

11
Lej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**DISEÑO MECANICO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
MANIPULADOR ANTROPOMORFICO**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE :

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA MECANICA)**

P R E S E N T A

LUIS VICENTE COLOMA MARGOLIES

Ciudad Universitaria,

1999

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

280823



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).

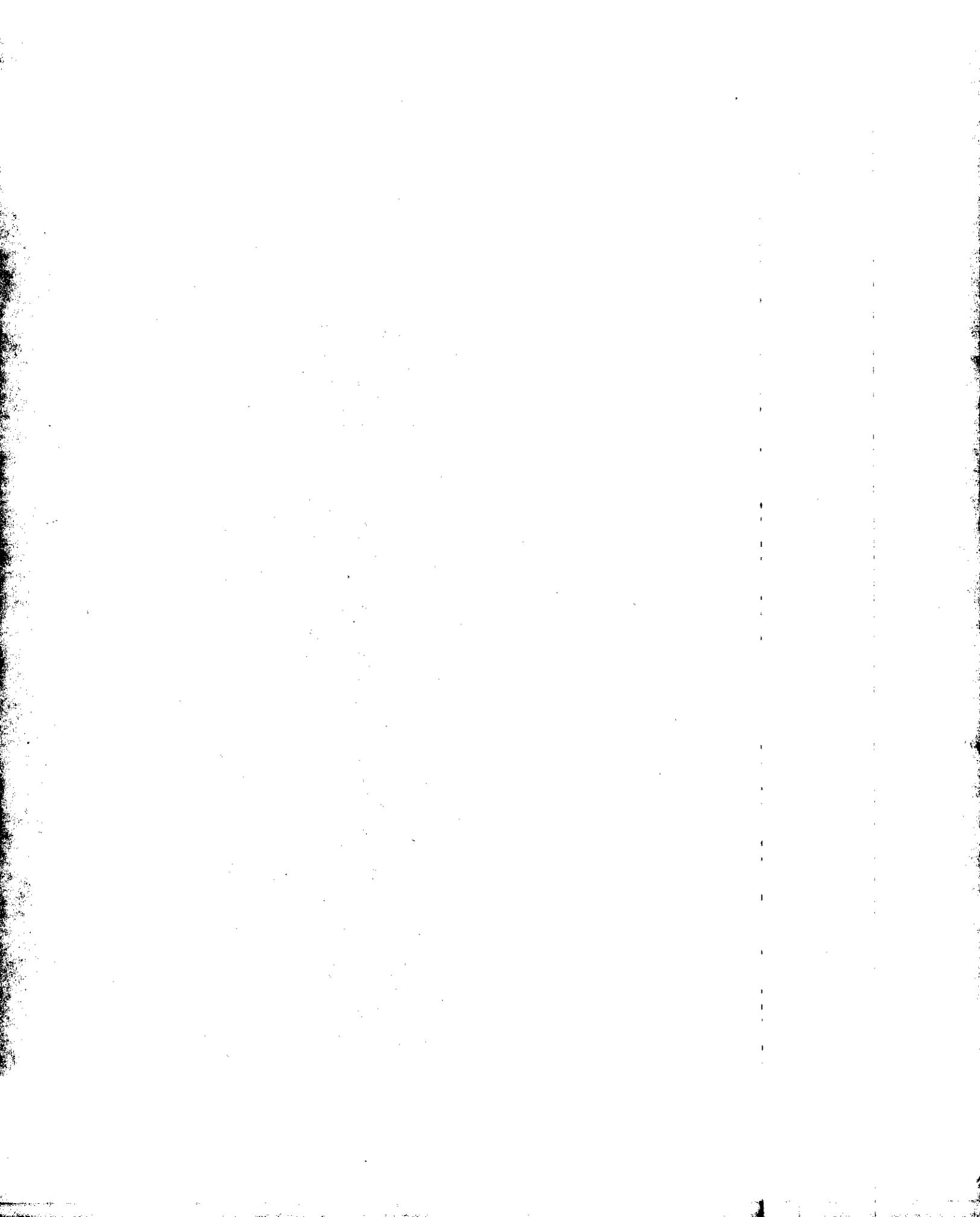
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

**DISEÑO MECANICO Y CONSTRUCCION DE UN
MANIPULADOR ANTROPOMORFICO**

Luis Vicente Coloma Margolies

Director de Tesis: M. en I. Víctor Javier González Villela

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



*A la memoria de mi Padre, que una de sus mayores
ilusiones era ver este trabajo terminado.*

Agradezco de todo corazón a mis padres Ernesto y Helen, que con su amor, ternura, ejemplo y paciencia me han dado todas las armas necesarias para poder salir adelante. Los amo.

Doy gracias también a mis hermanos Rocío y Ernesto por ser parte de mi vida y ser inmejorables como amigos y hermanos.

A mi profesor, asesor de tesis y amigo M. en I. Victor Javier González Vilela por todo el apoyo y paciencia que me ha tenido para la realización de este trabajo

A mis amigos quienes siempre me han apoyado en todo momento y nunca me han dejado de tener confianza.

Agradezco a todos mis profesores de la carrera quienes de alguna manera también forman parte de este trabajo.

DISEÑO MECANICO Y CONSTRUCCION DE UN MANIPULADOR ANTROPOMORFICO

INDICE
ATOS
RILAZ

Capítulo 1, Introducción	1
Capítulo 2, Análisis del Sistema	6
2.1 Definición del problema	7
2.1.1 Estudio Antropométrico de la Mano	9
2.1.1.1 Estructura de la Mano Humana	10
2.1.1.2 Tipos de Sujeción realizados por la Mano Humana	18
2.2 Antecedentes de Manos Mecánicas	25
2.2.1 Stanford / JPL	25
2.2.2 Utah / MIT	33
2.2.3 Belgrado / USC	37
2.3 Estado del Arte	43
2.4 Alternativas de Solución	46
2.5 Selección de la Mejor Alternativa	53
Capítulo 3, Diseño del Sistema	56
3.1 Diseño Preliminar de la Mano	58
3.1.1 Junta	61
3.1.2 Falange	62
3.1.3 Falangina	62

3.1.4	Falangeta	63
3.1.5	Articulaciones	64
3.2	Diseño de Tendones	66
3.2.1	Articulación Interfalangeana Distal	67
3.2.2	Articulación Interfalangeana Proximal y Metacarpofalangeana	70
3.3	Selección de Materiales para Manufactura	71
3.3.1	Selección de Materiales para las Falanges	71
3.3.2	Selección de Materiales para las Falangetas	73
3.3.3	Selección de Materiales para las Juntas	73
3.3.4	Selección de Materiales para las Articulaciones	74
3.3.5	Selección de Materiales para los Tendones	74
3.4	Diseño para Manufactura y Ensamble	75
3.4.1	Diseño de Piezas para ensamble de Falanges y Juntas	81
Capítulo 4, Fabricación		84
4.1	Parámetros de Fabricación	85
4.1.1	Velocidad de Corte	86
4.1.2	Avance por Minuto	87
4.2	Programación CNC	89
4.2.1	Programa para los Extremos de las Falanges	90
4.2.2	Programa de los Barrenos de las Falanges	92
4.2.3	Fabricación de las Falangetas	96
4.2.4	Programa para los Ejes de las Articulaciones	97
4.2.5	Programa para la Palma y el Dorso de la Mano	100
4.3	Fabricación y Ensamble	101
4.3.1	Fabricación	101
4.3.2	Ensamble	103

Capítulo 5, Pruebas, Caracterización y Resultados	108
5.1 Pruebas y Caracterización	108
5.1.1 Movimientos y Sujeción	108
5.1.2 Fuerza Máxima	114
5.1.3 Otras Propiedades Mecánicas	117
5.2 Resultados	118
Capítulo 6, Conclusiones	120
6.1 Ventajas del Manipulador Antropomórfico	121
6.2 Desventajas del Manipulador Antropomórfico	122
6.3 Expectativas a Futuro del Manipulador Antropomórfico	123
6.4 Conclusiones Personales	124
Anexo A, Planos de Construcción	125
Anexo B, Programas de Control Numérico	138
Bibliografía	146

CAPITULO 1
INTRODUCCION

CAPITULO 1

Introducción

Desde el comienzo de la existencia del hombre, nos hemos valido de nuestro ingenio para desarrollar herramientas que nos permitan realizar tareas que no podríamos realizar por nosotros mismos debido a las limitaciones físicas que nos caracterizan y distinguen de los demás seres vivientes. Gracias a todas esas herramientas, hemos logrado superar esos límites impuestos por la naturaleza al desarrollar máquinas y aparatos que amplían nuestras capacidades. La invención del automóvil, de los grandes buques, de los aviones y de las naves espaciales, ha permitido al hombre llegar a lugares jamás antes imaginados; el telescopio, el microscopio y la televisión nos muestran cosas que no veríamos a simple vista; con la radio, el teléfono y los amplificadores de sonido escuchamos cosas imperceptibles por nosotros; potentes motores nos dejan desarrollar grandes fuerzas; y por último, los brazos de robot y los manipuladores mecánicos han dado la facilidad de manejar cosas con exactitud y precisión.

Los brazos de robot y manipuladores industriales han contribuido a un desarrollo sin precedentes en el ramo manufacturero de la industria, pues poseen la capacidad de realizar una tarea continuamente una innumerable cantidad de veces, siempre con la misma precisión y exactitud de movimientos, a velocidades mayores que lo que nosotros los hombres podríamos hacerlo. Estos factores han logrado bajar los costos de fabricación significativamente debido al tiempo ahorrado en las tareas por ellos realizadas y además

han aumentado la calidad de los productos. También cuentan con la posibilidad de trabajar en lugares hostiles y/o con materiales peligrosos o delicados. En la actualidad, los manipuladores realizan tareas muy específicas y tienen pocas facilidades para utilizarse en otras tareas para las que no fueron diseñados. Estas tareas son, sobre todo, de ensamble teniendo gran éxito en el armado de circuitos electrónicos y la fabricación de los diferentes componentes electrónicos. También existen robots específicos para la realización de trabajos de soldadura y pintura en la industria automotriz.

Los brazos robot empleados para soldadura y pintura, no cuentan con un manipulador propiamente dicho pues la herramienta se adapta en el extremo del robot. Los utilizados para tareas de ensamble son, básicamente, sujetadores o "grippers" que sólo realizan la tarea de abrir y cerrar dos o a lo mucho tres "dedos" oponibles que son los que sujetan las piezas, es decir, son prácticamente un tipo de pinzas. También existen los manipuladores operados por ventosas, las cuales realizan un vacío succionando y adhiriéndose a la pieza en cuestión, para lo cual, se requiere una superficie lisa que permita que las ventosas se peguen a la pieza, sin peligro de que ésta se desprenda.

Estos grippers y ventosas, son los que limitan el uso de los manipuladores a tareas muy específicas pues sólo tienen la posibilidad de sujetar piezas, mas no de maniobrarlas para que adquieran diferentes posiciones. Todos estos manipuladores están diseñados para programar sus movimientos por lo que su uso se remite a lugares y condiciones conocidas de antemano. La manera de programarlos es por medio de un teclado, o bien guiándoles los movimientos una vez, "llevándolos de la mano", y ellos tienen la

capacidad de almacenar en su memoria la ruta seguida por cada una de sus partes. De estos dos, sólo los operados por medio de un teclado tienen la posibilidad de controlarse a distancia, pero la interface del teclado nos hace perder la sensibilidad de los movimientos por lo que resultan muy difícil de operar a distancia.

Para resolver estas limitaciones se desarrolló un proyecto que consistió en diseñar y construir un manipulador antropomórfico con telemando. El manipulador es una mano mecánica semejante a la mano humana que nos facilita la maniobrabilidad de piezas en la propia mano desarrollando movimientos más naturales y similares a los del hombre. Esta es controlada por medio de un guante que viste el usuario en el cual son sensados los movimientos de cada uno de sus dedos para ser interpretados por un microcontrolador Motorola de la familia HC-11, el cual manda señales de control a motores acoplados por medio de tendones a cada una de las articulaciones de la mano mecánica. El manipulador también cuenta con sensores de posición que retroalimentan al microcontrolador su posición real para que éste continúe mandando señales a los motores en el caso de que la posición de la mano mecánica no sea la que se está sensando en el guante vestido por el usuario.

Al usar un guante como medio para operar el manipulador, el usuario recupera la sensibilidad de los movimientos, elimina una capacitación para su uso, y además, la actuación de los motores es en tiempo real. Estas características permiten el uso del manipulador en lugares desconocidos pues puede no existir una programación de los movimientos, haciéndolo un sistema flexible de manipulación.

Esta tesis comprende el diseño de una mano mecánica así como su fabricación y caracterización. En el capítulo 2 se presenta una serie de requerimientos para el diseño, un breve análisis de las manos mecánicas ya existentes para tomar las mejores características de cada una, así como sus limitaciones, para crear junto con ellas algunas alternativas de solución y seleccionar la mejor de todas. En el capítulo 3 se realiza el diseño de detalle ayudados por paquetes de cómputo de CAD y modelado de sólidos con los que se hacen los planos de construcción; también se atienden criterios de manufactura y ensamble y la selección de los materiales. El capítulo cuarto, se centra principalmente en la fabricación, es decir los parámetros de maquinado y la programación de las máquinas de control numérico. En los capítulos 5 y 6 se caracteriza la mano después de hacer algunas pruebas de funcionamiento y se presentan los resultados y conclusiones. Las partes del proyecto correspondientes al sensado de la mano humana, el desarrollo de software y el control de los motores corresponden a otras tres tesis independientes a la presente.

CAPITULO 2

Análisis del Sistema

2.1. Definición del Problema.

En la actualidad, el uso de manipuladores se remite prácticamente a la industria, en tareas de ensamble, pintura, soldadura, aplicación de recubrimientos electrolíticos, y otras tareas de metalurgia, en las que resultan ser más eficientes que el trabajo humano debido a la repetitividad exacta y precisa de sus movimientos, la velocidad con que los desarrollan y sobre todo, en materia de seguridad, éstos pueden sujetar piezas en lugares en los que la salud de un obrero se vería afectada. Estos manipuladores, por lo general, sólo pueden realizar trabajos con piezas para los que fueron diseñados, es decir, que si un sujetador o "gripper" de un robot se proyectó sólo para sujetar piezas de ciertas dimensiones y forma, su aplicación no puede ir más allá de piezas muy similares a la pieza tomada en cuenta para su diseño. Además, todos los tipos de grippers o en algunos casos ventosas sólo pueden sujetar piezas, más no maniobrarlas para que adquieran otras posiciones.

Ya que el uso de los manipuladores es generalmente en la industria, donde realizan tareas en las que se repiten sus movimientos, todos ellos son necesariamente programables, y aunque existen los que se pueden usar en un modo manual por medio de un teclado con el cual se les programa, el manejo de ellos por medio de éste hace

que el usuario pierda la sensibilidad de los movimientos dificultando su uso en aplicaciones únicas que se vayan a ejecutar una sola vez. En adición, a pesar de la precisión en sus movimientos, los brazos de robot sobre los cuales se montan los grippers, por lo general tienen una gran masa que los limita para controlar pequeñas fuerzas en los manipuladores.

Debido a estas limitaciones, se ha pensado en un manipulador no industrial que pueda ser utilizado en labores de exploración en lugares inaccesibles u hostiles, y manejo de residuos tóxicos o materiales en condiciones altamente peligrosas para el hombre. Como las tareas a desarrollar pueden ser muy variadas, los tipos de sujeción y maniobras que debe realizar el manipulador no pueden estar limitadas por la forma del sujetador o gripper, es decir, que necesitamos un manipulador flexible.

El manipulador más flexible del que se tiene conocimiento es la mano humana por lo que se ha decidido hacer un manipulador antropomórfico que imite lo más fielmente posible los movimientos de nuestras manos. Para que el usuario tenga la suficiente sensibilidad en los movimientos del manipulador, se ha pensado en que el usuario pueda operar el manipulador por medio de un guante que el usuario vista en su mano. Este guante sensa los movimientos de cada una de las articulaciones del operador, enviando estos datos a un microcontrolador para que sean procesados. Una vez que el microcontrolador procesa las señales de entrada que recibe del guante, envía señales de control a motores que hacen mover las articulaciones respectivas.

Los requerimientos establecidos para el diseño de esta mano mecánica son los siguientes:

- Ser lo más semejante posible en forma y dimensiones a la mano humana.
- Realizar los movimientos que el hombre hace con su mano.
- Contar con sensores de posición que indiquen el estado actual de la mano mecánica.
- Estar hecha de materiales resistentes a condiciones extremas.
- Ejercer fuerzas mayores que las que el hombre puede hacer con su mano.
- Debe ser de poco peso.
- Estar hecha de manera económica.

2.1.1. Estudio Antropométrico de la Mano.

Con la finalidad de satisfacer los dos primeros requerimientos, es decir, que la mano mecánica sea lo más semejante posible a la mano humana, y que sea capaz de realizar los movimientos que el hombre hace con sus manos, fue necesario hacer un estudio antropométrico de la mano para conocer cada una de sus partes, en específico cada uno de sus huesos, la manera en que estos se articulan entre sí, las relaciones dimensionales entre cada uno de ellos, la cantidad de grados de libertad, los tipos de movimientos efectuados por cada articulación, y la posición y orientación de cada hueso.

2.1.1.1. Estructura de la Mano Humana.

La mano del hombre cuenta con cuatro dedos similares entre sí; el dedo índice (número 2 en la figura 1), el medio (núm. 3) anular (núm. 4) y meñique (núm. 5); siendo la única diferencia entre ellos, su longitud. Los cuatro cuentan con tres falanges, llamadas respectivamente desde la más próxima a la muñeca hasta la más alejada: primera falange, falange proximal o simplemente falange; segunda falange, falange media o falangina; y tercera falange, falange distal, terminal, ungueal o falangeta. Cada una consta de un cuerpo y dos extremos, que en la primera y segunda falange son articulares, y en la tercera sólo por su extremo proximal.

Las articulaciones de estos dedos son conocidas como articulaciones interfalangeanas distales y proximales, las primeras permiten a la falangina y a la falangeta tener un movimiento relativo entre ellas de flexión y de extensión, y la segunda deja tener los mismos movimientos entre la falangina y la falange. En la articulación metacarpofalangeana, las falanges proximales se acoplan con los huesos del metacarpo para lograr dos movimientos, la flexión y extensión, y la aducción y abducción.

Existen cinco huesos metacarpianos, los cuales son huesos cilíndricos y largos que articulan el carpo con las falanges. Están situados paralelamente y se enumeran del I al V, desde el dedo pulgar hasta el meñique. El I es el más corto; el II el más largo y los

demás decrecen en longitud del III al V. Los huesos del metacarpo del II al V carecen prácticamente de movimiento, mientras que el metacarpiano I, correspondiente al dedo pulgar tiene una gran movilidad. Éste al articularse con el carpo en la coyuntura carpometacarpiana, permite al dedo pulgar movimientos de flexión y extensión, y de aducción y abducción.

Los huesos del carpo, son los huesos que forman la muñeca. Estos son ocho huesillos llamados trapecio, escafoides, semilunar, piramidal, pisiforme, hueso ganchoso, hueso grande y trapezoide. La muñeca se articula con los dos huesos del antebrazo conocidos como cúbito y radio para lograr movimientos de flexión y extensión, y de aducción y abducción. El giro o rotación de la muñeca se logra por el cruce o anteposición del radio con el cúbito.

El dedo pulgar (núm. 1) sólo cuenta con falange y falangina, es decir, que carece de falangeta, por lo que sólo tiene una articulación interfalangeana, la metacarpofalangeana y la carpometacarpiana. Las dos primeras dejan que el dedo tenga movimientos de flexión y extensión, mientras que la tercera permite además de la flexión y extensión, como ya se mencionó, la aducción y abducción. Este dedo está dispuesto de una forma muy distinta a la de los demás dedos para lograr que éste se anteponga sobre la palma de la mano al movimiento de los otros cuatro dedos.

Con la mano extendida, los dedos índice, medio, anular y meñique tienen igual orientación. Disponemos de un sistema de tres ejes perpendiculares entre sí, un eje,

llamémoslo Z, apuntaría en la dirección que apuntan los dedos, el segundo sería un eje Y perpendicular al plano del dorso de la mano y el X sería paralelo al eje en el que rotan las falanges en las articulaciones interfalangeanas. Este sistema de referencia estaría situado sobre la articulación metacarpofalangeana. Si este sistema lo transportamos a la articulación carpometacarpiana del dedo pulgar, tendríamos que hacer dos rotaciones para lograr la particular disposición del dedo pulgar. La primera sería una rotación sobre el eje Y de aproximadamente 45° de modo que el eje Z señale hacia la punta del pulgar. La segunda rotación, después de hacer la primera, sería de alrededor de 45° sobre el nuevo eje Z hacia el borde lateral de la mano. Con este sistema de referencia del dedo pulgar, se logra que, cuando se ejecuta la flexión y extensión de la coyuntura carpometacarpiana, el pulgar se anteponga a los otros cuatro dedos sobre la palma de la mano.

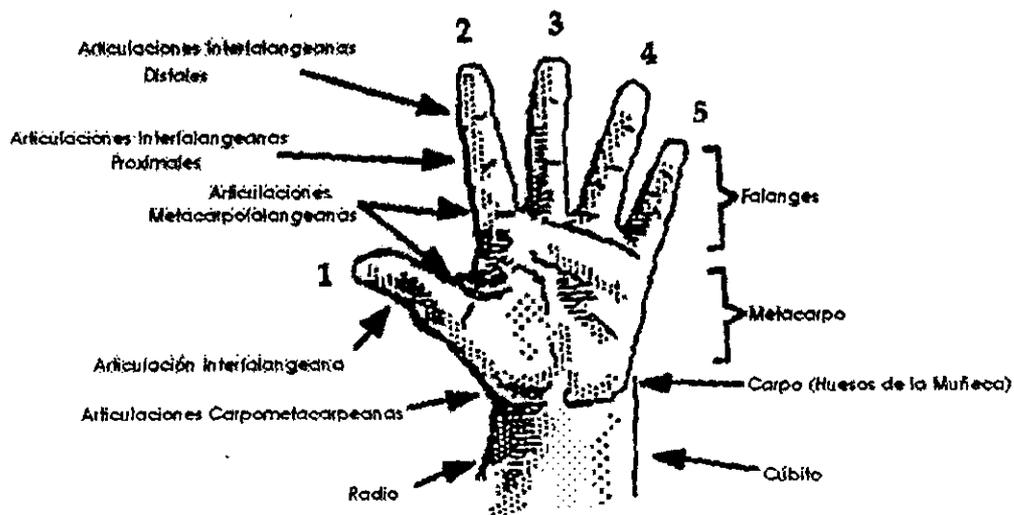


Fig. 2.1 Huesos y Articulaciones de la Mano Humana

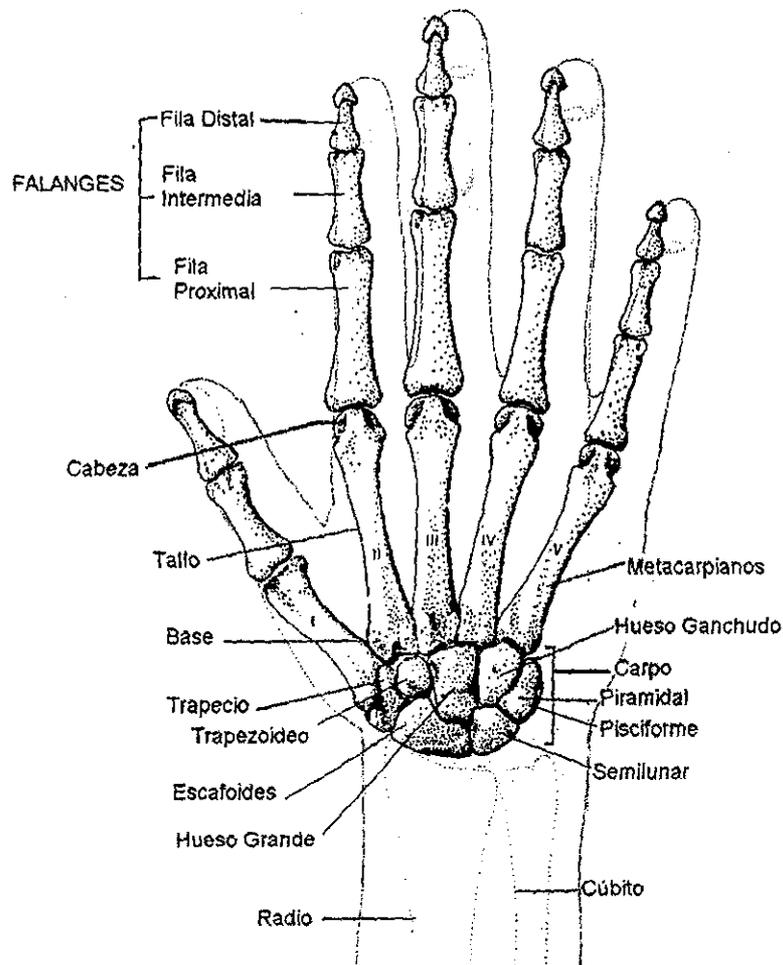


Figura 2.2. Estructura ósea de la mano humana

En términos generales se habla que la mano tiene más de 25 grados de libertad. Cuatro en cada uno de los dedos índice, medio, anular y meñique (uno en la articulación interfalangeana distal y otro en la proximal, y dos en la metacarpofalangeana), en el pulgar dos (uno en la unión interfalangeana y otro en la metacarpofalangeana), tres en la muñeca; un pequeño giro en cada una de las coyunturas carpometacarpianas II a V y dos movimientos en la carpometacarpiana I.

A pesar de que la mano tiene más de 25 grados de libertad, muchos de ellos están relacionados entre sí gracias a la estructura de ligamentos y la localización de las sinfisis de los tendones en los huesos. Por ejemplo, aunque cada dedo tiene cuatro grados de libertad, ellos no son controlables individualmente, tal es el caso de los músculos flexores que tienden a trabajar conjuntamente. Cuando los dedos índice, medio, anular o meñique comienzan a cerrarse dirigiéndose al pulgar en una sujeción de precisión, la flexión de la junta interfalangeana proximal, libera la tensión en el ligamento retinacular, permitiendo la flexión en la articulación interfalangeana distal.

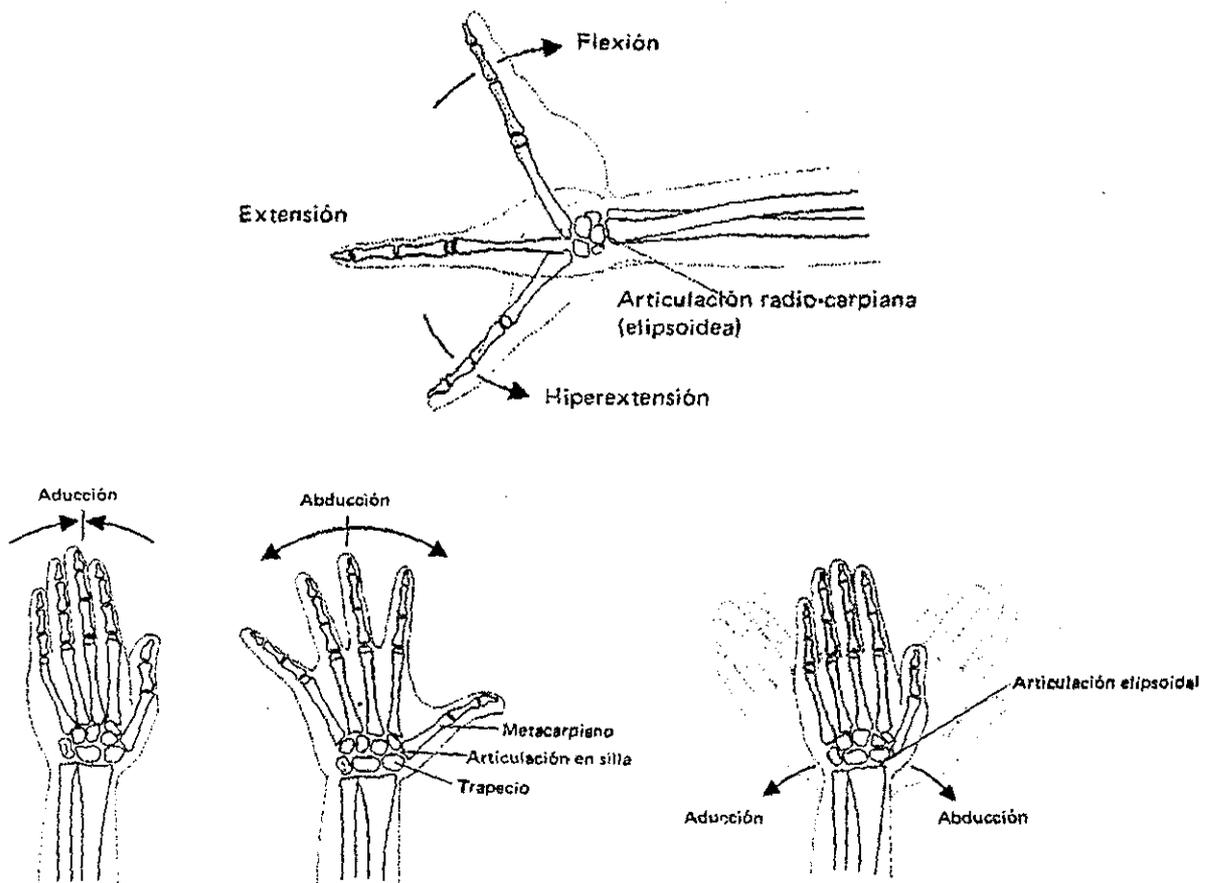


Figura 2.3. Movimientos de la Mano Humana

Para conocer las relaciones dimensionales de la mano, se han tomado mediciones a algunas manos. Estas mediciones son básicamente ancho y grueso de los dedos, longitud de cada falange y las distancias entre la articulación carpometacarpiana I con las metacarpofalangeanas I a V. Estas últimas mediciones se han escogido así porque se observó una singular característica en las manos tomadas como muestra. Esta característica es que la coyuntura carpometacarpiana I se encuentra alineada con el dedo índice en su posición natural y se puede aprovechar ésta para el posterior diseño de la mano. Las medidas de falanges se tomaron de eje a eje articulado, y el grueso y el ancho de los dedos en la articulación interfalangeana proximal para considerar esas medidas promedio al resto del dedo.

