ejemplos presentados, se puede concluir que en años recientes se ha investigado la posibilidad de combinar mecanismos de barras con resortes a tensión o compresión para realizar un movimiento de flexión y extensión de los dedos más natural y con esto también obtener una mejor prensión.

Por otro lado, las investigaciones más recientes que se encontraron de manos robóticas o protésicas en donde se utilizan engranes como parte del mecanismo del dedo para realizar el movimiento de flexo-extensión, son las siguientes:

La mano NTU realizada por Li-Ren Lin y Han-Pang Huang de la Universidad Nacional de Taiwan [23] tiene diecisiete grados de libertad y cada dedo se mueve individualmente. El dedo de la mano NTU consiste en la falange distal, medial y proximal. Cada falange del dedo, excepto la distal, contiene un micromotor de alta potencia que produce movimiento a un tren de engranes especialmente ordenado para rotar la falange anterior como se muestra en la siguiente figura.

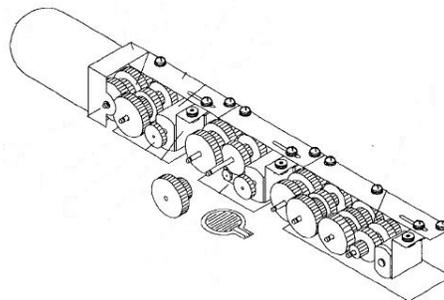


Figura 1.11: Configuración del dedo de la mano NTU [23].

El pulgar y el primer dedo, tienen cada uno cuatro grados de libertad que proveen de movimientos aproximadamente antropomórficos similares a la mano humana.

La patente 005378033 **MULTI-FUNCTION MECHANICAL HAND WITH SHAPE ADAPTATION**[24] realizada por Gongliang Geo, Xikang Qian y William A. Graver. Es una mano mecánica para uso en aplicaciones protésicas y robóticas. Los dedos están unidos a una placa central movible, el movimiento de la placa en direcciones opuestas causa que los dedos se flexionen y se enderecen. Cada dedo incluye una base, un brazo de palanca y falanges múltiples que están interconectadas por medio de engranes. El movimiento principal del brazo de palanca se transmite a las falanges a través de la interconexión entre éstas, el brazo de palanca y el movimiento de rotación de los engranes. El subensamble de la palma también incluye un espacio entre cada dedo que fija las posiciones relativas de los dedos, la orientación del dedo en la placa, cuando rota cambia la orientación de los dedos y de los planos en los que flexionan. Otra característica importante es que esta mano solo cuenta con tres dedos.

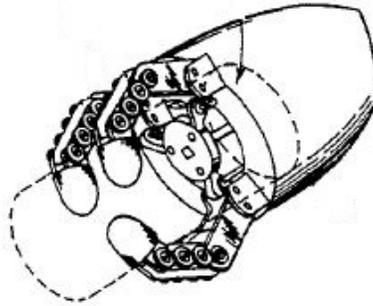
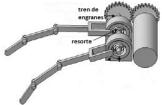
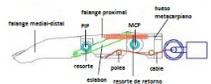
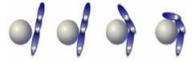
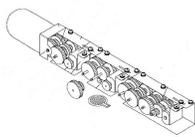


Figura 1.12: Multi-function mechanical hand [24].

La tabla 1.1 comparativa muestra en resumen las características de las manos antes descritas.

Tabla 1.1: Tabla comparativa.

Nombre	Imagen	Características	Mecanismo
KNU Hand		Los cuatro dedos se adaptan a la forma de los cuerpos. Para cada dedo las tres falanges se pueden flexionar independientemente. El dedo pulgar puede realizar el movimiento de abducción-aducción.	Diseño de los dedos se basa en un mecanismo de 7 barras.
Mano Robótica (Sung-Yoon)		La mano consiste en el pulgar, el índice y el medio, cada uno con cuatro grados de libertad. Se acciona al jalar un cable usando un motor de corriente directa.	Tendones y mecanismos de 4 barras.
Cyberhand		Uso de un tendón simple en cada una de las falanges de cada dedo. Cuenta con 16 grados de libertad.	Mecanismo de Hirose's .
NTU		Tiene 17 grados de libertad y cada dedo se mueve individualmente. Cada falange, excepto la distal cuenta con un micromotor de alta potencia que produce el movimiento.	Tren de engranes.
Patente 005378033		Cada dedo incluye una base, un brazo de palanca y falanges múltiples que están interconectadas por medio de engranes. Solo cuenta con tres dedos.	Tren de engranes.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

Para entender mejor el funcionamiento de la mano desde el punto de vista de la mecánica, es importante comentar algunos ejemplos de la biomecánica de la mano.

Por otro lado, uno de los estudios que se realizará en esta tesis es la síntesis del mecanismo bicicloidal para encontrar el mecanismo que mejor se aproxima a la trayectoria de flexión del dedo. La manera en como se realizó esto es por medio de la síntesis con números complejos.

En este capítulo se describen conceptos básicos de la biomecánica de la mano, se describe lo que es un mecanismo bicicloidal y algunos conceptos necesarios para la síntesis del mecanismo.

2.1. Biomecánica de la mano

La biomecánica es un conjunto de conocimientos derivados de la física que tienen como objetivo estudiar todos los fenómenos biológicos, en especial el cuerpo humano. La mecánica (una rama de la física) posee métodos propios que pueden aplicarse al estudio de los seres vivos, de esta manera, la biomecánica aporta un enfoque útil en el estudio y solución de los problemas que afectan al hombre[25].

La mano humana desde un punto de vista biomecánico se puede considerar como un sistema compuesto de segmentos óseos equilibrados por fuerzas tendinosas y musculares y con restricciones articulares [1].

La mano puede adecuarse a la forma de los objetos que sujeta, gracias a su movilidad, la cual es debida a la disposición y dimensiones de las estructuras óseas de que está conformada [1].

Cada dedo está conformado por tres falanges, un metacarpiano y tres articulaciones, formando una cadena de segmentos articulados, la cual se estabiliza y controla por medio de una compleja distribución de músculos intrínsecos y extrínsecos [1].

Existe una forma de calcular las longitudes de las falanges y metacarpianos de cada dedo, para una persona en particular, consiste en usar la serie de **Fibonacci**, de manera que la longitud de cada hueso, desde el distal hasta el proximal, es la suma de la longitud de los dos anteriores (1, 2, 3, 5, 8,...). Esta relación matemática es útil cuando no se conoce la longitud correcta de una falange o metacarpiano de algún dedo, ya que si se conoce la longitud de otro hueso largo del mismo dedo se puede determinar la longitud correcta de los demás.

El término cadena cinemática se puede aplicar al conjunto de huesos y articulaciones que conforman cada uno de los dedos [26]. El dedo índice y el dedo pulgar forman una cadena cinemática cerrada cuando juntan sus yemas en un pellizco, con los huesos metacarpianos y del carpo cerrando la cadena. Estas cadenas se pueden estudiar de forma cinemática o dinámica, sin embargo debido a que los movimientos de las manos y los dedos son lentos, los efectos inerciales son normalmente despreciables, lo que permite que se analicen de manera estática.

Como ejemplos de la biomecánica de la mano, se describen cómo se pueden estudiar las articulaciones interfalángicas y algunos de los movimientos de las articulaciones de los dedos. Sólo se hablará a grandes rasgos de la biomecánica, por tal motivo se recomienda consultar las referencias para mayor información ([25],[26]).

Las articulaciones interfalángicas se pueden estudiar como una analogía a una polea, en donde la polea está representada por la cabeza de la falange medial y la cuerda que desliza por la misma corresponde al tendón flexor base de la falange distal. Claro está que la comparación no es exacta, sin embargo la aproximación es aceptable para el fin último.

Dentro de los distintos movimientos, las articulaciones interfalángicas (IF) se pueden considerar como articulaciones tipo bisagra que brindan movimientos de flexión y extensión. Las articulaciones metacarpofalángicas (MCF) se consideran articulaciones universales, ya que no sólo se ejecuta movimiento de flexión-extensión con un rango de 90°, sino también de abducción-aducción, con un rango de movimiento de 20°-30° cuando los dedos están extendidos. Al estudiar en conjunto los movimientos de las articulaciones anteriores durante el movimiento de flexo-extensión, se puede ver que las articulaciones MCF e IF consiguen que el dedo describa una trayectoria. El estudio del recorrido de flexo-extensión muestra que está dividido en dos fases diferentes [26]:

1. La fase metacarpofalángica, que supone un 77% del rango de movimiento.
2. La fase interfalángica, que supone un 23% del rango de movimiento. Ver figura 2.1

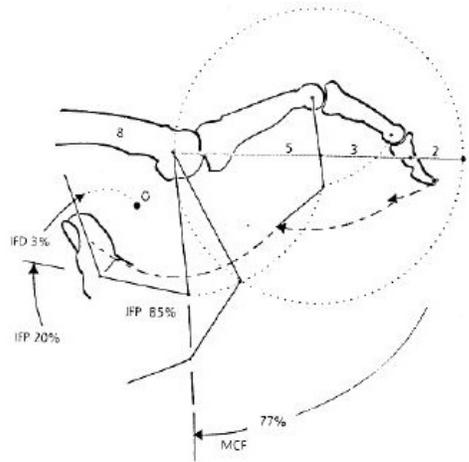


Figura 2.1: Rangos de movimiento de las falanges [26].

La articulación IFP contribuye en un 85% a obtener el movimiento total, mientras que la articulación IFD aporta un 15% por tanto es más funcional la articulación IFP y es ésta la que se deberá de preservar íntegra [1].

Para conocer la cinemática entre las distintas falanges de los dedos es necesario conocer la relación que existe entre la localización de los segmentos óseos y los desplazamientos sufridos por los tendones que actúan en el dedo. Los autores Buchner, Himes y Hemami [27] plantearon un modelo analítico sobre el plano en donde relacionan los giros entre las diferentes articulaciones del dedo con los desplazamientos de los principales tendones que trabajan en el plano sagital durante la flexión.

2.2. Mecanismo bicicloidal

En un mecanismo bicicloidal los puntos de los cuerpos generan patrones cicloidales o circulares.

El **mecanismo bicicloidal** [2] (figura 2.2), es un mecanismo basado en el principio antes mencionado. Utiliza el movimiento relativo entre elementos que tienen movimiento planetario para controlar la orientación angular del último eslabón y la posición de un punto del mismo.

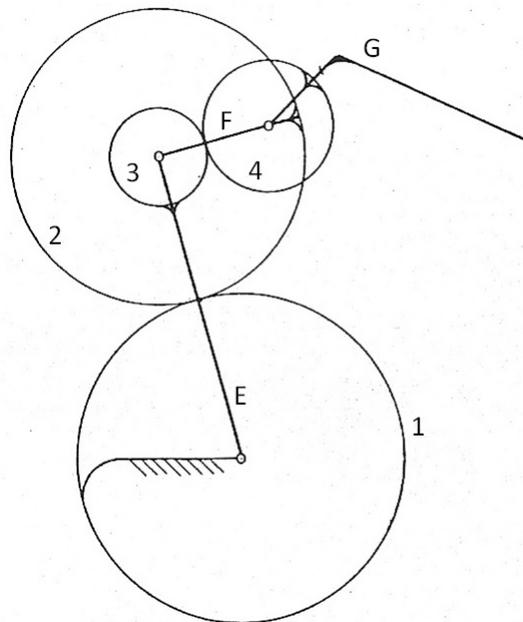


Figura 2.2: Mecanismo Bicicloidal [2].

Con este mecanismo la síntesis de movimiento finito puede alcanzar a determinar un máximo de cinco posiciones. Para la generación de trayectoria es posible generar hasta nueve posiciones finitas o hasta un contacto de noveno orden en el caso de posiciones separadas infinitesimalmente. Usando la velocidad constante del eslabón de entrada se puede alcanzar un contacto de quinto orden en la síntesis con derivadas con respecto al tiempo.

Existen muchas aplicaciones prácticas para este mecanismo, especialmente como un generador de movimiento de cuatro posiciones o como un generador de trayectoria de siete posiciones en maquinaria de alta velocidad.

Un eslabonamiento de engranes ofrece (a) balance perfecto (eliminación de vibraciones); (b) transmisión constante; (c) no existen puntos muertos; (d) control de la secuencia del tiempo en algunos casos; (e) montaje de ejes coaxiales; (f) una elección de cogonados y (g) una variedad de posibles modificaciones.

En el mecanismo bicicloidal el movimiento de los engranes y eslabones están relacionados, debido a la estructura de tren planetario. En la siguiente sección se establecerá la relación angular entre estos, que será utilizada en las ecuaciones de diseño.

2.3. Relación angular entre engranes y eslabones

De la teoría de trenes de engranes [28], método de la fórmula, ec.(7.24), se tiene:

$$\frac{\omega_{LA}}{\omega_{FA}} = \frac{\omega_L - \omega_A}{\omega_F - \omega_A} = \frac{\text{Producto del número de dientes de los engranes impulsores}}{\text{Producto del número de dientes de los engranes impulsados}} \quad (2.1)$$

Donde:

ω_{LA} .- velocidad angular del último engranes relativo al brazo

ω_{FA} .- velocidad angular del primer engrane relativo al brazo

ω_L .- velocidad angular absoluta del último engrane

ω_F .- velocidad angular absoluta del primer engrane

ω_A .- velocidad angular absoluta del brazo

Aplicando la ecuación anterior a la figura 2.3, se tiene:

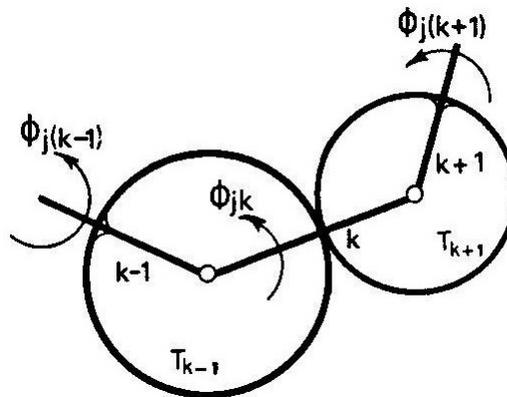
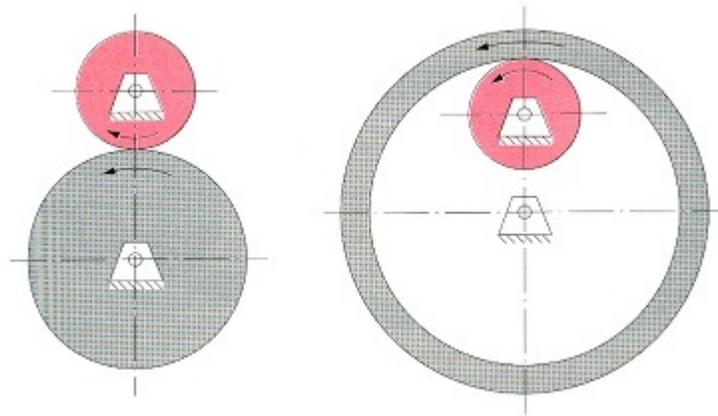


Figura 2.3: Relación entre engranes y eslabones.

$$\frac{\omega_{k+1} - \omega_k}{\omega_{k-1} - \omega_k} = \pm \frac{T_{k-1}}{T_{k+1}}$$

$$\omega_{k+1} - \omega_k = \pm \frac{T_{k-1}}{T_{k+1}} (\omega_{k+1} - \omega_k)$$

Donde T = *número de dientes de engranes* y los signos \pm es para indicar si el tren es externo (signo negativo = giran contrarios) o si el tren es interno (signo positivo = giran igual), figura 2.4.



a) Contacto externo. b) Contacto interno.

Figura 2.4: Contacto entre engranes.

También:

$$\frac{d\phi_{k+1}}{dt} - \frac{d\phi_k}{dt} = -\frac{T_{k-1}}{T_{k+1}} \left(\frac{d\phi_{k-1}}{dt} - \frac{d\phi_k}{dt} \right)$$

Multiplicando por dt:

$$d\phi_{k+1} - d\phi_k = -\frac{T_{k-1}}{T_{k+1}} (d\phi_{k-1} - d\phi_k)$$

Integrando para obtener posiciones angulares:

$$\int_{\phi_0}^{\phi} d\phi_{(k+1)} - \int_{\phi_0}^{\phi} d\phi_k = -\frac{T_{k-1}}{T_{k+1}} \left(\int_{\phi_0}^{\phi} d\phi_{(k-1)} - \int_{\phi_0}^{\phi} d\phi_k \right)$$

$$[\phi_{(k+1)} - \phi_{0(k+1)}] - [\phi_k - \phi_{0(k)}] = -\frac{T_{k-1}}{T_{k+1}} ([\phi_{(k-1)} - \phi_{0(k-1)}] - [\phi_k - \phi_{0(k)}])$$

$$\Delta\phi_{j0(k+1)} - \Delta\phi_{j0(k)} = -\frac{T_{k-1}}{T_{k+1}} (\Delta\phi_{j0(k-1)} - \Delta\phi_{j0(k)})$$

Sea el incremento $\Delta\phi_{j0}$ de ϕ a partir de la *posición inicial 0* a la *j-ésima posición* al ser denotado por ϕ_j , se tiene:

$$\phi_{j(k+1)} - \phi_{jk} = -\frac{T_{k-1}}{T_{k+1}} (\phi_{j(k-1)} - \phi_{jk}) \quad (2.2)$$

También:

$$\frac{\phi_{j(k+1)} - \phi_{jk}}{\phi_{j(k-1)} - \phi_{jk}} = \pm \frac{T_{k-1}}{T_{k+1}} \quad (2.3)$$

Además:

ϕ_{jk} - es el ángulo del eslabón k, a partir de su posición inicial a su *j-ésima* posición.

$\phi_{j(k+1)}$ - es el ángulo girado del eslabón (k+1), a partir de su posición inicial a su *j-ésima* posición.

$\phi_{j(k-1)}$ - es el ángulo girado del eslabón (k-1), a partir de su posición inicial a su *j-ésima* posición.

Despejando $\phi_{j(k+1)}$ a partir de la ec. (2.3), para un tren externo se tiene:

$$\phi_{j(k+1)} = \phi_{jk} + (\phi_{jk} - \phi_{j(k-1)}) \frac{T_{k-1}}{T_{k+1}} \quad (2.4)$$

La expresión 2.4 es de utilidad en la realización de la síntesis del mecanismo, usando ésta expresión se va relacionar el movimiento de los eslabones y los engranes que conforman el mecanismo bicicloidal para obtener las ecuaciones que representan el movimiento.

