

1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MANIPULADOR ANTROPOMORFICO  
TELEOPERADO II

299281

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO  
P R E S E N T A N :  
ENRIQUE FERNANDO AGUILAR ROMERO  
GERMAN LOPEZ BATIZ



DIRECTOR DE TESIS: M.I. VICTOR JAVIER GONZALEZ VILLELA

MEXICO, D.F.

2001



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.

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

# *Agradecimientos*

---

*Enrique Fernando Aguilar Romero*

***A mis padres***

Por todo el apoyo, la confianza y las oportunidades.  
Gracias.

***A mis hermanos***

*Toño, Paty, Paco y Marce*  
Porque hasta con las discusiones hemos crecido juntos.

***A mis otros hermanos***

*Anapaula, Viky, César, Charly y Ulises*  
Con quienes también comparto este trabajo.

***A mi familia***

A mi abuela María de los Ángeles, tíos y primos.  
A la Abuela y al resto de los Garzón,  
quienes saben que si los nombro a todos...  
necesitaría otras dos hojas.

***A mis amigos***

Cecilia, Edgar, Elisa, Fernando, Germán,  
Hugo, Iris, Jaime, Jorge A., José Luis, Karla,  
Magali, Oscar, Radamés, Ramón, Ulises,  
Víctor J.G.V. y Virginia Hdz. (y familia)  
Que de una u otra forma siempre han estado ahí.

***A Roxana***

Por el apoyo y la compañía en la culminación de esta meta  
... y por todas las que faltan.

*Y finalmente, aunque para nada el menos importante: a Dios*

Por el regalo y la bendición de conocer a tantas y tan  
importantes personas que conforman mi vida.

---

# *Agradecimientos*

---

Dedico este trabajo especialmente a mis padres, Germán y Tere que me dieron todo para poder llegar hasta aquí, a mis hermanos Mónica, Cecilia y Arturo con los que aprendí a compartir alegrías y tristezas, a mi abuelita Esther por todo su cariño y a mis abuelos Simón, Susana y Pepe que me gustaría siguieran aquí.

A mis amigos Víctor, Gabriel, Wunsch, Sergio, Gaby y todos con los que sé puedo contar.

A Víctor González Villela por su apoyo y amistad.

Germán

---

---

# ÍNDICE

## *Manipulador Antropomórfico Teleoperado II*

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>Capítulo 2. ANÁLISIS DEL SISTEMA</b>	<b>7</b>
2.1 La mano humana	7
2.2 Rediseño del manipulador	10
2.3 Actuadores	16
<b>Capítulo 3. MODELADO MATEMÁTICO</b>	<b>22</b>
3.1 Análisis cinemático	22
3.2 Análisis de mecanismos	31
3.3 Transmisión (tendones)	37
3.4 Reestablecimiento (resortes)	43
<b>Capítulo 4. SELECCIÓN DE MATERIALES</b>	<b>47</b>
4.1 Análisis de eficiencia estructural	47
4.2 Diagramas de selección	52
4.3 Método de propiedades ponderadas	54
4.4 Resultados.	59
<b>Capítulo 5. SISTEMAS DEL PROYECTO</b>	<b>62</b>
5.1 Sistema de medición	62
5.2 Sistema de visualización	65
5.3 Sistema de control y actuación	68
5.4 Sistema mecánico	69
5.5 Sistema de comunicación	72

---

---

<b>Capítulo 6. INTEGRACIÓN DEL PROYECTO</b>	<b>74</b>
6.1 Fabricación y ensamble del sistema mecánico	74
6.2 Incorporación de los diversos sistemas	76
6.3 Resultados	84
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>89</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>93</b>
a) Referencias bibliográficas	93
b) Sitios en Internet	95
c) Asesoría médica	95
<b>Apéndice A</b>	<b>96</b>
PROGRAMA DEL HC11	
<b>Apéndice B</b>	<b>102</b>
PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA MS-DOS (16 bits)	
<b>Apéndice C</b>	<b>118</b>
PROGRAMA DEL 8031	
<b>Apéndice D</b>	<b>121</b>
DIAGRAMAS Y PLANOS DEL MANIPULADOR	

---

# INTRODUCCIÓN

En numerosos campos de la investigación como la robótica, biomecánica, etcétera, es necesario conocer en tiempo real la posición y orientación de objetos móviles con relación a su situación original. Se sabe que un sólido puede ubicarse en el espacio con un sistema de ejes normalizados y que sus movimientos pueden definirse mediante traslaciones y rotaciones alrededor de los ejes principales, (por ejemplo X, Y, Z). Por otro lado, es posible reproducir estos movimientos a través de teleoperaciones o movimientos controlados a distancia.

Estas reproducciones exigen herramientas de entrada/salida que digitalicen las entradas u órdenes del usuario y le proporcionen ciertas respuestas a una computadora. Para este fin, en el Departamento de Mecatrónica de la División de Ingeniería Mecánica e Industrial de la Facultad de Ingeniería se ha logrado desarrollar un sistema de teleoperación que consta de un guante, como los usados para juegos interactivos y de realidad virtual, con sensores que detectan y traducen los movimientos más importantes de una mano humana en señales electrónicas que entran a un ordenador; de un programa de simulación gráfica por computadora que interpreta las señales enviadas a dicho ordenador y las convierte en movimientos gráficos; de una mano mecánica construida de aluminio y accionada por un conjunto de motores de corriente directa acoplados a tendones de nylon.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos a partir de la investigación, desarrollo y recopilación de los trabajos previos para el proyecto del Manipulador Antropomórfico Teleoperado (MAT), que consta de los sistemas descritos arriba brevemente.

La justificación de un proyecto como éste, está dada por el hecho de que muchas veces los brazos mecánicos industriales poseen en su parte terminal algún tipo de herramienta o dispositivo de sujeción, como pinzas o tenazas. Sin embargo, gran parte de éstos son muy simples y generalmente se fabrican de manera que puedan realizar una tarea muy específica y sencilla, lo cual trae como consecuencia que a veces manifiesten cierta "torpeza". Ésta se ve reflejada en algunas consecuencias tales como la falta de destreza en la manipulación, el número limitado de objetos que se pueden manipular, etc., y que provoca que las herramientas tengan que sustituirse por otra más adecuada, además de la imposibilidad para llevar a cabo movimientos muy finos con un control preciso de la fuerza aplicada.

La primera parte, de antecedentes, introduce el tema de la teleoperación describiendo algunas ventajas del uso de un manipulador antropomórfico sobre manipuladores de pinzas o tenazas, presentando los objetivos del proyecto y esquematizando los elementos que lo forman.

La segunda parte, de análisis del sistema, proporciona un estudio de la estructura de la mano humana a fin de determinar los elementos, tipos de movimientos, ángulos de rotación y estructuras que compondrán al manipulador. Así mismo, se realiza la selección y justificación de los actuadores a emplear, de su mecanismo de reducción incorporado y del sistema de control aplicado.



La tercer parte, de modelado matemático, presenta el análisis cinemático, el modelado de mecanismos y de elementos mecánicos que conforman al manipulador, tales como los tendones, a fin de determinar las propiedades necesarias y óptimas para la elaboración y buen desempeño del manipulador.

En la cuarta parte se presenta un análisis detallado sobre selección de materiales, a fin de determinar el material óptimo para la elaboración del manipulador, considerando algunos de los más usados materiales de ingeniería. Esta selección es realizada a través de tres métodos distintos en los que se trata de llegar al mismo resultado con base en ciertas necesidades y requerimientos.

En el quinto capítulo se mencionan y detallan, a groso modo, cada uno de los sistemas que componen al manipulador, de los cuales, dos fueron el resultado de trabajos de tesis desarrollados con anterioridad (sistema de medición de la posición y sistema de visualización), los dos siguientes surgen como resultado de la investigación desarrollado para este trabajo (sistema de control y actuación y sistema mecánico), y el último se refiere al protocolo y modo de comunicación entre cada uno de estos sistemas (sistema de comunicación), también generado en este trabajo.

En el sexto capítulo se reporta la fabricación y ensamble de los dos sistemas que componen este trabajo, como son el sistema de actuación y el sistema mecánico, y una vez concluido esto, se muestra la incorporación física de los cinco sistemas descritos en el capítulo anterior, haciendo además un estudio de su desempeño en conjunto y presentando los resultados correspondientes.

En la séptima y última parte de desarrollo, se presentan las conclusiones del desempeño del manipulador, así como posibles trabajos futuros que complementen a este que se presenta, como sería un brazo mecánico que pueda soportar y contener a la mano mecánica, a fin de conseguir una manipulación completa.

Se presentan las referencias bibliográficas y cuatro apéndices en los que se incluye el programa del microprocesador HC11, usado en el control y organización de entradas y salidas de datos entre los diferentes sistemas; el programa de simulación y visualización, desarrollado para MS-DOS; el programa para el microprocesador 8031, usado en el control de los actuadores empleados para el manipulador, y se presentan también los diagramas y planos de cada una de las piezas y elementos que constituyen el manipulador antropomórfico teleoperado.

# Capítulo 1

## **ANTECEDENTES Y OBJETIVOS**

El proyecto del manipulador antropomórfico teleoperado busca la construcción de una mano artificial de alta funcionalidad y de bajo costo, tanto en tecnologías accesibles como en tiempo de desarrollo, cuyo control esté basado en un sistema de medición directo, que permita operarla sin necesidad de un entrenamiento previo, y que cuente hasta con once grados de libertad proporcionando una ventaja sobre manipuladores de pinzas o tenazas con sólo tres grados de libertad; que cuente además con un sistema de simulación gráfica en computadora para reproducir los movimientos detectados por el sistema de medición y simular las posiciones relativas de los elementos de la mano mecánica.

Las manos articuladas o provistas de estructuras semejantes a dedos, ofrecen soluciones a problemas variados, ya que su uso dota al robot que las posee con la capacidad de llevar a cabo tareas de una manera versátil y con cierta destreza. La habilidad que este tipo de manos tienen para reconfigurarse y adoptar formas que permiten realizar distintos tipos de sujeción, reduce la posibilidad de tener que cambiar las herramientas de sujeción. De hecho, las manos articuladas representan un concepto antropomórfico en lo que se refiere a las tareas de manipulación con destreza, ya que por ejemplo, en el ser humano, el brazo se utiliza para posicionar la mano en cierto lugar del espacio para después emplear tanto la muñeca como los dedos para interactuar de forma precisa con el ambiente.

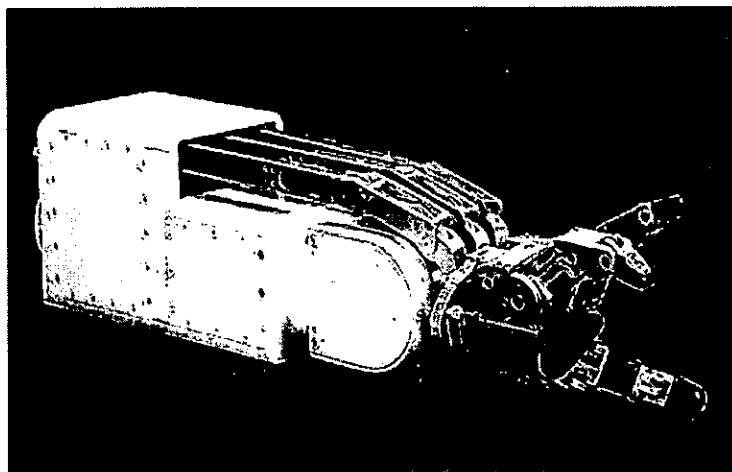
A pesar de las ventajas que este tipo de manipuladores ofrecen, en el terreno práctico, hay que saber valorar si realmente resultan ser la mejor solución, ya que si bien se gana en el terreno de la manipulación, también hay que pagar un precio elevado por lo que toca al sistema de control, ya que se vuelve más complejo. Generalmente las necesidades específicas para una determinada aplicación son las que van a determinar si vale la pena o no adoptar esta clase de sistemas de manipulación.

Como se dijo, la teleoperación ha motivado en buena parte el interés en la investigación y desarrollo de este tipo de sistemas mecánicos. Esto se debe a que con la teleoperación se puede tener acceso a ambientes de trabajo tan desfavorables como pueden ser lugares con alta radioactividad, el suelo marino, el espacio exterior, el subsuelo terrestre, en la manipulación de sustancias químicas, corrosivas o explosivas, y muchas aplicaciones más donde no haya un ambiente seguro para el ser humano. Últimamente se han visto las ventajas de su uso en aplicaciones quirúrgicas, en donde el cirujano puede realizar una operación sin tener que estar presente en el lugar donde se está llevando a cabo, o como sustitución ortopédica para un miembro perdido.

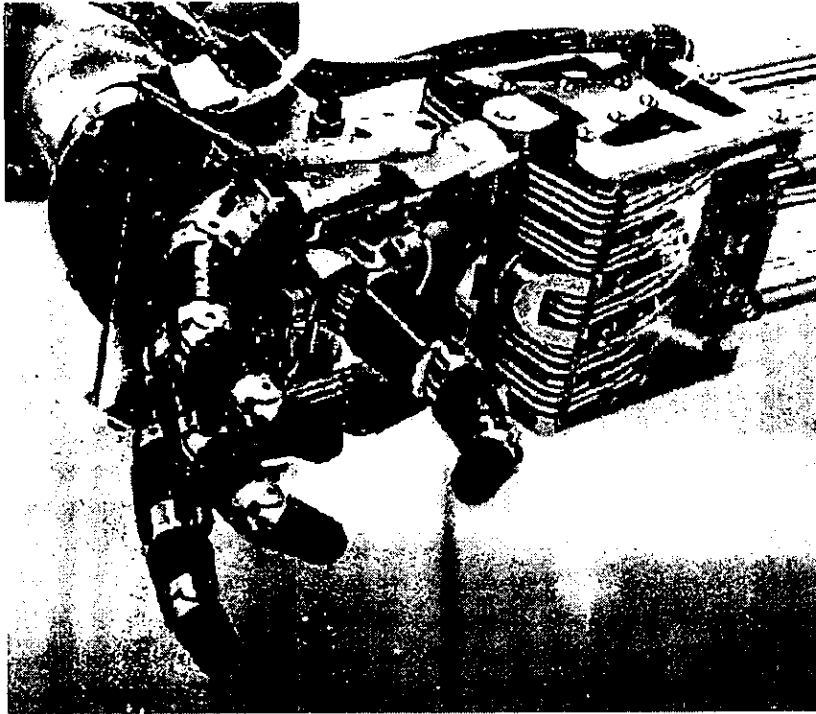
El objetivo principal de este trabajo de tesis es recopilar los trabajos previos respecto al manipulador (MAT I) y rediseñar la parte mecánica y de actuación, ya que el modelo que se tiene actualmente posee diversas deficiencias y carece de funcionalidad (su peso es muy elevado, requiere de un torque muy alto para su accionamiento, emplea motores que tienen un muy alto consumo de corriente y el peso del conjunto de todos éstos también es elevado). Por tanto, se quiere elaborar un sistema funcional que sea capaz de realizar los movimientos más aproximados a los de una mano humana, que permita controlar la posición de un manipulador antropomórfico mecánico a partir de la posición equivalente de la mano del operador, aprovechando tecnologías accesibles a la solución de problemas de diseño en mecatrónica, mejorando al modelo anterior en peso y funcionalidad.



*Foto 1. Mano mecánica Salisbury (Stanford / JPL).*



*Foto 2. Mano mecánica Jameson (JH-2).*



*Foto 3. Mano mecánica Utah / MIT.*

Entre los intentos más recientes que se han hecho para diseñar dispositivos antropomórficos de sujeción controlados a distancia se hallan por ejemplo: la mano mecánica Salisbury, también conocida como Stanford/JPL (**foto 1**); la mano Jameson (JH-2) desarrollada en el Centro Espacial Johnson para aplicaciones en el espacio exterior (**foto 2**); y la mano UTAH/MIT (**foto 3**).

En estas tres manos (**foto 1, 2 y 3**), se observa que todos los dedos están hechos de manera modular, es decir, que son iguales entre sí. El problema con esta configuración, es que la trayectoria seguida por la punta de los dedos en el manipulador, no va a ser la misma que la seguida por los dedos del usuario; es decir, los dedos de la mano mecánica no están proporcionados por las dimensiones humanas, lo que significa que un dedo puede ser más largo o más corto que el correspondiente en la mano humana, ocasionando que el usuario pierda la "sensibilidad" en el control si es que un dedo de la mano mecánica alcanza a tocar un objeto que él nunca tocaría con los suyos.

Las tres manos tienen constantemente en oposición al 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 (**figura 2.3**).

Las manos de Salisbury y de Utah/MIT utilizan como actuadores cables a manera de tendones. Esto permite 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 a que los tendones estén siempre bien tensos. Para mantener la tensión, la mano de Salisbury utiliza forros en cada tendón, mientras que la mano de Utah lo hace por medio de su estructura rígida.

Al desarrollar el Manipulador Antropomórfico Teleoperado II se crea un precedente en el Departamento de Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería, mismo que contribuye con el conocimiento adquirido sobre teleoperación y muestra los problemas generales de este tipo de sistemas. Además, se abre la posibilidad de continuar, si no con las mejoras y rediseños de este proyecto, sí con el desarrollo de sistemas complementarios en el área de la manipulación, tales como brazos mecánicos, bandas transportadoras, vehículos de transportación, grippers, etcétera, que puedan ser añadidos a este proyecto a fin de volverlo más completo y funcional.

# Capítulo 2

## ANÁLISIS DEL SISTEMA

Ya que el uso de los manipuladores está 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 de un modo manual por medio de un teclado, el manejo de ellos por este medio provoca que el usuario pierda la "sensibilidad" de los movimientos dificultando su uso en operaciones que vayan a ser ejecutadas una sola vez. En adición a esto y a pesar de la precisión en sus movimientos, los brazos de robot sobre los cuales se montan las pinzas o tenazas industriales (grippers), por lo general tienen una gran masa que los limita para controlar objetos que requieran de poca fuerza.

Por este motivo, se ha establecido emplear un modelo antropomórfico, siendo la mano humana el manipulador más flexible conocido. Por lo que se requiere de un estudio antropométrico de la mano humana para conocer cada una de sus partes, en específico, de 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 La mano humana

La mano del hombre cuenta con cuatro dedos similares entre sí (índice, medio, anular y meñique), siendo su longitud la única diferencia entre ellos. Los cuatro cuentan con tres falanges, llamadas respectivamente, desde la más próxima a la palma, primera falange o falange proximal; segunda falange o falange medial; y, tercera falange o falange distal.

Las articulaciones de estos dedos son conocidas como articulaciones interfalángicas distales y proximales. Las primeras permiten a la falange medial y a la falange distal tener un movimiento relativo entre ellas de flexión y de extensión, y la segunda permite tener los mismos movimientos entre la falange medial y la falange proximal. En la articulación metacarpofalángica las falanges proximales se acoplan con los huesos del metacarpo para lograr dos movimientos: la flexión y extensión, y la aducción y abducción (**figura 2.1**)

El dedo pulgar sólo cuenta con falange proximal y falange distal, es decir, que carece de falange medial, por lo que sólo tiene una articulación interfalángica, y las articulaciones metacarpofalángica y la trapeciometacarpal (**figura 2.2**). Las dos primeras permiten que este dedo tenga movimientos de flexión y extensión, mientras

que la tercera permite, además, los movimientos de aducción y abducción. Este dedo está dispuesto de una forma muy distinta a la de los otros cuatro para lograr que éste se anteponga sobre la palma de la mano al movimiento de estos cuatro; movimiento que se llama de oposición.

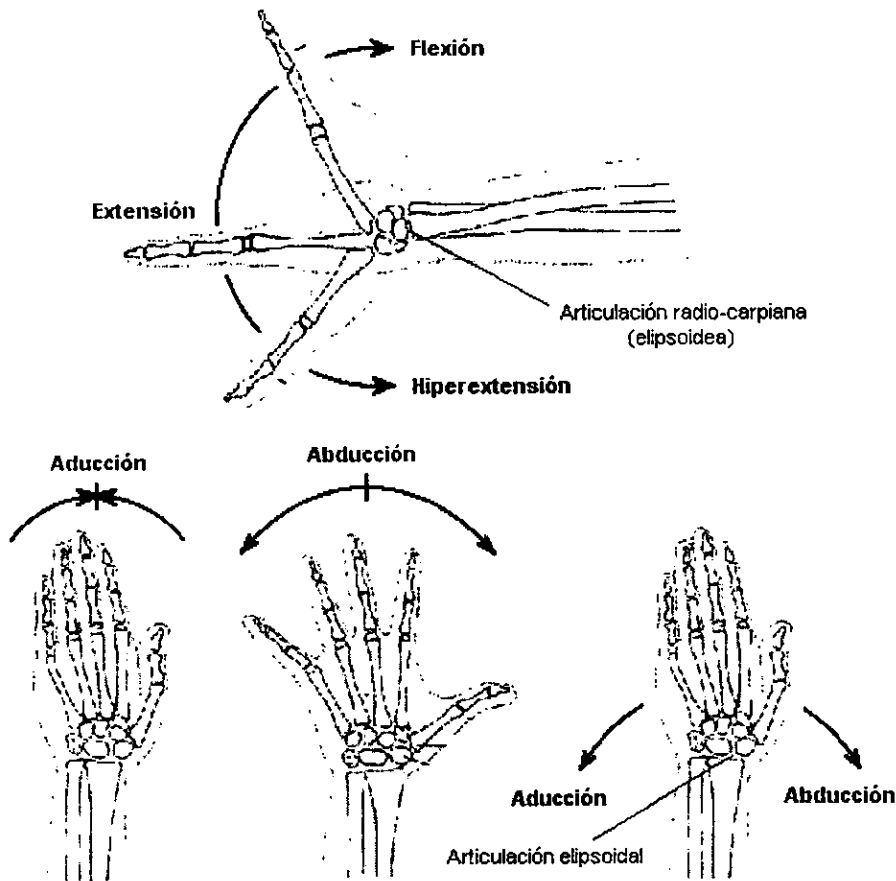


Figura 2.1 Movimientos de la mano humana.

En términos generales, se habla de que la mano humana tiene 22 grados de libertad. Una en cada una de las articulaciones interfalángicas proximales de los cinco dedos (5); dos en cada una de las articulaciones metacarpofalángicas de los dedos índice, medio, anular y meñique ( $2 \times 4 = 8$ ) y sólo una en la correspondiente del dedo pulgar (1); dos en la muñeca o carpo (2); una pequeña rotación en cada una de las articulaciones carpometacarpicas (4), y dos más en la trapeciometacarpal (2).

De manera general, existen dos tipos de estudios sobre la sujeción o aprehensión y manipulación de objetos con una mano humana: 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 efectivos según nuestra experiencia. Los estudios analíticos, por su parte, 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. Afortunadamente estos dos tipos de estudios se complementan. Estos dos tipos de estudios generaron la fisiología articular y por lo tanto la biomecánica articular.

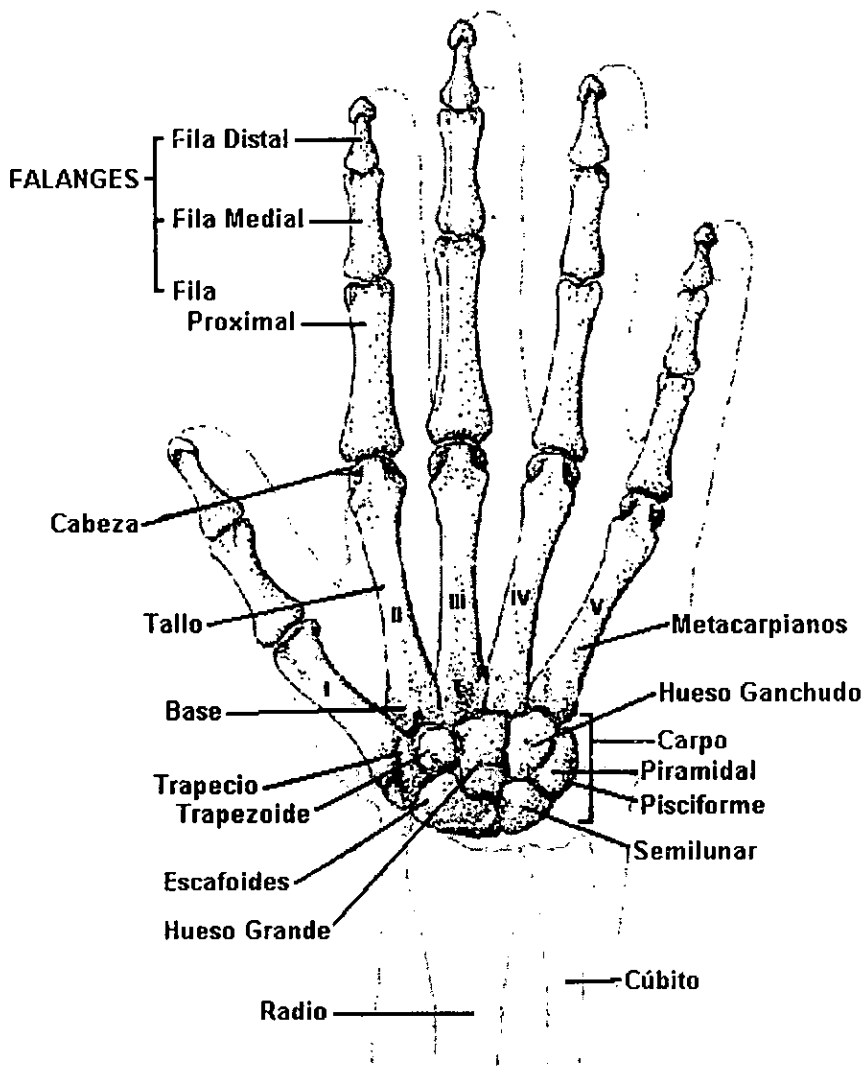


Figura 2.2 Estructura ósea de la mano humana

El diagrama mostrado en la **figura 2.3**, sugerido por Napier en 1956, está organizado con base en la función o tarea a desempeñar, más que a la forma geométrica. Bajo este esquema, las sujeciones se clasifican en fuerza y precisión. En general, la selección del tipo de sujeción que se puede desarrollar con el manipulador, depende de las restricciones que dictan la tarea a realizar (fuerzas y movimientos a ser impartidos); el objeto sujetado (forma, fragilidad y rugosidad de la superficie); y, el manipulador (fuerza de sujeción y apertura máxima de los dedos).

La razón por la que la fuerza y la 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 o se sostiene ligeramente, la piel "flota" sobre una suave pulpa subcutánea, por lo que la piel no está íntimamente ligada a los huesos y a los músculos. Así, aún 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 precisión 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.



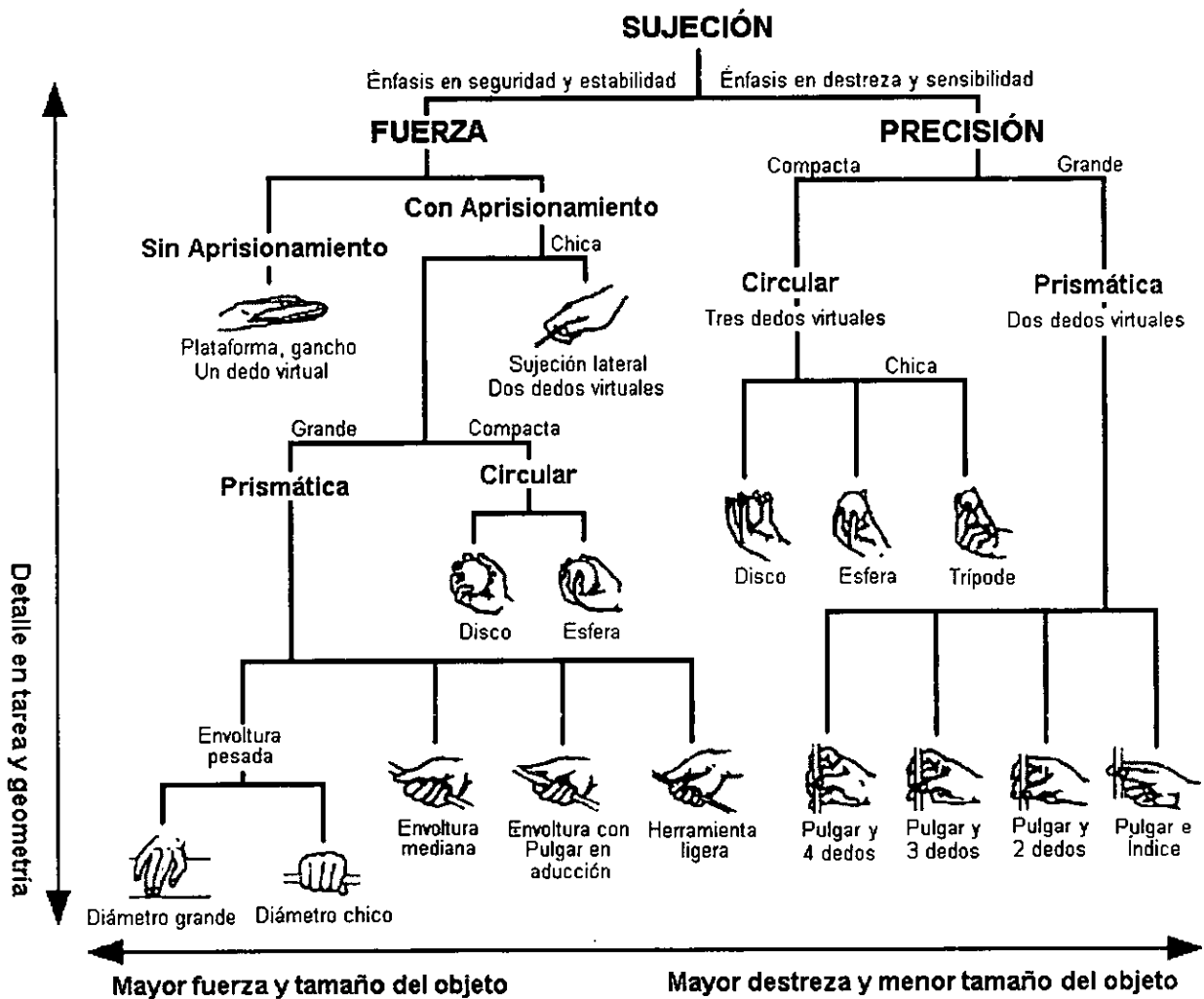


Figura 2.3 Clasificación de los distintos tipos de sujeción.

## 2.2 Rediseño del manipulador

Con base en los estudios previos sobre los tipos de sujeción (mostrados en la figura 2.3) y los requerimientos de un manipulador para estas actividades y, además, contando con un estudio extra sobre el estado del arte y las necesidades de usar o no algunos de los dedos, se llegó a la conclusión de que no es indispensable la utilización de los cinco dedos de la mano humana debido a que los objetivos planteados se refieren a una mano mecánica empleada para la manipulación de objetos, no incluyéndose la reorientación de éstos.

Una mano es ideal para controlar pequeños movimientos y para reorientar objetos. Para los humanos es trivial desarrollar continuamente reorientaciones. Esto requiere reposicionar algunos de los dedos en nuevos tipos de sujeción, y la transición de uno a otro tipo de sujeción requiere de suficientes dedos para mantener en una posición estable al 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. Todo esto con base en la experimentación realizada para este trabajo. El valor que ofrece tener más dedos disponibles es realmente cualitativo si uno intenta manipular objetos usando dos, tres, cuatro o cinco dedos de la 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 la estabilidad del objeto, e incluso podemos usar algunos dedos para asegurar el objeto contra la palma mientras que con los dedos sobrantes se ejecuta alguna otra tarea sobre el objeto sujetado.

De esta forma, y experimentando personalmente sobre la manipulación de objetos usando solamente cuatro dedos, se determinó que el manipulador contara sólo con esos dedos, que representan al dedo índice, medio, anular y pulgar de una mano humana normal.

Al igual que en la mano humana, y en contraste con las manos de Salisbury y UTAH mostradas en el capítulo anterior (**fotos 1 y 3**), el MAT II cuenta con el dedo pulgar opuesto al resto de la mano y rotado sobre su eje longitudinal cierto ángulo de forma que se asemeje aún más a la mano humana. Esto es, que al realizarse la flexión de la falange proximal y distal, ésta última no se encuentre perpendicular al plano de la palma como sucede cuando se flexiona alguno de los otros dedos en cualquiera de sus articulaciones.

Ya que cada uno de los dedos en la mano humana posee dimensiones diferentes entre sí y distintas también a las de otros seres humanos, dependiendo además del sexo, edad y otras condiciones del dueño de ésta; se llegó a la determinación de que cada uno de los dedos (índice, medio y anular) en el manipulador, poseería también distintas dimensiones, pero únicamente en lo que se refiere a la falange proximal y que el dimensionamiento total del dedo sería a través de las diferentes medidas que esta falange pueda presentar, a fin de simplificar el diseño (**figura 2.5**).

Tomando como base que en lo que se refiere a la flexión de la articulación metacarpofalángica, los dedos medio y anular sean iguales al dedo índice, al menos en lo que se refiere a una flexión de contracción dirigida hacia la palma de la mano, excepto que este último dedo posee un tercer grado de libertad que le permite un movimiento de abducción, separándose de los otros dos dedos pero manteniéndose en el mismo plano de la palma.

Por otro lado, se puede notar también que en la mano humana existe cierto movimiento relativo entre las articulaciones distal y proximal gracias a la estructura de ligamentos y la localización de las correderas de los tendones en los huesos. Por ejemplo, aunque cada dedo tiene cuatro grados de libertad, ellos no son controlados individualmente de manera libre, 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 a la palma, la flexión de la articulación interfalángica proximal libera la tensión en el ligamento retinacular (ligamento situado sobre la articulación interfalángica distal), permitiendo la flexión en la articulación interfalángica distal, esto es, que cuando se flexiona la articulación proximal cierto ángulo dirigido hacia la palma de la mano, la articulación distal se flexiona aproximadamente dos tercios de dicho

ángulo. Por este motivo, se decidió emplear algún tipo de mecanismo o sistema que pudiera simular tal movimiento a fin de reducir los grados de libertad y, por tanto, los actuadores y sensores correspondientes.

Respecto a los grados de libertad, se definió que toda la mano en conjunto tuviera once grados de libertad por ser éstos los más importantes para la manipulación de objetos, producidos por simples articulaciones de rotación distribuidos de la siguiente manera: dos grados para los dedos medio y anular cada uno (articulación interfalángica proximal y articulación metacarpofalángica para contracción); tres grados para el dedo índice (articulación interfalángica proximal y articulación metacarpofalángica para contracción y en movimiento de abducción), y cuatro grados de libertad para el dedo pulgar (articulación interfalángica proximal, articulación metacarpofalángica y articulación trapeciometacarpal para contracción y en movimiento de abducción).

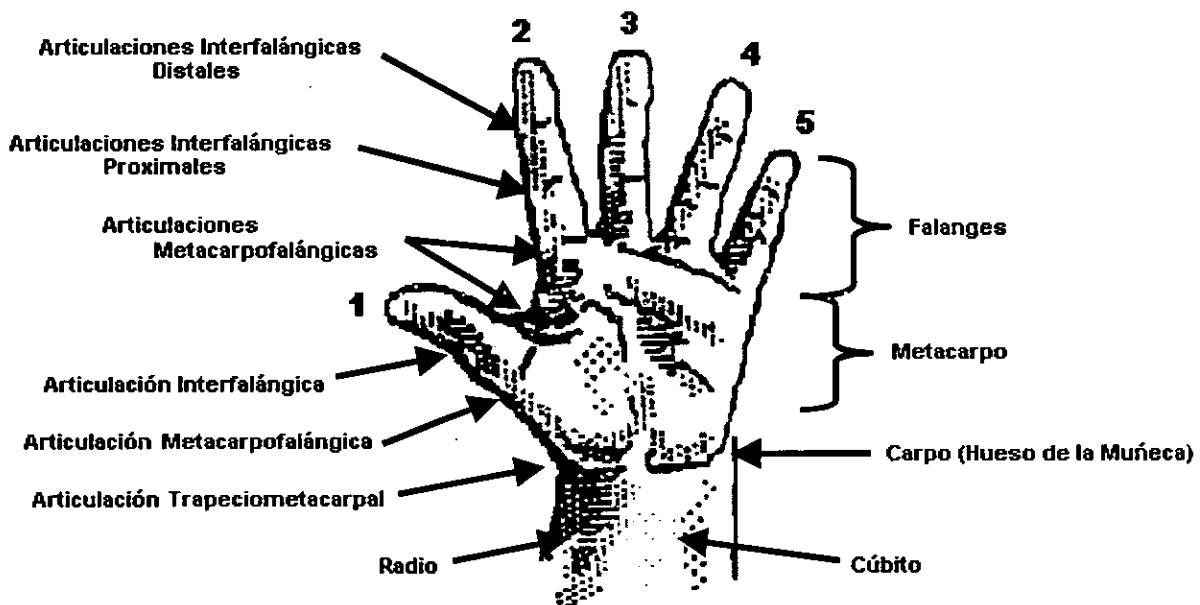
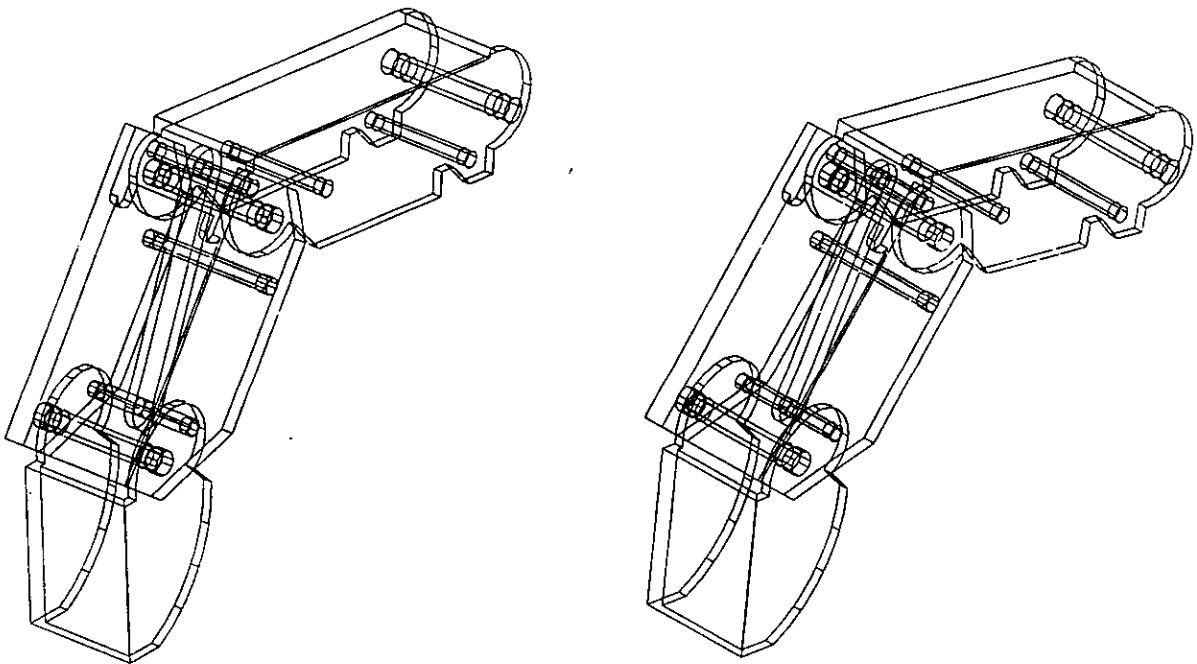


Figura 2.4 Articulaciones de la mano humana.

Para definir el ángulo máximo al que podría rotar cada articulación, se crearon prototipos de rápido ensamble en papel ilustración, y se determinó que todas las rotaciones interfalángicas proximales y metacarpofalángicas pudieran flexionarse de  $0$  a  $90^\circ$ , así como la articulación trapeciometacarpal del dedo pulgar. Por parte de los movimientos de abducción del dedo índice y pulgar, se vió que el primero posee una libertad de rotación entre los  $0$  y  $30^\circ$ , y entre  $0$  y  $45^\circ$  para el pulgar (desde su posición original). Cabe señalar que para dotar de movimiento a las articulaciones interfalángicas distales, se cuenta con un sistema acoplado a las articulaciones proximales en una relación de ángulo  $1.5$  a  $1$ , esto es, que cuando la articulación proximal se flexiona el máximo ángulo posible que es de  $90^\circ$ , la articulación distal rotará tan solo  $60^\circ$ .

Para este sistema, se optó por un mecanismo de cuatro barras donde la falange medial se considera como eslabón fijo, la falange proximal como eslabón conductor y la falange distal como eslabón conducido. En la **sección 3.2** se efectúan los cálculos para determinar la longitud de estos eslabones, así como del eslabón acoplador, teniendo como datos la longitud de la falange medial y los ángulos de rotación.

Sobre el diseño de los dedos, se optó por elaborarlos con perfiles de sección transversal rectangular, ya que ofrecen un mayor espacio interior para alojar los tendones, además de ser una sección fácil de maquinar. Por otro lado, después de la construcción y experimentación con varios modelos y prototipos, se observó que no era indispensable que esas secciones rectangulares contaran con la superficie anterior de los dedos (superficie en el mismo lado de la palma), y que al eliminarla, se reduciría el peso y el maquinado de cada elemento. Sin embargo, a fin de proporcionar cierta protección a los tendones y dotar a los dedos de una superficie de alto coeficiente de fricción, apto para la sujeción de objetos, se decidió sustituir esta superficie por secciones de hule de espesor reducido. Además, se decidió que los extremos de los dedos (falanges distales) fueran también de hule, a fin de incrementar la capacidad de sujeción. Las **figuras 2.5, 2.6 y 2.7** muestran el diseño de los dedos comunes (medio y anular), del dedo índice y del pulgar, respectivamente.



*Figura 2.5 Estructura de alambre de los dedos medio y anular respectivamente.*

Por otro lado, en la **figura 2.8** se muestra el diseño del elemento metacarpiano del dedo pulgar.

Sobre el diseño de las piezas que conforman a la palma y al dorso de la mano, se optó por uno que permitiera el alojamiento de la articulación para el dedo pulgar, principalmente del elemento que hace la función del hueso metacarpiano correspondiente, así como del elemento que dota de movimiento de abducción al dedo índice y los correspondientes movimientos de contracción del dedo medio y anular. Este diseño cuenta con espacio suficiente para permitir el libre desplazamiento de los tendones y cuenta con ejes de acero que reorientan la dirección de éstos. Tal diseño se muestra en la **figura 2.9**. Posteriormente, estos elementos, cuya superficie anterior es rígida, se cubrieron por una capa de hule con similar propósito que el propuesto para los dedos.

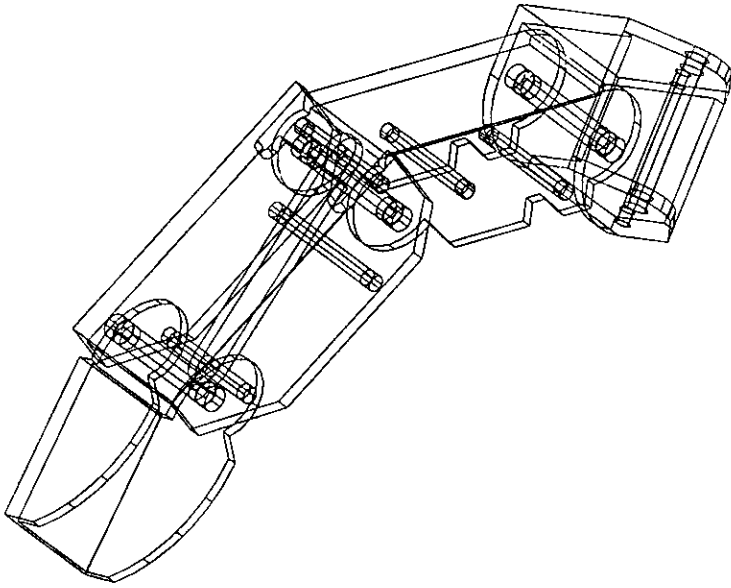


Figura 2.6 Estructura de alambre del dedo índice.

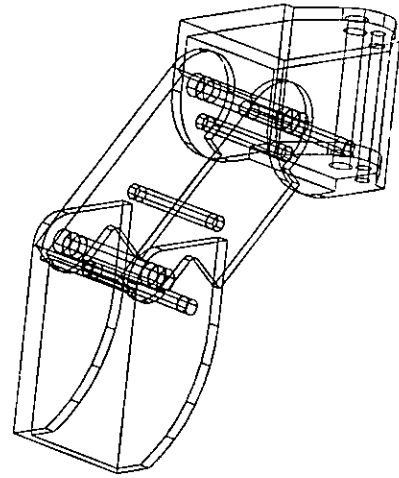


Figura 2.7 Estructura de alambre del dedo pulgar.

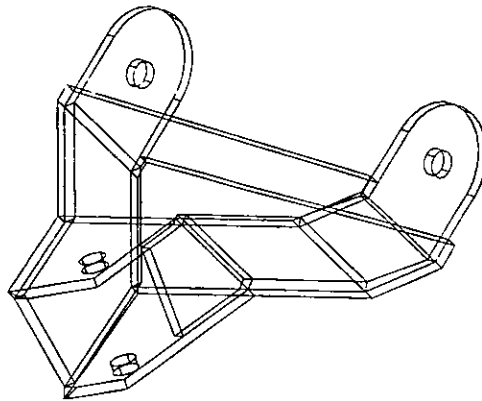


Figura 2.8 Estructura de alambre del metacarpo del dedo pulgar.

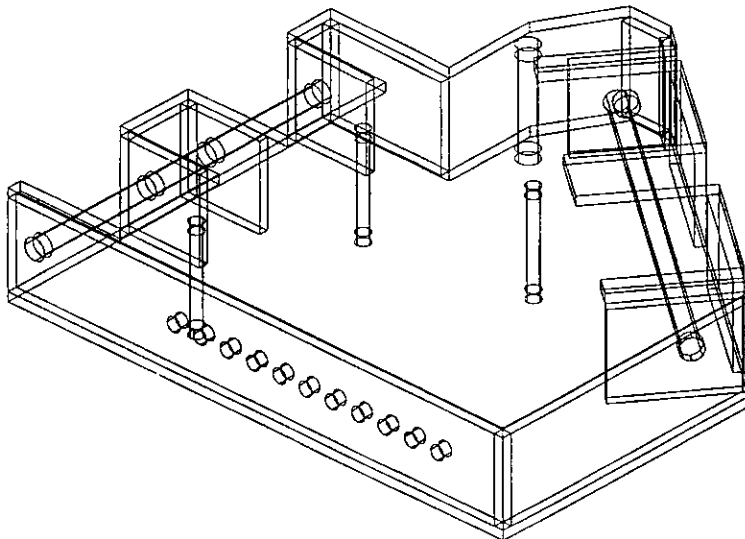
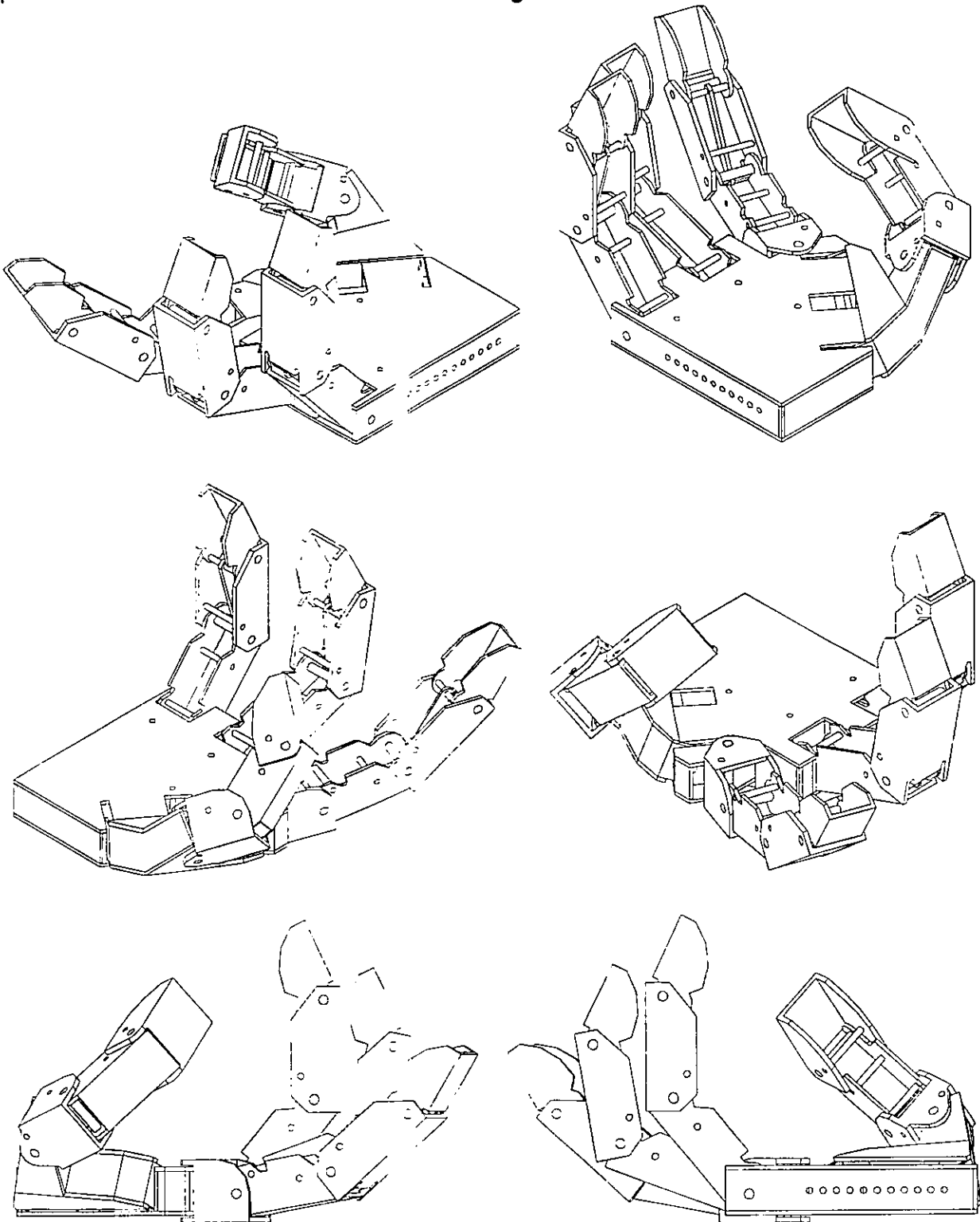


Figura 2.9 Estructura de alambre de la palma del manipulador.