La muestra consistió en diez manos de hombres y en promedio se obtuvieron las medidas mostradas en la tabla 2.1.

Se tomó el ancho de los dedos como medida base para obtener las relaciones dimensionales entre cada uno de los huesos, pues es una medida prácticamente constante en cada uno de los dedos siendo una característica que nos será de utilidad para el diseño de la mano. Para las relaciones de la palma, se consideró el ancho de los dedos anular, medio e índice de 18 mm como base de comparación. Así las relaciones dimensionales son las mostradas en la tabla 2.2

Parte Medida	Longitud (mm.)	Parte Medida	Longitud (mm.)
<i>Índice :</i>		<i>Pulgar :</i>	
Falange	41	Falangina	33
Falangina	24	Falangeta	26
Falangeta	20	Ancho	19
Ancho	18	Grueso	16
Grueso	15		
<i>Medio :</i>		<i>Metacarpo :</i>	
Falange	45	Metacarpiano I	40
Falangina	28	Art. Carpometacarpiana I a metacarpofalangeana II	70
Falangeta	21	Art. Carpometacarpiana I a metacarpofalangeana III	75
Ancho	18	Art. Carpometacarpiana I a metacarpofalangeana IV	83.3
Grueso	15	Art. Carpometacarpiana I a metacarpofalangeana V	84
<i>Anular :</i>		Art. Metacarpofalangeana II a metacarpofalangeana III	24
Falange	44	Art. Metacarpofalangeana III a metacarpofalangeana IV	24
Falangina	26		
Falangeta	21		
Ancho	18		
Grueso	15		
<i>Meñique :</i>			
Falange	35		
Falangina	19		
Falangeta	19		
Ancho	15		
Grueso	12		

Tabla 2.1 Medidas Promedio de la Mano Humana.

Parte Medida	Longitud / ancho	Parte Medida	Longitud / ancho
<i>Índice :</i>		<i>Pulgar :</i>	
Falange	2.277	Falangina	1.737
Falangina	1.333	Falangeta	1.368
Falangeta	1.111	Grueso	0.842
Grueso	0.833		
<i>Medio :</i>		<i>Metacarpo :</i>	
Falange	2.500	Metacarpiano I	2.105
Falangina	1.555	Art. Carpometacarpiana I a metacarpofalangeana II	3.889
Falangeta	1.166	Art. Carpometacarpiana I a metacarpofalangeana III	4.166
Grueso	0.833	Art. Carpometacarpiana I a metacarpofalangeana IV	4.629
<i>Anular :</i>		Art. Carpometacarpiana I a metacarpofalangeana V	4.666
Falange	2.444	Art. Metacarpofalangeana II a metacarpofalangeana	
Falangina	1.444	III	1.333
Falangeta	1.166	Art. Metacarpofalangeana III a metacarpofalangeana	
Grueso	0.833	IV	1.333
<i>Meñique :</i>			
Falange	2.333		
Falangina	1.266		
Falangeta	1.266		
Grueso	0.800		

Tabla 2.2 Relaciones Dimensionales entre los huesos de la mano y el ancho de los dedos

2.1.1.2. Tipos de Sujeción Realizados por la Mano Humana.

De manera general, existen dos tipos de estudios sobre la sujeción y manipulación: los empíricos y los analíticos. Los estudios empíricos se centran en los tipos de sujeción realizados por el hombre y los animales, los únicos sistemas de sujeción efectivos según nuestra experiencia. La motivación de todos estos estudios está simplemente justificada por la esperanza de aprender de los sistemas naturales de sujeción y poder realizar unos buenos sistemas artificiales.

Por otro lado los estudios analíticos toman en cuenta las interacciones entre la mano y el objeto sujetado haciendo modelados matemáticos en términos de movimientos y fuerzas usando las leyes de la física. Aquí, el problema es que el proceso de sujeción es intrínsecamente tan complicado que se requieren muchas simplificaciones para poder hacer un seguimiento del análisis, lo cual significa que muchos efectos se dejan a un lado, resultando en modelos que sólo se pueden aplicar en experimentos cuidadosamente estructurados en un laboratorio.

Afortunadamente estos dos tipos de estudios se complementan. Los estudios empíricos de los sistemas naturales ayudan a los analíticos a asegurar que no se está pasando ningún efecto por alto. El trabajo analítico ayuda a explicar porqué la gente hace lo que hace en las distintas situaciones de sujeción.

Todos estos estudios siempre han sido un área de interés para distintas aplicaciones como cirugía de mano, diseño de prótesis y para cuantificar las pérdidas en individuos con deformaciones congénitas o lesiones. Como resultado, existe una gran cantidad de literatura médica empírica sobre las capacidades de sujeción de la mano del hombre. La mayor parte de esta literatura hace referencia a seis tipos de sujeción definidas por Schlesinger en 1919 y sintetizadas en 1955 por Taylor y Schwarz. Los tipos de sujeción a los que hacen referencia son la cilíndrica o prismática, de punta, de gancho, palmar, esférica y lateral.

Esta categorización está asociada a la forma del objeto. Así una esfera sugiere una sujeción esférica mientras que una cilíndrica una sujeción envolvente prismática, pero mas bien el tipo de sujeción no se determina por la forma y tamaño del objeto sujetado, sino que se determina por el tipo de tarea que se va a realizar con dicho objeto. Aún durante el curso de una sola tarea con un sólo objeto, la mano adopta diferentes tipos de sujeción para cambiar de condiciones de fuerza o par a condiciones de destreza. Por ejemplo, cuando se desenrosca una tapa de un tarro, se comienza con una sujeción de fuerza donde la palma también se involucra en el movimiento y cuando la tapa se ha aflojado, el par se torna menos importante y ahora la destreza es la importante para lo cual sólo las yemas de los dedos tocan la tapa. Napier en 1956 fue quien sugirió que la sujeción debe primero categorizarse por la función o tarea que por la forma o geometría del objeto.

Bajo el esquema de Napier, las sujeciones se clasifican en sujeciones de fuerza y en sujeciones de precisión. Donde predominan las condiciones de estabilidad y seguridad, se selecciona una sujeción de fuerza y éstas se distinguen por las áreas de contacto grandes entre el objeto y los dedos y la palma de la mano y por una habilidad mínima para impartir movimientos con los dedos. Donde predominan las condiciones de sensibilidad y destreza se selecciona una sujeción de precisión, distinguiéndose éstas porque los objetos se sujetan con las puntas de los dedos y del pulgar.

Más recientemente, en 1985, Arbib, Iberall y Lyons desarrollaron el concepto de "Dedos Virtuales", el cual es una abstracción donde cualquier número de dedos reales que trabajen conjuntamente, se les considera como una sola entidad. Por ejemplo, cuando se toma un lápiz de una superficie plana, típicamente se utilizan dos o tres dedos al unísono para oponerse al pulgar; así el pulgar se puede describir como un dedo virtual y el conjunto de los otros dos o tres dedos se podrían definir como otro dedo virtual.

Iberall en 1987, sugirió que las sujeciones hechas por la mano humana se pueden definir en términos de "oposiciones", las cuales son las configuraciones básicas de la mano para aplicar fuerza a las caras opuestas del objeto que se esté sujetando. Todas las sujeciones hechas por el hombre se forman de un conjunto de sólo tres oposiciones:

- Entre yemas, para fuerzas entre las yemas de los dedos y del pulgar.
- Palmar, para fuerzas entre los dedos y la palma de la mano.
- Lateral, para fuerzas entre el pulgar y el costado del dedo índice.

Estas oposiciones son independientes y pueden ser usadas separadamente o simultáneamente en una tarea. Cada oposición se forma de dos dedos virtuales, uno de los cuales es la palma o el pulgar. Así, al levantar un lápiz, se usa una oposición entre yemas, al girar una llave de una cerradura se usa una oposición lateral y al golpear con un martillo una palmar. Iberall también correlacionó esta aproximación de oposición / dedo virtual a las categorizaciones anteriores de Schlesinger, Napier, y Cutkosky y Wright.

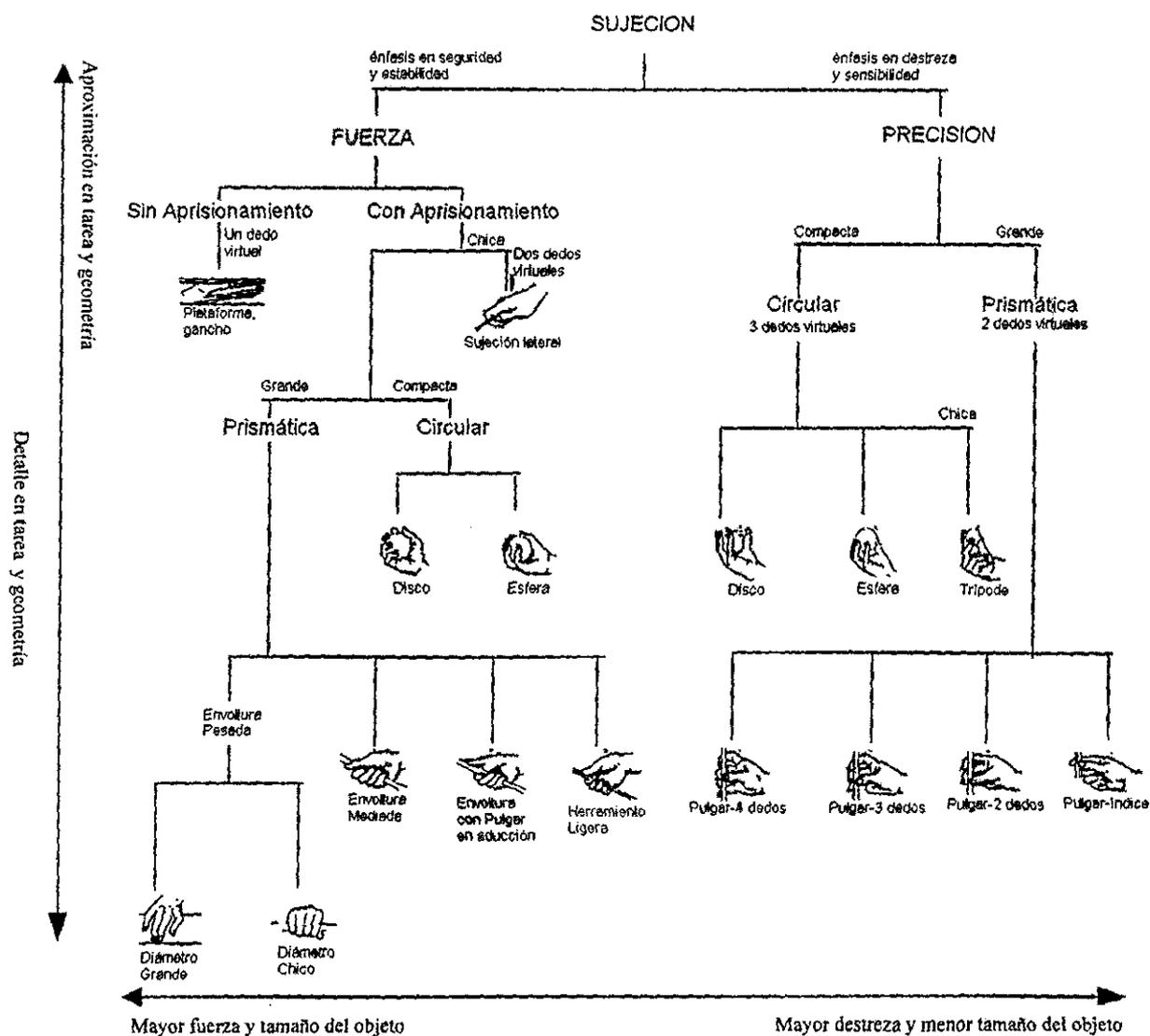


Figura 2.4. Cuadro clasificatorio de los distintos tipos de sujeción

Analizando la figura 2.4, referente a los diferentes tipos de sujeción, se comienza por las dos categorías básicas sugeridas por Napier (fuerza y precisión), y se desciende por el árbol de manera jerarquizada en el tipo de sujeción. Al ir bajando, los detalles de tipo de tarea y geometría del objeto se van haciendo igualmente importantes, por lo que al final del análisis, tanto los requerimientos de la tarea como los de la forma del objeto, juegan un rol muy importante al determinar los tipos de sujeción. Una vez que se ha seleccionado el tipo de sujeción básica entre fuerza y precisión, una combinación de consideraciones de tarea y geometría entra en juego. Por ejemplo, si suponemos que se selecciona una sujeción de fuerza, nos preguntamos si el objeto necesita estar aprisionado para ejercer las fuerzas a partir de varias direcciones o sólo se requiere soportarlo. Si sólo se debe soportar, se utilizará una sujeción "No Envolvente"; por ejemplo "de gancho" al levantar una maleta, o de "plataforma" cuando un mesero lleva una charola. Si por el contrario, el objeto necesita ser aprisionado, se utilizará una sujeción "Envolvente" en las que los dedos y la palma confinan el objeto. En este punto, se toman algunas consideraciones geométricas al preguntarse si el objeto es grande, pequeño, plano, delgado, etc. Por ejemplo, si necesitamos una sujeción de fuerza, y el objeto es plano y pequeño, (como al girar una llave en una cerradura), se usará la sujeción "lateral". Si el objeto tiene una forma compacta o aproximadamente a la de una esfera, se usará una sujeción "circular" y si el objeto es prismático o cercano a un cilindro, como es el caso del mango de muchas herramientas, una sujeción "de envoltura" será la indicada.

Mientras que muchos tipos de sujeción de precisión parecen estar originados en la forma del objeto, el tipo de sujeción también se debe según la tarea a realizar, ya que muchos objetos pueden ser sujetados de diferentes maneras. Por ejemplo, un objeto cilíndrico pequeño puede sujetarse por sus costados usando el pulgar y cuatro dedos, o también puede ser sujetado por un extremo, usando una sujeción “circular”. En general, la selección del tipo de sujeción depende de las restricciones que dicten la tarea a realizar (fuerzas y movimientos a ser impartidos); el objeto sujetado (forma, fragilidad y rugosidad de la superficie); y la mano o gripper (fuerza de sujeción máxima y apertura máxima de los dedos).

En la misma figura 2.4, al moverse de izquierda a derecha, las sujeciones pasan a ser menos fuertes y los objetos más pequeños. Así, las sujeciones del tipo de “envoltura fuerte” son las más fuertes y menos diestras, donde toda la manipulación debe realizarse con la muñeca e inclusive ésta se encuentra limitada en movimientos, ya que los dedos y la palma de la mano deben de inmovilizar al objeto sujetado, mientras que la sujeción de “trípode” y la “pulgar – índice” son las de mayor precisión. Sin embargo, esta regla no es tan estrictamente seguida, pues una sujeción de fuerza tipo “esfera” puede ser menos o más diestra que una “envoltura media” dependiendo del tamaño del objeto. Al moverse de arriba a abajo en el árbol, las sujeciones van de tareas generales a detalles en geometría y sensibilidad.

La razón por la que fuerza y sensibilidad sean mutuamente excluyentes es que, en general, la mano se hace menos sensible a pequeñas fuerzas y vibraciones conforme

se aplica más fuerza. Cuando la mano se carga ligeramente, la piel “flota” sobre una suave pulpa subcutánea, por lo que la piel no está tan íntimamente ligada a los huesos y a los músculos. Así, aun pequeñas fuerzas y movimientos del objeto sujetado pueden ocasionar un movimiento substancial en la piel, resultando en una buena sensibilidad. Conforme las fuerzas de contacto se incrementan, la presión sobre la piel crece y la piel y la estructura de la mano se juntan más por lo que los pequeños movimientos de la piel se reducen y por ende, también la sensibilidad.

Finalmente, la mayor parte de los grippers comerciales, pueden realizar sujeciones del tipo de fuerza, localizadas en la parte izquierda de la figura 2.4; además, se ha notado que los grippers de uso general son inadecuados para su uso en sistemas flexibles de manufactura por la variedad de formas de los objetos que deben manipular, por lo que en ciertas ocasiones se recurre a tener un arreglo de grippers de uso especial para cada tipo de pieza, sin embargo, se vuelve a caer en el problema original de que un manipulador, al estar diseñado para una forma de objeto en específico, está limitado a ese tipo de pieza; mientras que si se diseñaran los sujetadores según la tarea, se podrían tener grippers de precisión con dedos oponibles y grippers de fuerza que envuelvan a los objetos; o mejor aún, se puede diseñar una mano mecánica que tenga la posibilidad de hacer varios tipos de tareas con un mismo objeto.

2.2. Antecedentes de Manos Mecánicas.

A la fecha se han desarrollado varios tipos de manos mecánicas, algunas con la finalidad de ser utilizadas como prótesis, otras con fines de investigación en el ramo de la biomecánica y otras para ser usadas en tareas industriales. De estas, las más desarrolladas y de las cuales se cuenta con suficiente información son las siguientes:

2.2.1. Stanford / JPL:

La mano de Stanford / JPL, también conocida como la mano de Salisbury, es una mano de 3 dedos con 3 grados de libertad en cada uno. Se diseñó con la intención de que fuera una herramienta en la investigación del control y el diseño de manos articuladas, pero actualmente se intenta usarla industrialmente en conjunto con brazos mecánicos existentes.

Esta mano, como se dijo anteriormente, cuenta con 3 dedos: un dedo oponible a otros dos. Los tres dedos son idénticos entre sí en dimensiones y en movimientos y sólo cuentan con 2 falanges. Los dedos se han diseñado de manera modular con el propósito de hacer el diseño más económico y que se puedan añadir más dedos si así se decidiera. Estas falanges se articulan entre ellas para obtener movimientos de flexión y extensión en una articulación interfalangeana. La falange proximal se articula con una palma por medio de una

coyuntura metacarpofalangeana donde se obtienen movimientos de flexión y extensión y de abducción y aducción.

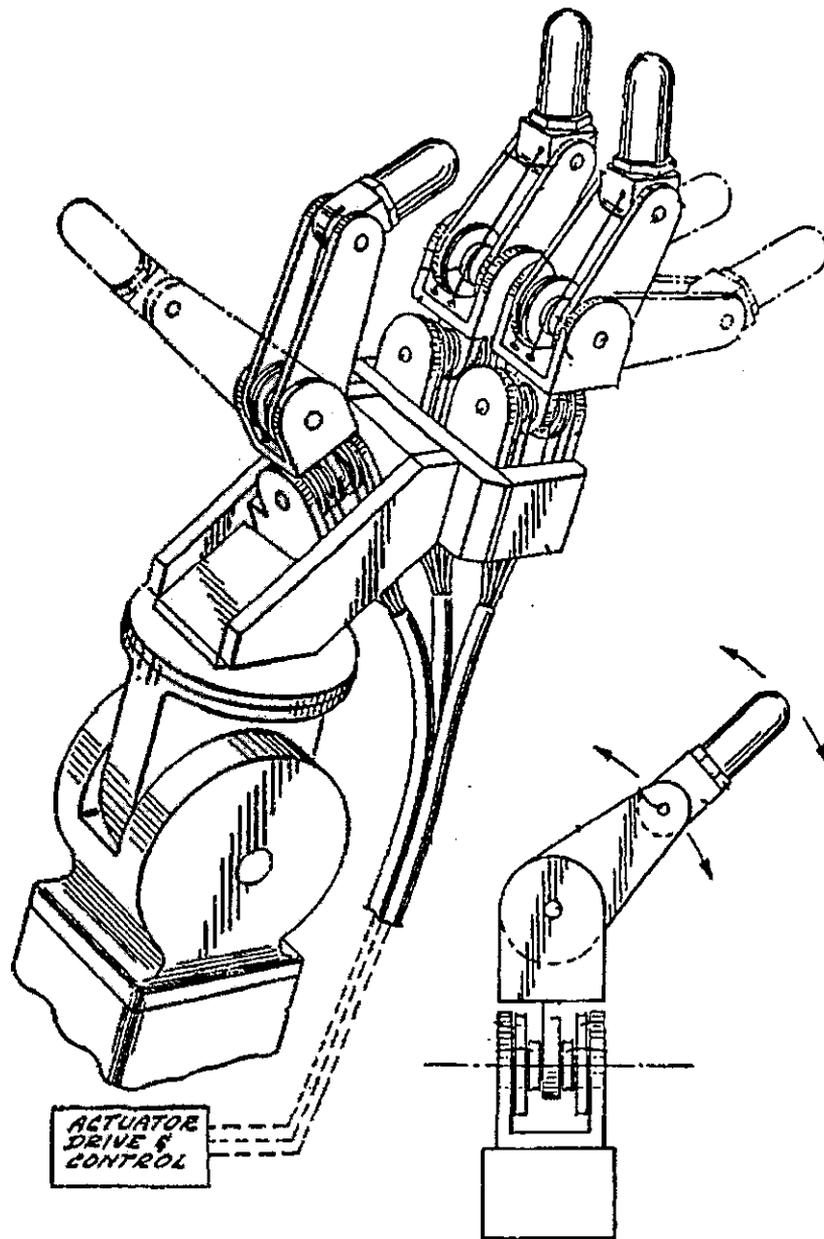


Figura 2.5. La Mano de Stanford/JPL montada en un manipulador Unimate 600

El dedo oponible se encuentra en un plano inferior al de los otros dos dedos, los cuales se encuentran en un mismo plano. El plano de este dedo oponible tiene una dirección de unos 45° con respecto al plano de los otros dos dedos, y la articulación metacarpofalangeana del dedo oponible se halla exactamente entre las de los otros dos dedos, cada una en su plano respectivo.

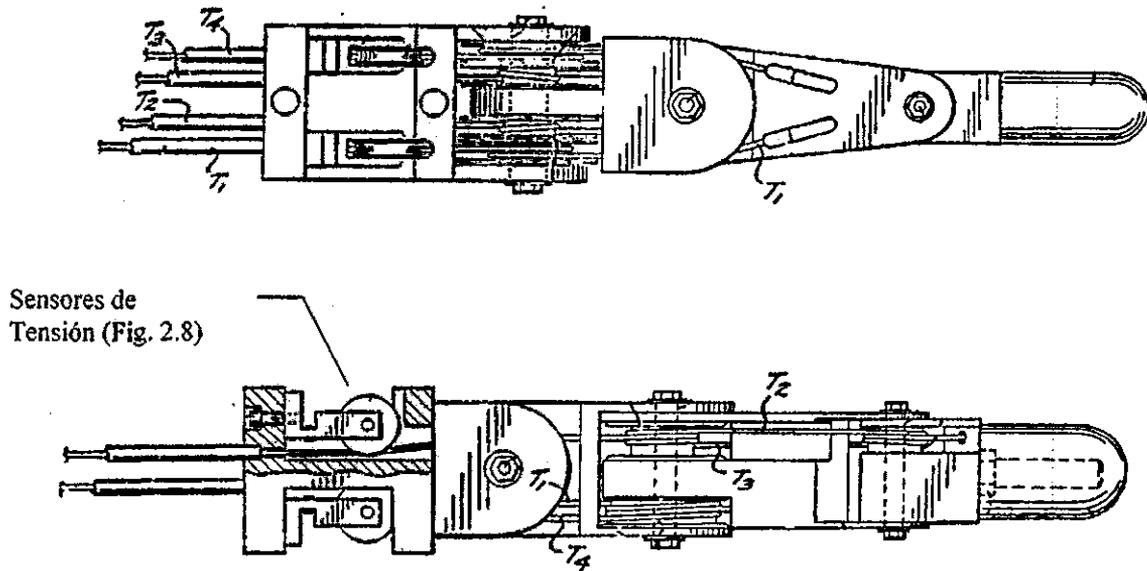


Figura 2.6. Detalle de los dedos de la mano de Salisbury

Con el fin de reducir el peso y el volumen de la mano, se decidió ubicar los motores en el antebrazo del manipulador y usar cables de acero recubiertos de teflón dentro de conductos flexibles para transmitir fuerza a las articulaciones de los dedos. Debido a la correlación que existe entre el movimiento de las articulaciones, los creadores de la mano de Stanford / JPL hallaron que el número mínimo de actuadores unidireccionales (tendones) requeridos para mover n articulaciones bidireccionales es $n + 1$. En otras palabras se necesitan n

+ 1 cables para controlar n grados de libertad. En teoría se necesitarían 10 cables para controlar los 9 grados de libertad de todos los dedos, pero como los dedos se han diseñado de manera modular para que funcionen independientemente, y ya que esta mano cuenta con 3 grados de libertad en cada dedo, se requiere de 4 cables para poder controlar cada dedo, es decir que en total utiliza 12 cables. En la figura 2.7 se muestra el arreglo de cables utilizado por la mano de Salisbury. Al aplicar las combinaciones apropiadas de tensiones en los cables T_1 a T_4 , se pueden ejercer pares de fuerza arbitrarios en los ejes z_1 , z_2 , y z_3 .

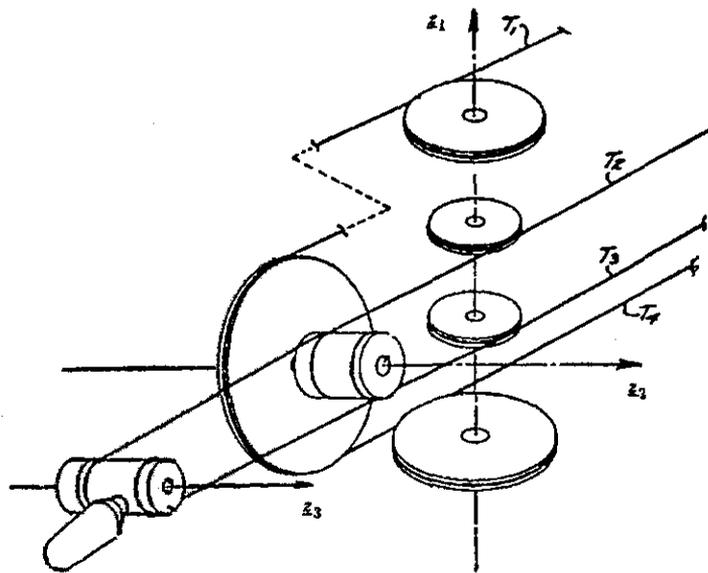


Figura 2.7. Arreglo de tendones de la mano de Stanford/JPL

Esta mano tiene como parte medular de su control, en su parte de retroalimentación la tensión de los cables, ya que al conocer la tensión que existe

en cada uno de ellos, se pueden conocer los pares de fuerzas que se pueden ejercer con las puntas de los dedos. Una vez que logran la retroalimentación de fuerza de los tendones, y por lo tanto del par que ejerce la punta del dedo, el control de la mano de Stanford / JPL aplica los algoritmos con los que calcula la posición de los dedos. Este algoritmo está hecho con la ayuda de un Jacobiano de (3×3) de las tensiones que existen en cada tendón de los dedos. Con este Jacobiano se pueden mapear las coordenadas de cada tendón. En la figura 2.8, se muestra el mecanismo para sensar la tensión de los tendones. Este mecanismo se ha localizado en cada cable en la parte en donde entran en cada dedo. Cada cable causará un momento flexionante en el mecanismo a través de la polea del mecanismo por la que se desliza el tendón. En el mecanismo existen *strain gauges* localizados en la barra que sostiene la polea. La tensión de los cables se puede inferir de la lectura de estas galgas.

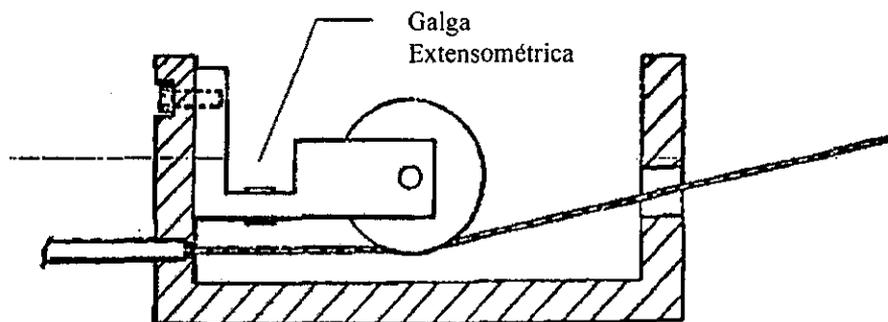


Figura 2.8. Mecanismo sensor de tensión de los tendones

Este sistema presenta dos ventajas: se puede determinar de una manera más precisa las fuerzas que están aplicando cada punta de los dedos al monitorear la tensión de los tendones (ya que los sensores están cerca del sitio donde se están aplicando las fuerzas, las lecturas serán más precisas que si se colocaran los sensores en los motores); y el situar los sensores después de las fuentes de mayor fricción del sistema como lo son los conductos guías o chicotes de los cables. Gracias a esto, se pueden evitar no-linearidades y minimizar su efecto en el desempeño del sistema.

La información de posición y velocidad es obtenida por medio de codificadores ópticos incrementales localizados directamente en los ejes de los motores. Las posiciones reales de las puntas de los dedos se deducen de las lecturas de estos codificadores ópticos y se puede corregir la tensión de los tendones por medio de las lecturas del mecanismo sensor de tensión.

Ya que cada motor puede controlar un par de cables, la mano de Salisbury cuenta con dos motores por dedo teniendo un total de 6 motores de corriente directa con gran par. Como se dijo anteriormente, los cables o tendones son de acero cubierto con teflón y son guiados a través de conductos tipo chicote. Los motores se localizan en el antebrazo para reducir los efectos dinámicos sobre la mano. Inicialmente se pensó en utilizar dos motores por articulación para mantener una pretensión en los cables opuestos que controlan cada articulación y ayudar a reducir la fricción que se iba a crear dentro de los

conductos guía, pero esto significaba que se debían utilizar 18 motores, lo cual era prohibitivo para lograr un arreglo adecuado de estos.