Capítulo 3

ESPECIFICACIONES DE DISEÑO Y SÍNTESIS DEL MECANISMO BICICLOIDAL

En este capítulo se presentan las especificaciones de diseño, la síntesis del mecanismo bicicloidal, el ensamble de la carcasa con el mecanismo y comentarios sobre los resultados obtenidos.

Se muestran las ecuaciones de diseño para realizar la síntesis del mecanismo, las cuales se basan en las ecuaciones de desplazamiento lineal y angular entre engranes y eslabones para satisfacer tanto la trayectoria propuesta del movimiento de flexo-extensión, como la orientación de la última falange del dedo índice de la mano derecha.

Para el dedo índice se muestran dos iteraciones obtenidas, ambas restringidas por las medidas antropométricas del dedo previamente estudiadas en el trabajo de investigación “Diseño de una prótesis mecatrónica” [1].

Usando el mismo procedimiento se realizó la síntesis para el dedo medio, anular y meñique, y se muestran los resultados obtenidos. En el caso del dedo pulgar se establecieron ecuaciones de diseño diferentes puesto que cuenta con solo dos falanges y no tres como en los otros cuatro dedos.

Cabe recordar que el objetivo de la tesis es obtener una mano que realice los movimientos básicos para realizar dos prensiones. Cuando en el diseño del dedo se utilizan mecanismos de 4 barras, para realizar movimientos básicos es necesario como mínimo un grado de libertad para cada dedo. Esto se puede justificar mediante la teoría de mecanismos, ya que para definir la posición y orientación de un mecanismo de 4 barras sólo es necesario un grado de libertad, es decir, solo necesitamos definir la posición del primer eslabón para mover los otros tres eslabones. El mecanismo bicloidal es en realidad un mecanismo de dos grados de libertad, en donde uno de ellos es bloqueado al considerarlo como parte de la base. Esto permite satisfacer los movimientos básicos, sin embargo al poder mover el otro grado de libertad, podemos generar movimientos más complejos.

3.1. Especificaciones de diseño

Las especificaciones objetivo de la mano se establecieron tomando en cuenta las necesidades que se creyeron importantes de mejorar (funcionamiento, peso, etc.) con respecto a otros tipos de prótesis existentes en el mundo.

Funcionamiento

El propósito de la mano es realizar algunos de los movimientos de la mano humana, teniendo como prioridad la precisión y el par de torsión necesario para lograr mover el mecanismo empleado para el diseño de los dedos. La mano diseñada reemplazará una mano izquierda y contará con cinco dedos; los cuatro dedos se moverán de manera independiente.

Los movimientos que podrá realizar la mano son los siguientes:

1. La mano se encontrará normalmente abierta y podrá realizar el movimiento de flexión y extensión.
2. El prototipo de mano realizará presión en punta fina con la punta de los dedos.
3. El ángulo que se moverán los dedos será de 90° .

Los dedos realizarán los movimientos siguientes: los cuatro dedos (índice, medio, anular y meñique) podrán flexionarse y extenderse simulando el movimiento natural de los dedos, el dedo pulgar realizará el movimiento de oposición además de flexionarse y extenderse.

La mano podrá realizar diferentes posiciones preestablecidas al combinarse los movimientos independientes de cada dedo, centrando la funcionalidad en las características del mecanismo empleado para el diseño de los dedos.

Ambiente

La mano será diseñada con base en las medidas antropométricas de una mano de un hombre adulto de 25 años de edad y será funcional bajo las siguientes condiciones y restricciones:

1. Las condiciones ambientales en las cuales trabajará la mano serán los estándares de la Ciudad de México, es decir, una temperatura de 23 °C, una presión atmosférica de 78kPa y una humedad relativa del 65 %
2. No podrá ser sumergida ni expuesta a ningún líquido.
3. Podrá ser utilizada en actividades de la vida cotidiana, tales como tomar una hoja de papel o un vaso.

Tiempo de vida

Se busca que tenga una vida útil mayor a las manos existentes. Al utilizar engranes dentro del mecanismo de los dedos se considera deseable que estos tengan el mínimo mantenimiento.

Instalación y mantenimiento

Para la instalación y mantenimiento no se requerirán de herramientas especiales.

Se realizará un mantenimiento preventivo cada 6 meses en donde se checará de manera periódica el estado de los engranes. Revisando sobre todo el estado de los dientes ya que estos son los primeros que sufren desgaste por uso.

Tamaño

El tamaño de la mano será equivalente al de la mano de un hombre de edad promedio de acuerdo a tablas antropométricas de la Ciudad de México ([36], [37], [38]).

Peso

El peso de la mano se busca que sea menor o que por lo menos sea igual al de las prótesis mioeléctricas existentes, teniendo como límite el peso de 800 [g]. Se está limitando a este peso, ya que en este momento sólo se busca un prototipo funcional.

Estética y apariencia final

La mano se recubrirá con un guante para que le de un aspecto más natural. La parte electrónica se ubicará en el antebrazo, el cual llevará un plástico como recubrimiento para aislar los elementos electrónicos.

Material

La baja densidad y la alta resistencia son características primordiales en el diseño de una mano para uso protésico, se utilizarán materiales que cumplan con estas características y que además sean fáciles de conseguir y maquinar. Estos materiales pueden ser: Aluminio, polímero ABS o Duraluminio.

Cliente

El fin del diseño de esta mano es poder utilizarla como una prótesis de mano para que el usuario se reincorpore a su vida diaria.

3.2. Primera iteración

En la figura 3.1 se muestra el diagrama del mecanismo bicicloidal.

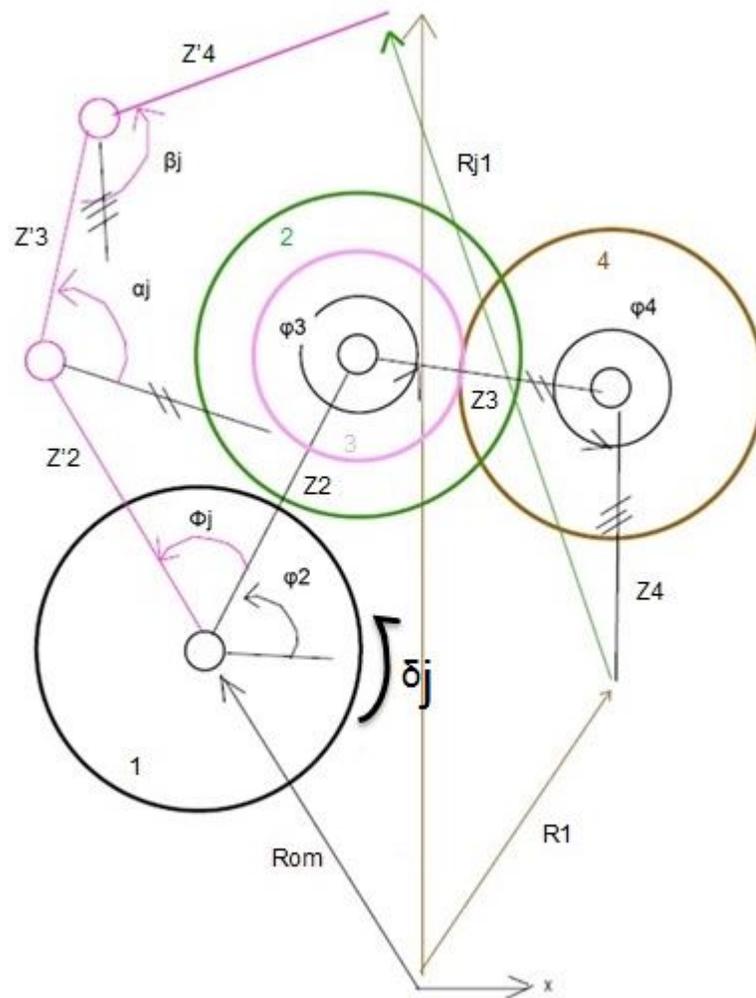


Figura 3.1: Primer Mecanismo Bicicloidal.

3.2.1. Ecuaciones de diseño

La ecuación de lazo cerrado se escribe como:

$$\mathbf{Z}'_2 + \mathbf{Z}'_3 + \mathbf{Z}'_4 - \mathbf{R}_{j1} - \mathbf{Z}_4 - \mathbf{Z}_3 - \mathbf{Z}_2 = \vec{0} \quad (3.1)$$

Donde:

$$\mathbf{Z}'_2 = Z_2 e^{i(\varphi_2 + \phi_j)} = Z_2 (e^{i\varphi_2} e^{i\phi_j}) = \mathbf{Z}_2 e^{i\phi_j}$$

$$\mathbf{Z}'_3 = Z_3 e^{i(\varphi_3 + \alpha_j)} = Z_3 (e^{i\varphi_3} e^{i\alpha_j}) = \mathbf{Z}_3 e^{i\alpha_j}$$

$$\mathbf{Z}'_4 = Z_4 e^{i(\varphi_4 + \beta_j)} = Z_4 (e^{i\varphi_4} e^{i\beta_j}) = \mathbf{Z}_4 e^{i\beta_j}$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación 3.1 obtenemos:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_2 e^{i\phi_j} + \mathbf{Z}_3 e^{i\alpha_j} + \mathbf{Z}_4 e^{i\beta_j} - \mathbf{R}_{j1} - \mathbf{Z}_4 - \mathbf{Z}_3 - \mathbf{Z}_2 &= 0 \\ \mathbf{Z}_2 (e^{i\phi_j} - 1) + \mathbf{Z}_3 (e^{i\alpha_j} - 1) + \mathbf{Z}_4 (e^{i\beta_j} - 1) &= \mathbf{R}_{j1} \end{aligned} \quad (3.2)$$

A partir de la relación angular se definen las siguientes ecuaciones.

Engranés 1 y 3

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_j - \phi_j}{\delta_j - \phi_j} &= -\frac{T_1}{T_3} \\ \alpha_j &= -\frac{T_1}{T_3} (\delta_j - \phi_j) + \phi_j \\ \alpha_j &= \left(1 + \frac{T_1}{T_3}\right) \phi_j \\ \alpha_j &= (1 + re_1) \phi_j \\ \alpha_j &= Q \phi_j \end{aligned} \quad (3.3)$$

Engranés 2 y 4

$$\begin{aligned} \frac{\beta_j - \alpha_j}{\phi_j - \alpha_j} &= -\frac{T_2}{T_4} \\ \beta_j &= -\frac{T_2}{T_4} (\phi_j - \alpha_j) + \alpha_j \\ \beta_j &= -re_2 (\phi_j - \alpha_j) + \alpha_j \\ \beta_j &= (1 + re_2) \alpha_j - \phi_j re_2 \\ \beta_j &= (1 + re_2) (1 + re_1) \phi_j - \phi_j re_2 \\ \beta_j &= (1 + re_1 + re_2 + re_1 re_2 - re_2) \phi_j \\ \beta_j &= (1 + re_1 + re_1 re_2) \phi_j = S \phi_j \\ \beta_j &= S \phi_j \end{aligned} \quad (3.4)$$

Para generar movimiento damos el ángulo β_j y los puntos de la trayectoria, los cuales se mostrarán más adelante.

Al dar el ángulo β_j necesitamos dejar ϕ_j y α_j en función de ese ángulo.

De ecuación 3.4:

$$\phi_j = \frac{1}{S} \beta_j \quad (3.5)$$

Sustituyendo la ecuación 3.5 en 3.3:

$$\begin{aligned} \alpha_j &= Q \left(\frac{1}{S} \beta_j \right) \\ \alpha_j &= \frac{Q}{S} \beta_j \end{aligned} \quad (3.6)$$

Las ecuaciones 3.2, 3.5 y 3.6 se usan para generar movimiento.

Donde:

$$\begin{aligned} Q &= 1 + re_1 \\ S &= 1 + re_1 + re_1 re_2 \end{aligned}$$

Las ecuaciones que representan la longitud de cada falange son las siguientes:

$$\begin{aligned} Z_2 &= x_2 + y_2 * I \\ Z_3 &= x_3 + y_3 * I \\ Z_4 &= x_4 + y_4 * I \end{aligned}$$

Donde:

Z_2 es la falange proximal.

Z_3 es la falange medial.

Z_4 es la falange distal.

Se busca que la longitud de cada eslabón se aproxime a las medidas antropométricas de cada falange. Para esto se establecieron ecuaciones de restricción de longitud para cada eslabón. Las cuales se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} fp &= x_2^2 + y_2^2 - L_2^2 \\ fm &= x_3^2 + y_3^2 - L_3^2 \\ fd &= x_4^2 + y_4^2 - L_4^2 \end{aligned}$$

Donde:

fp es la falange proximal y L_2 es la longitud del eslabón que representa esa falange.

fm es la falange medial y L_3 es la longitud del eslabón que representa esa falange.

fd es la falange distal y L_4 es la longitud del eslabón que representa esa falange.

3.2.2. Síntesis del mecanismo

Para obtener algunos puntos de la trayectoria que genera el dedo al realizar el movimiento de flexo-extensión. De manera gráfica se trazó la trayectoria que sigue el dedo índice al realizar este movimiento. Se ubicaron puntos arbitrarios sobre la trayectoria; el origen se ubicó en la articulación metacarpofalángica del dedo y a partir de este punto se trazaron rectas para conocer las coordenadas de los puntos, los cuales se propusieron como puntos que deberá seguir el extremo del dedo para realizar el movimiento de flexión-extensión. En la figura 3.2 se muestra la mano que se utilizó para realizar la trayectoria, las medidas antropométricas de esta mano, están dentro del rango de las tablas antropométricas de la Ciudad de México ([36], [37], [38]).

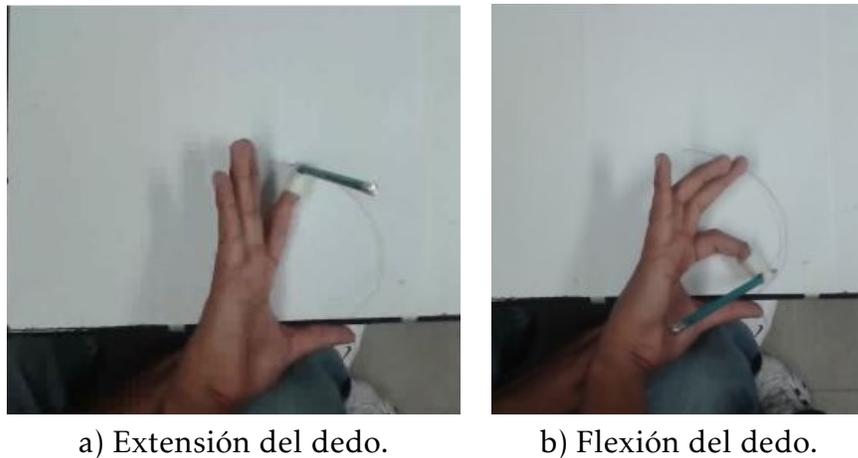


Figura 3.2: Movimiento flexión-extensión.

Los puntos de la trayectoria propuesta se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Puntos de la trayectoria.

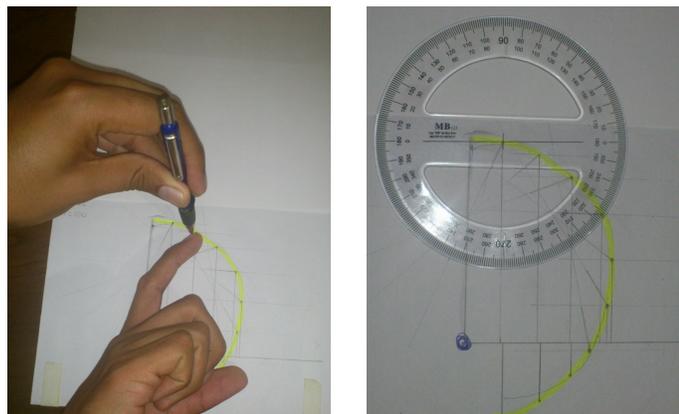
Punto	Coordenada x (cm)	Coordenada y (cm)
1	1.7	9.7
2	3.5	9.1
3	5.1	8.1
4	6.6	6.2
5	7.1	4
6	6.9	1.3
7	6.1	-0.4

La medida de cada falange que se utilizó en las ecuaciones de restricción de longitud de los eslabones se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.2: Medida de cada falange.

Falange	Longitud (cm)
proximal	5
medial	2.7
distal	3

Como se mencionó en la sección donde se plantearon las ecuaciones de diseño, es necesario dar el ángulo del último eslabón para poder calcular los otros dos ángulos. Para obtener el ángulo de este eslabón, de manera gráfica se midió el ángulo de la falange distal durante el movimiento de flexo-extensión. Para cada uno de los puntos propuestos de la trayectoria se midió el ángulo que estaba flexionada la falange en ese instante. En la figura 3.3 se muestra la manera en como se obtuvo el ángulo del último eslabón.



a) Trazado del ángulo. b) Medición del ángulo.

Figura 3.3: Obtención del ángulo de la falange distal.

Los ángulos medidos se muestran en la siguiente tabla

Tabla 3.3: Ángulos de la falange distal.

Ángulo	Valor
k_1	234°
k_2	220°
k_3	180°
k_4	170°
k_5	160°
k_6	150°
k_7	140°

Con los puntos anteriores, los ángulos y las ecuaciones antes descritas, se realizó la síntesis y simulación del movimiento del mecanismo con la ayuda de un programa en *Mathematica*. El método utilizado para realizar la síntesis del mecanismo es el método de mínimos cuadrados no lineales. En este método se plantea una función cuadrática objetivo, la cual se resuelve mediante una función en *Mathematica* llamada *findminimum*, la cual es una función utilizada en el método de los gradientes conjugados.

La función objetivo que se resuelve es la que se muestra en la ecuación 3.7.

$$\begin{aligned} \text{FuncionObjetivo} = & (ec0x)^2 + (ec0y)^2 + (ec1x)^2 + (ec1y)^2 + (ec2x)^2 + \\ & (ec2y)^2 + (ec3x)^2 + (ec3y)^2 + (ec4x)^2 + (ec4y)^2 + (ec5x)^2 \\ & + (ec5y)^2 + (ec6x)^2 + (ec6y)^2 + (ec7a)^2 + (ec7b)^2 + (ec7c)^2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Las incógnitas a resolver dentro de la función objetivo son: Y , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) y (x_4, y_4) , las cuales aparecen en las ecuaciones que a continuación se presentan.