Finalmente, se pueden apreciar algunas vistas del diseño de la mano, compuesta por todos sus elementos estructurales en la **figura 2.10**.



*Figura 2.10 Vistas de la mano mecánica completa.*

## 2.3 Actuadores

Los sistemas de accionamiento o impulso suministran al manipulador el poder necesario para su movimiento. Son dispositivos para conversión de energía, que transforman una potencia eléctrica, neumática o hidráulica en una potencia mecánica, o viceversa. Los elementos básicos de accionamiento pueden clasificarse en motores y actuadores; los primeros son capaces de presentar rotación continua, mientras que los segundos están limitados en su movimiento, ya sea lineal o giratorio.

Se puede llegar a ciertas conclusiones relativas al uso potencial de cada uno de estos sistemas en el campo de los robots y manipuladores. Primero, es necesario distinguir entre actuadores directos e indirectos. Los impulsores directos no tienen enlaces mecánicos entre el actuador y el eslabón del impulsor. Los cilindros y motores hidráulicos y neumáticos pueden usarse como actuadores directos debido a sus elevadas capacidades de generación de fuerzas y pares, y tienen varias ventajas: son compactos, lo cual permite su instalación en las articulaciones de los robots; son sencillos y fáciles de mantener.

Los impulsores indirectos requieren una transmisión mecánica entre el actuador y el elemento impulsado, generalmente con el propósito de incrementar la fuerza y el par de salida. Estas transmisiones pueden adoptar la forma de engranes, tornillos sinfín, impulsores armónicos, bandas, cables, cadenas, etc. La relación de engranes de los impulsores indirectos se encuentra generalmente en el rango de 50:1 a 200:1 y esto produce un sistema rígido, un sistema con transmisión de movimiento prácticamente unidireccional. Para nuestro caso, esta característica representa una ventaja al tratar de acoplar un sistema de control al manipulador ya que reduce los errores causados por las fuerzas de gravedad y/o fuerzas externas; también es una característica deseable en aplicaciones de maquinado y en aplicaciones que requieren movimientos rápidos a lo largo de distancias cortas. Los impulsores directos a base de potencia neumática muestran una cierta compresibilidad del fluido, que puede ser una desventaja en las aplicaciones mencionadas, es decir, es común sacrificar precisión por fuerza. Entre los impulsores indirectos se encuentran los servomotores de corriente directa, los cuales son silenciosos, eficientes y algunos cuentan con reducción por engranes y alto torque.

Una de las principales desventajas del impulsor indirecto es el volumen y el costo de las transmisiones mecánicas asociadas. Además, el juego o deslizamiento en estas transmisiones puede afectar la repetitividad y la rigidez. Como las transmisiones están diseñadas para la reducción de velocidad de los motores eléctricos, los impulsores indirectos rara vez resultan adecuados para los robots que requieren movimientos a alta velocidad. Estos robots generalmente necesitan impulsores hidráulicos, mientras que los robots pequeños requieren impulsores indirectos eléctricos, como en nuestro caso.

En los robots se utilizan dos tipos principales de motores eléctricos: motores de pasos y servomotores de corriente directa. Los motores de pasos han encontrado gran variedad de aplicaciones en toda la maquinaria controlada por computadora ya que una computadora es el elemento ideal para generar los pulsos de las señales de control requeridas. Los motores de pasos se desplazan a un ángulo fijo con cada pulso y como el tamaño del paso es fijo, puede obtenerse una posición determinada enviando el número adecuado de pulsos al motor. El problema con estos motores es la gran cantidad de entradas que posee para recibir las señales de control, y al tenerse la necesidad de utilizar once motores para accionar los once grados de libertad con que

cuenta el manipulador, el número de salidas provenientes del microcontrolador se multiplicaría y los controladores, como el empleado en este proyecto, se vuelven insuficientes.

Los servomotores de corriente continua (c.c.), son motores alimentados por una corriente suministrada por amplificadores electrónicos de c.c. o por amplificadores de corriente alterna (c.a.) con demoduladores de voltaje colocados interna o externamente. Los servomotores de c.c. tienen potencias comprendidas entre **0.05 y 1000 HP**.

Las características fundamentales a cumplir por cualquier servomotor son:

- 1) el par de salida del motor debe ser proporcional a la corriente que se le aplica, y
- 2) el sentido del par, que viene determinado por la polaridad (instantánea) del voltaje de control.

Se utilizan tres tipos de servomotor de c.c.: el motor derivación, el motor serie partida y el motor derivación de imán permanente (excitación de campo fija).

Los *servomotores con derivación de imán permanente* se utilizan para instrumentos, y son pequeños motores de c.c. de potencia fraccionaria que utilizan imanes permanentes como excitación constante, en lugar de una fuente constante de corriente de excitación, como se indica en la **figura 2.11**. Estos dispositivos se fabrican generalmente para tensiones nominales de **6 a 28 V**. La estructura de la excitación de estos motores consiste en una aleación Alnico VI moldeada en forma de anillo circular de aproximadamente **1"** de diámetro que rodea totalmente al rotor y que proporciona un flujo intenso. Los motores de imán permanente se compensan por medio de devanados de conmutación para evitar la desmagnetización de los imanes de excitación cuando el voltaje del rotor se invierte bruscamente. Las corrientes parásitas y los efectos de histéresis son generalmente despreciables en este tipo de motores, y las piezas polares son generalmente laminadas para reducir las chispas en las escobillas cuando tiene lugar un rápido cambio en el voltaje. Estos dispositivos se controlan también por el voltaje del rotor, de la misma manera que los motores-derivación de inducido controlado.

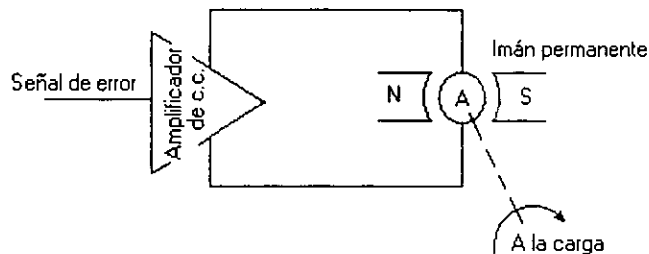


Figura 2.11 Servomotor de c.c. de imán permanente.

Estos servomotores son dispositivos de relativamente alta velocidad y bajo par y requieren, por lo general, un reductor para su aplicación en robots.

Un motor eléctrico es más pesado que un impulsor hidráulico para una potencia dada y la inclusión de engranes acentúa esta situación. La solución en el caso de los robots es, con frecuencia, montar el motor y los engranes en la base o cerca de ésta y transmitir la baja velocidad con alto par requerido por una articulación del manipulador mediante una transmisión mecánica, sistema que se analizará en la **sección 3.3**.



Los servomotores empleados para esta aplicación son motores que se utilizan generalmente en modelismo, ya que estos cuentan con características deseables para ser utilizados en el manipulador, como puede ser el tamaño reducido, la relativamente fácil implementación e instrumentación, y que ya cuentan, en su interior, con un juego de engranes para reducción.

Las características más relevantes de los motores empleados se enlistan a continuación:

- Velocidad de operación: **0.19 seg/60° a 4.8 volts**
- Torque a la salida: **3 kg cm a 4.8 volts**
- Peso total: **44.5 gramos**
- Dimensiones: **41 X 20 X 36 mm**
- Relación de reducción: **116:1 (aproximadamente)**

Se emplearon 11 servomotores iguales con estas características dispuestos en un arreglo horizontal de dos niveles, cinco en la parte inferior y seis en la superior. Estos motores cuentan además con poleas de **25.3 mm** de diámetro, en las que se acoplan los tendones que llegan hasta la mano mecánica.

Estos servomotores cuentan con un sistema de engranes, dentro de su carcasa, que reducen la velocidad de rotación y aumentan el torque a la salida del motor de c.c. Este arreglo es lo que se conoce como un tren de engranes.

Se considerará un piñón 2 como impulsor de un engrane 3. La velocidad del impulsado es:

$$n_3 = \frac{N_2}{N_3} n_2 = \frac{d_2}{d_3} n_2$$

donde  $n$  es el número de vueltas o  $rpm$ ,  $N$  es el número de dientes y  $d$  es el diámetro de paso.

Este tren de engranes está representado por la ecuación:

$$\frac{n_A}{n_H} = \left(\frac{n_B}{n_A}\right) \left(\frac{n_D}{n_C}\right) \left(\frac{n_F}{n_E}\right) \left(\frac{n_H}{n_G}\right) = \left(\frac{N_B}{N_A}\right) \left(\frac{N_D}{N_C}\right) \left(\frac{N_F}{N_E}\right) \left(\frac{N_H}{N_G}\right)$$

$$n_A = n_H \frac{N_B N_D N_F N_H}{N_A N_C N_E N_G} = (0.19 \text{ seg}/60^\circ) \frac{(10)(10)(10)(8)}{(37)(37)(37)(37)} = 8.1103 \times 10^{-4} \text{ seg}/60^\circ$$

Como ya se mencionó, para incrementar el torque de actuación de los servomotores, se optó por colocar en la flecha de salida de éstos poleas de **25.3 mm** de diámetro, que es donde se acoplan los tendones que han de dotar de movimiento al manipulador.

El arreglo de engranes de reducción se muestra en la **figura 2.12**.

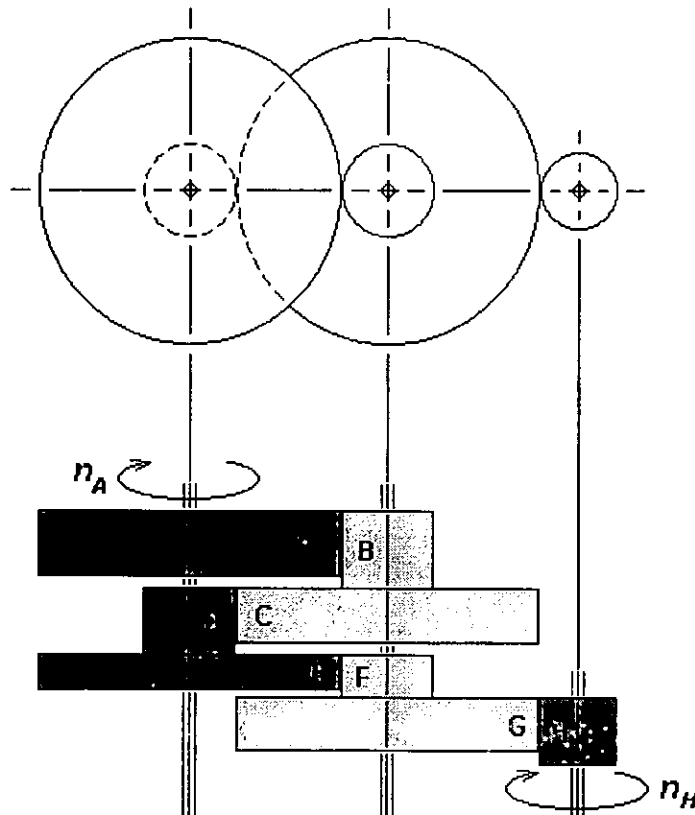


Figura 2.12 Arreglo de engranes de los servomotores.

En este caso, se observa que los engranes **B-C**, **D-E** y **F-G** no están fijados a sus ejes de rotación, sino que giran libremente, mientras que el engrane **H** está conectado directamente al eje del motor de c.c. del servomecanismo. El eje del engrane **A** es el de salida, que se acopla a la polea donde se sujetará el tendón correspondiente.

Respecto al control es esencial utilizar un control de malla cerrada, en el cual el error entre una variable deseada y una real se emplea con fines correctivos. En muchos de estos sistemas, el control de la posición del efector final es la principal preocupación pero, cada vez con mayor frecuencia, las aplicaciones requieren controlar la velocidad y la aceleración, así como la posición a lo largo de una trayectoria deseada. El movimiento prescrito se mantiene mediante la aplicación de pares o fuerzas correctivas en los actuadores para ajustar cualquier desviación del brazo respecto a la trayectoria establecida.

Este control de malla cerrada es útil si se requiere ubicar con precisión los eslabones del manipulador en presencia de perturbaciones físicas como las cargas por gravedad o fuerzas externas.

El uso de un dispositivo digital para medir la posición, es decir, un codificador, elimina la necesidad de un convertidor analógico-digital, lo que simplifica el sistema. Este convertidor puede eliminarse mediante la utilización de un servomecanismo digital, un dispositivo que acepta directamente las señales digitales y genera un movimiento de rotación controlada.

Para medir la posición lineal o angular puede emplearse una resistencia variable o potenciómetro. En las **figuras 2.14 (a) y (b)** se muestran respectivamente potenciómetros lineales y de rotación. El movimiento del eje de entrada causa que la resistencia del dispositivo cambie de 0 al valor máximo; el circuito se muestra en la **figura 2.14 (c)**.

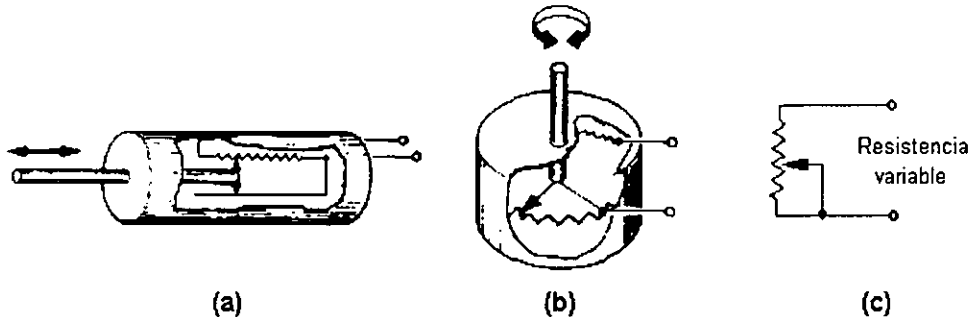


Figura 2.14 Potenciómetro.

La resistencia del estator de un potenciómetro puede ser de alambre enrollado o estar fabricada con plástico conductor. Por lo tanto, el contacto deslizante de un potenciómetro de alambre enrollado hace contacto solamente en  $n$  posiciones sobre su desplazamiento, en donde  $n$  es el número de vueltas de la resistencia. Esto afecta la resolución del dispositivo.

Los servomotores empleados cuentan ya, en su interior, con un sistema de control electrónico de malla cerrada cuya señal de alimentación está dada por un potenciómetro de rotación. Este dispositivo es capaz de controlar la posición del servomecanismo pero de una forma muy localizada, es decir, asegura que la posición angular del eje de salida del motor sea la requerida, pero cuando este resultado se traslada al correspondiente eje de alguna de las articulaciones del manipulador, el resultado no es siempre el deseado. Esto se debe a que existen pérdidas entre el servomotor y el manipulador debidas prácticamente a la elongación de los tendones. Por otro lado, el control de malla cerrada con que cuentan los servomotores no incluye tampoco las pérdidas generadas por las minúsculas variaciones en las señales que se obtienen de los fototransistores infrarrojos del guante de teleoperación.

Para poder contar con un sistema de control más preciso y adecuado, que sea capaz de asegurar que las posiciones angulares del manipulador sean iguales o suficientemente aproximadas a las del usuario del guante, es necesario que los ejes de rotación de las articulaciones de la mano mecánica cuenten con algún dispositivo, digital o analógico, que compare estas posiciones a fin de hacer las correcciones necesarias. Sin embargo, un sistema de este tipo resulta en extremo complicado por la cantidad de cálculos e interpolaciones de resultados y datos obtenidos que sería necesario efectuar, además de que el tiempo consumido por éstos provocaría que la respuesta del manipulador con respecto al guante tuviera un retraso cada vez más significativo.

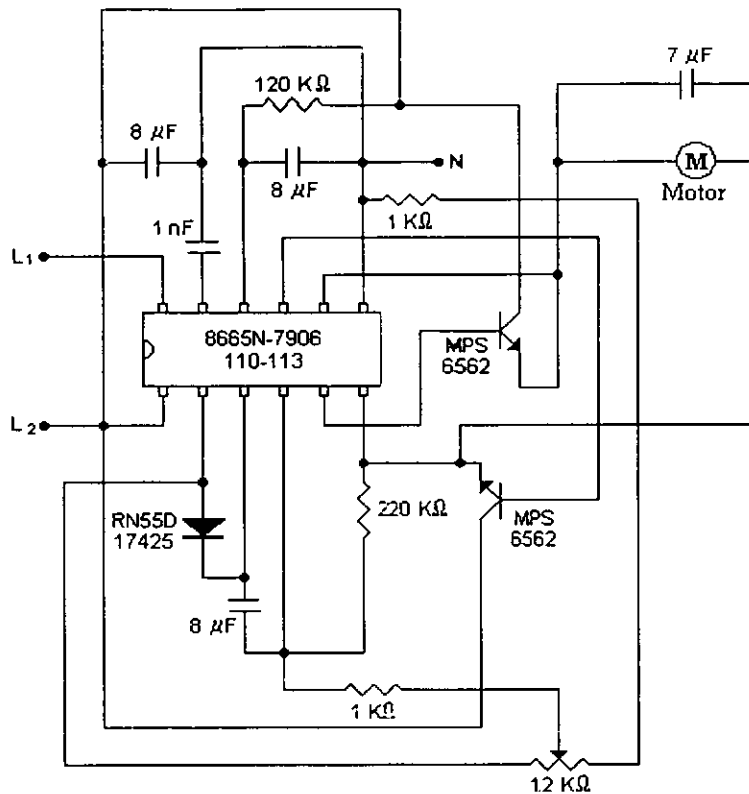


Figura 2.15 Circuito de control de malla cerrada para los servomotores.

El sistema de control de malla cerrada con la que cuentan los servomotores se muestra en la **figura 2.15**. En esta figura, las señales de frecuencia, provenientes de la tarjeta microcontroladora, entran al sistema por los puntos **L<sub>1</sub>**, **L<sub>2</sub>** y **N** (ver también **figura 6.4**). El eje de rotación del potenciómetro está acoplado directamente al eje de rotación del engrane **A** de la **figura 2.12**, mismo que proporciona la velocidad de operación y la posición angular a la salida del servomotor.

# Capítulo 3

## MODELADO MATEMÁTICO

La función de un robot es llevar a cabo tareas útiles y esto no se puede lograr sin un medio para controlar los movimientos del manipulador. La falta de flexibilidad de los dispositivos para posicionamiento y control de fuerza impide que éstos se utilicen en aplicaciones más complicadas.

Un manipulador mecánico se puede modelar como una cadena articulada en lazo abierto con algunos cuerpos rígidos (eslabones) conectados en serie por una articulación de revolución o prismática accionada por actuadores. Un final de la cadena se une a una base-soporte accionada por motores, mientras que el otro extremo, está libre y unido a una herramienta típicamente una tenaza (gripper) de alguna clase o un manipulador (propriadamente dicho), para manipular objetos o realizar tareas de montaje. En la mayoría de las aplicaciones de robótica, se está interesado en la descripción espacial del efector final del manipulador con respecto a un sistema de coordenadas de referencia fijo.

### 3.1 Análisis cinemático

La cinemática de un robot trata directamente con el estudio analítico de la geometría del movimiento del robot con respecto a un sistema de coordenadas de referencia fijo como una función del tiempo, sin considerar las fuerzas o momentos que originan dicho movimiento. Esta cinemática plantea dos cuestiones fundamentales:

- Para un manipulador determinado, dado el vector de ángulos de las articulaciones  $\mathbf{q}(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t))$  y los parámetros geométricos del elemento, donde  $n$  es el número de grados de libertad, se define un punto determinado que alcanza el extremo del órgano terminal. (*Cinemática directa*).
- Dada una posición y orientación deseada del punto final del eslabonamiento y los parámetros geométricos de los elementos con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, es posible que el manipulador alcance dicha posición y orientación con, incluso, diferentes configuraciones que satisfacen la misma condición. (*Cinemática inversa*).

A partir de la notación de Denavit-Hartenberg, se realiza el análisis para el sistema de articulaciones que componen al dedo índice, ya que es, junto con el pulgar, uno de los dedos con mayor número de articulaciones, y su estudio, por consiguiente, engloba a los dedos medio y anular, cuyo análisis sería más sencillo. Este dedo posee cuatro articulaciones con tres grados de libertad, recordando que la articulación

interfalángica distal depende directamente de la articulación interfalángica proximal, por lo que el ángulo  $\theta_4$  cumple con la siguiente relación:

$$\theta_4 = 120^\circ + \frac{2\theta_3}{3}$$

Para este análisis es necesario definir los parámetros de eslabonamiento, de acuerdo a la notación de Denavit-Hartenberg:

1.  $a_{i-1}$  : es el vector que define la longitud del eslabón i-1 y su longitud se determina como la más corta entre el eje i-1 y el eje i, y su sentido es del eje i-1 al eje i, (**figura 3.1**).
2.  $\alpha_{i-1}$  : es el ángulo de torsión del eslabón i-1 y se encuentra de la siguiente manera: se traslada el eje i hasta el punto donde  $a_{i-1}$  corta al eje i-1 ( $a_{i-1} = 0$ ). Siguiendo la regla de la mano derecha, tomando al vector  $a_{i-1}$  como referencia, se lleva el positivo del eje i-1 hacia el positivo de la proyección del eje i, (**figura 3.1**).

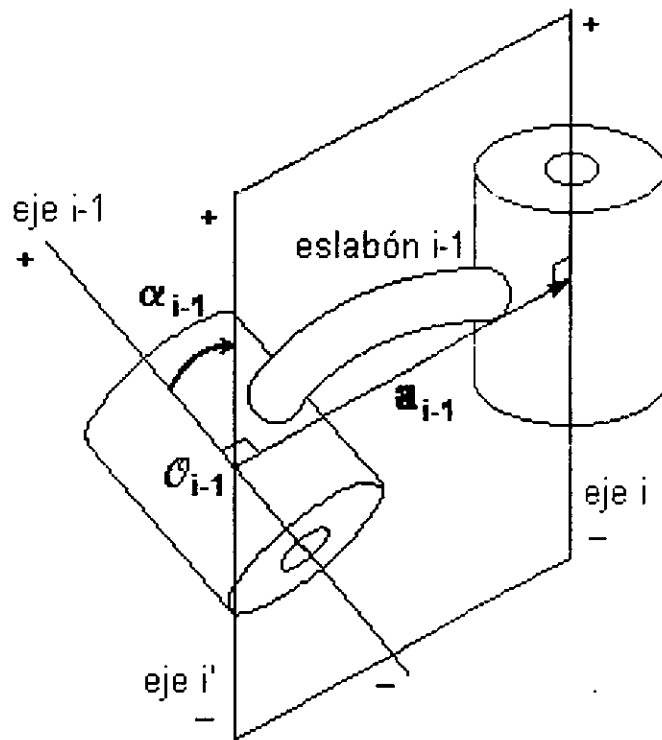


Figura 3.1 Parámetros  $a_{i-1}$  y  $\alpha_{i-1}$ .

3.  $d_i$  : es el vector que define la longitud existente entre los eslabones i-1 e i; su sentido va desde el corte de  $a_{i-1}$  con el eje i hasta el corte de  $a_i$  con el eje i. Este parámetro define el sentido positivo del eje, (**figura 3.2**).
4.  $\theta_i$  : es el ángulo entre los eslabones i-1 e i, y se obtiene de la siguiente manera: se traslada el parámetro  $a_i$  hasta el punto donde  $a_{i-1}$  corta al eje i. Según la regla de la mano derecha, tomando al vector  $d_i$  como referencia y partiendo de la prolongación del vector  $a_{i-1}$ ,  $\theta_i$  es el ángulo entre los vectores  $a_{i-1}$  y la proyección de  $a_i$ , (**figura 3.2**).

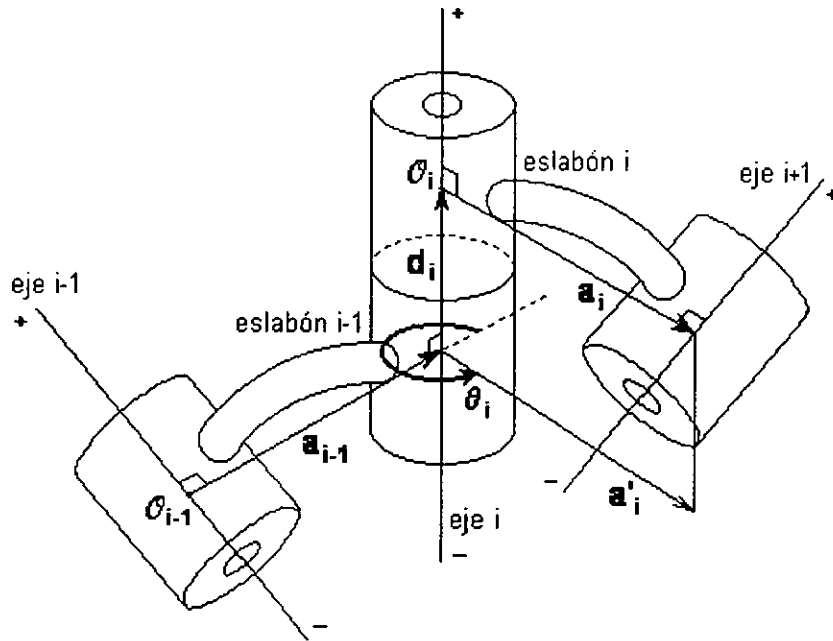


Figura 3.2 Parámetros  $d_i$  y  $\theta_i$ .

**Nota:**  $a_{i-1}$  y  $\alpha_{i-1}$  determinan el estado del eslabón  $i-1$  y son constantes;  $d_i$  y  $\theta_i$  determinan el estado que guarda la relación de eslabonamiento. Para articulaciones prismáticas,  $d_i$  es variable y  $\theta_i$  es constante, y para articulaciones rotacionales,  $d_i$  es constante y  $\theta_i$  es variable.

Para establecer el sistema de referencia de los eslabones ( $\mathcal{C}_{i-1}$ ) se siguen las siguientes reglas:

1. El origen del sistema de referencia  $\{i-1\}$ , correspondiente al eslabón  $i-1$ , se coloca en la intersección del eje  $i-1$  y  $a_{i-1}$ .
2. El eje  $x_{i-1}$  se coloca sobre  $a_{i-1}$  con sentido desde el eje  $i-1$  al eje  $i$ .
3. El eje  $z_{i-1}$  se coloca sobre el eje  $i-1$  en la dirección positiva de giro.
4. El eje  $y_{i-1}$  se forma de manera natural con el producto cruz usual.

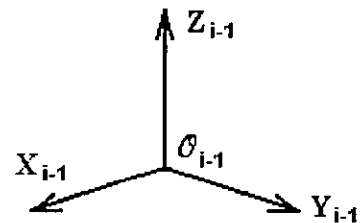


Figura 3.3 Sistema de referencia.

Por otro lado, existe lo que se conoce como *matriz de transformación de la base  $i$  con respecto a  $i-1$* , que sirve para determinar de forma rápida y precisa la ubicación del extremo del órgano terminal y es usada sobre todo en programas de simulación como el empleado en el sistema expuesto en la **sección 5.2**. Los resultados proporcionados por esta matriz aplicada para cada eslabón, pueden emplearse posteriormente como retroalimentación del manipulador a fin de tener un mayor control y mejora en la precisión de sus movimientos.

Esta matriz se obtiene como sigue:

$$T_i^{i-1} = \left[ \begin{array}{ccc|c} Rot_i^{i-1}(k, \beta) & & & O_i^{i-1} \\ \hline 0 & & & 1 \end{array} \right] = T_B^{i-1} \cdot T_C^B \cdot T_D^C \cdot T_i^D$$

donde  $O_i^{i-1} = \mathbf{a}_{i-1} + \mathbf{d}_i$  y las transformaciones indicadas están dadas como:

$${}^{i-1}\{B\} = \{Rot(x, \alpha_{i-1}), 0^T\}$$

$${}^B\{C\} = \{I_{3 \times 3}, [a_{i-1}, 0, 0]^T\}$$

$${}^C\{D\} = \{Rot(z, \theta_i), 0^T\}$$

$${}^D\{i\} = \{I_{3 \times 3}, [0, 0, d_i]^T\}$$

Sustituyendo:

$$T_i^{i-1} = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \left[ \begin{array}{ccc|c} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

Al realizar todas las multiplicaciones y simplificaciones queda la matriz de transformación buscada:

$$T_i^{i-1} = \left[ \begin{array}{ccc|c} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos \alpha_{i-1} \cdot \sin \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \cdot \cos \theta_i & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \cdot \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \alpha_{i-1} \cdot \sin \theta_i & \sin \alpha_{i-1} \cdot \cos \theta_i & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cdot \cos \alpha_{i-1} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

En el análisis de la cinemática directa se conocen las variables de articulación (ángulos ó desplazamientos) y se obtiene la posición y orientación del órgano terminal.

Para obtener el modelo matemático con los parámetros de eslabonamiento se deben seguir los siguientes pasos:

1. Enumerar los eslabones en forma creciente, asignándole 0 (cero) al eslabón de referencia o fijo (el cual no se considera en el análisis).
2. Trazar vectores de los ejes de movimiento que pueden ser prismáticos o rotacionales, mostrados en la **figura 3.4**; el primer eje de movimiento tendrá el número 1 (ya que el eslabón cero no se considera). El número de eslabones se relaciona con el número de articulaciones mediante la siguiente ecuación:

$$Na + 1 = Ne$$

donde **Na** = número de articulaciones y **Ne** = número de eslabones.

3. Llenar una tabla de parámetros de eslabonamiento. (**Tabla 3.1**).
4. Con cada renglón de dicha tabla, se obtiene la matriz de transformación correspondiente de acuerdo a la matriz  $T_i^{i-1}$ ; por lo tanto, el primer renglón corresponderá a la matriz de transformación  $T_1^0$ , el segundo renglón corresponderá a  $T_2^1$ , etcétera.



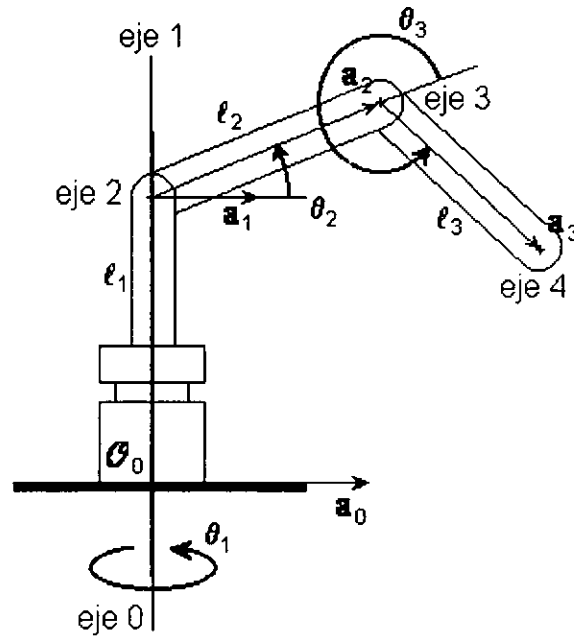


Figura 3.4 Representación vectorial.

i	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	$0^\circ$	0	$\theta_1$
2	$l_1$	$90^\circ$	0	$\theta_2$
3	$l_2$	$0^\circ$	0	$\theta_3$
4	$l_3$	$0^\circ$	0	$0^\circ$

$$\begin{aligned}
 &0 < \theta_1 < 30^\circ \\
 &-90^\circ < \theta_2 < 360^\circ \\
 &-90^\circ < \theta_3 < 360^\circ \\
 &-60^\circ < \theta_4 < 360^\circ
 \end{aligned}$$

Tabla 3.1 Parámetros de eslabonamiento.

En realidad, en la última casilla debería anotarse el ángulo  $\theta_4$ , pero recordando su dependencia lineal con respecto a  $\theta_3$ , no se considerará este dato en el análisis cinemático, por lo que se le asigna a esa casilla el valor de  $0^\circ$  a fin de simplificar el análisis.

De acuerdo al paso 4, las matrices de transformación mencionadas son:

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\text{sen } \theta_1 & 0 & 0 \\ \text{sen } \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\text{sen } \theta_2 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \text{sen } \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\text{sen } \theta_3 & 0 & l_2 \\ \text{sen } \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_4^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Al multiplicarlas según la regla  $T_4^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3$  y simplificando, se puede obtener tanto la matriz de rotación correspondiente a este eslabonamiento, como el vector de posición del extremo del órgano terminal respecto al origen de referencia  $\theta_{i-1}$ . Esto es:

$$R_4^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 (\cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_3) & -\cos \theta_1 (\cos \theta_2 \sin \theta_3 + \sin \theta_2 \cos \theta_3) & \sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 (\cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_3) & -\sin \theta_1 (\cos \theta_2 \sin \theta_3 + \sin \theta_2 \cos \theta_3) & -\cos \theta_1 \\ \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \sin \theta_2 \cos \theta_3 & \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$O_4^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 (l_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + l_2 \cos \theta_2 - l_3 \sin \theta_2 \sin \theta_3 + l_1) \\ \sin \theta_1 (l_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + l_2 \cos \theta_2 - l_3 \sin \theta_2 \sin \theta_3 + l_1) \\ l_3 (\sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_2 \sin \theta_3) + l_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_{4,x}^0 \\ O_{4,y}^0 \\ O_{4,z}^0 \end{bmatrix}$$

En el análisis de la cinemática inversa se conoce la posición y la orientación del órgano terminal y a partir de esto se determinan los ángulos y desplazamientos. Para obtener la cinemática inversa de este eslabonamiento, se realiza un análisis geométrico de los vectores de los ejes de movimiento para proporcionar después un perfil polinomial que se identifique con el movimiento del mecanismo. Basados en las figuras 3.5 (a) y 3.5 (b) se determinan los valores de los ángulos en los que intervienen los valores de las componentes de  $O_4^0$  obtenidos arriba, aunque en este caso representan datos conocidos.

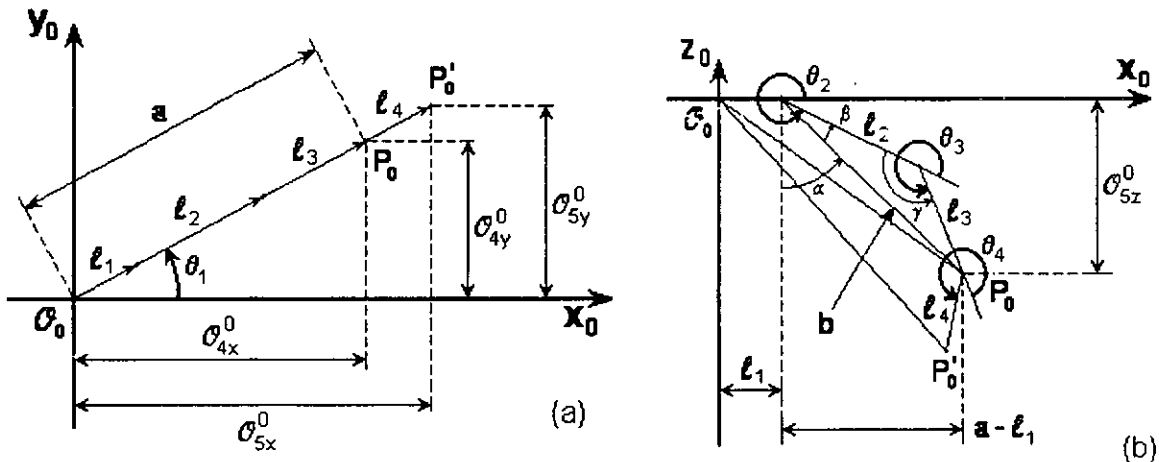


Figura 3.5 (a) Proyección en el plano XY y (b) Proyección en el plano XZ.

De la figura 3.5 (a) se puede determinar:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{O_{4,y}^0}{O_{4,x}^0} \right) \quad a = \sqrt{(O_{4,x}^0)^2 + (O_{4,y}^0)^2}$$

De la figura 3.5 (b) se obtiene lo siguiente:

$$\theta_2 = \alpha + \beta + 270^\circ \quad \theta_3 = \gamma + 180^\circ \quad b = \sqrt{(a - l_1)^2 + (O_{4,z}^0)^2}$$

De aquí se puede determinar:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{a - l_1}{O_{4z}^0} \right)$$

y por ley de los cosenos:

$$\beta = \cos^{-1} \left( \frac{b^2 + l_2^2 - l_3^2}{2 \cdot b \cdot l_2} \right) \quad \gamma = \cos^{-1} \left( \frac{l_2^2 + l_3^2 - b^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3} \right)$$

Finalmente:

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{(O_{4x}^0)^2 + (O_{4y}^0)^2} - l_1}{O_{4z}^0} \right) + \cos^{-1} \left( \frac{(a - l_1)^2 + (O_{4z}^0)^2 + l_2^2 - l_3^2}{2 \cdot \sqrt{(a - l_1)^2 + (O_{4z}^0)^2} \cdot l_2} \right) + 270^\circ$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left( \frac{l_2^2 + l_3^2 - (a - l_1)^2 + (O_{4z}^0)^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3} \right) + 180^\circ$$

$$\theta_4 = 120^\circ + \frac{2}{3} \cos^{-1} \left( \frac{l_2^2 + l_3^2 - (a - l_1)^2 + (O_{4z}^0)^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3} \right) + 180^\circ$$

Para  $\theta_4$  se sustituye el valor de  $\theta_3$  en la ecuación correspondiente:

$$\theta_4 = \frac{2}{3} \cos^{-1} \left( \frac{l_2^2 - l_3^2 - (a - l_1)^2 + (O_{4z}^0)^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3} \right) + 300^\circ$$

De esta forma, dependiendo del tipo de información con la que contemos (posición y orientación, o ángulos y desplazamientos), podemos emplear las ecuaciones de uno u otro análisis cinemático para completar la información. Esto es útil para programar simulaciones o realizar cálculos precisos del movimiento de cada uno de los dedos y sus articulaciones, de la misma forma en la que se realizó el sistema de visualización de este proyecto [19].

En términos generales, el objetivo de los subsistemas de un manipulador es transportar controladamente al órgano terminal, ya que con él se efectúa finalmente la tarea; pero para que esto se lleve a cabo, se debe imponer una posición, velocidad y aceleración a cada articulación. Por lo tanto, en Robótica, se definirá trayectoria como la historia en el tiempo de la posición, velocidad y aceleración del órgano terminal y, bajo la regla impuesta por el modelo matemático, se pueden mapear a éstas en un espacio articular.

Cada punto de la trayectoria está usualmente especificado en términos de una posición y orientación deseadas del órgano terminal, relativo a la base referenciada; cada uno de estos puntos es convertido a un conjunto de valores articulares mediante la aplicación de la cinemática inversa. El tiempo requerido por cada segmento de trayectoria es el mismo para cada desplazamiento articular, de tal manera que todas las

articulaciones alcanzarán su respectivo punto articular en el mismo tiempo, dando como resultado la posición cartesiana deseada en cada punto de la trayectoria.

Usualmente es deseable que el movimiento del manipulador sea suavizado, es decir, que las fuerzas inducidas a los eslabones y otros elementos no generen momentos superiores a los ejercidos por los actuadores. En nuestro caso, se desea que el extremo de los dedos del manipulador, para fines de simulación o control, alcance el punto  $P_2$  desde el punto  $P_1$  en un tiempo  $T$ . Comenzando con una velocidad inicial  $V_0 = 0$  y terminando con una velocidad final  $V_f = 0$ . Además, se requiere de un perfil en su desaceleración tal que se tenga un período de aceleración adecuado, se alcance una aceleración nula y, posteriormente, un período de desaceleración. Tales perfiles de posición, velocidad y aceleración se muestran en la figura 3.7.

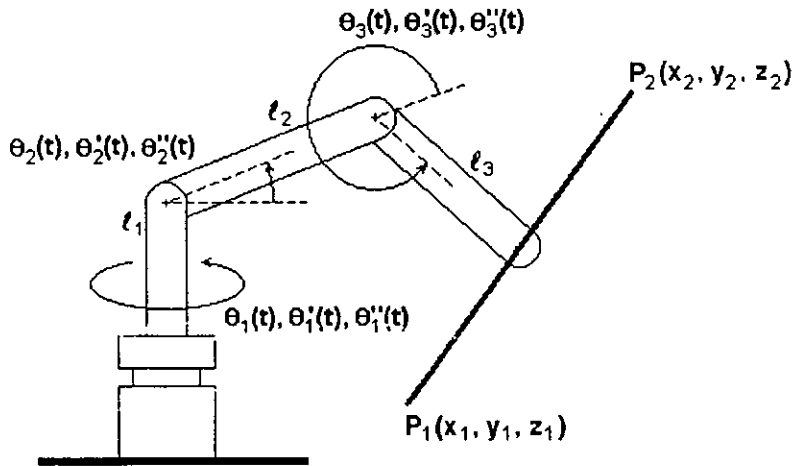


Figura 3.6 Representación de trayectoria.

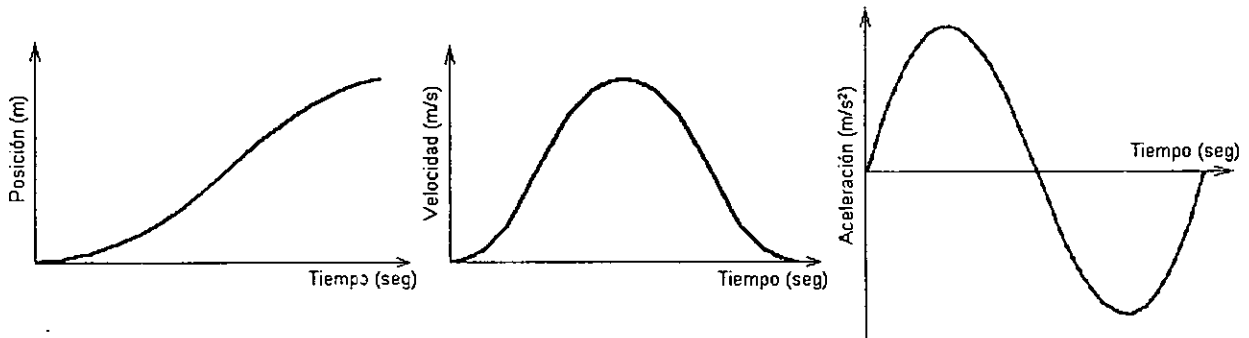


Figura 3.7 Gráficas de posición, velocidad y aceleración variables con el tiempo.

El polinomio que se utilizará para describir esos perfiles es el de quinto grado sin período estacionario, ya que contiene seis coeficientes que se tienen que determinar con la ayuda de su primer y segunda derivada, para la velocidad y aceleración, respectivamente y, además, seis condiciones iniciales y finales: dos para la posición, dos para la velocidad y las últimas dos para la aceleración en el inicio y fin del recorrido, esto es:

$$q(t) = c_0 + c_1t + c_2t^2 + c_3t^3 + c_4t^4 + c_5t^5$$

que define la distancia recorrida por el órgano terminal en función del tiempo.

Sus derivadas son:

$$q(t) = c_1 + 2c_2t + 3c_3t^2 + 4c_4t^3 + 5c_5t^4$$

que define el perfil de velocidad de la trayectoria que seguirá el órgano terminal en función del tiempo, y:

$$\dot{q}(t) = 2c_2 + 6c_3t + 12c_4t^2 + 20c_5t^3$$

que define el perfil de aceleración de la trayectoria que seguirá el órgano terminal en función del tiempo.

Sus restricciones están dadas por la valuación de sus coeficientes con las condiciones de frontera  $t = 0$  y  $t = t_f$ .

$$q(0) = c_0 = q_0$$

$$\dot{q}(0) = c_1 = \dot{q}_0$$

$$\ddot{q}(0) = 2c_2 = \ddot{q}_0$$

$$q(t_f) = c_0 + c_1t_f + c_2t_f^2 + c_3t_f^3 + c_4t_f^4 + c_5t_f^5 = q_f$$

$$\dot{q}(t_f) = c_1 + 2c_2t_f + 3c_3t_f^2 + 4c_4t_f^3 + 5c_5t_f^4 = \dot{q}_f$$

$$\ddot{q}(t_f) = 2c_2 + 6c_3t_f + 12c_4t_f^2 + 20c_5t_f^3 = \ddot{q}_f$$

donde  $t_f = T$  es el tiempo total empleado en el recorrido. Estas ecuaciones indican que en el tiempo  $t = 0$ , se tiene un desplazamiento nulo y se parte del reposo. En el tiempo  $t = t_f = T$  se ha alcanzado el último punto recorriendo toda la distancia y se llega al reposo.

Estas restricciones especifican un conjunto lineal de seis ecuaciones con seis incógnitas, cuya solución es:

$$c_0 = q_0$$

$$c_1 = \dot{q}_0$$

$$c_2 = \frac{\ddot{q}_0}{2}$$

$$c_3 = \frac{20q_f - 20q_0 - (8\dot{q}_f + 12\dot{q}_0)t_f - (3\ddot{q}_0 - \ddot{q}_f)t_f^2}{2t_f^3}$$

$$c_4 = \frac{30q_0 - 30q_f + (14\dot{q}_f + 16\dot{q}_0)t_f + (3\ddot{q}_0 - 2\ddot{q}_f)t_f^2}{2t_f^4}$$

$$c_5 = \frac{12q_f - 12q_0 - (6\dot{q}_f + 6\dot{q}_0)t_f - (\ddot{q}_0 - \ddot{q}_f)t_f^2}{2t_f^5}$$

Sustituyendo en el polinomio de quinto grado y sus derivadas se tiene:

$$q(t) = q_f \left[ 10 \left( \frac{t}{t_f} \right)^3 - 15 \left( \frac{t}{t_f} \right)^4 + 6 \left( \frac{t}{t_f} \right)^5 \right]$$

$$q(t) = \frac{q_f}{t_f} \left[ 30 \left( \frac{t}{t_f} \right)^2 - 60 \left( \frac{t}{t_f} \right)^3 + 30 \left( \frac{t}{t_f} \right)^4 \right]$$

$$q(t) = \frac{q_f}{t_f^2} \left[ 60 \left( \frac{t}{t_f} \right) - 180 \left( \frac{t}{t_f} \right)^2 + 120 \left( \frac{t}{t_f} \right)^3 \right]$$

Estas ecuaciones sirven para determinar la cinemática de los eslabonamientos que componen a cada uno de los dedos del manipulador; además, sirven de punto de partida para el análisis de posición, velocidad y aceleración de las articulaciones en cada punto de su trayectoria. Al emplear estos datos en el estudio de la cinemática, ya sea directa o inversa, se pueden determinar todas las características del movimiento del manipulador y sus componentes y eslabonamientos.