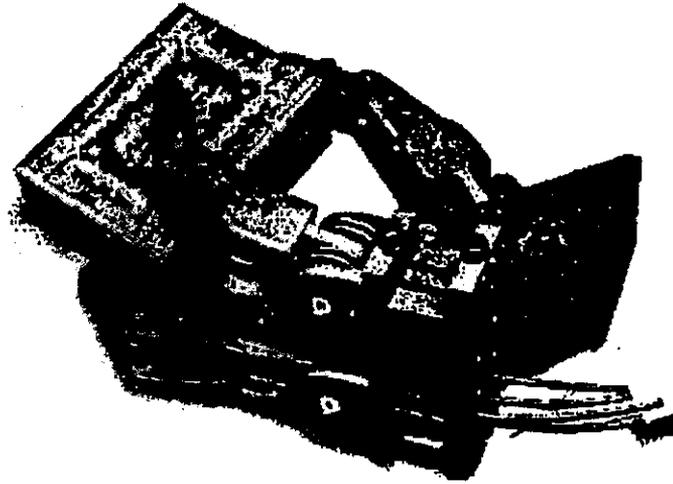


Figura 2.9. La mano de Salisbury sosteniendo diferentes objetos hexaédricos

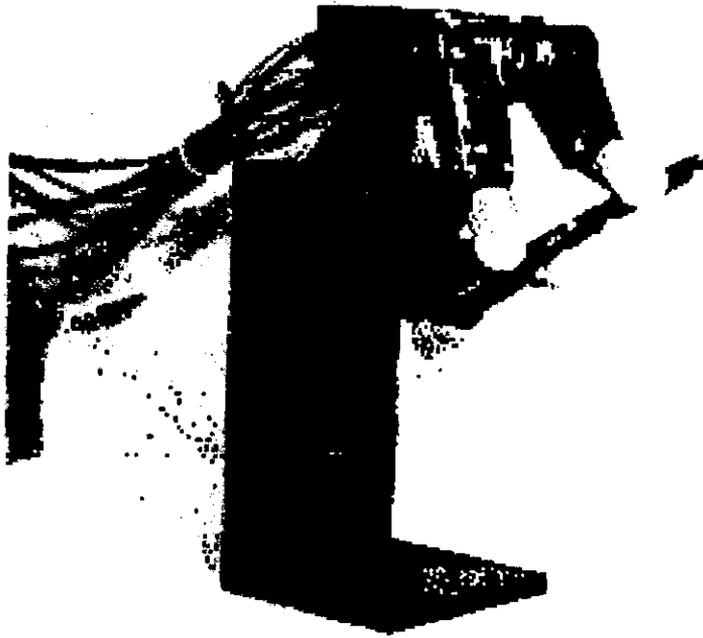


Figura 2.10. La mano de Stanford / JPL sosteniendo un objeto de forma cilíndrica

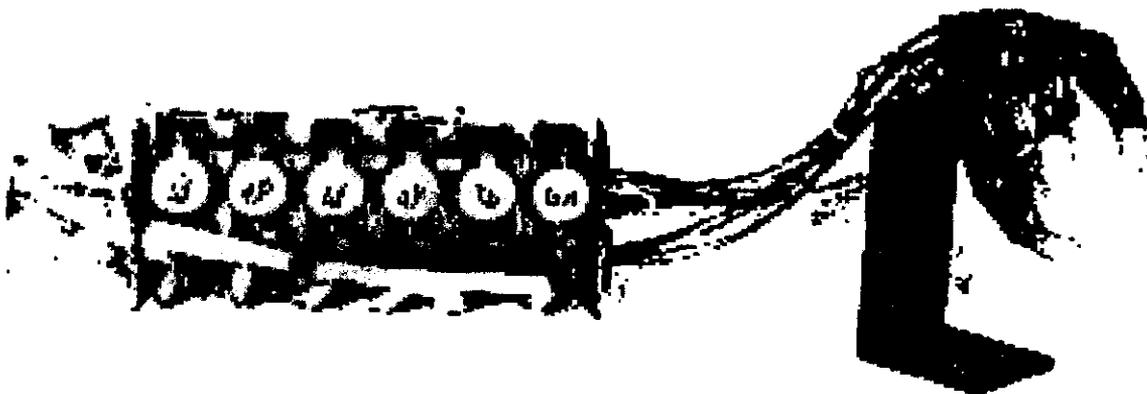


Figura 2.11. Ensamble general de la mano de Salisbury incluyendo motores y tendones

2.2.2. Utah / MIT:

La mano de Utah / MIT es posiblemente una de las manos mecánicas que presenta mayores adelantos pues su concepción data de 1982, cuando el Centro de Diseño de Ingeniería de la Universidad de Utah y el Laboratorio de Inteligencia Artificial del Instituto de Tecnología de Massachusetts comenzaron a desarrollar la mano de Utah / MIT. La finalidad primordial era la investigación experimental de la manipulación de máquinas, pero la mano ha evolucionado de los primeros prototipos a la versión IV. Hubo varias posiciones en el proceso de diseño de la mano y principalmente tres grandes requerimientos han determinado el desarrollo del proyecto. El primer requerimiento es que la mano debería de existir como un sistema confiable e integrado con el fin de ser útil a los investigadores en la manipulación de máquinas. Efectivamente, la cuarta versión de ésta mano ha sido usada muy intensamente en proyectos de investigación desde 1991 El segundo requerimiento es que la mano debería de incorporar una amplia diversidad de sensores. El requerimiento final es que debería tener varios niveles de control. El nivel de control más bajo es que se le pudiera determinar ángulo y fuerzas específicos y el nivel más alto es que se pudieran invocar diferentes sujeciones.

Las piezas y articulaciones de la mano de Utah / MIT son rigurosamente antropomórficas en forma. Su geometría se definió así por tres principales

razones. La primera es que la mano humana es una prueba de que su forma es muy capaz de una manipulación refinada. La segunda razón es que siendo antropomórfica permite a los experimentadores identificar más fácilmente nuevos paradigmas para la sujeción y manipulación por parte de las máquinas. Finalmente, la aproximación cinemática de la mano mecánica con la mano humana simplifica el uso como un manipulador teleoperado. Esta mano tiene 16 grados de libertad repartidos en 4 dedos de cuatro grados de libertad cada uno (la mano no incluye un dedo meñique). Como se mencionó anteriormente, la geometría de la mano es rigurosamente antropomórfica, sin embargo, el pulgar está permanentemente en oposición, y las dimensiones de las falanges y las posiciones de las articulaciones han sido alteradas para facilitar la guía de los tendones. Otra modificación hecha a la geometría real de la mano humana es que los dedos son idénticos y modulares.

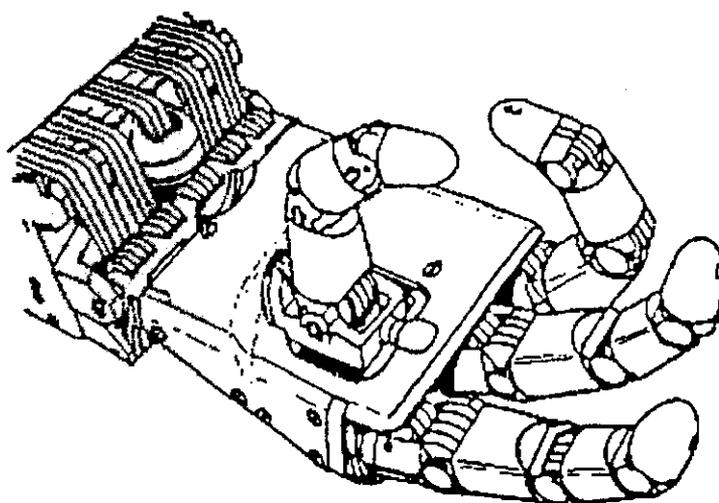


Figura 2.12. Croquis de la mano de Utah / MIT

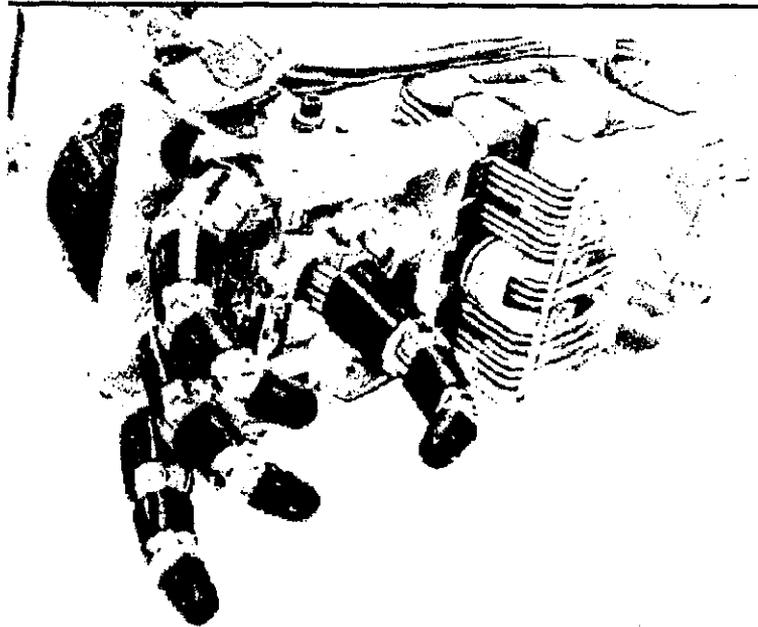


Figura 2.13. Mano de Utah / MIT ensamblada

Cada dedo tiene cuatro movimientos: flexión y extensión de las articulaciones interfalangeanas proximales y distales, flexión y extensión de la coyuntura metacarpofalangeana y aducción y abducción en la misma unión. En el caso del dedo pulgar, al no contar este con una falange distal, su hueso metacarpiano ha ocupado el lugar de la falange proximal, la falange funciona como falangina y la falangina como falangeta. La posición del dedo pulgar está directamente sobre la palma de la mano entre los dedos índice y medio. Al estar localizado en la palma de la mano, las sujeciones del tipo “envoltura” y la sujeción palmar en las que la palma juega un papel muy importante, no se pueden ejecutar; lo mismo sucede con la sujeción lateral porque el dedo pulgar

está imposibilitado para alcanzar la posición en la que se pueda apoyar contra el costado del dedo índice.

Los 16 grados de libertad son movidos por medio de un arreglo de 32 tendones poliméricos y actuadores electroneumáticos. Estos actuadores son rápidos, de baja fricción y pueden generar relativamente grandes fuerzas.

Para obtener mediciones precisas del ángulo de las articulaciones, se montó en los ejes de rotación de cada articulación sensores que utilizan el efecto Hall. Cada sensor provee una lectura del ángulo entre 0 y 95°. La tensión de los tendones no se puede medir en los ejes de las articulaciones pero se mide en la muñeca a través de un arreglo de poleas también con sensores del tipo efecto Hall. Los sensores de tensión dan una lectura que corresponden a tensiones de hasta 30 libras. La retroalimentación de velocidad se logra por medio de la derivada de las señales enviadas por el sensor de posición. Los sensores tipo Hall fueron seleccionados para las dos lecturas por su simplicidad, tamaño y confiabilidad.

Para proteger las piezas y sensores de la mano, se utilizaron piezas protectoras de forma cilíndrica de aproximadamente 1/10 de pulgada de grosor de plástico inyectado. Estas cubiertas son el sitio donde se han puesto sensores de tacto experimentales, que la actual versión de la mano no cuenta con ellos.

Se utilizan 32 pistones neumáticos especialmente diseñados para controlar los tendones a través de válvulas. Estos actuadores funcionan con presiones relativamente bajas (50 a 100 psi) y proporcionan una respuesta en frecuencia plana de 20 Hz. Las fuerzas se transmiten a la mano por medio de tendones poliméricos de alta resistencia y poleas.

Los tendones son guiados a la mano con una estructura que a la vez permite mantener la longitud y tensión de los cables para evitar que la posición de las articulaciones no se modifique.

2.2.3. Belgrado / USC:

La mano de Belgrado / USC es una mano antropomórfica de cinco dedos diseñada en primera instancia para estudios de sujeción. Su diseño se basa en la mano de Belgrado diseñada en 1962 por Tomovic y Boni con fines protéticos. Originalmente, la mano de Belgrado tenía cinco dedos movidos por un sólo motor y cuando cualquiera de los cinco dedos tocaba la superficie del objeto a sujetar, los otros continuaban su movimiento hasta que la presión en todas las puntas de los dedos fuera aproximadamente la misma, por lo que se obtenía un alto grado de adaptabilidad automática a la forma de los objetos y una gran simplicidad en su control. La actual mano de Belgrado / USC fue diseñada bajo principios muy similares, es decir, que la meta era fabricar una mano adaptable a

tareas de sujeción y con una capacidad autónoma de adaptarse a distintas formas y con una arquitectura de control basada en principios no numéricos de control. Esta mano por lo tanto, se concibió haciendo énfasis en lograr una buena compatibilidad entre el movimiento de los diferentes segmentos de los dedos y una autonomía a nivel dedo durante la sujeción. No se pensó tanto en maximizar su flexibilidad y su destreza.



Figura 2.14. Modelo I de la mano de Belgrado USC

La mano está diseñada para ser montada en la muñeca de un robot del tipo PUMA 560 y es capaz de soportar una fuerza de 5 libras.

El primer modelo de la mano de Belgrado / USC (Figura 2.14) se equipó con un pulgar rígido y cuatro dedos articulados. El modelo II (Figura 2.15) es aproximadamente del tamaño de la mano humana y sus cinco dedos están fabricados con aleaciones de aluminio. El dedo pulgar tiene dos articulaciones (interfalangeana y metacarpofalangeana) y sus movimientos son alrededor de ejes paralelos al eje de aducción de la muñeca. Además, el pulgar puede rotar hasta 120° desde su posición totalmente extendida hasta una oposición completa frente a los dedos índice, medio y anular. Los otros cuatro dedos son idénticos en tamaño y consisten de 3 articulaciones cada uno (interfalangeanas distal y proximal y metacarpofalangeana). La mano cuenta con un total de 14 articulaciones. Todas las articulaciones de la mano rotan sobre rodamientos de bolas miniatura y se controlan por medio de servomotores de corriente directa localizados en la estructura de la muñeca. El movimiento de los motores se reduce por medio de un arreglo de engranes y la transmisión del movimiento de los motores se hace por medio de un mecanismo de barras que une cada articulación de cada dedo individualmente evitando el uso de tendones o cables.

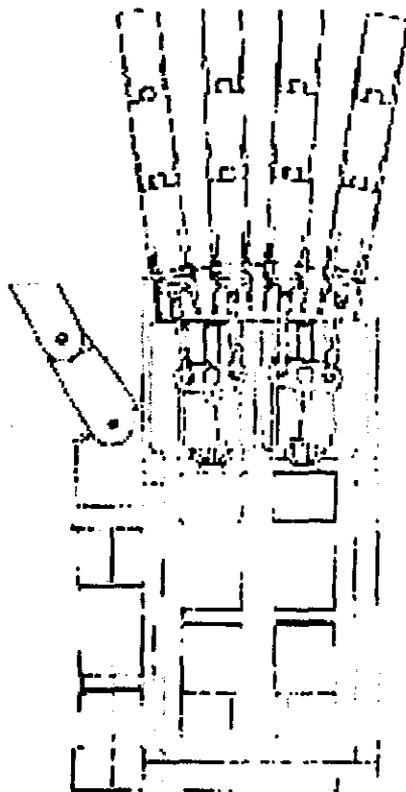


Figura 2.15. Modelo II de la mano de Belgrado USC

Esta mano tiene algunas características que la hacen muy diferente de la mano de Utah / MIT y de la de Salisbury. La primera particularidad es que los movimientos de cada segmento de cada dedo no son controlables individualmente. Las articulaciones de cada dedo están conectadas por medio de un mecanismo de barras (Figura 2.16) para simular los movimientos hechos por los dedos de la mano humana mientras hacen una sujeción, lo que se llama una "sinergia interna". En la figura 2.16 se aprecia que la rotación de la articulación metacarpofalangeana obliga la rotación de las articulaciones interfalangeanas distal y proximal.

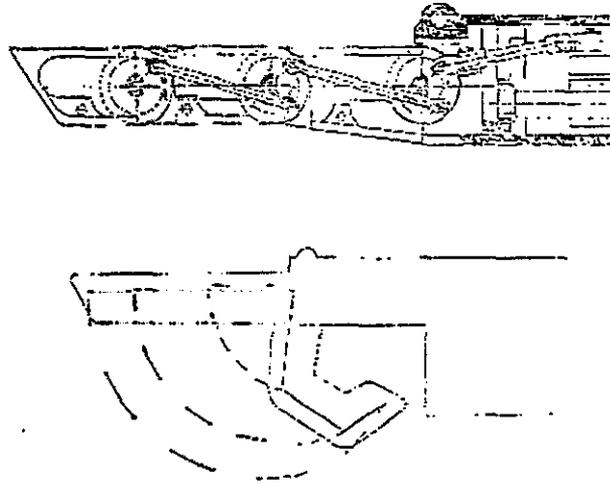


Figura 2.16 Diagrama esquemático del mecanismo interno de los dedos y su movimiento.

La segunda particularidad de esta mano es que se diseñó para adaptarse automáticamente a la forma de objetos. Cuatro motores montados en la muñeca de la mano proveen el movimiento de las articulaciones. Dos motores son usados para posicionar y flexionar el pulgar, mientras que los otros dos motores flexionan dos dedos cada uno. El control de dos dedos por medio de un solo motor se logra por medio de un mecanismo (Figura 2.17) diseñado de tal forma que si el movimiento de un dedo se inhibe por llegar a tocar el objeto a sujetar, el segundo dedo continúa su movimiento hasta llegar a tocar el objeto sujetado, adaptándose así automáticamente a la forma del objeto sin necesidad de un control externo. Esta característica es la que hace que esta mano sea ideal para tareas de sujeción, pero no lo es para tareas donde se requiere flexibilidad y destreza.

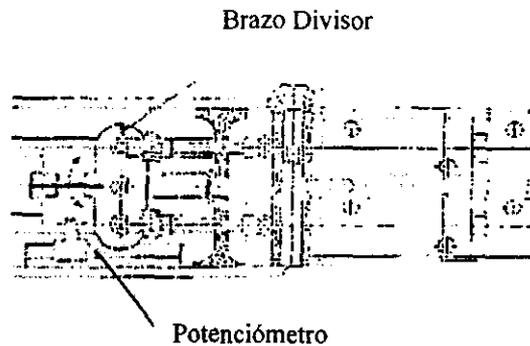


Figura 2.17 Mecanismo divisor de movimiento.

La mano de Belgrado tiene dos tipos de sensores:

- Sensores de posición para indicar la rotación de la base del dedo con respecto al plano de la palma de la mano y
- Sensores de presión en las puntas de los dedos para detectar el contacto con el objeto y la fuerza que está ejerciendo.

La rotación del pulgar se mide con un potenciómetro instalado en la base del pulgar y se mueve con la ayuda de un engrane. La flexión de los dedos se mide con otros potenciómetros localizados antes de cada mecanismo divisor de movimiento y provee la información de cada par de dedos. Estos sensores tienen más la función para una rutina de inicialización y determinar la posición inicial

de los dedos. Estos sensores no tienen tanto la función de retroalimentación porque la mano se adapta automáticamente a la forma del objeto sujetado.

Los sensores de presión, localizados en la punta de los dedos, son Resistencias Sensoras de Fuerza de Interlink Electronics y son capaces de detectar fuerzas de 20 g. a 5 kg.

2.3. Estado del Arte.

La primera cuestión relevante es explicar porqué las manos de Salisbury y la de Utah / MIT no tienen 5 dedos. La mano de Belgrado sí cuenta con 5 dedos porque originalmente fue desarrollada con la finalidad de ser una prótesis, pero las otras dos constan de un dedo oponible y al menos 2 dedos más.

Una mano es ideal para controlar pequeños movimientos y para reorientar objetos. Para los humanos es trivial desarrollar continuamente reorientaciones. Esto requiere repositionar algunos de los dedos en nuevos tipos de sujeción y la transición de un tipo de sujeción a otra requiere de suficientes dedos para mantener en una posición estable el objeto durante la transición. Así cuatro o más dedos se requieren para que una mano mecánica sea útil en el sentido de poder realizar cambios en el tipo de sujeción para que el objeto que se tiene en la mano pueda mantenerse estable. El valor que ofrece tener más dedos disponibles es realmente cualitativo si uno intenta manipular objetos usando dos,

tres, cuatro o cinco dedos de su mano. Con dos dedos, no se puede hacer mucho más que una simple tarea de tomar un objeto y soltarlo. Con tres dedos se logra una sujeción más estable pero no se pueden hacer gran cantidad de manipulaciones. Con cuatro y cinco dedos, podemos lograr transiciones de un tipo de sujeción a otro sin perder el control del objeto e incluso podemos usar algunos dedos para asegurar el objeto contra la palma mientras que con los dedos sobrantes ejecutamos otra tarea sobre el objeto sujetado, como por ejemplo quitar el tapón a una pluma o jalar un gatillo caen en este tipo de actividades. Así, en este aspecto las manos de Belgrado y Utah / MIT ofrecen mayores ventajas que la mano de Stanford / JPL.

La mano de Belgrado, tiene la característica de tener relacionados los movimientos de la cada falange. Esta característica sólo es cierta entre las articulaciones interfalangeanas mas no es así entre la articulación interfalangeana proximal y la metacarpofalangeana, ya que cuando los dedos índice, medio, anular o meñique comienzan a cerrarse dirigiéndose al pulgar en una sujeción de precisión, la flexión de la junta interfalangeana proximal, libera la tensión en el ligamento retinacular, permitiendo la flexión en la articulación interfalangeana distal. Al contar con la relación de movimientos entre las articulaciones interfalangeanas, uno está evitando el uso de un motor menos por dedo.

Las manos de Salisbury y de Utah / MIT utilizan como actuadores cables a la manera de tendones. Esto permite por un lado tener los motores alejados del

manipulador evitando así que los movimientos de la mano se vean afectados dinámicamente por el peso de los motores, pero a la vez, obliga que los tendones estén siempre bien tensos. La mano de Salisbury utiliza, para mantener la tensión de los tendones, conductos guía o chicotes y la mano de Utah / MIT mantiene la tensión por medio de una estructura rígida.

En el caso de las tres manos, se observa que todos los dedos están hechos de manera modular, es decir, son iguales entre sí. Desde el punto de vista del objetivo del presente proyecto que es que esta mano pueda ser controlada con la ayuda de un guante que es vestido por el usuario, puede presentar desventajas ya que la trayectoria seguida por la punta de los dedos no va a ser la misma que la seguida por la punta de los dedos del usuario, es decir, si los dedos de la mano mecánica no están proporcionados entre sí, lo que significa que un dedo puede ser más largo o más corto que el correspondiente al de una mano humana promedio, el usuario puede perder la sensibilidad en el control de la mano si es que un dedo de la mano mecánica alcanza a tocar un objeto que él nunca tocaría con sus dedos.

Las manos de Salisbury y de Utah / MIT tienen constantemente en oposición el dedo pulgar, lo que reduce las posibilidades de realizar sujeciones con la ayuda de la palma de la mano porque prácticamente no cuentan con una palma y tampoco pueden hacer sujeciones del tipo lateral como para tomar una llave al abrir una puerta (en la que se involucra el pulgar y la parte lateral del

dedo índice). La mano de Belgrado sí tiene una palma y además su dedo pulgar puede estar o no en oposición a los otros dedos.

La mano de Utah / MIT aprovecha la característica de que el hueso metacarpiano del dedo pulgar tiene gran movilidad con respecto a los metacarpianos de los otros dedos y este hueso lo está usando como falange, la falange como falangina y la falangina como falangeta.

Recogiendo las mejores características de las tres manos, se llega a los siguientes requerimientos:

- La mano debe de tener al menos 4 dedos
- Debe ser manejada por tendones
- Los dedos no pueden ser fabricados de manera modular
- El dedo pulgar no debe de estar permanentemente en oposición
- El hueso metacarpiano del dedo pulgar debe funcionar como la primera falange
- Las falangetas y las falanginas deben tener movimientos relacionados entre sí

2.4. Alternativas de Solución.

La solución puede estar determinada por el tipo de sensor de posición que se va utilizar y su localización. La localización puede ser directamente en la articulación o fuera de la articulación.

La ventaja que ofrece poner el sensor de posición en las articulaciones, es que si se localiza ahí va a leer el ángulo real que tiene la coyuntura. El poner el sensor en la articulación tiene como desventajas el espacio y la resistencia mecánica que pueden soportar los componentes de sensado en la articulación. El espacio es restringido ya que se pretende hacer los dedos del tamaño de los dedos humanos.

El poner los sensores fuera de la mano, es decir, que la posición de los dedos se mediría indirectamente por medio de alguna relación mecánica, permite tener un mayor espacio dentro de los dedos para poder poner los cables o tendones, pero puede llegar a haber un error implícito que dependería de la precisión de la relación mecánica.

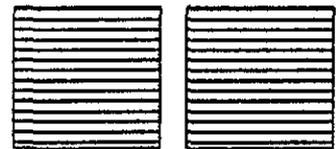
Se pensó en tres posible soluciones:

- Utilizar sensores ópticos que puedan estar dentro de los ejes de las articulaciones.
- Utilizar resistencias variables que formen parte del eje
- Utilizar las mismas resistencias variables poniéndolas frente a los ejes de los motores.

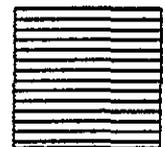
a) Utilizar sensores ópticos dentro de los ejes de las articulaciones

Se propuso diseñar unos sensores ópticos que utilizaran un fotoemisor y un fotoreceptor, poniendo al frente de cada uno una placa de plástico polarizado. Si se colocan dos placas de plástico polarizado una frente a la otra, se puede regular la intensidad de la luz que pasa. Esta intensidad podría ser una relación directa del ángulo en el que se encuentre la articulación.

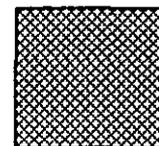
- Se tienen dos placas polarizadas idénticas una frente a la otra, una montada sobre la fuente emisora y otra sobre el receptor.



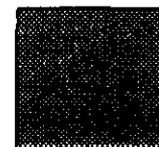
- Al colocar las placas polarizadas una atrás de la otra, en la posición inicial, la intensidad de la luz que pasa por ellas va a ser la máxima pues el patrón de líneas de las placas es coincidente
- Al girar las placas polarizadas haciendo que los patrones de líneas se vayan cruzando, la intensidad de luz se va reduciendo y por lo tanto el fotoreceptor tendrá una lectura más débil
- Al estar las placas a 90° el patrón de líneas estará completamente cruzado dejando pasar el mínimo de luz al fotoreceptor



0°



45°



90°

El arreglo del fotoemisor y del fotoreceptor podría ser como sigue:

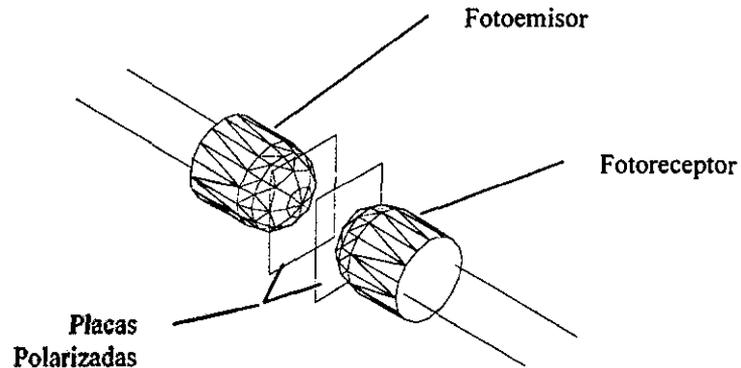


Figura 2.19. Solución a) Sensor óptico dentro del eje de la articulación

El problema que presenta el uso de este sensor es la montura dentro de la articulación. Para poder lograr este arreglo, se necesitaría que el emisor esté sujeto a una pieza y el receptor a otra, y además estas dos piezas deben tener sus ejes alineados.

Se pensó en un pequeño tubo dentro del cual se alojara el emisor con su placa polarizada y a su vez este tubo dentro de otro tubo que contenga al receptor con su placa polarizada. El tubo de menor diámetro giraría libremente dentro del tubo de mayor diámetro. El primer tubo

deberá estar sujeto a la falange más distal de la articulación y el segundo a la falange más proximal de la articulación. El tubo exterior del arreglo debería de poder servir como polea donde se puedan fijar los tendones o cables para hacer girar la articulación. El arreglo quedaría como se muestra en la Figura 2.20.

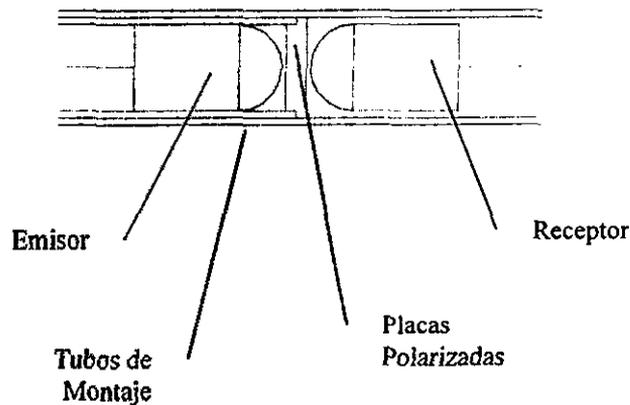


Figura 2.20. Solución a) Arreglo del sensor óptico dentro de la articulación

Este arreglo presenta el inconveniente de que la unión entre los tubos no es estable axialmente y se tendería a que el par dinámico se perdiera.

b) Utilizar resistencias variables dentro de los ejes de las articulaciones

Esta alternativa es similar a la anterior sólo que en esta se usan resistencias variables del tipo *Trimpot* como sensores de posición.

Estos sensores varían el valor de su resistencia de manera angular al hacer girar un eje propio. Este eje de los sensores se puede lograr alinear con el eje de giro de la articulación y hacer variar la resistencia del sensor si se coloca un pequeño apéndice en la articulación del dedo.