De la función objetivo las variables $ec0x$, $ec0y$, $ec7a$, $ec7b$ y $ec7c$ se representan por medio de las siguientes ecuaciones:

$$ec0x, y = Rom + Z2 * e[0] + Z3 * e[0] + Z4 * e[0] - R1 \quad (3.8)$$

$$ec7a = x2^2 + y2^2 - (L2)^2 \quad (3.9)$$

$$ec7b = x3^2 + y3^2 - (L3)^2 \quad (3.10)$$

$$ec7c = x4^2 + y4^2 - (L4)^2 \quad (3.11)$$

De la ecuación $ec0x, y$; la variable Rom se representa por la ecuación

$$Rom = 0 + Y * I \quad (3.12)$$

Estas ecuaciones se utilizaron en el programa antes mencionado que se utilizó para resolver la síntesis del mecanismo.

Los resultados obtenidos del programa son el valor del radio de paso de cada uno de los engranes que conforman el mecanismo bicicloidal de acuerdo al número de dientes propuesto. El número de dientes propuesto para esta primera iteración, se basó en el número de dientes que se puede encontrar en un catálogo de engranes comerciales.

El número de dientes propuesto para cada engranes es:

Tabla 3.4: Número de dientes.

Engrane	1	2	3	4
Número de dientes	60	20	40	30

En la siguiente tabla se observa el valor del radio de paso obtenido por medio del programa para cada engrane de acuerdo al número de dientes propuesto.

Tabla 3.5: Resultados.

Engrane	1	2	3	4
Radio (cm)	2.9	1.9	1.07	1.61

En la figura 3.4 se muestra los resultados de la primera propuesta del mecanismo.

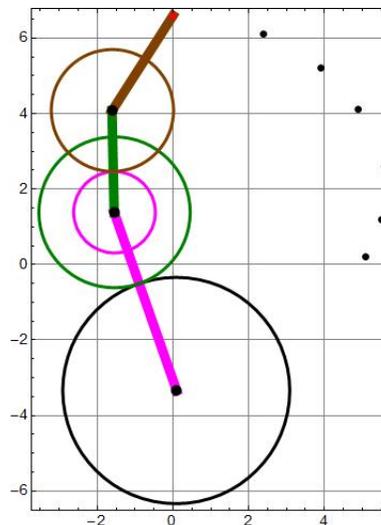


Figura 3.4: Primer iteración.

Cuando se observó la simulación del movimiento se percibió que el mecanismo no usa todos los dientes de cada uno de los engranes al recorrer la trayectoria, por lo tanto es posible utilizar sectores de engranes en la propuesta de diseño. En la siguiente figura se muestra el mecanismo y la trayectoria que dibuja durante el recorrido.

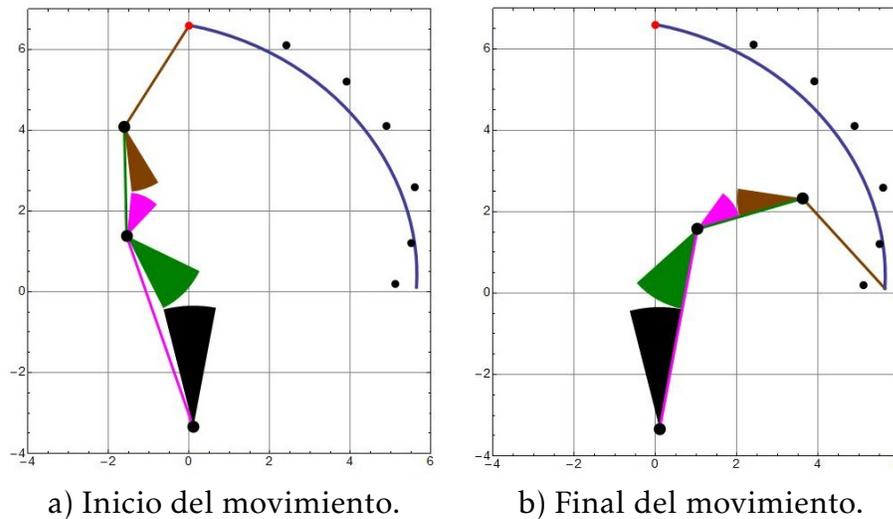


Figura 3.5: Movimiento flexión-extensión del mecanismo.

Como se observa, la trayectoria que realiza el mecanismo es similar en la forma curva a la trayectoria real que está representada por los puntos de color negro. De cada una de las iteraciones que se realizaron, se comparó la imagen del movimiento del mecanismo (como la que aparece en la figura 2.3). Se comparó la forma de la curva y la aproximación a los puntos que forman la trayectoria real y se llegó a la conclusión de que la trayectoria del mecanismo presentada (fig 2.3) es la que pasa más cerca de algunos puntos de la trayectoria real, por lo que se considera una aproximación aceptable.

3.2.3. Diseño asistido por computadora del mecanismo

Una vez obtenido el diseño del mecanismo, se procedió a realizar el modelo por medio del diseño asistido por computadora. El objetivo es observar algunas características como: el contacto entre dientes, el movimiento de flexo-extensión y las dimensiones reales del mecanismo. En la figura 3.6 se observa el diseño asistido por computadora del mecanismo.

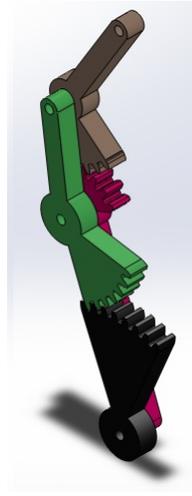


Figura 3.6: Diseño asistido por computadora del mecanismo.

En la siguiente figura se observa el ensamble del dedo incluyendo la carcasa. La carcasa debe contener al mecanismo conservando la forma antropomórfica del dedo, siendo esto último una especificación importante dentro del diseño de la mano.

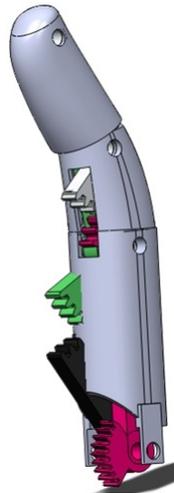


Figura 3.7: Mecanismo con la carcasa.

En la posición inicial como durante el movimiento, los engranes sobresalen de la carcasa debido a su tamaño. Lo antes mencionado se puede apreciar en la figura 3.7. Esto no es permisible desde el punto de vista antropomórfico, estético y funcional. Es un problema, ya que al ser implementado el mecanismo en una prótesis de mano, lo que se busca es que en su totalidad esté cubierto por la carcasa de los dedos. Por lo tanto se procede a proponer variantes en el mecanismo que permitan reducir el tamaño de los engranes.

3.3. Segunda propuesta

La segunda propuesta se presenta en la siguiente figura.

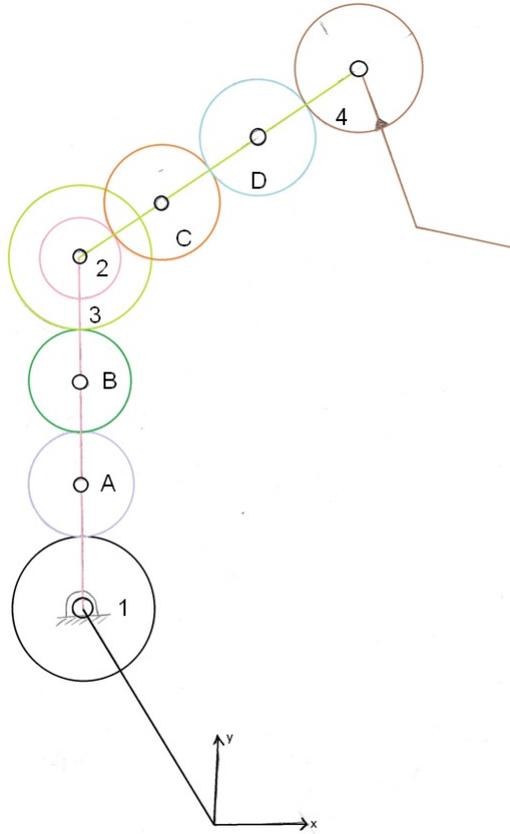


Figura 3.8: Segunda propuesta.

Cómo se observa en la figura 3.8 la segunda propuesta del mecanismo cuenta con 4 engranes más, representados por las letras A, B, C, y D. Esto se debe a que se agregaron dos engranes intermedios entre cada par de engranes que dan movimiento a cada falange. El objetivo es reducir el tamaño del mecanismo para que este se pueda introducir en la carcasa .

3.3.1. Ecuaciones de diseño

Los vectores para formar las ecuaciones de diseño se observan en la siguiente figura.

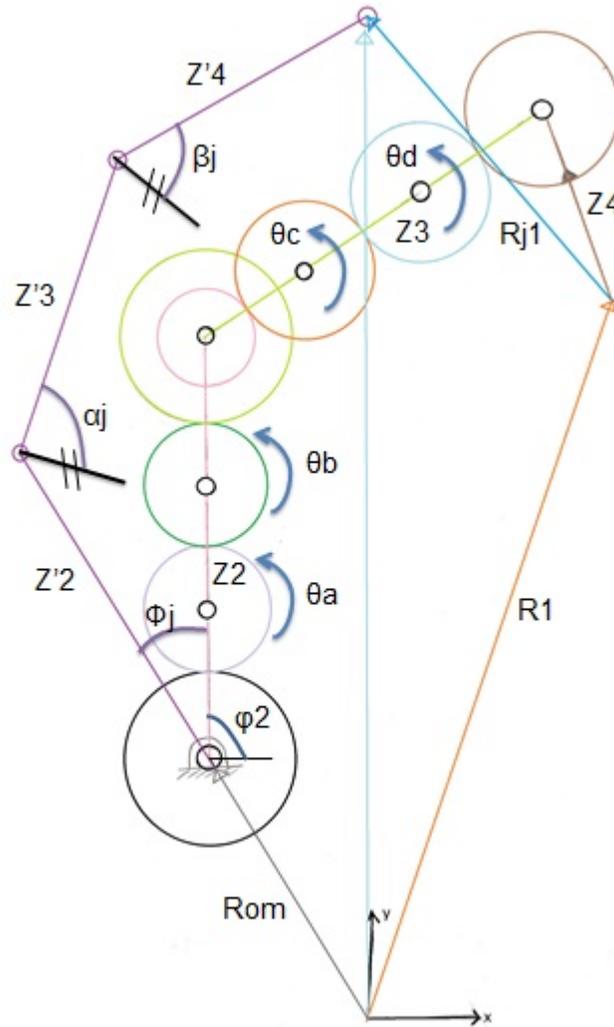


Figura 3.9: Vectores del mecanismo.

La ecuación de lazo cerrado se escribe como:

$$\mathbf{Z}'_2 + \mathbf{Z}'_3 + \mathbf{Z}'_4 - \mathbf{R}_{j1} - \mathbf{Z}_4 - \mathbf{Z}_3 - \mathbf{Z}_2 = \vec{0} \quad (3.13)$$

Donde:

$$\begin{aligned}\mathbf{Z}'_2 &= \mathbf{Z}_2 e^{i(\varphi_2 + \phi_j)} = \mathbf{Z}_2 (e^{i\varphi_2} e^{i\phi_j}) = \mathbf{Z}_2 e^{i\phi_j} \\ \mathbf{Z}'_3 &= \mathbf{Z}_3 e^{i(\varphi_3 + \alpha_j)} = \mathbf{Z}_3 (e^{i\varphi_3} e^{i\alpha_j}) = \mathbf{Z}_3 e^{i\alpha_j} \\ \mathbf{Z}'_4 &= \mathbf{Z}_4 e^{i(\varphi_4 + \beta_j)} = \mathbf{Z}_4 (e^{i\varphi_4} e^{i\beta_j}) = \mathbf{Z}_4 e^{i\beta_j}\end{aligned}$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación 3.13 obtenemos:

$$\begin{aligned}\mathbf{Z}_2 e^{i\phi_j} + \mathbf{Z}_3 e^{i\alpha_j} + \mathbf{Z}_4 e^{i\beta_j} - \mathbf{R}_{j1} - \mathbf{Z}_4 - \mathbf{Z}_3 - \mathbf{Z}_2 &= \vec{\mathbf{0}} \\ \mathbf{Z}_2 (e^{i\phi_j} - 1) + \mathbf{Z}_3 (e^{i\alpha_j} - 1) + \mathbf{Z}_4 (e^{i\beta_j} - 1) &= \mathbf{R}_{j1}\end{aligned}\quad (3.14)$$

A partir de la relación angular se definen las siguientes ecuaciones.

Engranés 1 y A

$$\begin{aligned}\frac{\theta_{Aj} - \phi_j}{\delta_j - \phi_j} &= -\frac{T_1}{T_A} \\ \theta_{Aj} - \phi_j &= -\frac{T_1}{T_A} (\delta_j - \phi_j) \\ \theta_{Aj} &= -\frac{T_1}{T_A} (-\phi_j) + \phi_j \\ \theta_{Aj} &= (1 + re_1) \phi_j = E \phi_j\end{aligned}\quad (3.15)$$

Donde:

$$E = 1 + re_1$$

Engranés A y B

$$\begin{aligned}\frac{\theta_{Bj} - \phi_j}{\theta_{Aj} - \phi_j} &= -\frac{T_A}{T_B} \\ \theta_{Bj} - \phi_j &= -\frac{T_A}{T_B} (\theta_{Aj} - \phi_j) \\ \theta_{Bj} &= -\frac{T_A}{T_B} \theta_{Aj} + \frac{T_A}{T_B} \phi_j + \phi_j \\ \theta_{Bj} &= -\frac{T_A}{T_B} \theta_{Aj} + (1 + re_2) \phi_j \\ \theta_{Bj} &= -re_2 (1 + re_1) \phi_j + (1 + re_2) \phi_j \\ \theta_{Bj} &= [-re_2 (1 + re_1) + (1 + re_2)] \phi_j = F \phi_j\end{aligned}\quad (3.16)$$

Donde:

$$F = -re_2(1 + re_1) + (1 + re_2)$$

Engranés B y 3

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_j - \phi_j}{\theta_{Bj} - \phi_j} &= -\frac{T_B}{T_3} \\ \alpha_j - \phi_j &= -\frac{T_B}{T_3}(\theta_{Bj} - \phi_j) \\ \alpha_j &= -\frac{T_B}{T_3}\theta_{Bj} + \frac{T_B}{T_3}\phi_j + \phi_j \\ \alpha_j &= -\frac{T_B}{T_3}\theta_{Bj} + (1 + re_3)\phi_j \\ \alpha_j &= -re_3[-re_2(1 + re_1) + (1 + re_2)]\phi_j + (1 + re_3)\phi_j \\ \alpha_j &= [-re_3F + (1 + re_3)]\phi_j = G\phi_j \end{aligned} \quad (3.17)$$

Donde:

$$G = -re_3F + (1 + re_3)$$

Engranés 2 y C

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{Cj} - \alpha_j}{\phi_j - \alpha_j} &= -\frac{T_2}{T_C} \\ \theta_{Cj} - \alpha_j &= -\frac{T_2}{T_C}(\phi_j - \alpha_j) \\ \theta_{Cj} &= -re_4(\phi_j - \alpha_j) + \alpha_j \\ \theta_{Cj} &= -re_4\phi_j + re_4\alpha_j + \alpha_j \\ \theta_{Cj} &= -re_4\phi_j + (1 + re_4)[-re_3[-re_2(1 + re_1) + (1 + re_2)] + (1 + re_2)]\phi_j \\ \theta_{Cj} &= [-re_4 + (1 + re_4)G]\phi_j = H\phi_j \end{aligned} \quad (3.18)$$

Donde:

$$H = -re_4 + (1 + re_4)G$$

Engranés C y D

$$\begin{aligned}
\frac{\theta_{Dj} - \alpha_j}{\theta_{Cj} - \alpha_j} &= -\frac{T_C}{T_D} \\
\theta_{Dj} - \alpha_j &= -\frac{T_C}{T_D}(\theta_{Cj} - \alpha_j) \\
\theta_{Dj} &= -re_5(\theta_{Cj} - \alpha_j) + \alpha_j \\
\theta_{Dj} &= -re_5\theta_{Cj} + re_5\alpha_j + \alpha_j \\
\theta_{Dj} &= -re_5\theta_{Cj} + (1 + re_5)\alpha_j \\
\theta_{Dj} &= -re_5H\phi_j + (1 + re_5)G\phi_j \\
\theta_{Dj} &= [-re_5H + (1 + re_5)G]\phi_j
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Donde:

$$I = -re_5H + (1 + re_5)G$$

Engranés D y 4

$$\begin{aligned}
\frac{\beta_j - \alpha_j}{\theta_{Dj} - \alpha_j} &= -\frac{T_D}{T_4} \\
\beta_j - \alpha_j &= -\frac{T_D}{T_4}(\theta_{Dj} - \alpha_j) \\
\beta_j &= -re_6(\theta_{Dj} - \alpha_j) + \alpha_j \\
\beta_j &= -re_6\theta_{Dj} + re_6\alpha_j + \alpha_j \\
\beta_j &= -re_6\theta_{Dj} + (1 + re_6)\alpha_j \\
\beta_j &= -re_6I\phi_j + (1 + re_6)G\phi_j \\
\beta_j &= [-re_6I + (1 + re_6)G]\phi_j
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Donde:

$$J = -re_6I + (1 + re_6)G$$

Para generar movimiento damos el ángulo β_j y los puntos de la trayectoria, los cuales se mostrarán más adelante.

Al dar el ángulo β_j necesitamos dejar ϕ_j y α_j en función de ese ángulo.

De ecuación 3.20:

$$\phi_j = \frac{1}{J}\beta_j \quad (3.21)$$

Sustituyendo la ecuación 3.21 en 3.17:

$$\begin{aligned} \alpha_j &= G\left(\frac{1}{J}\beta_j\right) \\ \alpha_j &= \frac{G}{J}\beta_j \end{aligned} \quad (3.22)$$

Las ecuaciones 3.14, 3.21 y 3.22 se usan para generar movimiento.