### 3.2 Análisis de mecanismos

La sencillez es una marca distintiva del buen diseño. La menor cantidad de partes que puedan efectuar un trabajo, generalmente constituye la solución menos costosa y más confiable. Por lo tanto, el mecanismo de cuatro barras debe colocarse entre las primeras soluciones para problemas de control de movimiento.

A fin de solucionar el problema del movimiento relativo que existe entre las articulaciones interfalángicas proximal y distal, mencionado en la **sección 2.1**, se optó por un mecanismo de cuatro barras para dotar de movimiento a la falange distal de los dedos índice, medio y anular. De esta forma, podemos prescindir de un accionador con su correspondiente sistema de control para cada una de esas articulaciones.

En las **figuras 3.8 (a) y (b)**, se muestran las configuraciones de *paralelogramo* y *antiparalelogramo* del mecanismo de cuatro barras, respectivamente. El primero es muy útil, ya que duplica exactamente el movimiento de la manivela impulsora en la manivela impulsada, siempre y cuando las longitudes de estos dos eslabones sean las mismas. El eslabonamiento de antiparalelogramo es también una doble manivela, pero la manivela de salida tiene un desplazamiento angular diferente al de la manivela de entrada.

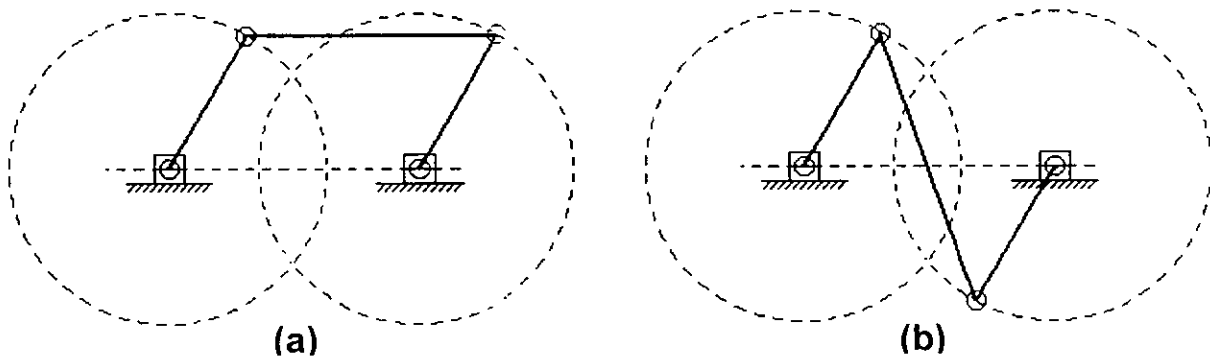


Figura 3.8 Formas de paralelogramo y antiparalelogramo.

Para el análisis de este tipo de mecanismos se parte de la configuración empleada en el eslabonamiento de paralelogramo con un grado de libertad.

En la **figura 3.9** se puede observar que el *eslabón d* es el marco o base y generalmente es estacionario. El *eslabón a* es el motriz, el cual puede girar completamente o puede oscilar. En cualquiera de los casos, el *eslabón c* oscila. Si el *eslabón a* gira completamente, entonces el mecanismo transforma el movimiento rotatorio en movimiento oscilatorio. Si la manivela (*eslabón a*) oscila, entonces el mecanismo multiplica el movimiento oscilatorio.

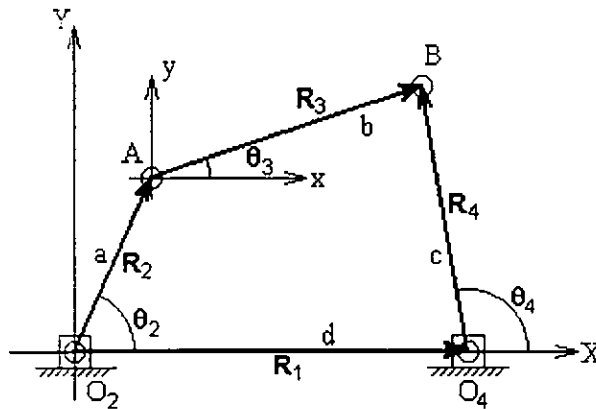


Figura 3.9 Polígono cerrado de vectores para un mecanismo de cuatro barras.

Si el mecanismo de cuatro barras articuladas se diseña de manera que el *eslabón a* pueda girar completamente y se hace que el *eslabón c* sea motriz, entonces ocurrirán puntos muertos, en los cuales el mecanismo se detiene completamente. En general, para una mejor transmisión de la fuerza dentro del mecanismo, los *eslabones b* y *c* deberán ser casi perpendiculares a lo largo de todo el ciclo de movimiento. Si el ángulo de transmisión se desvía de  $+90^\circ$  ó  $-90^\circ$  en más de  $45^\circ$  ó  $50^\circ$  aproximadamente, el eslabón tiende a pegarse o atorarse debido a la fricción en las uniones o articulaciones; los *eslabones b* y *c* también tienden a alinearse y se podrían trabar. Es especialmente importante verificar los ángulos de transmisión cuando los mecanismos articulados se diseñan para operar cerca de los puntos muertos [7].

Obsérvese que las direcciones de los vectores de posición se eligen de modo que se puedan definir sus ángulos. Por definición, *el ángulo motriz de un vector se mide siempre a una referencia inicial (o principio)*. Conviene que el ángulo  $\theta_4$  se mida con respecto al eje fijo en  $O_4$ , ya que el vector  $R_4$  tiene ahí su principio y gira con respecto al eje X. Así mismo, conviene que el ángulo  $\theta_3$  se mida en el punto donde se unen los *eslabones a* y *b*, ya que ahí principia el vector  $R_3$ . Una lógica similar dicta la disposición de los vectores  $R_1$  y  $R_2$ . Obsérvese que el eje X se toma por conveniencia a lo largo del *eslabón d* y el origen del sistema de coordenadas global, en el punto  $O_2$ , principio del vector  $R_2$ , del *eslabón de entrada*. Esta elección de las direcciones (ángulos y sentidos) de los vectores, que indican sus puntas de flecha, conducen a la siguiente ecuación vectorial o polígono de vectores.

$$R_2 + R_3 - R_4 - R_1 = 0$$

Una *notación alterna* para estos vectores de posición es utilizar como subíndices las letras que marcan sus extremos, *terminación* y *principio* (en ese orden). El segundo

subíndice suele omitirse, por convención, si es el que representa al origen del sistema coordinado global (el punto  $O_2$ ):

$$R_A + R_{BA} - R_{BO_4} - R_{O_4} = 0$$

A continuación se introduce la notación de números complejos para el vector de posición. Con el fin de simplificar la notación y minimizar el uso de subíndices, se denotarán las longitudes escalares de los cuatro eslabones como  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ ; como se indican en la **figura 3.9**. La ecuación queda entonces como:

$$ae^{j\theta_2} + be^{j\theta_3} - ce^{j\theta_4} - de^{j\theta_1} = 0$$

Éstas son tres formas de la misma ecuación vectorial, y como tales pueden resolverse para evaluar incógnitas. En principio, existen cuatro variables en esta última ecuación: los cuatro ángulos de eslabón. Las longitudes de los eslabones son constantes en este mecanismo en particular. Asimismo, el valor del ángulo del *eslabón 1* ( $d$ ) está fijo (en cero) ya que se trata del eslabón de fijación o base. Así que  $\theta_2$  es la *variable independiente* que controlaremos con un dispositivo de impulsión, que en nuestro caso será el tendón de la falange medial. Esto deja por hallar los ángulos de los *eslabones 3* ( $b$ ) y *4* ( $c$ ). Necesitamos expresiones algebraicas que definan a  $\theta_3$  y  $\theta_4$  como funciones sólo de las longitudes de eslabón constantes y el ángulo de entrada  $\theta_2$ . Las expresiones serán de la forma:

$$\theta_3 = f(a, b, c, d, \theta_2)$$

$$\theta_4 = g(a, b, c, d, \theta_2)$$

y se resolverán simultáneamente para encontrar las longitudes de los eslabones.

Para resolver la ecuación vectorial de números complejos, de forma polar, se deben introducir los *equivalentes de Euler* ( $e^{\pm j\theta} = \cos \theta \pm j \operatorname{sen} \theta$ ) en vez de los términos en  $e^{j\theta}$ , y separar luego la ecuación vectorial resultante en forma cartesiana, en dos ecuaciones escalares que puedan resolverse simultáneamente para evaluar  $\theta_3$  y  $\theta_4$ . Al sustituir estos *equivalentes* en la ecuación de números complejos, queda:

$$a(\cos \theta_2 + j \operatorname{sen} \theta_2) + b(\cos \theta_3 + j \operatorname{sen} \theta_3) - c(\cos \theta_4 + j \operatorname{sen} \theta_4) - d(\cos \theta_1 + j \operatorname{sen} \theta_1) = 0$$

Esta ecuación puede separarse en sus partes real e imaginaria, y luego igualar a cero cada una.

Parte real:

$$a \cos \theta_2 + b \cos \theta_3 - c \cos \theta_4 - d \cos \theta_1 = 0$$

parte imaginaria:

$$ja \operatorname{sen} \theta_2 + jb \operatorname{sen} \theta_3 - jc \operatorname{sen} \theta_4 - jd \operatorname{sen} \theta_1 = 0$$

pero como  $\theta_1 = 0$ , tenemos para la parte real:

$$a \cos \theta_2 + b \cos \theta_3 - c \cos \theta_4 - d = 0$$

y, simplificando para la parte imaginaria:

$$a \operatorname{sen} \theta_2 + b \operatorname{sen} \theta_3 - c \operatorname{sen} \theta_4 = 0$$

Estas dos ecuaciones escalares pueden ser resueltas simultáneamente para evaluar  $\theta_3$  y  $\theta_4$ . Resolver este sistema de dos ecuaciones trigonométricas simultáneas es un método directo pero tedioso. Alguna sustitución de identidades trigonométricas simplificará las expresiones. El primer paso es reescribir estas ecuaciones con el fin de aislar una de las dos incógnitas en el extremo izquierdo:



$$b \cos \theta_3 = d + c \cos \theta_4 - a \cos \theta_2$$

$$b \sin \theta_3 = c \sin \theta_4 - a \sin \theta_2$$

A continuación se elevan al cuadrado ambos lados de las dos ecuaciones y se suman entre sí:

$$b^2 (\sin^2 \theta_3 + \cos^2 \theta_3) = (-a \sin \theta_2 + c \sin \theta_4)^2 + (-a \cos \theta_2 + c \cos \theta_4 + d)^2$$

Nótese que la expresión entre paréntesis en el lado izquierdo es igual a 1, y elimina así a  $\theta_3$  de la ecuación. Sólo queda  $\theta_4$ , la cual puede ahora ser despejada y evaluada:

$$b^2 = (-a \sin \theta_2 + c \sin \theta_4)^2 + (-a \cos \theta_2 + c \cos \theta_4 + d)^2$$

El lado derecho debe ser desarrollado agrupando sus términos:

$$b^2 = a^2 + c^2 + d^2 - 2ad \cos \theta_2 + 2cd \cos \theta_4 - 2ac(\sin \theta_2 \sin \theta_4 + \cos \theta_2 \cos \theta_4)$$

Para simplificar más esta ecuación, se definen las constantes  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  en términos de las longitudes de eslabón constantes en la ecuación anterior:

$$K_1 = \frac{d}{a} \quad K_2 = \frac{d}{c} \quad K_3 = \frac{a^2 - b^2 + c^2 + d^2}{2ac}$$

por lo que:

$$K_1 \cos \theta_4 - K_2 \cos \theta_2 + K_3 = \sin \theta_2 \sin \theta_4 + \cos \theta_2 \cos \theta_4$$

Si se introduce la identidad  $\cos(\theta_2 - \theta_4) = \sin \theta_2 \sin \theta_4 + \cos \theta_2 \cos \theta_4$ , se obtiene la forma conocida como *ecuación de Freudenstein* [6], [7]:

$$K_1 \cos \theta_4 - K_2 \cos \theta_2 + K_3 = \cos(\theta_2 - \theta_4)$$

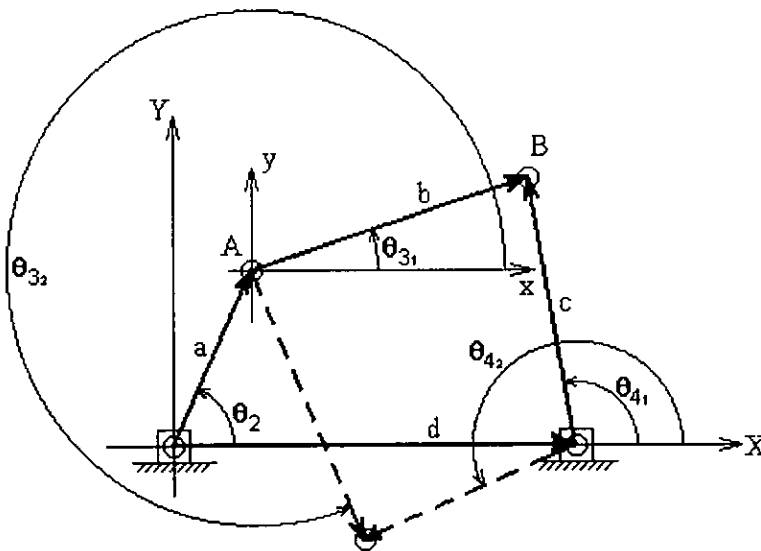
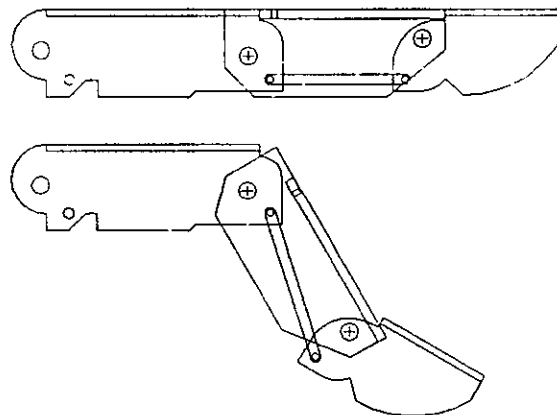


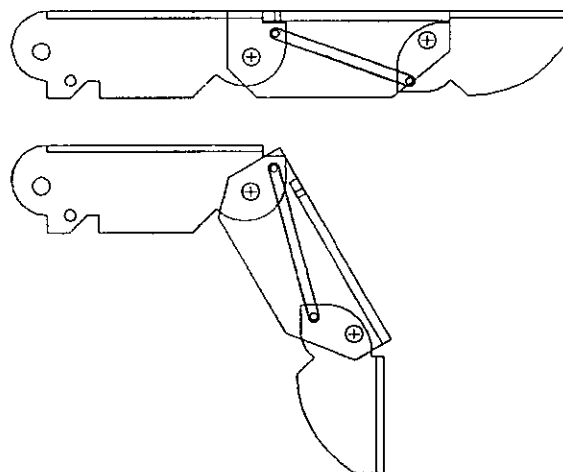
Figura 3.10 Configuraciones abierta y cruzada para un mecanismo de cuatro barras.

En la **figura 3.10** se muestran las soluciones abierta y cruzada (paralelogramo y antiparalelogramo) para un eslabonamiento de cuatro barras o de *Grashof*. Los términos “cruzada” y “abierta” se basan en la consideración de que el *eslabón de entrada 2*, para el cual está definido  $\theta_2$ , se coloca en el primer cuadrante (es decir,  $0 < \theta_2 < \pi/2$ ). Un eslabonamiento de Grashof se denomina entonces **cruzado**, si los dos eslabones adyacentes al más corto se cruzan o atraviesan entre sí, y **abierto** si no se entrecruzan en esa posición. Nótese que la configuración del eslabonamiento, cruzada o abierta, sólo depende de la forma en que están ensamblados los eslabones. Dependerá de nuestras necesidades determinar cuál de las dos configuraciones nos conviene.

Al realizar el análisis del tipo de movimiento que efectuarán las articulaciones interfalángicas proximal y distal, tomando como eslabón fijo (*eslabón 1*) a la falange medial, se tiene que cuando la falange proximal (*eslabón 2*) se flexiona un determinado ángulo ( $\theta_2$ ) para acercarse a la falange medial, la falange distal (*eslabón 4*) se debe flexionar también, aproximándose a la falange medial, dos tercios de ese ángulo. Las **figuras 3.11** y **3.12** muestran las simulaciones de movimiento de éstas articulaciones al emplear los dos tipos de configuraciones (abierta y cruzada respectivamente) para el eslabonamiento de Grashof.



*Figura 3.11 Simulación para eslabonamiento abierto.*



*Figura 3.12 Simulación para eslabonamiento cruzado.*

Como puede apreciarse, la estructura abierta no corresponde al tipo de movimiento que se desea realizar. También puede observarse, en la **figura 3.12**, que al emplear un eslabonamiento cruzado o de antiparalelogramo se consigue un movimiento similar al que realiza una mano humana.

Una vez seleccionado el tipo de estructura, el problema se enfoca en determinar las longitudes y ángulos que ésta llevará. Aunque hay que considerar que se tiene como dato la longitud del *eslabón 1* (falange medial), ya que es un valor definido previamente que se empleará en los dedos índice, medio y anular, y que es  $d = 3 \text{ cm}$ . Por otro lado, hay que tomar en cuenta que, ya que el ancho de cada falange es de un centímetro y medio, las longitudes de lo que corresponderá a los *eslabones 2 y 4*, no deberán exceder (como máximo) de la mitad de esta dimensión ( $0.75 \text{ cm}$ ), ya que se supone al eje de rotación de la articulación interfalángica, visto en dos dimensiones, a la mitad de la falange, en lo que a ancho se refiere. Sin embargo, como la orientación de estos eslabones con respecto al *eslabón 1* no es perpendicular, se permite cierto margen de excedencia con respecto a su longitud.

A fin de determinar todas estas variables ( $a, b, c, \theta_2$  y  $\theta_4$ ), se definieron valores para los dos ángulos y, a través de la ecuación de Freudenstein [6 y 7], se determinaron valores para las variables  $K_1, K_2$  y  $K_3$ , para después determinar las longitudes de los eslabones. Para esto, se asignan tres valores para  $\theta_2$  y tres valores para  $\theta_4$ , a fin de obtener un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas. La diferencia entre el primer y tercer valor para  $\theta_2$  deberá ser de  $90^\circ$ , mientras que para  $\theta_4$  será de  $60^\circ$  como se indicó anteriormente (dos tercios del valor de  $\theta_2$ ). El segundo valor para ambos ángulos será la mitad del rango correspondiente.

Basados en la **figura 3.12** se puede suponer que los valores para  $\theta_2$  pueden estar entre los  $0^\circ$  y los  $90^\circ$ , mientras que para  $\theta_4$  podrán situarse entre los  $220^\circ$  y los  $350^\circ$ . Como este método no ofrece una forma rápida de llegar a una solución que se adapte a nuestras condiciones dimensionales, fue necesario proponer diversos conjuntos de valores para los dos ángulos hasta conseguir una combinación que aportara valores más accesibles y aplicables para  $a, b$  y  $c$ . Estos conjuntos de valores deben ser de la forma:

$\theta_2$	$\theta_4$
30	335
60	290
90	245

$\theta_2$	$\theta_4$
15	325
45	280
75	235

Tabla 3.2 Combinación de valores angulares para el cálculo de longitudes en eslabones.

De estas dos combinaciones, la segunda es la que corresponde a los valores finales. Con base en ésta, la obtención de las longitudes de los eslabones para el mecanismo se muestra a continuación:

$$K_1 \cos(325^\circ) - K_2 \cos(15^\circ) + K_3 = \cos(15^\circ - 325^\circ)$$

$$K_1 \cos(280^\circ) - K_2 \cos(45^\circ) + K_3 = \cos(45^\circ - 280^\circ)$$

$$K_1 \cos(235^\circ) - K_2 \cos(75^\circ) + K_3 = \cos(75^\circ - 235^\circ)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, se obtiene:

$$K_1 = 4.694148, \quad K_2 = 7.007702, \quad K_3 = 3.566487$$

Retomando las relaciones de correspondencia para las longitudes y despejando:

$$K_1 = \frac{d}{a} \quad K_2 = \frac{d}{c} \quad K_3 = \frac{a^2 - b^2 + c^2 + d^2}{2ac}$$

$$a = \frac{d}{K_1} \quad c = \frac{d}{K_2} \quad b = \sqrt{d^2 + a^2 + c^2 - 2acK_3}$$

Sustituyendo a  $d$  se obtiene:

$$a = 0.639094 \text{ cm} \quad b = 2.764083 \text{ cm} \quad c = 0.4281004 \text{ cm} \quad d = 3 \text{ cm}$$

La siguiente figura muestra una aproximación de la forma y disposición que conformarán los eslabones del mecanismo con respecto a las falanges, tomando como ejemplo al dedo índice.

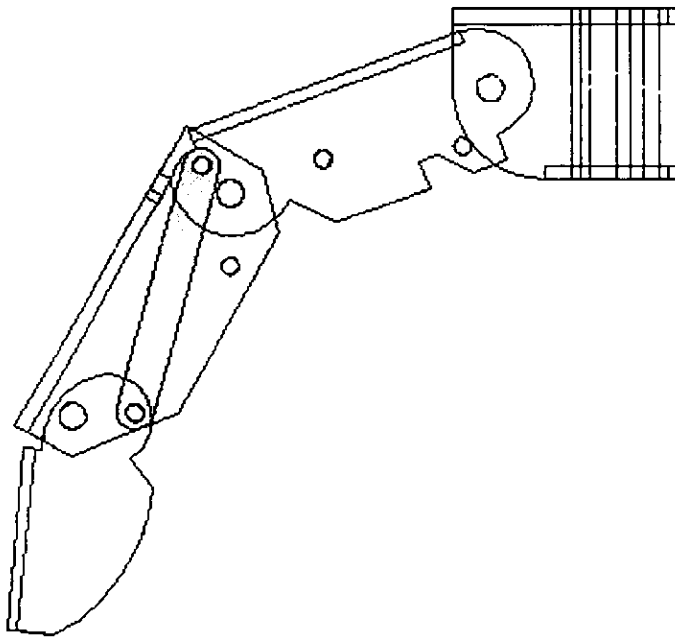


Figura 3.13 Solución con mecanismo de cuatro barras en el dedo índice.

### 3.3 Transmisión (tendones)

En la **sección 2.3** se vió que en un actuador directo no se tiene una transmisión mecánica entre el motor o impulsor y el eslabón del robot que es impulsado. El actuador indirecto requiere enlaces mecánicos para la transmisión de fuerza motriz. Con frecuencia involucra una fuente remota de poder y puede requerir una transmisión mecánica a través de una distancia considerable. Sin embargo, el término "indirecto" no

significa que el actuador no se pueda colocar en la articulación. Existen unidades completas para robots que incluyen un motor, un reductor y dispositivos para la medición de la posición y la velocidad; la instalación de estas unidades en las articulaciones se ha denominado sistema de impulso casi directo (QDD).

En muchas aplicaciones de robótica, es difícil controlar directamente el torque en una articulación, aunado al problema del tamaño que debe tener el actuador para producir fuerzas equivalentemente grandes. Una solución práctica se basa en el uso de *redes de actuadores* para conducir estas fuerzas desde el actuador hasta la articulación correspondiente. Tal red típicamente consiste en alguna combinación de cadenas, engranes, bandas o tendones (cables).

Para impulsar articulaciones en forma remota, se pueden emplear dispositivos, tales como engranes, tornillos sinfín o impulsores armónicos, cables, bandas y cadenas, mecanismos de enlace y tornillos de bolas. Una de las cualidades de las bandas, cables y cadenas es que poseen la habilidad de combinar la transmisión con alguna reducción.

Si los actuadores se pueden colocar cerca de la base existe una doble ganancia: el peso en el manipulador se reduce y se disminuye la deflexión de los dedos.

Las transmisiones por cadena se encuentran por lo general en los grandes manipuladores SCARA en los que el accionador del codo está montado en la base. Las máquinas más pequeñas pueden usar transmisiones de banda o de cable. Incluso con un mecanismo tensionante, todos estos dispositivos están sujetos a cierto juego mecánico o deslizamiento debido a la elongación del medio conductor del impulso. Las cadenas y bandas dentadas son impulsores positivos, mientras que un cable o banda lisa puede "barrerse" después de funcionar durante un tiempo prolongado.

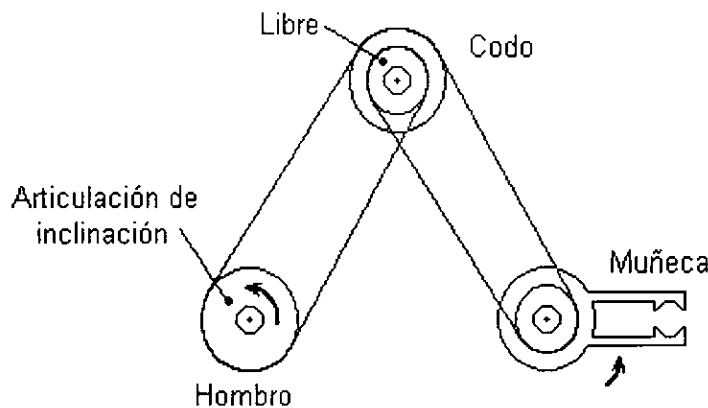


Figura 3.14 Impulsor por medio de cables.

Los tendones ofrecen ventajas en términos de peso y flexibilidad; sin embargo, ellos pueden complicar la cinemática de un mecanismo. El problema básico es describir cómo la aplicación de fuerzas al final de un tendón produce momentos aplicados en la correspondiente articulación.

Los impulsores de cable que se muestran en la **figura 3.14** inclinan el codo bajo el control de un motor montado en la base (hombro). La polea del codo está libre para girar de manera que el ángulo del codo no afecta el ángulo de inclinación de la muñeca.

Consideremos un dedo que es accionado por el juego de tendones inelásticos, mostrados en la **figura 3.15**. Cada tendón está conectado a un generador de fuerza, como lo es un servomotor. Por simplicidad, asumimos que cada par tendón/actuador está conectado entre la base de la mano y el ensamble en el dedo, o entre dos conexiones en los dedos. Las interconexiones entre tendones no son recomendables. Lo que se busca es demostrar cómo las fuerzas aplicadas al inicio de los tendones (en el servomotor) son proporcionales a los torques aplicados en las articulaciones.

Nótese además cómo cada tendón no está aplicado a un solo eslabonamiento, lo que puede producir el accionamiento de varias articulaciones. Esto ocurre porque la tensión aplicada al tendón ejerce una fuerza a todo lo largo de éste sobre cualquier parte del o los mecanismos que lo contengan.

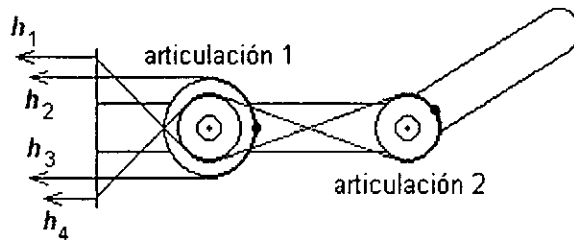


Figura 3.15 Dedo accionado por tendones inelásticos.

La ruta de cada tendón se modela como una *función de elongación*,  $h_i$ , se calcula el desplazamiento del extremo del tendón como una función de los ángulos de la articulación del dedo. Para la disposición mostrada en la **figura 3.15**, la función de elongación es la siguiente:

$$h_i(\theta) = \ell_i \pm r_{i_1} \theta_1 \pm \dots \pm r_{i_n} \theta_n$$

donde  $\ell_i$  es la longitud nominal (en  $\theta = 0$ ) y  $r_{ij}$  es el radio de la polea en la  $j$ -ésima articulación. El signo depende de si el tendón se alarga (+) o acorta (-) cuando la dirección de rotación del eslabón cambia.

Una vez que la función de elongación del tendón ha sido calculada, se determinan las relaciones de correspondencia entre las fuerzas en el tendón y los torques en la articulación por el estudio de conservación de la energía.

Sea  $\mathbf{e} = \mathbf{h}(\theta)$  la representación vectorial de la elongación del tendón para un sistema con  $p$  tendones, definimos la matriz  $\mathbf{P}(\theta)$  como:

$$\mathbf{P}(\theta) = \in \mathfrak{R}^{p \times n} = \frac{\partial \mathbf{h}^T(\theta)}{\partial \theta}$$

Entonces:

$$\mathbf{e}(t) = \frac{\partial \mathbf{h}(\theta) \cdot \theta}{\partial \theta} = \mathbf{P}^T(\theta) \cdot \theta$$

Ya que el trabajo realizado por los tendones es equivalente al realizado por los dedos (en ausencia de fricción u otras pérdidas), se puede usar el análisis de conservación de la energía para concluir:

$$\tau = P(\theta) \cdot f$$

donde  $f$  es el vector de fuerzas aplicadas a los extremos de los tendones y  $\tau$  es el torque requerido por los motores. La matriz  $P(\theta)$  es llamada *matriz de acoplamientos*.

Este análisis puede extenderse para tendones elásticos. Asumiendo que los tendones son completamente libres de deslizarse a lo largo de los dedos, además de poseer una masa despreciable, se puede eliminar la necesidad de un análisis dinámico.

Ya que los tendones son dispositivos unidimensionales, las relaciones de fuerza derivadas para tendones elásticos también pueden contener el caso cuando los tendones son inelásticos. Esto se debe a que en el instante en que se aplica la fuerza en el extremo del tendón por el actuador y considerando que el tendón tiene una masa despreciable, el tendón se alargará inmediatamente hasta que la fuerza debida al estiramiento del tendón se balancee con la fuerza aplicada por el actuador, esto es, la reacción del tendón no será instantánea, pero al final, cuando se establezca su elasticidad, en la articulación se tendrá la misma magnitud de fuerza que la aplicada por el actuador. Por esto, es posible controlar la posición en el extremo del tendón cuando no existe algún objeto a manipular que ejerza una fuerza opuesta a la proporcionada por el servomotor, lo que provocaría una elongación proporcional en el tendón.

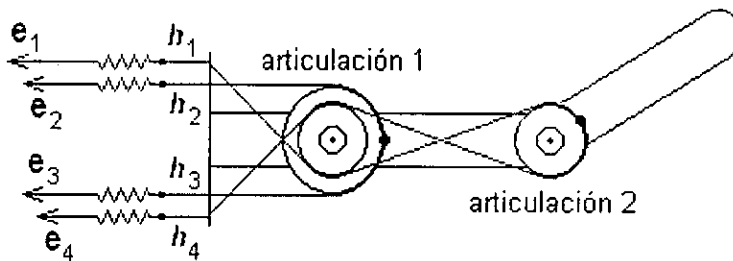


Figura 3.16 Dedo accionado por tendones elásticos.

Para calcular esta elongación, definimos a  $e_i$  como la elongación del tendón producida por el actuador, y sea  $h_i(\theta)$  la elongación del tendón debida a la reacción proporcionada por el mecanismo. Asumiendo que cuando  $\theta = 0$  y  $e_i = 0$  el tendón se encuentra libre de tensión. La fuerza aplicada a los tendones está dada por:

$$f_i = E_i e_i [h_i(0) - h_i(\theta)]^T$$

donde  $E_i$  es la rigidez del tendón (módulo de elasticidad) y  $e_i$  se define como:

$$e_i = (\% \text{elongación})(\text{longitud inicial}_i - \text{longitud final}_i)$$

$$e_i = \% \varepsilon (l_{i_i} - l_{f_i})$$

Sea  $K$  la matriz diagonal de los módulos de elasticidad de los tendones,  $E_j$ , tenemos que, para un sistema de tendones elásticos con elongación  $e_i$  :

$$f = K \cdot e [h(0) - h(\theta)]^T$$

Sustituyendo la ecuación de  $h_i(\theta)$  descrita al inicio, podemos obtener la matriz de fuerzas correspondientes a cada dedo accionado por tendones elásticos:

$$f_i = E_i \cdot e_i (-1)^{(\pm r_{i_1} \theta_1 \pm \dots \pm r_{i_n} \theta_n)}$$

Se buscó que los tendones fueran resistentes y lo suficientemente flexibles para dar las vueltas necesarias alrededor de las articulaciones. Los materiales seleccionados fueron: cuerda para pescar de nylon 6/6 (elástico), o alambre flexible de acero de bajo calibre (inelástico) sólo si se requiere que el manipulador trabaje bajo condiciones de altas temperaturas o de cargas elevadas. Por otro lado, la selección correcta de un material para los tendones es de suma importancia, ya que se busca que sirvan como fusibles mecánicos para que éstos sean los primeros en fallar antes de que se dañe alguna otra pieza o elemento del sistema. Bajo esta condición, los tendones de acero son poco aptos. Así, la fuerza máxima que puede soportar el manipulador está limitada por la resistencia a la tensión de los tendones de nylon.

Algunos valores característicos de este material son:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| - Resistencia a la tensión:            | <b>81.361 MPa</b>            |
| - Densidad:                            | <b>1.14 g/cm<sup>3</sup></b> |
| - Módulo de elasticidad:               | <b>3275.125 MPa</b>          |
| - Porcentaje de elongación mecánica:   | <b>5 - 25 %</b>              |
| - Coef. de expansión térmica (1/°C):   | <b>90X10<sup>-6</sup></b>    |
| - Temperatura máxima de servicio (°C): | <b>105°C a 1.82028 MPa</b>   |

En la **figura 3.17** se muestra la disposición de cada uno de los tendones dentro de la mano, así como sus puntos de enlace con las articulaciones, los ejes de rotación de éstas y los ejes de reorientación de trayectoria de los tendones, donde éstas son requeridas.

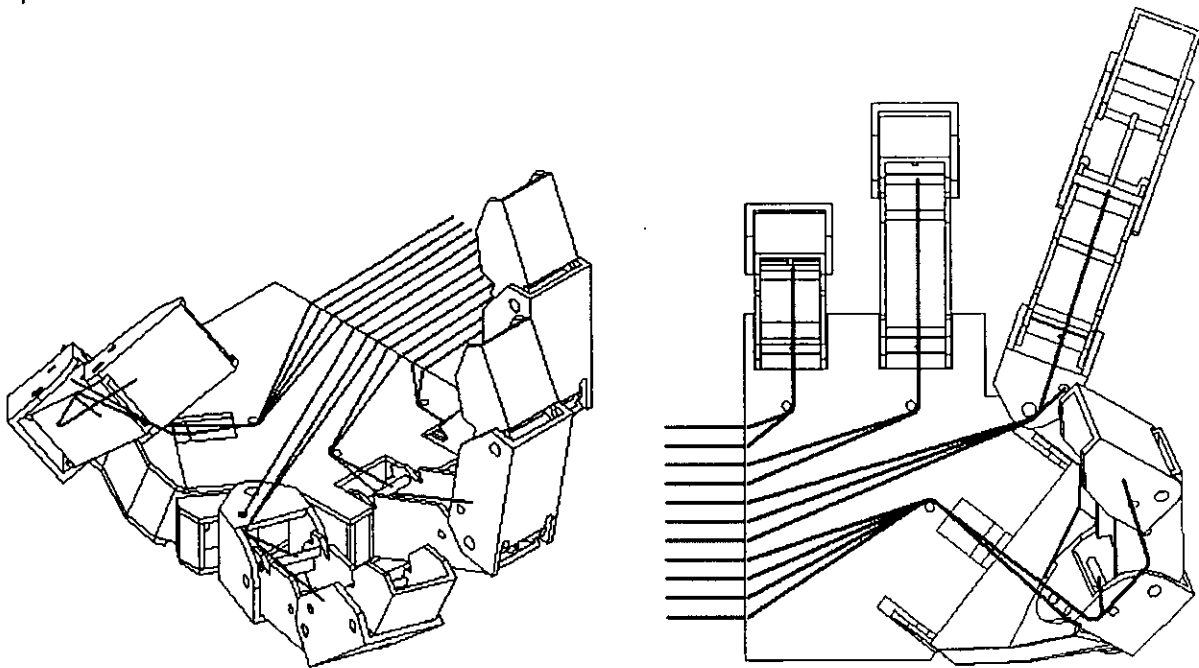


Figura 3.17 Vistas de la disposición de los tendones.



Realizando los cálculos correspondientes para determinar la fuerza real que será aplicada en cada articulación con respecto a la proporcionada por los actuadores, para tendones elásticos (como son los de nylon), se tiene la matriz de fuerzas para cada uno de los dedos (empleando los subíndices **A** para el índice, **B** para el pulgar, y **C** y **D** para el medio y el anular respectivamente) como sigue:

$$f_A = \begin{bmatrix} 3275.125 & 0 & 0 \\ 0 & 3275.125 & 0 \\ 0 & 0 & 3275.125 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.25(l_i - l_f)_1 \\ 0.25(l_i - l_f)_2 \\ 0.25(l_i - l_f)_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\pi}{2}r_{11} + \frac{\pi}{2}r_{21} + \frac{\pi}{6}r_{31} \\ \frac{\pi}{2}r_{22} + \frac{\pi}{6}r_{32} \\ \frac{\pi}{6}r_{33} \end{bmatrix}$$

$$f_B = \begin{bmatrix} 3275.13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3275.13 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3275.13 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3275.13 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.25(l_i - l_f)_1 \\ 0.25(l_i - l_f)_2 \\ 0.25(l_i - l_f)_3 \\ 0.25(l_i - l_f)_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\pi}{2}r_{11} + \frac{\pi}{4}r_{21} + \frac{\pi}{2}r_{31} + \frac{\pi}{2}r_{41} \\ \frac{\pi}{4}r_{22} + \frac{\pi}{2}r_{32} + \frac{\pi}{2}r_{42} \\ \frac{\pi}{2}r_{33} + \frac{\pi}{2}r_{43} \\ \frac{\pi}{2}r_{44} \end{bmatrix}$$

$$f_C = \begin{bmatrix} 3275.125 & 0 \\ 0 & 3175.125 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.25(l_i - l_f)_1 \\ 0.25(l_i - l_f)_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\pi}{2}r_{11} + \frac{\pi}{2}r_{21} \\ \frac{\pi}{2}r_{22} \end{bmatrix}$$

$$f_D = \begin{bmatrix} 3275.125 & 0 \\ 0 & 3175.125 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.25(l_i - l_f)_1 \\ 0.25(l_i - l_f)_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\pi}{2}r_{11} + \frac{\pi}{2}r_{21} \\ \frac{\pi}{2}r_{22} \end{bmatrix}$$

Los valores de la diferencia ( $l_i - l_f$ ) para cada tendón, así como los valores de los radios de giro para cada articulación, se incluyen en la siguiente tabla:

tendón	( $l_i - l_f$ )	articulación	$r_{ij}$
abductor - índice	<b>4.1</b>	abductor - índice	<b>8.8408</b>
proximal - índice	<b>12.35</b>	proximal - índice	<b>7.0711</b>
medial - índice	<b>12.05</b>	medial - índice	<b>16.2422</b>
proximal - medio	<b>11.2</b>	proximal - medio	<b>7.0711</b>
medial - medio	<b>11.15</b>	medial - medio	<b>16.2422</b>
proximal - anular	<b>11.65</b>	proximal - anular	<b>7.0711</b>
medial - anular	<b>10.7</b>	medial - anular	<b>16.2422</b>
metacarpo - pulgar	<b>15.7</b>	metacarpo - pulgar	<b>13.95</b>
abductor - pulgar	<b>9.65</b>	abductor - pulgar	<b>6.3218</b>
proximal - pulgar	<b>9.9</b>	proximal - pulgar	<b>4.2426</b>
distal - pulgar	<b>12.55</b>	distal - pulgar	<b>6.4031</b>

Tabla 3.3 Valores de ( $l_i - l_f$ ) y de radios de giro.

Sustituyendo estos datos en las ecuaciones matriciales descritas arriba, obtenemos:

$$f_A = \begin{bmatrix} 406980.5 & 155259.2 & 45671.17 \\ 417112.8 & 159124.7 & 46808.21 \\ 138474.7 & 52826.81 & 15539.57 \end{bmatrix} \quad f_B = \begin{bmatrix} 581455.1 & 299771.6 & 172127.9 & 129292.9 \\ 357391.2 & 184254.5 & 105798.4 & 79469.87 \\ 366650.1 & 189027.9 & 108539.3 & 81528.68 \\ 464793.8 & 239629.4 & 137592.7 & 103352.1 \end{bmatrix}$$

$$f_C = \begin{bmatrix} 335821.9 & 233964.9 \\ 334322.7 & 232920.5 \end{bmatrix} \quad f_D = \begin{bmatrix} 349314.7 & 243365.4 \\ 320829.8 & 223520.1 \end{bmatrix}$$

Lo que muestran estos resultados es lo siguiente. Los valores que se encuentran sobre la diagonal principal hacen referencia al valor de la fuerza para cada tendón y para cada articulación, mientras que el resto de los datos de la matriz representan los valores de las fuerzas inducidas en el resto de los tendones por el movimiento del tendón al que se refiere la diagonal, es decir, cuando se aplica cierta fuerza. Supongamos en el tendón del abductor del dedo índice, por la manera en la que fueron diseñadas las articulaciones, se generan fuerzas o tensiones en los otros tendones que intervienen en ese dedo, aún cuando la tensión no sea aplicada directamente en éstos. Esta fuerza inducida es también generadora de la *rotación inducida* a la que se hace referencia en la **sección 6.3** en la prueba sobre la veracidad de las posiciones angulares.

### 3.4 Reestablecimiento (resortes)

Como ya se mencionó, el manipulador antropomórfico será accionado por servomotores colocados en la base de la mano, controlados a través de una computadora usando una tarjeta que emplea un microprocesador 8031, la cual posee el programa que genera las frecuencias necesarias para su accionamiento. Los servomotores transmitirán su potencia y torque por medio de once tendones de nylon conectados a cada una de las articulaciones que corresponden a los once grados de libertad.

Una de las características de estos tendones es que están conectados en las articulaciones de tal forma que sólo proporcionan el movimiento de flexión en la mayoría de los dedos y de abducción en las articulaciones correspondientes del índice y del pulgar (ver **figura 2.1**); sin embargo, para estas articulaciones no hay forma de reestablecer su posición (extensión y aducción según corresponda), por lo que la forma en la que se decidió conseguir esto es colocando, en cada eje de rotación de las articulaciones donde se encuentre algún tendón, resortes helicoidales de torsión con la fuerza suficiente como para restablecer la posición de equilibrio de los dedos, pero sin oponerse demasiado a la fuerza aplicada por los actuadores, tanto como para impedir su flexión. Esta solución se propuso dado que la acción de manipular un objeto se basa, principalmente, en los movimientos de flexión de los dedos, apoyándose, cuando se requiere, de algunos movimientos de abducción, y no en los movimientos de extensión o aducción.

Al no requerirse una fuerza elevada para el restablecimiento de la extensión de los dedos y con el fin de no emplear energía eléctrica (en los servomotores) para proporcionar este movimiento, el uso de los resortes resulta una opción funcional, de bajo costo y muy práctica.

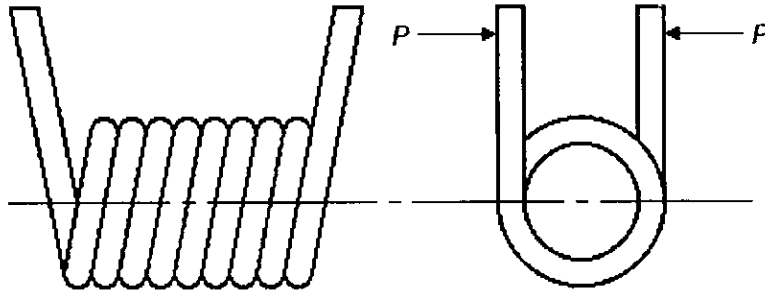


Figura 3.18 Resorte helicoidal a torsión.

El resorte helicoidal sujeto a torsión mostrado en la **figura 3.18**, tiene arrollamiento de mano izquierda y la dirección más favorable de la carga es como se muestra ahí, tendiendo a arrollar más al resorte; sin embargo, para el manipulador se conseguirán resortes de arrollamiento de mano derecha, es decir, aquellos cuya carga más favorable es hacia afuera (dirección opuesta a la mostrada en la figura). La formación en frío deja una tensión residual de compresión en el borde exterior de la sección rectangular. Por consiguiente, la carga normal del resorte debe ser tal que haga que éste se enrolle y por consiguiente produzca tensiones de tracción en la parte exterior del alambre. Si el resorte está montado sobre un eje, como es en el caso del manipulador, debe dejarse suficiente espacio libre para permitir la disminución del radio de la hélice al enrollar el resorte.

La deflexión de los resortes helicoidales a torsión es debida principalmente al momento flexionante, el cual corresponde al par de torsión con respecto al eje central del resorte. Por tanto, tendremos que la deflexión angular es:

$$\theta = \frac{ML}{EI} [\text{rad}]$$

Con respecto a la figura, el momento flexionante de acuerdo a cualquier sección es  $M = aP$  y la longitud  $L = 2\pi RN_a$  para  $N_a$  vueltas de radio medio  $R$ , donde  $a$  es el área de la sección transversal y  $P$  es la carga aplicada. Para un alambre circular de diámetro  $D$ , e  $I = \pi D^4 / 64$ , la deflexión angular es:

$$\theta = \frac{128 \cdot a N_a P R}{E D^4} [\text{rad}]$$

La *constante del resorte torsional* puede definirse como:

$$K_{\text{torsional}} = \frac{M}{\theta} = \frac{E D^4}{128 N_a R} \left[ \frac{N \cdot m}{\text{rad}} \right]$$

Si ignoramos el esfuerzo residual, el esfuerzo flexionante es:

$$\sigma = \frac{K_f M_c}{I}$$

donde  $c$  es la distancia desde el eje neutro a flexión hasta la fibra más alejada. Para una sección circular el esfuerzo flexionante es:

$$\sigma = \frac{32K_f aP}{\pi D^3}$$

El factor de concentración de esfuerzo  $K_f$ , el cual depende del diámetro del alambre y de la curvatura, puede obtenerse analizando al resorte como una viga curva. El esfuerzo máximo ocurre en la superficie interior. Para un índice de resorte  $C_k = 4$ , el factor de concentración de esfuerzo es  $K_f = 1.23$  y para  $C_k = 6$ ,  $K_f = 1.14$ , para extremos curvados o de gancho,  $K_f$  puede ser mayor. Para nuestro caso es posible y válido considerar un valor de  $K_f = 1.2$ , ya que los resortes empleados cuentan con un diámetro y un radio de curvatura reducidos.