El sensor se debe lograr sujetar a una pequeña base donde se le pueda colocar un eje sobre el cual gire el sensor. Este eje a su vez, puede servir como polea donde se puedan colocar los tendones y hacer girar la articulación. Este mismo eje debe estar sujeto a la falange más proximal y el apéndice que hará variar la resistencia deberá alinearse a este eje pero sobre la falangé más distal de la articulación.

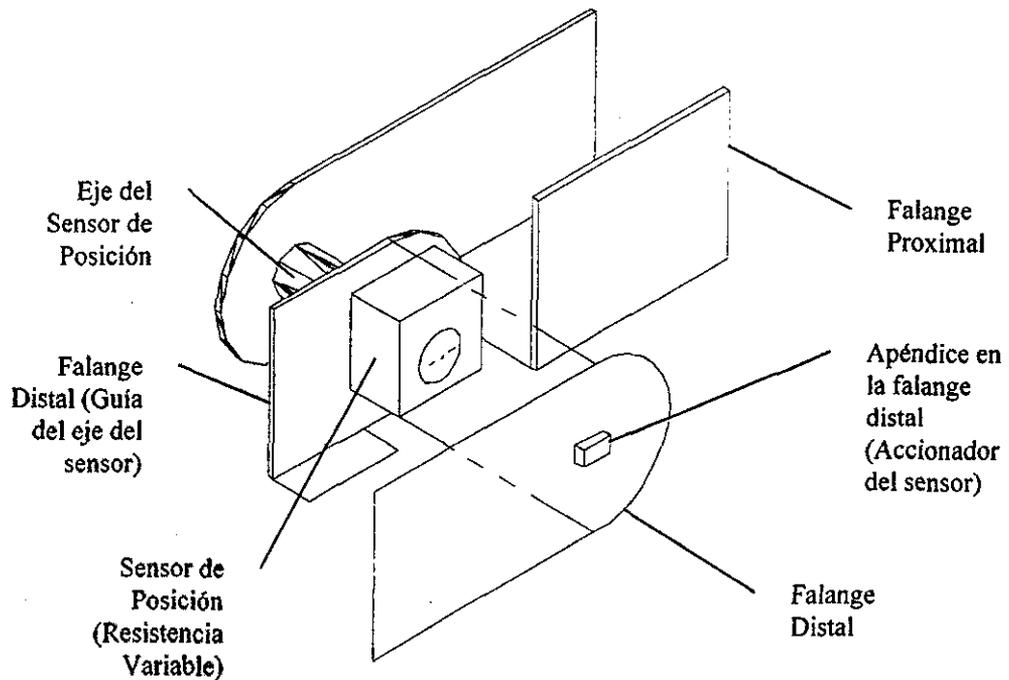


Figura 2.21. Solución b) Arreglo de la Resistencia Variable en el Eje de la Articulación

Lograr esto requiere de un diseño y maquinado de piezas muy preciso, y además necesitaría muchas piezas porque de alguna manera se debe lograr sujetar el sensor en la articulación.

Esta solución también presenta la desventaja como la anterior que la resistencia mecánica de los dedos se ve mermada al colocar el sensor en el eje de la articulación, pues estos componentes no están diseñados para soportar grandes fuerzas ni pares mecánicos. También presenta el inconveniente de no tener estabilidad en sentido axial.

c) Utilizar resistencias variables frente a los ejes de los motores

Esta propuesta de solución utiliza el mismo tipo de sensor que la propuesta (b), es decir, resistencias variables del tipo *Trimpot*, sólo que en esta solución se colocan frente a los ejes de giro de los motores y no dentro de los ejes de giro de las articulaciones.

El sensor de posición estará fijo frente al eje de giro del motor y también deberá estar alineado al mismo. Al estar sujeto firmemente frente al eje del motor, el propio giro de este eje hace variar el valor de la resistencia del sensor.

Para lograr que el ángulo de la articulación deseado corresponda al ángulo del sensor equivalente al valor de su resistencia, debe existir una relación angular precisa entre ambos elementos. Para lograr esta relación, el diámetro del eje de la articulación debe ser igual al diámetro del eje del motor.

2.5. Selección de la Mejor Alternativa.

a) Utilizar sensores ópticos dentro de los ejes de las articulaciones

Esta opción presenta la desventaja que el sensor reduce la resistencia mecánica de las articulaciones pues las piezas del sensor no se concibieron para trabajar como elementos mecánicos.

Otro inconveniente de esta propuesta es que para lograr que las piezas de la articulación se mantuvieran en su posición en sentido axial se requerirían demasiadas piezas y un ensamble muy complicado

La ventaja a favor de esta propuesta es que el ángulo retroalimentado al sistema de control es el ángulo real y no un ángulo medido indirectamente por medio de una relación de diámetros.

b) Utilizar resistencias variables dentro de los ejes de las articulaciones

Esta opción presenta básicamente las mismas ventajas y desventajas que la primera opción. Las desventajas son que la resistencia mecánica de la articulación se ve reducida al trabajar el sensor como

parte de los elementos mecánicos, y que se requieren demasiadas piezas y un ensamble muy complicado para lograr una estabilidad en la posición de las piezas de la articulación en sentido axial.

Esta opción presenta además las desventajas de que el espacio se ve sumamente reducido dentro del dedo para poder colocar los tendones; y que si se hace funcionar la mano dentro de un medio hostil, el valor de la resistencia o incluso la integridad de los sensores pueden verse afectados por variaciones en la temperatura o al meterse dentro de algún medio distinto al aire.

Como la primera opción, la ventaja principal es que el ángulo leído por el sensor de posición es el ángulo real de la articulación y no un ángulo leído indirectamente por alguna relación mecánica.

c) Utilizar resistencias variables frente a los ejes de los motores

Esta opción requiere de una menor cantidad de piezas y por lo tanto el ensamble resulta más sencillo; las únicas piezas que trabajan como elementos mecánicos son exclusivamente piezas diseñadas para trabajar como tales; el sensor no se expone a medios ni temperaturas hostiles que puedan afectar la lectura de sensado; y por último esta

solución presenta la ventaja de que en la eventual falla del sensor, éste se puede sustituir por uno nuevo de una manera muy sencilla.

Esta opción y la opción (b), tienen la ventaja sobre la (a) que los sensores son piezas comerciales y no se requieren construir y calibrar separadamente, por lo que el control del sistema se puede hacer de manera idéntica entre todas las articulaciones.

La desventaja de esta propuesta es que la lectura del ángulo de las articulaciones no es una lectura directa sino indirecta, pero su solución es una solución muy simple y controlable fácilmente.

Así, la mejor propuesta de solución es la c), es decir, colocar los sensores de posición fuera de la articulación y que estos sean resistencias variables comerciales que se puedan conseguir fácilmente.

CAPITULO 3
DISEÑO DEL SISTEMA

CAPITULO 3

Diseño del Sistema

Como se definió al final del capítulo 2, la alternativa de solución seleccionada fue utilizar resistencias variables frente a los ejes de los motores.

Los requerimientos establecidos para el diseño de esta mano mecánica son los siguientes:

- Ser lo más semejante posible a la mano humana.
- Realizar los movimientos que el hombre hace con su mano.
- Contar con sensores de posición que indiquen el estado actual de la mano mecánica.
- Estar hecha de materiales resistentes a condiciones extremas.
- Ejercer fuerzas mayores que las que el hombre puede hacer con su mano.
- Debe ser de poco peso.
- Estar hecha de manera económica.

Para alcanzar el requerimiento de ser lo más semejante a la mano humana, se realizó un estudio antropométrico de la mano y se definieron las relaciones dimensionales, tomando como medida base el ancho de los dedos. Se consideró el ancho de los dedos anular, medio e índice de 18 mm como base de comparación.

Con base a esto, se debió buscar un material ligero, económico, fácil de maquinar, y de dimensiones comerciales alrededor de los 18 mm, es decir, entre 11/16" y 3/4". El material que se buscó también debía permitir que los cables que funcionan como tendones se alojen dentro de las falanges para evitar que los tendones se puedan dañar al estar en contacto directo con el exterior y además así, al ser falanges huecas el peso se reduce considerablemente.

Para lograr que el ángulo de la articulación deseado corresponda al ángulo del sensor equivalente al valor de su resistencia, debe existir una relación angular precisa entre ambos elementos. Para lograr esta relación, el diámetro del eje de la articulación debe ser igual al diámetro del eje del motor que es donde estarán los sensores de posición.

3.1. Diseño Preliminar de la Mano

Para los humanos es trivial desarrollar continuamente reorientaciones. Esto requiere reposicionar algunos de los dedos en nuevos tipos de sujeción y la transición de un tipo de sujeción a otra requiere de suficientes dedos para mantener en una posición estable el objeto durante la transición. Así cuatro o más dedos se requieren para que una mano mecánica sea útil en el sentido de poder realizar cambios en el tipo de sujeción para que el objeto que se tiene en la mano pueda mantenerse estable. El valor que ofrece tener más dedos disponibles es realmente cualitativo si uno intenta manipular objetos usando

dos, tres, cuatro o cinco dedos de su mano. Con dos dedos, no se puede hacer mucho más que una simple tarea de tomar un objeto y soltarlo. Con tres dedos se logra una sujeción más estable pero no se pueden hacer gran cantidad de manipulaciones. Con cuatro y cinco dedos, podemos lograr transiciones de un tipo de sujeción a otro sin perder el control del objeto e incluso podemos usar algunos dedos para asegurar el objeto contra la palma mientras que con los dedos sobrantes ejecutamos otra tarea sobre el objeto sujetado, como por ejemplo quitar el tapón a una pluma o jalar un gatillo caen en este tipo de actividades. Así, al igual que la mano de Utah/MIT, se ha decidido hacer esta mano de cuatro dedos ya que es el número mínimo de dedos para controlar pequeños movimientos y para reorientar objetos.

Sobre el diseño de los dedos, inicialmente se pensó en fabricarlos de sección cuadrada o rectangular ya que ofrecería un mayor espacio interior para alojar los tendones. De seleccionar una sección circular y respetando el ancho de los dedos, es como si estuviésemos hablando del área que ocupa un círculo circunscrito dentro de un cuadrado, de ahí que la sección cuadrada o rectangular ofrezca un mayor espacio interior. Por otro lado, ya que el diseño preliminar obligaba el maquinado de varias piezas en fresa, la sección cuadrada ofrecía mayor facilidad para ser sujeta y orientada que la sección circular. Las figuras 3.1 y 3.2 muestran el diseño preliminar de los dedos los cuales están compuestos de las siguientes piezas:

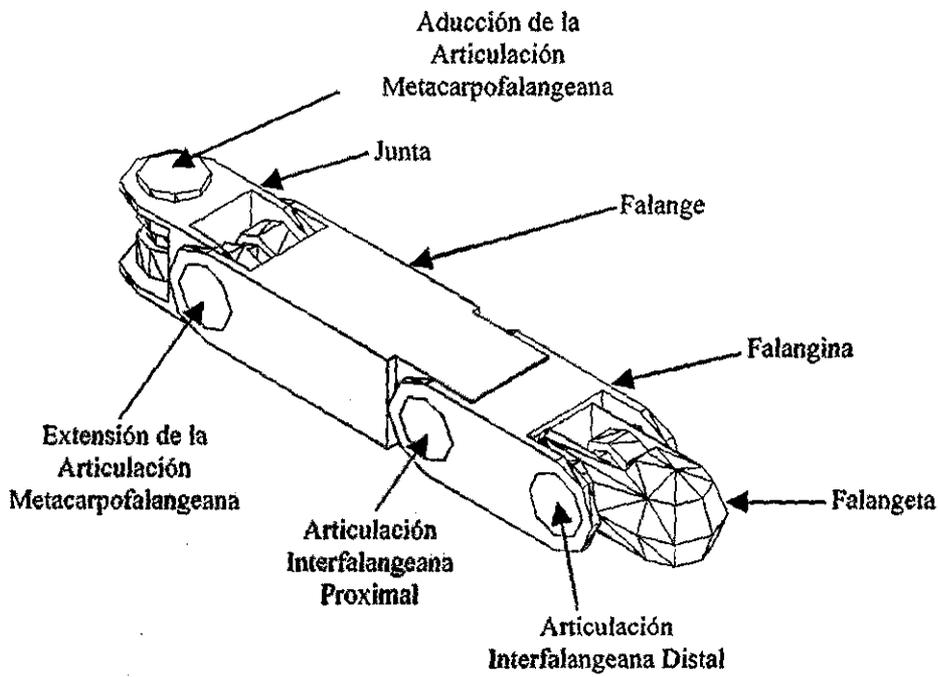


Figura 3.1 Diseño preliminar de los dedos

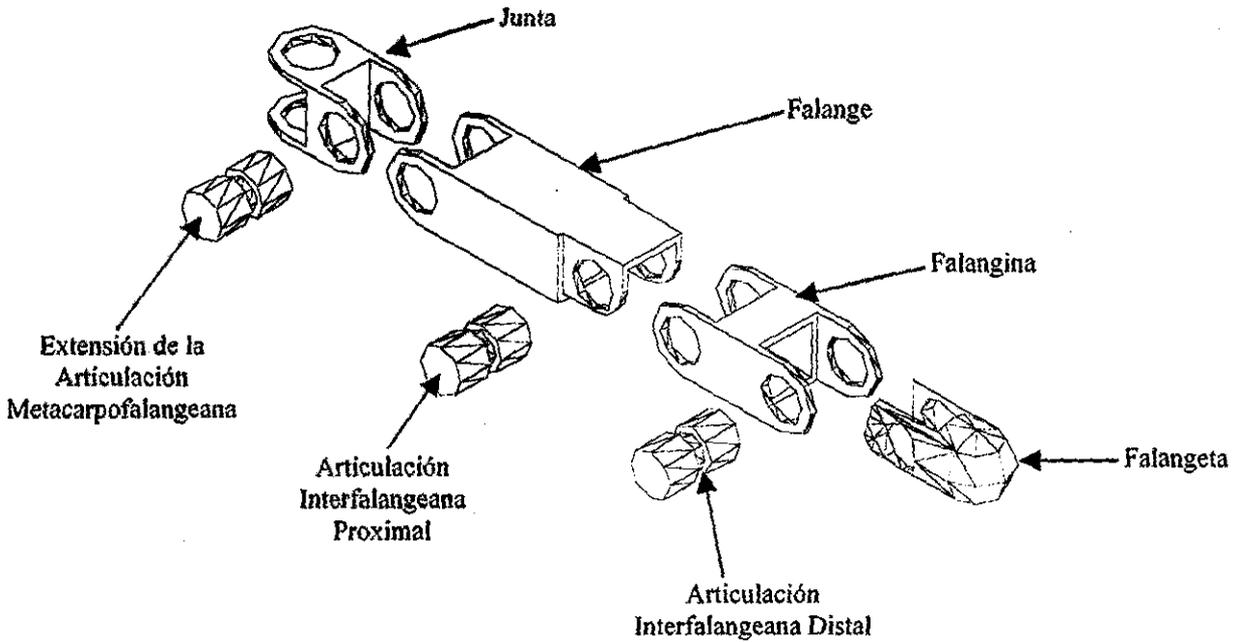


Figura 3.2 Despiece del dedo (Diseño Preliminar)

3.1.1 Junta

Esta pieza es una articulación del tipo junta universal con la cual se pretende lograr los movimientos de abducción/aducción y de flexión/ extensión de la falange con respecto a la palma de la mano, es decir, con respecto a los huesos metacarpianos. Esta pieza puede fabricarse a partir de dos piezas iguales acopladas una contra la otra y rotadas 90°. Estas piezas se pueden maquinar de perfil cuadrado o en "U".

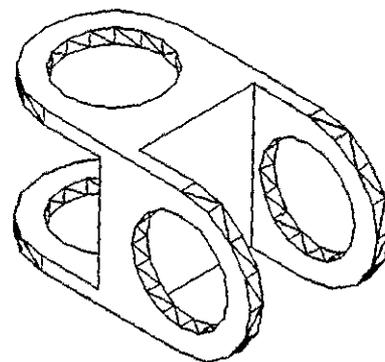


Figura 3.3 Junta (Articulación Metacarpofalangeana)

Otra característica que deberá tener la junta es que deberá tener guías para los tendones ya que a través de ella pasarán todos los cables de las articulaciones interfalangeanas y de la metacarpofalangeana.

3.1.2 Falange

La falange también se puede fabricar con perfil cuadrado, o a partir de 2 perfiles en "U" donde uno se introduzca en el otro debido a que son de diferente medida. El perfil exterior debería ser de mayor tamaño que el perfil utilizado en la junta para que se pueda tener el par cinemático en la articulación metacarpofalangeana. El perfil interior sería igual al utilizado en la junta para poderse acoplar con la falangina.

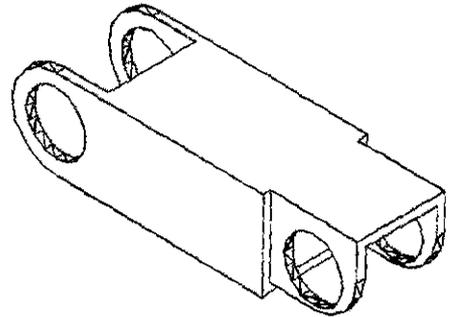


Figura 3.4 Falange

3.1.3 Falangina

La falangina se fabricaría con el mismo perfil cuadrado o del perfil en "U" utilizado en la parte exterior de la falange.

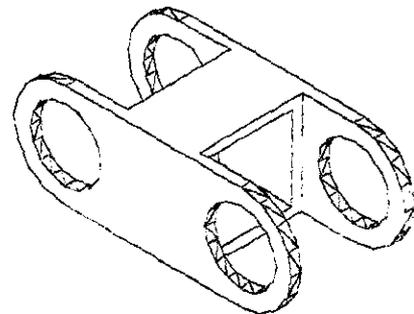


Figura 3.5 Falangina

3.1.4 Falangeta

La falangeta sería la única de las falanges fabricada en un material sólido pues no se podría dar un terminado semejante a la punta de un dedo si se trabaja con un perfil como material base. Al fabricarse a partir de un material sólido, se le puede dar la forma deseada por lo que no resulta importante en este punto el cómo se defina ésta. Lo que sí resulta de importancia es su extremo proximal ya que es la sínfisis con la falangina. Para poderse acoplar con la falangina, la falangeta también tendrá que tener las dimensiones iguales que el perfil interior de la falange y de la junta.

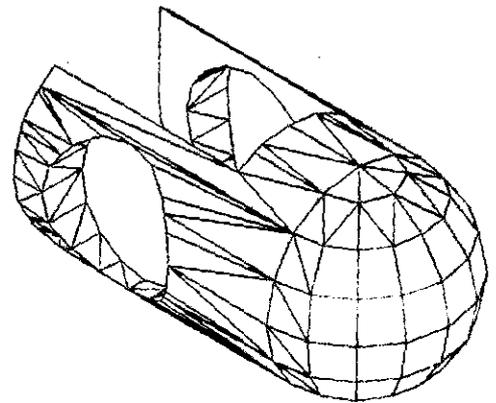


Figura 3.6 Falangeta

3.1.5 Articulaciones

Las articulaciones interfalangeanas y la flexora metacarpofalangeana son idénticas entre sí pues no son mas que ejes sobre los cuales deben actuar los tendones. El diámetro de todas estas articulaciones es el mismo ya que los motores que se han seleccionado son idénticos y por lo tanto los ejes de sus motores también, por lo cual, como se mencionó anteriormente, para poder tener una relación precisa entre el giro del motor y la posición de los dedos, el diámetro de los ejes de las articulaciones deberá ser igual al diámetro de los ejes de los motores. La longitud de las articulaciones también será igual en todas excepto en la abductora de la articulación metacarpofalangeana. La razón de esto es que se está proponiendo un ancho de dedo

parejo a lo largo de todo el dedo. La longitud de la articulación abductora metacarpofalangeana podrá ser diferente dependiendo del espesor del material utilizado para la palma de la mano.

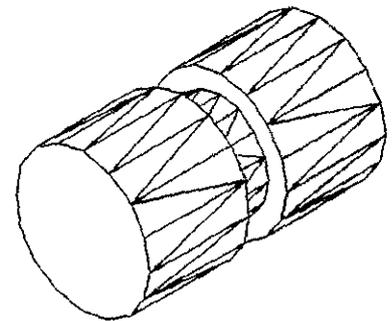


Figura 3.7 Articulaciones

Las articulaciones serán acanaladas para alojar los tendones y servirles como guía ayudándoles a que no se encimen uno con el otro. Estas articulaciones también tendrán un lugar donde se puedan sostener firmemente los tendones y evitar que pueda haber deslizamientos de los tendones sobre los ejes, lo cual nos acarrearía posiciones indeseadas.

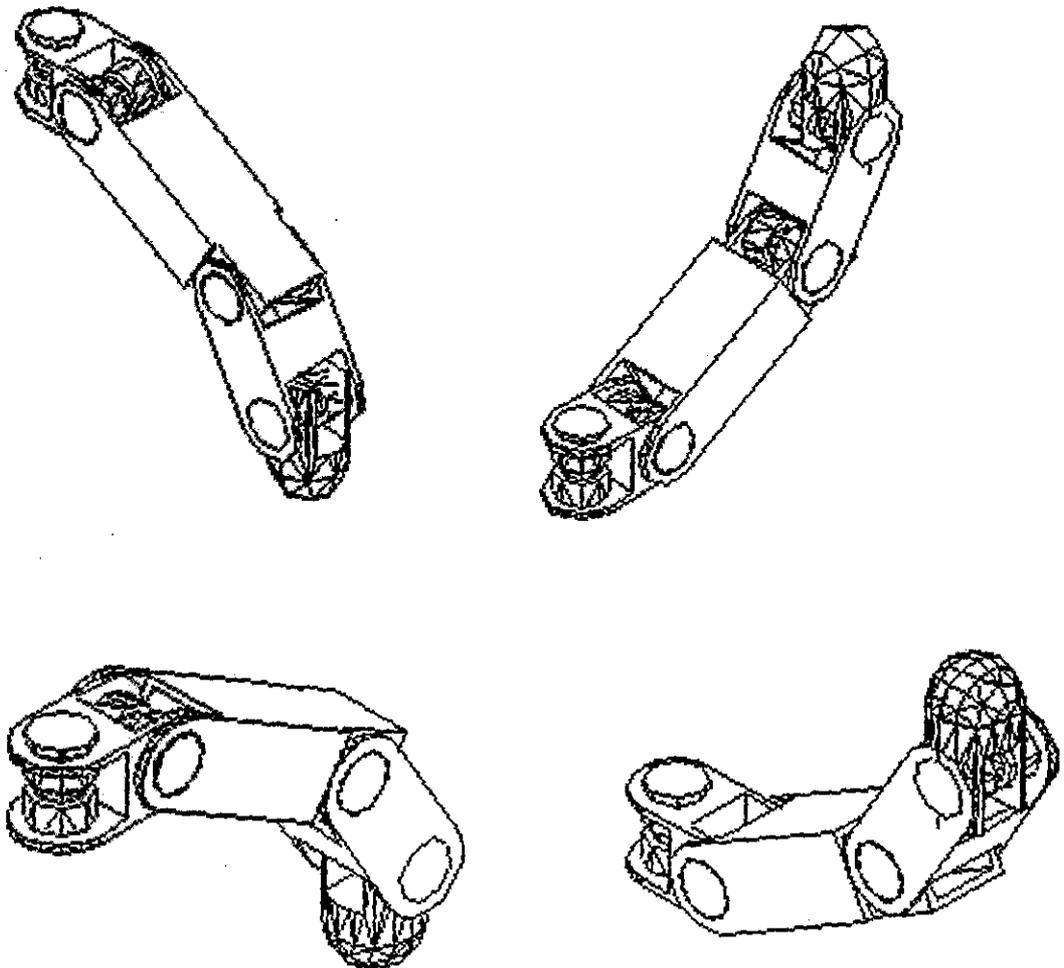


Figura 3.8 Vistas del diseño preliminar de los dedos

La figura 3.8 muestra diferentes vistas del diseño preliminar de los dedos. En algunas vistas cabe hacer notar el espacio que existe en el interior de las falanges para poder alojar a los tendones y las canales de las articulaciones para guiar a los mismos. En las vistas donde se aprecia la parte inferior de los dedos (Vistas del lado derecho de la figura) se aprecia un espacio por el cual se puede tener acceso a los tendones y acoplarlos a las articulaciones sin necesidad de desarmar los dedos. Las vistas donde se aprecia la parte superior de los dedos se nota que no existe este espacio, lo cual tiene como finalidad de servir como límite al movimiento de las falanges para que no vayan a tener una sobreextensión.

3.2. Diseño de Tendones

Debido a que los movimientos son independientes entre sí, se requiere de un arreglo de actuadores para cada movimiento, a excepción de la flexión/extensión de la articulación interfalangeana distal que, como se mencionó en el capítulo anterior, depende de la flexión/extensión en la articulación interfalangeana proximal dado que cuando los dedos comienzan a cerrarse dirigiéndose al pulgar en una sujeción de precisión, la flexión de la junta interfalangeana proximal, libera la tensión en el ligamento retinacular, permitiendo la flexión en la articulación interfalangeana distal.

Tomando en cuenta estas características y que la mano se ha decidido hacer de 4 dedos iguales, la mano mecánica tendrá un total de 13 grados de libertad controlados por

13 motores. Los grados de libertad serán repartidos de la siguiente manera: aducción/abducción de la articulación metacarpofalangeana de los cuatro dedos, flexión/extensión de la articulación metacarpofalangeana de los cuatro dedos, flexión/extensión de la articulación interfalangeana proximal en los cuatro dedos y flexión extensión de la interfalangeana distal del dedo oponible o pulgar.

Los tendones serán a propósito la parte más débil de nuestro sistema pues además de funcionar como el medio de transmisión de movimiento, servirán como fusible mecánico del sistema. Si bajo ciertas condiciones la mano mecánica se somete a un esfuerzo muy grande que la pudiera hacer fallar mecánicamente en una de sus piezas, primero fallará el tendón evitando un daño mayor a las falanges o a los ejes mismos. Esta decisión radica en que será más sencillo cambiar un cable que manufacturar una pieza, desensamblar el dedo y armarlo todo otra vez, incluyendo que todos los tendones de ese dedo se tendrían que desacoplar de las articulaciones.

3.2.1 Articulación Interfalangeana Distal

La relación de movimiento entre falangeta y falangina se puede lograr con el arreglo de tendones presentados en la figura 3.9.

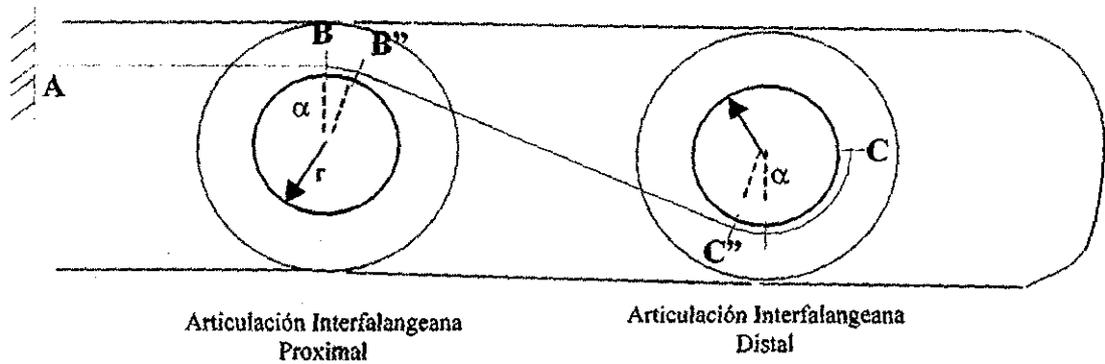


Figura 3.9 Arreglo de tendones entre falangeta y falangina

El punto A es un punto fijo dentro del dedo, específicamente dentro de la falange y los puntos B, B'' y C'' son los puntos en los que el tendón comienza a hacer contacto (tangentes) con los ejes de las articulaciones, las cuales son del mismo diámetro r. El punto C es el otro extremo del tendón que está fijo al eje de la articulación interfalangeana distal.

Así la longitud ℓ del tendón es constante y está determinada por la ecuación:

$$\ell = AB + BB'' + B''C'' + C''C$$

$$BB'' = \alpha r$$

$$C''C = \alpha r + \frac{\pi}{2} r$$

$$\ell = AB + B''C'' + \left(\frac{\pi}{2} + 2\alpha \right) r$$

Al flexionarse la falangina 90° , la posición del dedo será como se muestra en la figura 3.10.

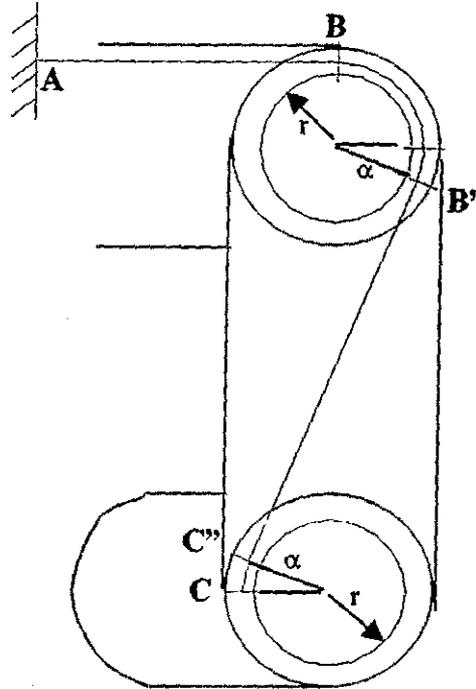


Figura 3.10. Disposición del arreglo de tendones en posiciones alternas de la falangeta y falangina

La longitud ℓ del tendón es constante dado que los extremos A y C se encuentran fijos. La longitud $B''C''$ también es constante ya que la distancia entre los ejes de las articulaciones interfalangeanas es constante. Con estos hechos, resulta que la suma de las longitudes BB'' y $C''C$ deber ser también constante. Esto se debe a que el ángulo α se reduce tantos grados en la articulación interfalangeana distal como se aumenta en la articulación interfalangeana proximal para que la longitud del tendón se mantenga constante. En la posición de la figura 3.10, la longitud del tendón está dada por:

$$l = AB + BB'' + B''C''' + C'''C$$

$$BB'' = \alpha r + \frac{\pi}{2}r$$

$$C'''C = \alpha r$$

$$l = AB + B''C''' + \left(\frac{\pi}{2} + 2\alpha \right) r$$

3.2.2 Articulación Interfalangeana Proximal y Metacarpofalangeana

Los tendones de las articulaciones interfalangeanas proximales y de las metacarpofalangeanas tanto de flexión/extensión como de abducción/aducción tienen un arreglo más sencillo. En el eje de cada articulación existe un punto donde se fijan los tendones y se les hace una vuelta completa alrededor del eje enviando los extremos de los tendones a los ejes de los motores donde se fijan de la misma manera que en los ejes de las articulaciones. Este arreglo es muy similar al de una transmisión flexible con bandas pero tiene la diferencia de la vuelta alrededor de los ejes y fijarse en un punto de ellos con la finalidad de evitar deslizamientos de los tendones sobre los ejes.