Donde:

$$\begin{aligned} J &= -re_6I + (1 + re_6)G \\ G &= -re_3[-re_2(1 + re_1) + (1 + re_2)] + (1 + re_3) \end{aligned}$$

3.3.2. Síntesis del mecanismo

Para realizar la síntesis y simulación del movimiento del mecanismo con la ayuda de un programa en *Mathematica* además de las ecuaciones anteriores, se utilizan los puntos, los ángulos y la longitud de cada falange utilizados para la síntesis de la primer propuesta (ver tablas 3.1, 3.2 y 3.3). Se utiliza la misma función objetivo que se utilizó para la primer iteración.

Al igual que en la iteración anterior, se propuso un número de dientes para cada engrane. El número de dientes que se propuso se baso en la relación del valor del radio de paso que se obtuvo en la primera iteración, es decir, se propuso un número de dientes menor para que los engranes respetarán las medidas antropométricas de la mano.

En la siguiente tabla se muestra el número de dientes para cada engrane:

Tabla 3.6: Número de dientes.

Engrane	1	2	3	4	A	B	C	D
Número de dientes	24	24	26	26	24	24	26	26

En la siguiente tabla se observan los resultados del valor de los radios de paso para cada engrane de acuerdo al número de dientes propuesto.

Tabla 3.7: Resultados.

Engrane	1	2	3	4	A	B	C	D
Radio (cm)	0.8219	0.4257	0.8904	0.4612	0.8219	0.8219	0.4612	0.4612

En la figura 3.10 se muestra el mecanismo para la segunda iteración.

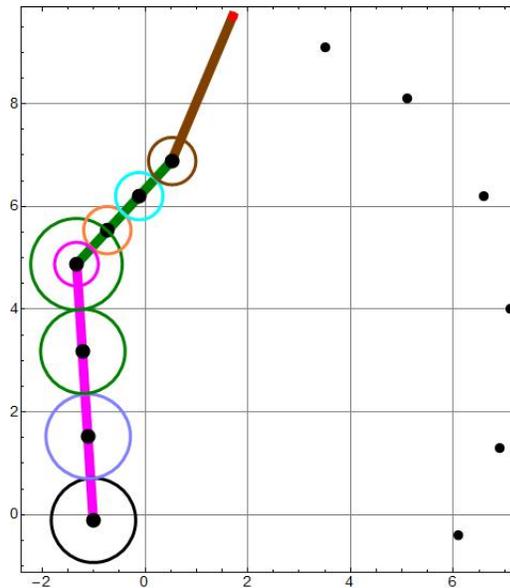
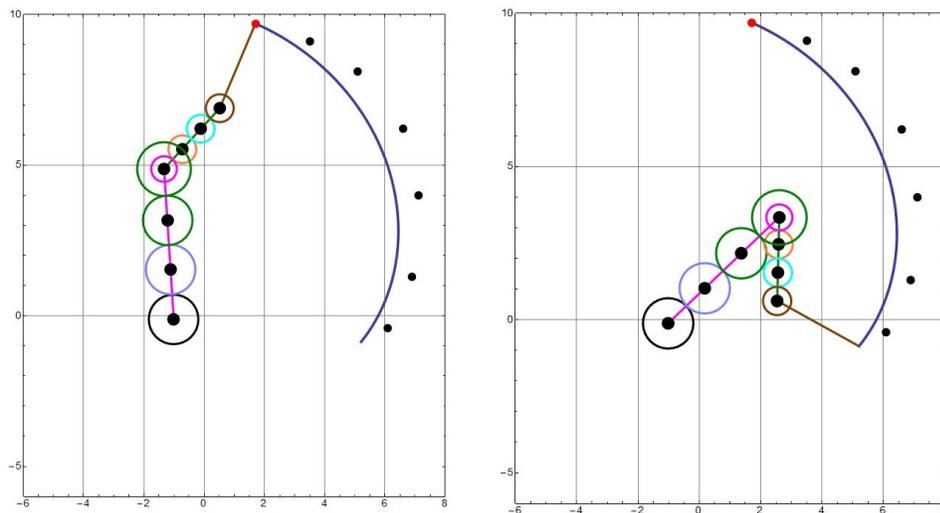


Figura 3.10: Segunda propuesta.

Al tener engranes más pequeños, se decidió no usar sectores de engranes y usar los engranes completos, esto desde el punto de vista del uso y desgaste de los engranes, también para poder usar la totalidad de dientes y con esto evitar el cambio frecuente de engranes. En la siguiente figura se presenta el movimiento del mecanismo.



a) Inicio del movimiento.

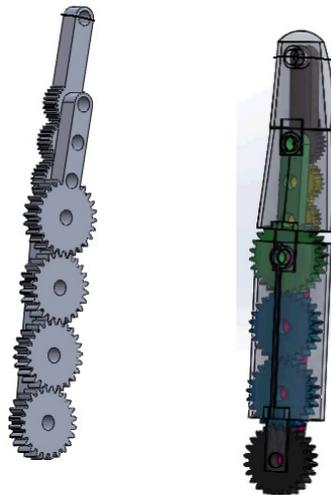
b) Final del movimiento.

Figura 3.11: Movimiento flexión-extensión de la segunda propuesta.

Como se observa en las imágenes anteriores la trayectoria que sigue el mecanismo se asemeja a la trayectoria original que está dibujada por los puntos en negro. Para conocer que mecanismo se aproximó más a la trayectoria, se usó el mismo procedimiento de comparación que para la primer propuesta. La trayectoria del mecanismo no toca ninguno de los puntos negros, sin embargo se encontró que el mecanismo mostrado en la figura 3.11 es el que más se aproxima a la trayectoria propuesta. Por otra parte, el movimiento del mecanismo es diferente al que realiza la primer propuesta, es decir, el mecanismo en su segundo y tercer eslabón no realiza una flexión como lo hace un dedo. Estas condiciones son fáciles de corregir en el ensamble del diseño asistido por computadora ya que solo hay que modificar la postura de ensamble, esto se observa en la figura 3.12.

3.3.3. Diseño asistido por computadora del mecanismo

En la figura 3.12 se observa el diseño asistido por computadora de la segunda propuesta sin la carcasa y con la carcasa. En la figura 3.12 del mecanismo con la carcasa, se puede observar que el mecanismo es más compacto y se adapta mejor a esta. Además el problema con respecto a que los engranes sobresalían de la carcasa durante el movimiento de flexión del dedo quedó resuelto. Por lo tanto se concluye utilizar la segunda propuesta, ya que los engranes respetan las medidas de la carcasa.



a) Sin carcasa. b) Con carcasa.

Figura 3.12: Segunda propuesta del mecanismo.

3.3.4. Dedo anular, medio y meñique

Utilizando las mismas ecuaciones de diseño y modificando datos de las falanges, se procedió a diseñar los otros tres dedos. A continuación se muestran los datos que se modificaron y los resultados obtenidos.

Para el caso del dedo anular se utilizaron los mismos datos que para el dedo índice (ver tablas 3.1, 3.2 y 3.3).

En la figura 3.13 se muestra el diseño asistido por computadora del dedo anular.



Figura 3.13: Dedo anular.

Para el caso del dedo medio, se utilizaron los mismos puntos de la trayectoria que para el dedo índice y el anular, los ángulos y el número de dientes también son los mismos. En cuanto a la longitud de las falanges, éstas son diferentes y se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.8: Medida de cada falange dedo medio.

Falange	Longitud (cm)
proximal	5.4
medial	3
distal	3.1

En la siguiente tabla se muestran los resultados del valor de los radios de paso para cada engrane de acuerdo al número de dientes propuesto.

Tabla 3.9: Resultados.

Engrane	1	2	3	4	A	B	C	D
Radio (cm)	0.8875	0.4703	0.9615	0.5095	0.8875	0.88755	0.5095	0.5095

El diseño asistido por computadora del dedo anular se observa en la siguiente figura:

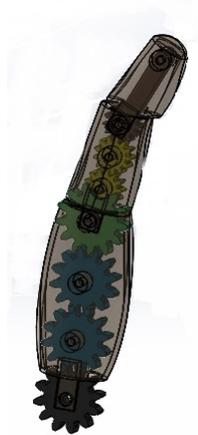


Figura 3.14: Dedo anular.

Para el caso del dedo meñique, se trazó la trayectoria que sigue el dedo de la misma forma que para el dedo índice y se obtuvieron los puntos que se utilizaron para la síntesis del mecanismo. En la siguiente tabla se muestran los puntos utilizados.

Tabla 3.10: Puntos de la trayectoria.

Punto	Coordenada x (cm)	Coordenada y (cm)
1	-1.55	6.8
2	-3.4	6
3	-4.89	5.1
4	-6	3.6
5	-6.4	1.6
6	-6.1	0
7	-5.1	-1.2

Utilizando estos puntos y el mismo número de dientes que se propuso para los otros tres dedos, se realizó la síntesis para el mecanismo del dedo meñique.

En la siguiente tabla se muestran los resultados del valor de los radios para cada engrane de acuerdo al número de dientes propuesto.

Tabla 3.11: Resultados.

Engrane	1	2	3	4	A	B	C	D
Radio (cm)	0.6456	0.3366	0.6994	0.3647	0.6456	0.6456	0.3647	0.3647

El diseño asistido por computadora del dedo meñique se observa en la siguiente figura:

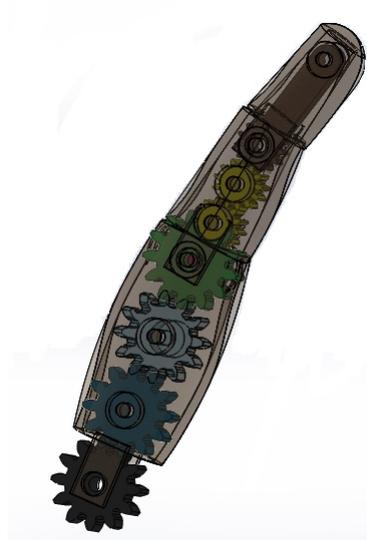


Figura 3.15: Dedo meñique.

3.4. Dedo pulgar

Como se mencionó al principio de este capítulo, para realizar la síntesis del dedo pulgar fue necesario plantear nuevas ecuaciones de diseño, debido a que solo cuenta con tres falanges. También cabe mencionar que la síntesis para el pulgar sólo se realizó para el movimiento de flexión-extensión. A continuación se presentan las ecuaciones de diseño y los resultados de la síntesis para el mecanismo del dedo pulgar.

3.4.1. Ecuaciones de diseño

Los vectores para formar las ecuaciones de diseño y las ecuaciones que relacionan los engranes con los eslabones, se observan en la siguiente figura:

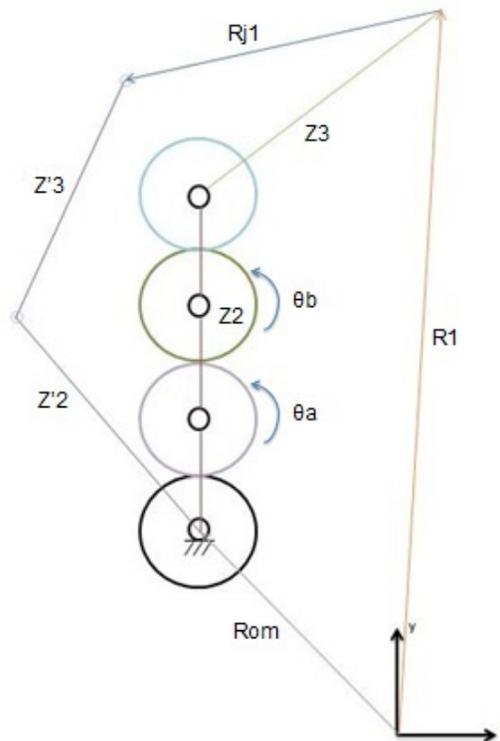


Figura 3.16: Dedo pulgar.

La ecuación del lazo cerrado se escribe como:

$$\mathbf{Z}'_2 + \mathbf{Z}'_3 + \mathbf{Z}'_4 - \mathbf{Z}_3 - \mathbf{Z}_2 = \vec{\mathbf{0}} \quad (3.23)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}'_2 &= Z_2 e^{i(\varphi_2 + \phi_j)} = Z_2 (e^{i\varphi_2} e^{i\phi_j}) = \mathbf{Z}_2 e^{i\phi_j} \\ \mathbf{Z}'_3 &= Z_3 e^{i(\varphi_3 + \alpha_j)} = Z_3 (e^{i\varphi_3} e^{i\alpha_j}) = \mathbf{Z}_3 e^{i\alpha_j} \end{aligned}$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación 3.23 obtenemos:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_2 e^{i\phi_j} + \mathbf{Z}_3 e^{i\alpha_j} - \mathbf{R}_{j1} - \mathbf{Z}_4 - \mathbf{Z}_3 - \mathbf{Z}_2 &= \vec{\mathbf{0}} \\ \mathbf{Z}_2 (e^{i\phi_j} - 1) + \mathbf{Z}_3 (e^{i\alpha_j} - 1) &= \mathbf{R}_{j1} \end{aligned} \quad (3.24)$$

A partir de la relación angular se definen las siguientes ecuaciones.

Engranés 1 y A

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{Aj} - \phi_j}{\delta_j - \phi_j} &= -\frac{T_1}{T_A} \\ \theta_{Aj} - \phi_j &= -\frac{T_1}{T_A} (\delta_j - \phi_j) \\ \theta_{Aj} &= -\frac{T_1}{T_A} (-\phi_j) + \phi_j \\ \theta_{Aj} &= (1 + re_1) \phi_j = E \phi_j \end{aligned} \quad (3.25)$$

Donde:

$$E = 1 + re_1$$

Engranés A y B

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{Bj} - \phi_j}{\theta_{Aj} - \phi_j} &= -\frac{T_A}{T_B} \\ \theta_{Bj} - \phi_j &= -\frac{T_A}{T_B} (\theta_{Aj} - \phi_j) \\ \theta_{Bj} &= -\frac{T_A}{T_B} \theta_{Aj} + \frac{T_A}{T_B} \phi_j + \phi_j \\ \theta_{Bj} &= -\frac{T_A}{T_B} \theta_{Aj} + (1 + re_2) \phi_j \\ \theta_{Bj} &= -re_2 (1 + re_1) \phi_j + (1 + re_2) \phi_j \\ \theta_{Bj} &= [-re_2 (1 + re_1) + (1 + re_2)] \phi_j = F \phi_j \end{aligned} \quad (3.26)$$

Donde:

$$F = -re_2(1 + re_1) + (1 + re_2)$$

Engranés B y 3

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_j - \phi_j}{\theta_{Bj} - \phi_j} &= -\frac{T_B}{T_3} \\ \alpha_j - \phi_j &= -\frac{T_B}{T_3}(\theta_{Bj} - \phi_j) \\ \alpha_j &= -\frac{T_B}{T_3}\theta_{Bj} + \frac{T_B}{T_3}\phi_j + \phi_j \\ \alpha_j &= -\frac{T_B}{T_3}\theta_{Bj} + (1 + re_3)\phi_j \\ \alpha_j &= -re_3[-re_2(1 + re_1) + (1 + re_2)]\phi_j + (1 + re_3)\phi_j \\ \alpha_j &= [-re_3F + (1 + re_3)]\phi_j = G\phi_j \end{aligned} \quad (3.27)$$

Donde:

$$G = -re_3F + (1 + re_3)$$

En este caso para generar movimiento damos el ángulo α_j y los puntos de la trayectoria, que se mostraran más adelante.

Al dar el ángulo α_j , de la ecuación 3.27 despejamos el ángulo ϕ_j , obteniendo lo siguiente:

$$\phi_j = \frac{\alpha_j}{G} \quad (3.28)$$

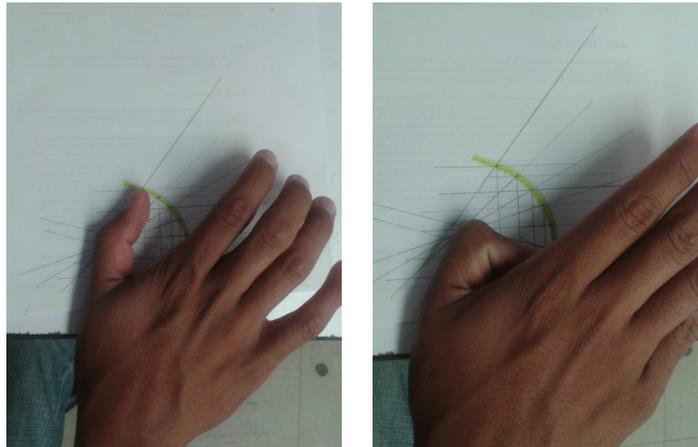
Las ecuaciones 3.24 y 3.28 se usan para generar movimiento.

Donde:

$$G = -re_3F + (1 + re_3)$$

3.4.2. Síntesis del mecanismo

Para obtener los puntos que se necesitan proponer para poder resolver la síntesis del mecanismo para el dedo pulgar, se realizó lo siguiente. De manera gráfica se trazo la trayectoria que sigue el dedo al realizar el movimiento de flexo-extensión. Se ubicaron puntos arbitrarios sobre la trayectoria; el origen se ubicó en la articulación metacarpofalangica del dedo y a partir de este se trazaron rectas para conocer las coordenadas de los puntos. También se midió el ángulo de flexión de la última falange del dedo para cada uno de los puntos.



a) Extensión del dedo. b) Flexión del dedo.

Figura 3.17: Movimiento flexión-extensión.

Los puntos de la trayectoria propuesta se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.12: Puntos de la trayectoria.

Punto	Coordenada x (cm)	Coordenada y (cm)
1	2.4	6.7
2	3.4	6.2
3	4.1	5.5
4	4.6	4.7
5	4.9	3.7
6	5.1	2.5
7	5	1.5

Los ángulos se midieron de la misma manera que para el dedo índice, los valores de estos ángulos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.13: Ángulos de la falange distal.

Ángulo	Valor
k_1	234°
k_2	220°
k_3	180°
k_4	170°
k_5	160°
k_6	150°
k_7	140°

El número de dientes que se propuso para cada engrane del mecanismo para el dedo pulgar se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.14: Número de dientes.