Los datos de los resortes empleados son los siguientes:

$N_a$ =	número de vueltas =	7 vueltas
$D$ =	diámetro del alambre circular =	0.6 mm
$c$ =	radio de la sección transversal =	0.3 mm
$E$ =	módulo de elasticidad para acero inoxidable =	195 GPa

Aplicados estos valores a las ecuaciones, se obtiene:

$$R = (\text{Diámetro de curvatura})/2 - D = 5.6/2 - 0.6 = 2.2 \text{ mm} = 0.0022 \text{ m}$$

$$a = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.6)^2}{4} = 0.2827 [\text{mm}] = 2.827 \times 10^{-7} [\text{mm}]$$

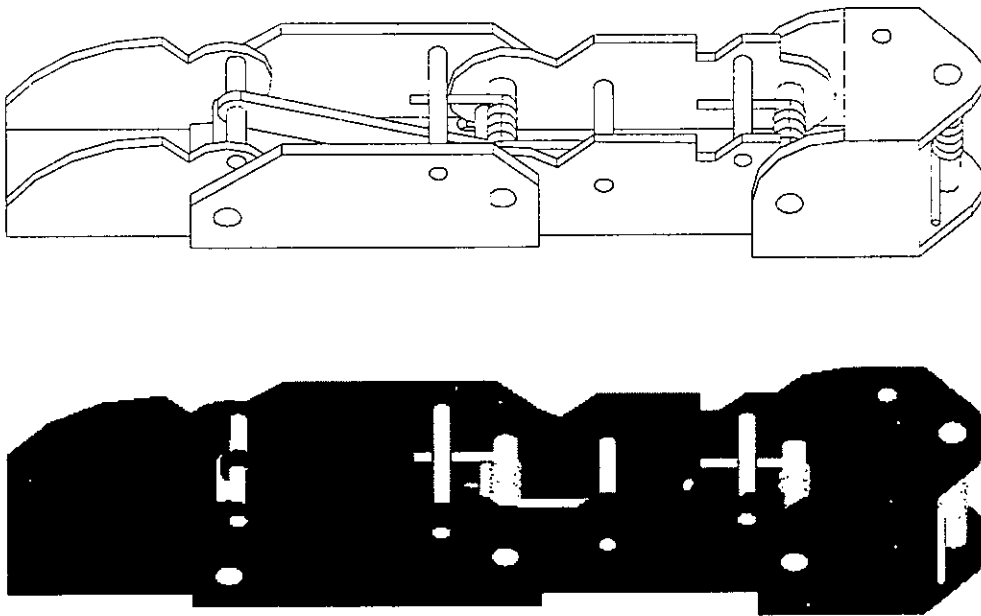
$$\theta = \frac{128 \cdot a N_a P R}{E D^4} = \frac{128 (2.827 \times 10^{-7}) (7) (0.0022) P}{4} = 2.20538 \times 10^{-5} \cdot P \left[ \frac{\text{rad} \cdot \text{m}}{\text{N}} \right]$$

donde  $P$  es la carga aplicada al resorte en Newtons [N], siendo diferente para cada una de las diversas articulaciones del manipulador.

$$K_{\text{torsional}} = \frac{M}{\theta} = \frac{a \cdot P}{\theta} = \frac{(2.8274 \times 10^{-7}) P}{2.20538 \times 10^{-5} \cdot P} = 0.01282 [\text{N} \cdot \text{m}]$$

$$I = \frac{\pi \cdot D^4}{64} = \frac{\pi \cdot (0.0006)^4}{64} = 6.3617 \times 10^{-15} [\text{m}^4]$$

$$\sigma = \frac{K_f \cdot M \cdot c}{I} = \frac{1.2 (2.8274 \times 10^{-7}) (0.0003) P}{6.3617 \times 10^{-15}} = 16000 \cdot P \left[ \frac{1}{\text{m}^2} \right]$$



*Figura 3.19 Resortes acoplados al dedo indice.*

Lo que se puede obtener con estas ecuaciones es el cálculo exacto para cada uno de los resortes que se ocupan en el manipulador.

El valor de la carga  $P$  se puede sustituir con los datos obtenidos en el **capítulo 6** (fuerza aplicada) y es posible calcular el esfuerzo flexionante para cada resorte. Sin embargo, por cuestiones de facilidad, se consiguieron resortes iguales con las características antes descritas.

# Capítulo 4

## SELECCIÓN DE MATERIALES

En adición a las deficiencias que pueden existir en el diseño y a los defectos en la manufactura, condiciones de servicio inadecuadas, y mantenimiento inapropiado, una pobre selección de materiales puede representar una fuente mayor de falla en componentes de ingeniería en servicio. Generalmente, en muchos de los más usados materiales de ingeniería se han establecido rangos para su aplicación y condiciones de servicio que se compaginan con sus capacidades en ciertas aplicaciones. Exceder tales capacidades puede provocar una falla en servicio. Por otro lado, el uso excesivo de factores de seguridad para tales materiales, usualmente se traduce como productos poco económicos.

La resistencia a cargas estáticas puede ser definida como la habilidad a resistir, en un período corto, una carga estable a temperatura ambiente. Esta resistencia es usualmente medida en términos de la resistencia a la tensión, a la compresión o al esfuerzo cortante.

El nivel de la resistencia estática en materiales de ingeniería puede ser tratado de manera absoluta o relativa, aunque es recomendable emplearlos de manera absoluta a fin de determinar de forma más precisa las capacidades físicas de los materiales, sin atender demasiado al tipo de material; de esta forma se obtiene un gran número de posibles candidatos para determinada aplicación, los cuales se deberán eliminar poco a poco dependiendo de otras necesidades como costos, procesabilidad, factibilidad, resistencia a la corrosión, etc., hasta obtener uno o algunos candidatos óptimos para la aplicación.

### 4.1 Análisis de eficiencia estructural

El criterio de selección de un material por medio de la resistencia estática, es un criterio que depende de la resistencia del material, pero también de los factores de diseño y procesamiento a considerar. Con este fin, y en busca de un volumen, peso y costo reducido, este criterio emplea el uso de la llamada *eficiencia estructural (EE)*, que equivale a la relación entre la carga aplicada a un miembro estructural contra su masa.

$$EE = \frac{P}{m}$$

donde **P** es la carga aplicada y **m** es la masa del material.

Para seleccionar un material para los dedos del robot, podemos decir que:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot l$$

donde  $\rho$  es la densidad del material,  $V$  es el volumen,  $A$  es el área de la sección transversal ( $A_1 + A_2 + A_3$ ) y  $l$  es la longitud para una estructura como la mostrada en la figura 4.1, analizada como barra en cantilever.

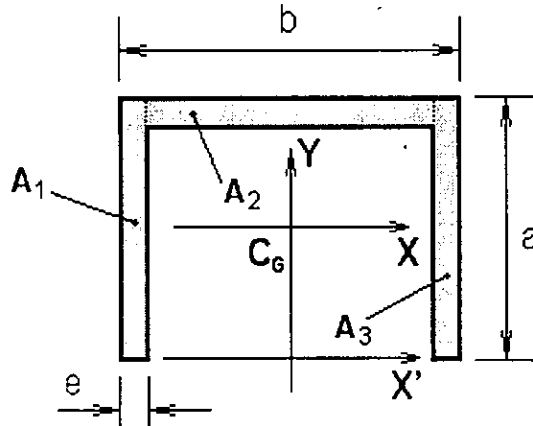


Figura 4.1 Sección transversal de los dedos.

Para la sección transversal mostrada, se tiene:

$$\sigma_{yD} = \frac{M_x}{I_x} (y')$$

donde  $\sigma_{yD}$  es la resistencia normal a la flexión en el diseño;  $M_x$  es el momento flexionante, dado por la multiplicación de la carga  $P$  por la longitud  $l$ ;  $I_x$  es el momento de inercia centroidal en la dirección del eje  $X$ , y  $y'$  es la posición del centro de masa respecto al eje  $X'$ .

Para calcular los *momentos de inercia centroidales*, nos basamos en el conocimiento del momento de inercia centroidal de cada una de las figuras que componen al perfil, y se transportan mediante el teorema de los ejes paralelos o de Steiner.

Las ecuaciones generales son:

$$I_x = \sum I'_x + A \cdot dy^2 \quad I_y = \sum I'_y + A \cdot dx^2$$

donde  $I'_x$  e  $I'_y$  son los momentos de inercia de cada figura con respecto a sus ejes centroidales;  $dx$  es la distancia del eje  $Y$  al eje centroidal  $y$  de cada figura, y  $dy$  es la distancia del eje  $X$  al eje centroidal  $x$  de cada figura.

Por otro lado,  $y'$  se calcula como sigue:

$$y' = \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i}$$

donde  $y_i$  es la distancia del eje  $X'$  al eje centroidal  $x$  de cada figura y  $A_i$  es el área de cada figura.

Entonces:

$$y' = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2 + A_3 \cdot y_3}{A_1 + A_2 + A_3}$$

donde  $A_1$  y  $A_3$  son iguales y las distancias  $y_1$  y  $y_3$  también son iguales, por lo que:

$$y' = \frac{2A_1 \cdot y_1 + 2A_2 \cdot y_2}{2A_1 + A_2}$$

Sustituyendo los valores correspondientes:

$$y' = \frac{2ae\left(\frac{a}{2}\right) + e(b-2e)\left(a - \frac{e}{2}\right)}{2ae + e(b-2e)}$$

$$y' = \frac{ae^2 + (eb - 2e^2)\left(a - \frac{e}{2}\right)}{2ae + (be - 2e^2)}$$

Simplificando:

$$y' = \frac{ea^2 + bea - 2e^2a - \frac{be^2}{2} + e^3}{2ae + be - 2e^2}$$

$$y' = \frac{a^2 + ba - 2ea - \frac{be^2}{2} + e^2}{2a + b - 2e}$$

Resolviendo entonces para el momento de inercia centroidal  $I_x$ :

$$I_x = \sum I'_x + A \cdot dy^2$$

$$I_x = 2\left(I'_{x_1} + A_1 \cdot d_1 y^2\right) + \left(I'_{x_2} + A_2 \cdot d_2 y^2\right)$$



$$I_x = 2 \left[ \frac{ea^3}{12} + ea \left( y' - \frac{a}{2} \right)^2 \right] + \left[ \frac{e^3(b-2e)}{12} + e(b-2e) \left( y' - \frac{e}{2} \right)^2 \right]$$

Entonces, para cada una de las falanges, cuyos valores para  $a$ ,  $b$  y  $e$  son distintos, se tendrán por consiguiente distintos valores de  $y'$  e  $I_x$ . Además, a fin de determinar la máxima carga que podría soportar cada falange, se establecen las siguientes suposiciones:

- La mano carece de movilidad en la muñeca.
- Por consiguiente, la palma permanece en posición horizontal.
- Aún suponiendo la carga de una esfera de plomo, su aplicación sería sobre algún punto de la palma y no en los dedos.
- La forma de las falanges se considerará como perfil recto (sin contornos redondeados), de sección transversal como la mostrada en la **figura 4.1**.
- Debido a los tendones, en una posición dada, se considerará como viga empotrada.
- Tal empotramiento se supondrá a nivel de la articulación más próxima a la palma (articulación metacarpofalángica).
- La carga, entonces, se supondrá aplicada sobre las articulaciones opuestas en el caso de la falange proximal y medial, y en el extremo para la falange distal, tal como se muestra en las figuras:

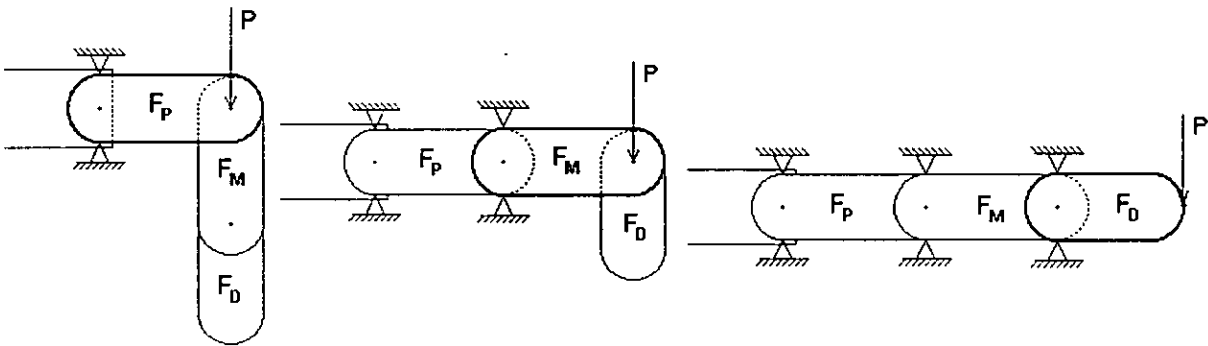


Figura 4.2 Cargas aplicadas a las falanges.

En esta figura,  $F_P$  es la falange proximal,  $F_M$  es la falange medial,  $F_D$  es la falange distal y  $P$  es la carga máxima aplicada a cada una de éstas bajo las suposiciones anteriores. Además, como puede observarse, las longitudes,  $\ell$ , de cada falange son distintas entre sí.

Entonces, la carga  $P$  que actúa sobre la falange proximal, está determinada por la suma de los pesos de las falanges medial y distal; para la falange medial, la carga  $P$  estará determinada por el peso de la falange distal, y para esta última,  $P = 0$  ya que su propio peso no se considera para efectos de cálculo. Cabe notar que la falange proximal es la que soporta mayor carga, así que al determinar un material óptimo para ésta, se obtiene un material con propiedades ligeramente sobradas para las otras dos

falanges, por lo que el cálculo de eficiencia estructural se resume en el cálculo para la falange proximal solamente.

Lo que se logra con todas estas suposiciones, algunas más restrictivas que otras, es proporcionar de forma implícita un factor de seguridad que intervenga en los cálculos, incluido el factor que se obtiene al sustituir la resistencia a la flexión  $\sigma_y$  por la resistencia en el diseño  $\sigma_{yD}$ :

$$\sigma_{yD} = \frac{\sigma_y}{f}$$

donde  $f$  es el factor de diseño.

Sustituyendo  $P = M_x/\ell$  y la masa  $m$  para la eficiencia estructural  $EE$ , se obtiene:

$$EE = \frac{P}{m} = \frac{M_x}{A \cdot \rho \cdot l^2}$$

Despejando  $M_x$  de la ecuación de la resistencia a la flexión y considerando el factor de diseño:

$$M_x = \frac{\sigma_{yD} \cdot I_x}{y'} = \frac{\sigma_y \cdot I_x}{f \cdot y'}$$

Sustituyendo esto último en la eficiencia estructural y añadiendo el costo  $C_S$ :

$$EE = \frac{\sigma_y \cdot I_x}{f \cdot y'} \times \frac{1}{A \cdot \rho \cdot l^2} = \frac{\sigma_y}{C_S \cdot \rho} \times \frac{I_x}{A \cdot l^2 \cdot f \cdot y'}$$

Para nuestro estudio, dejaremos la  $EE$  en función de la resistencia  $\sigma_y$  y de la densidad  $\rho$ , parámetros que dependerán del material que empleemos. Además, el segundo miembro de la ecuación consta de constantes conocidas y sólo el primer miembro, conocido como **condición mínima de peso**, será variable. Entonces, en la ecuación para  $EE$ , se puede sustituir el valor de todas las constantes para dejarla en función del esfuerzo y la densidad. De esta forma se obtiene, dado que:

$$\ell = 4.3 \text{ cm} \quad e = 0.12 \text{ cm} \quad a = 1.5 \text{ cm} \quad b = 1.525 \text{ cm} \quad f = 2$$

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = e(2a + b - 2e) = 0.5142 [\text{cm}^2]$$

$$y' = \frac{a^2 + ba - 2ea - \frac{be}{2} + e^2}{2a + b - 2e} = 0.9569195 [\text{cm}]$$

$$I_x = 2e \left[ \frac{a^3}{12} + a \left( y' - \frac{a}{2} \right)^2 \right] + e \left[ \frac{e^2(b-2e)}{12} + (b-2e) \left( y' - \frac{e}{2} \right)^2 \right] = 0.207147 [\text{cm}^4]$$

Entonces:

$$\frac{I_x}{A \cdot l^2 \cdot f \cdot y'} = \frac{0.207147}{(0.5142)(4.3)(2)(0.9569195)} = 0.0113843 [cm^{-1}]$$

Por lo tanto:

$$EE = \frac{\sigma_y}{C_s \cdot \rho} \times \frac{I_x}{A \cdot l^2 \cdot f \cdot y'} = \frac{\sigma_y}{C_s \cdot \rho} (1.13843 [m^{-1}])$$

Sin embargo, para fijar un valor que nos permita analizar los diferentes tipos de materiales posibles en el diagrama de propiedades correspondientes, excluirémos el costo del primer término de la igualdad y el análisis será en el diagrama  $\sigma_y$  contra  $\rho$ , fijando un valor mínimo de **30 [MPa m<sup>3</sup>/ Mg]**, representado por una línea de color azul (línea diagonal inferior) en el diagrama de la **figura 4.3**. De esta forma, todos los materiales que se encuentren sobre esta línea serán candidatos para nuestra aplicación y, por medio de nuestras necesidades, se deberán eliminar aquellos que no puedan ser empleados por no cumplir con ciertas propiedades, tales como la funcionalidad, procesabilidad, costo, resistencia a la corrosión, etcétera.

## 4.2 Diagramas de selección

Las propiedades de un material limitan su desempeño, pero raramente, ese desempeño depende solamente de una propiedad. Casi siempre es una combinación (o varias combinaciones) de diversas propiedades las que influyen. Esto sugirió la idea de graficar una propiedad contra otra, elaborando zonas que los materiales de ciertas categorías ocupan por poseer determinados valores de tales propiedades.

Los diagramas resultantes son útiles en el sentido de que contienen mucha información en forma compacta pero accesible; muestran correlaciones entre diversas propiedades de los materiales que ayudan a estimar valores críticos de ciertas características físicas; y son eficientes como una técnica de optimización en el desempeño de un componente. Estos diagramas están basados en escalas logarítmicas y abarcan desde los materiales con valores más bajos para determinada propiedad, hasta los más altos.

En la **figura 4.3** se muestra la resistencia a la flexión contra la densidad [17]. La considerable extensión de valores de la resistencia mostrada en el eje vertical (en algunos casos para un solo material), demuestra la amplia gama de posibilidades para seleccionar un solo material con distintas variantes, generalmente ocasionadas por un trabajo extra en su conformado, tales como los grados de aleación, trabajo de endurecimiento, tamaño de grano (en metales), longitud de cadenas poliméricas (en plásticos), porosidad, etc.

Un uso muy importante para estos diagramas se refiere a la selección de materiales. Con este diagrama, lo que se puede determinar es una alta resistencia contra un bajo peso, dependiente de su densidad.

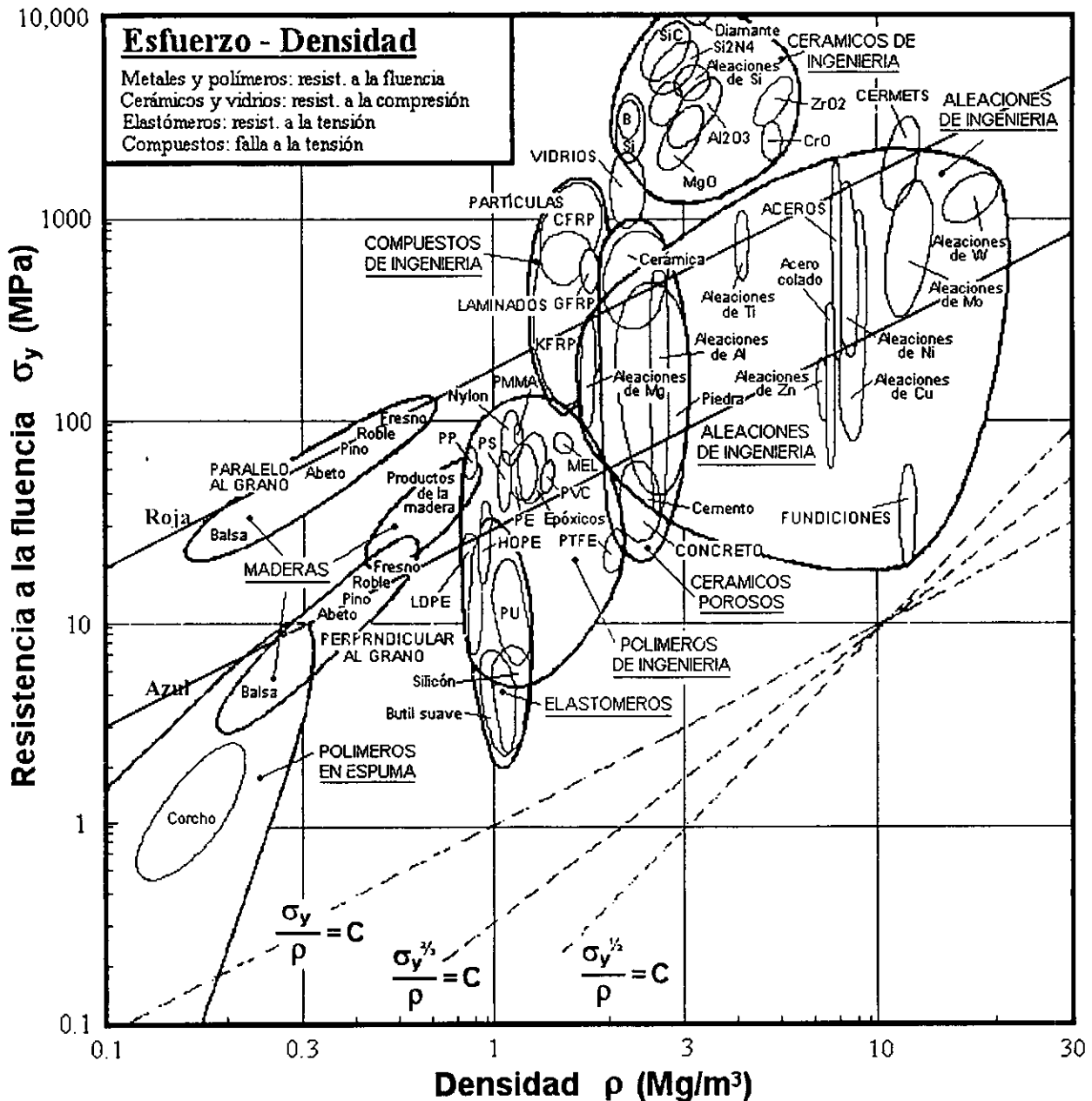


Figura 4.3 Resistencia  $\sigma_y$  contra densidad  $\rho$  [17].

Empleando la línea antes definida dentro del diagrama de la **figura 4.3**, todos los materiales por encima de ésta son candidatos que cumplen con la condición analizada para la eficiencia estructural.

Como puede observarse, los *cerámicos* de ingeniería son los materiales que cumplen de la mejor manera con el cociente del primer miembro de la eficiencia estructural, pero todos se descartan por tener muy pobre procesabilidad para esta aplicación, además de tener muy baja resistencia a la flexión, inferior a la que se someterían los dedos del manipulador. Los siguientes materiales en el diagrama son los *compuestos de ingeniería*, entre los que destacan los reforzados por fibras, sin

embargo su procesabilidad resultaría muy costosa para las dimensiones establecidas. Posiblemente puedan ser aplicables algunos materiales compuestos por partículas, ya que por un lado es difícil obtener la información de sus propiedades, y por otro, por el tipo de procedimientos de fabricación se elevaría el costo a valores poco rentables. Con respecto a las *maderas*, éstas poseen muy pobres propiedades tanto para los esfuerzos no homogéneos que sufrirá el manipulador, como en procesabilidad, lo que las descarta como candidatos. Igualmente se descartan los *polímeros en espuma* y los *elastómeros*, cuyo problema básico es su baja resistencia térmica y baja rigidez.

Muchos de los *polímeros de ingeniería* pueden descartarse por deficiencias en su resistencia térmica y alta deformación elástica, pero algunos otros podrían resultar buenos candidatos, que serán comparados con algunos metales, cuyas propiedades también cumplen con la mayoría o todos los requerimientos antes mencionados.

Todo esto reduce la zona de selección al área formada entre la línea azul (línea diagonal inferior), antes descrita, y la línea roja (línea diagonal superior), establecida en base a las justificaciones arriba mencionadas. De entre los materiales ubicados en esta zona, se seleccionaron algunos posibles materiales, aptos para esta aplicación, que se enumeran a continuación:

1. Aleación de aluminio
2. Nylamid [*nombre comercial para el nylon*] -M (Nylon 6/12)
3. Poliestireno (PS)
4. Polietileno de alta densidad (HDPE)
5. Policarbonato (PC)
6. Acero inoxidable austenítico 347 (0.08%-C, 18%-Cr, 11%-Ni, 0.8%-Nb)
7. Acero inoxidable austenítico 201 (0.15%-C, 17%-Cr, 4.5%-Ni, 6.5%-Mn)
8. Bronce al aluminio (89%-Cu, 8%-Al, 3%-Fe)
9. Acero al carbono 1020 (0.2%-C, 0.04%-Mn, 0.04%-P, 0.05%-S)

### 4.3 Método de propiedades ponderadas

El método de propiedades ponderadas se utilizan cuando se ponen a consideración varias propiedades que de acuerdo al juicio o criterio personal todas son importantes.

En este método, a cada propiedad se le asigna un *peso* dependiendo de su importancia, y posteriormente, como resultado de la multiplicación de ese *peso* y su valor numérico de propiedad, da como resultado el valor de propiedad ponderada, es decir, el valor numérico de la propiedad por un factor de peso  $\beta$ . Luego, cada valor de la propiedad ponderada de cada material se suma para obtener con ello el *índice de funcionalidad*,  $\gamma$ , comparativo entre los materiales. El material con el índice de funcionalidad más alto es el que se considera óptimo para la aplicación.

La ventaja de este método es que cuando se evalúa una lista de materiales candidatos, una propiedad es considerada al mismo tiempo para todos los materiales. Al mejor valor de la lista se le asignará un valor de **100%** y los demás se escalarán proporcionalmente. Así, una propiedad con un valor escalado, para valores altos, se calcula como:

$$P = \text{Propiedad escalada} = \frac{\text{Valor numérico de la propiedad}}{\text{Valor máximo de la lista}} \quad (100)$$

En el caso de propiedades con valores bajos (coeficiente de expansión térmica, densidad, corrosión, desgaste, etc.), lo que implica que un valor bajo es el deseable, esta propiedad se pondera como sigue:

$$P = \text{Propiedad escalada} = \frac{\text{Valor mínimo de la lista}}{\text{Valor numérico de la propiedad}} \quad (100)$$

Si la propiedad no se puede medir (propiedades estéticas, resistencias químicas, corrosión, etc.), donde la clasificación sea: *Buena, Regular, Mala, etc.*, se usará entonces una escala arbitraria dependiendo del número de calificativos a emplear (ej. *1-pésima, 2-mala, 3-regular, 4-buena, 5-excelente*), y después se escalará la propiedad con la fórmula de valor alto, ya que en este caso lo que se desea es la cualidad de *excelente*.

En el caso donde varias o muchas propiedades del material deban especificarse y la importancia no es muy clara se procederá a usar matrices de decisión para determinar el valor de  $\beta$ .

$$\beta = \frac{\text{\# de decisiones positivas de cada material}}{\text{\# total de posibles decisiones}} = \frac{m}{N}$$

y  $N$  se calcula como:

$$N = \frac{n(n-1)}{2}$$

donde  $n$  es el número de propiedades a comparar.

En este caso en particular, las propiedades a ponderar son:

- A. Resistencia a la fluencia,  $\sigma_y$ .
- B. Densidad,  $\rho$ .
- C. Resistencia a la corrosión.
- D. Módulo de elasticidad,  $E$ .
- E. Coeficiente de expansión térmica,  $\alpha$ .
- F. Costo por kilogramo, estimado en dólares.

Para el caso de la resistencia a la corrosión, se calificaron los materiales de acuerdo a distintos factores vistos en la bibliografía y se propuso la siguiente escala:

- 5: excelente resistencia a la corrosión
- 4: buena resistencia a la corrosión
- 3: regular resistencia a la corrosión
- 2: mala resistencia a la corrosión
- 1: pésima resistencia a la corrosión

Para el caso de los polímeros, el factor de corrosión está determinado por el efecto o deterioro que pueden provocar las condiciones atmosféricas. Los plásticos se afectan lentamente por la atmósfera y, particularmente, por la radiación UV de la luz solar. Los polímeros son susceptibles a producir enlaces cruzados con el oxígeno y a perder el plastificante; esto conduce al agrietamiento por esfuerzo o al microagrietamiento superficial.

Material	$\sigma_y$ (MPa)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Corrosión	$E$ (MPa)	$\alpha$ (%)	Costo/ kg (U.S.D.)
1	96.53	2.7	5	73,087	43	1.98
2	81.361	1.14	4	3275.125	25	4.62
3	34.475	1.05	5	3,171.7	36	0.88
4	42.5	0.96	3	827.4	43	2.42
5	68.95	1.25	5	2,413.25	53	5.72
6	241.317	7.863	4	199,947.961	50	2.86
7	310.264	7.767	4	193,053.204	40	3.74
8	258.553	8.304	4	124,105.631	25	2.64
9	351.645	7.8	3	206,850	30	0.66

Tabla 4.1 Propiedades.

Para obtener la importancia relativa entre las diferentes propiedades se crea la siguiente matriz de decisión, donde  $n = 6$ :

$$N = \frac{6(6-1)}{2} = 15$$

Propiedades	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	m	$\beta$
A	0	0	1	0	0											1	0.0667
B	1					0	0	0	0							1	0.0667
C		1				1				1	1	1				5	0.3333
D			0				1			0			0	0		1	0.0667
E				1				1			0		1		0	3	0.2
F					1				1			0		1	1	4	0.2666
<b>Total</b>																15	1

Tabla 4.2 Matriz de decisión.

Entonces,  $\beta$  será el factor de ponderación para cada propiedad. Para la elaboración de la tabla, se colocan las propiedades de cada material. De acuerdo al tipo de propiedad, se escala la propiedad menor contra la mayor ( $\sigma_y$ , **corrosión**, y **E**) o la mayor contra la menor ( $\rho$ ,  $\alpha$  y **Costo/kg**). Después, se multiplica el resultado por el factor de ponderación y, al final, se suma, para un material, todas sus propiedades hasta obtener el índice de funcionalidad.

El índice de funcionalidad,  $\gamma$ , se calcula como:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \beta_i$$

donde  $P$  es la propiedad escalada,  $\beta$  es el factor de peso mostrado en la tabla e  $i$  es la suma de todas las propiedades relevantes.

Los valores de cada una de las propiedades, las propiedades escaladas, las propiedades ponderadas y el índice de funcionalidad se muestran en la **tabla 4.4**, y hay que tener en cuenta que, tal como lo indica la teoría, el escalamiento de las propiedades se realiza basándose en las necesidades específicas para la aplicación. Esto es, en el caso de la resistencia a la fluencia, el escalamiento se hace basándose en el máximo valor, ya que es lo deseado. Con respecto a la densidad, lo que se desea es un valor bajo, ya que nos interesa un bajo peso del material y, por tanto, un bajo costo. Respecto a la resistencia a la corrosión, aunque los valores asignados son bajos, lo que se desea es un valor alto que garantice esta característica, por lo que el escalamiento es respecto al valor máximo. Al considerar el módulo de elasticidad, se desea que este valor sea alto, por lo que se escala al máximo valor. Finalmente, con respecto al coeficiente de expansión térmica, lo que se desea es un valor bajo, por lo que el escalamiento se efectúa respecto al valor mínimo de esta propiedad.

Por otro lado, se puede decir que la discriminación de los materiales por el método de *eficiencia estructural* y por el diagrama de propiedades, prácticamente vienen de la mano ya que el valor de la *condición mínima de peso* (no considerando el costo) puede ayudarnos a determinar la localización aproximada de un determinado material dentro del diagrama de propiedades, recordando además que la *eficiencia estructural* es el valor de la *condición mínima de peso* multiplicado por una constante.

Realizando este cálculo, se tiene:

Material	$\sigma_y$	$\rho$	$C_s$	$\sigma_y / \rho$	$\sigma_y / \rho \cdot C_s$	EE
1	124.12	2.7	1.98	45.97037	23.21736	26.434339
2	81.361	1.14	4.62	71.3693	15.4479	17.586353
3	34.475	1.05	0.88	32.83333	37.31061	42.475518
4	42.5	0.96	2.42	44.27083	18.29373	20.826131
5	68.95	1.25	5.72	55.16	9.64336	10.97829
6	241.317	7.863	2.86	30.69019	10.73084	12.21631
7	310.264	7.767	3.74	39.94644	10.68087	12.159423
8	258.553	8.304	2.64	31.13596	11.79392	13.426552
9	351.645	7.8	0.66	45.08269	68.30711	77.762863

Tabla 4.3 Cálculo de la condición mínima de peso y EE.



A. Resistencia a la fluencia (MPa) $\beta = 0.066667$				B. Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) $\beta = 0.066667$		
Material	Propiedad	Prop. esc.	Prop. pond.	Propiedad	Prop. esc.	Prop. pond.
1	124.12	40.00464121	2.666989415	2.7	35.18518519	2.345690741
2	81.361	26.2231519	1.748218867	1.14	83.33333333	5.555583333
3	34.475	11.11150504	0.740770707	1.05	90.47619048	6.03177619
4	42.5	13.69801202	0.913205367	0.96	98.95833333	6.597255208
5	68.95	22.22301008	1.481541413	1.25	76	5.066692
6	241.317	77.77795684	5.185223048	7.863	12.08190258	0.805464199
7	310.264	100	6.6667	7.767	12.23123471	0.815419724
8	258.553	83.3332259	5.555576171	8.304	11.44026975	0.762688463
9	351.645	113.3373514	7.555861207	7.8	12.17948718	0.811969872

C. Resistencia a la corrosión $\beta = 0.333333$				D. Módulo de elasticidad (MPa) $\beta = 0.066667$		
Material	Propiedad	Prop. esc.	Prop. pond.	Propiedad	Prop. esc.	Prop. pond.
1	5	100	33.3333	73,087	35.33333333	2.355567333
2	4	80	26.66664	3275.125	1.583333333	0.105556083
3	5	100	33.3333	3,171.70	1.533333333	0.102222733
4	3	60	19.99998	827.4	0.4	0.0266668
5	5	100	33.3333	2,413.25	1.166666667	0.077778167
6	4	80	26.66664	199,947.96	96.66326372	6.444249802
7	4	80	26.66664	193,053.20	93.33004786	6.222034301
8	4	80	26.66664	124,105.63	59.99788784	3.999879189
9	3	60	19.99998	206,850	100	6.6667

E. Coeficiente de expansión térmica (%) $\beta = 0.2$				F. Costo por unidad de masa (USD/kg) $\beta = 0.266666$		
Material	Propiedad	Prop. esc.	Prop. pond.	Propiedad	Prop. esc.	Prop. pond.
1	43	58.13953488	11.62790698	1.98	31.31313131	8.350147475
2	25	100	20	4.62	13.41991342	3.578634632
3	36	69.44444444	13.88888889	0.88	70.45454545	18.78783182
4	43	58.13953488	11.62790698	2.42	25.61983471	6.831938843
5	53	47.16981132	9.433962264	5.72	10.83916084	2.890435664
6	50	50	10	2.86	21.67832168	5.780871329
7	40	62.5	12.5	3.74	16.57754011	4.42066631
8	25	100	20	2.64	23.48484848	6.262610606
9	30	83.33333333	16.66666667	0.66	93.93939394	25.05044242

Índice de funcionalidad	
Material	$\gamma$
1	60.67960194
2	57.65463292
3	72.88479034
4	45.9969532
5	52.28370951
6	54.88244838
7	57.29146034
8	63.24739443
9	76.75162017

Prop. esc. = Propiedad escalada  
Prop. pond. = Propiedad ponderada

Tabla 4.4 Ponderación de propiedades.

## 4.4 Resultados

El orden de importancia que se dio a cada uno de los tres métodos de selección empleados, está basado en el número de propiedades consideradas, así, el método que tiene mayor relevancia es el de ponderación, seguido por el de eficiencia estructural y, finalmente, el del diagrama de propiedades.

Con respecto a este último método, el resultado de  $\sigma_y / \rho$ , mostrado en la **tabla 4.4** para los cinco mejores materiales, fue: 1.- **Nylamid**, 2.- **PC**, 3.- **Aluminio**, 4.- **Acero 1020** y 5.- **HDPE**. Sin embargo, como ya se mencionó, a este método se le da poca importancia por tomar en cuenta sólo dos propiedades, aunque resulta útil al tener que tomar una decisión sobre posibles candidatos o para discriminar materiales de los resultados en los otros dos métodos. Con respecto al método de eficiencia estructural el resultado fue: 1.- **Acero 1020**, 2.- **PS**, 3.- **Aluminio**, 4.- **HDPE** y 5.- **Nylamid**. Este resultado se toma un poco más en cuenta por incluir tres propiedades, y se pueden observar cuatro materiales que se repiten, aunque en diferente orden (Acero 1020, Aluminio, Nylamid y HDPE). Basados en el método de propiedades ponderadas, se pudo observar, en la **tabla 4.3**, que los cinco materiales con los mayores valores de índice de funcionalidad fueron: 1.- **Acero 1020**, 2.- **PS**, 3.- **Bronce al aluminio**, 4.- **Aluminio** y 5.- **Nylamid**.

De esta forma, considerando los tres métodos, se puede observar que el Acero 1020 ocupa el primer lugar en los resultados de los métodos más incluyentes, seguido por el PS y el Aluminio. Así, se puede establecer una lista del orden aproximado que tendrían los nueve materiales, basados en la parte relevante de cada uno de los métodos:

1. Acero 1020
2. Poliestireno (PS)
3. Aleación de aluminio
4. Nylamid M (Nylon 6/12)
5. Polietileno de alta densidad (HDPE)
6. Bronce al aluminio
7. Acero inoxidable SS-201
8. Acero inoxidable SS-347
9. Policarbonato (PC)

Un nuevo problema surge al seleccionar uno de los tres o cuatro primeros materiales, pues hay que considerar algunas propiedades extras que son difíciles de evaluar o ponderar; estas propiedades, tales como la disponibilidad, procesabilidad, y factibilidad de uso, pueden jugar un papel tan importante como el de las propiedades ya empleadas.

De esta forma, la manera de obtener las posibles características físicas del manipulador, a partir de las diferentes presentaciones que se pueden conseguir de los cuatro primeros materiales, son las siguientes:

- En el caso de Acero 1020, es posible obtener las secciones de las falanges a partir del desbaste de barras cuadradas, básicamente de  $\frac{3}{4}$  de pulgada. El segmento metacarpiano del dedo pulgar, así como la estructura de la palma y los segmentos que dotan de abducción y

aducción a los dedos índice y pulgar (articulación metacarpofalángica), podrían conformarse a partir de lámina de **1.2** o **1.5 mm** de espesor, que deberían ser fresadas y unidas ya sea por soldadura o con algún pegamento especial para acero. El inconveniente que se presenta con este método es que la cantidad de material desperdiciado excede por más del 200% al material aprovechado.

- En el caso del Poliestireno, es muy difícil conseguir las barras cuadradas como en el caso del acero, sin embargo, es posible encontrar láminas de distintos espesores y habría que cortar todas las secciones que componen al manipulador, por separado, es decir, tres secciones para cada falange (33), cuatro para las articulaciones metacarpofalángicas (8), ocho para el segmento metacarpiano del dedo pulgar y siete para la estructura de la palma. La unión, tendría que ser con algún pegamento especial y los inconvenientes radican en la rigidez resultante de tales estructuras y en la complicación de cortar y ensamblar cada una de las secciones. Cabe mencionar, que a pesar de estas complicaciones, aún así resulta más fácil y menos costoso que diseñar y construir los moldes de inyección o dados para extrusión que proporcionarían las secciones transversales como la de la **figura 4.1**.
- Con respecto al Nylamid, se cuenta con características similares a las vistas para el acero, con la salvedad de que es complicado o prácticamente imposible conseguir láminas de espesor delgado. De esta forma, las falanges se obtendrían desbastando tubos cuadrados y, para las secciones laminares de **1.6 mm** de espesor, se tendría que desbastar alguna placa rectangular hasta conseguir el espesor deseado. La unión, también se realizaría con algún pegamento especial y el inconveniente es de nuevo la gran cantidad de material desperdiciado, que ahora superaría incluso el 300%.
- En el caso del Aluminio, es, de los cuatro, el que tiene más disponibilidad, ya que las presentaciones que hay en el mercado son muy extensas y es muy versátil. Viendo además que la única manera de conformar la estructura de la palma y del segmento metacarpiano del dedo pulgar es ensamblando y pegando cada sección por separado, de esta misma forma tendría que hacerse con el aluminio, habiendo una gran factibilidad para realizarse con una lámina calibre 16 (**1.85 mm** de espesor) o 18 (**1.3 mm** de espesor). Respecto a algunas falanges, se realizarían con tubo cuadrado de  $\frac{3}{4}$  de pulgada de **1.55 mm** de espesor (falange medial de los dedos índice, medio y anular; falange distal y segmento abductor del dedo pulgar y del dedo índice), para las otras falanges es posible emplear un riel de ventana para mosquitero de **1.2 mm** de espesor, cuya sección transversal queda contenida dentro de la sección del tubo cuadrado como se mostró en las **figuras 2.5, 2.6 y 2.7**. El maquinado no es complicado y el desperdicio de material es reducido, siendo el único problema el ensamble de las secciones planas que conformarían a la estructura de la palma y el segmento metacarpiano del dedo pulgar, (**figura 4.4**).

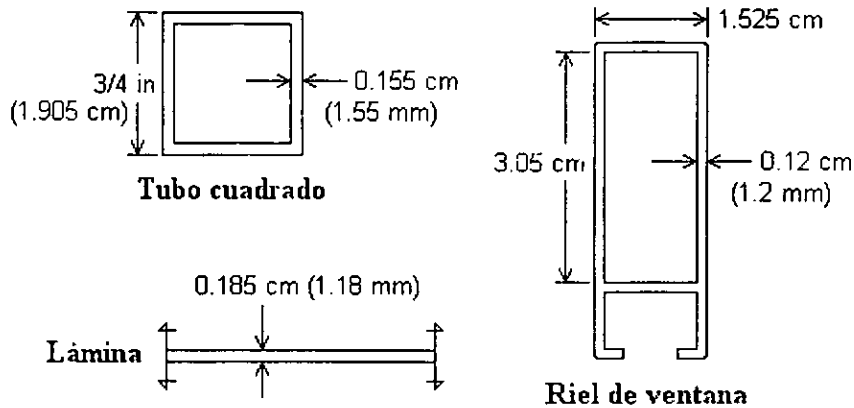


Figura 4.4 Perfiles de aluminio.

De esta forma, es como queda determinado el uso de aluminio para la construcción del manipulador, teniendo como ventaja adicional el bajo costo y la excelente disponibilidad.

El maquinado de las piezas se realizó en máquinas de control numérico (CNC) a fin de asegurar las tolerancias y homogeneidad de medidas en las falanges repetidas. Para el ensamble, se consiguió un pegamento de contacto especial para metales, aunque, donde fue posible, se realizaron los dobleces pertinentes a fin de prescindir del pegamento lo más posible.

Para los ejes de rotación de las articulaciones se empleó varilla de acero de 3 mm de diámetro, y para los ejes de re-orientación de los tendones se utilizó varilla de acero de 2 mm de diámetro, empleando lubricación para los primeros y pegamento para los segundos.

Finalmente, como ya se había explicado, se colocaron secciones de hule en las caras internas de las falanges y en la palma, así como puntas redondeadas también de hule en los extremos de los cuatro dedos del manipulador.

Comparado con el modelo anterior (MAT I), que también fue construido en aluminio, la diferencia en peso es muy grande ya que ese modelo pesó 1.066 kg (incluyendo su soporte y los forros por donde pasan los tendones) y el desarrollado en este trabajo pesa 247 gr (con soporte de nylamid incluido). Por otro lado, el sistema de actuación del modelo anterior, constituido por 13 motores de c.c., pesó 831 gr cada motor, lo que da un total de casi 11 kg, mientras que el modelo actual pesa 848 gr todo el sistema de actuación incluyendo la estructura de aluminio de soporte.

Parte de las diferencias que generan esta variación de peso se debieron a que en el modelo anterior, las caras internas de la mano (las encontradas en el mismo plano de la palma), también cuentan con superficies de aluminio. Por otro lado, las falanges distales de los dedos fueron fabricadas a partir de barras rígidas de aluminio, maquinadas en CNC para darles la forma redondeada de los extremos de los dedos, y los ejes de rotación en ese manipulador también eran de aluminio y su diámetro era de 9 mm y 18.5 mm de longitud, mientras que los de acero del MAT II son más ligeros.

Todo esto es lo que elevó tanto el peso del primer modelo, así que la potencia requerida para su accionamiento también tuvo que ser superior.

## SISTEMAS DEL PROYECTO

Como se ha mencionado, el proyecto Manipulador Antropomórfico Teleoperado (MAT II) tiene como propósito crear un manipulador semejante a una mano humana, capaz de ser controlado mediante un sistema de operación intuitivo colocado en la mano del operador. Las partes del proyecto pueden agruparse en cuatro módulos principales: un sistema de sensado de los movimientos de los dedos de la mano humana mediante un guante, como los utilizados para realidad virtual; un sistema de procesamiento de datos, simulación y visualización en un monitor de computadora; un sistema de control y actuación por medio de un microcontrolador y servomotores respectivamente; y por último el mecanismo del manipulador, la parte mecánica.

### 5.1 Sistema de medición

Como su nombre lo indica, tiene a su cargo la medición de las posiciones angulares relativas en las articulaciones de los dedos de la mano del usuario. El dispositivo está compuesto por un guante flexible sobre el que se montan una serie de pares diodo emisor-fototransistor infrarrojos (**figura 5.1**). Estos pares se colocan exactamente sobre las articulaciones, de manera que cada uno de los elementos del sensor queda en lados opuestos de la articulación. Cuando en ésta ocurre algún desplazamiento, se produce un desalineamiento de los componentes del par, lo que se traduce en una variación de la señal de salida del fototransistor, la cual se aprovecha como medida del ángulo.

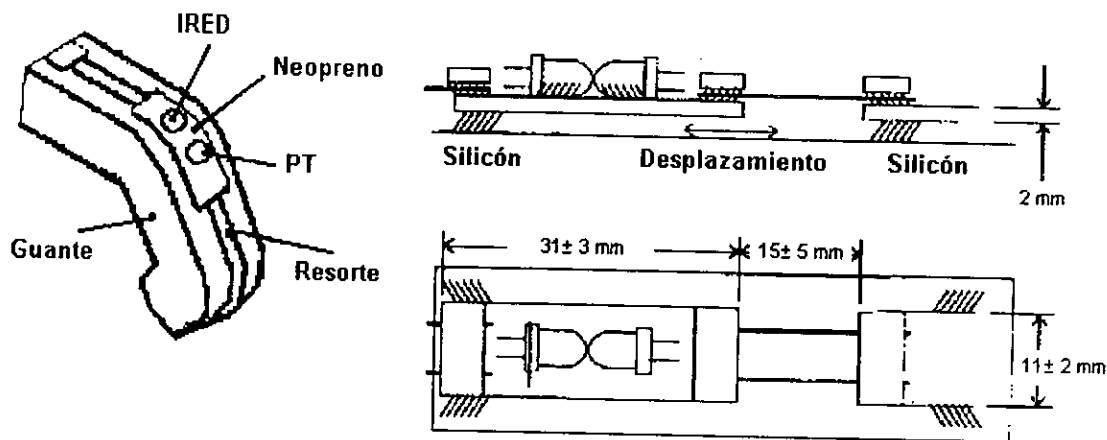


Figura 5.1 Montaje de un transductor.

El sistema se encarga también de organizar y dar formato a la salida de información para poder ser procesada tanto por el sistema de visualización, como por el sistema de control.

El desarrollo de este sistema fue llevado a cabo como proyecto de tesis por el Ing. Ernesto Riestra Martínez, con el título *Sistema de medición para un manipulador antropomórfico teleoperado*, presentado en el Departamento de Ingeniería Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Aquí se realizó la investigación y selección de los diferentes sistemas de medición existentes, entre los que se encontraban:

- Transductores activos y pasivos.
- Transductores afectados por un grado de libertad.
- Transductores afectados por varios grados de libertad.
- Transductores de desplazamiento capacitivos.
- Transductores de desplazamiento inductivos.
- Transductores de desplazamiento potenciométricos.
- Transductores de desplazamiento por galgas extensométricas.
- Transductores de desplazamiento electro-ópticos.
- Codificadores lineales y angulares.
- Dispositivos de radar y sonar, sensores de distancia.

Finalmente, se optó por un transductor óptico activo basado en un par emisor-receptor infrarrojo usado normalmente para comunicación digital en fase de saturación, muy económico y comercialmente extendido.