3.3. Selección de Materiales para Manufactura

3.3.1 Selección de Materiales para las Falanges

Un material que es fácilmente maquinable y que ofrece gran variedad de formas y perfiles comerciales es el aluminio. Lo ideal para maquinar lo menos posible y utilizar un tiempo máquina lo más reducido, sería un perfil que pudiera guardar la relación ancho/grueso de los dedos de 0.833 como se vio en el capítulo 2, pero dado que no existe un perfil comercial con esa relación dimensional se solucionó de la siguiente manera:

Un perfil cuadrado de 3/4 de pulgada que nos dé el ancho del dedo aproximadamente en 19 mm. Ya que el espesor de las paredes del perfil es de 1.5 mm, el interior mide 16 mm.

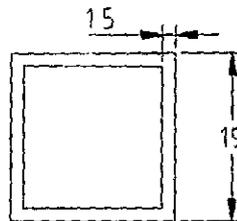


Figura 3.11 Perfil cuadrado de aluminio de 3/4 de pulgada utilizado como materia prima

El perfil de 3/4 de pulgada se rebaja por una de sus caras hasta que quede de una altura de 16 mm., que es la medida que debe tener el grueso del dedo dada la relación dimensional determinada en el capítulo 2. Haciendo esta operación el perfil quedará como un perfil en "U" que se muestra en la figura 3.12.

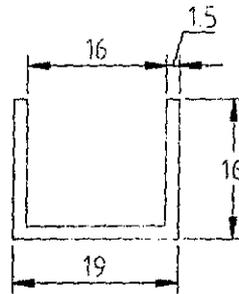


Figura 3.12 Perfil externo de las falanges

Para ocupar el espacio interior del nuevo perfil en "U" se podría utilizar un perfil cuadrado de 16 mm. de lado (equivalente a 7/16 de pulgada), el cual no existe comercialmente, por lo que se tuvo que buscar un perfil que alguna de sus partes se tuviera estas dimensiones. Este perfil fue un perfil de carril de ventana corrediza de donde se obtuvo la pieza mostrada en la figura 3.13.

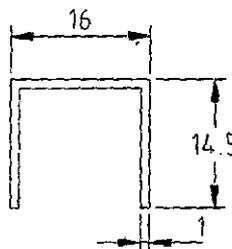


Figura 3.13 Perfil interno de las falanges

Juntando estos dos perfiles, logramos tener el perfil de nuestros dedos con un ancho de 19 mm. y un grosor de 16 mm. como lo muestra la figura 3.14.

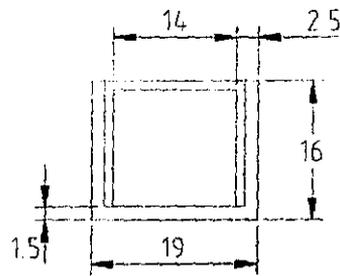


Figura 3.14. Perfil de los dedos

3.3.2 Selección de Materiales para las Falangetas

Como se mencionó anteriormente la falangeta deberá ser fabricada de un material sólido para darle la forma a la punta del dedo. Dada la forma de la falangeta, este puede ser barra de aluminio de hasta 1 pulgada para que se tenga suficiente material para darle la forma definitiva que llegue a tener la falangeta.

3.3.3 Selección de Materiales para las Juntas

El material de las juntas será el mismo que se seleccionó para el perfil interior de las falanges pero con otras dimensiones. La razón de esto es, como se ha expresado con anterioridad, que las juntas se articularán por la parte interior de la falange.

3.3.4 Selección de Materiales para las Articulaciones

Las articulaciones no representan mayor problema para su manufactura y pueden fabricarse a partir de barra de aluminio de 3/8 de pulgada (10 mm.), ya que esta medida ofrece aún suficiente margen para que las canales de las articulaciones donde se alojarán los tendones tengan el diámetro de los ejes de los motores.

3.3.5 Selección de Materiales para los Tendones

Se buscó que los tendones fueran resistentes y lo suficientemente flexibles como para dar las vueltas que se necesitan hacer alrededor de las articulaciones. El material seleccionado fue cuerda de nylon. Este material puede llegar a ser sustituido por algún alambre de cobre si es que se busca que la mano mecánica trabaje bajo condiciones extremas de temperatura, pero para fines de pruebas y de fabricación de este prototipo, donde el objetivo es lograr los movimientos y sujeciones de la mano humana, el nylon es suficiente.

Por otro lado, la selección correcta de un material para los tendones es de suma importancia, ya que como se definió con anterioridad, se busca que los tendones actúen como fusibles mecánicos para que estos sean los primeros en fallar antes de que dañen alguna de las otras piezas de nuestro sistema. Así, las fuerzas máximas que pueda soportar nuestra mano mecánica estarán limitadas por la resistencia a la tensión de los tendones.

3.4. Diseño para Manufactura y Ensamble

Después de varias vueltas sobre el diseño de las piezas de la mano, se llegó a un diseño donde básicamente los cambios importantes sobre los diseños preliminares fueron en los ejes de las articulaciones y en las falangetas.

Los ejes de las articulaciones se diseñaron con 3 ranuras o canales para los tendones, ya que por el eje de la abducción/aducción de la articulación metacarpofalangeana deben pasar también los tendones de la flexión/extensión de la misma articulación y el de la flexión extensión de la articulación interfalangeana proximal. Por el eje de la flexión/extensión de las articulaciones metacarpofalangeanas pasarán dos pares de tendones y lo mismo por la de la articulación interfalangeana proximal. Sólo el eje de la articulación interfalangeana distal es distinto ya que éste sólo tendrá una ranura o canal, pues dado es espesor de las paredes de las falangetas los canales laterales estorbarían para el ensamble de las falangetas con las falanginas.

Las falangetas cambiaron su forma para aproximarse un poco más la forma de las humanas quedando de la manera como se ilustra en la figura 3.15

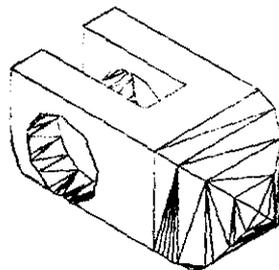


Figura 3.15. Diseño final de las falangetas

Las piezas que formarán la palma y el dorso de la mano podría pensarse que serían iguales, pero aunque son muy similares, difieren en la zona donde se les acopla el dedo pulgar debido a la particular orientación de aproximadamente 45° de este dedo para que pueda ser oponible al resto de los dedos. Para que las perforaciones que alojaran al eje de la abducción/aducción de la articulación metacarpofalangeana del dedo pulgar, estén perfectamente alineadas, éstas necesitan estar localizadas en distintos lugares en la palma y en el dorso con respecto a las perforaciones de las articulaciones metacarpofalangeanas de los demás dedos. Estas dos piezas se pueden apreciar en las figuras 3.16 a) y b).

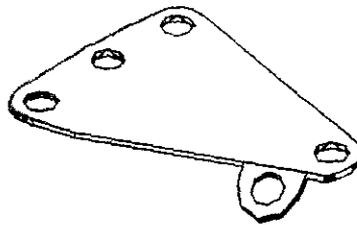


Figura 3.16 a) Palma de la mano

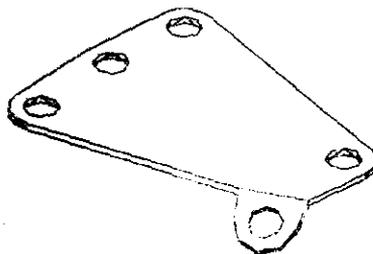


Figura 3.16 b) Dorso de la mano

Ya que el dobléz que deben llevar estas piezas es hacia la palma de la mano, la perforación que se localiza en la palma de la mano se encuentra más cercana a la muñeca de la mano que en el dorso, por lo que la pieza de la palma de la mano es más pequeña que la del dorso.

La palma y el dorso de la mano se pueden hacer de placa de aluminio de 1.8 mm. de espesor y posteriormente se les hace el dobléz de 45° en la zona de la abducción/aducción de la articulación metacarpofalangeana del dedo pulgar.

En las figuras 3.17 se muestran algunas vistas del diseño de la mano que se ha definido finalmente.

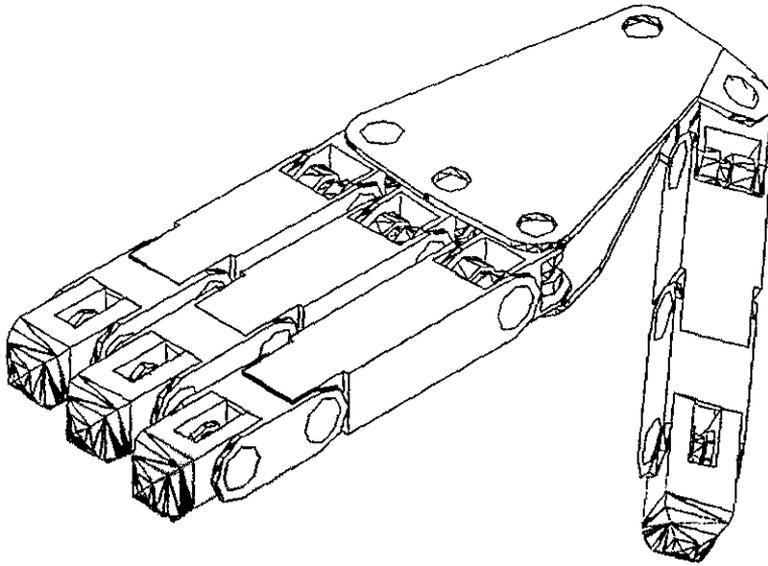


Figura 3.17 a) Vista interior de la mano extendida

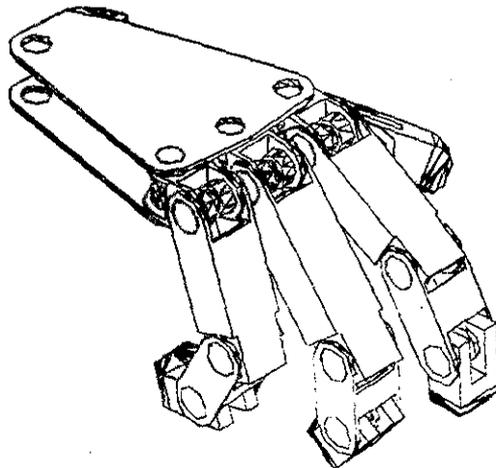


Figura 3.17 b) Vista exterior superior de la mano flexionada

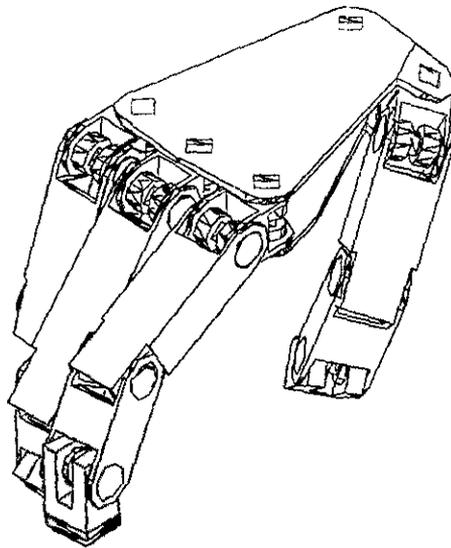


Figura 3.17 c) Vista interior superior de la mano flexionada

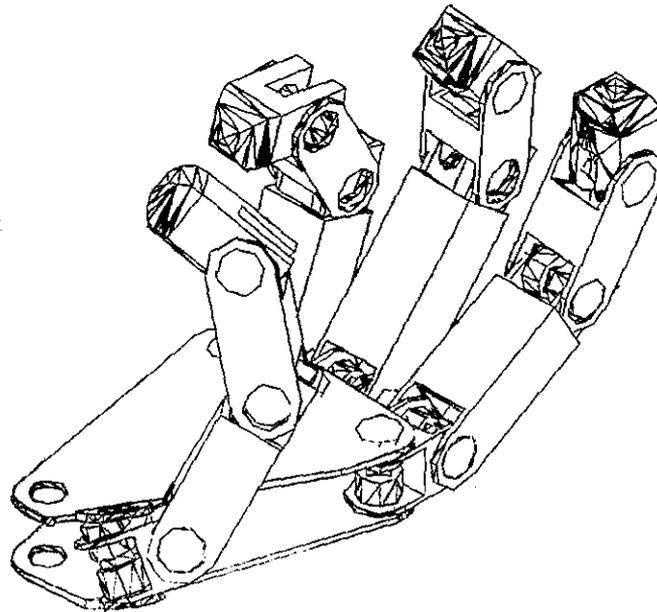


Figura 3.17 d) Vista interior inferior de la mano flexionada

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

El ensamble de la mano se realizará con pegamento, pues el uso de tornillos o remaches dificultaría el arreglo de tendones al interferir en sus trayectorias. Por otro lado, como se piensa que los dedos no serán sustituidos ya que estos no están diseñados para que fallen, sino los tendones, no tiene ningún sentido poner uniones no permanentes para que se puedan desensamblar. El uso de una unión permanente como pegamento facilita y acelera el trabajo.

Las uniones deberán estar hechas de tal forma que el eje que gire haga rotar las falanges deseadas, así pues las uniones permanentes son de la siguiente manera:

- a) Ejes de abducción/aducción de las articulaciones metacarpofalangeanas a las juntas
- b) Ejes de flexión/extensión de las articulaciones metacarpofalangeanas a las falanges
- c) Ejes de flexión/extensión de las articulaciones interfalangeanas proximales a las falanginas
- d) Ejes de flexión/extensión de las articulaciones interfalangeanas distales a las falangetas

Dadas estas uniones, las articulaciones giran libremente formando pares cinemáticos con las siguientes piezas:

- a) Abducción/aducción de las articulaciones metacarpofalangeanas giran libremente sobre la palma y el dorso de la mano
- b) Flexión/extensión de las articulaciones metacarpofalangeanas giran libremente sobre las juntas
- c) Flexión/extensión de las articulaciones interfalangeanas proximales giran libremente sobre las falanges
- d) Flexión/extensión de las articulaciones interfalangeanas distales giran libremente sobre las falanginas

Estas uniones permanentes con pegamento deberán hacerse con un adhesivo de alta calidad que garantice que no habrá deslizamientos debidos a una mala adherencia. Existen diversos tipos de pegamentos industriales que pueden garantizar una buena unión pero el más recomendado debido a su uso en condiciones extremas por varias compañías de diversos ramos es el *Loctite Depend*, un adhesivo a base de Metacrilato resistente a solventes y a un rango de temperaturas de -50°C a 121°C . Este pegamento también es capaz de llenar las pequeñas holguras donde se le piensa aplicar, además de soportar grandes fuerzas tanto a la tensión como al cortante.

3.4.1 Diseño de Piezas para ensamble de Falanges y Juntas

Como se mencionó anteriormente las falanges, falanginas y juntas se fabricarán a su vez de dos piezas cada una, una a partir de combinaciones de los perfiles exteriores e interiores.

La junta se formará con dos piezas iguales hechas con el perfil interior, rotadas 90° una con respecto a la otra de la manera como se indica en la figura 3.18.

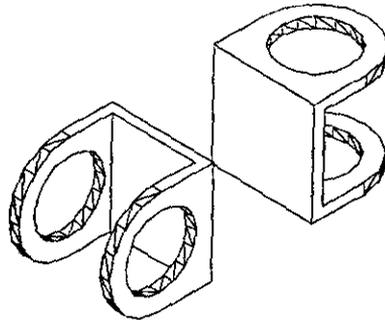


Figura 3.18. Ensamble de las juntas

Las falanges se formarán de una pieza hecha a partir del perfil exterior, plana por un extremo y por el otro con la perforación donde se alojará el eje de la flexión/extensión de la articulación metacarpofalangeana. La otra pieza será hecha con el perfil interior y al igual que la otra pieza, será plana por un extremo y por el otro tendrá una perforación para alojar al eje de la articulación interfalangeana proximal. El ensamblaje de esta pieza se muestra en la figura 3.19.

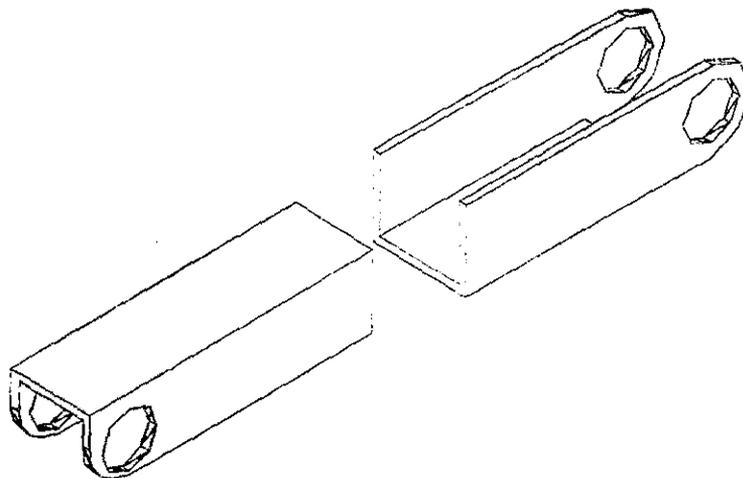


Figura 3.19. Ensamble de las falanges

Las falanginas se fabricarán con una pieza maquinada a partir del perfil exterior con ambos extremos perforados para alojar los ejes de las articulaciones interfalangeanas y otra pieza que sólo funcionará como una tapa para cubrir los tendones dentro de la falangina. Esta última pieza es plana por ambos extremos como se muestra en la figura 3.20.

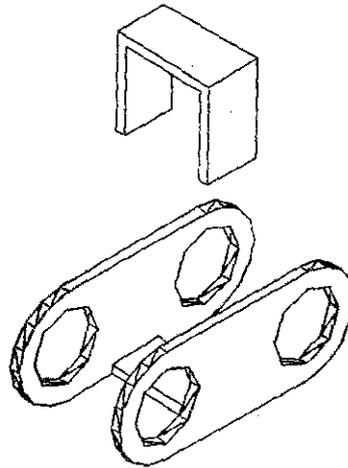


Figura 3.20. Ensamble de las falanginas

Todas estas piezas deben también ser unidas entre sí con la unión permanente hecha con el adhesivo *Loctite Depend* pues no deberá existir movimiento relativo entre ellas.

CAPITULO 4
FABRICACION

CAPITULO 4

Fabricación

En el capítulo 3 y en el anexo A, se definieron el material, la geometría y las dimensiones de cada una de las piezas de los dedos de la mano mecánica. Este capítulo tiene la finalidad de definir los métodos de manufactura y los parámetros de fabricación de cada pieza.

La máquina herramienta que se deberá utilizar para las falanges, palma y dorso de la mano, es la fresa vertical; mientras que para los ejes de los dedos se deberá usar el torno. Debido a que muchas de las partes de las falanges a maquinarse son idénticas, lo ideal es utilizar máquinas de control numérico por computadora CNC para hacer programas de maquinado que nos permitan que estas partes de verdad sean idénticas y además lograr que los tiempos de manufactura se reduzcan considerablemente. En el caso de los ejes y de los barrenos que alojarán estos ejes, se necesita cierta precisión en cuanto a alineación y holgura que las máquinas CNC nos la dan con cierta facilidad precisamente por los programas de control numérico.

4.1. Parámetros de Fabricación.

Los parámetros de fabricación están determinados por el material, herramienta de corte y máquina herramienta.

4.1.1. Velocidad de Corte

Uno de los principales parámetros es la velocidad de corte que se define por el material a maquinarse y el tipo de herramienta. Estos datos comúnmente se dan en tablas. Así para aluminio y sus aleaciones y utilizando un cortador cilíndrico frontal en una operación de afinado, se tienen los siguientes datos:

Velocidad de Corte (V_c) 300 a 350 in/min.

Se puede considerar un afinado pues el corte sólo tiene como máximo 1.5 mm de profundidad que es el espesor del perfil de aluminio que se utilizará. Además el acabado superficial que podremos alcanzar con altas velocidades de corte es mejor que con velocidades de corte bajas.

Dada esta velocidad de corte se puede determinar la velocidad de la máquina en R.P.M.

$$N = \frac{V_c}{\pi D} \dots (\text{ec.1})$$

donde:

N = Revoluciones por minuto (R.P.M.)

V_c = Velocidad de corte (in/min.)

D = Diámetro de la herramienta (in)

La herramienta con la que se fresarán las falanges será un cortador cilíndrico de 1/4 de pulgada y la velocidad de corte V_c que se usará será de 300in/min. Sustituyendo estos valores en la fórmula anterior se obtiene que N es igual a:

$$N = \frac{300}{\pi \times 0.25} = 382RPM$$

4.1.2. Avance por Minuto

El avance por minuto es la velocidad con la cual se moverá la mesa de la fresadora. Para determinar el avance se necesita conocer la velocidad máxima que aguanta el cortador en contacto con el material a maquinar. Esta velocidad se conoce como avance por diente y se puede obtener de tablas. Así para aluminio y sus aleaciones y utilizando un cortador cilíndrico frontal en una operación de afinado, se tiene que el avance por diente es:

Avance por diente (A_z) 0.05 mm/diente

El avance por minuto A_m o F de la herramienta se determina de la siguiente manera:

$$A_m = A_v N \dots(\text{ec.2})$$

$$A_v = A_z Z \dots(\text{ec.3})$$

donde:

$A_m = F =$ Avance por minuto (mm/min.)

$A_v =$ Avance por vuelta (mm/vuelta)

$N =$ Revoluciones por minuto (R.P.M.)

$A_z =$ Avance por diente (mm/diente)

$Z =$ Número de dientes de la herramienta

Sustituyendo la ecuación 3 en la 2 se tiene que el avance por minuto es igual a:

$$A_m = A_z Z N \dots(\text{ec.4})$$

Si el cortador que usaremos tiene 4 dientes y usando el valor de 0.05 mm/diente como avance por diente y 382 R.P.M. obtenidas de la ecuación 1, se tiene que el avance por minuto es igual a:

$$A_m = F = 0.05 \times 4 \times 382 = 76.4 \text{ mm / min}$$

Con estos dos datos ya tenemos nuestros parámetros de corte para la herramienta de 1/4 de pulgada que redondeándolos son:

Velocidad de la máquina (N) 400 R.P.M.

Avance por minuto (Am o F) 75 mm/min.

4.2. Programación en CNC.

Las partes a maquinar en CNC donde se requiere precisión en cuanto a la alineación y a las holguras son los extremos de las falanges y juntas y los ejes de las articulaciones. Por otra parte debido a la complejidad en la forma de la palma y del dorso de la mano, estas piezas también serán maquinadas en control numérico pero en ellas la manera de programar es muy diferente a los extremos de las falanges y los ejes de las articulaciones. En el caso de las falanges el programa es muy sencillo y se puede hacer fácilmente con un código muy pequeño, pero en el caso de la palma y del dorso de la mano se requiere de un programa de cómputo llamado Pro CAD/CAM que permite generar el código de control numérico a partir del dibujo en planta de la pieza.

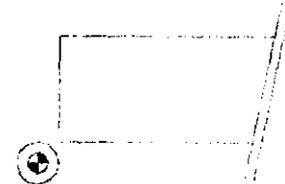
4.2.1. Programa de los extremos de las falanges

		X	Y	Z	F	Explicación
N00	G92	0.0	0.0	0.0		Definición del origen de la herramienta
N01	M03					Enciende el husillo poniéndolo a girar en sentido horario
N02	G00	1118	-100	0.0		Avance rápido aproximación al inicio de la circunferencia
N03	G01	1118	0.0	0.0	75	Avance despacio para corte al inicio de la circunferencia F=75mm/min
N04	G02	0.0	1118	0.0	75	Interpolación circular en sentido horario. Primer arco del círculo F=75mm/min
N05	G02	1118	2236	0.0	75	Interpolación circular en sentido horario. Segundo arco del círculo F=75mm/min
N06	G00	0.0	2236	0.0		Avance rápido para regresar la herramienta al origen en dos
N07	G00	0.0	0.0	0.0		movimientos (N06 y N07)
N08	M30					Final del programa

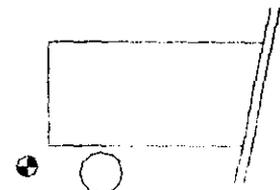
Gráficamente el programa hace los siguientes cortes

N00 G92 Definición del origen de la herramienta

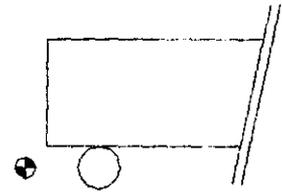
N01 M03 Encendido del husillo en sentido horario



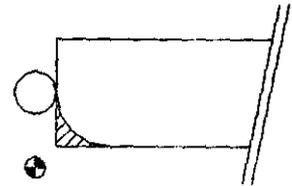
N02 G00 Aproximación rápida al inicio de la circunferencia



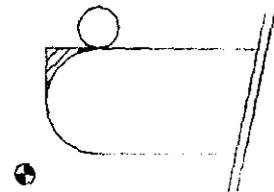
N03 G01 Movimiento lento para corte al inicio del arco



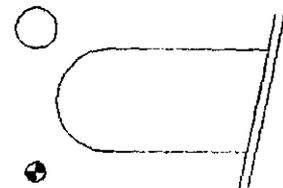
N04 G02 Corte del primer arco en sentido horario



N05 G02 Corte del segundo arco en sentido horario

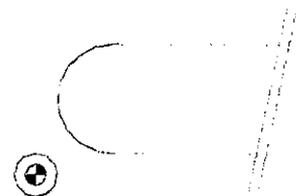


N06 G00 Avance rápido para regresar al origen



N07 G00 Avance rápido para regresar al origen

N08 M30 Fin del programa



Todas estas medidas se deben definir en centésimas de milímetro de ahí los valores en órdenes de magnitud 100 veces mayores que las medidas que necesitamos.

En este programa cabe hacer notar que las medidas de X y Y a las que se quiere llegar se deben de ver modificadas por el radio del cortador dado que el origen se define en el centro del cortador. El origen o cero pieza se define fácilmente al hacer tocar ligeramente la herramienta con los bordes de la pieza, así que el origen estará alejado de la pieza en $1/8$ de pulgada en X y $1/8$ en Y, ambos en dirección negativa. Un ejemplo de la modificación de las medidas se nota en la línea N05 donde en el sentido X se define el número 1118, esto se debe a la suma de 800 centésimas de milímetro del radio del arco en el extremo de la falange más $1/8$ de pulgada equivalente a 318 centésimas de milímetro. En la dirección Y la medida de 2236 es igual a 1600 del diámetro del arco más $1/4$ de pulgada iguales a 635 centésimas de milímetro del diámetro del cortador.

Este programa se corre dos veces por extremo de las falanges que llevan esta terminación.

4.2.2. Programa de los barrenos de las falanges

Los barrenos de las falanges se hacen también con la fresadora de control numérico porque es este el punto más crítico de toda la manufactura de la mano, ya que es imprescindible que los dos barrenos que lleva cada extremo de la falange estén

perfectamente alineados. Este requerimiento se puede lograr gracias a la posición exacta que nos pueden dar los servomotores de las máquinas de control numérico.

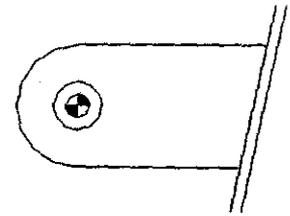
	X	Y	Z	F	Explicación	
N00	G92	0.0	0.0	0.0	Definición del origen de la herramienta	
N01	M03				Enciende el husillo poniéndolo a girar en sentido horario	
N02	G01	0.0	-132	0.0	75	Corte desde el origen hasta el inicio del primer arco
N03	G02	-132	0.0	0.0	75	Corte del primer arco del barreno F=75mm/min
N04	G02	0.0	-132	0.0	75	Corte del segundo arco del barreno F=75 mm/min.
N05	G02	-132	0.0	0.0	75	Corte del tercer arco del barreno F=75 mm/min.
N06	G02	0.0	-132	0.0	75	Corte del cuarto arco del barreno F=75 mm/min.
N07	G01	0.0	0.0	0.0	75	Regreso al origen
N08	M30				Final del programa	

El origen o cero pieza se define en el centro del barreno. Al igual que el programa anterior las medidas se modifican por el radio de la herramienta. El barreno deberá tener 9 mm. de diámetro. Por el simple hecho de introducir el cortador ya tendríamos un barreno de 6.35 mm. por lo que faltan 2.65 mm. en el diámetro, es decir 1.325 mm. por todo el derredor de la perforación original, de ahí que la medida que aparece constantemente en el programa sea precisamente 132 centésimas de milímetro.