Engrane	1	3	A	B
Número de dientes	24	26	24	24

En la siguiente tabla se observan los resultados del valor de los radios de paso para cada engrane de acuerdo al número de dientes propuesto.

Tabla 3.15: Resultados.

Engrane	1	3	A	B
Radio (cm)	0.3936	0.4265	0.3936	0.3936

En la figura 3.18 se muestra el mecanismo para el dedo pulgar.

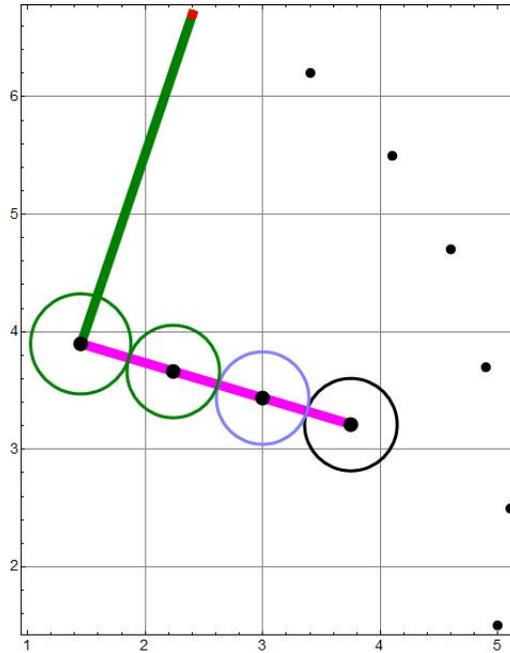


Figura 3.18: Mecanismo pulgar.

Como se observa en la figura la posición inicial del mecanismo pulgar es distinta a la común, esto se soluciona en el diseño asistido por computadora al realizar el ensamble.

En la siguiente figura se muestra el diseño asistido por computadora del dedo pulgar.

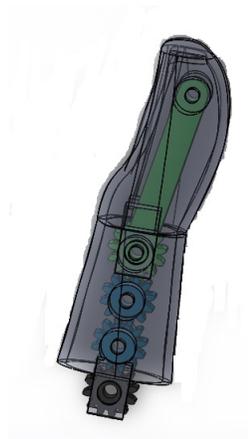


Figura 3.19: Mecanismo pulgar.

En la siguiente figura se muestra el ensamble completo de la mano.



Figura 3.20: Ensamble mano.

El diseño de la palma fue realizado por el alumno de licenciatura de la carrera de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de Santo Tomas de Bucaramanga Colombia, Marco Arturo Becerra Arias quien colaboró en este proyecto. En su tesis se encuentra todo el proceso de diseño seguido para el diseño de la palma y de las carcasas de los dedos.

Capítulo 4

ANÁLISIS ESTÁTICO DEL MECANISMO

Después de obtener la síntesis del mecanismo, lo siguiente que se realizó fue el análisis estático. El objetivo de este análisis es conocer las fuerzas que se generan en el mecanismo. Aunque se tienen fuerzas de reacción, el interés real es la fuerza obtenida a la salida del mecanismo, la cual después será traducida en la fuerza de prensión de la mano y los pares de torsión necesarios para realizar esta fuerza.

En esta sección se explica el proceso seguido para realizar el análisis estático.

Como primer paso analizaremos cuántas ecuaciones y cuantas incógnitas se tienen en el mecanismo de la siguiente manera:

Número de ecuaciones

Tabla 4.1: Número de ecuaciones.

8 cuerpos en movimiento X 3 ecuaciones	24
1 junta multiple X 2 ecuaciones	2
TOTAL	26 ecuaciones

Donde:

Cuerpos en movimiento: Se refiere a todo aquel cuerpo que está realizando un movimiento de rotación o traslación durante el movimiento del mecanismo. Para este caso los engranes giran, por lo tanto al tener ocho engranes se tienen 8 cuerpos en movimiento. Se multiplica por 3 ecuaciones porque tenemos la suma de fuerzas en el eje x , en el eje y , y la suma de momentos. Por lo tanto cada uno de los cuerpos en movimiento se va representar de esta manera.

Junta multiple: Es aquella junta que restringe dos tipos de movimiento, es por esta razón que se multiplica por 2 ecuaciones. Se obtiene una fuerza en el eje x y una fuerza en el eje y .

Número de incógnitas

Tabla 4.2: Número de incógnitas.

9 fuerzas en pernos X 2 incógnitas	18
0 correderas X 2 incógnitas	0
6 engranes X 1 incógnita	6
2 actuadores X 1 incógnita	2
TOTAL	26 ecuaciones

Donde:

Fuerzas en pernos: Son todas las fuerzas que afectan a un perno. Se multiplica por 2 ecuaciones porque se considera la fuerza en el eje x y en el eje y .

Correderas: Es la fuerza normal (F_y) que existe en un cuerpo al realizar un movimiento de traslación sobre una superficie. Esta fuerza genera un momento (M).

Engranes: Es la fuerza de rozamiento que se genera entre cada par de engranes durante el movimiento.

Actuadores: Número de dispositivos que se necesitan para mover el mecanismo. Como variable se obtiene un par de torsión (T).

El mecanismo del dedo medio que se analizó se muestra en la figura 4.1

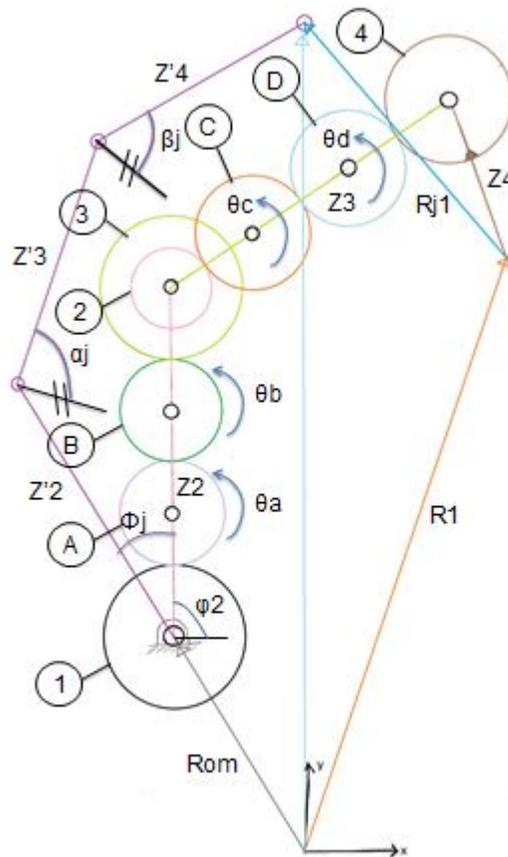


Figura 4.1: Mecanismo del dedo índice.

A continuación se muestra el diagrama de cuerpo libre de cada uno de los cuerpos en movimiento, en donde se tomaron en cuenta todas y cada una de las fuerzas que se ejercen sobre éstos.

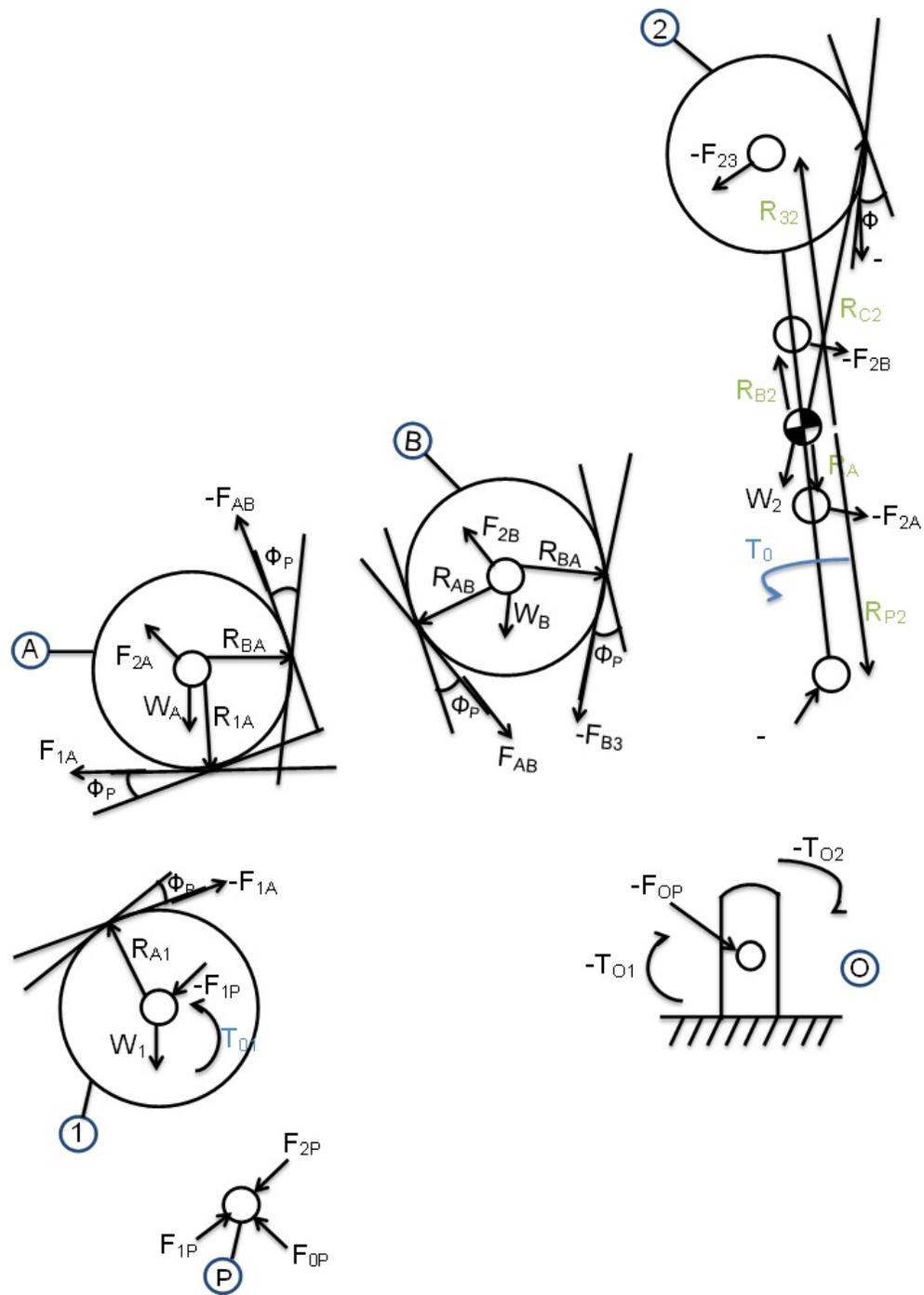


Figura 4.2: Diagramas de cuerpo libre 1 del dedo medio.

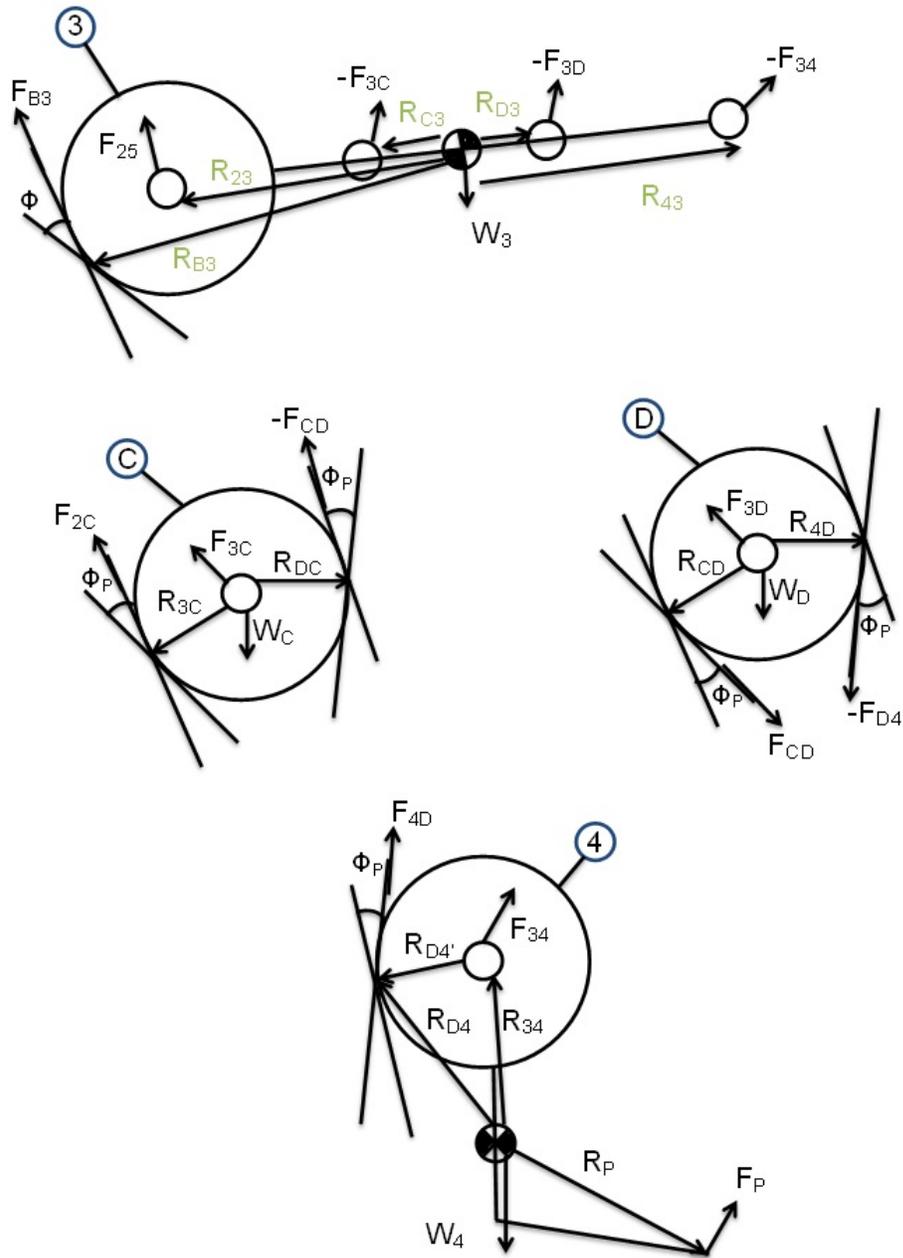


Figura 4.3: Diagramas de cuerpo libre 2 del dedo medio.

Las siguientes ecuaciones estáticas se aplican para cada uno de los cuerpos en movimiento.

$$\sum F = 0$$

$$\sum M_G = 0$$

Para cada uno de los cuerpos en movimiento se plantearon las ecuaciones para la suma de fuerzas y la suma de momentos de acuerdo a las ecuaciones anteriores.

Cuerpo 1

$$\begin{aligned} -\mathbf{F}_{1P} - \mathbf{F}_{1A} + \mathbf{W}_1 &= 0 \\ \mathbf{T}_{01} + \mathbf{R}_{A1} \times (-\mathbf{F}_{1A}) &= 0 \end{aligned}$$

Cuerpo A

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{1A} + \mathbf{F}_{2A} - \mathbf{F}_{AB} + \mathbf{W}_A &= 0 \\ \mathbf{R}_{1A} \times \mathbf{F}_{1A} + \mathbf{R}_{BA} \times (-\mathbf{F}_{AB}) &= 0 \end{aligned}$$

Cuerpo B

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{AB} + \mathbf{F}_{2B} - \mathbf{F}_{B3} + \mathbf{W}_B &= 0 \\ \mathbf{R}_{AB} \times \mathbf{F}_{AB} + \mathbf{R}_{3B} \times (-\mathbf{F}_{B3}) &= 0 \end{aligned}$$

Cuerpo 2

$$\begin{aligned} -\mathbf{F}_{2P} - \mathbf{F}_{2A} - \mathbf{F}_{2B} - \mathbf{F}_{23} - \mathbf{F}_{2C} + \mathbf{W}_2 &= 0 \\ \mathbf{T}_{02} + \mathbf{R}_{P2} \times (-\mathbf{F}_{2P}) + \mathbf{R}_{A2} \times (-\mathbf{F}_{2A}) + \mathbf{R}_{B2} \times (-\mathbf{F}_{2B}) + \mathbf{R}_{32} \times (-\mathbf{F}_{23}) + \mathbf{R}_{C2} \times (-\mathbf{F}_{2C}) &= 0 \end{aligned}$$

Cuerpo 3

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{B3} + \mathbf{F}_{23} - \mathbf{F}_{3C} - \mathbf{F}_{3D} - \mathbf{F}_{34} + \mathbf{W}_3 &= 0 \\ \mathbf{R}_{B3} \times \mathbf{F}_{B3} + \mathbf{R}_{23} \times \mathbf{F}_{23} + \mathbf{R}_{C3} \times (-\mathbf{F}_{3C}) + \mathbf{R}_{D3} \times (-\mathbf{F}_{3D}) + \mathbf{R}_{43} \times (-\mathbf{F}_{34}) &= 0 \end{aligned}$$

Cuerpo C

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{2C} + \mathbf{F}_{3C} - \mathbf{F}_{CD} + \mathbf{W}_C &= 0 \\ \mathbf{R}_{2C} \times \mathbf{F}_{2C} + \mathbf{R}_{DC} \times (-\mathbf{F}_{CD}) &= 0 \end{aligned}$$

Cuerpo D

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{CD} + \mathbf{F}_{3D} - \mathbf{F}_{D4} + \mathbf{W}_D &= 0 \\ \mathbf{R}_{CD} \times \mathbf{F}_{CD} + \mathbf{R}_{4D} \times (-\mathbf{F}_{D4}) &= 0 \end{aligned}$$

Cuerpo 4

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{D4} + \mathbf{F}_{34} + \mathbf{F}_P + \mathbf{W}_4 &= 0 \\ \mathbf{R}_{D4} \times \mathbf{F}_{D4} + \mathbf{R}_{34} \times \mathbf{F}_{34} + \mathbf{R}_D \times \mathbf{F}_P &= 0 \end{aligned}$$