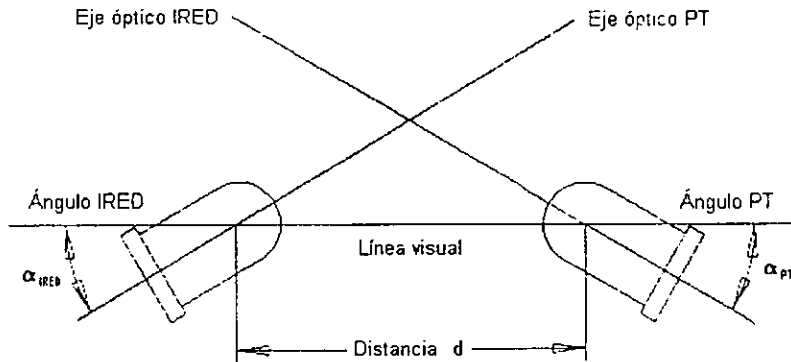
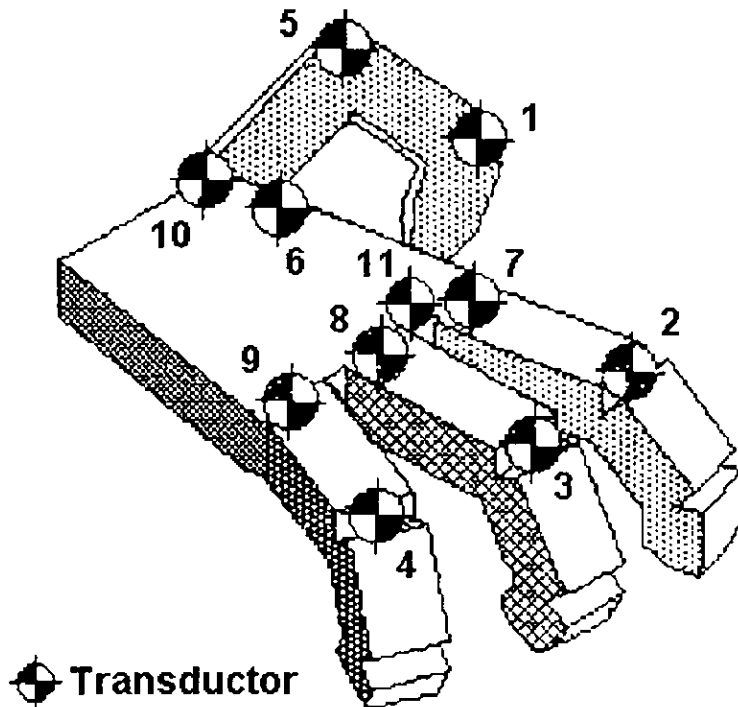


Figura 5.2 Modelo plano del transductor.

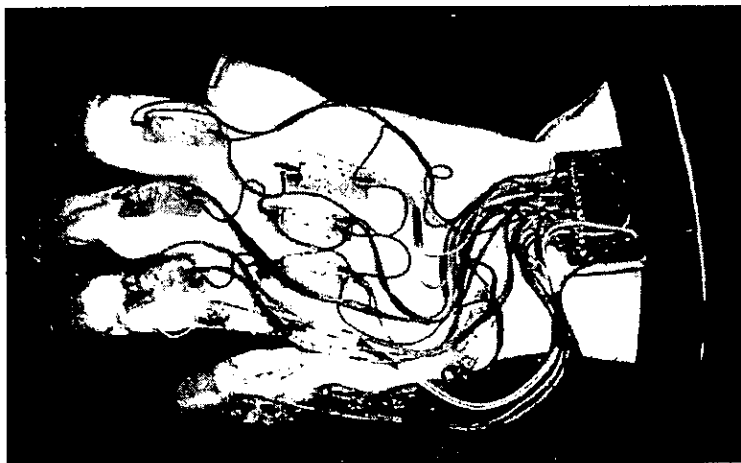
Este arreglo posee una variación de la señal en fase de ganancia que puede utilizarse en este caso para medir variaciones en la potencia luminosa recibida con una buena resolución.

El sistema de control de las señales consiste en una plataforma que coordina la captura y el envío de información desde la mano del usuario hasta una tarjeta de control. Este sistema se basa en un microcontrolador MC68HC11-E1FN de Motorola, que cuenta con cuatro convertidores A/D (análogo/digital) de 8 bits multiplexados en 8 canales, además de un UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) programable para realizar la transferencia de información por el puerto serial. El sistema de actuación del manipulador puede dirigirse desde el programa de visualización o directamente desde el sistema de

medición. Sin embargo, en la primer etapa del proyecto del MAT, se desarrolló un guante que sólo consideraba diez grados de libertad (no estaba incluido el movimiento de abducción del dedo índice), por lo que se tuvo que desarrollar y construir un nuevo guante que contara con los once grados requeridos para el segundo diseño del manipulador (**foto 4**), y cuyo tamaño está enfocado hacia un hombre adulto de estatura promedio. También fue necesario hacer las modificaciones correspondientes tanto en el sistema de control y procesamiento de las señales, como en el programa que lo controla y que envía las señales digitalizadas al sistema de visualización y actuación, a fin de considerar los once grados de libertad (**figura 5.3**).



*Figura 5.3 Ubicación de los transductores en el guante.*



*Foto 4 Guante sensor para once grados de libertad.*

## 5.2 Sistema de visualización

El software desarrollado para este sistema proporciona al usuario información visual de la posición en tiempo real del manipulador desplegando un modelo en tres dimensiones utilizando los datos capturados por el sistema de medición. Existen dos versiones del programa del simulador, una para plataforma MS-DOS y otra para Windows, siendo la primera la que tiene la mejor secuencia de simulación que se puede considerar como en tiempo real. La segunda presenta retrasos graves en la actualización de la representación, pero incluye un generador de trayectorias que después pueden ser enviadas al manipulador.

Este trabajo fue desarrollado por el Ing. Hugo Figueroa Rosas con el título *Análisis cinemático y programa de simulación para un manipulador antropomórfico teleoperado*, como trabajo de tesis en el Departamento de Ingeniería Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

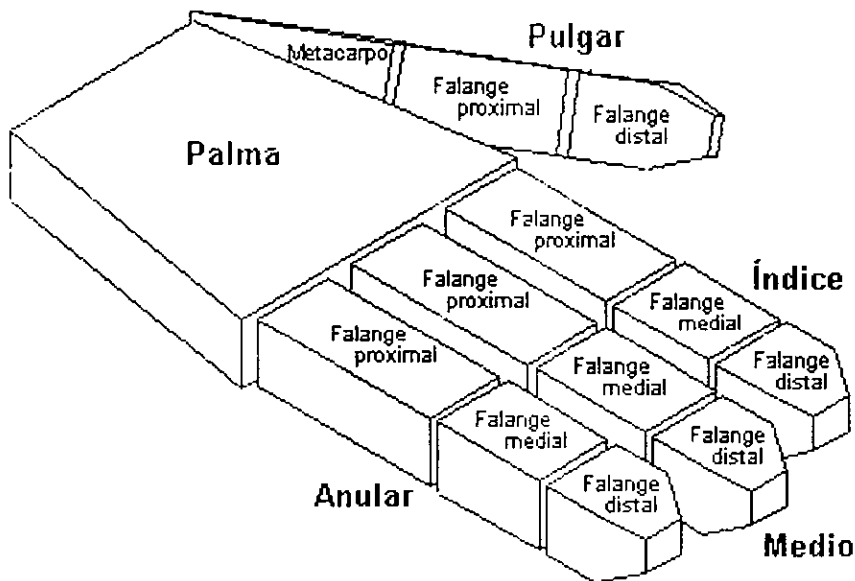


Figura 5.4 Esquema del manipulador antropomórfico.

La simulación espacial de los movimientos del manipulador se realizó a partir del análisis cinemático, dando al usuario la posibilidad de verificar su posición de acuerdo con el sistema de medición en caso de que no tuviera contacto visual con dicho manipulador. Además, en ambas versiones del programa se puede grabar y reproducir secuencias de actuación.

Para esto, se establecieron las bases matemáticas y analíticas para poder representar los movimientos principales de un cuerpo rígido, como son rotaciones y traslaciones, haciendo uso extensivo del álgebra vectorial y matricial. También se presentan los medios para poder realizar el análisis cinemático (tanto directo, como inverso) de mecanismos de cadena cruzada, aplicando el método de productos exponenciales.

Se hace la descripción en cuanto a posición y orientación del manipulador en términos de los ángulos relativos entre sus elementos constituyentes, teniendo en cuenta todas las características físicas y de funcionamiento del sistema mecánico. Se hace el análisis de la



cinemática inversa para cada uno de los dedos, y se estudia la generación de la trayectoria con base en las llamadas curvas B-spline de tercer grado.

Todos estos elementos se conjuntan en un programa de cómputo capaz de interactuar con las demás partes que integran al proyecto, es decir, tanto con el sistema de medición, como con el sistema de control y actuación.

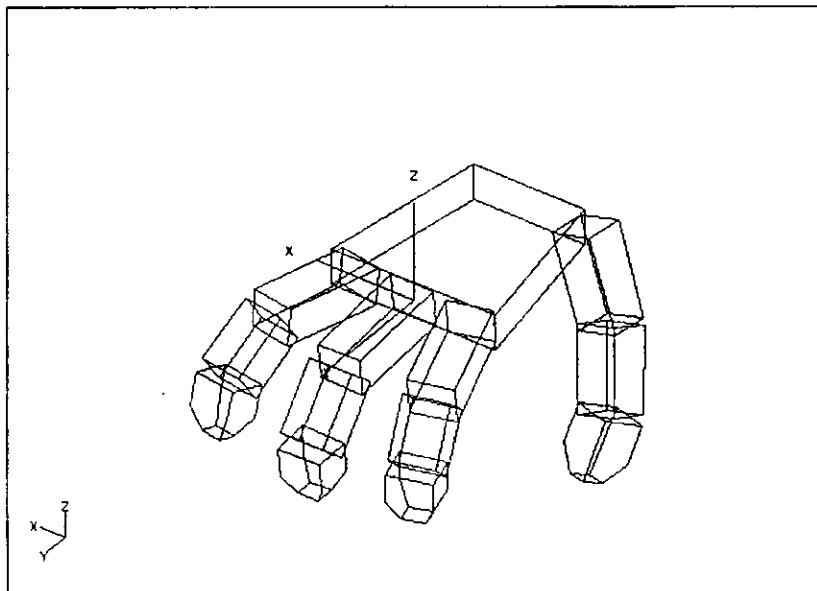
Para poder llevar a cabo la programación, se requirió de un lenguaje apropiado para este fin, como el C++, con ventajas en la compilación de programas orientados a objetos y en su velocidad de ejecución que lo hace atractivo para desarrollar aplicaciones de ingeniería. Tanto la versión para MS-DOS (16 bits) como para Windows (32 bits) fueron programas en este lenguaje.

A partir de aquí se hará referencia sólo al programa en MS-DOS por ser el que cumple con los requerimientos de simulación en tiempo real.

El programa obtiene la cinemática directa, tomando los valores de los ángulos relativos de las articulaciones de los dedos de la mano. Una vez obtenidos, se procede a calcular las matrices de transformación para cada uno de los elementos que constituyen al manipulador. Posteriormente, estas matrices se multiplican por las coordenadas de los vértices de los bloques que sirven para representar al mecanismo, dando como resultado las nuevas coordenadas que corresponden a la configuración actual del manipulador.

Ya que se obtienen las nuevas posiciones, se llama a la rutina encargada de su representación gráfica.

MANIPULADOR ANTROPOMORFICO TELEOPERADO



SIMULACIÓN INTERRUMPIDA, PRESIONE UNA TECLA

Figura 5.5 Visualización gráfica en computadora.

La mano mostrada en esta simulación es lo que se conoce como *estructura de alambre* y muestra de forma tridimensional y transparente cada uno de los movimientos realizados por el usuario, a fin de apreciar todos los elementos de los que se compone el manipulador y no se pierda detalle de la posición de los dedos con respecto a la palma, sin importar la orientación de ésta respecto a la pantalla de la computadora.

Una vez iniciada la ejecución de la rutina de simulación, es necesario comenzar con el proceso de calibración. Mediante este proceso, los límites para los movimientos, así como la resolución de los mismos, se ajustan a medida que se van recibiendo datos del guante. En caso de percibirse variaciones considerables entre el guante y la simulación, bastará con activar nuevamente la rutina de calibración.

Además de la calibración, el programa cuenta con una opción que permite almacenar secuencias de movimientos realizados por el usuario, las cuales pueden ser reproducidas en algún momento posterior. También posee funciones de visualización y control que hacen más flexible la operación del programa. En la **tabla 5.1** puede consultarse un resumen de estos comandos.

Tecla	Función
F11	Inicialización de los ángulos de visión.
I	Incrementa el ángulo de elevación.
K	Decrementa el ángulo de elevación.
J	Incrementa el ángulo de acimut.
L	Decrementa el ángulo de acimut.
F5	Rotación antihorario del plano de proyección.
F6	Rotación horaria del plano de proyección.
TAB	Intercala la selección de los elementos de la mano.
Q	Palma: movimiento de supinación. Dedos: movimiento de aducción.
A	Palma: movimiento de pronación. Dedos: movimiento de abducción.
W	Palma: movimiento de inclinación positiva. Dedos: extensión de la falange proximal. Pulgar: extensión del metacarpo.
S	Palma: movimiento de inclinación negativa. Dedos: flexión de la falange proximal. Pulgar: flexión del metacarpo.
E	Palma: movimiento de aducción. Dedos: extensión de la falange medial y falange distal. Pulgar: extensión de la falange medial.
D	Palma: movimiento de abducción. Dedos: flexión de la falange medial y falange distal. Pulgar: flexión de la falange medial.
R	Pulgar: extensión de la falange distal.
F	Pulgar: flexión de la falange distal.
F12	Inicializa los ángulos de todos los elementos de la mano.
C	Inicializa o interrumpe la secuencia de calibración.
G	Inicia o interrumpe el almacenamiento de la secuencia de movimientos realizados por el usuario.
P	Reproduce la secuencia almacenada.
ESC	Termina la ejecución del programa.

*Tabla 5.1 Comandos para el manejo de la pantalla de visualización.*

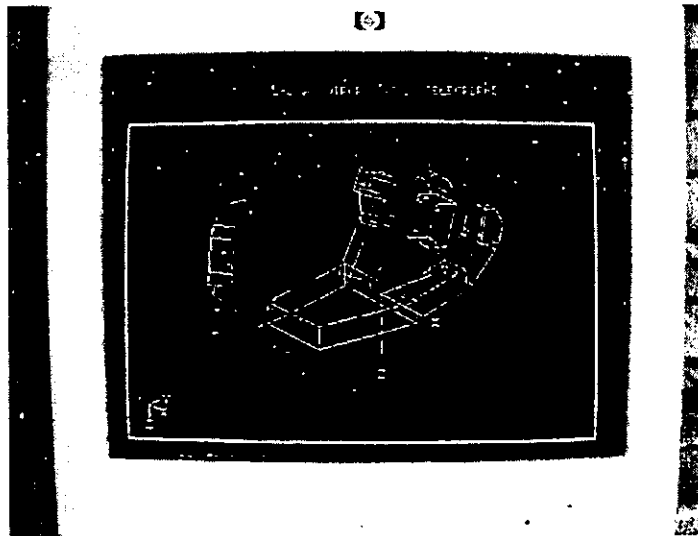


Foto 5. Simulador gráfico por computadora.

### 5.3 Sistema de control y actuación

Esta parte del proyecto es la que se encarga de dar movimiento a cada uno de los elementos que conforman al manipulador, procurando mediante un esquema de control analógico, que se alcancen las posiciones de referencia establecidas ya sea por el sistema de medición o por el sistema de visualización.

En la primera versión del proyecto del manipulador, se desarrolló un banco de actuadores para la instrumentación del manipulador. Este trabajo fue desarrollado por el Ing. César Augusto Espinoza Rommyngth. como trabajo de tesis con el título *Instrumentación de un Manipulador Antropomórfico capaz de reproducir los movimientos de la mano humana utilizando un microprocesador 68HC11*, entendiéndose por instrumentación la implementación de un sistema de control capaz de operar actuadores que movieran los tendones del MAT. En esta versión, se contó con un sistema de actuadores compuestos por motores de corriente directa extraídos de desarmadores inalámbricos de la marca "Black & Decker" modelo 1272, por contar con un alto par y una caja de reducción por medio de engranes planetarios de **60:1**. Además, se emplearon tacogeneradores de CD y un sensor de posición angular resistivo (potenciómetro) como dispositivos para medir la velocidad y posición respectivamente. Se propuso también la utilización de un control distribuido, cuyo control maestro es un microprocesador Motorola MC68HC11-E1FN en modo expandido, utilizado también para el sistema de sensado.

Una de las desventajas de este sistema fue el alto consumo de corriente. En algunas pruebas, se necesitaron valores superiores a los **3 [A]** para poder accionar al motor que se encontraba bloqueado. Otra desventaja se refirió al peso del conjunto de actuadores, ya que cada uno pesaba casi **600 gr**, lo cual volvía casi imposible el montaje sobre un brazo mecánico que podría contener a la mano, pues su peso total superaba los **8 kg**. La tercera y mayor desventaja por la cual se decidió modificar este sistema fue su costo, además al contar con un exceso de material en la estructura de soporte de los actuadores, este sistema se volvió cada vez menos funcional y más costoso.

Para esta segunda fase del proyecto, se diseñó y desarrolló un sistema de actuadores compuesto por once servomotores encargados de comandar a los dedos a través de tendones de nylon. Los servomotores utilizados se controlan por modulación de ancho de pulso y son los circuitos incluidos dentro de su carcasa los que se encargan del control de la posición de la flecha de salida.

El sistema de control consiste en un microprocesador Intel 8031 que traduce los valores obtenidos del sistema de medición en señales apropiadas para los servomotores. Así, aunque el control es de tipo analógico (por potenciómetro) y de malla cerrada, la señal de entrada es generada de forma digital mediante el microprocesador.

En el diseño de la transmisión original, los tendones actuaban en las dos direcciones; para este caso se utilizan los tendones sólo para provocar la flexión, pues durante la extensión un resorte será el encargado de restituir la posición de la falange.

Las ventajas de los servomotores sobre los motores utilizados en un principio son muchas, como la alimentación que requieren, similar a la utilizada por los microprocesadores empleados (**5 volts**); su tamaño reducido y bajo peso; su simplicidad en conexiones y su excelente precisión y exactitud.

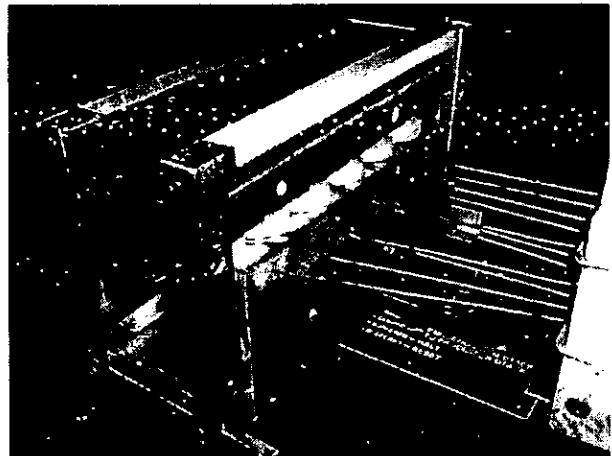
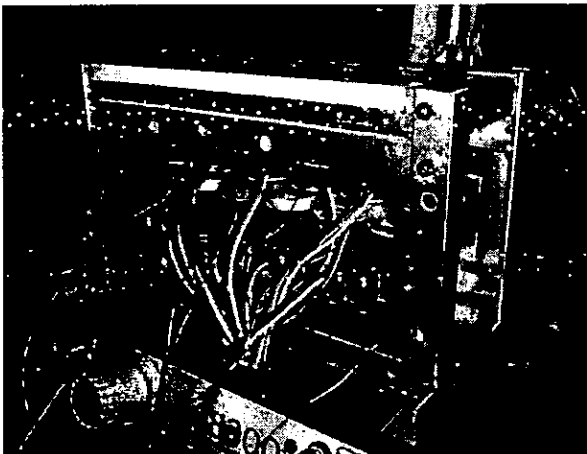


Foto 6. Sistema de actuación con servomotores.

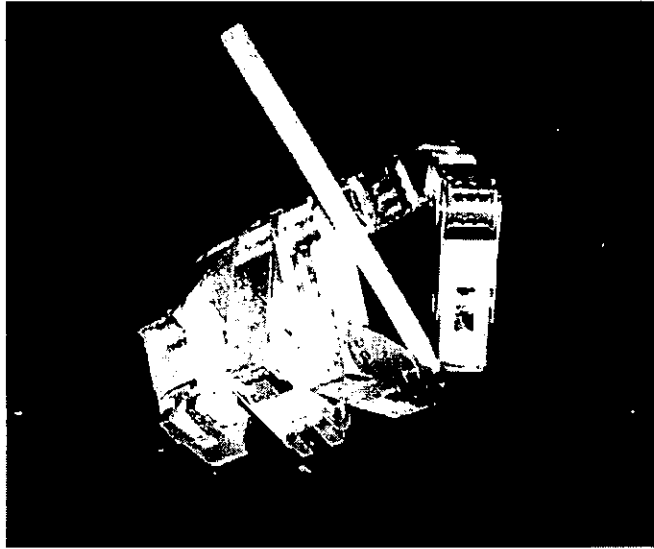
El programa que acciona a los once servomotores a través del microprocesador 8031 se presenta en el **Apéndice C**.

#### **5.4 Sistema mecánico**

Este sistema permite interactuar físicamente con el ambiente de trabajo y, como se ha mencionado, es semejante al de una mano humana, de ahí que se le haya dado el nombre de manipulador antropomórfico. La razón por la cual se decidió que el manipulador fuera de esta clase, es el hecho de que la estructura de la mano permite realizar gran parte de los posibles tipos de sujeción, como son la plana, cilíndrica, esférica, etcétera.

El primer modelo de este proyecto, fue desarrollado por el Ing. Luis Vicente Coloma Margolies como trabajo de tesis en el Departamento de Ingeniería Mecatrónica, con el título *Diseño Mecánico y Construcción de un Manipulador Antropomórfico*, contando con una mano de poliedros de caras rectas construidos en aluminio, pero cuyos espesores resultaron

demasiado grandes, lo que aumentaba considerablemente el peso; además de no poseer la suficiente movilidad requerida en la manipulación precisa de un objeto. (Foto 7).



*Foto 7, Manipulador Antropomórfico Teleoperado I.*

Para el segundo modelo, se cuenta con una mano mecánica de aluminio cuyo peso está reducido casi a la mitad con respecto al primer manipulador y que es accionada por servomotores, transmitiendo el movimiento por medio de tendones de nylon de alta resistencia que servirán como fusibles mecánicos en caso de que el manipulador sea sometido a fuerzas superiores para las que está diseñado.

Entre las características más importantes de este manipulador está la imitación de una mano derecha humana con cuatro dedos; tres de los cuales cumplen con las funciones de los dedos índice, medio y anular; y otro oponible que reproduce las funciones del dedo pulgar. En la mayoría de las manipulaciones que realiza el ser humano, el dedo meñique no cumple una función relevante, y previendo una reducción en el costo de manufactura y los actuadores a emplear se optó por su eliminación.

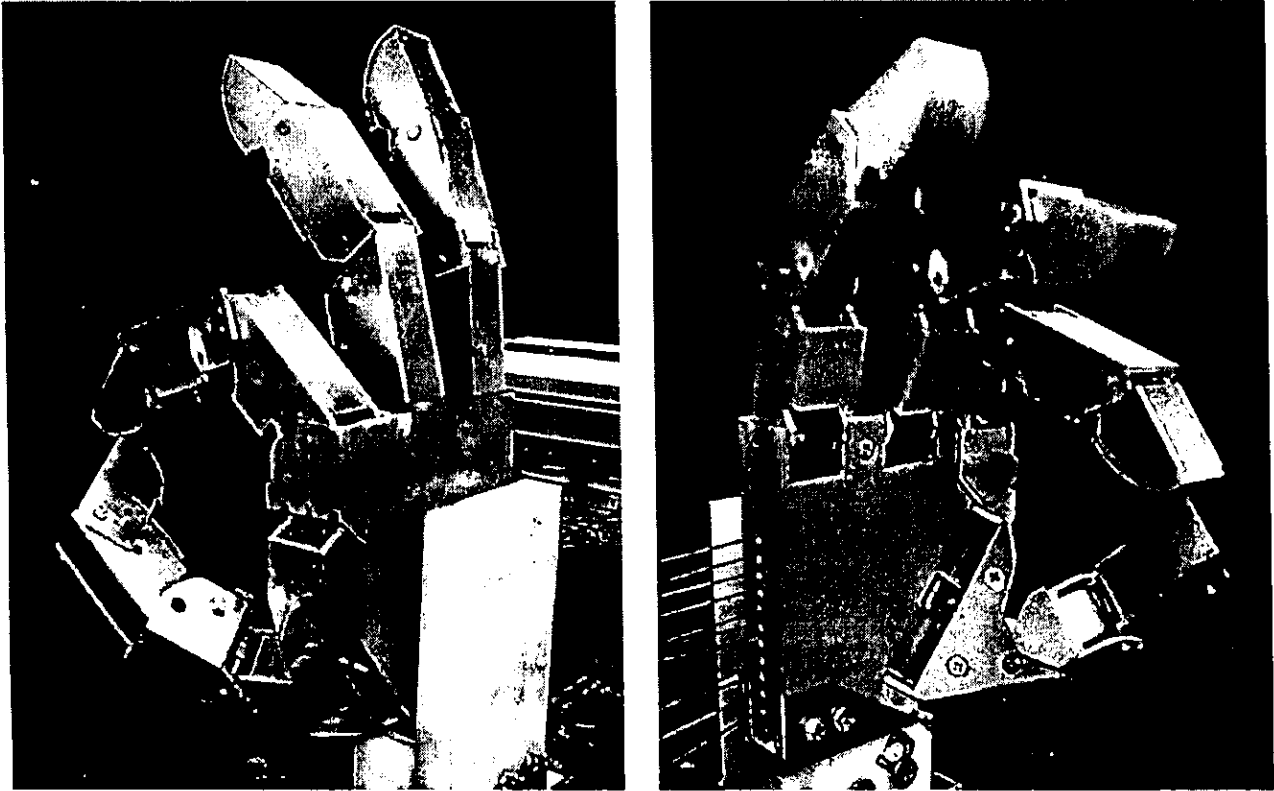
Por otro lado, se descubrió mediante la investigación previa, que las dos últimas falanges en todos los dedos de una mano humana, a excepción del pulgar, cumplen con una relación de movimiento en que, aproximadamente, al flexionar la penúltima falange a cierto ángulo, la última se flexiona involuntariamente dos tercios de ese ángulo, por lo que se diseñó un mecanismo que simulara ese movimiento.

Se definió entonces que la mano mecánica contara con once grados de libertad en simples articulaciones de rotación distribuidos de la siguiente manera: dos grados en cada uno de los dedos medios y anulares; tres grados para el dedo índice y, otros cuatro para el dedo pulgar, cada uno a semejanza de la mano humana.

Se acordó también que las dimensiones de las falanges medial y distal de los dedos índice, medio y anular fueran las mismas a fin de simplificar el diseño del mecanismo de cuatro barras, y que las estructuras en toda la mano fueran poliedros de caras planas, esto es, que no se cuenta con superficies curvas a excepción de las puntas de los dedos, que además, son de hule. Las longitudes de los dedos estarán dadas, entonces, por la variación

en la longitud de la falange proximal, a fin de que cuando la mano se encuentre extendida, la ubicación de las puntas de los dedos sea muy similar a la de una mano humana promedio.

Por otro lado, aunque las superficies de contacto de lo que representa la palma de la mano y las correspondientes zonas internas de los dedos, son de poliedros de caras planas abiertos, se optó por cubrirlos, a modo de protección, con una membrana de hule que además proporcionará mayor adherencia y fricción al manipular objetos.



*Foto 8. Manipulador Antropomórfico Teleoperado II.*

Este segundo modelo del MAT permite un mayor número de manipulaciones en comparación a las que se efectuaban con el primero y, debido a que el dedo pulgar en el nuevo modelo puede oponerse mejor al resto de los dedos, las dimensiones y características de los objetos a manipular son más amplias.

## 5.5 Sistema de comunicación

Cada uno de los sistemas que integran al proyecto requiere interactuar con los demás, ya sea para obtener información o para entregar datos que sirvan de entrada para algún otro. Se eligió a la comunicación serial como medio de comunicación entre los sistemas que intercambian información dado que todos cuentan con elementos capaces de establecer comunicación de este tipo.

El sistema de medición puede comunicarse directamente con el sistema de visualización, con el sistema de actuación y control o con ambos al mismo tiempo. Cuando se encuentran los tres sistemas conectados entonces se tiene el sistema de teleoperación completo, funcionando el sistema de medición como entrada para los otros dos.

También el sistema de visualización puede conectarse directamente al sistema de actuación y control para reproducir alguna secuencia previamente almacenada.

La transmisión serial se hace a **9600 bps**, a través de una conexión RS-232, con un formato de bytes de control y datos. Se requiere de un cable serial tipo Null-Modem con regreso de información para establecer la comunicación entre la computadora y cualquiera de los otros dos sistemas. Entre los sistemas de medición y el de control y actuación basta con un cable del tipo Null-Modem simple.

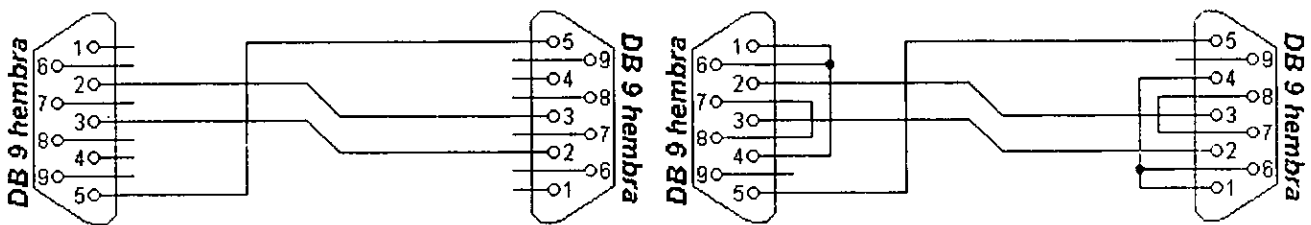


Figura 5.6 a) Cable Null-Modem simple, b) Cable Null-Modem con regreso de información.

Para conectar los tres sistemas juntos se construyó un cable serial tipo Null-Modem con regreso de información para la comunicación entre el sistema de medición y el sistema de visualización con otro cable en paralelo que incluye solo a la terminal TX del sistema de medición que se dirige al sistema de actuación, esto con el fin de eliminar choques de información entre los tres. Así, cuando se encuentra el sistema de teleoperación completo, el sistema de actuación y control sólo recibe información y no tiene posibilidad de enviar nada.

La información formateada se transmite en una cadena que corresponde al protocolo utilizado por los instrumentos con implementación MIDI, clasificado como un mensaje exclusivo en tiempo real. En este protocolo los bytes de control se caracterizan por tener un 1 (uno) en la posición más significativa, mientras que los bytes de datos tienen un 0 (cero) en la misma posición.

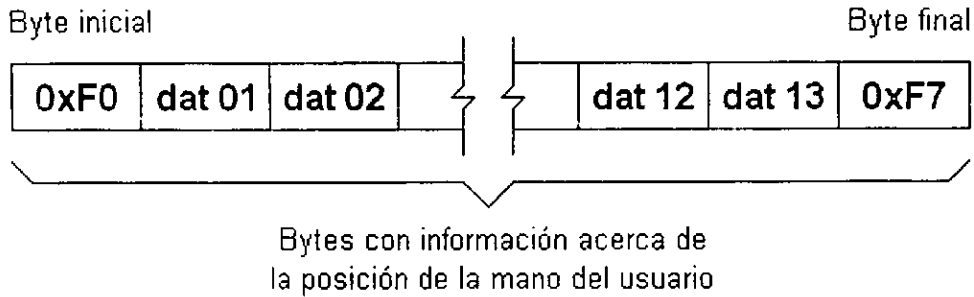


Figura 5.7 Configuración de la cadena de información.

Se transmiten 13 bytes de datos aunque sólo 11 son los utilizados, uno para cada grado de libertad, los otros dos tienen un valor fijo y se desprecian cuando se procesa la información. El bit que diferencia a los bytes de datos de los de control es lo que obligó a restringir la resolución de los datos de 0 a 127.

El sistema de visualización y el sistema de actuación y control presentan retrasos en la respuesta debido al tiempo que tardan los microprocesadores en procesar las cadenas de información. El sistema de visualización tarda alrededor de **80 ms** en refrescar el modelo, esto es, tiene una frecuencia de despliegue de **12.4 Hz**. Esta frecuencia es suficiente para que el usuario no note el retraso, pero el sistema de actuación y control genera la modulación de pulsos por software a partir de las cadenas recibidas y tarda más en completar el control para los once servos que el tiempo entre una cadena y otra, lo que hace que se pierdan cadenas y el movimiento del manipulador presente retardos de respuesta graves.



# Capítulo 6

## INTEGRACIÓN DEL PROYECTO

Este capítulo está dedicado al ensamble e integración del sistema de actuación y de la mano mecánica con los sistemas existentes de medición (guante sensor) y sistema de visualización.

Cabe aclarar que la parte medular de este trabajo se refiere al rediseño del sistema de control y actuación, y del sistema mecánico, realizando las mejoras pertinentes o el total desarrollo de la o las partes necesarias en ellos que permitan incrementar la funcionalidad del MAT II.

El otro objetivo de este trabajo fue, una vez contando con los dos sistemas mencionados, integrar cada uno de los elementos que conforman el proyecto a fin de contar con un manipulador funcional operado a distancia que cumpla con ciertas características de posicionamiento y manipulación, y que fuera capaz de realizar la mayoría de las sujeciones de las que es capaz el ser humano.

Este proyecto incluye los diversos sistemas mencionados en el **capítulo 5** de este trabajo y los integra de manera funcional y versátil. Estos sistemas son: un guante que permita al usuario interactuar con la parte mecánica, aportando las diversas posiciones de sus dedos; un medio para controlar y accionar a la parte mecánica de manera eficiente, rápida y con cierta fuerza; una mano mecánica, similar a la humana que ofrezca la movilidad necesaria para la manipulación de objetos, contando además cualidades importantes como la resistencia, flexibilidad, durabilidad, ligereza, rapidez y tamaño adecuado; y, un medio visual que muestre al usuario la posición y el tipo de movimientos que realiza el manipulador en tiempo real y verazmente, sin necesidad de utilizar la parte mecánica.

### **6.1 Fabricación y ensamble del sistema mecánico.**

Como ya se vio en el **Capítulo 4**, y basados en los diseños expuestos en el **Capítulo 2** y mostrados en el **Apéndice D**, este manipulador cuenta con una estructura rígida de aluminio; con articulaciones, ejes de rotación y de reorientación para los tendones de varilla de acero; tendones de nylon y resortes de acero inoxidable como sistema de restablecimiento de la posición. Este manipulador está montado sobre una base rígida donde se aloja la tarjeta controladora del 8031 y el circuito de potencia requerido para el accionamiento de los servomotores, y está sujeto a esta estructura en la zona correspondiente a la muñeca pero careciendo de movilidad en ésta.

Específicamente, las partes mecánicas de aluminio que componen al manipulador fueron diseñadas con ayuda de un sistema CAD, y maquinadas a partir de perfiles comerciales y lámina de aluminio calibre 18 y 16.

Una de las complicaciones presentadas para el maquinado de los elementos a partir de la lámina de aluminio, se debió a la sujeción de ésta en las prensas de la fresadora, ya que se corría el riesgo de deformar la lámina si se le aplicaba demasiada presión. Por otro lado, si se realizaban demasiados cortes en la lámina, también existía la posibilidad de debilitarla y por lo tanto, perder la sujeción o deformarla durante el corte. Por esto, se decidió emplear láminas de mayor área que soportaran e impidieran cualquier tipo de deformación provocada por la pérdida de material durante el corte, sin embargo, esto provocó mayor desperdicio.

Todos los elementos que componen a las falanges, así como a la palma del manipulador, se diseñaron, como ya se vio, en un software CAD y se generó el código para la fresadora de control numérico utilizando un software CAM. Una vez creado el código, se colocaron los perfiles y la lámina de aluminio en la fresadora de CNC que cortó todos los elementos necesarios.

Se utilizó un cortador recto de **3/32 de pulgada** para las piezas obtenidas de la lámina y un cortador de **3/8"** para los cortes en las piezas fabricadas a partir de perfiles comerciales de aluminio. Los ejes de rotación y reorientación (**1/8"** y **3/32"** de diámetro respectivamente) se obtuvieron de varilla de acero y todos los cortes se hicieron con segueta. La longitud de éstos excedía a la requerida para las diversas falanges o para la palma, y una vez ensamblados se ajustaron a la longitud correspondiente desbastándolos en un esmeril circular.

El ensamble de los elementos del manipulador se realizó en el siguiente orden:

1. Unión de las placas de aluminio que conforman al metacarpo del pulgar.
2. Unión de las placas de aluminio que conforman el dorso y caras laterales de la palma (la cara anterior se dejó descubierta momentáneamente).
3. Colocación de los ejes de reorientación en las falanges y de aquellos donde se sujetan los tendones.
4. Pegado de dichos ejes y desbaste para conseguir la longitud adecuada.
5. Colocación de la barra acopladora en los dedos índice, medio y anular con sus correspondientes ejes de rotación.
6. Pegado de dichos ejes y desbaste para conseguir la longitud adecuada.
7. Ensamble de las diversas falanges entre sí y colocación de los ejes de rotación entre éstas, introduciendo al mismo tiempo los resortes helicoidales de torsión correspondientes.
8. Pegado de éstos ejes y su desbaste para conseguir la longitud adecuada.
9. Ensamble de los elementos abductores del dedo índice y del pulgar con las correspondientes falanges proximales, introduciendo los resortes helicoidales de torsión correspondientes.
10. Pegado de los ejes correspondientes y su desbaste para conseguir la longitud adecuada.
11. Ensamble del elemento abductor del pulgar con el metacarpo, colocación del eje de rotación y resorte correspondientes.
12. Pegado de dicho eje y desbaste para conseguir la longitud adecuada.

13. Ensamble del metacarpo del pulgar con la palma, colocación del eje de rotación y resorte correspondiente.
14. Pegado de dicho eje y desbaste para conseguir la longitud adecuada.
15. Introducción de los tendones por la correspondiente cara lateral de la palma y su conducción por las diversas rutas hasta el encuentro con los ejes de sujeción de las diversas falanges (la orientación de estos tendones dentro de la palma se dejaron sobrepuestos pues aún no se habían colocado los ejes de reorientación en ésta).
16. Colocación de la cara anterior de la palma intentando no mover los tendones sobrepuestos.
17. Colocación de los ejes de reorientación de la palma.
18. Pegado de dichos ejes y desbaste para conseguir la longitud adecuada.
19. Ensamble del elemento abductor del dedo índice con la palma y colocación del correspondiente eje de rotación, introduciendo el resorte de torsión correspondiente.
20. Pegado de este eje y su desbaste para conseguir la longitud adecuada.
21. Colocación y adhesión de las superficies de hule correspondientes a los diversos elementos de la mano mecánica.
22. Ensamble de la mano con el elemento de soporte diseñado para ésta (dicho soporte ya se encuentra colocado sobre la estructura que contiene a la tarjeta controladora, los servomotores y su tarjeta de potencia).
23. Colocación, con ajuste y calibración, de los tendones a las poleas de los servomotores correspondientes.

La unión de las diversas placas de aluminio entre sí, así como la unión de los ejes de rotación y reorientación con los diversos elementos se realizó utilizando un pegamento de contacto para uniones metal-metal

No existe una forma detallada de cómo deben desensamblarse los dedos y la palma, pero como el manipulador se diseñó para que lo primero que falle sean los tendones, no existe una necesidad aparente para realizar este desensamble. Por otro lado, como se espera que los tendones fallen cuando sea el manipulador sometido a cargas extremas, en este caso sí existe una forma sencilla para desacoplarlos y reemplazarlos.

Una vez fabricada y ensamblada la parte mecánica, se procedió a realizar todas las conexiones, ensambles, acoplamientos y cableados para incorporarla con los otros sistemas.

## **6.2 Incorporación de los diversos sistemas.**

Lo que se tiene, al inicio de la secuencia de incorporación del proyecto, es a un usuario que se coloca el guante del sistema de medición en su mano derecha. Este usuario, al flexionar sus dedos, provoca un defasamiento de la posición angular de los transductores conectados al guante (emisor / fototransistor infrarrojo), y éstos generan señales que llevan la información necesaria para determinar la posición angular de las articulaciones de la mano del usuario.

Un microcontrolador HC11 es el encargado de adquirir la información de los sensores del guante, los cuales están conectados a un circuito de amplificación y multiplexado que acondiciona las señales del guante para el convertidor analógico/digital del microprocesador.

El circuito de amplificación y multiplexado está basado en un amplificador (LM324) que limita la señal entre 0 y 3 volts para que se aproveche al máximo la capacidad de conversión analógica/digital del HC11. Para la selección de las señales amplificadas se utilizan dos MUX/DEMUX analógicos CMOS 4052 para conformar un DEMUX de 16 a 4 señales por medio de una palabra de 2 bits, que selecciona al sensor (emisor / fototransistor infrarrojo) a leer. El diagrama del circuito empleado para cada transductor se muestra en la figura 6.1, mientras que el esquema de la tarjeta que integra todos estos circuitos para todos los pares de transductores y los dos multiplexores, se muestra en la figura 6.2.

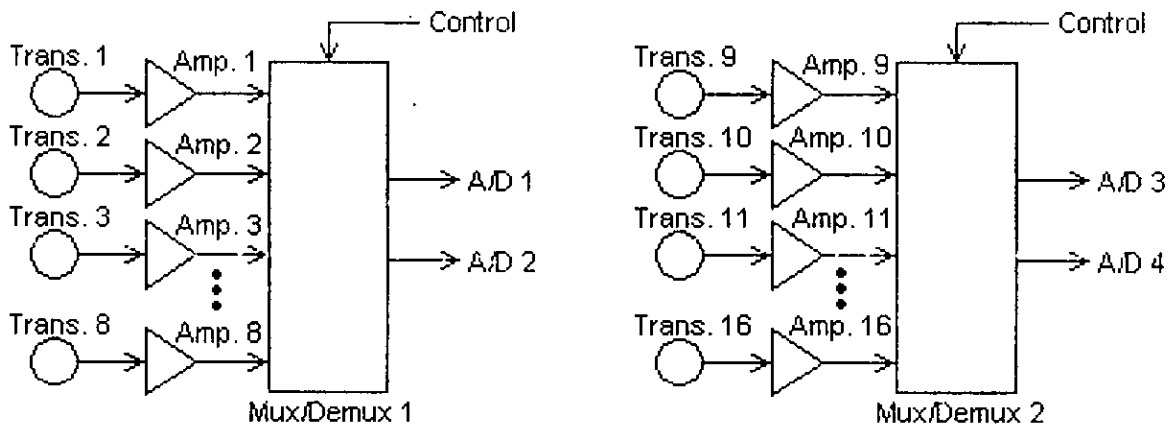


Figura 6.1 Diagrama de amplificación y multiplexado de la señal de los transductores.

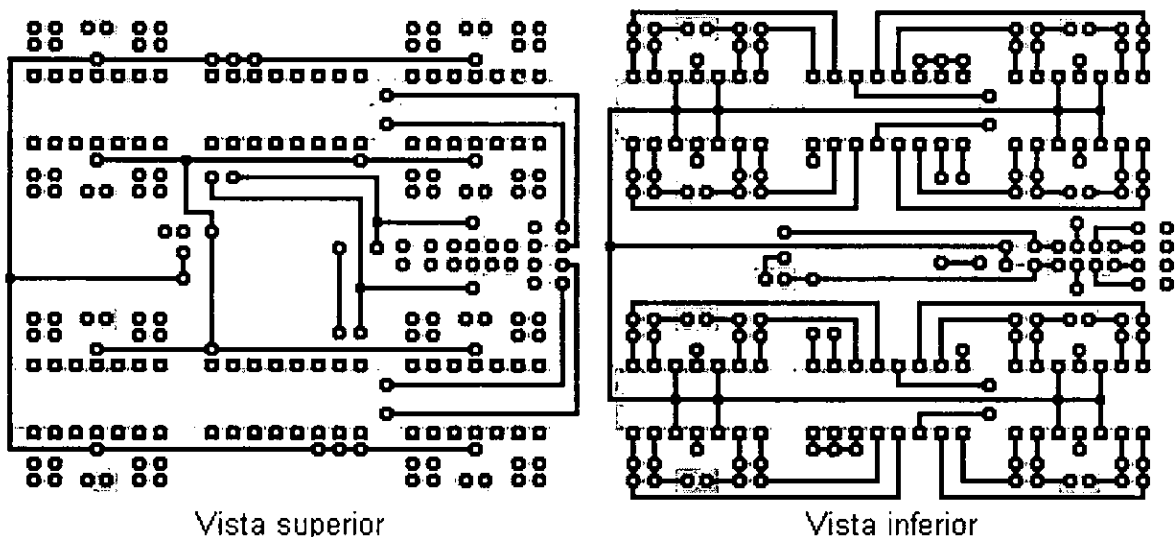


Figura 6.2 Esquema de la tarjeta de amplificación y multiplexado.

La parte correspondiente a los circuitos electrónicos que requiere el guante y sus transductores se muestra en la **figura 6.3**. En este diagrama se incluye el amplificador de la **figura 6.1** y la indicación **C** se refiere a la señal que entrará al multiplexor.

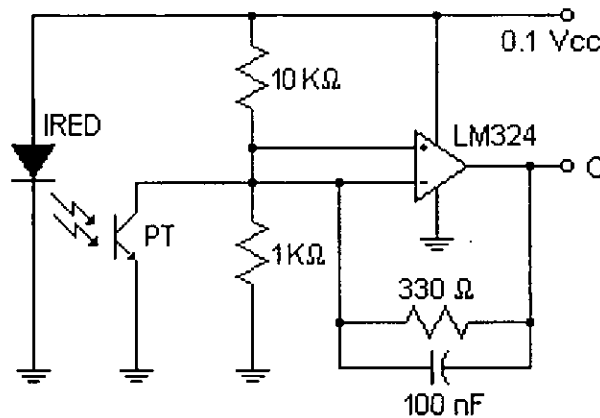


Figura 6.3 Diagrama eléctrico para los transductores y su amplificación.

La tarjeta del HC11 envía la información obtenida del guante a otro microprocesador, un Intel 8031, a través de un cable serial.

Cuando se requiere incorporar el sistema de visualización junto con los demás sistemas, se debe conectar un cable de comunicación serial tipo null-modem de la tarjeta del HC11 al puerto serial de una PC. Para esto se construyó un cable de una entrada y dos salidas: la entrada se conecta a la tarjeta del HC11 y las salidas son para la tarjeta del 8031 y para el puerto serial de la computadora.

El sistema de visualización recoge las señales provenientes del guante de medición y calcula la cinemática del modelo para desplegarlo después en la pantalla de la computadora. Esa misma señal se envía a la tarjeta del 8031 para ser procesada y enviada hacia los servomotores.

El programa del 8031 genera las señales requeridas para el accionamiento de los motores. Para esto, se utiliza un circuito de potencia para cada servomotor que se muestra en la **figura 6.4** ( $L_1$ ,  $L_2$  y  $N$  son las mismas conexiones mostradas en la **figura 2.15**).

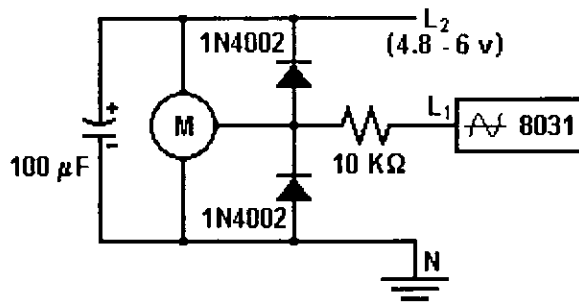


Figura 6.4 Diagrama electrónico para cada servomotor.