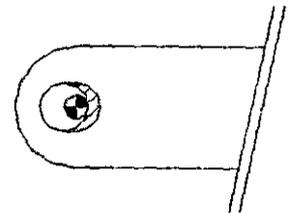
Gráficamente, el programa hace los siguientes pasos:

N00 G92 Definición del origen de la herramienta

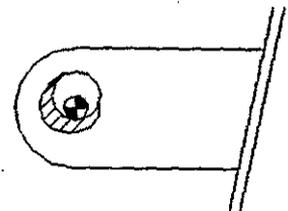
N01 M03 Enciende el husillo en sentido horario



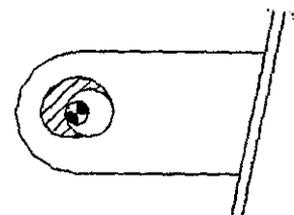
N02 G01 Corte desde el origen hasta el inicio del primer arco



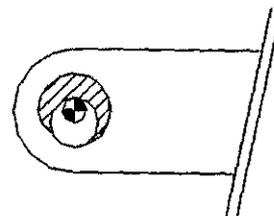
N03 G02 Corte del primer arco del barreno



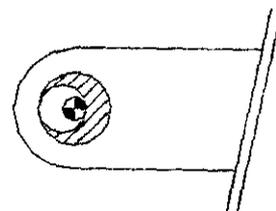
N04 G02 Corte del segundo arco del barreno



N05 G02 Corte del tercer arco del barreno

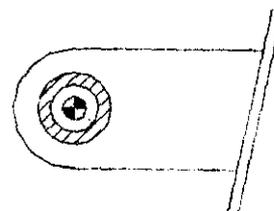


N06 G02 Corte del cuarto arco del barreno



N07 G01 Regreso al origen

N08 M30 Final del programa



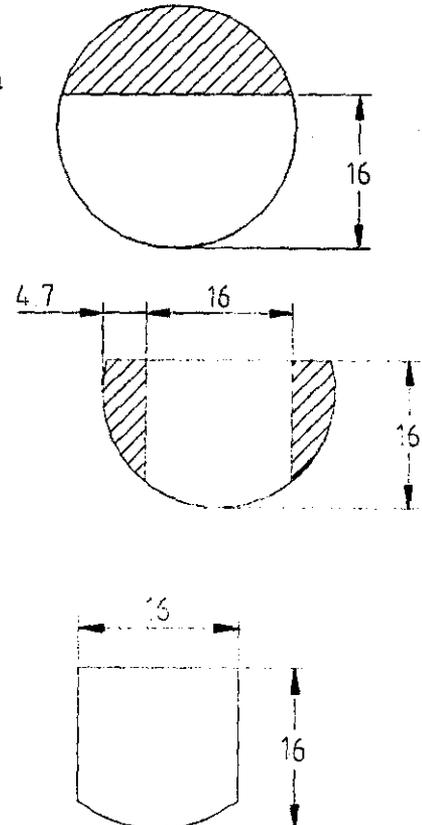
Todos los perfiles de aluminio usados para las falanges y las juntas se cortan inicialmente en bruto a una medida muy aproximada a la que tendrán finalmente y luego se desbastan en la fresadora hasta las medidas definidas en el capítulo 3 para los perfiles interior y exterior. Luego del desbaste se define el cero pieza y se corren los programas anteriores.

En el caso del perfil interior de la falange, el programa utilizado para el extremo de la falange, es el mismo que el descrito anteriormente pero sin la parte que realiza el corte del primer arco.

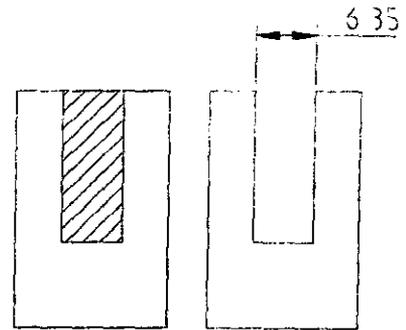
4.2.3. Fabricación de las Falangetas

Para las falangetas, la fabricación es muy similar, de hecho, para dar el perfil a la punta del dedo, se utiliza el mismo programa que para los extremos de las falanges. Para su extremo que se articula con la falangina, se usa el mismo concepto que el descrito para el perfil interior de la falange. El desbaste de la falange se realiza a partir de una barra de aluminio de 1 pulgada de diámetro comenzando su desbaste de la siguiente manera:

- Se desbasta paralelamente al eje longitudinal hasta dejar una altura de 16 mm.
- Se hacen dos desbastes paralelos entre sí y al eje longitudinal y perpendicular al desbaste anterior de 4.7 mm. para dejar el grueso de la falangeta de 16 mm. La vista frontal después de hacer estos desbastes queda como se muestra en la tercera figura.



- Se rota la pieza 90° y se ranura con la ayuda del cortador de 1/4 por el centro para que después ahí se puedan alojar los tendones de la falangeta.



Una vez que se tiene esta preforma en la falangeta, se pueden usar los mismos programas usados para las demás falanges.

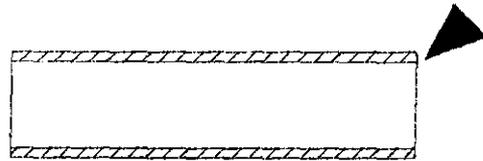
4.2.4. Programa para los ejes de las articulaciones

Los ejes de las articulaciones se maquinarán en torno de control numérico. En este caso se requieren de dos herramientas: un cortador izquierdo y un tronizador. El cortador izquierdo es necesario para el refrentado y el cilindrado iniciales y el tronizador para realizar las ranuras o canales que servirán como guías para los tendones. El tronizador que se utilizará será de 3 mm. de ancho para realizar el corte de cada canal de una sola pasada.

El diámetro de los ejes de las articulaciones es el otro punto crítico dimensionalmente hablando, pues es el punto a través del cual se estarán acoplando las falanges.

	X	Z	F	H	Explicación
N00	G92	0.0	0.0		Definición del origen de la herramienta
N01	G00	1000	100		Aleja la herramienta con un movimiento rápido de la pieza
N02	G84	880	-1920	50 50	Ciclo de cilindrado hasta D 8.8 mm. avance 50 y reducciones de 0.5 mm
N03	G00	5000	11000		Movimiento rápido alejado de la pieza para cambiar hta.
N04	M06	1032	1415	T04	Cambio de hta. al tronzador y coordenadas de compensación
N05	G00	900	-710		Aproximación rápida a la posición de la primer canal
N06	G01	640	-710	25	Movimiento lento de corte de la primera ranura
N07	G01	900	-710	50	Saca el tronzador lentamente de la pieza
N08	G00	900	-1100		Aproximación rápida a la posición de la segunda canal
N09	G01	640	-1100	25	Movimiento lento de corte de la segunda ranura
N10	G01	900	-1100	50	Saca el tronzador lentamente de la pieza
N11	G00	900	-1510		Aproximación rápida a la posición de la tercer canal
N12	G01	640	-1510	25	Movimiento lento de corte de la tercer ranura
N13	G01	1000	-1510	50	Saca el tronzador lentamente de la pieza
N14	G00	1000	-2220		Aproximación rápida a la posición del final de la pieza
N15	G01	200	-2220	25	Movimiento lento de corte de la pieza para desprenderla
N16	G01	1000	-2220	50	Saca el tronzador lentamente de la pieza
N17	G00	5000	11000		Aleja la herramienta rápido de la pieza para cambio de hta.
N18	M06	0.0	0.0	T02	Cambio de hta. por el cortador izquierdo y compensación
N19	G00	0.0	0.0		Movimiento rápido al origen
N20	M30				Fin del programa

N00 G92 0.0 0.0
 N01 G00 1000 100
 N02 G84 880 -1920 50



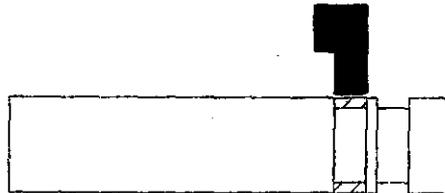
N03 G00 5000 11000
 N04 M06 1032 1415 T04



N05 G00 900 -710
 N06 G01 640 -710 25
 N07 G01 900 -710 50
 N08 G00 900 -1100



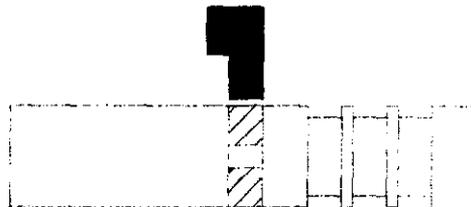
N09 G01 640 -1100 25
 N10 G01 900 -1100 50
 N11 G00 900 -1510



N12 G01 640 -1510 25
 N13 G01 1000 -1510 50
 N14 G00 1000 -2220



N15 G01 200 -2220 25
 N16 G01 1000 -2220 50
 N17 G00 5000 11000



N18 M06 0.0 0.0 T02
 N19 G00 0.0 0.0
 N20 M30



4.2.5. Programa para la palma y el dorso de la mano

Como se mencionó con anterioridad, los programas de la palma y del dorso de la mano se obtuvieron con el paquete de cómputo Pro-CAD/CAM, en el cual sólo se introduce el dibujo en planta de las piezas, se definen trayectorias y Pro-CAD/CAM realiza el listado del programa de maquinado.

Para ambas piezas se definió que la manufactura sería en el centro de maquinado VMC 100 de EMCO, donde una vez generado el código de control numérico, se le introduce a la máquina a través de una comunicación serial RS-232.

Los programas de las piezas a pesar de haber resultado largos, son muy simples pues están hechos prácticamente en su totalidad con interpolaciones lineales (G01) y circulares (G03). La ventaja de haber utilizado este paquete que genera el código de control numérico es que uno se desentiende totalmente de definir correctamente las coordenadas de la pieza. En el caso específico de la palma y del dorso de la mano, la forma de estas piezas resultaron sólo de definir la posición exacta de los ejes de las articulaciones y lo demás bastó con aproximar la forma de la mano alrededor de los agujeros de estos ejes, por lo que las dimensiones y orientaciones de todas las líneas del

contorno de estas piezas son difíciles de medir y de ahí que se haya decidido utilizar estas herramientas de cómputo.

El cortador utilizado fue un cortador de 3 mm. de diámetro y la definición de las trayectorias fue siempre del lado del material que sería desechado. En el caso de los agujeros de los ejes de las articulaciones, la trayectoria se definió por la parte interior y para el contorno de la palma y del dorso las trayectorias se definieron por la parte exterior.

En el Anexo B se presentan los códigos de control numérico de estas piezas.

4.3. Fabricación y Ensamble.

4.3.1. Fabricación

Todas las piezas que conforman las falanges, inicialmente se cortaron en bruto con segueta a las medidas aproximadas de las piezas con un exceso de material de aproximadamente 1 mm. más por lado en la longitud de las piezas. Para el perfil exterior, también se cortó con segueta la parte superior del perfil para ya darle la forma inicial de perfil en U.

Posteriormente, operando en modo manual las máquinas de control numérico y aprovechando su precisión en lectura y avance, se cortaron las piezas hasta las medidas

adecuadas de las falanges, pero aún sin darle la forma final de los extremos, que posteriormente se maquinarían con los programas de control numérico antes descritos.

La parte más crítica durante la fabricación de las piezas fue la sujeción de ellas en las mesas de trabajo de los centros de maquinado, debido a lo delgado de las paredes de los perfiles y por ende poca resistencia a las fuerzas aplicadas por las prensas de sujeción. Por lo mismo, la profundidad de los cortes no podría ser demasiada ya que la fuerza ejercida por la herramienta sobre la pieza sería tal que también deformaría los perfiles. El segundo punto se resolvió fácilmente al tener a lo mucho 1 a 1.5 mm. que maquinar.

Aún ayudando con los cortes preliminares con segueta, los tiempos de maquinado se vieron elevados por dos razones: a) tiempo dedicado a realizar una sujeción cuidadosa de las piezas y b) ser el prototipo de la mano mecánica. El tiempo de fabricación de cada pieza se elevó en promedio a 40 minutos desde la sujeción inicial hasta que la pieza estaba completamente terminada, por lo que en total se utilizó la fresadora unas 16 horas. Los ejes de las articulaciones no presentaron problema alguno en su maquinado utilizando aproximadamente 3 minutos por eje, por lo que en total el torno se utilizó aproximadamente 1 hora incluyendo el tiempo inicial de referenciación de las herramientas.

4.3.2. Ensamble

El ensamble de la mano se realizó con el siguiente orden:

1. Unión de los perfiles interior y exterior de las falanginas
2. Unión de las dos piezas que forman las juntas o articulación metacarpofalangeana
3. Acoplamiento de las falanginas con las falangetas
4. Poner en posición el eje de la articulación interfalangeana distal y pegarlo a la falangeta
5. Acoplamiento de las falanginas con el perfil interior de la falange
6. Poner en posición el eje de la articulación interfalangeana proximal y pegarlo a la falangina
7. Realizar el arreglo de los tendones de la articulación interfalangeana distal
8. Tensión y sujeción de los tendones de la articulación interfalangeana distal entre los perfiles de la falange
9. Unión de los perfiles de las primeras falanges
10. Acoplamiento de las falanges con las juntas
11. Poner en posición el eje flexor de la articulación metacarpofalangeana y pegarlo a la falange
12. Poner en posición el eje abductor de la articulación metacarpofalangeana y pegarlo a la junta
13. Realizar el arreglo del tendón del eje abductor de la articulación metacarpofalangeana

14. Realizar el arreglo del tendón del eje flexor de la articulación metacarpofalangeana
15. Realizar el arreglo del tendón de la articulación interfalangeana proximal
16. Acoplar cada dedo por medio de la junta con la palma y dorso de la mano
17. Introducir los tendones por los forros de chicote
18. Realizar el arreglo de tendones de nylon en los ejes de cada motor
19. Unir cada uno de los extremos de los tendones de nylon de los motores con los tendones de la mano que vienen de los forros de chicote y tensar.

Aparentemente no existe un diseño para el desensamble de los dedos, pero como se mencionó anteriormente, los dedos se diseñaron para que lo primero que falle sean los tendones, los cuales sí se pueden desacoplar y acoplar fácilmente.

En las figuras 4.1 en adelante se muestra la mano mecánica armada en diferentes posiciones y desde distintos puntos de vista.

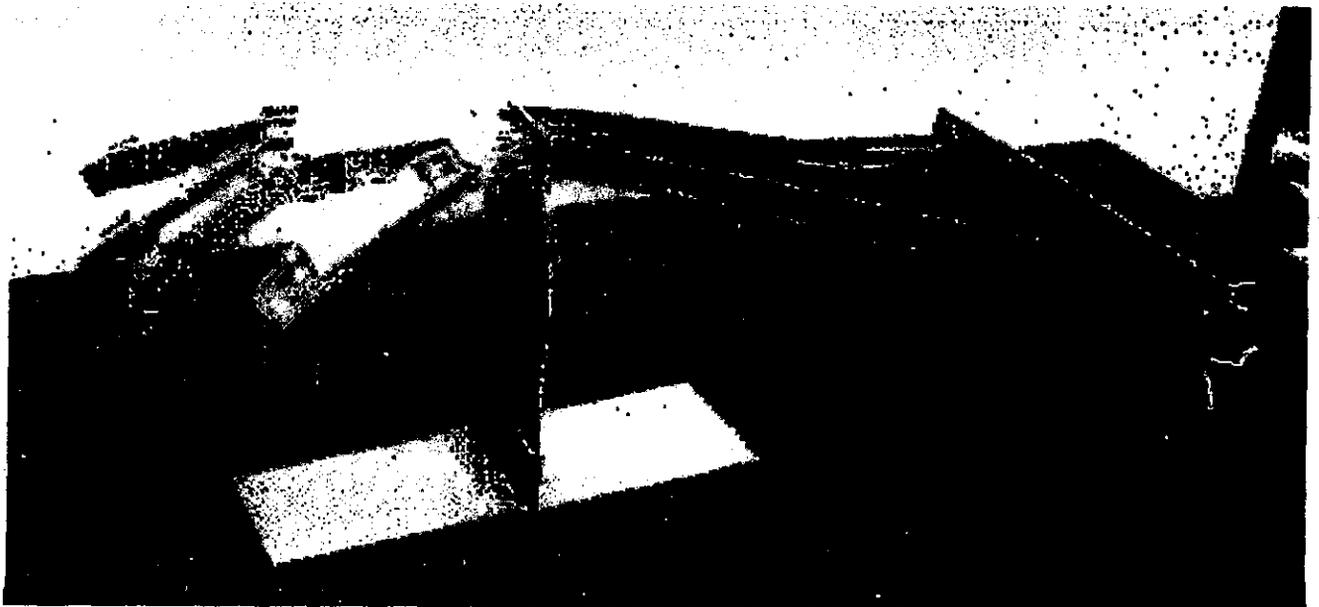


Figura 4.1. Vista general de la mano mecánica con todo y el arreglo de chicotes

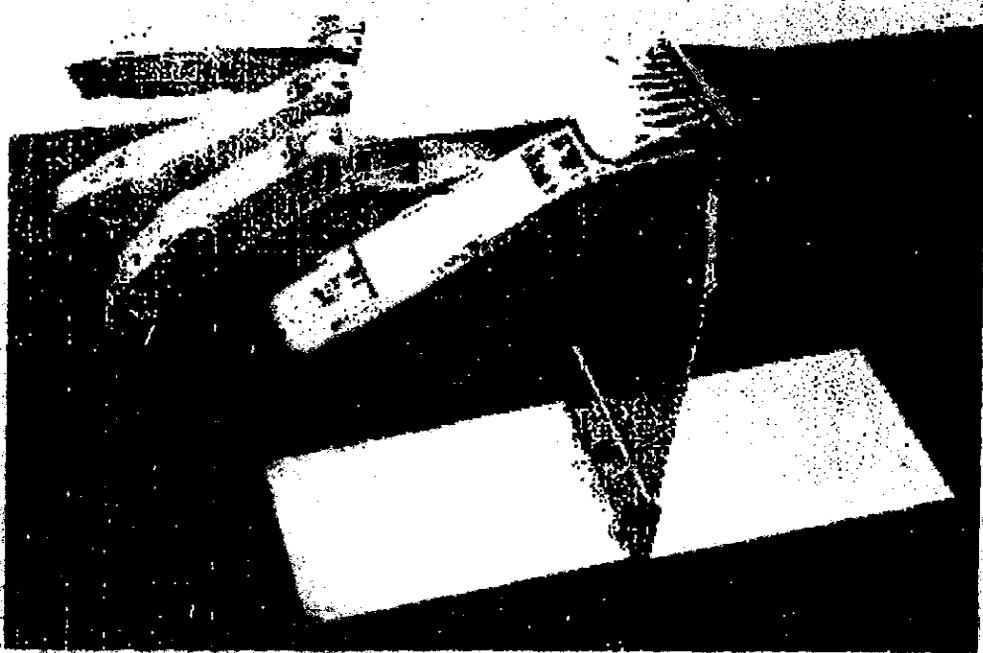


Figura 4.2. Vista general de la mano mecánica

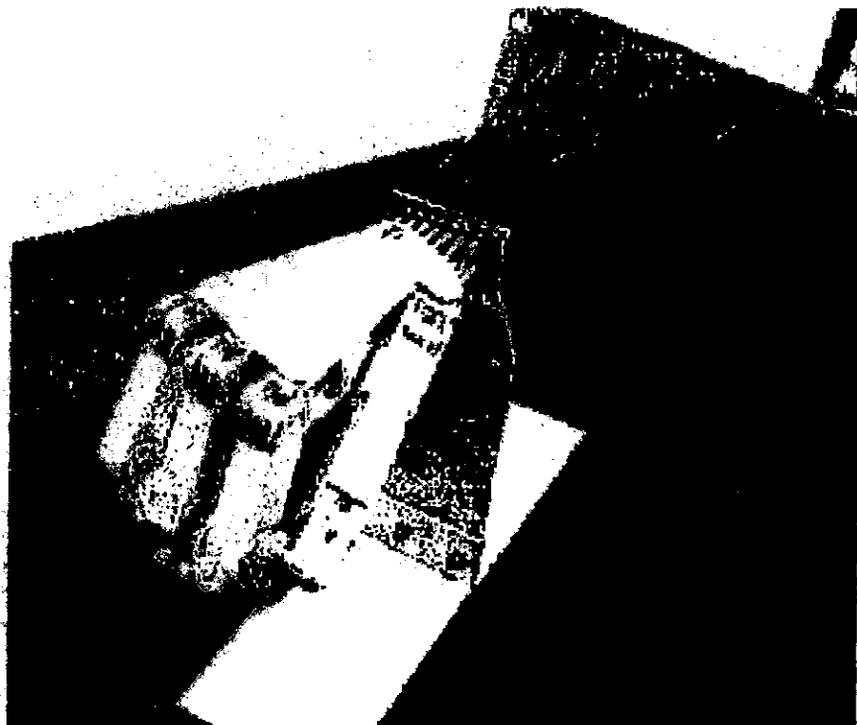


Figura 4.3 Mano mecánica parcialmente flexionada

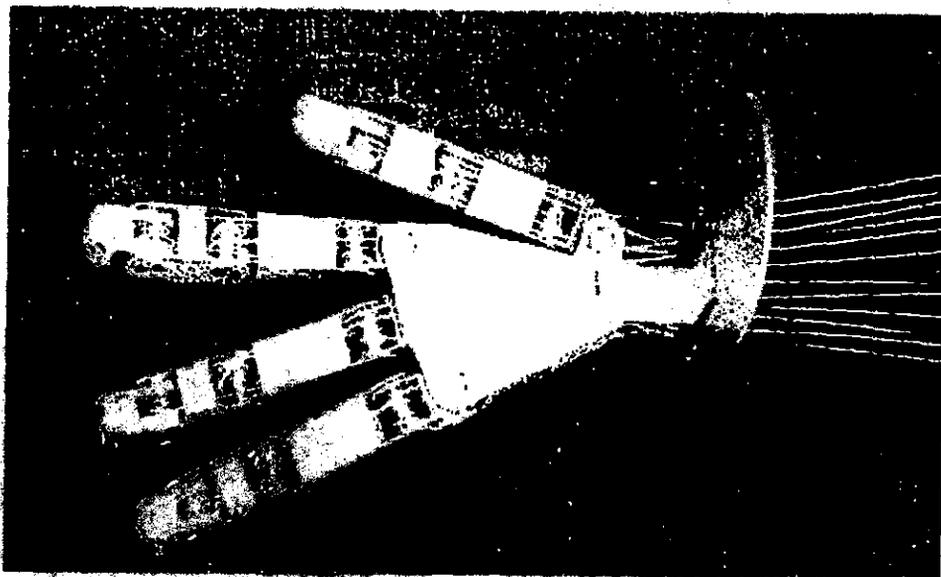


Figura 4.4. Vista inferior de la mano mecánica completamente extendida.

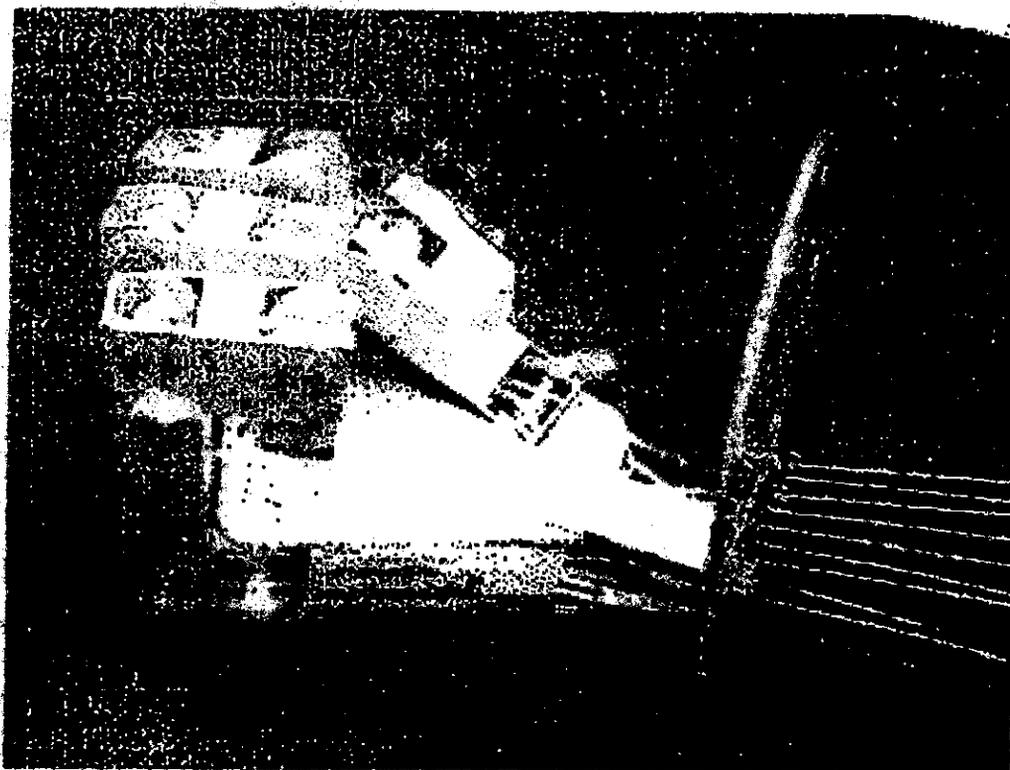


Figura 4.5. Vista inferior de la mano flexionada

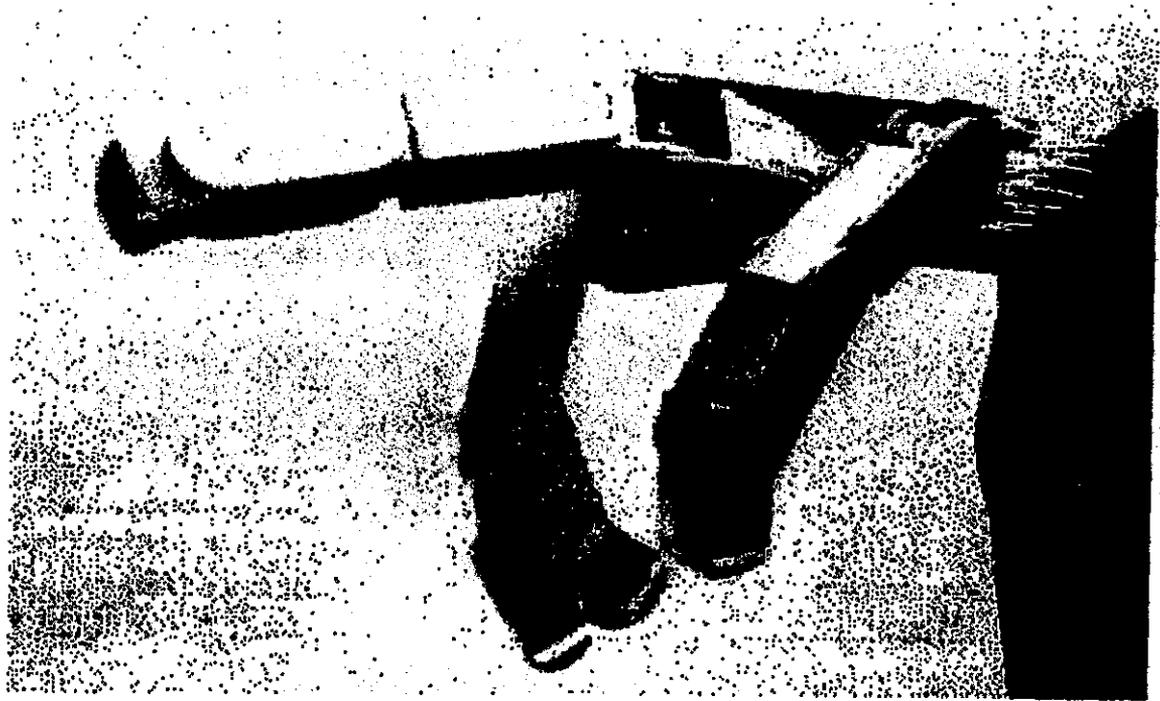


Figura 4.6. Dedo pulgar oponiéndose al dedo medio. Vista inferior

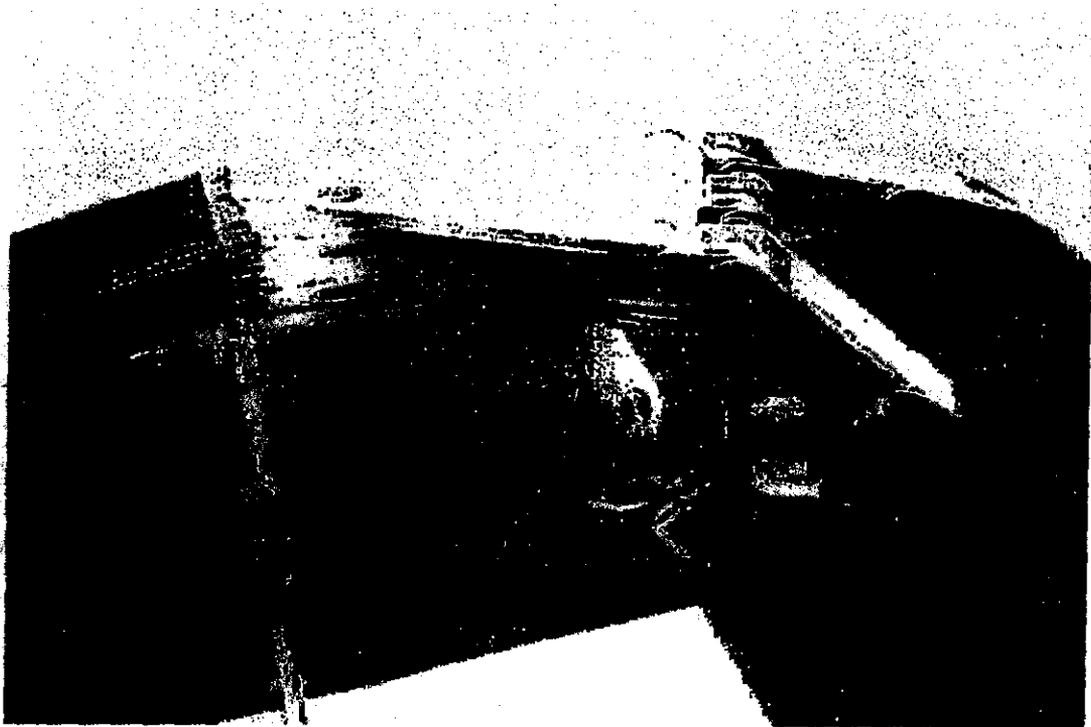


Figura 4.7. Dedo pulgar oponiéndose al dedo medio. Vista superior

CAPITULO 5
PRUEBAS, CARACTERIZACION Y RESULTADOS

CAPITULO 5

Pruebas, Caracterización y Resultados

5.1. Pruebas y Caracterización

5.1.1. Movimientos y Sujeción

Una vez ensamblada la mano mecánica y acoplados los tendones tanto a los ejes de las articulaciones como de los ejes de los motores, se procedió a realizar las pruebas del sistema.