Donde

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_{1P} &= [f_{1PX}, f_{1PY}, 0]^T \\
 \mathbf{f}_{1A} &= [f_{1AX}, 0, 0]^T \\
 \mathbf{F}_{1A} &= \mathbf{R}_Z(\phi + (\frac{\Pi}{2} - \phi_p))f_{1A} \\
 \mathbf{F}_{1A} &= \mathbf{R}_Z(\phi + (\frac{\Pi}{2} - \phi_p))f_{1A} \\
 \mathbf{W}_1 &= [0, m_1g, 0]^T \\
 \mathbf{T}_{01} &= [0, 0, T_{01Z}]^T \\
 \mathbf{F}_{2A} &= [F_{2AX}, F_{2AY}, 0]^T \\
 \mathbf{f}_{AB} &= [f_{ABX}, 0, 0]^T \\
 \mathbf{F}_{AB} &= \mathbf{R}_Z(\phi - (\frac{\Pi}{2} - \phi_p))f_{AB} \\
 \mathbf{W}_A &= [0, -m_Ag, 0]^T \\
 \mathbf{F}_{2B} &= [F_{2BX}, F_{2BY}, 0] \\
 \mathbf{f}_{B3} &= [f_{B3X}, 0, 0]^T \\
 \mathbf{F}_{B3} &= R_Z(\phi + (\frac{\Pi}{2} - \phi_p))f_{B3} \\
 \mathbf{W}_B &= [0, -m_Bg, 0]^T \\
 \mathbf{F}_{2P} &= [F_{2PX}, F_{2PY}, 0]^T \\
 \mathbf{F}_{23} &= [F_{23x}, F_{23y}, 0]^T \\
 \mathbf{f}_{2C} &= [f_{2CX}, 0, 0]^T \\
 \mathbf{F}_{2C} &= R_Z(\alpha + (\frac{\Pi}{2} - \phi_p))f_{2C} \\
 \mathbf{W}_2 &= [0, -m_2g, 0]^T \\
 \mathbf{T}_{02} &= [0, 0, T_{02Z}]^T
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{T}_{02} &= [0, 0, T_{02Z}]^T \\
\mathbf{F}_{3C} &= [F_{3CX}, F_{3CY}, 0]^T \\
\mathbf{F}_{3D} &= [F_{3DX}, F_{3DY}, 0]^T \\
\mathbf{F}_{34} &= [F_{34X}, F_{34Y}, 0]^T \\
\mathbf{W}_3 &= [0, -m_3g, 0]^T \\
\mathbf{f}_{CD} &= [f_{CDX}, 0, 0]^T \\
\mathbf{F}_{CD} &= R_Z(\alpha - (\frac{\Pi}{2} - \phi_p))\mathbf{f}_{CD} \\
\mathbf{W}_C &= [0, -m_cg, 0]^T \\
\mathbf{f}_{D4} &= [f_{D4X}, 0, 0]^T \\
\mathbf{F}_{D4} &= R_Z(\alpha + (\frac{\Pi}{2} - \phi_p))\mathbf{f}_{D4} \\
\mathbf{W}_D &= [0, -m_Dg, 0]^T \\
\mathbf{F}_P &= [F_{PX}, F_{PY}, 0]^T \\
\mathbf{W}_4 &= [0, -m_4g, 0]^T
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_{A1} &= \text{reng1} * U2 \\
R_{1A} &= \text{rengA} * (-U2) \\
R_{BA} &= \text{rengA} * U2 \\
R_{AB} &= \text{rengB} * (-U2) \\
R_{3B} &= \text{rengB} * U2 \\
R_{p2} &= (d - b) * (-U2) \\
R_{A2} &= (c - b) * (-U2) \\
R_{B2} &= (b - a) * U2 \\
R_{32} &= b * U2 \\
R_{C2} &= R_{32} + \text{reng2} * U3 \\
R_{23} &= f * (-U3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_{C3} &= (ee - f) * (-U3) \\
R_{D3} &= (h - f) * U3 \\
R_{43} &= (h - g) * U3 \\
R_{B3} &= R_{23} + reng3 * (-U3) \\
R_{2C} &= rengC * (-U3) \\
R_{DC} &= rengC * U3 \\
R_{CD} &= rengD * (-U3) \\
R_{4D} &= rengD * U3 \\
r_{34} &= 1 \\
R_{34} &= r_{34} * (-U4) \\
R_{D4p} &= reng4 * (-U3) \\
R_{D4} &= R_{34} + R_{D4p} \\
r_p &= (3,1318841497918815 - 1) \\
R_p &= r_p * U4
\end{aligned}$$

Los valores de la masa se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.3: Datos

Cuerpo N°	Masa (kg)
1	32×10^{-4}
A	32×10^{-4}
B	32×10^{-4}
2	51×10^{-4}
3	45×10^{-4}
C	91×10^{-5}
D	91×10^{-5}
4	93×10^{-3}

Teniendo las ecuaciones planteadas, se procedió a realizar un programa para realizar el análisis estático del mecanismo.

4.1. Resultados

Lo que se busca obtener con el análisis, es el par de torsión que se necesita para mantener en su posición inicial el mecanismo y así mismo el par de torsión necesario para una fuerza de prensión determinada.

Adicionalmente se obtienen las fuerzas de contacto entre cada uno de los engranes y las fuerzas que se ejercen sobre los pernos.

A continuación se presenta el resultados del par de torsión requerido para una fuerza en la punta del dedo medio.

En la figura 4.4 se observa gráficamente la fuerza sobre la punta del dedo y la fuerza de entrada.

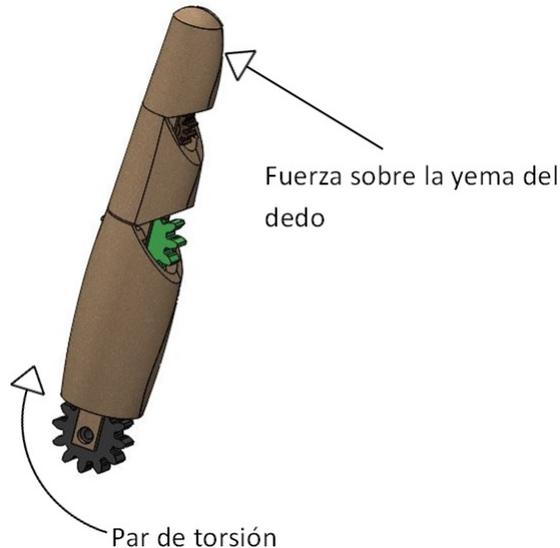


Figura 4.4: Esquema de la fuerza del dedo y el par de torsión.

En la siguiente gráfica se muestra el par de torsión requerido, resultado del análisis estático para una fuerza de entrada de 1 [N] sobre la punta del dedo medio de manera perpendicular a la yema.

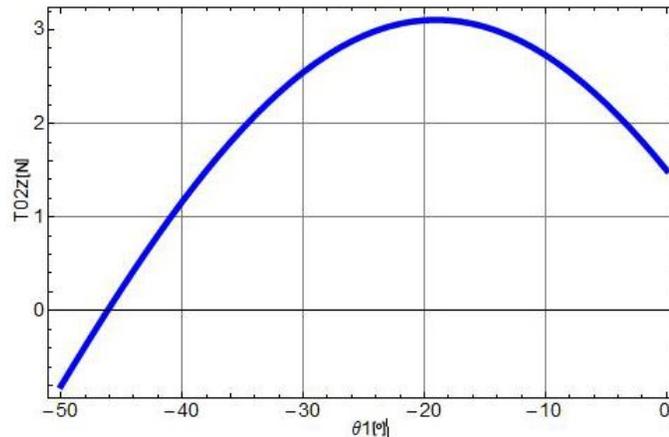


Figura 4.5: Gráfica del torque requerido.

En la gráfica se puede observar que el par de torsión máximo requerido es de 3 [N·m], esto ocurre cuando el dedo está por llegar al punto máximo de flexión. Esto significa que cuando queramos presionar un objeto de manera puntual con una fuerza de 1 [N], es necesario que el motor tenga ese par de torsión para poder lograrlo. Este par de torsión se toma en cuenta para la selección de los actuadores como el par de torsión máximo que los motores pueden tener. Aunque no es un dato primordial para su selección, puesto que es posible realizar el movimiento con un par de torsión menor.

Al usar originalmente el mecanismo bicicloidal, la ventaja que se podría apreciar es el aumento o reducción del par de torsión de entrada mediante el arreglo de engranes planetarios. Este control del par de torsión de entrada está asociado a los radios de paso de los engranes, que a su vez, para su aplicación en un dedo protésico este depende del volumen del dedo.

La extensión natural del mecanismo bicicloidal se logró mediante la propuesta del mecanismo hexacicloidal como una opción de reducir el par de torsión de entrada. Al incrementar el número de engranes se logró satisfacer el requerimiento de volumen del dedo, pero una consecuencia del método de síntesis cinemática fue la obtención de radios casi iguales, lo cual no permite una variación considerable de la reducción del par de torsión de entrada.

Mediante la síntesis estática se pueden incluir el par de torsión de entrada y las fuerzas de salida para obtener un diseño con radios nuevos que permitan incrementar la fuerza de entrada. Una posible consecuencia de esto, es que los engranes obtenidos mediante este método sobrepasen el volumen del dedo, por lo que esto llevaría a sugerir una nueva estructura usando trenes de engranes planetarios compuestos, donde cada eje tendría dos o más engranes. Esto permitiría no rebasar el volumen antropomórfico del dedo, aunque incrementa el problema de manufactura.

Capítulo 5

SISTEMA DE ACTUACIÓN DEL MECANISMO

Una vez que se obtuvo el mecanismo capaz de aproximarse a la trayectoria que se realiza durante el movimiento de flexión-extensión y se conoció el par de torsión máximo necesario para realizar la prensión de un objeto con una cierta fuerza. Lo siguiente que se realizó fue buscar un actuador adecuado para realizar el movimiento de flexión-extensión y la prensión de un objeto.

Existen diferentes actuadores que se han utilizado tanto en prótesis como en manos robóticas, sin embargo los más comúnmente utilizados son actuadores de tipo eléctrico, es decir, aquellos actuadores que utilizan la energía eléctrica para producir movimiento mecánico, como por ejemplo; motores de corriente directa (micromotores), servomotores y motores a pasos.

En este capítulo se describen las características básicas de cada uno de los motores antes mencionados. Se mencionan las especificaciones en las cuales se basó la elección del motor para accionar el mecanismo y se menciona el tipo de motor a utilizar.

5.1. Motores de corriente directa

Un motor de corriente continua/directa (figura 5.1) transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Son utilizados para impulsar dispositivos tales como ventiladores, bombas y carros [29].



Figura 5.1: Motor de corriente directa [30].

Tienen características variables, y se usan mucho en propulsión con velocidad variable. Pueden proporcionar un alto par de arranque, y también es posible obtener el control de velocidad dentro de márgenes amplios. En el caso normal, los métodos para controlar la velocidad son más sencillos y menos costosos que los de los motores de corriente alterna [31].

Debido a sus conmutadores, los motores de CD no son adecuados para aplicaciones de muy alta velocidad, y requieren más mantenimiento que los motores de CA.

Dentro de las configuraciones de motores de corriente continua se encuentran los micromotores, a continuación se describirá brevemente sobre este tipo de configuración.

5.2. Micro-motorreductores

Los micro-motorreductores son pequeños motores de corriente directa. La característica principal de este tipo de motores es su tamaño, miden de largo desde la base hasta la punta del eje 3.4 cm, 0.7 cm más que el diámetro de una moneda de 10 pesos (figura 5.2). Un ejemplo de las dimensiones tan pequeñas que pueden alcanzar este tipo de motores es el siguiente. Un motor de este tipo fabricado por **Flexmotor Corporation**, mide 2 milímetros de largo por .6 milímetros de ancho.

Como son del tipo de moto-reductores, cuenta con un tren de engranes que proporciona una reducción de velocidad, esto da la ventaja de poder escoger de una gran gama de distintos tipos de reducción la que mejor se adecue a nuestras necesidades. Otra de las características que tienen este tipo de motores, es que están clasificados por alto, medio o bajo poder, es decir, que su par de torsión varía con respecto a la reducción y al consumo de energía (en amperios) del motor.



Figura 5.2: Micro-motorreductor Pololu.

5.3. Servomotor

Es un dispositivo similar a un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse en dicha posición.

Los servos se utilizan frecuentemente en sistema de radio control y en robótica, sin embargo su uso no está limitado a estos.

Partes de un servomotor

- Motor de corriente continua

Es el elemento que le brinda movilidad al servomotor. Cuando se aplica un potencial a sus dos terminales, este motor gira en un sentido a su velocidad máxima. Si el voltaje aplicado a sus dos terminales es inverso, el sentido de giro también se invierte.

- Engranajes reductores

Se encargan de convertir gran parte de la velocidad de giro del motor de corriente continua en par de torsión.

- Circuito de control

Este circuito es el encargado del control de la posición del motor. Recibe los pulsos de entrada y ubica al motor en su nueva posición dependiendo de los pulsos recibidos.

Tiene además de los circuitos de control un potenciómetro conectado al eje central del motor. Este potenciómetro permite a la circuitería de control, supervisar el ángulo real del servomotor. Si el eje está en el ángulo correcto, entonces el motor está apagado. Si el circuito comprueba que el ángulo no es correcto, el motor se moverá hasta llegar al ángulo correcto. El eje del servomotor es capaz de llegar alrededor de los 180° grados.

Los servomotores tienen 3 terminales:

- Terminal positivo: Recibe la alimentación del motor (4 a 8 voltios).
- Terminal negativo: Referencia tierra del motor (0 voltios).
- Entrada de señal: Recibe la señal de control del motor (mediante pulsos de voltaje).

En la figura 5.3 se muestran las partes del servomotor antes descritas.

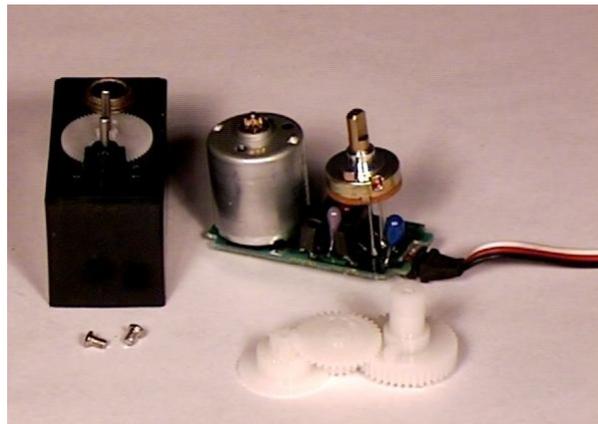


Figura 5.3: Servomotor [32].

5.4. Motores a pasos

Los motores de velocidad gradual o de pasos (figura 5.4) son motores especiales que se utilizan cuando el movimiento y la posición se tienen que controlar con precisión. Los motores de pasos giran en pasos discretos, y cada paso corresponde a un pulso que es suministrado a uno de sus devanados de estator [29].



Figura 5.4: Motor a pasos [33].

Las características anteriormente mencionadas hacen que el movimiento sea preciso, constante y repetible; dándole al motor paso a paso una elevada capacidad de posicionamiento, lo que permite utilizarlos en sistemas que requieren un control exacto de velocidad, distancia y dirección de un movimiento [34].

Lo más importante del motor paso a paso es que el único error sistemático que produce es el error de paso que generalmente es menor que el 5% del valor del paso. Este error no es acumulativo, o sea que es independiente del desplazamiento total girado y del número de veces que se repita la posición final.

Entre sus principales aplicaciones destacan como motor de frecuencia variable, motor de corriente continua sin escobillas, servomotores y motores controlados digitalmente.

Existen tres tipos de motores paso a paso, según su principio de funcionamiento:

- 1) Motores de reluctancia variable.
- 2) Motores de imán permanente.
- 3) Motores mixtos.

Los primeros constan de un estator con devanados de excitación, y un rotor magnético con salientes. No se necesitan conductores en el rotor porque el par se produce por la tendencia del rotor a alinearse con la onda de flujo producida por el estator de acuerdo con la posición de menor reluctancia.

En los motores paso a paso de imán permanente el rotor es un imán permanente. Funciona con el principio básico del magnetismo: polos igual signo se repelen y polos de signo opuesto se atraen.

Por último los motores de paso a paso híbridos son combinación de los dos tipos anteriores; el rotor suele estar constituido por anillos de acero dulce dentado en un número ligeramente distinto al del estator y dichos anillos montados sobre un imán permanente dispuesto axialmente.

5.5. Selección del motor

Las especificaciones para la selección del motor se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.1: Requerimientos y Especificaciones.

Requerimiento	Especificación
Los motores consuman poco voltaje	Voltaje máximo 6[V]
Ocupen poco espacio	Volumen máximo que pueden ocupar los motores $7.95 \times 10^{-6} [m^3]$
Poder mover el mecanismo con poca fuerza	El par de torsión mínimo es de 0.24[N·m]

Las especificaciones antes mostradas se obtuvieron a partir de las características de los servomotores que se han utilizado en proyectos anteriores dentro del grupo de investigación. Además de esto, para el voltaje máximo se estableció que la duración de las baterías fuera de mínimo una jornada de 8 horas diarias.

La especificación más importante es la del volumen máximo que pueden ocupar los motores. Estos van a estar dentro de la palma y para poder conservar las medidas antropomórficas de ésta es importante que el volumen que ocupe el motor esté dentro del rango especificado. Con base en esto el motor a pasos se descartó porque el volumen que puede ocupar dentro de la palma es mayor que el rango especificado.

Se investigaron distintos modelos de servomotores y micromotores, con el objetivo de seleccionar el adecuado de acuerdo con las especificaciones. Se realizó una tabla comparativa de algunos modelos de estos motores que se pueden encontrar de manera comercial.

Tabla 5.2: Tabla comparativa.

Tipo de motor	Imagen	Velocidad [rpm]	Voltaje [V]	Consumo de energía libre [mA]	Consumo de energía detenido [A]	Torque [kg-cm]	Torque [N-m]	Reducción	Dimensiones [mm]
Micro-motorreductor		440	6	40	0.36	0.36	0.035	30:1	
Micro motorreductor		320	6	60	1.6	2.2	0.156	100:1	largo 9.27
Micro motorreductor		440	6	40	0.36	0.36	0.035	30:1	
Motor-reductor		140	6	60	0.8	2.5	0.078	115:1	15.5 D x 30L
Micro motor		3000	6	120	1.6	0.3	0.156	10:1	9.27 L
Hobbico CS-5		111	6			1.2			21.88 largo 10.92 Ancho
Servomotor SKU-MKS-DS470		117	5			2.47			19.812 Alto 22.5X10 X23.5

Después de observar las características de los motores presentados en la tabla comparativa, se concluye que es posible utilizar los micro-motorreductores, ya que cumplen con las especificaciones antes mencionadas. Por otro lado, en proyectos anteriores dentro del grupo de investigación de prótesis del CDMIT ya se han probado los servomotores, por lo tanto también al proponer los micro-motorreductores se busca probar otro tipo de actuadores para su futura utilización en siguientes proyectos.