En la tarjeta de potencia se conectan los tres cables de cada servomotor ( $L_1$ ,  $L_2$  y  $N$ ), que están representados en la **figura 6.4**. La posición de los servomotores es controlada por modulación de ancho de pulso (PWM); la frecuencia no debe ser mayor de 50 Hz y el ciclo de trabajo oscila entre 6.25 y 9.25 %.

Una vez accionados los servomotores, lo siguiente es acoplarlos con la mano mecánica.

A las poleas de los servomotores se unen los tendones de nylon, pegándolos a éstas con pequeñas gotas de silicón que pueden ser removidas y reubicadas en caso de ser necesario, es por esta versatilidad por la que se optó por este tipo de unión.

Estos tendones son los encargados de modificar las posiciones angulares de las falanges y articulaciones de la mano mecánica de aluminio a partir de las posiciones de los servomotores.

Finalmente, para el reestablecimiento y extensión de los dedos del manipulador se emplean resortes que facilitan este trabajo y que dotan a la mano mecánica de características humanas.

Es importante añadir que la estructura que soporta a los servomotores se construyó con perfiles de aluminio de sección transversal tipo "L". En esta estructura se disponen, como se comentó en el **capítulo 2**, de manera horizontal y en dos niveles los once motores empleados, cinco en la línea inferior y seis en la superior. Para toda la estructura se empleó el mismo tipo de perfil, cuyo espesor es de 1.2 mm y 12.65 mm por lado; las cuatro diferentes longitudes empleadas son:  $L_A = 100$  mm,  $L_B = 180$  mm,  $L_C = 63$  mm y  $L_D = 100$  mm. Esta estructura se muestra en la siguiente figura:

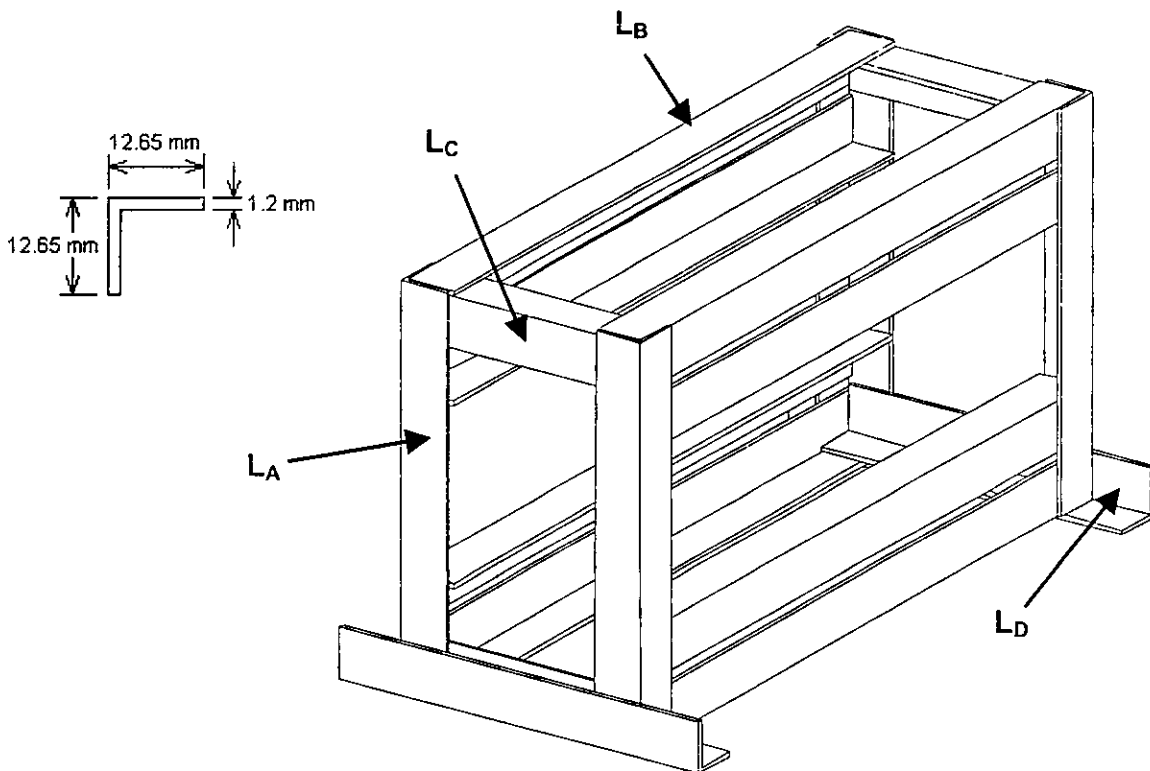


Figura 6.5 Estructura de soporte para los once servomotores.

En la **figura 6.6** se ejemplifica la forma en la que interactúan los diversos sistemas que componen al Manipulador Antropomórfico Teleoperado II y las conexiones que existen entre éstos.

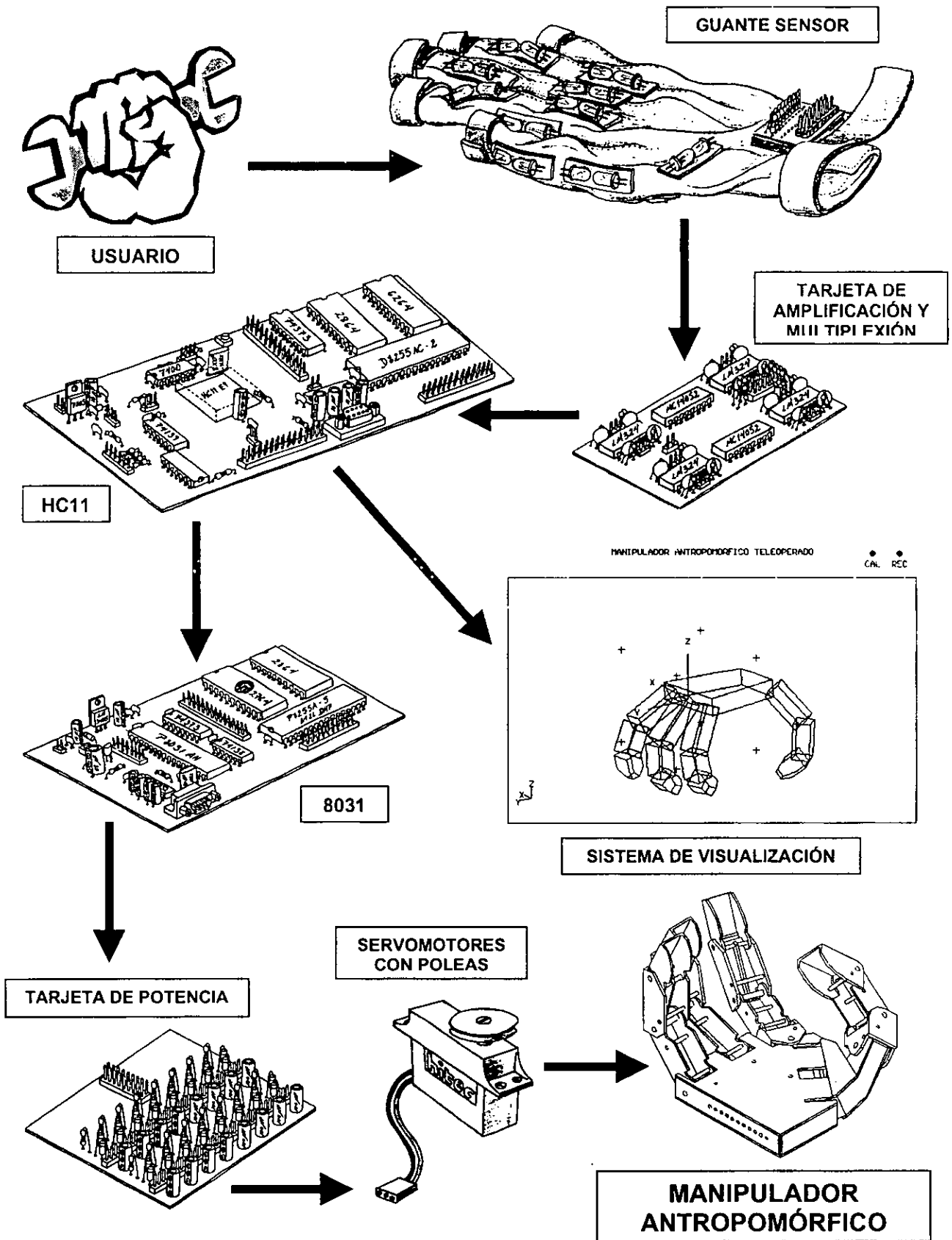
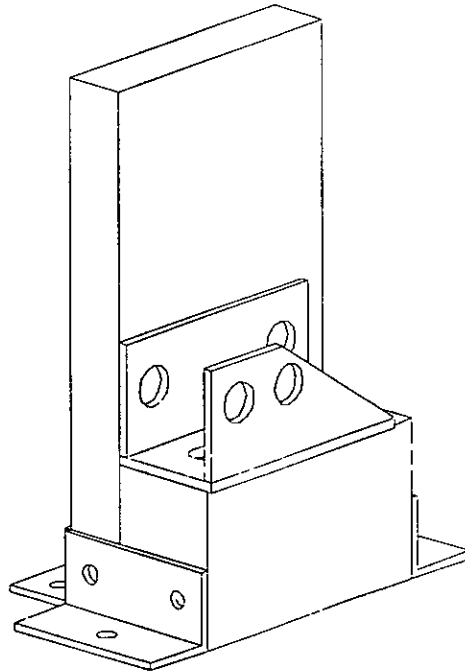


Figura 6.6 Esquema de los diversos sistemas del MAT II.

Por otro lado, la estructura que soporta a la mano mecánica y que le proporciona la orientación y elevación necesarios para la realización de pruebas, se construyó a partir de una placa de nylamid de **7/16 de pulgada** de espesor y un soporte rígido de aluminio obtenido a partir de un perfil tipo "U", que sirve para sujetar a la mano mecánica a la estructura de nylamid. Esta estructura coloca al manipulador de manera vertical, de tal forma que puedan apreciarse sus movimientos y flexiones, sin obstaculizar demasiado la manipulación de objetos; ésta se muestra en la **figura 6.7**.



*Figura 6.7 Soporte de la mano mecánica.*

Finalmente, y tratando de corregir otro de los problemas encontrados en el modelo anterior del MAT, se optó por colocar todos los sistemas, hasta donde fuera posible, en alguna estructura o arreglo que permitiera su movilidad, que fuera de volumen reducido y que permitiera contener internamente a la mayoría de los cables de conexiones empleados. Para esto se consiguieron dos estructuras rígidas tipo caja, iguales en dimensiones, de lámina de aluminio y con extremos de plástico. Estas cajas son delgadas (**4 cm**) y de forma rectangular (**19.5x27 cm**), lo que permite el alojamiento de las tarjetas controladoras de los diversos sistemas.

En una de estas cajas se introdujo la tarjeta microcontroladora del HC11 y la tarjeta de amplificación y multiplexado que requiere el guante sensor. La conexión entre éstas se realiza internamente y sobre uno de los extremos de plástico de la caja se colocó el conector para la alimentación eléctrica, el botón que sirve para dar RESET a la tarjeta del HC11 y el conector tipo *DB-9* que se utiliza para el cable que va hacia la tarjeta del 8031 y a la PC. Por la cara superior de la caja sale el cable que proviene de la tarjeta de amplificación y multiplexado y que se conecta con el guante sensor.

En la otra caja se aloja la tarjeta microcontroladora del 8031 y la tarjeta del circuito de potencia que requieren los servomotores. La conexión entre éstas también se realiza internamente y en uno de los extremos de plástico de esta caja se encuentra el conector para la alimentación eléctrica, el botón que sirve para dar RESET a la tarjeta



del 8031 y el conector tipo *DB-9* que se utiliza para el cable que proviene de la tarjeta del HC11. La diferencia más notoria entre esta y la otra caja es que en la parte superior de ésta se colocó, como ya se dijo, la estructura que contiene a los servomotores y la estructura que soporta a la mano mecánica, además de un pequeño ventilador que trabaja a **12 volts** que sirve para mantener baja la temperatura del microprocesador 8031.

La finalidad de esta integración es mostrar lo que para nuestro caso representa la *teleoperación*, ya que el sistema que contiene al guante y su controlador es independiente al que contiene a la mano mecánica y sus actuadores; mostrando que la aplicación del simulador gráfico en computadora depende directamente del sistema del guante y la tarjeta del HC11, y que el cable de comunicación entre las tarjetas del HC11 y del 8031 puede medir varios metros, o incluso hasta puede ser sustituido por un canal de comunicación vía MODEM. Este tipo de incorporación es lo que se conoce como *sistema modular*.

Estas estructuras, conteniendo ya a todos los sistemas mencionados y sus conexiones, se muestran en las **fotos 9, 10, 11 y 12**.

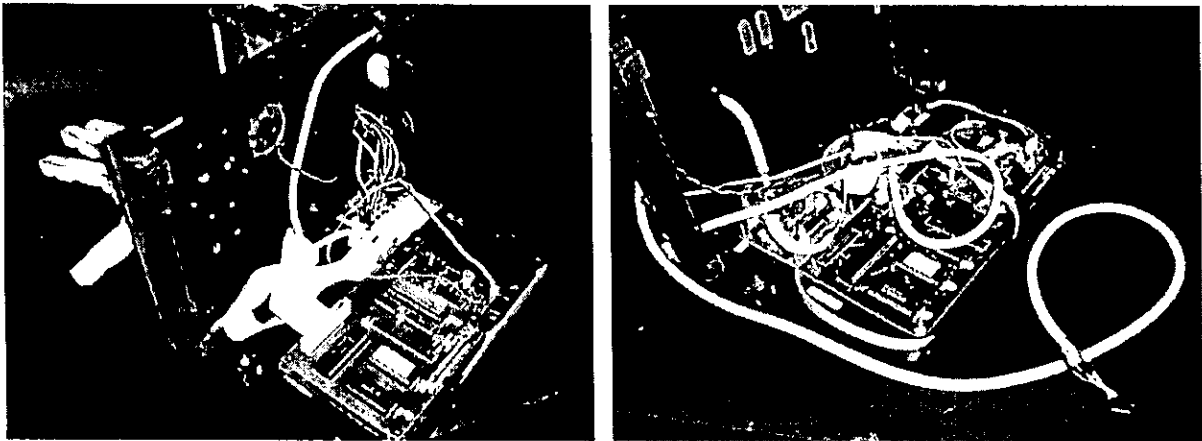


Foto 9 Disposición de las tarjetas microcontroladoras del MAT II.

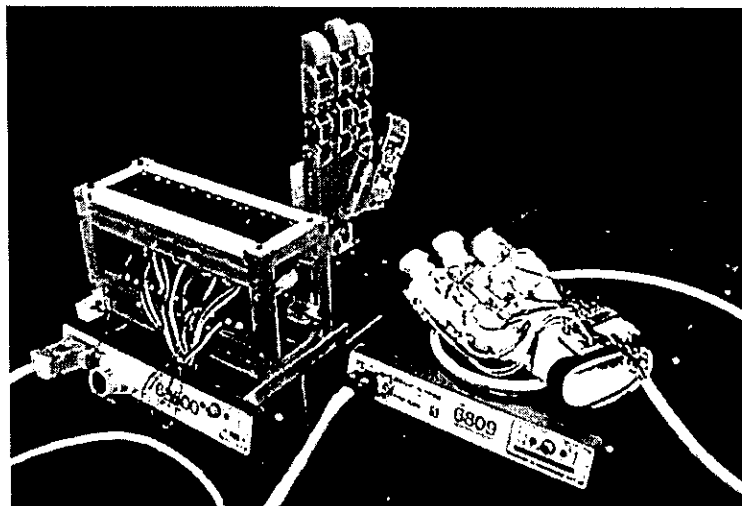
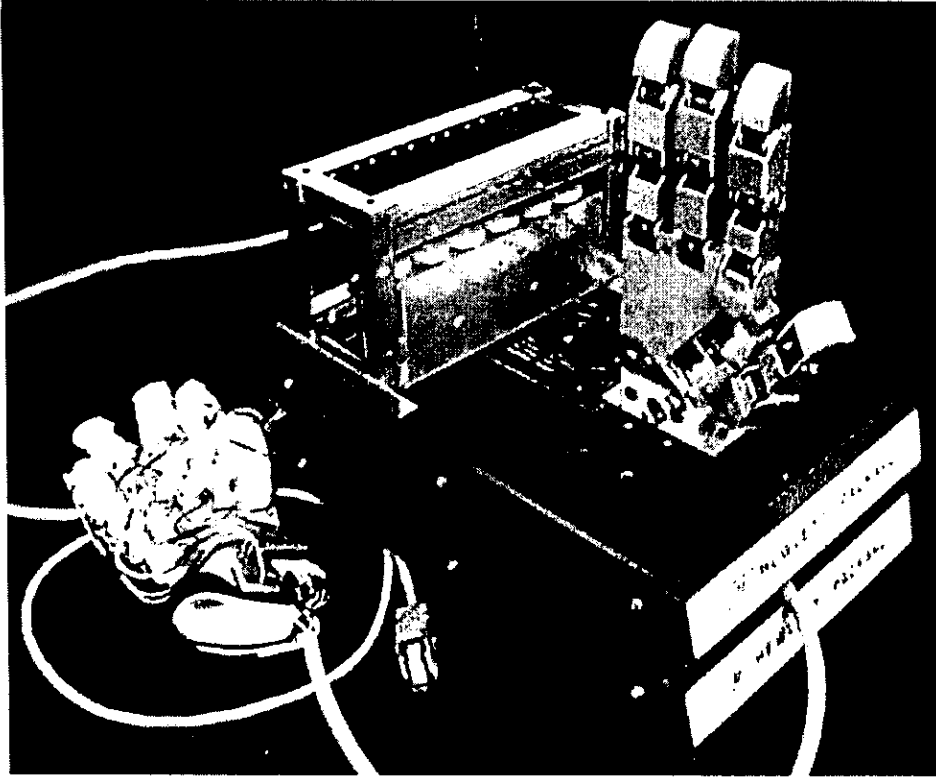
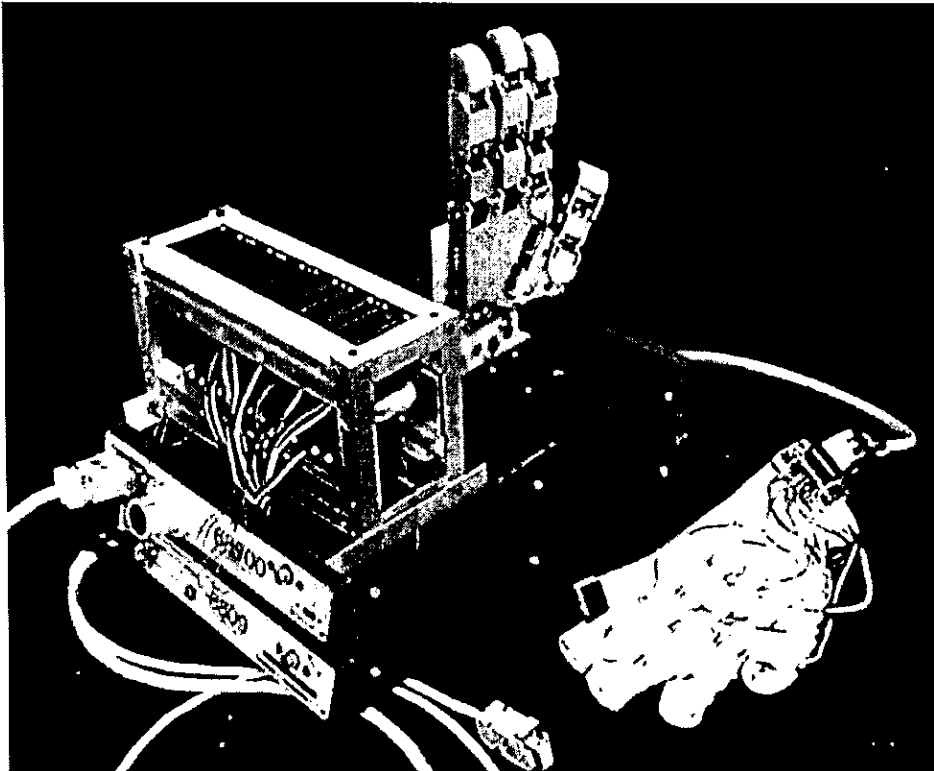


Foto 10 Incorporación del MAT II, disposición horizontal.



*Foto 11 Incorporación del MAT II, disposición vertical, vista frontal.*



*Foto 12 Incorporación del MAT II, disposición vertical, vista posterior.*

### 6.3 Resultados.

Una vez realizado el ensamble del manipulador se procedió a realizar diversos tipos de pruebas del sistema: como la fuerza proporcionada por los resortes para la extensión de los dedos, la veracidad de las posiciones angulares, la fuerza aplicada, la velocidad de respuesta y los tipos de sujeciones. Las dos primeras pruebas se realizaron con el manipulador sin ser montado sobre su base y, obviamente, sin conectarse con los servomotores. En la tercer prueba, la mano ya estaba montada sobre su base de nylon pero sin conexión con los servomotores.

Estas pruebas fueron diseñadas incluso para estimar la resistencia de los tendones de nylon, cuyo propósito, entre otros, es funcionar como fusibles mecánicos a fin de que se rompan antes de que el manipulador o los motores sufran algún daño que resultara más costoso.

#### Veracidad de las posiciones angulares - límite:

La flexión y extensión de los dedos permite a las diversas falanges moverse los siguientes rangos de valores angulares sin obstrucción física:

elemento	ángulo [°]	elemento	ángulo [°]
Falange proximal – índice	-1.15 a 88	Falange proximal – anular	-0.3 a 112.5
Falange medial – índice	1.65 a 86.3	Falange medial – anular	0 a 88.2
Falange distal – índice	0.1 a 51.15	Falange distal – anular	0.5 a 52.8
Abductor – índice	2.65 a 29.2	Falange proximal – pulgar	-5.4 a 86.7
Falange proximal – medio	0.25 a 109.7	Falange distal – pulgar	-1.4 a 87.85
Falange medial – medio	0.4 a 87	Metacarpo – pulgar	0.5 a 91.3
Falange distal – medio	0.1 a 49.35	Abductor – pulgar	-2 a 51

Estas variaciones con respecto al valor angular teórico se deben a la aproximación de las dimensiones de los elementos de cada falange en lo que a diseño se refiere y problemas de ensamble presentados. Recordando que el valor teórico para las falanges proximales y mediales, así como para la distal del pulgar y el metacarpo del mismo es de 0 a 90°; de 0 a 60° para las falanges distales del índice, medio y anular; de 0 a 30° para el abductor del índice, y de 0 a 45° para el abductor del pulgar.

Por otro lado, la flexión de las falanges mediales de los dedos índice, medio y anular, producen una rotación inducida en sus correspondientes falanges proximales, así como la flexión de la falange distal del pulgar produce cierta rotación en la falange proximal, e incluso en los movimientos de abducción y flexión del metacarpo se produce esta ligera rotación; éstos valores son:

- Falange proximal y medial del anular: 12°
- Falange proximal y medial del medio: 16°
- Falange proximal y medial del índice: 17°
- Abductor y falange proximal del índice: 7°
- Abductor y falange distal del índice: 3°
- Falange proximal y distal del pulgar: 28°
- Metacarpo y falange distal del pulgar: 19°
- Metacarpo y abductor del pulgar: 8°

Esta rotación inducida se presenta por los radios de rotación de las diversas articulaciones, que al flexionarse, producen un estiramiento y tensión sobre otros tendones de otras articulaciones. Este problema puede solucionarse o reducirse teniendo un sistema de control en tiempo real y con sensores localizados en cada articulación, el cual debe medir el ángulo en la articulación y compararlo con el valor real proveniente del guante; hecho esto, deberá corregir el error reduciendo la rotación en el servomotor correspondiente a fin de alcanzar al valor real.

#### Fuerza aplicada:

Para medir este parámetro se consiguieron dinamómetros de 1 y 10 N, que fueron conectados a los tendones de cada dedo, y colocándolos en forma horizontal (para evitar la oposición o ayuda de la fuerza de gravedad), se flexionó cada dedo hasta su máximo ángulo y se registró el valor correspondiente:

elemento	fuerza
Falange proximal – índice	3.2 N
Falange medial – índice	4.5 N
Abductor – índice	5.8 N
Falange proximal – medio	3.7 N
Falange medial – medio	4.4 N

elemento	fuerza
Falange proximal – anular	3.5 N
Falange medial – anular	5.2 N
Falange proximal – pulgar	9.4 N
Falange distal – pulgar	6.7 N
Metacarpo – pulgar	5.3 N
Abductor – pulgar	5.8 N

Lo que muestran estos datos es el valor de la fuerza máxima necesaria para flexionar las diversas articulaciones. Sin embargo, si la mano se colocara en forma vertical de tal forma que para la flexión se tuviera que considerar la oposición de la gravedad, estos valores se incrementarían en un 10% aproximadamente. Cabe aclarar que durante la flexión esta fuerza requerida no es la misma, pues al no contarse con un radio de giro constante, el brazo de palanca también es variable.

#### Fuerza de oposición de los resortes:

Este valor se tomó para cada articulación que cuenta con resorte y se realizó como se muestra en la **figura 6.8**, colocando un dinamómetro de forma perpendicular al movimiento de rotación, en el sentido de la flexión de las falanges, oponiéndose al trabajo desempeñado por los resortes. Cabe mencionar, como puede apreciarse en la figura, que en cada valor de fuerza mostrado en la tabla, se tiene que considerar la distancia desde el eje de rotación hasta el punto de aplicación de la prueba con el dinamómetro.

Los resultados son los siguientes:

elemento	fuerza
Falange proximal – índice	1.15 N
Falange medial – índice	1.1 N
Abductor – índice	0.47 N
Falange proximal – medio	0.89 N
Falange medial – medio	1.13 N

elemento	fuerza
Falange proximal – anular	1.07 N
Falange medial – anular	1.06 N
Falange proximal – pulgar	1.18 N
Falange distal – pulgar	1.8 N
Metacarpo – pulgar	0.68 N
Abductor – pulgar	0.59 N

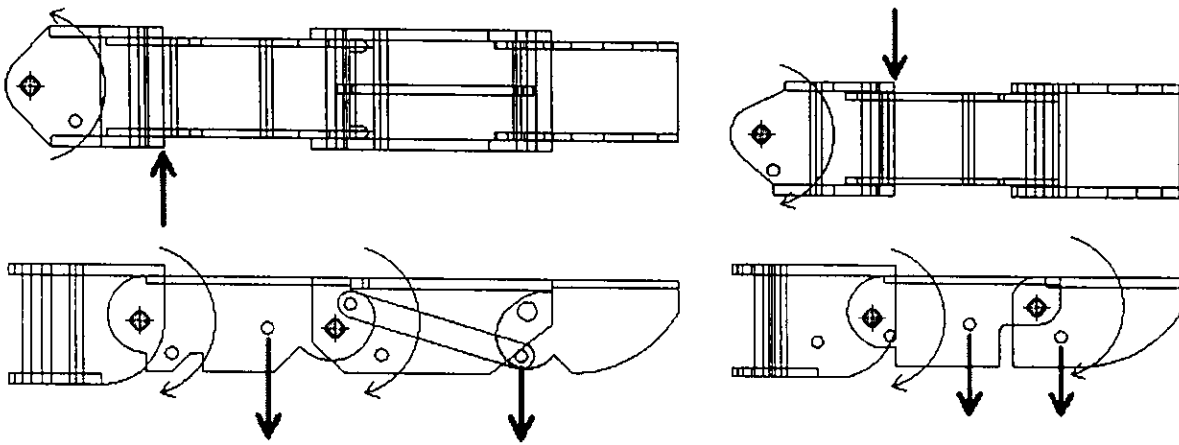


Figura 6.8 Representación vectorial de la fuerza a medir.

Los valores de las distancias empleadas para realizar esta prueba, como ya se dijo, están tomadas perpendicularmente (tangencialmente al ángulo de rotación) desde el eje de rotación de la articulación hasta el punto en el que se aplicó la carga con el dinamómetro. Estos valores son:

elemento	distancia
Falange proximal – índice	1.98 cm
Falange medial – índice	2.945 cm
Abductor – índice	2.47 cm
Falange proximal – medio	3 cm
Falange medial – medio	2.945 cm

elemento	distancia
Falange proximal – anular	2.51 cm
Falange medial – anular	2.945 cm
Falange proximal – pulgar	1.625 cm
Falange distal – pulgar	0.65 cm
Metacarpo – pulgar	3.64 cm
Abductor – pulgar	2.435 cm

Los datos de la fuerza de oposición son muy distintos con fuerza de gravedad en contra o a favor, esto es, que en algunos casos, dependiendo del peso de las falanges, el valor de la fuerza ofrecida por el resorte es apenas suficiente para soportar el peso de los dedos, mientras que con fuerza de gravedad a favor el resorte es muy eficiente. Para esto fueron escogidos los resortes, por lo que se puede concluir que, a pesar de que se emplearon resortes con las mismas características para todas las articulaciones, éstos cumplieron su cometido.

Velocidad de respuesta:

Para determinar estos valores, se emplearon métodos simples estadísticos en donde se realizaron varias mediciones para cada falange del manipulador, tanto en flexión como en extensión.

Se trató de medir manualmente (lo que arrastra cierto error de lectura) la diferencia o desfase de tiempo desde el cierre o apertura total de las articulaciones del usuario con respecto a las del modelo mecánico, dando como resultado los siguientes valores:

*Flexión:*

elemento	tiempo
Falange proximal – índice	<b>0.34 s</b>
Falange medial – índice	<b>0.35 s</b>
Abductor – índice	<b>1.94 s</b>
Falange proximal – medio	<b>0.21 s</b>
Falange medial – medio	<b>0.31 s</b>

elemento	tiempo
Falange proximal – anular	<b>0.28 s</b>
Falange medial – anular	<b>0.25 s</b>
Falange proximal – pulgar	<b>0.28 s</b>
Falange distal – pulgar	<b>0.66 s</b>
Metacarpo – pulgar	<b>0.88 s</b>
Abductor – pulgar	<b>0.25 s</b>

*Extensión:*

elemento	tiempo
Falange proximal – índice	<b>0.22 s</b>
Falange medial – índice	<b>0.25 s</b>
Abductor – índice	<b>0.31 s</b>
Falange proximal – medio	<b>0.46 s</b>
Falange medial – medio	<b>0.34 s</b>

elemento	tiempo
Falange proximal – anular	<b>0.19 s</b>
Falange medial – anular	<b>0.22 s</b>
Falange proximal – pulgar	<b>0.25 s</b>
Falange distal – pulgar	<b>0.56 s</b>
Metacarpo – pulgar	<b>0.28 s</b>
Abductor – pulgar	<b>0.31 s</b>

Estos resultados también reflejan algunas de las consecuencias de la fricción en las articulaciones, ya que por ejemplo, en el caso del elemento abductor del dedo índice, puede notarse que hay un retraso considerable para la flexión, debido a la fricción ejercida contra la palma y a la misma fricción de ese tendón ocasionada por la cantidad de ejes de rotación y reorientación por los que debe pasar. Por otro lado, puede observarse que aunque los dedos medio y anular son prácticamente iguales, las velocidades de respuesta varían entre sí, debido principalmente a la distancia que los tendones deben recorrer dentro de la palma y a los ángulos de entrada de estos tendones a la palma provenientes de los servomotores, lo que también genera cierta fricción.

Tipos de sujeciones:

Una vez determinada el área de trabajo de cada dedo y conociendo sus máximos valores angulares, se pueden definir los diferentes tipos de sujeciones que el manipulador es capaz de realizar, basados en la **figura 2.3**.

La mayor parte de las sujeciones de fuerza no son posibles de realizar con este manipulador por el hecho de contar con servomotores de muy bajo torque y por contar con tendones de alta elongación. Por otro lado, la forma de la palma, aún contando con una superficie ahulada, no ayuda mucho a realizar sujeciones en las que se requiere que la palma se ajuste a la forma de la pieza a manipular. Por esto, las únicas sujeciones de fuerza que son posibles realizar con nuestro manipulador son:

- Sin aprisionamiento:* **Sí**, aunque ayudaría más si la falange distal del pulgar girara ángulos negativos.
- Con aprisionamiento chica:* **Sí**, aunque como el anular y el medio no se pegan a la palma, no es posible la sujeción con estos dedos.
- Circular de disco:* **Sí**, relativamente fácil.
- Circular de esfera:* **Sí**, relativamente fácil.

- Envoltura pesada de diámetro grande:* **No**, porque el pulgar no alcanza a oponerse totalmente al resto de los dedos.
  - Envoltura pesada de diámetro chico:* **Sí**, pero de preferencia sólo para diámetros mayores o iguales a **2 cm** aproximadamente.
  - Envoltura mediana:*
  - Envoltura con pulgar en aducción:*
  - Envoltura ligera:*
- } **No**, porque los dedos índice, medio y anular no alcanzan a acercarse tanto a la palma y el objeto se cae.

Debido a la versatilidad de los dedos del manipulador, de sus similitudes en forma y dimensiones a la mano humana, las sujeciones de precisión que pueden realizarse con este manipulador son:

- Compacta circular de disco:* **No**, porque el pulgar no alcanza a oponerse totalmente al resto de los dedos.
- Compacta circular de esfera:* **Sí**, relativamente fácil.
- Compacta circular de trípode:* **Sí**, aunque si la esfera es muy pequeña se cae.
- Prismática de pulgar y cuatro dedos:* **No**, porque sólo se cuentan con cuatro dedos en total (índice, medio, anular y pulgar).
- Prismática de pulgar y tres dedos:* **No**, porque el pulgar no alcanza a oponerse totalmente al resto de los dedos.
- Prismática de pulgar y dos dedos:* **No**, porque el pulgar no alcanza a oponerse totalmente al resto de los dedos.
- Prismática de pulgar e índice:* **Sí**, aunque se mejoraría la sujeción si el pulgar pudiera oponerse más al resto de los dedos.

Lo que estas pruebas demuestran es que aún se tienen errores y fallas en el diseño y construcción de un sistema de esta naturaleza, errores que pueden ser corregidos al mejorarse, sobre todo, la parte del diseño mecánico y cierta falla de rapidez proporcionada por las deficiencias de los servomotores empleados. Respecto a los tipos de sujeciones, en la mayoría de los casos donde el tipo de sujeción no fue posible realizarse, se debe básicamente a que los extremos de los dedos no llegan hasta la palma y a que ésta no es flexible como en la mano humana; esta propiedad en el ser humano permite muchas sujeciones de precisión y facilita las sujeciones de fuerza donde el objeto tiene que asirse apoyado sobre la palma.

La fuerza requerida para flexionar las diversas falanges, puede corregirse un poco encontrando mejores rutas para la reorientación de los tendones en el interior de la palma, tratando de evitar, por un lado, la mayor cantidad de fuerzas de fricción posible, y por otro, la manera en que esas rutas sean más directas y con menos cambios de dirección.

# CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos planteados desde el comienzo de este trabajo, y haciendo referencia a los resultados obtenidos durante el desarrollo de las diferentes partes que integran este proyecto, pueden exponerse las siguientes conclusiones.

Las manos articuladas o provistas de estructuras semejantes a dedos, ofrecen soluciones a algunos de los problemas que implica la manipulación, ya que su uso dota al robot que las posee con la capacidad de llevar a cabo tareas de una manera muy versátil y con cierta destreza. La habilidad que este tipo de manos tiene para configurarse y adoptar formas que permiten realizar distintos tipos de sujeción, reduce la posibilidad de tener que cambiar las herramientas de sujeción.

Una ventaja sobre el modelo anterior del manipulador se refiere al bajo peso y versatilidad, además de que la funcionalidad se ve ampliamente incrementada. El bajo peso y volumen del sistema de motores permite que la aplicación del manipulador en lugares peligrosos, sinuosos o de difícil acceso se haya visto incrementada pues es posible montar todo el sistema sobre vehículos o brazos mecánicos; esto se debe a que los servomotores empleados cuentan con un sistema de control y reducción integrados que reduce el tamaño, además de que la corriente requerida para operar los once motores empleados no es muy alta y es posible alimentarlos a todos al mismo tiempo, cosa que no sucedía con el modelo anterior en el que las pruebas tenían que hacerse por cada dedo pues la corriente consumida por los motores empleados era muy alta.

La variación en el diseño del manipulador también representa una ventaja y avance sobre el modelo anterior, pues el peso se redujo casi a la mitad y las articulaciones cuentan con menor fricción y mayor funcionalidad. El cambio en el diseño del dedo pulgar y el mecanismo de cuatro barras empleado en los dedos índice, medio y anular, también resultó una importante mejora en lo que a manipulación se refiere, pues al aproximarse más a la forma de la mano humana, los tipos de sujeciones que puede realizar un usuario del guante, son más aproximadas a la realidad y las diferencias entre los movimientos del usuario y el manipulador son cada vez más reducidas.

La posición, orientación y rotación del dedo pulgar en el manipulador, por ser semejante a la mano humana, permite realizar movimientos que otros manipuladores no pueden realizar; esto se debe a la forma y orientación del elemento metacarpiano del dedo pulgar, que permite que las sujeciones en las que es necesaria la oposición de este dedo respecto a los otros, se realicen de forma similar a como los realiza el ser humano.



El desplazamiento del dedo índice hacia el interior de la palma, a fin de alinear al eje de rotación que permite el movimiento de abducción de dicho dedo, proporciona una excelente solución para no tener al eje de rotación de este dedo, correspondiente a la flexión, fuera del mismo plano en el que se encuentran los demás ejes de rotación de los dedos medio y anular.

La relación de movimiento entre las falanges mediales y las distales producido por el mecanismo de cuatro barras empleado para acoplarlas, permite reducir los grados de libertad y, por lo tanto, el número de actuadores o servomotores a emplear. Esta relación de movimiento quizás pueda ser variable entre diferentes personas, pero los ángulos empleados para este diseño son datos promedio entre varios individuos y resulta ser una excelente mejora en el campo de la manipulación.

Los resortes empleados para restablecer la extensión de las articulaciones resultaron ser un importante avance pues se enfoca todo el torque proporcionado por los servomotores a la flexión de los dedos, que es lo único requerido para realizar una manipulación, y el uso de estos resortes no opone tanta resistencia contra la flexión de las falanges del manipulador como para limitarle el movimiento.

La ausencia del dedo meñique limita al manipulador para realizar reorientaciones, pero no lo limita para realizar diferentes tipos de manipulaciones, es decir, se comprobó que este dedo no es indispensable para realizar varios de los tipos de manipulaciones mostradas en la **figura 2.3**, y que sólo es requerido al tratar de cambiar o alterar la posición y orientación de un objeto, pues entre más elementos participen en este movimiento, mejor se realizará la reorientación, aunque al final tampoco es indispensable.

Las mejoras y adaptaciones realizadas al guante sensor también representan importantes avances pues se cuenta ahora con un modelo más funcional y versátil. Este nuevo modelo incorpora los elementos electrónicos, con excepción de los sensores, en una pequeña tarjeta para circuitos electrónicos que se coloca a la altura de la muñeca y el dorso de la mano; de esta forma, al tener únicamente los pares receptor-emisor infrarrojos sobre las articulaciones, es posible que el usuario del guante goce de mayor movilidad. Por otro lado, el circuito de control que envía las señales recopiladas por el guante al microcontrolador HC11, se colocó alejado del guante por medio de un cable de 13 hilos y 2 metros de longitud, a diferencia del modelo anterior en el que dicho circuito dificultaba la movilidad del usuario por la proximidad con el guante.

Debido a la forma de los dedos y de la palma, y a la superficie ahulada integrada a éstos, las sujeciones realizadas por el usuario del guante, son muy similares a las efectuadas por el manipulador. Desgraciadamente la forma de las falanges del manipulador y el ensamble entre éstas no permitió que absolutamente toda la superficie inferior de los dedos estuviera recubierta de hule, por lo que en ocasiones el manipulador no alcanza a sujetar con estas superficies al objeto que se está manipulando.

Entre las desventajas que aún posee el manipulador, se tiene que el arreglo de tendones y la orientación de éstos, dificultan en algunos casos la flexión de las falanges del manipulador; esto debido a la extensión de algunos tendones al tensar otros, como por ejemplo, los diferentes tendones de un mismo dedo.

Otra desventaja se refiere al material del que están compuestos los tendones, pues se cuenta con un relativamente alto factor de elongación, por lo que la diferencia angular entre las articulaciones de la mano del usuario y del manipulador es significativa. Esta diferencia no permite, por ejemplo, sujetar una pelota con el manipulador, aún cuando el usuario ya se encuentra sujetando otra pelota del mismo tamaño.

Cabe aclarar que el tiempo de diseño y maquinado de los elementos del manipulador es elevado, sobre todo si se considera la variación en las dimensiones de los dedos y en el tamaño de la palma. El uso de un manipulador de este tipo como prótesis para reemplazar extremidades perdidas o dañadas, resultaría muy complicado, pues la elaboración de diferentes tamaños de manos para las diferentes personas necesitadas se volvería muy laborioso.

La otra desventaja que presenta este manipulador se refiere a la aplicación de fuerza, pues al contar con un control de posición se pierde la capacidad de aplicar presión sobre un punto o una superficie determinada. Por ejemplo, es posible oprimir un botón o exprimir un trozo de esponja porque estos elementos pueden ser alterables en su forma y/o posición y el usuario del guante puede simular estas acciones excediendo la posición relativa de las superficies de estos objetos. Pero no es posible aplicar más presión al sujetar algo, como por ejemplo una esfera de plomo; hasta aquí, se sabe que el manipulador necesita estar en cierta posición para sujetar una esfera cualquiera, pero al tratarse de una esfera de plomo, se necesita mayor fuerza y presión para que no se caiga de la mano, pero este excedente de presión no puede aplicarse pues la simulación con el guante llevaría al manipulador a una posición donde puede sujetar la esfera pero no sería suficiente para sostenerla. Un usuario necesitaría suponer que las dimensiones de la esfera son menores, para que al tratar de llegar al centro de ésta con el guante, cerrando más la mano, el manipulador pueda ejercer mayor presión para asirla con fuerza.

Además de las conclusiones directas que se obtiene a partir de este trabajo, pueden establecerse otra serie de conclusiones que más bien están ligadas con la manera de concebir los problemas y con la forma de diseñar soluciones. En primer lugar, las experiencias recogidas durante el tiempo de desarrollo indican que en la mayoría de las ocasiones, no es posible prever todos los aspectos que intervienen en un problema determinado, por lo que su solución va acompañada de un proceso de prueba y error.

Una de las principales mejoras que pueden realizarse se enfoca al uso de servomotores de mayor torque, mayor velocidad e, incluso, menor tamaño, que permitan una mejor sujeción, un mejor control de fuerza y el incremento de ésta. El problema básico de esta mejora se refiere al costo, pues un servomotor de,

aproximadamente, siete veces más torque y tres veces más velocidad de respuesta, incrementa el costo en unas diez veces en comparación con los servomotores usados en este proyecto.

Otra posible mejora que puede realizarse y como perspectiva a largo plazo, se trata del montaje del manipulador a un brazo mecánico que cuente con hombro, codo y muñeca. Se ha pensado que en el hombro se pueden tener dos grados de libertad, otro grado en el codo y tres más en la muñeca. De esta forma se puede contar con un sistema completo de manipulación antropomórfica, que pueda colocarse después sobre algún vehículo o en una mesa de trabajo y realizar complicadas tareas de manipulación.

Un punto fundamental está ligado con el aspecto académico, pues con el desarrollo de este proyecto se establece un precedente y una serie de líneas de investigación relacionadas con los elementos que intervienen en los sistemas mecatrónicos, que favorecen el crecimiento de esta disciplina dentro de la Facultad de Ingeniería.

Por otro lado, está muy claro que con proyectos como el desarrollado, el ingeniero debe ser capaz de actuar en un ambiente multidisciplinario, ya que actualmente los problemas llegan a ser tan complejos que requieren de la intervención de todo tipo de sistemas para su solución. Por tanto, la ingeniería mecatrónica resulta ser una valiosa herramienta pues dentro de su concepción cuenta con elementos en el área de la ingeniería mecánica, electrónica y sistemas computacionales.

# BIBLIOGRAFÍA

## a) Referencias bibliográficas

- [1] William D. Cooper, Albert D. Helfrick. *Instrumentación electrónica moderna*. Ed. Prentice-Hall. México, D.F. 1991.
- [2] E. Katissen. *Industrial Robotics & Robots*. Ed. Prentice-Hall. México, D.F. 1990.
- [3] G. Burdea, P. Coiffet. *Tecnologías de la Realidad Virtual*. Ed. Paidós Hipermedia. Barcelona, España. 1996.
- [4] D. McCloy, D.M.J. Harris. *Robótica, Una introducción*. Ed. Limusa. México, D.F. 1993.
- [5] Irving L. Kosow. *Máquinas eléctricas y transformadores*. Ed. REVERTÉ. Barcelona, España. 1980.
- [6] Hamilton H. Mabie, Charles F. Reinholtz. *Mecanismos y Dinámica de maquinaria*. Ed. Limusa. México, D.F. 1998.
- [7] Robert L. Norton. *Diseño de maquinaria*. Ed. McGraw-Hill. México, D.F. 1995.
- [8] K.S. Fu, R.C. González, C.S.G. Lee. *Robótica, Control, detección, visión e inteligencia*. Ed. McGraw-Hill. Madrid, España. 1988.
- [9] John J. Craig. *Robotics, Introduction to*. Addison-Wesley Publishing. E.U.A. 1989.
- [10] R.M. Murray, Z. Li, S.S. Sastry. *Robotic Manipulation, A Mathematical Introduction to*. CRC Press. E.U.A. 1994.
- [11] A.D. Deutschman, W.J. Michels, C.E. Wilson. *Diseño de Máquinas, Teoría y prácticas*. Ed. C.E.C.S.A. México, D.F. 1996.
- [12] Davis, Troxell, Wiskocil. *Ensaye e Inspección de los Materiales en Ingeniería*. Ed. C.E.C.S.A. México, D.F. 1966.

- 
- [13] Van Vlack. *Materiales para Ingeniería*.  
Ed. C.E.C.S.A. México, D.F. 1984.
- [14] Donald Askeland. *La Ciencia e Ingeniería de los Materiales*.  
Grupo Editorial Iberoamérica, S.A. México, D.F. 1987.
- [15] M.F. Spotts. *Proyecto de Elementos de Máquinas*.  
Ed. Reverté, S.A. Barcelona, España. 1974.
- [16] Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke. *Diseño en Ingeniería Mecánica*.  
Ed. McGraw-Hill. México, D.F. 1990.
- [17] Ashby. *Materials Selection in Mechanical Design*.  
Ed. Pergamon Press. 1992.
- [18] Ing. Ernesto Riestra Martínez, Tesis: Sistema de medición para un manipulador antropomórfico teleoperado,  
Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería,  
UNAM. 1998.
- [19] Ing. Hugo Figueroa Rosas, Tesis: Análisis cinemático y programa de simulación para un manipulador antropomórfico teleoperado,  
Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería,  
UNAM. 1998.
- [20] Ing. César Augusto Espinosa Rommyngth, Tesis: Instrumentación de un manipulador antropomórfico capaz de reproducir los movimientos de la mano humana utilizando un microprocesador 68HC11,  
Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería,  
UNAM. 1998.
- [21] Ing. Luis Vicente Coloma Margolies, Tesis: Diseño Mecánico y Construcción de un Manipulador Antropomórfico,  
Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería,  
UNAM. 1999.

**b) Sitios en Internet**

- [1] <http://www.cee.hw.ac.uk/subsea/hw/robots/acm/execsum.html/>
- [2] <http://www.robotics.co.uk/research/uni/uni.htm/>
- [3] <http://rcs.ee.washington.edu/BRL/devices/mckibben/>
- [4] <http://www.anthrobot.com/tech/>
- [5] <http://www.carpenterfortuna.com.mx/index2.htm/>
- [6] <http://www.ses.soton.ac.uk/Introduction/introduction.html/>

**c) Asesoría médica**

- [1] Dr. Francisco Moreno Delgado. Médico ortopedista.