Las pruebas básicamente fueron diseñadas para verificar los tipos de sujeción que la mano mecánica sería capaz de realizar, así como las fuerzas máximas que podrían resistir los tendones.

Determinando el área de trabajo de cada dedo, se definieron las sujeciones capaces de realizar. La flexión y extensión de las articulaciones metacarpofalangeanas permiten a las falanges moverse 180° , mientras que la flexión y extensión de las articulaciones interfalangeanas permiten a las falanginas y falangetas moverse 90° . La abducción y aducción de las articulaciones metacarpofalangeanas permiten un movimiento de aproximadamente 135° en los dedos índice, anular y pulgar, y de unos 60° en el dedo medio, pero el arreglo de tendones diseñado provoca un movimiento de abducción/aducción no deseado al realizar la flexión/extensión de las articulaciones interfalangeanas

proximales y de las articulaciones metacarpofalangeanas. Debido a esto, se decidió eliminar este par cinemático dejando la posición de los dedos en una posición que permita la mayor parte de las sujeciones.

Analizando las áreas de trabajo de cada dedo las sujeciones que la mano mecánica puede realizar son las indicadas en la figura 5.1.

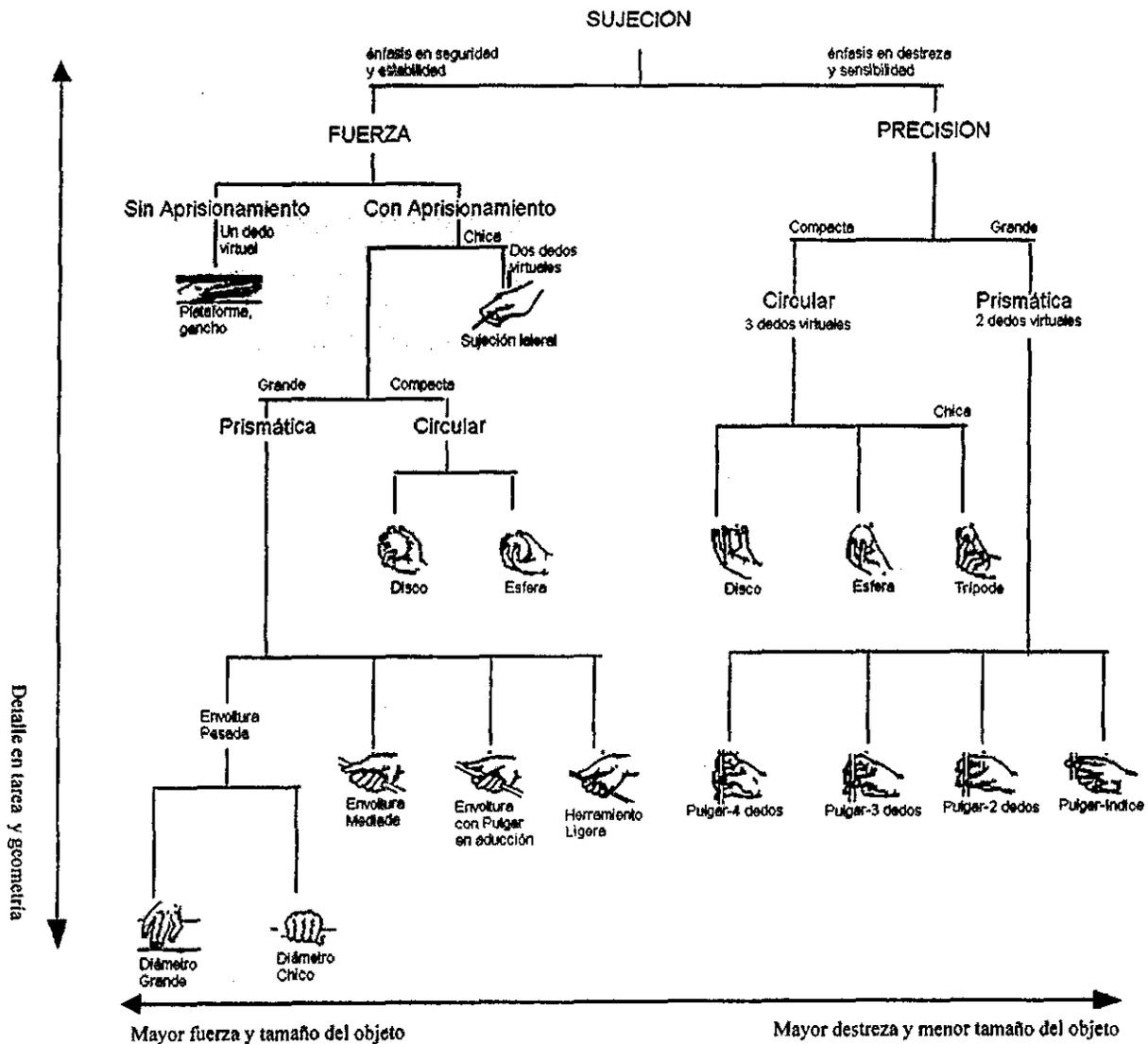


Figura 5.1. Sujeciones hechas por la mano mecánica

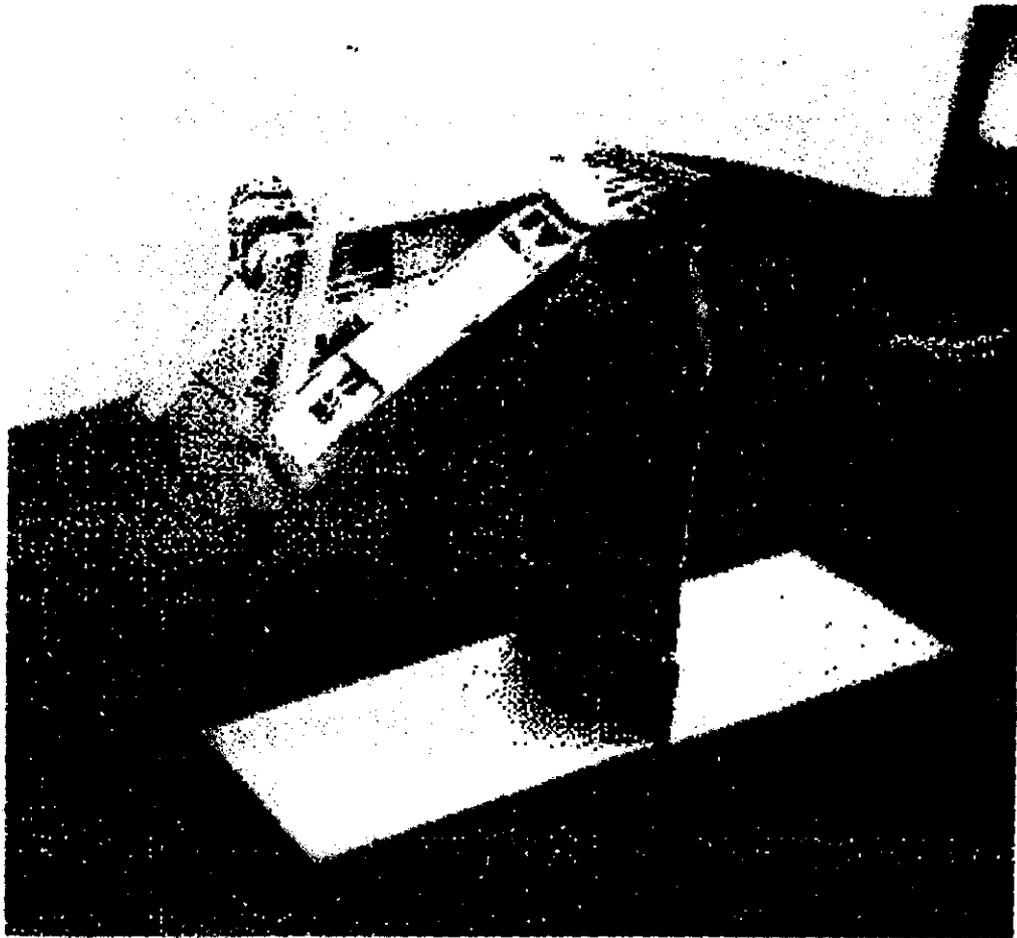


Figura 5.2 Sujeción Lateral. Mano mecánica sujetando un bolígrafo

La mayor parte de las sujeciones de fuerza no son posibles con nuestra mano mecánica pues requieren que la palma se ajuste a la forma de la pieza, característica que nuestra mano mecánica no posee pues la palma y el dorso de la mano son rígidos y no poseen la movilidad que los huesos metacarpianos le dan a una mano natural. De ahí que las únicas sujeciones de fuerza posibles sean las de plataforma y la envoltura pesada de diámetro grande pues en ellas los huesos metacarpianos estarían totalmente extendidos como sería el caso de nuestra palma. La otra sujeción de fuerza que la mano es capaz de realizar es la lateral pues nuestro dedo pulgar sí es oponible al índice.

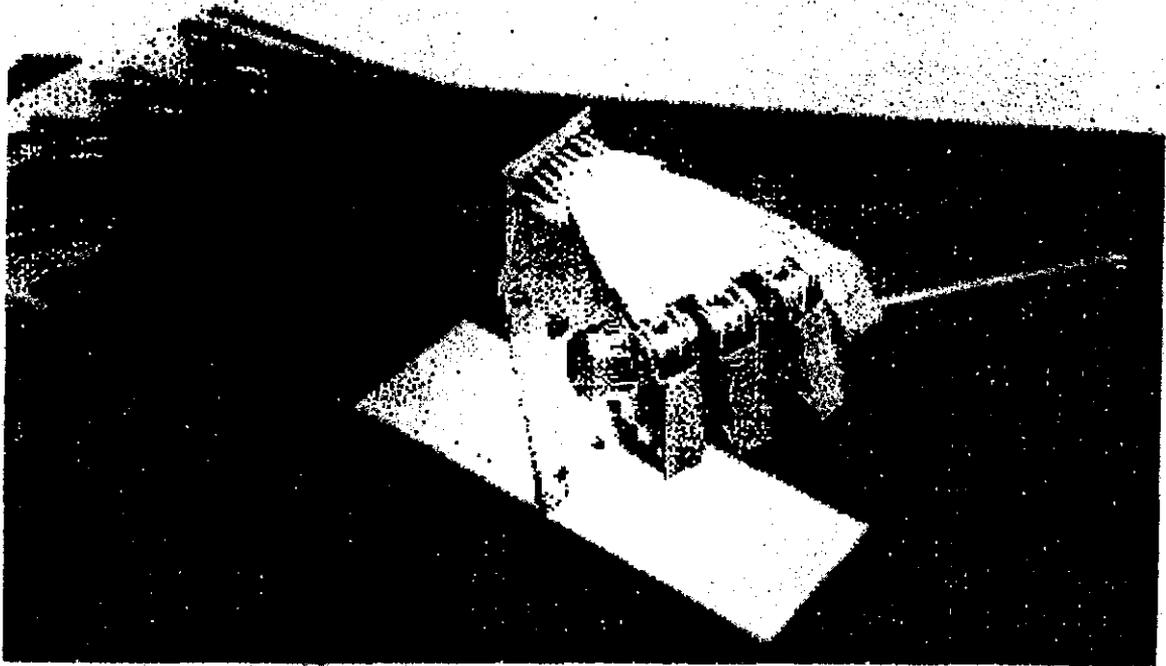


Figura 5.3. Sujeción envolvente. Mano mecánica sujetando un desarmador

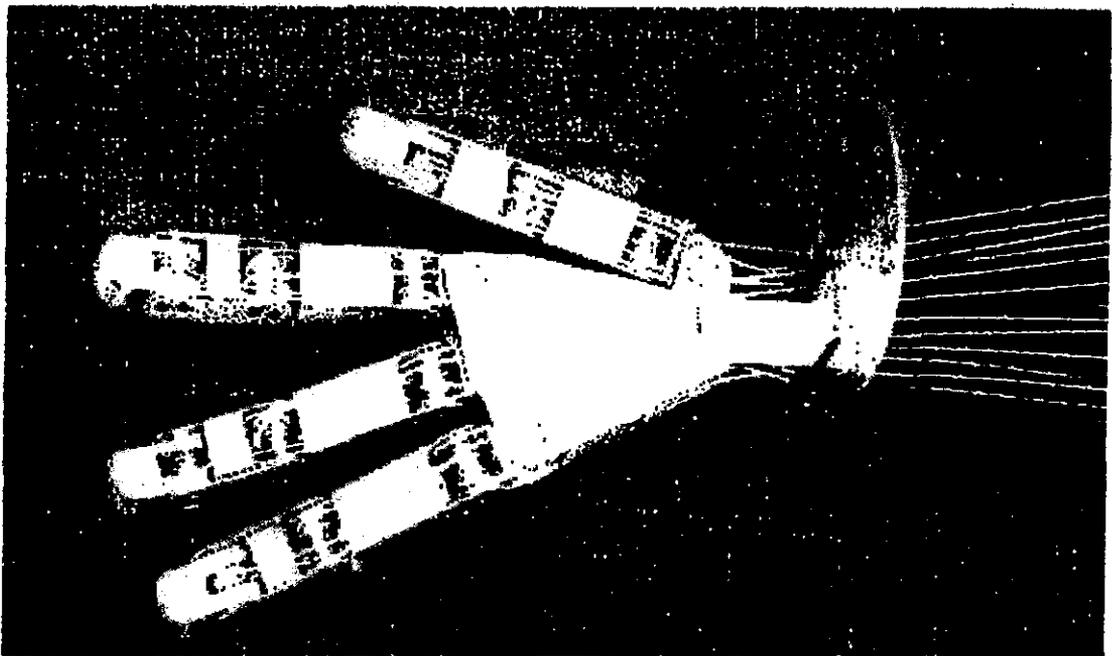


Figura 5.4. Mano mecánica extendida para hacer una sujeción de plataforma

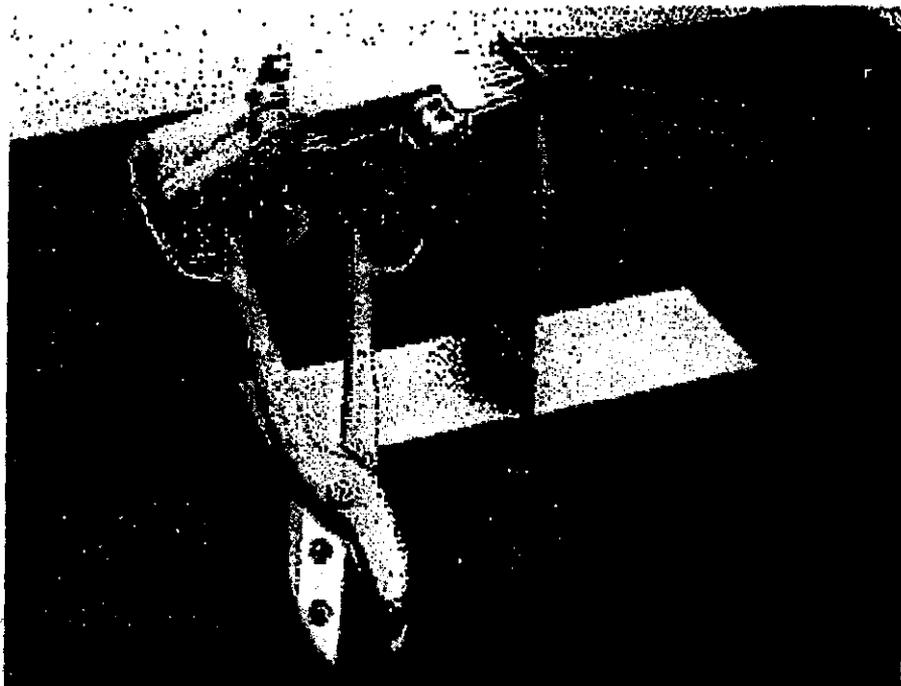


Figura 5.5. Mano mecánica sujetando unas tijeras.

En cuanto a las sujeciones de precisión, la mano puede realizar todas gracias a que el dedo pulgar es oponible a los demás dedos a pesar de que la abducción se tuvo que eliminar.

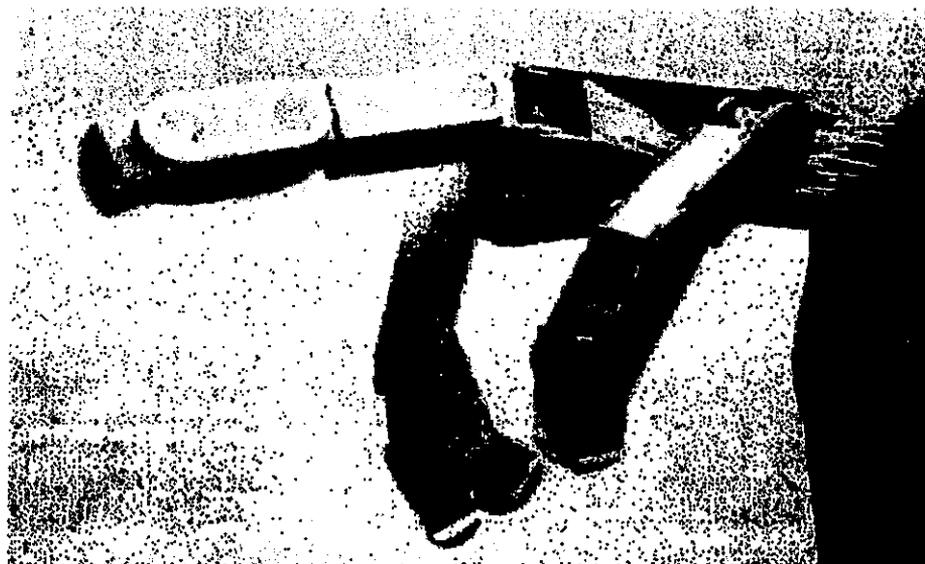


Figura 5.6. Mano mecánica demostrando la oponibilidad del dedo pulgar para sujeciones de precisión

5.1.2. Fuerza máxima

La fuerza máxima que podría soportar la mano se buscó que fuera la que podrían soportar los tendones. Como verificación de este punto y de manera muy sencilla se revisó la fuerza máxima que podrían soportar las piezas de aluminio y los tendones tomando en cuenta la resistencia a la tensión de ambos materiales y al cortante para el aluminio.

Material	Esfuerzo de Cedencia σ_y (MPa)
Aleaciones de Aluminio (Usadas en Perfilería)	414 (42.2 kgf/mm ²) a Tensión 172 (17.5 kgf/mm ²) al Cortante
Nylon	711 (72.5 kgf/mm ²) a Tensión

El hilo de nylon tiene un diámetro en su parte más delicada de 0.53 mm. Esta parte se encuentra en los ejes de los motores donde para poder acoplar los tendones con los motores sólo se utilizó la tercera parte del hilo de 1.6 mm. de diámetro. Por su parte el aluminio presenta su zona con menor área en los agujeros que alojan los ejes de las articulaciones de las juntas tanto al cortante como a la tensión así como se indica en la figura 5.7.

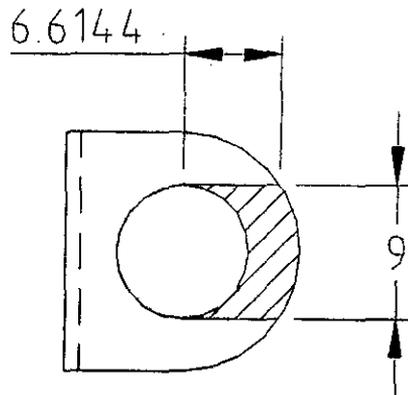


Figura 5.7. Areas críticas en las juntas

El área crítica en el caso de la resistencia a la tensión del aluminio es 2 veces 9×1 mm. es decir 18 mm^2 . Para el cortante es 4 veces 6.6144×1 mm. es decir 24.58 mm^2 . Para el caso del hilo de nylon con diámetro de 0.53 mm . el área es de 0.2206 mm^2 . La fuerza máxima que pueden soportar cada una de las partes críticas está dada por:

$$F = \sigma A$$

Sustituyendo los valores de σ y A para cada uno tenemos los siguientes resultados:

Zona Crítica	σ_y (kgf/mm ²)	Area (mm ²)	Fuerza (kgf)
Junta de Aluminio (Tensión)	42.2	18.00	759
Junta de Aluminio (Cortante)	17.5	24.58	430
Tendón de Nylon (Tensión)	72.5	0.221	16

Como se puede comprobar en la tabla anterior, la fuerza máxima del sistema, efectivamente la determina la fuerza máxima de los tendones.

La fuerza máxima que puede cargar un dedo es aquella que se le aplique en la punta de la falangeta cuando todo el dedo se encuentra en plena extensión. En específico, la fuerza máxima que se puede aplicar en el extremo del dedo medio en plena extensión, es la mínima fuerza que haría fallar al sistema ya que es el dedo que puede cargar menos pues presenta un mayor brazo de palanca al ser el dedo más largo. Así, para determinar la fuerza máxima que puede cargar un dedo, en particular el dedo medio, se debe calcular el momento equilibrante debido a una fuerza aplicada en el extremo de dicho dedo para que el tendón que hace actuar a la articulación metacarpofalangeana se rompa. Esta fuerza se calcula de la siguiente manera:

$$F_1 d_1 = F_2 d_2$$

$$F_2 = \frac{F_1 d_1}{d_2}$$

$$F_2 = \frac{16 \times 0.45}{9.8} = 0.735 \text{kgf}$$

donde:

F_1 = Fuerza máxima que soporta el tendón

d_1 = Radio del eje de la articulación metacarpofalangeana

F_2 = Fuerza máxima en el extremo del dedo en plena extensión

d_2 = Longitud del dedo en plena extensión

Esta fuerza de 735 g es la carga máxima que se puede aplicar en el extremo del dedo medio tratando de que el dedo se mantenga completamente extendido.

Para comprobar que lo primero en fallar de la mano serían los tendones, se forzaron los motores evitando que las articulaciones se flexionaran hasta que los tendones se rompieron.

5.1.3. Otras Propiedades Mecánicas

Con la finalidad de ayudar a la definición de los parámetros de control de los motores, se definieron los momentos de inercia máximos que tienen los dedos. Los momentos de inercia máximos son cuando el dedo está completamente extendido pues es cuando el centro de masa se encuentra más alejado de los radios de giro. Para poderlos determinar, se echó mano del paquete de dibujo AutoCAD en su versión 13, que gracias a su modelador de sólidos nos puede facilitar esta información.

Los resultados de los momentos de inercia fueron los siguientes:

Pieza	Vol. (mm ³)	MASA (g)	Momento de Inercia (kg*m ²)	
			I _{yy} '	I _{zz} '
Anular Abducción (F 1,2,3)	18407	49.7	3.33E-04	3.32E-04
Anular Extensión (F 1,2)	8448	22.8	2.87E-05	2.82E-05
Anular Extensión (F 1,2,3)	15311	41.3	2.13E-04	2.12E-04
Indice Abducción (F 1,2,3)	17484	47.2	2.79E-04	2.78E-04
Indice Extensión (F 1,2)	7954	21.5	2.32E-05	2.28E-05
Indice Extensión (F 1,2,3)	14388	38.8	1.73E-04	1.72E-04
Medio Abducción (F 1,2,3)	18835	50.9	3.61E-04	3.60E-04
Medio Extensión (F 1,2)	8733	23.6	3.25E-05	3.21E-05
Medio Extensión (F 1,2,3)	15739	42.5	2.34E-04	2.33E-04
Pulgar Abducción (F 1,2,3)	19062	51.5	3.67E-04	3.67E-04
Pulgar Extensión (F 1)	5205	14.1	3.91E-06	3.74E-06
Pulgar Extensión (F 1,2)	9973	26.9	5.03E-05	4.98E-05
Pulgar Extensión (F 1,2,3)	15966	43.1	2.38E-04	2.37E-04

Los momentos de inercia importantes para las articulaciones abductoras son las I_{yy} y para las articulaciones flexoras/extensoras las definidas como I_{xx} pues son los ejes paralelos a los ejes de estas articulaciones.

El peso total de la mano es aproximadamente unos 600 g. cumpliendo el requerimiento de que la mano mecánica fuera ligera.

5.2. Resultados

La mano mecánica una vez acoplada y comprobados sus movimientos dio muy buenos resultados a pesar que los movimientos abductores se tuvieron que omitir. Los tipos de sujeción que puede realizar son muy variados pudiendo imitar gran parte de las

sujeciones hechas por los hombres. La mano mecánica se puede desempeñar más eficazmente realizando sujeciones de precisión que de fuerza.

El arreglo de tendones para lograr el movimiento relativo entre falangeta y falangina efectivamente hace que las falangetas se muevan al mismo tiempo y en la misma proporción que las falanginas.

Las partes donde no se obtuvieron buenos resultados fue en el arreglo de tendones de las articulaciones abductoras metacarpofalangeanas ya que como se mencionó anteriormente, el accionar los movimientos flexores provoca una abducción no deseada. Posiblemente de haberse comprobado con los sistemas de control funcionando, la retroalimentación de la posición regresaría los dedos a su lugar.

CAPITULO 6
CONCLUSIONES

CAPITULO 6

Conclusiones

De manera general se puede decir que el manipulador antropomórfico cumplió con sus objetivos ya que es efectivamente una mano muy semejante a la mano humana y que realiza gran variedad de las sujeciones hechas por nosotros.

Las conclusiones alcanzadas por el desarrollo del manipulador antropomórfico desarrollado pueden ser divididas en ventajas, desventajas y expectativas a futuro.

6.1 Ventajas del Manipulador Antropomórfico

- La posición y orientación del dedo pulgar en la mano, permite que la oponibilidad del pulgar con respecto a los demás dedos sea más semejante en movimientos a la mano humana que en otras manos mecánicas desarrolladas.
- La relación de movimiento entre falangetas y falanginas gracias al arreglo de tendones es muy efectiva y semejante a la realidad ayudando a reducir los grados de libertad independientes y la cantidad de motores.
- La ausencia del dedo meñique no limita a la mano en la cantidad de sujeciones realizables.

- El hecho de que la forma, los movimientos y las sujeciones de la mano mecánica sean tan semejantes a la mano humana permite perfectamente que pueda ser controlada a distancia por un guante vestido por el usuario, imitando los movimientos de la mano humana.
- El poder controlar la mano a distancia imitando los movimientos de la mano del usuario, la hace ideal para manipular objetos en lugares peligrosos y desconocidos que obstaculicen el uso de un manipulador programable.

6.2. Desventajas del Manipulador Antropomórfico

- El arreglo de tendones para lograr la flexión y extensión de las falanges y falanginas imposibilitó los movimientos abductores de las articulaciones metacarpofalangeanas.
- El peso total de los motores resulta ser muy elevado (7.8 kg.) lo cual hace muy difícil colocarlos en un brazo de robot, por lo que para poder acoplar el manipulador antropomórfico a un brazo mecánico requeriríamos unos tendones muy largos para dejar el banco de motores afuera del brazo.
- La cantidad de piezas diferentes que tiene la mano mecánica hace que el tiempo de fabricación se eleve considerablemente. Las otras manos mecánicas existentes tienen todos los dedos iguales por los programas de fabricación pueden manufacturar la pieza completa a diferencia de la nuestra que sólo fabrican las partes semejantes de las piezas.

6.3. Expectativas a futuro del Manipulador Antropomórfico

La principal expectativa a futuro del manipulador antropomórfico es que se puedan desarrollar nuevas versiones ayudando al Departamento de Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería a tomar importancia por el desarrollo de sistemas y proyectos de punta en el país.

Esta mano es el primer prototipo y saca a la luz todos los problemas que presenta un proyecto como este. Las principales mejoras se centran en un mejor arreglo de tendones y en el uso de motores de menor peso. Otro punto por desarrollar es la posible colocación de los sensores de posición dentro de las articulaciones, lo cual implica el desarrollo de un sensor resistente a condiciones extremas que no alteren las lecturas y que no se usen demasiadas piezas en los dedos que dificulten el ensamble de la mano.

Por último, los futuros modelos de manos mecánicas que se puedan desarrollar deberán tener sensores de tacto que retroalimenten al usuario la fuerza con la que están siendo sujetados los objetos con la mano mecánica. El estado actual de la mano mecánica desarrollada sólo permite sostener los objetos y afianzarlos por un exceso de fuerza debido a un movimiento adicional en la posición.