Se buscaron distintos modelos de micro-motorreductores, ya que como se mencionó en la descripción de este tipo de motores existen diferentes clasificaciones de acuerdo al tipo de uso que se le quiere dar al micro-motorreductor.

En la siguiente tabla se muestran las características de los motores que se pueden utilizar.

Tabla 5.3: Micromotores.

Tipo de motor	Voltaje [V]	Reducción energía libre [mA]	Consumo de [rpm]	Velocidad	Torque [N-m]
bajo poder	6	360	150:1	85	0.120
			210:1	60	0.190
			250:1	50	0.2259
			298:1	45	0.2824

Capítulo 6

SISTEMA ELECTRÓNICO

En este capítulo se muestra la propuesta que se utilizará para la actuación de la mano, en específico el movimiento de los dedos. Se presenta el sistema de comunicación entre los motores y la interfaz donde se muestran los distintos tipos de prensiones. También se explica el circuito que se diseñó para controlar el encendido y apagado de los motores.

El objetivo del sistema electrónico es mandar la señal a los actuadores para mover el mecanismo de cada uno de los dedos de la mano. Para esto se utilizará el microcontrolador ATMEGA 328, el cual recibe una señal por medio de comunicación USB de un programa que se desarrolló en LabView, en donde se indican las distintas prensiones de la mano. Para controlar la fuerza de presión se propone un circuito de control por medio de corriente, el cual se explicará más adelante. En la siguiente figura se muestra en conjunto el sistema electrónico.

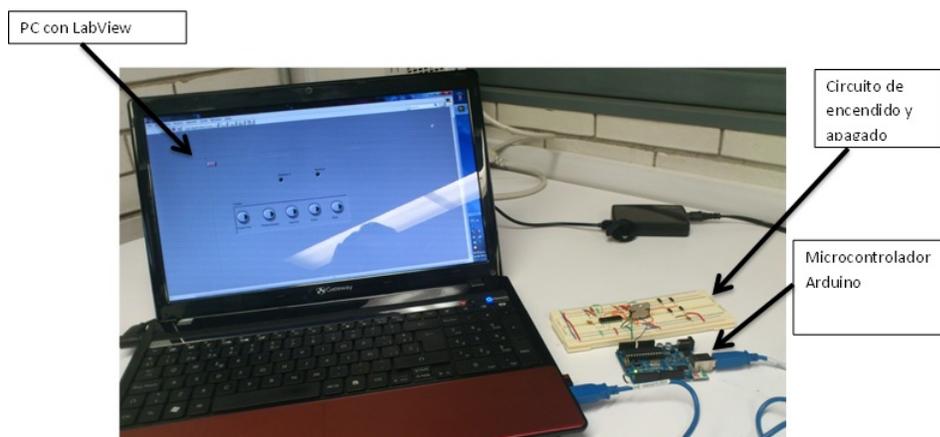


Figura 6.1: Sistema electrónico.

El microcontrolador recibirá un dato en donde se indica el tipo de prensión que se quiere realizar, posteriormente este manda una señal hacia el circuito de los motores para activar el motor. Una vez que cada uno de los motores ha alcanzado su posición final se manda una señal de control para indicarle al Programa en LabView que se ha llegado a la posición deseada. Para realizar una nueva prensión, primero se regresa a la posición inicial de la mano (normalmente abierta), para posteriormente mandar la señal de la nueva posición a la que se quiere llegar.

6.1. Circuito de encendido y apagado del motor

En esta sección se explica de manera general el funcionamiento del circuito de control. Para esta etapa del proyecto sólo se menciona la propuesta para dicho circuito y como es que se obtendrán los valores para las señales de control.

El circuito de control propuesto se basa en el principio del cambio en el valor de la corriente que ocurre cuando el motor de corriente directa tiene una carga, es decir, cuando el rotor del motor está bloqueado.

Con base en esto, a continuación se explica el funcionamiento del circuito de control cuando la mano realiza la prensión de un objeto. Al momento de iniciar el movimiento de flexo-extensión de los dedos la corriente que necesita el motor para moverse es de un cierto valor. Cuando los dedos comienzan a realizar la prensión de un objeto, el valor de la corriente que necesita el motor cambia debido a que se necesita de mayor corriente para poder seguir moviendo los dedos, es en este momento cuando el circuito de control realiza la función de apagar los motores. El circuito de control apaga los motores en el momento en que la corriente sobrepasa el valor de referencia.

Para conocer los valores de la corriente en los que el motor estará encendido o apagado, se realizará lo siguiente. Para cuando el motor estará encendido (valor de corriente de referencia), lo que se hará es conocer con que voltaje el motor puede mover el mecanismo de manera libre, es decir, solo realizando el movimiento de flexión y extensión. El valor en el cual el circuito de control apagará los motores será cuando el valor de la corriente sobrepase el valor de referencia.

La manera en que el circuito de control registra los cambios de corriente es mediante un circuito integrado que relaciona el voltaje con la corriente, es decir, a un valor de voltaje le corresponde un valor de corriente.

En la figura 6.2 se presenta el esquemático del circuito propuesto.

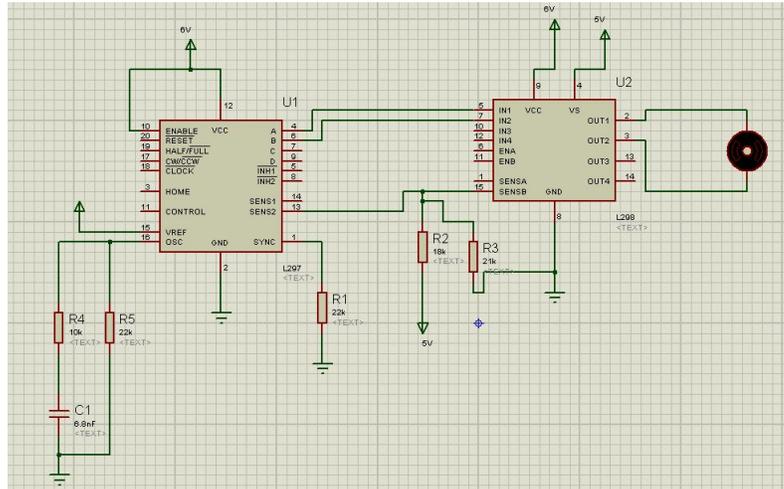


Figura 6.2: Esquemático del circuito.

Para poder realizar pruebas con el circuito de control y verificar si el diseño propuesto era correcto, se montó el diseño del circuito en una protoboard (figura 6.3).

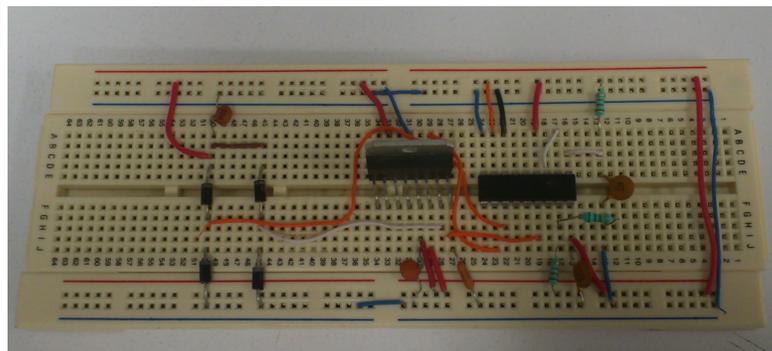


Figura 6.3: Circuito de encendido y apagado.

Capítulo 7

FABRICACIÓN

Con base en el diseño de configuración de la carcasa de los dedos con el mecanismo, se procedió a fabricar los engranes y la carcasa para validar el ensamble. La fabricación se dividió en dos partes:

- Maquinado de los engranes.
- Impresión en la máquina de prototipos rápido.

7.1. Impresión en la máquina de prototipos rápidos

Para la fabricación de la carcasa de los dedos se utilizó la máquina de prototipos rápidos, este proceso de fabricación permite obtener cualquier tipo de pieza en plástico ABS a partir de su diseño digital en CAD y permite realizar pruebas de funcionamiento.

La máquina utilizada que lleva por nombre impresora tridimensional (figura 7.1), utiliza una charola y dos cartuchos para crear los modelos, uno de ellos lo usa como material de soporte para sujetar las piezas y el otro como material de trabajo. Las piezas son orientadas y depositadas en la charola, la cual tiene las siguientes dimensiones 203x203 mm, el tamaño máximo de construcción es de 203x203x305 mm [1].

El material de soporte que utiliza esta máquina es fécula de maíz, el material de trabajo es polímero ABS. El ABS es un material muy usado por sus buenas propiedades mecánicas y por ser fácil de manufacturar. Los modelos de ABS se pueden procesar de muchas formas mediante: termoformado, moldeo por inyección, soplado y extrusión; una vez conformadas las piezas se pueden fresar, taladrar y pintar.

En la fabricación por medio de prototipos rápidos, se tomó en cuenta el sentido de la impresión. Cuando se imprimen piezas pequeñas es un parámetro fundamental para que las piezas no se rompan.



Figura 7.1: Máquina de prototipos rápidos.

En la figura 7.2 se muestra las carcasas después de ser retiradas de la máquina de prototipos rápidos.



Figura 7.2: Carcasas impresas.

7.2. Maquinado de los engranes

Para el maquinado de los engranes se probaron dos diferentes forma de fabricación, el corte por láser y el corte por chorro de agua.

7.2.1. Corte por láser

Es una técnica empleada para cortar piezas de cualquier tipo de material, que va desde MDF hasta metal. Se caracteriza por que su fuente de energía es un láser que concentra luz en la superficie de trabajo. Para poder retirar el material cortado es necesario el aporte de un gas a presión como por ejemplo oxígeno, nitrógeno o argón. Entre las principales ventajas de este tipo de fabricación de piezas se puede mencionar que no es necesario disponer de matrices de corte y permite efectuar ajustes de silueta. Como puntos desfavorables se puede mencionar que este procedimiento requiere una alta inversión en maquinaria y cuanto más conductor de calor sea el material, mayor dificultad habrá para cortar.

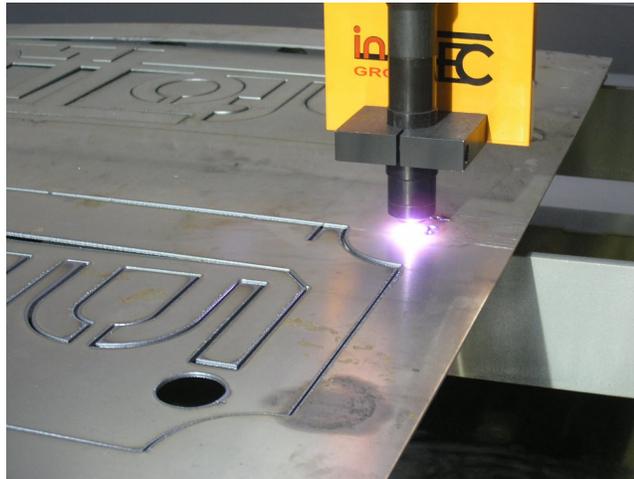


Figura 7.3: Corte por láser.

7.2.2. Corte por chorro de agua

El corte por chorro de agua es un proceso de índole mecánica por arranque de viruta, mediante el cual se consigue cortar cualquier material, haciendo impactar sobre éste un chorro de agua a gran velocidad que produce el acabado deseado. Los multiplicadores de presión hidráulicos o las bombas de alta presión mecánicas hacen que el agua alcance presiones superiores a los 5000 bar, produciendo el corte. Existe dos tipos de procesos para el corte por chorro de agua: corte con agua pura y corte con abrasivo.

Corte con agua pura

En este tipo de corte el agua es la herramienta de corte. Mediante este proceso es posible cortar sobre todo material blando, por ejemplo productor de papel, material de sellado, plástico, espuma, textiles o alimentos (figura 7.4). El corte con agua pura presenta una buena precisión. El grosor del chorro de agua puede ser inferior a 0.1 milímetros, lo que permite cortar contornos finos, ángulos afilados y radios estrechos.



Figura 7.4: Corte con agua pura.

Corte con abrasivo

Con el corte por chorro de agua también se pueden procesar materiales duros, como metales, minerales, vidrio o cerámica. Para realizar esto es preciso añadir un medio de corte (abrasivo) al chorro de agua (figura 7.5), como por ejemplo arena de granate. En este proceso el abrasivo es la herramienta de corte. El corte por chorro de agua con abrasivo es comparable con un micromecanizado.

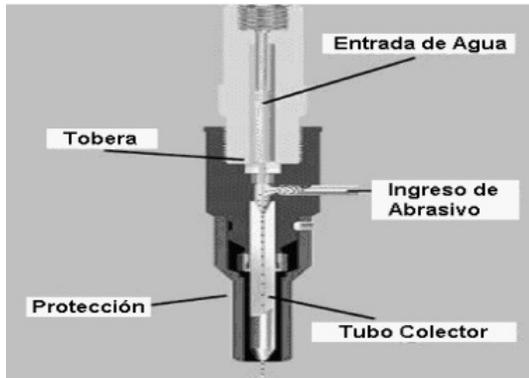


Figura 7.5: Corte con abrasivo.

RESULTADOS Y PRUEBAS

Se muestran los resultados de la fabricación del mecanismo mediante corte por láser y corte por chorro de agua. Se expone el mecanismo del dedo fabricado por corte por chorro de agua y el ensamblaje de la carcasa con el mecanismo para formar el prototipo del dedo. Finalmente se presentan las pruebas del dedo realizadas utilizando un servomotor.

La primera prueba de la fabricación del mecanismo se hizo mediante el corte por láser utilizando como material acrílico de 5 mm de espesor, en la figura 7.6 se muestra el ensamblaje final del mecanismo cortado por medio de láser.



Figura 7.6: Mecanismo cortado con láser.

Al revisar cada uno de los engranes del mecanismo se notó que los dientes de los engranes con el diámetro más pequeño no están bien definidos, es decir, no existe profundidad en los dientes y por lo tanto no engranan entre ellos (figura 7.7). Esto ocurrió porque la resolución de la máquina con la que se realizó el corte no es lo suficiente para poder fabricar engranes de este tamaño.

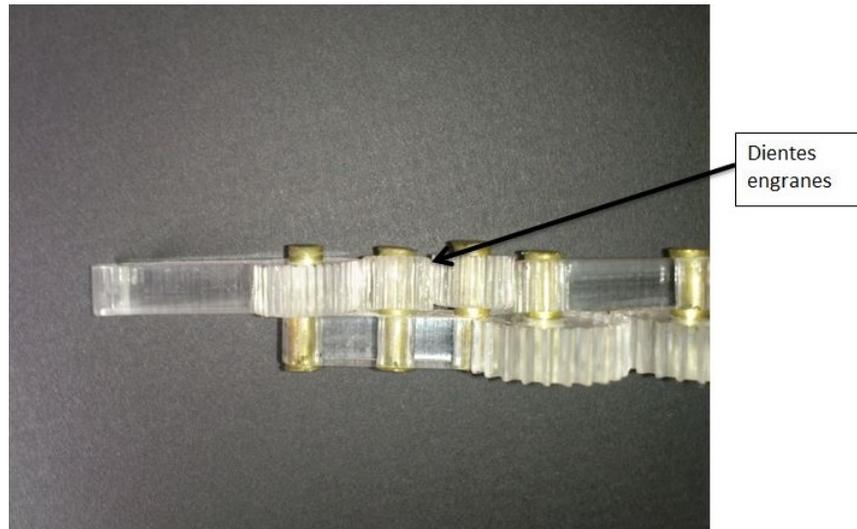


Figura 7.7: Contacto entre dientes.

Esta primera aproximación de la fabricación del mecanismo, ayudó a visualizar el movimiento de flexo-extensión. Además observar que la parte crítica de fabricación del mecanismo es los engranes de la última falange, debido a que los diámetros de los engranes de esta falange son pequeños.

Para la segunda prueba de fabricación se utilizó el corte por chorro de agua utilizando como material aluminio de 5 mm de espesor, en la figura 7.8 se observan los engranes en la posición (sin ensamblar) en la que se forma el mecanismo.



Figura 7.8: Mecanismo corte por chorro de agua.

Mediante este método se corrigió, en comparación con el corte por láser la forma de los dientes más pequeños, como se puede observar en la figura 7.9 los engranes ya tienen una forma más definida y se puede observar que el engranaje se mejoró.

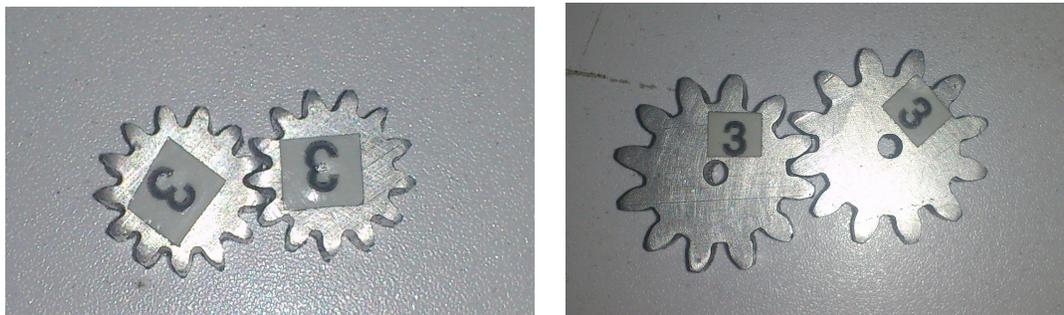


Figura 7.9: Contacto entre dientes de los engranes fabricados por medio de chorro de agua.

Con base en los resultados que se mostraron en la figura 7.9, se decidió utilizar el corte por chorro de agua para fabricar el mecanismo. Con este método de fabricación logramos obtener una resolución del corte de 0.5 mm.