# Apéndice A

## PROGRAMA DEL HC11

El programa que se muestra a continuación fue realizado, dentro del trabajo de tesis realizada por el Ing. Ernesto Riestra Martínez con el título *Sistema de Medición para un Manipulador Antropomórfico Teleoperado*, para el compilador IDE ICC11, que es un compilador cruzado de ANSI C a ensamblador del microprocesador 68HC11 de Motorola.

```

#include <hc11.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
/**** DEFINICIÓN DE RUTINAS
****/
int clip(double a,double
min,double max);
double intrpl(double a,double
min,double max);
double maximo(double a,double
b);
double minimo(double a,double
b);
void readports(int n);
void send(void);
void senddebug(void);
void filter(int p,int r);
void sci_svc(void);
/**** DEFINICIÓN DE VARIABLES
GLOBALES ****/
extern void _start();
char sci;
short int
chsr[16],e[16],ea[16],eb[16],lh
[16],uh[16];
#pragma interrupt_handler
sci_svc()
void sci_svc(void)
{
int l;
sci=getchar();
if(sci=='r' || sci=='c' || sci=='n'
)
{
switch(getchar())
{
case
'0':chsr[0]=sci;
break;
case
'1':chsr[1]=sci;
break;
case
'2':chsr[2]=sci;
break;
case
'3':chsr[3]=sci;
break;
case
'4':chsr[4]=sci;
break;
case
'5':chsr[5]=sci;
break;
case
'6':chsr[6]=sci;
break;
case
'7':chsr[7]=sci;
break;
case
'8':chsr[8]=sci;
break;

```

```

        case
'9':chsr[9]=sci;
        break;
        case
'A':chsr[A]=sci;
        break;
        case
'B':chsr[B]=sci;
        break;
        case
'C':chsr[C]=sci;
        break;
        case
'D':chsr[D]=sci;
        break;
        case
'E':chsr[E]=sci;
        break;
        case
'F':chsr[F]=sci;
        break;
        case 'a':
for(i=0;i<=15;i++) chsr[i]=sci;
        break;
    }
printf("\nChannel Status
Register (CHSR:");
for(i=0;i<=15;i++) putchar
(chsr[i]);
SCCR2=0x2C;
}
main(void)
{
/**** DEFINICIÓN DE VARIABLES
****/
int con,val,ret;
char o,op,c;
short int i,s,a;
/**** CONFIGURACIÓN DE HARDWARE
****/
OPTION=OPTION|0x80;
CNTRLX=0x80;
BAUD=0x30;
SCCR2=0x2C;
ADCTL=0x30;
PACTL=0x80;
/**** MENU PRINCIPAL *****/
puts("\n OK. \n");
asm("cli");
readports(20);

/**** INICIACIÓN DE LOS LÍMITES
DE INTERPOLACIÓN *****/
for(i=0;i<=15;i++)chsr[i]='r';
for(;;)
{
    for(i=0;i<=15;i++)
    {
        if(chsr[i]=='r')
        {
            lh[i]=e[i]-1;
            uh[i]=e[i]+1;
            ea[i]=e[i];
            eb[i]=e[i];
            chsr[i]='c';
        }
    }
    filter(4,3);
}
/**** FUNCIÓN DE LECTURA DE
PUERTOS A/D *****/
void readports(int n)
{
    int i;
    short int a,ret;
    for(i=0;i<=15;i++)e[i]=0;
    for(i=0;i<n;i++)
    {
        for(a=0;a<=3;a++)
        {
            PORTA=a*64;
            for(ret=0;ret<50;ret
            ++);
            R1;
            e[0+a*4]=e[0+a*4]+AD
            R2;
            e[1+a*4]=e[1+a*4]+AD
            R3;
            e[2+a*4]=e[2+a*4]+AD
            R4;
            e[3+a*4]=e[3+a*4]+AD
        }
    }
    for(i=0;i<=15;i++)
    {
        e[i]=e[i]/n;
    }
    for(i=0;i<=15;i++)
    {
        if(chsr[i]=='c')
        {

```



```

        uh[i]=(uh[i]<e[i])?e
[i]:uh[i];
        lh[i]=(lh[i]<e[i])?e
[i]:lh[i];
    }
}
/**** FUNCIÓN DE FORMATO SERIAL
****/
void send(void)
{
double a;
int b,c;
putchar(0xF7);
for(c=0;c<=8;c++)
    {
        a=intrpl(e[c],lh[c],uh[c]
);
        b=clip(a,0,127);
        putchar (b);
    }
a=intrpl(e[15],lh[15],uh[15]);
b=clip(a,0,127);
putchar (b);
a=intrpl(e[15],lh[15],uh[15]);
b=clip(a,0,127);
putchar(125);
putchar(125);
putchar(125);
putchar(0xF0);
}
int clip(double a,double
min,double max)
{
int o;
o=(int)(maximo(min,(minimo(a,ma
x)))));
return o;
}
double máximo(double a,double
b)
{
double o;
if (a>b)o=a;
else o=b;
return o;
}
double minimo(double a,double
b)
{
double o;
if (a<b)o=a;
else o=b;
return o;
}
double intrpl(double a,double
min,double max)
{
double o;
o=127*(a-min)/(max-min);
return o;
}
void filter(int p,int r)
{
int t,j;
double f;
for(t=0;t<=15;t++)ea[t]=eb[t];
readports(r);
for(t=0;t<=15;t++)eb[t]=e[t];
for(j=0;j<=p;j++)
    {
        for(t=0;t<=15;t++)
            {
                f=((double)(j))/((do
uble)(p));
                e[t]=(1-
f)*ea[t]+f*eb[t];
            }
        send();
    }
}
void senddebug(void)
{
int c;
int k;
k=2;
c=clip(intrpl(e[k],lh[k],uh[k])
,0,127);
printf("\n
c=%d,resol=%d",c,(int)(uh[k]-
lh[k]));
}
#pragma abs_address:0xffd6
void (interrupt_vectors[])()=
{
    (void (*)())(sci_svc), /*
SCI */
    _start, /*SPI */
    _start, /*PAIE */
    _start, /*PAO */
    _start, /*TOF */
    _start, /*TOC5 */
    _start, /*TOC4 */
    _start, /*TOC3 */
}

```

---

```
_start, /*TOC2 */  
_start, /*TOC1 */  
_start, /*TIC3 */  
_start, /*TIC2 */  
_start, /*TIC1 */  
_start, /*RTI */  
_start, /*IRQ */  
_start, /*XIRQ */  
_start, /*SWI */  
_start, /*ILLOP */  
_start, /*COP */  
_start, /*CLM */  
_start, /*RESET */  
};  
#pragma end_abs_address
```

En el siguiente programa, de la frecuencia de muestreo, no se incluyen ciertas rutinas descritas en el programa anterior.

```

#include <hc11.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
/**** DEFINICIÓN DE RUTINAS
****/
int clip(double a,double
min,double max);
double intrpl(double a,double
min,double max);
double maximo(double a,double
b);
double minimo(double a,double
b);
void readports(int n);
void send(void);
void senddebug(void);
void filter(int p,int r);
void sci_svc(void);
/**** DEFINICIÓN DE VARIABLES
GLOBALES *****/
extern void _start();
char sci;
short int
chsr[16],e[16],ea[16],eb[16],lh
[16],uh[16];
#pragma interrupt_handler
sci_svc()
void sci_svc(void)
{
int l;
sci=getchar();
if(sci=='r' || sci=='c' || sci=='n'
)
{
switch(getchar())
{
case
'0':chsr[0]=sci;
break;
case
'1':chsr[1]=sci;
break;
case
'2':chsr[2]=sci;
break;
case
'3':chsr[3]=sci;
break;
case
'4':chsr[4]=sci;
break;
case
'5':chsr[5]=sci;
break;
case
'6':chsr[6]=sci;
break;
case
'7':chsr[7]=sci;
break;
case
'8':chsr[8]=sci;
break;
case
'9':chsr[9]=sci;
break;
case
'A':chsr[A]=sci;
break;
case
'B':chsr[B]=sci;
break;
case
'C':chsr[C]=sci;
break;
case
'D':chsr[D]=sci;
break;
case
'E':chsr[E]=sci;
break;
case
'F':chsr[F]=sci;
break;
case 'a':
for(i=0;i<=15;i++) chsr[i]=sci;
break;
}
}
printf("\nChannel Status
Register (CHSR:");

```

```

for(i=0;i<=15;i++)putchar
(chsr[i]);
SCCR2=0x2C;
}
main(void)
{
/**** DEFINICIÓN DE VARIABLES
****/
int con,val,ret;
char o,op,c;
short int i,s,a;
/**** CONFIGURACIÓN DE HARDWARE
****/
OPTION=OPTION|0x80;
CNTRLX=0x80;
BAUD=0x30;
SCCR2=0x2C;
ADCTL=0x30;
PACTL=0x80;
puts("\n OK. \n");
asm("cli");
/****INICIACIÓN DE LOS LÍMITES
DE INTERPOLACIÓN *****/
for(i=0;i<=15;i++)chsr[i]='c';
/**** CICLO PRINCIPAL *****/
for(;;)
{
PORTA=0;
for(ret=0;ret<50;ret++);
e[0]=ADR1;
e[1]=ADR2;
e[2]=ADR3;
e[3]=ADR4;
PORTA=64;
for(ret=0;ret<50;ret++);

e[4]=ADR1;
e[5]=ADR2;
e[6]=ADR3;
e[7]=ADR4;
PORTA=128;
for(ret=0;ret<50;ret++);
e[8]=ADR1;
e[9]=ADR2;
e[10]=ADR3;
e[11]=ADR4;
for(i=0;i<=10;i++)
{
if(chsr[i]=='c')
{
uh[i]=(uh[i]<e
[i])?e[i]:uh[i];
lh[i]=(lh[i]<e
[i])?e[i]:lh[i];
}
buf[i]=(int)(maximo(
0,(minimo(127*(e[i]-
lh[i])/(uh[i]-lh[i]),127)))));
}
putchar(0xF7);
putchar(buf[0]);
putchar(buf[1]);
putchar(buf[2]);
putchar(buf[3]);
putchar(buf[4]);
putchar(buf[5]);
putchar(buf[6]);
putchar(buf[7]);
putchar(buf[8]);
putchar(buf[9]);
putchar(buf[10]);
putchar(125);
putchar(125);
putchar(0xF0);
}
}

```

# Apéndice B

## PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA MS-DOS (16 bits)

A continuación se muestra el código fuente del programa que se encarga de realizar la simulación gráfica del manipulador antropomórfico teleoperado, que deberá compilarse y correrse desde MS-DOS. Este programa fue realizado dentro del trabajo de tesis, realizada por el Ing. Hugo Figueroa Rosas, con el título *Análisis Cinemático y Programa de simulación para un Manipulador Antropomórfico Teleoperado*.

```

/*****/
//
// MANIPULADOR ANTROPOMORFICO TELEOPERADO - I (
MAT - I )
//
// DOSMAT-I.CPP
//
// Programa de simulacion para conectarse al guante sensor
//
// Plataforma: DOS (16 bits)
//
// Hugo Figueroa Rosas 1998.
//
/*****/
// Archivos de encabezado
/*****/
#include <bios.h>
#include <conio.h>
#include <ctype.h>
#include <dos.h>
#include <graphics.h>
#include <math.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
/*****/
// Definicion de funciones trigonometricas simplificadas
/*****/
#define S(x) sin((x)*PI/180) //funcion seno con argumento
en grados
#define C(x) cos((x)*PI/180) //funcion coseno con argumento
en grados
#define AS(x) (asin(x)*180/PI) //funcion arco seno en grados
#define AC(x) (acos(x)*180/PI) //funcion arco coseno en grados
#define AT(x) (atan(x)*180/PI) //funcion arco tangente en
grados
#define AT2(y,x) (atan2(y,x)*180/PI) //funcion arco tangente en
grados (y/x)
/*****/
// Definicion de constantes matematicas empleadas
/*****/
const double PI = 3.1415926535898; //pi
const int ORD = 4; //tamano de las matrices cuadradas y
vectores
const double DANG = 5; //delta de angulo
/*****/
// Constantes para instancias falso/verdadero
/*****/
const bool T = true; //valor verdadero
const bool F = false; //valor falso
/*****/
// Constantes para el trazo de los dedos
/*****/
const double FESC = 1; //factor de escala para los
dedos
const double WW = FESC*0.4392; //ancho de los dedos
const double HH = FESC*0.3659; //alto de los dedos
const double D = FESC*5; //distancia de la camara al plano de
proyeccion
const double U = FESC*1; //longitud de los ejes del origen
const double R = FESC*0.5; //longitud de los ejes de los
sistemas de referencia
/*****/
// Constantes de la palma
/*****/
const double XPL = FESC*0; //coordenada en x del origen
de la palma
const double YPL = FESC*-1.7325; //coordenada en y del origen
de la palma
const double ZPL = FESC*0; //coordenada en z del origen
de la palma
const double LPAL = FESC*1.7325; //longitud de la palma
const double LSPL1 = 180; //lim sup grado 1
const double LIPL1 = -180; //lim inf grado 1
const double LSPL2 = 90; //lim sup grado 2
const double LIPL2 = -90; //lim inf grado 2
const double LSPL3 = 90; //lim sup grado 3
const double LIPL3 = -90; //lim inf grado 3
/*****/
// Constantes del dedo pulgar
/*****/

```

```

const double XP = FESC*-0.5867; //coordenada en x del origen
del pulgar
const double YP = FESC*-1.7325; //coordenada en y del origen
del pulgar
const double ZP = FESC*0; //coordenada en z del origen
del pulgar
const double L1P = FESC*0.9246; //longitud de la falange
proximal del pulgar
const double L2P = FESC*0.7628; //longitud de la falange media
del pulgar
const double L3P = FESC*0.601; //longitud de la falange distal
del pulgar
const double LSP1 = 90; //lim sup grado 1
const double LIP1 = 0; //lim inf grado 1
const double LSP2 = 20; //lim sup grado 2
const double LIP2 = -90; //lim inf grado 2
const double LSP3 = 0; //lim sup grado 3
const double LIP3 = -90; //lim inf grado 3
const double LSP4 = 0; //lim sup grado 4
const double LIP4 = -90; //lim inf grado 4
const double A = 30; //angulo de orientacion del sistema del
pulgar (eje z')
const double B = 35; //angulo de orientacion del sistema del
pulgar (eje y')
/*****/
// Constantes del dedo indice
/*****/
const double XI = FESC*-0.5867; //coordenada en x del origen
del indice
const double YI = FESC*-0.0255; //coordenada en y del origen
del indice
const double ZI = FESC*0; //coordenada en z del origen
del indice
const double L1I = FESC*1; //longitud de la falange
proximal del indice
const double L2I = FESC*0.5855; //longitud de la falange media
del indice
const double L3I = FESC*0.4879; //longitud de la falange distal
del indice
const double LSD1 = 20; //lim sup grado 1 para el resto de los
dedos
const double LID1 = -20; //lim inf grado 1
const double LSD2 = 20; //lim sup grado 2
const double LID2 = -105; //lim inf grado 2
const double LSD3 = 0; //lim sup grado 3 y 4
const double LID3 = -90; //lim inf grado 3 y 4
/*****/
// Constantes del dedo medio
/*****/
const double XM = FESC*0; //coordenada en x del origen del
medio
const double YM = FESC*0; //coordenada en y del origen del
medio
const double ZM = FESC*0; //coordenada en z del origen del
medio
const double LIM = FESC*1.098; //longitud de la falange
proximal del medio
const double L2M = FESC*0.683; //longitud de la falange media
del medio
const double L3M = FESC*0.512; //longitud de la falange distal
del medio
/*****/
// Constantes del dedo anular
/*****/
const double XA = FESC*0.5867; //coordenada en x del origen
del anular
const double YA = FESC*-0.0255; //coordenada en y del origen
del anular
const double ZA = FESC*0; //coordenada en z del origen
del anular

```

```

const double L1A = FESC*1.07; //longitud de la falange
proximal del medio
const double L2A = FESC*0.6343; //longitud de la falange media
del medio
const double L3A = FESC*0.512; //longitud de la falange distal
del medio
/*****/
// Constantes de temporizacion
/*****/
const int TIME = 10; //intervalo de retraso para la ejecucion de
secuencias
const int CLIP = 1;
/*****/
// Clase para el manejo de puntos en dos dimensiones
/*****/
class TPoint
{
public:
    int x;
    int y;
};
/*****/
// Definicion de una matriz de 4x4 para el manejo de rotaciones en
3D
/*****/
class m4
{
public:
    double m[ORD][ORD];
};
/*****/
// Definicion de un vector de 4 elementos para el manejo de puntos
// y vectores en 3D
/*****/
class v4
{
public:
    double v[ORD];
};
/*****/
// Definicion de un vector de 8 elementos v4 para el manejo de
coordenadas
// de las aristas de paralelepipedos y prismas trapezoidales
/*****/
class v48
{
public:
    v4 v[8];
};
/*****/
// Definicion de un vector de 12 elementos v4 para el manejo de
coordenadas
// de las aristas de prismas de seccion variable
/*****/
class v412
{
public:
    v4 v[12];
};
/*****/
// Definicion de un vector de 19 elementos para el manejo de los
angulos
// en cada uno de los eslabones
/*****/
class v19
{
public:
    double v[19];
};
/*****/

```

```

// Definición de un vector de 13 elementos para el manejo de la
entrada
// y salida de información por puerto serie
/*****/
class v13
{
public:
    unsigned int v[13];
};
/*****/
// DECLARACION DE LA CLASE << THandSim >>
/*****/
class THandSim
{
protected:
    enum Estado {eActivo,eInactivo,ePausa} estado; //Estado de
ejecucion
    enum Miembro
{mNada,mPalma,mPulgar,mIndice,mMedio,mAnular};
    Miembro miembro; //identificador de miembro
    union REGS rin, rout;
    bool flag1; //bandera que activa la secuencia de calibracion
    bool flag2; //bandera que activa la secuencia de grabado
    bool flag3; //bandera que indica ejecucion de secuencia
    double THETA,PHI,RHO; //angulos del plano de proyección
    int WI,HE; //ancho y altura de la ventana
    int MARGEN; //margen alrededor de area de trazado
    int XL,XR,YB,YT; //limites izq, der, inf, y sup para el área de
trazo
    int XDIF,YDIF; //anchura y altura de la pantalla
    double XMIN,XMAX,YMIN,YMAX; //limites teoricos
deseados por el usuario
    double SCALX,SCALY; //factores de escala para el
trazado
    int UCS_XL,UCS_XR,UCS_YT,UCS_YB; //limites para el
ucs_icon
    int UCS_XDIF,UCS_YDIF;
    double UCS_XMIN,UCS_XMAX,UCS_YMIN,UCS_YMAX;
    double UCS_SCALX,UCS_SCALY;
    m4 mview,g[13],gs[13],gs0[17],e[19];
    v4 Q[17],I,J,K,IP,JP,KP,NULO;
    v19 ang,anginf,angsup;
    v48 bb[9];
    v412 tt[4];
    v13 canal,cmin,cmax;
    int
CBackground,CHand,CSelection,CORigin,CUCsOrigin,CFrame;
public:
    THandSim();
    ~THandSim();
    void SetupWindow();
    void CloseWindow();
    void Paint();
    void PrgPause();
    void PrgRun();
    void EvChar(char key);
    void initspuntos(void);
    m4 mgs0(const v4& p);
    m4 mgsp0(const v4& p);
    void initspuntos0(void);
    m4 ee1(double a,const v4& p);
    m4 ee2(double a,const v4& p);
    m4 ee3(double a,const v4& p);
    m4 ee4(double a,const v4& w,const v4& p);
    void mg(const v19& a);
    m4 m_rot(double a,const v4& b,double x,double y,double z);
    m4 m_esc(double esc,const m4& a);
    m4 m_transp(const m4& a);
    m4 mm_mult(const m4& a,const m4& b);
    v4 mv_mult(const m4& a,const v4& b);

```

```

m4 m_inv(const m4& a);
v4 p_in(double x,double y,double z,double k = 1);
v4 v_in(double x,double y,double z,double k = 0);
v4 v_sum(const v4& a,const v4& b,char oper);
v4 v_esc(double esc,const v4& a);
double dot(const v4& a,const v4& b);
v4 cross(const v4& a,const v4& b);
double mag2(const v4& a);
double mag(const v4& a);
v4 v_unit(const v4& a);
v48 v48_in(double a,double b,double h,double l);
v412 v412_in(double w1,double h1,double w2,double h2,double
l,double r);
m4 mmview(double theta,double phi,double rho);
TPoint vscreen(double d,const v4& a,const m4& m);
void ln(TPoint& p1,TPoint& p2);
void frame(int color);
void ucs_icon(int color,double l);
void origen(int color,double l);
void sistref(int color,double l,const m4& rot);
void barra(v48& p3d,const m4& rot);
void tip(v412& p3d,const m4& rot);
void palma(int color);
void pulgar(int color);
void indice(int color);
void medio(int color);
void anular(int color);
void mano(Miembro flag);
void pt2d(int color,TPoint& point,int l = 3);
void pt3d(int color,const v4& p,int l = 3);
void cal_icon(int color,bool flag);
void rec_icon(int color,bool flag);
void play_icon(int color,bool flag);
void init_rs(void);
int test_rs(void);
char leer(void);
void escribir(char c);
v13 get13(void);
double interpol(double x1,double x2,double y1,double y2,double
x);
v13 minimo(v13 datos,v13 minimos);
v13 maximo(v13 datos,v13 maximos);
void salvar(v19 buf);
void cargar(double tiempo);
};
/*****/
// FUNCIONES PROPIAS DE CLASE
/*****/
// Funcion: THandSim()
// Constructor de clase
/*****/
THandSim::THandSim()
{
    SetupWindow();
    WI=getmaxx()+1;
    HE=getmaxy()+1;
    MARGEN=40;
    estado=eInactivo;
    XL=MARGEN;
    XR=WI-MARGEN;
    YB=HE-MARGEN;
    YT=MARGEN;
    XDIF=XR-XL;
    YDIF=YB-YT;
    YMIN=-2.5;
    YMAX=-YMIN;
    XMIN=YMIN;
    XMAX=YMAX;
    XMIN=((XMIN*XDIF)/YDIF);

```

```

XMAX=((XMAX*XDIF)/YDIF);
SCALX=((double)XDIF/(double)(XMAX-XMIN));
SCALY=((double)YDIF/(double)(YMAX-YMIN));
UCS_XL=XL;
UCS_XR=XL+(int)(YDIF*0.2);
UCS_YT=YT+(int)(YDIF*0.8);
UCS_YB=YB;
UCS_XMIN=-1;
UCS_XMAX=1;
UCS_YMIN=-1;
UCS_YMAX=1;
UCS_XDIF=UCS_XR-UCS_XL;
UCS_YDIF=UCS_YB-UCS_YT;
UCS_SCALX=((double)UCS_XDIF/(double)(UCS_XMAX-
UCS_XMIN));
UCS_SCALY=((double)UCS_YDIF/(double)(UCS_YMAX-
UCS_YMIN));
init_rs();
initpuntos();
initmatgs0();
int i;
for(i=0;13>i;i++)
{
    cmin.v[i]=127;
    cmax.v[i]=0;
}
for(i=0;19>i;i++)
    ang.v[i]=0;
THETA=45;
PHI=55;
RHO=0;
mview=mmview(THETA,PHI,RHO);
CBackground=BLACK;
CHand=GREEN;
CSelection=CYAN;
COrigin=YELLOW;
CUcsOrigin=WHITE;
CFrame=GREEN;
miembro=mNada;
flag1=F;
flag2=F;
flag3=F;
}
/*****/
// Funcion: ~THandSim()
// Destructor de clase
/*****/
THandSim::~THandSim()
{
}
/*****/
// Funcion: SetupWindow()
// Inicializa el elemento visual
/*****/
void THandSim::SetupWindow()
{
    //int gdriver=DETECT;
    //int gmode;
    int gdriver=VGA;
    int gmode=1; //VGAMED 640*350 16c 2p
    initgraph(&gdriver,&gmode,"");
    settextrjustfy(CENTER_TEXT,CENTER_TEXT);
    settextrstyle(SMALL_FONT,HORIZ_DIR,4);
}
/*****/
// Funcion: CloseWindow()
// Destruye el elemento visual
/*****/
void THandSim::CloseWindow()
{

```

```

setcolor(CFrame);
outtextxy(W1/2,HE-10,"SIMULACION INTERRUMPIDA,
PRESIONE UNA TECLA");
flushall();
getch();
closegraph();
exit(0);
}
/*****/
// Funcion: Paint()
// Trazado de la pantalla
/*****/
void THandSim::Paint()
{
    static int page = 0;
    if(page==0)
        page=1;
    else
        page=0;
    setactivepage(page);
    clearviewport();
    frame(CFrame);
    ucs_Icon(CUcsOrigin,0.5*U);
    origen(COrigin,U);
    mano(miembro);
    pt3d(RED,p_in(XM-1,YM-1,ZM-1));
    pt3d(RED,p_in(XM-1,YM-1,ZM+1));
    pt3d(RED,p_in(XM-1,YM+1,ZM-1));
    pt3d(RED,p_in(XM-1,YM+1,ZM+1));
    pt3d(RED,p_in(XM+1,YM-1,ZM-1));
    pt3d(RED,p_in(XM+1,YM-1,ZM+1));
    pt3d(RED,p_in(XM+1,YM+1,ZM-1));
    pt3d(RED,p_in(XM+1,YM+1,ZM+1));
    cal_Icon(YELLOW,flag1);
    rec_Icon(RED,flag2);
    play_Icon(CYAN,flag3);
    setvisualpage(page);
}
/*****/
// FUNCIONES DE LA TABLA DE RESPUESTA
/*****/
// Funcion: PrgPause()
/*****/
void THandSim::PrgPause()
{
    if(estado==eActivo)
        estado=ePausa;
    else
        if(estado==ePausa)
            estado=eActivo;
    Paint();
}
/*****/
// Funcion: PrgRun()
// Ejecuta el programa
/*****/
void THandSim::PrgRun()
{
    unsigned char t1;
    char t2;
    estado=eActivo;
    miembro=mNada;
    Paint();
    for(;;)
    {
        t2=lee_kb();
        if(t2!=NULL)
            EvChar(t2);
        if(test_rs())
            {

```





```

}
switch(miembro)
{
case mPalma:
if(key2!='Q'&&key2!='A'&&key2!='W'&&key2!='S'&&key2!='E'
&&
    key2!='D')
    break;
if((key2=='Q')&&(ang.v[0]<LSPL1))
    ang.v[0]+=DANG;
if((key2=='A')&&(ang.v[0]>LIPL1))
    ang.v[0]-=DANG;
if((key2=='W')&&(ang.v[1]<LSPL2))
    ang.v[1]+=DANG;
if((key2=='S')&&(ang.v[1]>LIPL2))
    ang.v[1]-=DANG;
if((key2=='E')&&(ang.v[2]<LSPL3))
    ang.v[2]+=DANG;
if((key2=='D')&&(ang.v[2]>LIPL3))
    ang.v[2]-=DANG;
    Paint();
    break;
case mPulgar:
if(key2!='Q'&&key2!='A'&&key2!='W'&&key2!='S'&&key2!='E'
&&
    key2!='D'&&key2!='R'&&key2!='F')
    break;
if((key2=='Q')&&(ang.v[3]<LSP1))
    ang.v[3]+=DANG;
if((key2=='A')&&(ang.v[3]>LIP1))
    ang.v[3]-=DANG;
if((key2=='W')&&(ang.v[4]<LSP2))
    ang.v[4]+=DANG;
if((key2=='S')&&(ang.v[4]>LIP2))
    ang.v[4]-=DANG;
if((key2=='E')&&(ang.v[5]<LSP3))
    ang.v[5]+=DANG;
if((key2=='D')&&(ang.v[5]>LIP3))
    ang.v[5]-=DANG;
if((key2=='R')&&(ang.v[6]<LSP4))
    ang.v[6]+=DANG;
if((key2=='F')&&(ang.v[6]>LIP4))
    ang.v[6]-=DANG;
    Paint();
    break;
case mIndice:
if(key2!='Q'&&key2!='A'&&key2!='W'&&key2!='S'&&key2!='E'
&&
    key2!='D')
    break;
if((key2=='Q')&&(ang.v[7]<LSD1))
    ang.v[7]+=DANG;
if((key2=='A')&&(ang.v[7]>LID1))
    ang.v[7]-=DANG;
if((key2=='W')&&(ang.v[8]<LSD2))
    ang.v[8]+=DANG;
if((key2=='S')&&(ang.v[8]>LID2))
    ang.v[8]-=DANG;
if((key2=='E')&&(ang.v[9]<LSD3))
    ang.v[9]+=DANG,ang.v[10]+=DANG;
if((key2=='D')&&(ang.v[9]>LID3))
    ang.v[9]-=DANG,ang.v[10]-=DANG;
    Paint();
    break;
case mMedio:
if(key2!='Q'&&key2!='A'&&key2!='W'&&key2!='S'&&key2!='E'
&&
    key2!='D')
    break;

```

```

if((key2=='Q')&&(ang.v[11]<LSD1))
    ang.v[11]+=DANG;
if((key2=='A')&&(ang.v[11]>LID1))
    ang.v[11]-=DANG;
if((key2=='W')&&(ang.v[12]<LSD2))
    ang.v[12]+=DANG;
if((key2=='S')&&(ang.v[12]>LID2))
    ang.v[12]-=DANG;

if((key2=='E')&&(ang.v[13]<LSD3))
    ang.v[13]+=DANG,ang.v[14]+=DANG;
if((key2=='D')&&(ang.v[13]>LID3))
    ang.v[13]-=DANG,ang.v[14]-=DANG;
    Paint();
    break;
case mAnular:
if(key2!='Q'&&key2!='A'&&key2!='W'&&key2!='S'&&key2!='E'
&&
    key2!='D')
    break;
if((key2=='Q')&&(ang.v[15]<LSD1))
    ang.v[15]+=DANG;
if((key2=='A')&&(ang.v[15]>LID1))
    ang.v[15]-=DANG;
if((key2=='W')&&(ang.v[16]<LSD2))
    ang.v[16]+=DANG;
if((key2=='S')&&(ang.v[16]>LID2))
    ang.v[16]-=DANG;
if((key2=='E')&&(ang.v[17]<LSD3))
    ang.v[17]+=DANG,ang.v[18]+=DANG;
if((key2=='D')&&(ang.v[17]>LID3))
    ang.v[17]-=DANG,ang.v[18]-=DANG;
    Paint();
    break;
}
}
/*****
// FUNCIONES DEL MODELO MATEMATICO
/*****
// Funcion: initpuntos(void)
// Inicializa puntos clave de la mano
/*****
void THandSim::initpuntos(void)
{
// vector nulo
NULO=v_in(0,0,0);
// eje x para el origen del sistema inercial
I=v_in(1,0,0);
// eje y para el origen del sistema inercial
J=v_in(0,1,0);
// eje z para el origen del sistema inercial
K=v_in(0,0,1);
// palma: origen
Q[0]=p_in(XPL,YPL,ZPL);
// eje x para el origen del pulgar
IP=v_unit(v_in(C(B)*C(A),C(B)*S(A),S(B)));
// eje y para el origen del pulgar
JP=v_unit(v_in(-S(A),C(A),0));
// eje z para el origen del pulgar
KP=v_unit(v_in(-S(B)*C(A),-S(B)*S(A),C(B)));
// pulgar: origen falange
Q[1]=p_in(XP,YP,ZP);
// pulgar: origen falangina
Q[2]=p_in(XP+L1P*JP.v[0],YP+L1P*JP.v[1],ZP+L1P*JP.v[2]);
// pulgar: origen falangeta
Q[3]=p_in(XP+(L1P+L2P)*JP.v[0],YP+(L1P+L2P)*JP.v[1],
        ZP+(L1P+L2P)*JP.v[2]);
// pulgar: extremo falangeta

```

```

Q[4]=p_in(XP+(L1P+L2P+L3P)*JP.v[0],YP+(L1P+L2P+L3P)
*JP.v[1],
    ZP+(L1P+L2P+L3P)*JP.v[2]);
// indice: origen falange
Q[5]=p_in(XI,YI,ZI);
// indice: origen falangina
Q[6]=p_in(XI,YI+L1I,ZI);
// indice: origen falangeta
Q[7]=p_in(XI,YI+L1I+L2I,ZI);
// indice: extremo falangeta
Q[8]=p_in(XI,YI+L1I+L2I+L3I,ZI);
// medio: origen falange
Q[9]=p_in(XM,YM,ZM);
// medio: origen falangina
Q[10]=p_in(XM,YM+L1M,ZM);
// medio: origen falangeta
Q[11]=p_in(XM,YM+L1M+L2M,ZM);
// medio: extremo falangeta
Q[12]=p_in(XM,YM+L1M+L2M+L3M,ZM);
// anular: origen falange
Q[13]=p_in(XA,YA,ZA);
// anular: origen falangina
Q[14]=p_in(XA,YA+L1A,ZA);
// anular: origen falangeta
Q[15]=p_in(XA,YA+L1A+L2A,ZA);
// anular: extremo falangeta
Q[16]=p_in(XA,YA+L1A+L2A+L3A,ZA);
// palma
bb[0]=v48_in(LPAL/1.5,LPAL,HH,LPAL);
// pulgar: falange
bb[1]=v48_in(WW,WW,HH,L1P);
// pulgar: falangina
bb[2]=v48_in(WW,WW,HH,L2P);
// pulgar: falangeta
tt[0]=v412_in(WW,HH,WW/2,HH/2,L3P,0.6);
// indice: falange
bb[3]=v48_in(WW,WW,HH,L1I);
// indice: falangina
bb[4]=v48_in(WW,WW,HH,L2I);
// indice: falangeta
tt[1]=v412_in(WW,HH,WW/2,HH/2,L3I,0.6);
// medio: falange
bb[5]=v48_in(WW,WW,HH,L1M);
// medio: falangina
bb[6]=v48_in(WW,WW,HH,L2M);
// medio: falangeta
tt[2]=v412_in(WW,HH,WW/2,HH/2,L3M,0.6);
// anular: falange
bb[7]=v48_in(WW,WW,HH,L1A);
// anular: falangina
bb[8]=v48_in(WW,WW,HH,L2A);
// anular: falangeta
tt[3]=v412_in(WW,HH,WW/2,HH/2,L3A,0.6);
}
/*****/
// Funcion: mgs0(const v4& p)
// Define la matriz gs0
//
// p: punto base del eslabon
// Posicion inicial de la palma
// <Q[0]> palma
// Posicion inicial de la falange proximal
// <Q[5]> indice, <Q[9]> medio, <Q[13]> anular
// Posicion inicial de la falange media
// <Q[6]> indice, <Q[10]> medio, <Q[14]> anular
// Posicion inicial de la falange distal
// <Q[7]> indice, <Q[11]> medio, <Q[15]> anular
// Posicion inicial del extremo de la falange distal
// <Q[8]> indice, <Q[12]> medio, <Q[16]> anular
/*****/

```

```

m4 THandSim::mgs0(const v4& p)
{
    double x,y,z;
    x=p.v[0];y=p.v[1];z=p.v[2];
    m4 m={{1,0,0,x},
          {0,1,0,y},
          {0,0,1,z},
          {0,0,0,1}}};
    return m;
}
/*****/
// Funcion: mgs0(const v4& p)
// Define la matriz gsp0
// Posicion inicial de los eslabones del pulgar
//
// p: punto base del eslabon
// <Q[1]> f. prox., <Q[2]> f. med., <Q[3]> f. dist., <Q[4]> ext. dist.
/*****/
m4 THandSim::mgs0(const v4& p)
{
    double x,y,z;
    x=p.v[0];y=p.v[1];z=p.v[2];
    m4 m={{1P.v[0],JP.v[0],KP.v[0],x},
          {1P.v[1],JP.v[1],KP.v[1],y},
          {1P.v[2],JP.v[2],KP.v[2],z},
          {0,0,0,1}}};
    return m;
}
/*****/
// Funcion: initmats0(void)
// Inicializa las matrices gs0 (posicion inicial)
/*****/
void THandSim::initmats0(void)
{
    gs0[0]=mgs0(Q[0]); //palma
    gs0[1]=mgs0(Q[1]); //pulgar(falange proximal)
    gs0[2]=mgs0(Q[2]); //pulgar(falange media)
    gs0[3]=mgs0(Q[3]); //pulgar(falange distal)
    gs0[4]=mgs0(Q[5]); //indice(falange proximal)
    gs0[5]=mgs0(Q[6]); //indice(falange media)
    gs0[6]=mgs0(Q[7]); //indice(falange distal)
    gs0[7]=mgs0(Q[9]); //medio(falange proximal)
    gs0[8]=mgs0(Q[10]); //medio(falange media)
    gs0[9]=mgs0(Q[11]); //medio(falange distal)
    gs0[10]=mgs0(Q[13]); //anular(falange proximal)
    gs0[11]=mgs0(Q[14]); //anular(falange media)
    gs0[12]=mgs0(Q[15]); //anular(falange distal)
    gs0[13]=mgs0(Q[4]); //pulgar(extremo falange distal)
    gs0[14]=mgs0(Q[8]); //indice(extremo falange distal)
    gs0[15]=mgs0(Q[12]); //medio(extremo falange distal)
    gs0[16]=mgs0(Q[16]); //anular(extremo falange distal)
}
/*****/
// Funcion: ce1(double a,const v4& p)
// Calcula la matriz de transformacion No. 1 (ROLL)
// Rotacion en el eje "y"
//
// a: angulo de rotacion en grados
// p: punto base del eslabon
// <Q[0]> palma
/*****/
m4 THandSim::ce1(double a,const v4& p)
{
    double s,c,v,x,z;
    s=S(a);c=C(a);v=1-c;
    x=p.v[0];z=p.v[2];
    m4 m={{c,0,s,x*v-z*s},
          {0,1,0,0},
          {-s,0,c,x*s+z*v},
          {0,0,0,1}}};
}

```

```

    { 0,0,0, 1}});
return m;
}
/*****
// Funcion: ee2(double a,const v4& p)
// Calcula la matriz de transformacion No. 2 (PITCH)
// Rotacion en el eje "x"
//
// a: angulo de rotacion en grados
// p: punto base del eslabon
// <Q[0]> palma
// <Q[5]> prox. indice, <Q[9]> prox. medio, <Q[13]> prox. anular
// <Q[6]> med.indice, <Q[10]> med. medio, <Q[14]> med.
anular
// <Q[7]> dist. indice, <Q[11]> dist. medio, <Q[15]> dist. anular
/*****
m4 THandSim::ee2(double a,const v4& p)
{
    double s,c,v,y,z;
    s=S(a);c=C(a);v=1-c;
    y=p.v[1];z=p.v[2];
    m4 m={{ {1,0, 0, 0},
            {0,c,-s, y*v+z*s},
            {0,s, c,-y*s+z*v},
            {0,0, 0, 1}}};
    return m;
}
/*****
// Funcion: ee3(double a,const v4& p)
// Calcula la matriz de transformacion No. 3 (YAW)
// Rotacion en el eje "z"
//
// a: angulo de rotacion en grados
// p: punto base del eslabon
// <Q[0]> palma, <Q[5]> indice, <Q[9]> medio, <Q[13]> anular
/*****
m4 THandSim::ee3(double a,const v4& p)
{
    double s,c,v,x,y;
    s=S(a);c=C(a);v=1-c;
    x=p.v[0];y=p.v[1];
    m4 m={{ {c,-s,0, x*v+y*s},
            {s, c,0,-x*s+y*v},
            {0, 0,1, 0},
            {0, 0,0, 1}}};
    return m;
}
/*****
// Funcion: ee4(double a,const v4& w,const v4& p)
// Calcula la matriz de transformacion No. 4
// Rotacion en el eje "z" y "x" de cualquier eslabon del pulgar
//
// a: angulo de rotacion en grados
// w: vector que representa el eje de rotacion
// <IP> eje x', <KP> eje z'
// p: punto base del eslabon
// <Q[1]> f. proximal, <Q[2]> f. media, <Q[3]> f. distal
/*****
m4 THandSim::ee4(double a,const v4& w,const v4& p)
{
    double s,c,v,w1,w2,w3,x,y,z;
    s=S(a);c=C(a);v=1-c;
    w1=w.v[0];w2=w.v[1];w3=w.v[2];
    x=p.v[0];y=p.v[1];z=p.v[2];
    m4 m={{ {w1*w1*v+c,
            w1*w2*v-w3*s,
            w1*w3*v+w2*s,
            x*v*(1-w1*w1)+y*(s*w3-w1*w2*v)+z*(-s*w2-
            w1*w3*v)},
            {w1*w2*v+w3*s,
            w2*w2*v+c,
            w2*w3*v-w1*s,
            x*(-s*w3-w1*w2*v)+y*v*(1-w2*w2)+z*(s*w1-
            w2*w3*v)},
            {w1*w3*v-w2*s,
            w2*w3*v+w1*s,
            w3*w3*v+c,
            x*(s*w2-w1*w3*v)+y*(-s*w1-w2*w3*v)+z*v*(1-
            w3*w3)},
            {0,
            0,
            0,
            1}}};
    return m;
}
/*****
// Funcion: mg(const v19& a)
// Calcula las matrices g
//
// a: vector de todos los angulos de las articulaciones
/*****
void THandSim::mg(const v19& a)
{
    //palma
    e[0]=ee1(a.v[0],Q[0]);
    e[1]=ee2(a.v[1],Q[0]);
    e[2]=ee3(a.v[2],Q[0]);
    //pulgar
    e[3]=ee4(a.v[3],KP,Q[1]);
    e[4]=ee4(a.v[4],IP,Q[1]);
    e[5]=ee4(a.v[5],IP,Q[2]);
    e[6]=ee4(a.v[6],IP,Q[3]);
    //indice
    e[7]=ee3(a.v[7],Q[5]);
    e[8]=ee2(a.v[8],Q[5]);
    e[9]=ee2(a.v[9],Q[6]);
    e[10]=ee2(a.v[10],Q[7]);
    //medio
    e[11]=ee3(a.v[11],Q[9]);
    e[12]=ee2(a.v[12],Q[9]);
    e[13]=ee2(a.v[13],Q[10]);
    e[14]=ee2(a.v[14],Q[11]);
    //anular
    e[15]=ee3(a.v[15],Q[13]);
    e[16]=ee2(a.v[16],Q[13]);
    e[17]=ee2(a.v[17],Q[14]);
    e[18]=ee2(a.v[18],Q[15]);
    //palma
    gs[0]=mm_mult(mm_mult(e[0],e[1]),e[2]);
    //pulgar
    gs[1]=mm_mult(mm_mult(gs[0],e[3]),e[4]);
    gs[2]=mm_mult(gs[1],e[5]);
    gs[3]=mm_mult(gs[2],e[6]);
    //indice
    gs[4]=mm_mult(mm_mult(gs[0],e[7]),e[8]);
    gs[5]=mm_mult(gs[4],e[9]);
    gs[6]=mm_mult(gs[5],e[10]);
    //medio
    gs[7]=mm_mult(mm_mult(gs[0],e[11]),e[12]);
    gs[8]=mm_mult(gs[7],e[13]);
    gs[9]=mm_mult(gs[8],e[14]);
    //anular
    gs[10]=mm_mult(mm_mult(gs[0],e[15]),e[16]);
    gs[11]=mm_mult(gs[10],e[17]);
    gs[12]=mm_mult(gs[11],e[18]);
    //palma
    g[0]=mm_mult(gs[0],gs[0]);
    //pulgar
    g[1]=mm_mult(gs[1],gs[0]);
    g[2]=mm_mult(gs[2],gs[0]);
}

```

```

g[3]=mm_mult(gs[3],gs0[3]);
//indice
g[4]=mm_mult(gs[4],gs0[4]);
g[5]=mm_mult(gs[5],gs0[5]);
g[6]=mm_mult(gs[6],gs0[6]);
//medio
g[7]=mm_mult(gs[7],gs0[7]);
g[8]=mm_mult(gs[8],gs0[8]);
g[9]=mm_mult(gs[9],gs0[9]);
//anular
g[10]=mm_mult(gs[10],gs0[10]);
g[11]=mm_mult(gs[11],gs0[11]);
g[12]=mm_mult(gs[12],gs0[12]);
}
/*****/
// Funcion: m_rot(double a,const v4& b,double x,double y,double
z)
// Calcula matrices de rotacion
//
// a: angulo de rotacion
// b: vector que representa al eje de rotacion
// x: coordenada x del punto de anclaje del sist. de ref.
// y: coordenada y del punto de anclaje del sist. de ref.
// z: coordenada z del punto de anclaje del sist. de ref.
/*****/
m4 THandSim::m_rot(double a,const v4& b,double x,double
y,double z)
{
v4 w;
double s,c,v;
s=S(a);c=C(a);v=1-c;
w=v_unit(b);
m4 m={{w.v[0]*w.v[0]*v+c,
w.v[0]*w.v[1]*v-w.v[2]*s,
w.v[0]*w.v[2]*v+w.v[1]*s,
x},
{w.v[0]*w.v[1]*v+w.v[2]*s,
w.v[1]*w.v[1]*v+c,
w.v[1]*w.v[2]*v-w.v[0]*s,
y},
{w.v[0]*w.v[2]*v-w.v[1]*s,
w.v[1]*w.v[2]*v+w.v[0]*s,
w.v[2]*w.v[2]*v+c,
z},
{0,
0,
0,
1}}};
return m;
}
/*****/
// FUNCIONES DE PARA OPERAR CON MATRICES
/*****/
// Funcion: m_esc(double esc,const m4& a)
// Multiplica un escalar por una matriz
//
// esc: escalar por el cual se multiplica la matriz
// a: matriz objeto de la operacion
/*****/
m4 THandSim::m_esc(double esc,const m4& a)
{
int i,j;
m4 m;
for(i=0;ORD>i;i++)
for(j=0;ORD>j;j++)
m.m[i][j]=esc*a.m[i][j];
return m;
}
/*****/
// Funcion: m_transp(const m4& a)

```

```

// Obtiene la transpuesta de una matriz
//
// a: matriz objeto de la operacion
/*****/
m4 THandSim::m_transp(const m4& a)
{
int i,j;
m4 m;
for(i=0;ORD>i;i++)
for(j=0;ORD>j;j++)
m.m[j][i]=a.m[i][j];
return m;
}
/*****/
// Funcion: mm_mult(const m4& a,const m4& b)
// Multiplica una matriz por otra (matrices cuadradas de tamaño
ORD)
//
// a: matriz que funciona como primer factor
// b: matriz que funciona como segundo factor
/*****/
m4 THandSim::mm_mult(const m4& a,const m4& b)
{
int i,j,k;
m4 m;
for(i=0;ORD>i;i++)
for(j=0;ORD>j;j++)
{
m.m[i][j]=0;
for(k=0;ORD>k;k++)
m.m[i][j]=m.m[i][j]+a.m[i][k]*b.m[k][j];
}
return m;
}
/*****/
// Funcion: mv_mult(const m4& a,const v4& b)
// Multiplica matrices por vectores
//
// a: matriz que funciona como primer factor
// b: vector que funciona como segundo factor
/*****/
v4 THandSim::mv_mult(const m4& a,const v4& b)
{
int i,k;
v4 v;
for(i=0;ORD>i;i++)
{
v.v[i]=0;
for(k=0;ORD>k;k++)
v.v[i]=v.v[i]+a.m[i][k]*b.v[k];
}
return v;
}
/*****/
// Funcion: m_inv(const m4& a)
// Obtiene la inversa de una matriz tipo g (caso especial)
//
// a: matriz objeto de la inversion
/*****/
m4 THandSim::m_inv(const m4& a)
{
int i,j,k;
m4 m=a;
for(i=0;(ORD-1)>i;i++)
for(j=0;(ORD-1)>j;j++)
m.m[j][i]=a.m[i][j];
for(i=0;(ORD-1)>i;i++)
{
m.m[i][ORD-1]=0;
for(k=0;(ORD-1)>k;k++)