6.4. Conclusiones Personales

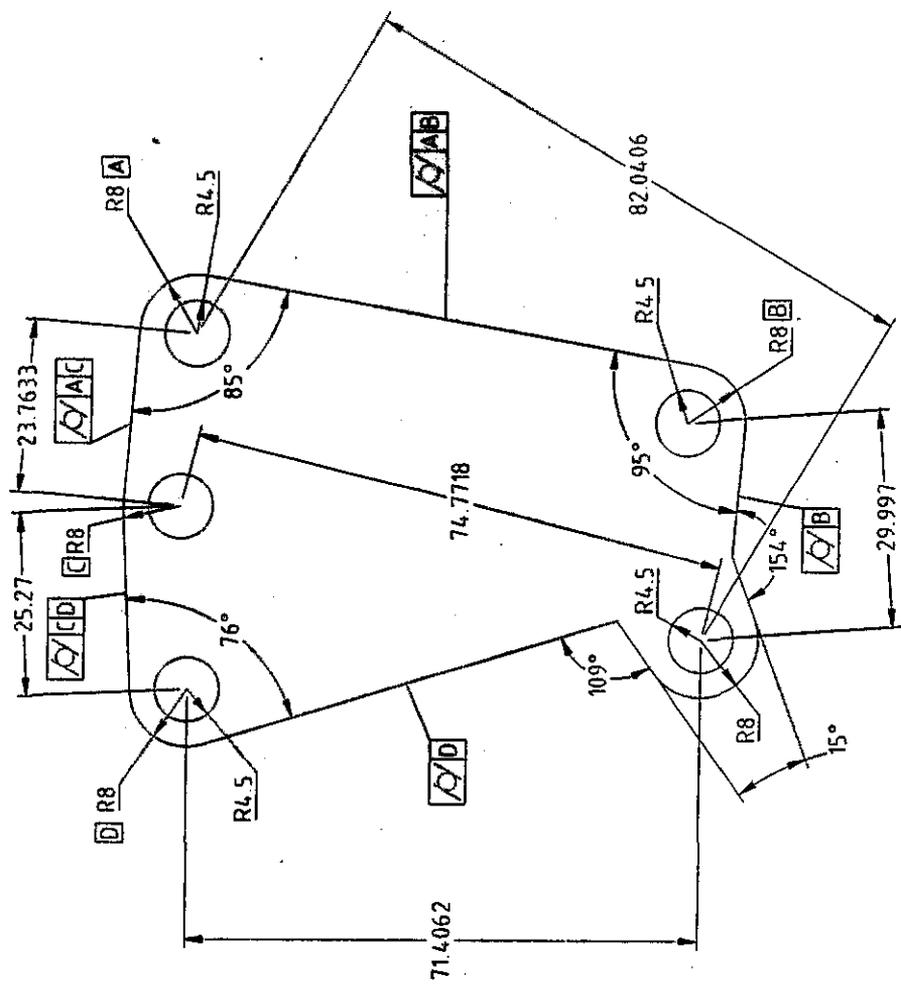
Sería ideal que una vez que se tuviera una mano mecánica que incorpore todas las mejoras posibles en tendones, motores y sensores, se comenzara a desarrollar la muñeca y el brazo, pues cuando los seres humanos manipulamos objetos con nuestras manos, no nos limitamos a usar nuestros dedos, sino que también involucramos los movimientos de la muñeca y del brazo, por lo que, desde mi muy particular punto de vista, una manipulación a distancia con un telemando basándose en guantes y exoesqueletos vestidos por un usuario no se verá completamente desarrollada y factible de utilizar prácticamente hasta que se incluyan los movimientos de estas partes de nuestros cuerpos. Por ejemplo, aunque nuestra mano sea capaz de sujetar una llave en una sujeción lateral o un desarmador en una sujeción envolvente, nuestra mano no es capaz de ejecutar tareas hechas normalmente con estos objetos ya que para ambos es necesaria la rotación que nos da la muñeca. Otro ejemplo es que si nuestra mano puede sujetar un bolígrafo y los dedos puedan hacer los movimientos de escritura, la mano no podría realizar una escritura real pues en la escritura se involucran los movimientos de la mano y del brazo.

El tener un manipulador antropomórfico sólo hace sentido si va a ser controlado en tiempo real por el usuario con alguna especie de telemando ya que realizar sujeciones que para nosotros son triviales, realmente involucran un procesamiento de información extraordinario, pues para seleccionar una sujeción nuestros cerebros analizan de manera instantánea la forma, dimensiones y posible peso del objeto, la tarea a desarrollar con

ellos y las limitaciones que nuestras manos tienen en cuanto fuerza y seguridad. Esto se aclara si vemos con detalle la manera en la que tomamos un lápiz de la mesa y la manera en que tomamos el mismo lápiz cuando vamos a escribir.

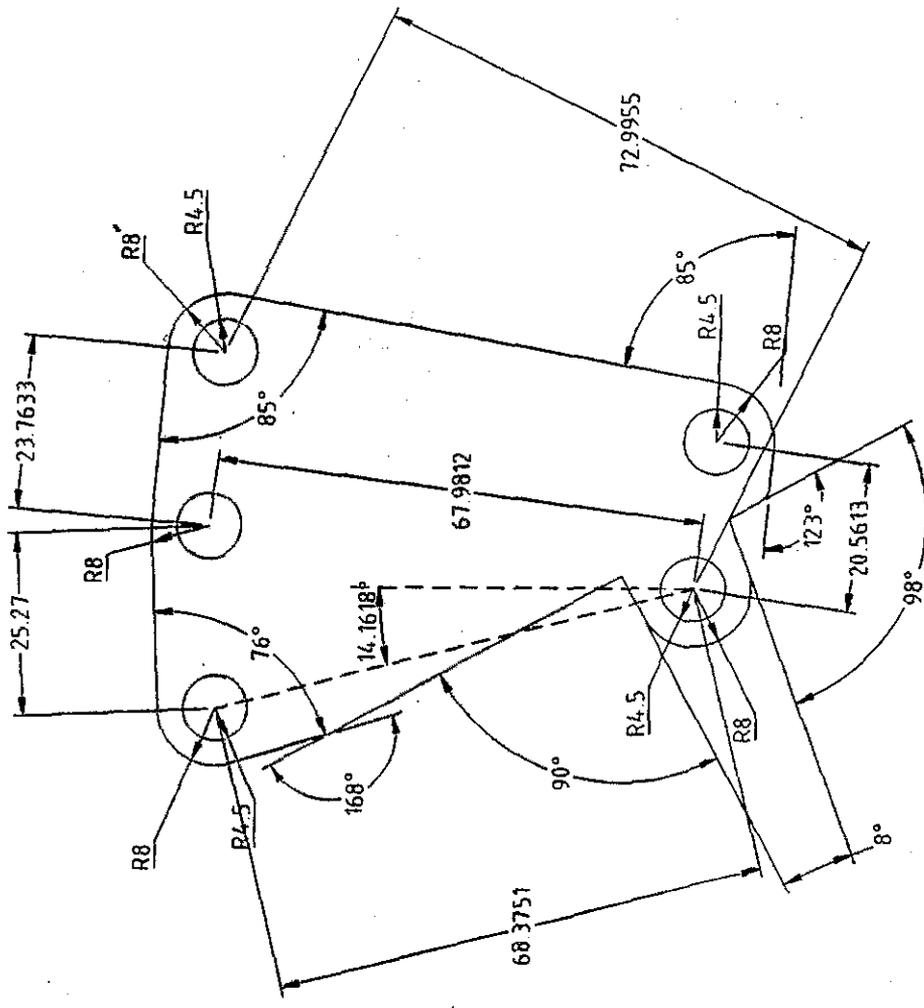
La conclusión más importante es que para poder desarrollar una mano mecánica que se aproxime lo más posible a la mano humana se requieren años de investigación y desarrollo, y aún así no se tendría algo superior a la mano humana, ya que ésta es resultado de millones de años de evolución y no sólo se desarrolló como un órgano de manipulación, sino como un órgano sensitivo y de comunicación. Hay que recordar que la mano humana, sin contar la muñeca, tiene más de 25 grados de libertad lo que la hace por sí sola una maravilla de la naturaleza, siendo la herramienta con la cual hemos logrado desarrollar todos los adelantos tecnológicos que nos dan el nivel de vida que tenemos después de un millón de años de andar rondando por la faz de la Tierra.

ANEXO A
PLANOS DE CONSTRUCCION



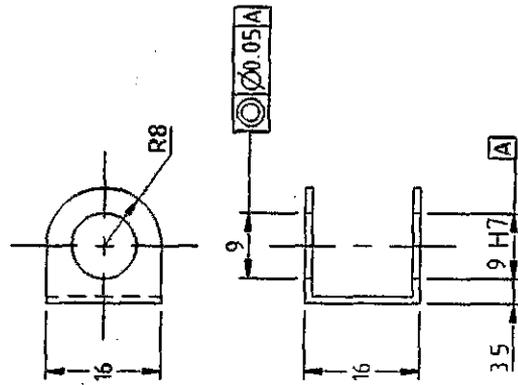
Nota: Todos los agujeros tienen un ajuste H7
 La tolerancia de todas las demás medidas es +/- 0.1

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MANIPULADOR ANTROPOMORFICO		COLOMA MARGOLIES LUIS VICENTE	
NOMBRE DE LA PIEZA Dorso		CANTIDAD 1	ESCALA 1:1
MATERIAL Placa de Aluminio de 1/16"		ACOF. mm	



DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MANIPULADOR ANTROPOMORFICO COLOMA MARGOLIES LUIS VICENTE			
NOMBRE DE LA PIEZA: Palma		CANTIDAD 1	ESCALA 1:1
MATERIAL: Placa de aluminio de 1/16"		ACOT mm	

Nota: Todos los agujeros tienen un ajuste H7
 Todas las demás medidas tienen una tolerancia de +/-0.1



Nota. Todas las medidas, excepto donde se indica tienen una tolerancia de ± 0.1

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
MANIPULADOR ANTROPOMORFICO
COLOMA MARGOLIES LUIS VICENTE

NOMBRE DE LA PEZA

Junta

MATERIAL

Aluminio

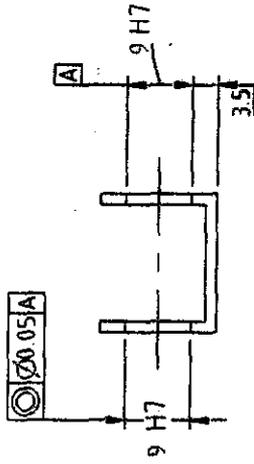
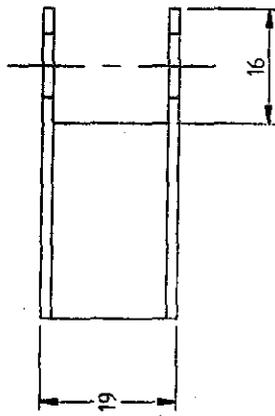
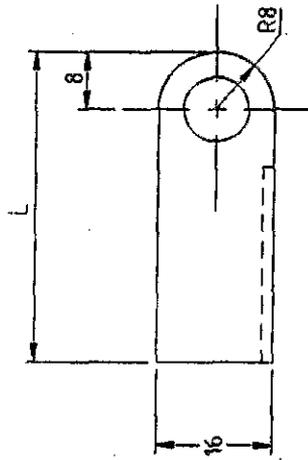
CANTIDAD

8

ESCALA

1:1





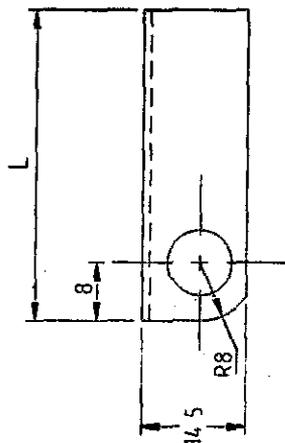
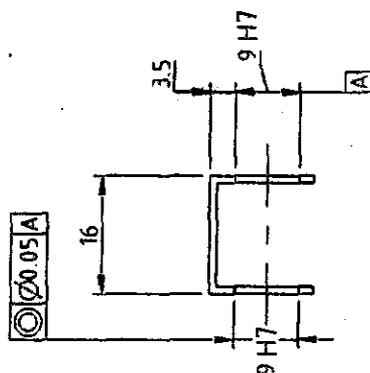
Dedo	L (mm)
Anular	46.94
Medio	47.50
Indice	43.26
Pulgar	40.00

Nota: Todas las medidas, excepto donde se indica tienen una tolerancia de +/- 0.1

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
MANIPULADOR ANTROPOMORFICO
COLOMA MARGOLIES LUIS VICENTE

NOMBRE DE LA PEZA		CANTIDAD
Falange, Perfil Exterior		1 c/u
MATERIAL		ESCALA
Perfil Exterior,	Aluminio	mm
		1:1





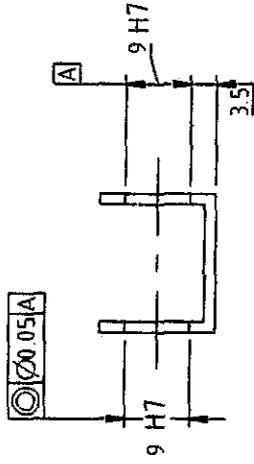
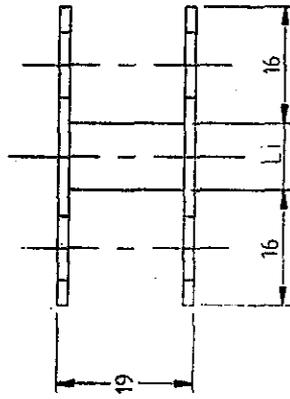
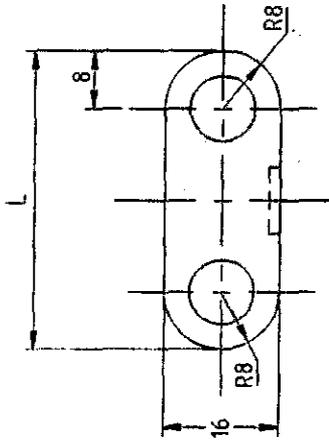
Dedo	L (mm)
Anular	46.94
Medio	47.50
Indice	43.26
Pulgar	40.00

Nota: Todas las medidas, excepto donde se indica tienen una tolerancia de ± 0.1

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
MANIPULADOR ANTROPOMORFICO
COLOMA MARGOLIES LUIS VICENTE

NOMBRE DE LA PIEZA		CANTIDAD	ESCALA	1:1
Falange, Perfil Interior		1 c/u		
MATERIAL		ACOT	mm	
Perfil Interior	Aluminio			



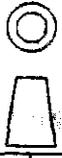


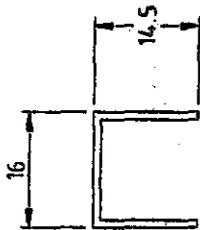
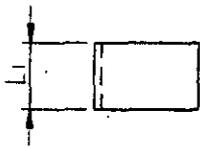
Dedo	L (mm)	Li (mm)
Anular	43.44	11.44
Medio	45.55	13.55
Indice	41.33	9.33
Pulgar	49.00	17.00

Nota: Todas las medidas, excepto donde se indica tienen una tolerancia de ± 0.1

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
MANIPULADOR ANTROPOMORFICO
COLOMA MARGOLIES LUIS VICENTE

NOMBRE DE LA PIEZA		CANTIDAD
Falangina, Perfil Exterior		1 c/u
MATERIAL		ESCALA
Perfil Exterior.	Aluminio	mm 1:1





Dedo	Li (mm)
Anular	11.44
Medio	13.55
Indice	9.33
Pulgar	17.00

Nota: Todas las medidas, excepto donde se indica tienen una tolerancia de ± 0.1

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
MANIPULADOR ANTROPOMORFICO
COLOMA MARGOLIES LUIS VICENTE

NOMBRE DE LA PEZA:

Fatagina, Perfil Interior

MATERIAL:

Perfil Interior Aluminio

CANTIDAD

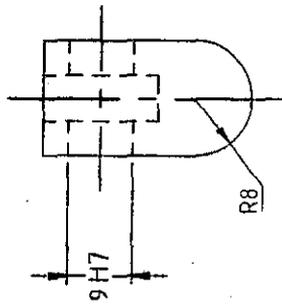
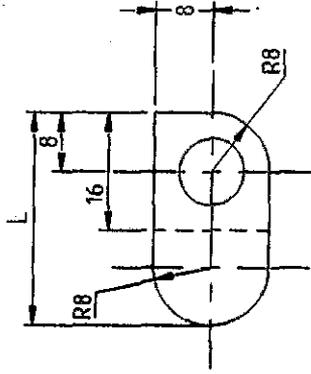
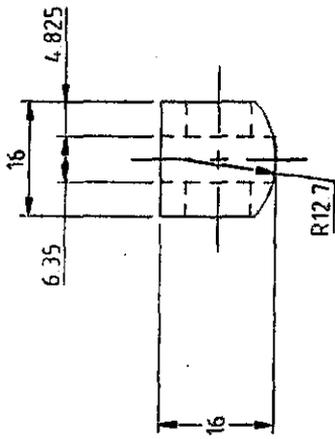
1 c/u

ESCALA

1:1

ACOT mm





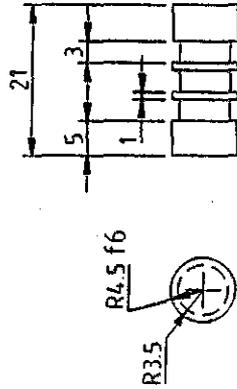
Dedo	L (mm)
Anular	30.15
Medio	30.15
Indice	29.11
Pulgar	34.00

Nota: Todas las medidas, excepto donde se indica tienen una tolerancia de ± 0.1

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
MANIPULADOR ANTROPOMORFICO
COLOMA MARGOLIES LUIS VICENTE

NOMBRE DE LA PIEZA	CANTIDAD	ESCALA	PROY.
Falangefa	1 C/U	1:1	
MATERIAL	mm		
Barra de Aluminio de 1 in			





Nota: Todas las medidas, excepto donde se indica tienen una tolerancia de ± 0.1

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
MANIPULADOR ANTROPOMORFICO

COLOMA MARGOLIES LUIS VICENTE

NUMERO DE LA PIEZA

Eje Abductor Pulgar

MATERIAL

Barra de Aluminio de 3/8 "

CANTIDAD

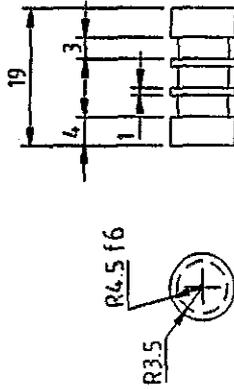
1

ESCALA

1:1

mm

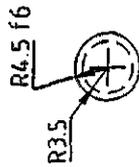
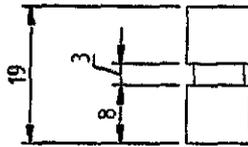




Nota. Todas las medidas, excepto donde se indica tienen una tolerancia de +/- 0.1

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
MANIPULADOR ANTROPOMORFICO
COLOMA MARGOLIES LUIS VICENTE

NOMBRE DE LA PEZA:		CANTIDAD	
Eje de articulación		11	
MATERIAL:		TOT	ESCALA
Barra de Aluminio de 3/8 "		mm	1.1

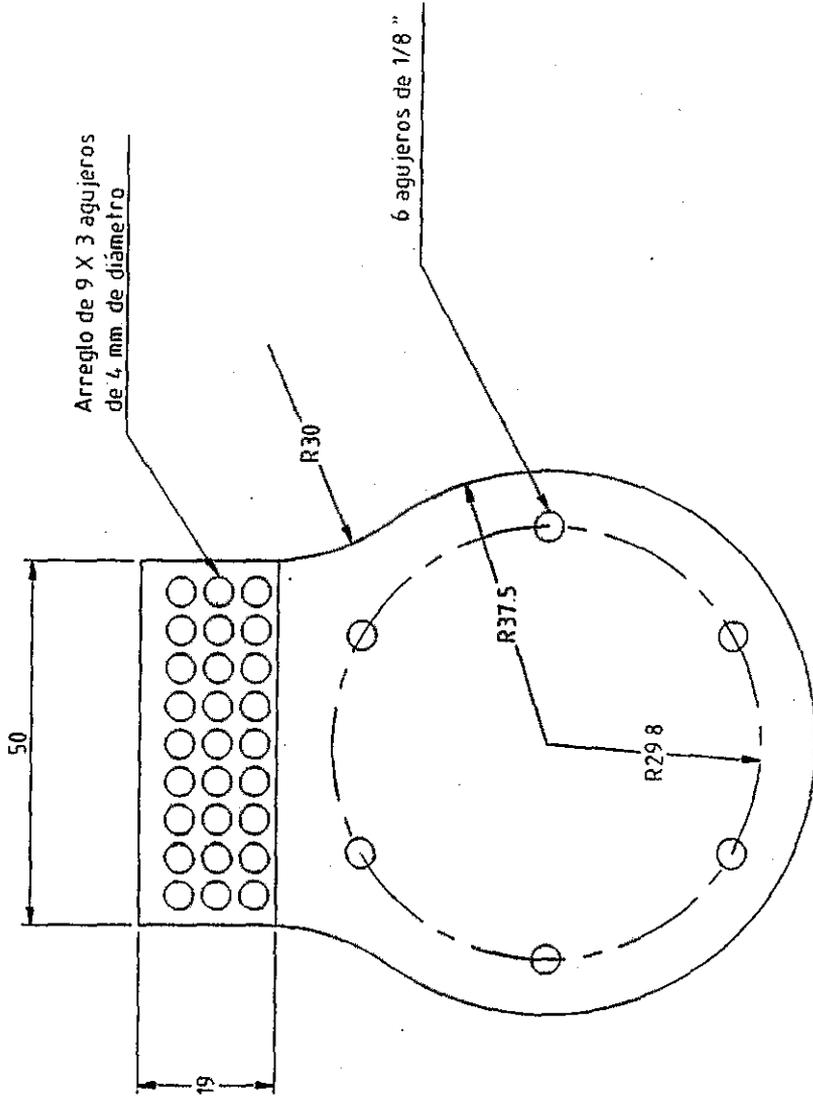


Nota: Todas las medidas, excepto donde se indica tienen una tolerancia de ± 0.1

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
 MANIPULADOR ANTROPOMORFICO
 COLOMA MARGOLIES LUIS VICENTE

NOMBRE DE LA PIEZA		CANTIDAD	ESCALA	1:1
Eje Articulaciones Distales		4		
MATERIAL		ALUM. Barra de Aluminio de 3/8 " mm		





DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
 MANIPULADOR ANTROPOMORFICO
 COLOMA MARGOLIES LUIS VICENTE

NOMBRE DE LA PIEZA		CANTIDAD	
Soporte - Guía de Tendones		1	
MATERIAL		ESCALA	
Placa de Aluminio de 1/16"		mm 1:1	

Nota. Todas las medidas tienen una tolerancia de +/- 0.1

ANEXO B
PROGRAMAS DE CONTROL NUMERICO

ANEXO B

Programas de control numérico

En este anexo se presentan los programas de control numérico de algunas piezas de la mano mecánica, específicamente el de la palma de la mano y el del dorso de la mano, piezas que por su complejidad en tamaño y orientación de sus líneas, se decidió realizar sus programas de fabricación con la ayuda del programa Pro-CAD/CAM, el cual genera el código a partir de un dibujo en planta de las piezas. Los dibujos con los cuales se alimentó el programa son los mismos que los presentados en el Anexo A que se desarrollaron con la ayuda de Autocad versión 13.

B.1. Palma de la mano.

(* VMC_100 Julio 1997 *)

(* Controlador EMCO-Tronic *)

(* 09/04/96 1110 Palma7 Parte Inferior *)

N0000 G53 G54 G17 G71 G94 M09

N0010 T0101 M08 (**)

N0020 M03 S1000 F80

N0030 G00 X-29.701 Y-2.86 Z5.0

N0040 G01 Z0.0 F200

N0060 G03 X-33.201 Y0.64 I-3.5 J0.0

N0070 X-36.701 Y-2.86 I0.0 J-3.5
N0080 X-33.201 Y-6.36 I3.5 J0.0
N0090 X-29.701 Y-2.86 I0.0 J3.5
N0100 G00 Z5.0
N0120 X40.634 Y8.983
N0130 G01 Z0.0 F200
N0150 G03 X37.134 Y12.483 I-3.5 J0.0
N0160 X33.634 Y8.983 I0.0 J-3.5
N0170 X37.134 Y5.483 I3.5 J0.0
N0180 X40.634 Y8.983 I0.0 J3.5
N0190 G00 Z5.0
N0210 X-27.765 Y20.825
N0220 G01 Z0.0 F200
N0240 G03 X-31.265 Y24.325 I-3.5 J0.0
N0250 X-34.765 Y20.825 I0.0 J-3.5
N0260 X-31.265 Y17.325 I3.5 J0.0
N0270 X-27.765 Y20.825 I0.0 J3.5
N0280 G00 Z5.0
N0300 X-28.552 Y-28.103
N0310 G01 Z0.0 F200
N0330 G03 X-32.052 Y-24.603 I-3.5 J0.0
N0340 X-35.552 Y-28.103 I0.0 J-3.5
N0350 X-32.052 Y-31.603 I3.5 J0.0

N0360 X-28.552 Y-28.103 I0.0 J3.5
N0370 G00 Z5.0
N0390 X37.745 Y-11.375
N0400 G01 Z0.0 F200
N0420 G03 X34.245 Y-7.875 I-3.5 J0.0
N0430 X30.745 Y-11.375 I0.0 J-3.5
N0440 X34.245 Y-14.875 I3.5 J0.0
N0450 X37.745 Y-11.375 I0.0 J3.5
N0460 G00 Z5.0
N0480 X29.162 Y-18.801
N0490 G01 Z0.0 F200
N0510 G03 X34.245 Y-20.375 I5.084 J7.427
N0520 X43.245 Y-11.375 I0.0 J9.0
N0530 X42.526 Y-7.848 I-9.0 J0.0
N0540 G01 X40.316 Y-1.985
N0550 X43.584 Y-0.205
N0560 G03 X45.655 Y2.969 I-1.914 J3.512
N0570 G01 X46.102 Y8.221
N0580 G03 X46.134 Y8.983 I-8.968 J0.762
N0590 X38.669 Y17.851 I-9.0 J0.0
N0600 G01 X-29.729 Y29.693
N0610 G03 X-31.265 Y29.825 I-1.535 J-8.868
N0620 X-40.235 Y21.558 I0.0 J-9.0

N0630 G01 X-42.171 Y-2.126
N0640 G03 X-42.201 Y-2.86 I8.97 J-0.733
N0650 X-42.191 Y-3.269 I9.0 J0.0
N0660 G01 X-41.043 Y-28.513
N0670 G03 X-32.052 Y-37.103 I8.991 J0.409
N0680 X-29.421 Y-36.71 I0.0 J9.0
N0690 G01 X29.162 Y-18.801
N0700 G00 Z5.0
N0720 M09
N0730 G00 Z10.0 M05
N0740 M30
N0750 (** TIEMPO TOTAL : 3.48)

B.2. Dorso de la mano.

(* VMC_100 Julio 1997 *)
(* Controlador EMCO-Tronic *)
(* 07/04/96 1111-palma5 Parte Superior *)
N0000 G53 G54 G17 G71 G94 M09
N0010 T0101 M08 (* Cortador 2 mm. *)
N0020 M03 S1000 F80
N0030 G00 X-34.838 Y-21.151 Z5.0
N0040 G01 Z0.0 F80

N0050 G02 X-31.338 Y-24.651 I0.0 J-3.5
N0060 X-34.838 Y-28.151 I-3.5 J0.0
N0070 X-38.338 Y-24.651 I0.0 J3.5
N0080 X-34.838 Y-21.151 I3.5 J0.0
N0090 G00 Z5.0
N0100 X34.348 Y15.935
N0110 G01 Z0.0 F80
N0120 G02 X37.848 Y12.435 I0.0 J-3.5
N0130 X34.348 Y8.935 I-3.5 J0.0
N0140 X30.848 Y12.435 I0.0 J3.5
N0150 X34.348 Y15.935 I3.5 J0.0
N0160 G00 Z5.0
N0170 X-35.986 Y4.093
N0180 G01 Z0.0 F80
N0190 G02 X-32.486 Y0.593 I0.0 J-3.5
N0200 X-35.986 Y-2.907 I-3.5 J0.0
N0210 X-39.486 Y0.593 I0.0 J3.5
N0220 X-35.986 Y4.093 I3.5 J0.0
N0230 G00 Z5.0
N0240 X36.569 Y-13.979
N0250 G01 Z0.0 F80
N0260 G02 X40.069 Y-17.479 I0.0 J-3.5
N0270 X36.569 Y-20.979 I-3.5 J0.0

N0280 X33.069 Y-17.479 I0.0 J3.5
N0290 X36.569 Y-13.979 I3.5 J0.0
N0300 G00 Z5.0
N0310 X-34.05 Y27.778
N0320 G01 Z0.0 F80
N0330 G02 X-30.55 Y24.278 I0.0 J-3.5
N0340 X-34.05 Y20.778 I-3.5 J0.0
N0350 X-37.55 Y24.278 I0.0 J3.5
N0360 X-34.05 Y27.778 I3.5 J0.0
N0370 G00 Z5.0
N0380 X-44.977 Y0.184
N0390 G01 Z0.0 F80
N0400 X-43.828 Y-25.06
N0410 G03 X-34.838 Y-33.651 I8.991 J0.409
N0420 X-32.206 Y-33.257 I0.0 J9.0
N0430 G01 X24.395 Y-15.954
N0440 X29.046 Y-22.42
N0450 G03 X36.569 Y-26.479 I7.522 J4.941
N0460 X45.569 Y-17.479 I0.0 J9.0
N0470 X44.849 Y-13.953 I-9.0 J0.0
N0480 G01 X41.821 Y-5.919
N0490 X43.316 Y11.674
N0500 G03 X43.348 Y12.435 I-8.968 J0.762

N0510 X35.884 Y21.304 I-9.0 J0.0

N0520 G01 X-32.515 Y33.146

N0530 G03 X-34.05 Y33.278 I-1.535 J-8.868

N0540 X-43.02 Y25.011 I0.0 J-9.0

N0550 G01 X-44.956 Y1.327

N0560 G00 Z5.0

N0570 M09

N0580 G00 Z10.0 M05

N0590 M30

N0600 (** TIEMPO TOTAL : 3.858)

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

1. Robot Hands and Mechanics of Manipulations, Mason and Salisbury, MIT Press, USA, 1985
2. Dextrous Robot Hands, S.T. Venkataraman and T. Iberal, Springer-Verlag, USA, 1990
3. Design of the Utah / MIT Dextrous Hand, Jacobsen, Knutti, Johnson, Biggers, Proceedings 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, USA, 1986
4. Mecánica Vectorial para Ingenieros, Beer and Johnston, McGraw - Hill, México
5. Mecánica de Materiales, Beer and Johnston, McGraw - Hill, México
6. La Ciencia e Ingeniería de Materiales, D.R. Askeland, Grupo Editorial Iberoamerica, México, 1987
7. The Mechanical Design Process, Ullman, McGraw - Hill
8. Procesos y Materiales de Manufactura para Ingenieros, Doyle, Prentice Hall, México
9. Introduction to Manufacturing Process, Schey, McGraw - Hill, USA,
10. Fundamentos de Dibujo en Ingeniería, Luzadder, Prentice Hall, México 1988
11. Manuales de Programación de EMCOTRONIC TM 02