En la figura 7.10 se muestra el ensamble final del dedo con la carcasa en la posición extendida y flexionada.



a) Dedo extendido. b) Dedo flexionado.

Figura 7.10: Prototipo dedo.

En la figura de la izquierda se observa que el dedo tiene una forma similar a la de un dedo normal. En la figura de la derecha se puede observar que el dedo puede realizar la flexión.

Para comprobar si el prototipo del dedo seguía la trayectoria del dedo humano, se realizó lo siguiente. Se colocó el dedo sobre la hoja donde se trazó la trayectoria del dedo humano y se movió en tres diferentes posiciones (inicial, intermedia y final). En la figura 7.11 se puede observar que el prototipo del dedo sigue la forma de la curva trazada por el dedo humano. Con base en esto se puede concluir que el dedo protésico sigue el rizo de la trayectoria del movimiento de flexo-extensión.

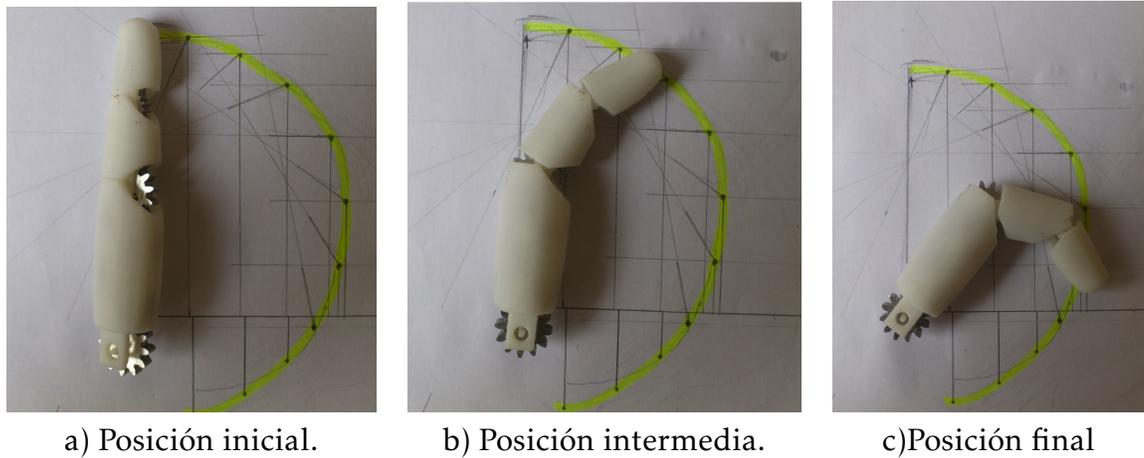


Figura 7.11: Movimiento del dedo.

En la siguiente figura se observa el prototipo del dedo junto con un dedo humano. Donde se puede ver que el tamaño del dedo protésico es ligeramente más grande al dedo humano. El dedo protésico es 0.03 centímetros más grande en su última falange debido al método utilizado para realizar la síntesis, el cual se explicó anteriormente.

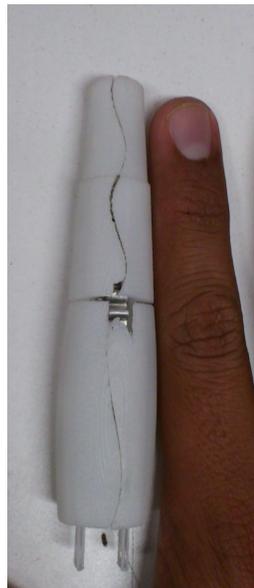


Figura 7.12: Prototipo dedo y dedo humano.

Este primer prototipo ayudó a observar de manera física la forma en como se realiza el movimiento de flexo-extensión del mecanismo ya ensamblado a la carcasa y observar el contacto entre engranes y la transmisión de movimiento.

Para observar el movimiento de flexo-extensión del prototipo, se realizó una prueba con un servomotor. La prueba se realizó con un servomotor, debido a que para utilizar los micromotores que se proponen es necesario un tornillo sin fin, la obtención de este tornillo se dejará como trabajo a futuro.

En la figura 7.13 se observa el banco de pruebas que se utilizó. En la imagen se puede apreciar el dedo montado en una base y el motor conectado al primer engrane, este engrane se fijó a una base de pegamento epoxico. Se utilizó el microcontrolador ATMEGA328, mediante la plataforma arduino se realizó un programa para hacer mover el servomotor de 180 a 90 para que el dedo realizara el movimiento de flexo-extensión.

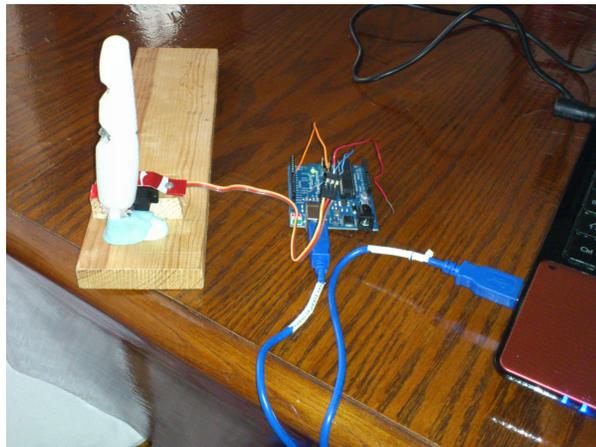


Figura 7.13: Banco de pruebas.

En la siguiente imagen (figura 7.14) se muestra la flexión máxima del dedo.

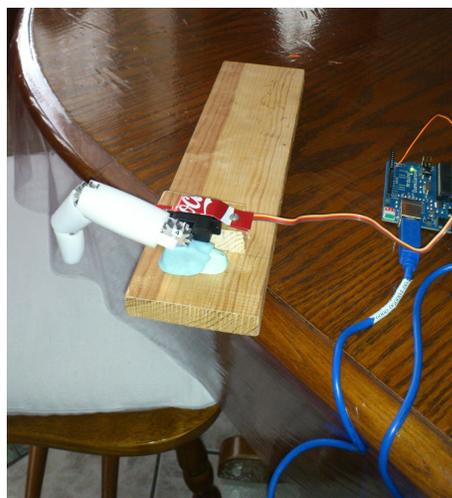


Figura 7.14: Flexión máxima del dedo.

CONCLUSIONES

Se cuenta con un modelo de síntesis cinemática del mecanismo con 1 GDL, el cual relaciona las dimensiones de las falanges, los radios de engranes y la trayectoria que sigue el dedo al realizar el movimiento de flexo-extensión. Dicho modelo para ser utilizado en el diseño de la prótesis, tiene la restricción de que las falanges tienen que respetar las medidas antropométricas del dedo humano. Dejando como variables libres de diseño los radios de los engranes y los ángulos que algunas falanges tiene durante el movimiento.

El principio del mecanismo bicicloidal utilizado en el diseño del mecanismo hexacicloidal, se propuso como una opción para reducir el par de torsión a la entrada. El incrementar el número de engranes para lograr satisfacer las medidas antropométricas del dedo no permitió una variación considerable en la reducción del par de torsión a la entrada, debido a que los radios de los engranes son muy parecidos.

El análisis estático realizado proporciona la fuerza requerida por el motor para realizar la prensión en la punta del dedo. El par de torsión obtenido del análisis estático es de 3 [N·m] considerando una fuerza en la punta del dedo de 1 [N].

Los motores que se proponen utilizar para accionar el mecanismo cumplen con la especificación del par de torsión mínimo, además de que el tamaño de estos ayuda ahorrar espacio en la palma. La variación en el par de torsión requerido por el motor se puede conseguir al modificar el radio de los engranes. Esta modificación llevaría a sugerir una nueva estructura usando trenes de engranes planetarios compuestos, es decir, por cada eje dos o más engranes. Esto pudiera ocasionar que la manufactura se complique y el volumen requerido sea mayor.

Por otro lado el poder variar el par de torsión, ofrece poder conservar los micro-motores para el accionamiento del mecanismo y con esto conservar un peso adecuado en la prótesis para el usuario.

El diseño de la carcasa fue un apoyo importante en el diseño del mecanismo, ya que su diseño se basó en las medidas antropométricas de la mano y se obtuvo un dedo más parecido al dedo humano.

El circuito propuesto permitirá poder realizar las dos prensiones que se establecieron como especificaciones. Para conocer si los dedos han llegado a la posición indicada se utilizará la variación de corriente en los motores, es decir, cuando la corriente tenga un valor sobre el valor de referencia el motor se detendrá.

El prototipo del dedo protésico fabricado sirvió para observar algunos detalles de la fabricación. Los cuales se mencionan a continuación:

- El corte por chorro de agua fue adecuado para realizar los engranes. En comparación con el corte por láser nos ofreció una mejor forma en los dientes de los engranes, lo cual ayuda a tener una mejor transmisión de movimiento.
- El tamaño del dedo es similar al tamaño de un dedo humano. Se cumplió que las medidas del dedo protésico fueran similares a las medidas antropométricas de un dedo.
- El mecanismo fabricado realiza el movimiento de flexo-extensión.

Esta tesis se desarrolló en el marco del proyecto PAPIIT IT102512 “Diseño de sistemas mecatrónicos aplicados al ser humano”.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que en la fabricación de los engranes se busque que la máquina en la que se va realizar el corte por chorro de agua tenga la precisión para poder realizar un corte de engranes de diámetro menor a 1 cm. También se recomienda buscar si existe una máquina de corte por láser en metal que realice cortes de piezas del tamaño que se necesitan. En el mismo sentido también se recomienda buscar si es posible realizar los engranes por medio de corte con fresa.

Para la fabricación de los engranes se recomienda explorar el nylamid y algunos otros materiales que ofrezcan alta resistencia al impacto y las fuerzas de fricción.

Es necesario considerar la lubricación de los engranes. Al realizar pruebas de movimiento con el prototipo se observó que la fricción entre los dientes ocasionaba que el movimiento no se realizará de manera completa.

Para la fabricación de la carcasa se recomienda buscar fabricarla con otro tipo de polímero considerando el proceso de fabricación por medio de inyección. Esto se recomienda porque es necesario que el material de la carcasa de los dedos sea resistente. Además de considerar revestir la mano con un guante de latex.

TRABAJO A FUTURO

Como hemos visto se tiene un dedo formado por un mecanismo hexacicloidal que realiza el movimiento de flexo-extensión, quedando pendiente la fabricación y ensamble de la mano completa para realizar las pruebas de prensión.

También queda pendiente la fabricación o búsqueda de manera comercial del tornillo sinfín que ayudará a transmitir el movimiento de los motores hacia el mecanismo.

Proponer otro tipo de control para realizar los distintos tipos de prensión, en donde además de controlar la posición del motor, se controle la velocidad y la fuerza de prensión.

Buscar las baterías adecuadas de acuerdo al consumo de energía del circuito durante el accionamiento de la mano.

Las prótesis mecánicas desde hace más de treinta años tienen el problema de que el usuario necesita realizar mucha fuerza con su espalda para lograr abrir la pinza cuando el codo de la prótesis se encuentra a 90°. Con el objetivo de proponer el mecanismo como una posible solución al problema antes mencionado. Se sugiere probar si el mecanismo propuesto para los dedos se puede accionar por medio de un chicote, ya que es la manera como se acciona la pinza que se utiliza en las prótesis mecánicas como órgano terminal.

Bibliografía

- [1] Flores Luna Itzel; Juárez Mendoza Ana. *Diseño de Prótesis Mecatrónica de Mano*. 2007.
- [2] R.E. Kaufman, G.N. Sandor, and American Society of Mechanical Engineers. *Bicycloidal Crank: A New Four-link Mechanism*. American Society of Mechanical Engineers. ASME, 1968.
- [3] Julio Cesar Díaz Montes; Jesús Manuel Dorador González. Mecanismos de transmisión y actuadores utilizados en prótesis de mano. *Memorias del XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, pages 335–345, Septiembre 2009.
- [4] Massimiliano Zecca; Stefano Roccella; Giovanni Cappiello; Kazuko Ito; Kazutaka Imanishi; Hiroyasu Miwa; M. Chiara Carrozza; Paolo Dario; Atsuo Takanishi. From the Human Hand to a Humanoid Hand: Biologically-Inspired Approach for the Development of RoboCasa Hand 1. Disponible en Internet: <http://www.robocasa.net>.
- [5] Marco Controzzi; Christian Cipriana; M. Chiara Carrozza. Mechatronic Design of a Transradial Cybernetic Hand. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 576–581, 2008.
- [6] G. Stellan; C. Cipriani; F. Zaccone; M. C. Carrozza; C. Lashi; P. Dario. Design of an Anthropomorphic Dexterous Hand for a 2-Years-Old Humanoid: Ongoing Work. Disponible en Internet: www.robotcup.org.
- [7] P. Dario B. Massa; S. Roccella; M. C. Carrozza. Design and Development of an Underactuated Prosthetic Hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3374–3379, 2002.
- [8] F. Lotti; P. Tiezzi; G. Vassura; L. Biagiotti; G. Palli; C. Melchiorri. Development of UB Hand 3: Early Results. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4488–4493, 2005.

- [9] S. Levin; W. Van Moorleghem J. L. Pons; E. Rocon; R. Ceres; D. Reynaerts; B. Saro. The MANUS-HAND Dextrous Robotics Upper Limb Prosthesis: Mecahnical and Manipulation Aspects. *Autonomous Robots 16*, pages 143–163, 2004.
- [10] Jimmy W. Soto Martell; Giuseppina Gini. Robotic Hands: Design Review and Proposal of New Design Process. *Proceedings Of World Academy Of Science Engineering And Technology*, 20:1307–6884, 2007.
- [11] Shadow Dextrous Hand - Technical Specification, 2006.
- [12] M. A. Diftler C.S. Lovchik. The Robonaut Hand: A Dexterous Robot Hand For Space. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 907–912, 1997.
- [13] Ann M. Ramos; Ian A. Gravagne; Ian D. Walker. Goldfinger A Non-Anthropomorphic, Dextrous Robot Hand. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 913–191, 1999.
- [14] D. W. Zhao; L. Jiang; H. Huang; M. H. Jin; H. G. Cai; H. Liu. Development of a Multi-DOF Antropomorphic Prosthetic Hand. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 878–883, 2006.
- [15] P. J. Kyberd; J. L. Pons. A Comparison of the Oxford and Manus Intelligent Hand prostheses. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3231–3236, 2003.
- [16] C. S. Lovchik; M. A. Diftler. The Robonaut Hand: A Dexterous Robot Hand For Space. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 907–912, 1999.
- [17] N. Dechev; W.L. Cleghorn; S. Naumann. Multiple finger, passive adaptative grasp prosthetic hand. *Mechanism and Machine Theory*, 36:1157–1173, 2001.
- [18] C. M. Light; P. H. Chappell. Development of a lightweighth and adaptable multiple-axis hand prosthesis. *Medical Engineering and Physics*, 22:679–684, 2000.
- [19] Disponible en Internet: www.centri.se.
- [20] Tetsuya Mouri; Haruhisa Kawasaki; Keisuke Yoshikawa; Jun Taki; Satoshi Ito. Anthropomorphic Robot Hand: Gifu Hand III. *ICCAS; Jeonbuk; Korea*, pages 1288–1293, 2002.
- [21] Jun-Uk Chu; Dong-Hyun Jung; Yun-Jung Lee. Design and Control of a Multifunction Myoelectric Hand with New Adaptative Grasping and Self-locking Mechanisms. *International Conference on Robotics and Automation*, pages 743–748, 2008.

- [22] Sung-Yoon Jung; Sung kyun Kang; Myoung-Jun Lee; Inhyuk Monn. Design of Robotic Hand with Tendon-driven Three Fingers. *International Conference on Control, Automation and Systems*, pages 83–86, 2007.
- [23] Li-Ren Lin; Han-Pang Huang. Mechanism Design of A New Multifingered Robot Hand. *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1471–1476, 1996.
- [24] Gougliang Guo; Xikang Oian; A. Gruver. Multi-Function Mechanical Hand With Shape Adaptation, May 1993. Patente número 5,378,033.
- [25] Iris Miralles Rull. *Biomecánica clínica de las patologías del aparato locomotor*. Elsevier España, 2007.
- [26] Mario Comín. *Biomecánica articular y sustitución protésicas*.
- [27] Buchner H. J.; Hines M.J. Hemami H. A dynamic model for finger intherphalangeal coordination. *Journal of Biomechanics* 21, pages 459–468, 1968.
- [28] Arthur G. Edman and George N. Sandor. *Mechanism Design - Analysis and Synthesis Volume 1*. Prentice Hall, Third edition, 1997.
- [29] T. Wildi and R.N. Salas. *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. Pearson Educación, 2007.
- [30] TODO PRODUCTIVIDAD. El uso de motores de corriente continua. Disponible en Internet: <http://todoproductividad.blogspot.mx/2009/10/el-uso-de-motores-de-corriente-continua.html>, abril 2013.
- [31] M.H. Rashid, M.H.R.V.G.P.A.S. Fernández, and V.G. Pozo. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación, 2004.
- [32] Robotics Sistem. Servo motors. Disponible en Internet: http://www.robotiksistem.com/servo_motor_types_properties.html, abril 2013.
- [33] Minirobot. Motor a pasos. Disponible en Internet: <http://www.minirobot.com.mx/tienda/img/p/276-325-large.jpg>, abril 2013.
- [34] Osvaldo Luis Mosconi. Máquinas e Instalaciones Eléctricas. Disponible en Internet: <http://www.ing.unp.edu.ar/asignaturas/maqueinstelectricas/MOTOR%20PASO%20A%20PASO.pdf>, abril 2013.
- [35] Wikipedia. Brushed DC electric motor. Disponible en Internet: http://en.wikipedia.org/wiki/Brushed_DC_electric_motor, abril 2013.
- [36] Guedez Victor; Mosquera Camelo Leonardo. Estudio biomecánico de la mano durante el agarre de herramientas manuales, datos antropométricos preliminares. *3rd International Conference on occupational Risk prevention*, 2004.

- [37] Instituto tecnológico y de estudios superiores de Monterrey; campus Morelos. Laboratorio de producción, antropometría.
- [38] A. Santiago; I. Valenzuela. *Ergonomía de miembro superior*. Facultad de Ingeniería. UNAM, Mayo 2005. Tesis.