```

```

    m.m[i][ORD-1]=m.m[i][ORD-1]-m.m[i][k]*a.m[k][ORD-1];
}
return m;
}
/*****
// FUNCIONES PARA OPERAR CON VECTORES
/*****
// Funcion: p_in(double x,double y,double z,double k = 1)
// Ingresa datos en un punto
//
// x: componente x del punto
// y: componente y del punto
// z: componente z del punto
// k: cuarto elemento comodin
/*****
v4 THandSim::p_in(double x,double y,double z,double k)
{
    v4 v={{x,y,z,k}};
    return v;
}
/*****
// Funcion: v_in(double x,double y,double z,double k = 0)
// Ingresa datos en un vector
//
// x: componente x del vector
// y: componente y del vector
// z: componente z del vector
// k: cuarto elemento comodin
/*****
v4 THandSim::v_in(double x,double y,double z,double k)
{
    v4 v={{x,y,z,k}};
    return v;
}
/*****
// Funcion: v_sum(const v4& a,const v4& b,char oper)
// Suma dos vectores en forma algebraica
//
// a: vector que funciona como primer sumando
// b: vector que funciona como segundo sumando
// oper: tipo de operacion, '<+>' suma, '<->' resta
/*****
v4 THandSim::v_sum(const v4& a,const v4& b,char oper)
{
    int i;
    v4 v;
    if(oper=='+') //'+'=43
        for(i=0;(ORD-1)>i;i++)
            v.v[i]=a.v[i]+b.v[i];
    if(oper=='-') //'-'=45
        for(i=0;(ORD-1)>i;i++)
            v.v[i]=a.v[i]-b.v[i];
    v.v[(ORD-1)]=0;
    return v;
}
/*****
// Funcion: v_esc(double esc,const v4& a)
// Calcula el producto de un escalar con un vector
//
// esc: escalar por el cual se multiplica el vector
// a: vector objeto de la operacion
/*****
v4 THandSim::v_esc(double esc,const v4& a)
{
    int i;
    v4 v;
    for(i=0;(ORD-1)>i;i++)
        v.v[i]=esc*a.v[i];
    v.v[(ORD-1)]=0;
    return v;
}
}
/*****
// Funcion: dot(const v4& a,const v4& b)
// Calcula el producto punto entre dos vectores
//
// a: vector que funciona como primer operando
// b: vector que funciona como segundo operando
/*****
double THandSim::dot(const v4& a,const v4& b)
{
    int i;
    double prod=0;
    for(i=0;(ORD-1)>i;i++)
        prod=prod+a.v[i]*b.v[i];
    return prod;
}
/*****
// Funcion: cross(const v4& a,const v4& b)
// Calcula el producto cruz entre dos vectores
//
// a: vector que funciona como primer operando
// b: vector que funciona como segundo operando
/*****
v4 THandSim::cross(const v4& a,const v4& b)
{
    v4 v={{a.v[1]*b.v[2]-a.v[2]*b.v[1],
            a.v[2]*b.v[0]-a.v[0]*b.v[2],
            a.v[0]*b.v[1]-a.v[1]*b.v[0],
            0}};
    return v;
}
/*****
// Funcion: mag2(const v4& a)
// Obtiene el cuadrado de la magnitud de un vector
//
// a: vector objeto de la operacion
/*****
double THandSim::mag2(const v4& a)
{
    return dot(a,a);
}
/*****
// Funcion: mag(const v4& a)
// Obtiene la magnitud de un vector
//
// a: vector objeto de la operacion
/*****
double THandSim::mag(const v4& a)
{
    return sqrt(mag2(a));
}
/*****
// Funcion: v_unit(const v4& a)
// Normaliza un vector
//
// a: vector objeto de la normalizacion
/*****
v4 THandSim::v_unit(const v4& a)
{
    return v_esc((1/mag(a)),a);
}
/*****
// FUNCIONES PARA OPERAR CON ESTRUCTURAS DE
// DATOS ESPECIALES
/*****
// Funcion: v48_in(double a,double b,double h,double l)
// Ingresa datos en un elemento v48 (aristas de barras y prismas
// trapezoidales)
//
// a: ancho en un extremo de la barra

```

```

// b: ancho en el otro extremo de la barra
// h: altura de la barra
// l: longitud de la barra
/*****/
v48 THandSim::v48_in(double a,double b,double h,double l)
{
    v48 v={{ { a/2,0,-h/2,1 },
             { -a/2,0,-h/2,1 },
             { a/2,0, h/2,1 },
             { -a/2,0, h/2,1 },
             { b/2,1,-h/2,1 },
             { -b/2,1,-h/2,1 },
             { b/2,1, h/2,1 },
             { -b/2,1, h/2,1 } }};

    return v;
}
/*****/
// Funcion: v412_in(double w1,double h1,double w2,double
h2,double l,double r)
// Ingresa datos en un elemento v412 (aristas prismas de seccion
variable)
//
// w1: ancho en la primera seccion de la barra
// h1: altura en la primera seccion de la barra
// w2: ancho en el otro extremo de la barra
// h2: altura en el otro extremo de la barra
// l: longitud de la barra
// r: relacion de longitudes de la primera seccion a la longitud total
/*****/
v412 THandSim::v412_in(double w1,double h1,double w2,double
h2,
                        double l,double r)
{
    double l1=r*l;
    v412 v={{ { w1/2, 0,-h1/2,1 },
             { -w1/2, 0,-h1/2,1 },
             { w1/2, 0, h1/2,1 },
             { -w1/2, 0, h1/2,1 },
             { w1/2,11,-h1/2,1 },
             { -w1/2,11,-h1/2,1 },
             { w1/2,11, h1/2,1 },
             { -w1/2,11, h1/2,1 },
             { w2/2, 1,-h2/2,1 },
             { -w2/2, 1,-h2/2,1 },
             { w2/2, 1, h2/2,1 },
             { -w2/2, 1, h2/2,1 } }};

    return v;
}
/*****/
// FUNCIONES GRAFICAS
/*****/
// Funcion: mmview(double theta,double& phi,double rho)
// Calcula la matriz de pasa de coord. en 3d a coord. graficas
//
// theta: azimut
// phi: elevacion
// rho: giro de vista
/*****/
m4 THandSim::mmview(double theta,double& phi,double rho)
{
    double c=C(rho),s=S(rho);
    static v4 u;
    v4 v,n,vp;
    if(phi==180)
        phi=180;
    if(phi>180)
        phi=phi-360;
    n=v_in(S(phi)*C(theta),S(phi)*S(theta),C(phi));
    vp=v_in(0,0,((phi>0)&&(phi<180))? 1 : -1);
    if((n.v[0]==0)&&(n.v[1]==0))
        v=cross(n,u);
    else
    {
        v=v_unit(v_sum(vp,v_esc(dot(vp,n),n),'-'));
        u=cross(v,n);
    }
    m4 m1={{ { c,s,0,0 },
             { -s,c,0,0 },
             { 0,0,1,0 },
             { 0,0,0,1 } }};
    m4 m2={{ { u.v[0],u.v[1],u.v[2],0 },
             { v.v[0],v.v[1],v.v[2],0 },
             { n.v[0],n.v[1],n.v[2],0 },
             { 0, 0, 0,1 } }};
    m4 m3=mm_mult(m1,m2);
    return m3;
}
/*****/
// Funcion: vscreen(double d,const v4& a,const m4& m)
// Transforma las coord. en 3d a coord. de la pantalla
//
// d: distancia de la camara al plano de proyeccion de la imagen
// a: vector que representa un punto en el espacio
// m: matriz de pasa de coord. en 3d a coord. graf.
/*****/
TPoint THandSim::vscreen(double /*d*/,const v4& a,const m4&
m)
{
    v4 v;
    TPoint p;
    v=mv_mult(m,a);
    p.x=(int)(XL+(v.v[0]-XMIN)*SCALX);
    p.y=(int)(YB-(v.v[1]-YMIN)*SCALY);
    // p.x=(int)(((v.v[0]*d)/fabs(v.v[2]))-XMIN)*SCALX);
    // p.y=(int)(YDIF-(((v.v[1]*d)/fabs(v.v[2]))-YMIN)*SCALY);
    return p;
}
/*****/
// Funcion: ln(TPoint& p1,TPoint& p2)
// Dibuja una linea dados los dos extremos
//
// p1: punto inicial
// p2: punto final
/*****/
void THandSim::ln(TPoint& p1,TPoint& p2)
{
    line(p1.x,p1.y,p2.x,p2.y);
}
/*****/
// Funcion: frame(int color)
// Dibuja el marco de presentacion
/*****/
void THandSim::frame(int color)
{
    setcolor(color);
    outtextxy(WI/2,10,"MANIPULADOR ANTROPOMORFICO
TELEOPERADO");
    rectangle(XL,YT,XR,YB);
}
/*****/
// Funcion: ucs_icoon(int color,double l)
// Crea el icono del sistema universal de coordenadas
//
// color: color del origen
// l: longitud de los ejes
/*****/
void THandSim::ucs_icoon(int color,double l)
{
    int i;
    v4 v;

```

```

TPoint p2d[7];
v4 p3d[]={ {0,0,0,1}}, //origen
           {1,0,0,1}}, //eje X
           {0,1,0,1}}, //eje Y
           {0,0,1,1}}, //eje Z
           {{1.3*1,0,0,1}}, //etiqueta de eje "X"
           {{0,1.3*1,0,1}}, //etiqueta de eje "Y"
           {{0,0,1.3*1,1}}}; //etiqueta de eje "Z"
for(i=0;7>i;i++)
{
v=mv_mult(mview,p3d[i]);
p2d[i].x=(int)(UCS_XL+(v.v[0]-UCS_XMIN)*UCS_SCALX);
p2d[i].y=(int)(UCS_YB-(v.v[1]-UCS_YMIN)*UCS_SCALY);
}
setcolor(color);
ln(p2d[0],p2d[1]);
ln(p2d[0],p2d[2]);
ln(p2d[0],p2d[3]);
outtextxy(p2d[4].x,p2d[4].y,"X");
outtextxy(p2d[5].x,p2d[5].y,"Y");
outtextxy(p2d[6].x,p2d[6].y,"Z");
}
/*****
// Funcion: origen(int color,double l)
// Crea el origen en la pantalla
//
// color: color del origen
// l: longitud de los ejes
*****/
void THandSim::origen(int color,double l)
{
int i;
TPoint p2d[7];
v4 p3d[]={ {0,0,0,1}}, //origen
           {1,0,0,1}}, //eje X
           {0,1,0,1}}, //eje Y
           {0,0,1,1}}, //eje Z
           {{1.3*1,0,0,1}}, //etiqueta de eje "X"
           {{0,1.3*1,0,1}}, //etiqueta de eje "Y"
           {{0,0,1.3*1,1}}}; //etiqueta de eje "Z"
for(i=0;7>i;i++)
p2d[i]=vscreen(D,p3d[i],mview);
setcolor(color);
ln(p2d[0],p2d[1]);
ln(p2d[0],p2d[2]);
ln(p2d[0],p2d[3]);
outtextxy(p2d[4].x,p2d[4].y,"X");
outtextxy(p2d[5].x,p2d[5].y,"Y");
outtextxy(p2d[6].x,p2d[6].y,"Z");
}
/*****
// Funcion: sistref(int color,double l,const m4& rot)
// Crea sistemas de referencia en la pantalla
//
// color: color del origen
// l: longitud de los ejes
// rot: matriz de rotacion asociado a dicho sistema
*****/
void THandSim::sistref(int color,double l,const m4& rot)
{
int i;
TPoint p2d[4];
v4 p3d[]={ {0,0,0,1}},
           {1,0,0,1}},
           {0,1,0,1}},
           {0,0,1,1}}};
for(i=0;4>i;i++)
p2d[i]=vscreen(D,mv_mult(rot,p3d[i]),mview);
setcolor(color);
ln(p2d[0],p2d[1]);
ln(p2d[0],p2d[2]);
}
/*****
// Funcion: barra(v48& p3d,const m4& rot)
// Crea una barra en el espacio
//
// p3d: coordenadas de las aristas de la barra
// rot: matriz de rotacion asociada a la barra
*****/
void THandSim::barra(v48& p3d,const m4& rot)
{
int i;
TPoint p2d[8];
for(i=0;8>i;i++)
p2d[i]=vscreen(D,mv_mult(rot,p3d.v[i]),mview);
ln(p2d[0],p2d[4]);
ln(p2d[4],p2d[6]);
ln(p2d[6],p2d[2]);
ln(p2d[2],p2d[3]);
ln(p2d[3],p2d[7]);
ln(p2d[7],p2d[5]);
ln(p2d[5],p2d[1]);
ln(p2d[1],p2d[0]);
ln(p2d[0],p2d[2]);
ln(p2d[1],p2d[3]);
ln(p2d[4],p2d[5]);
ln(p2d[6],p2d[7]);
}
/*****
// Funcion: tip(v412& p3d,const m4& rot)
// Crea la punta de los dedos
//
// p3d: coordenadas de las aristas de la barra
// rot: matriz de rotacion asociada a la barra
*****/
void THandSim::tip(v412& p3d,const m4& rot)
{
int i;
TPoint p2d[12];
for(i=0;12>i;i++)
p2d[i]=vscreen(D,mv_mult(rot,p3d.v[i]),mview);
ln(p2d[0],p2d[4]);
ln(p2d[4],p2d[8]);
ln(p2d[8],p2d[10]);
ln(p2d[10],p2d[6]);
ln(p2d[6],p2d[2]);
ln(p2d[2],p2d[3]);
ln(p2d[3],p2d[7]);
ln(p2d[7],p2d[11]);
ln(p2d[11],p2d[9]);
ln(p2d[9],p2d[5]);
ln(p2d[5],p2d[1]);
ln(p2d[1],p2d[0]);
ln(p2d[0],p2d[2]);
ln(p2d[1],p2d[3]);
ln(p2d[8],p2d[9]);
ln(p2d[10],p2d[11]);
// ln(p2d[4],p2d[5]);
// ln(p2d[5],p2d[7]);
// ln(p2d[7],p2d[6]);
// ln(p2d[6],p2d[4]);
}
/*****
// Funcion: palma(int color)
// Dibuja la palma
//
// color: color de la palma
*****/
void THandSim::palma(int color)

```



```

{
  setcolor(color);
  barra(bb[0],g[0]);
  // sistref(COrigin,R,g[0]);
}
/*****/
// Funcion: pulgar(int color)
// Dibuja el dedo pulgar
//
// color: color del pulgar
/*****/
void THandSim::pulgar(int color)
{
  setcolor(color);
  barra(bb[1],g[1]);
  barra(bb[2],g[2]);
  tip(tt[0],g[3]);
  // sistref(COrigin,R,g[1]);
  // sistref(COrigin,R,g[2]);
  // sistref(COrigin,R,g[3]);
}
/*****/
// Funcion: indice(int color)
// Dibuja el dedo indice
//
// color: color del indice
/*****/
void THandSim::indice(int color)
{
  setcolor(color);
  barra(bb[3],g[4]);
  barra(bb[4],g[5]);
  tip(tt[1],g[6]);
  // sistref(COrigin,R,g[4]);
  // sistref(COrigin,R,g[5]);
  // sistref(COrigin,R,g[6]);
}
/*****/
// Funcion: medio(int color)
// Dibuja el dedo medio
//
// color: color del dedo medio
/*****/
void THandSim::medio(int color)
{
  setcolor(color);
  barra(bb[5],g[7]);
  barra(bb[6],g[8]);
  tip(tt[2],g[9]);
  // sistref(COrigin,R,g[7]);
  // sistref(COrigin,R,g[8]);
  // sistref(COrigin,R,g[9]);
}
/*****/
// Funcion: anular(int color)
// Dibuja el dedo anular
//
// color: color del anular
/*****/
void THandSim::anular(int color)
{
  setcolor(color);
  barra(bb[7],g[10]);
  barra(bb[8],g[11]);
  tip(tt[3],g[12]);
  // sistref(COrigin,R,g[10]);
  // sistref(COrigin,R,g[11]);
  // sistref(COrigin,R,g[12]);
}
/*****/

// Funcion: mano(Miembro flag)
// Dibuja la mano
//
// flag: bandera que identifica el miembro en movimiento
// <1> palma, <2> pulgar, <3> indice, <4> medio, <5> anular
/*****/
void THandSim::mano(Miembro flag)
{
  int coldef,colesp,colpal,colind,colmed,colanu,colpul;
  coldef=CHand;
  colesp=CSelection;
  colpal=coldef;
  colind=coldef;
  colmed=coldef;
  colanu=coldef;
  colpul=coldef;
  switch (flag)
  {
    case mPalma: colpal=colesp; break;
    case mPulgar: colpul=colesp; break;
    case mIndice: colind=colesp; break;
    case mMedio: colmed=colesp; break;
    case mAnular: colanu=colesp; break;
    default: break;
  }
  mg(ang); //Aqui se calculan todas las matrices
  palma(colpal);
  pulgar(colpul);
  indice(colind);
  medio(colmed);
  anular(colanu);
}
/*****/
// Funcion: pt2d(int color,TPoint& point,int l)
// Crea una marca en el punto señalado
//
// color: color de la marca
// p: punto en la pantalla
// l: longitud de los brazos de la marca
/*****/
void THandSim::pt2d(int color,TPoint& p,int l)
{
  setcolor(color);
  line((int)(p.x-l),(int)p.y,(int)(p.x+l),(int)p.y);
  line((int)p.x,(int)(p.y-l),(int)p.x,(int)(p.y+l));
}
/*****/
// Funcion: pt3d(int color,const v4& p,int l)
// Dibuja un punto en el espacio
//
// color: color del punto dibujado
// p: coordenada en 3d del punto
/*****/
void THandSim::pt3d(int color,const v4& p,int l)
{
  TPoint p2d;
  setcolor(color);
  p2d=vscreen(D,p,mview);
  pt2d(color,p2d,l);
}
/*****/
// Funcion: rec_ico(int color,bool flag)
// Dibuja el icono de "CAL" (calibracion)
//
// color: color del icono
// flag: bandera de activacion
/*****/
void THandSim::cal_ico(int color,bool flag)
{
  if(flag==T)

```

```

{
  int x,y;
  x=XR-75;
  y=10;
  setcolor(color);
  setfillstyle(SOLID_FILL,color);
  fillellipse(x,y,3,3);
  setcolor(CFrame);
  outtextxy(x,y+10,"CAL");
}
}
/*****/
// Funcion: rec_icon(int color,bool flag)
// Dibuja el icono de "REC" (guardar)
//
// color: color del icono
// flag: bandera de activacion
/*****/
void THandSim::rec_icon(int color,bool flag)
{
  if(flag==T)
  {
    int x,y;
    x=XR-45;
    y=10;
    setcolor(color);
    setfillstyle(SOLID_FILL,color);
    fillellipse(x,y,3,3);
    setcolor(CFrame);
    outtextxy(x,y+10,"REC");
  }
}
/*****/
// Funcion: play_icon(int color,bool flag)
// Dibuja el icono de "PLAY" (cargar)
//
// color: color del icono
// flag: bandera de activacion
/*****/
void THandSim::play_icon(int color,bool flag)
{
  if(flag==T)
  {
    int x,y;
    x=XR-15;
    y=10;
    setcolor(color);
    setfillstyle(SOLID_FILL,color);
    fillellipse(x,y,3,3);
    setcolor(CFrame);
    outtextxy(x,y+10,"PLAY");
  }
}
/*****/
// FUNCIONES DE COMUNICACION SERIAL
/*****/
const int SET = 0; //configuracion de puerto
const int SEND = 1; //envia caracter por el puerto
const int READ = 2; //recibe un caracter en el puerto
const int STAT = 3; //verifica el estado del puerto
const int COM1 = 0; //puerto serie COM 1
const int COM2 = 1; //puerto serie COM 2
const int DB_7 = 0x02; //7 bits de datos
const int DB_8 = 0x03; //8 bits de datos
const int SB_1 = 0x00; //1 bit de paro
const int SB_2 = 0x04; //2 bits de paro
const int NO_PAR = 0x00; //sin paridad
const int ODD_PAR = 0x08; //paridad non
const int EVEN_PAR = 0x18; //paridad par
const int B_110 = 0x00; //110 bauds

const int B_150 = 0x20; //150 bauds
const int B_300 = 0x40; //300 bauds
const int B_600 = 0x60; //600 bauds
const int B_1200 = 0x80; //1200 bauds
const int B_2400 = 0xa0; //2400 bauds
const int B_4800 = 0xc0; //4800 bauds
const int B_9600 = 0xe0; //9600 bauds
const int DATA_READY = 0x100; //hay un caracter en el puerto
/*****/
// Funcion: init_rs(void)
// Inicializa el puerto serial
/*****/
void THandSim::init_rs(void)
{
  bioscom(SET,DB_8|SB_1|NO_PAR|B_9600,COM2);
}
/*****/
// Funcion: test_rs(void)
// Prueba si hay informacion disponible en el puerto serial
/*****/
int THandSim::test_rs(void)
{
  return(bioscom(STAT,0,COM2)&DATA_READY);
}
/*****/
// Funcion: leer(void)
// Lee un caracter del puerto serial
/*****/
char THandSim::leer(void)
{
  return(bioscom(READ,0,COM2)&0x00ff);
}
/*****/
// Funcion: escribir(char c)
// Escribe un caracter al puerto serial
//
// c: caracter que va a ser mandado por el puerto
/*****/
void THandSim::escribir(char c)
{
  bioscom(SEND,c,COM2);
}
/*****/
// Funcion: get13(void)
// Captura una secuencia de 13 bytes del puerto serial
/*****/
v13 THandSim::get13(void)
{
  int i=0;
  v13 v;

  for(;13>i;)
  {
    if(test_rs())
    {
      v.v[i]=leer();
      i++;
    }
  }
  return v;
}
/*****/
// FUNCIONES MISCELANEAS
/*****/
// Funcion: interpol(double x1,double x2,double y1,double
// y2,double x)
// Realiza la interpolación lineal de puntos
//
// x1: Punto 1 sobre las abscisas
// x2: Punto 2 sobre las abscisas

```

```

// y1: Punto 1 sobre las ordenadas
// y2: Punto 2 sobre las ordenadas
// x: Punto actual
/*****/
double THandSim::interpol(double x1,double x2,double y1,
                          double y2,double x)
{
    double y,k;
    k=(x2-x1);
    if(k==0)
        k=1;
    y=((y2-y1)/k)*(x-x1)+y1;
    return y;
}
/*****/
// Funcion: minimo(v16 datos,v16 minimos)
// Obtiene el minimo de los valores que son leidos en el puerto
//
// datos: vector de datos actuales recibidos en el puerto
// minimos: vector de datos minimos recibidos en el puerto
/*****/
v13 THandSim::minimo(v13 datos,v13 minimos)
{
    for(int i=0;13>i;i++)
        if(datos.v[i]<minimos.v[i])
            minimos.v[i]=datos.v[i];
    return minimos;
}
/*****/
// Funcion: maximo(v13 datos,v13 maximos)
// Obtiene el maximo de los valores que son leidos en el puerto
//
// datos: vector de datos actuales recibidos en el puerto
// maximos: vector de datos maximos recibidos en el puerto
/*****/
v13 THandSim::maximo(v13 datos,v13 maximos)
{
    for(int i=0;13>i;i++)
        if(datos.v[i]>maximos.v[i])
            maximos.v[i]=datos.v[i];
    return maximos;
}
/*****/
// FUNCIONES DE MANEJO DE ARCHIVOS
/*****/
// Funcion: salvar(v19 buf)
// Graba la secuencia de angulos en el archivo: "Serie.sec"
//
// buf: guarda el valor de todos los ángulos
/*****/
void THandSim::salvar(v19 buf)
{
    FILE *outfile;
    if((outfile = fopen("Serie.sec","a+b"))==NULL)
    {
        printf("\nError en escritura");
    }
    fwrite(&buf,sizeof(v19),1,outfile);
    fclose(outfile);
}
/*****/
// Funcion: cargar(double tiempo)
// Carga la secuencia almacenada en el archivo: "Serie.sec"
//
// tiempo: retraso en milisegundo entre imagenes
/*****/
void THandSim::cargar(double tiempo)
{
    FILE *infile;
    v19 buf;

```

```

if((infile = fopen("Serie.sec","rb"))==NULL)
{
    printf("\nError en lectura!");
}
fseek(infile, SEEK_SET, 0);
while(!feof(infile))
{
    fread(&buf,sizeof(v19),1,infile);
    ang=buf;
    Paint();
    delay(tiempo);
}
fclose(infile);
}
/*****/
// Funcion: lee_kb()
// Lee un caracter del teclado
/*****/
union REGS in,out;
char lee_kb(void)
{
    in.h.ah=0x06;
    in.h.dl=0xFF;
    int86(0x21,&in,&out);
    return(out.h.al);
}
/*****/
// Programa principal
/*****/
main()
{
    THandSim *Hand;
    Hand = new THandSim();
    Hand->PrgRun();
}

```

Este programa posee funciones de visualización y control que hacen más flexible la operación de éste. En la tabla siguiente puede consultarse el resumen de estos comandos.

<b>F11</b>	Inicialización de los ángulos de visión.
<b>I</b>	Incrementa el ángulo de elevación.
<b>K</b>	Decrementa el ángulo de elevación.
<b>J</b>	Incrementa el ángulo de acimut.
<b>L</b>	Decrementa el ángulo de acimut.
<b>F5</b>	Rotación antihoraria del plano de proyección.
<b>F6</b>	Rotación horaria del plano de proyección.
<b>TAB</b>	Intercala la selección de los elementos de la mano.
<b>Q</b>	Palma: movimiento de supinación. Dedos: movimiento de aducción.
<b>A</b>	Palma: movimiento de pronación. Dedos: movimiento de abducción.
<b>W</b>	Palma: movimiento de inclinación positiva. Dedos: extensión de la falange. Pulgar: flexión del metacarpo.
<b>S</b>	Palma: movimiento de inclinación negativa. Dedos: flexión de la falange. Pulgar: flexión del metacarpo.
<b>E</b>	Palma: movimiento de aducción. Dedos: extensión de falangina y falangeta. Pulgar: extensión de la falangina.
<b>D</b>	Palma: movimiento de abducción. Dedos: flexión de la falangina y falangeta. Pulgar: flexión de la falangina.
<b>R</b>	Pulgar: extensión de la falangeta.
<b>F</b>	Pulgar: flexión de la falangeta.
<b>F12</b>	Inicializa los ángulos de todos los elementos de la mano.
<b>C</b>	Inicia o interrumpe la secuencia de calibración.
<b>G</b>	Inicia o interrumpe el almacenamiento de la secuencia de movimiento del usuario.
<b>P</b>	Reproduce la secuencia almacenada.
<b>ESC</b>	Termina la ejecución del programa.

*Tabla B.1 Comandos adicionales para el manejo de la pantalla de visualización.*

# Apéndice C

## PROGRAMA DEL 8031

El programa que se muestra a continuación fue realizado como parte del trabajo para esta tesis, el cual se encarga del control de los once servomotores empleados en la actuación del manipulador.

```
;Prueba de control de servos con los
;datos leídos por el puerto
;Control para ONCE servos
;13/III/01
;PUERTOS A Y B
```

```
ON EQU 50H
OFF EQU 51H
ORG 2000H
LJMP 2040H
ORG 2040H
MOV TH1,#0FDH ;9600 bps
ANL PCON,#7FH ;K=1
MOV A,#80H
MOV DPTR,#0E003H
MOVX @DPTR,A
MOV P1,#0H
MOV ON,#01H
MOV OFF,#0H
```

```
INC: MOV R0,#3FH
LCALL 22FH
CJNE A,#0F0H,INC
```

```
LOOP: LCALL 22FH
CJNE A,#0F7H,CONT
LCALL GENERA
LJMP INC
```

```
CONT: INC R0
MOV @R0,A
LJMP LOOP
```

```
GENERA: MOV DPTR,#0E001H
MOV R0,#40H
```

```
MOV A,#01H
MOVX @DPTR,A
MOV A,@R0
MOV B,#03H
MUL AB
ADD A,#0FFH
MOV R4,A
MOV A,B
ADDC A,#01H
MOV R1,A
```

```
GENER: DJNZ R4,GENER
DJNZ R1,GENER
MOV A,OFF
MOVX @DPTR,A
INC R0
MOV A,#02H
MOVX @DPTR,A
MOV A,@R0
MOV B,#03H
MUL AB
ADD A,#0FFH
MOV R4,A
MOV A,B
ADDC A,#01H
MOV R1,A
```

```
GENER1: DJNZ R4,GENER1
DJNZ R1,GENER1
MOV A,OFF
MOVX @DPTR,A
INC R0
MOV A,#04H
MOVX @DPTR,A
MOV A,@R0
```

```

MOV B,#03H
MUL AB
ADD A,#0FFH
MOV R4,A
MOV A,B
ADDC A,#01H
MOV R1,A

```

```

GENER2: DJNZ R4,GENER2
DJNZ R1,GENER2
MOV A,OFF
MOVX @DPTR,A
INC R0
MOV A,#8H
MOVX @DPTR,A
MOV A,@R0
MOV B,#03H
MUL AB
ADD A,#0FFH
MOV R4,A
MOV A,B
ADDC A,#01H
MOV R1,A

```

```

GENER3: DJNZ R4,GENER3
DJNZ R1,GENER3
MOV A,OFF
MOVX @DPTR,A
INC R0
MOV A,#10H
MOVX @DPTR,A
MOV A,@R0
MOV B,#03H
MUL AB
ADD A,#0FFH
MOV R4,A
MOV A,B
ADDC A,#01H
MOV R1,A

```

```

GENER4: DJNZ R4,GENER4
DJNZ R1,GENER4
MOV A,OFF
MOVX @DPTR,A
INC R0
MOV A,#20H
MOVX @DPTR,A
MOV A,@R0
MOV B,#03H
MUL AB
ADD A,#0FFH

```

```

MOV R4,A
MOV A,B
ADDC A,#01H
MOV R1,A

```

```

GENER5: DJNZ R4,GENER5
DJNZ R1,GENER5
MOV A,OFF
MOVX @DPTR,A
INC R0
MOV A,#40H
MOVX @DPTR,A
MOV A,@R0
MOV B,#03H
MUL AB
ADD A,#0FFH
MOV R4,A
MOV A,B
ADDC A,#01H
MOV R1,A

```

```

GENER6: DJNZ R4,GENER6
DJNZ R1,GENER6
MOV A,OFF
MOVX @DPTR,A
INC R0
MOV A,#80H
MOVX @DPTR,A
MOV A,@R0
MOV B,#03H
MUL AB
ADD A,#0FFH
MOV R4,A
MOV A,B
ADDC A,#01H
MOV R1,A

```

```

GENER7: DJNZ R4,GENER7
DJNZ R1,GENER7
MOV A,OFF
MOVX @DPTR,A
MOV DPTR,#0E000H
INC R0
MOV A,#1H
MOVX @DPTR,A
MOV A,@R0
MOV B,#03H
MUL AB
ADD A,#0FFH
MOV R4,A

```

```
MOV A,B
ADDC A,#01H
MOV R1,A
```

```
GENER8: DJNZ R4,GENER8
        DJNZ R1,GENER8
        MOV A,#0H
        MOVX @DPTR,A
        INC R0
        MOV A,#2H
        MOVX @DPTR,A
        MOV A,@R0
        MOV B,#03H
        MUL AB
        ADD A,#0FFH
        MOV R4,A
        MOV A,B
        ADDC A,#01H
        MOV R1,A
```

```
GENER9: DJNZ R4,GENER9
        DJNZ R1,GENER9
        MOV A,#0H
        MOVX @DPTR,A
        INC R0
        MOV A,#4H
        MOVX @DPTR,A
        MOV A,@R0
        MOV B,#03H
        MUL AB
        ADD A,#0FFH
        MOV R4,A
        MOV A,B
        ADDC A,#01H
        MOV R1,A
```

```
GENER10:DJNZ R4,GENER10
        DJNZ R1,GENER10
        MOV A,#0H
        MOVX @DPTR,A
```

```
RET
```

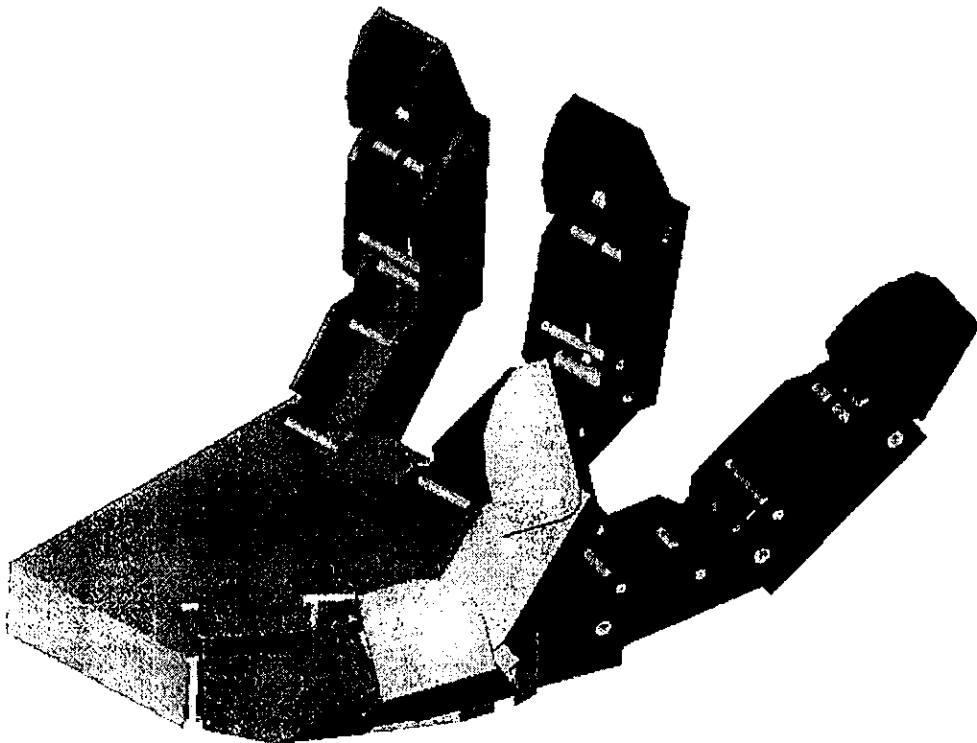
```
END 0000H
```

# Apéndice D

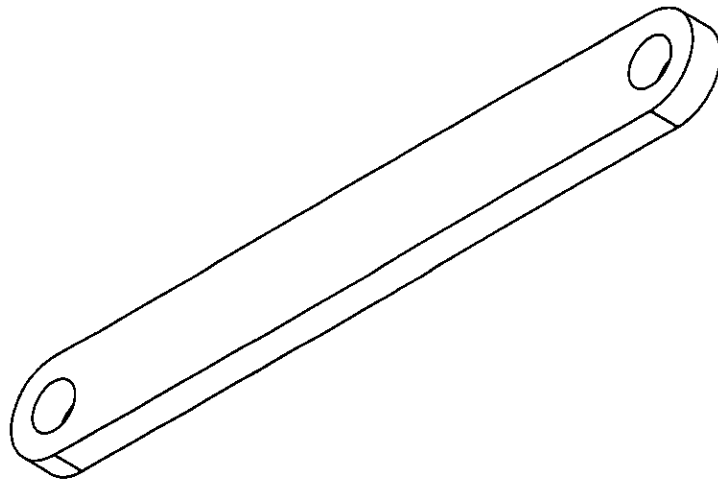
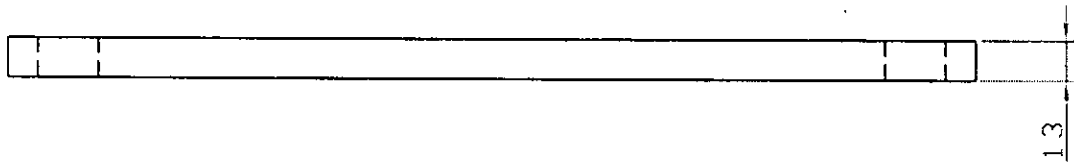
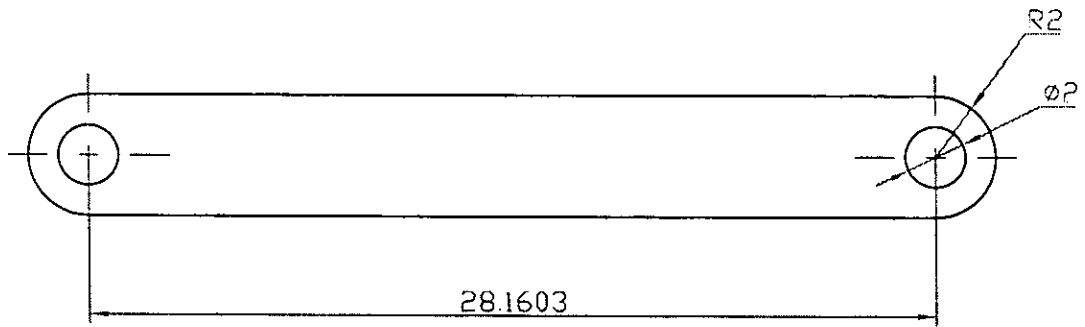
## DIAGRAMAS Y PLANOS DEL MANIPULADOR


Los diagramas mostrados a continuación fueron realizados en AutoCAD R14 y muestran los elementos mecánicos de los que se compone el manipulador, así como algunas de sus diferentes vistas, acotaciones, escalas, indicaciones y modos de ensamble. Se muestran también algunos códigos de programación empleados para el maquinado de algunos de estos elementos en máquinas de control numérico (CNC).

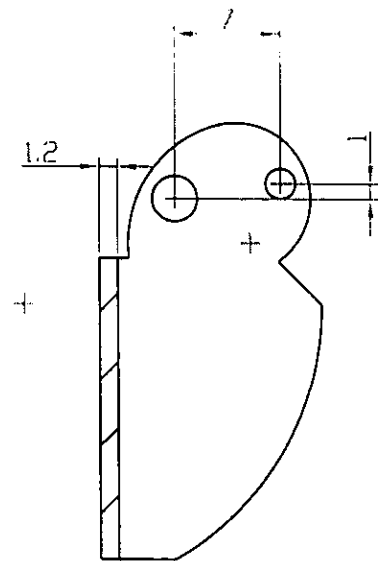
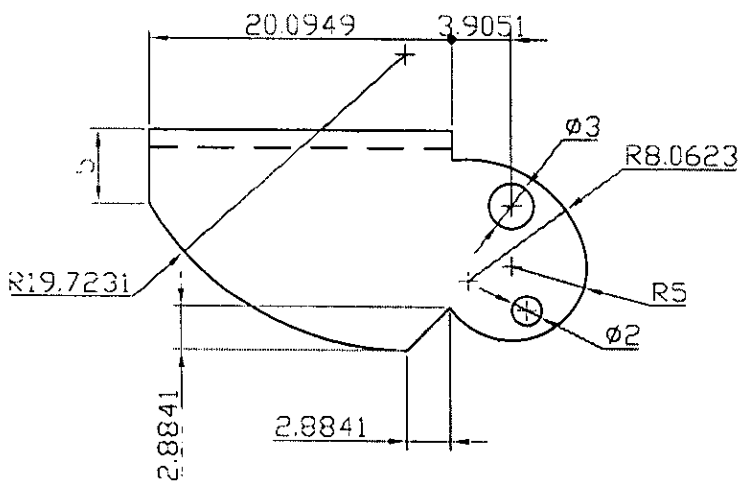
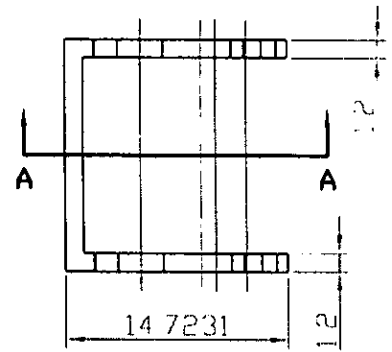
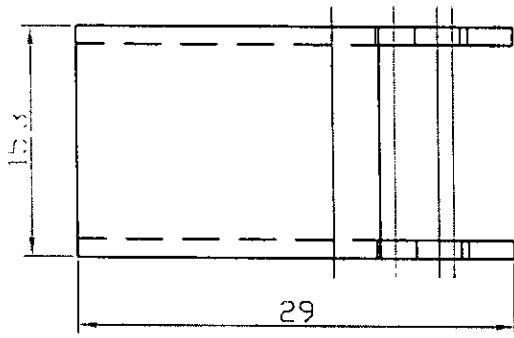
Cabe aclarar que en los diversos pies de plano, las iniciales **EFAR** corresponden a *Enrique Fernando Aguilar Romero*, **GLB** corresponden a *Germán López Bátiz* y las iniciales **E y G** corresponden a *Enrique y Germán*. En estas últimas, se muestra el hecho de que en las diversas piezas mostradas en esos dibujos, la participación de ambas personas, ya sea en el diseño o dibujo, se vio entrelazada y compartida.



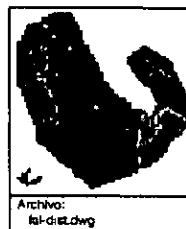
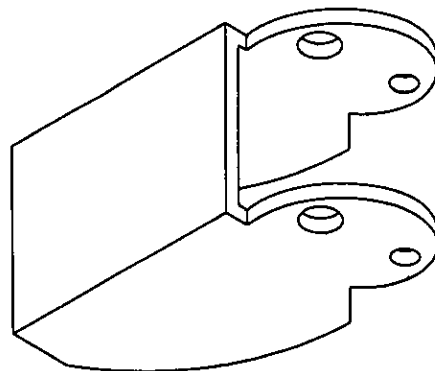




	Manipulador Antropomórfico Teleoperado II		
	Barra acopladora		
Material: aluminio	Diseño: EFAR		
Cant. 3	Acot: mm	Dibujó: GLB	
Fecha: 20/06/01	Esc: 4:1	Dibujo No. 1	
Archivo: acopladora.dwg			



SECCION A-A



Archivo:  
fal-dist.dwg

Manipulador Antropomórfico Teleoperado II

Falange distal

Material: aluminio

Diseño: EFAR

Cant. 3

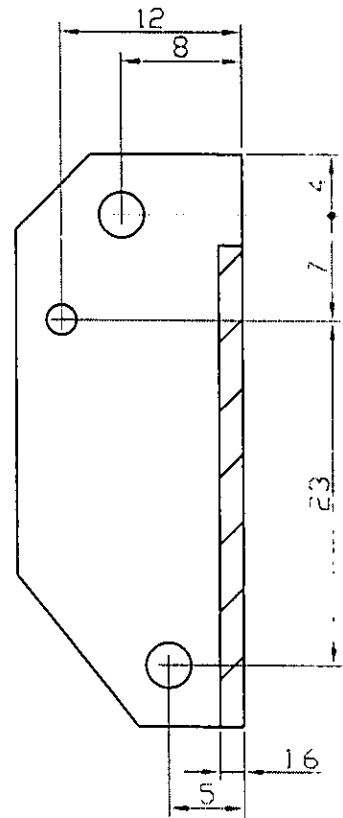
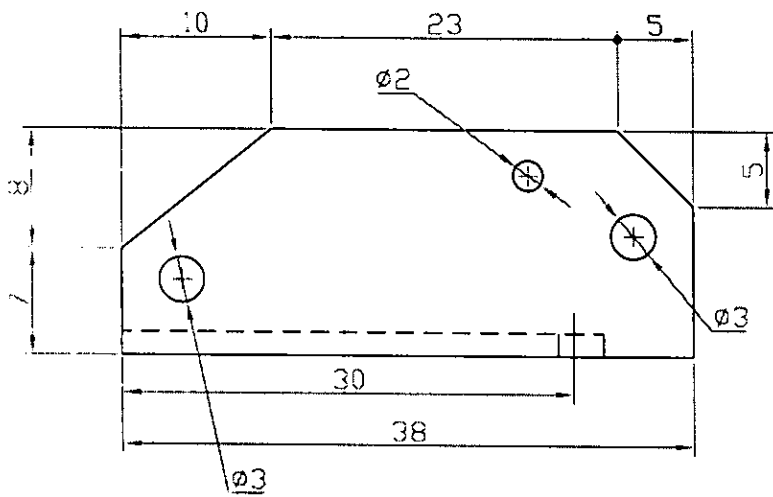
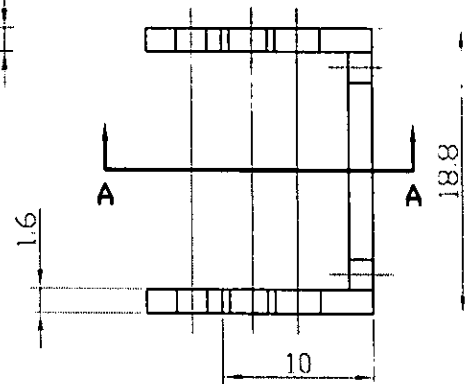
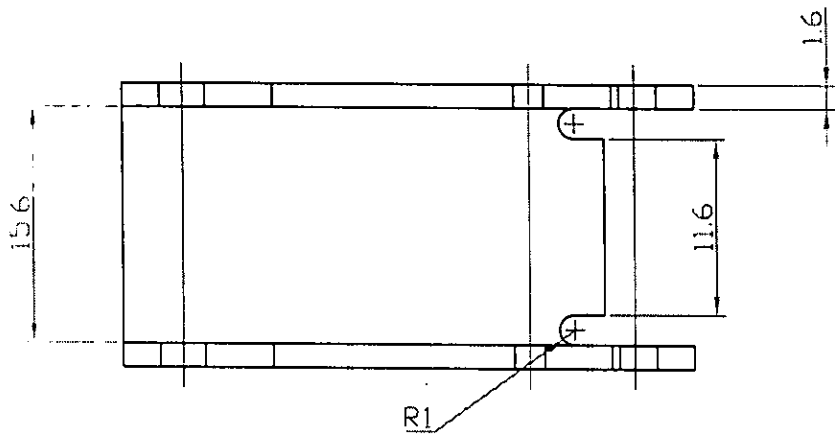
Acot: mm

Dibujó: GLB

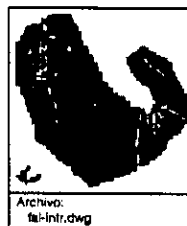
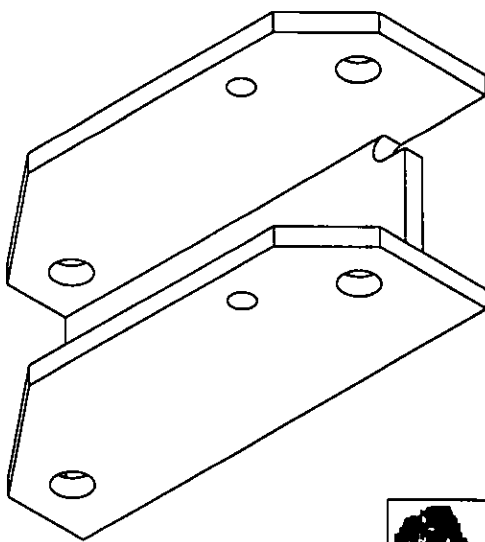
Fecha: 21/06/01

Esc: 2:1

Dibujo No. 2

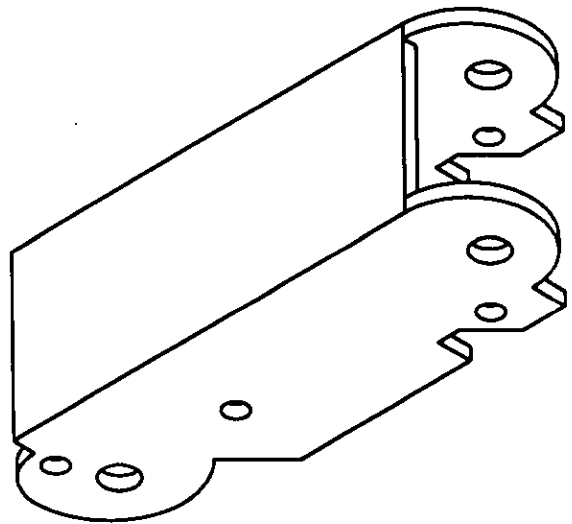
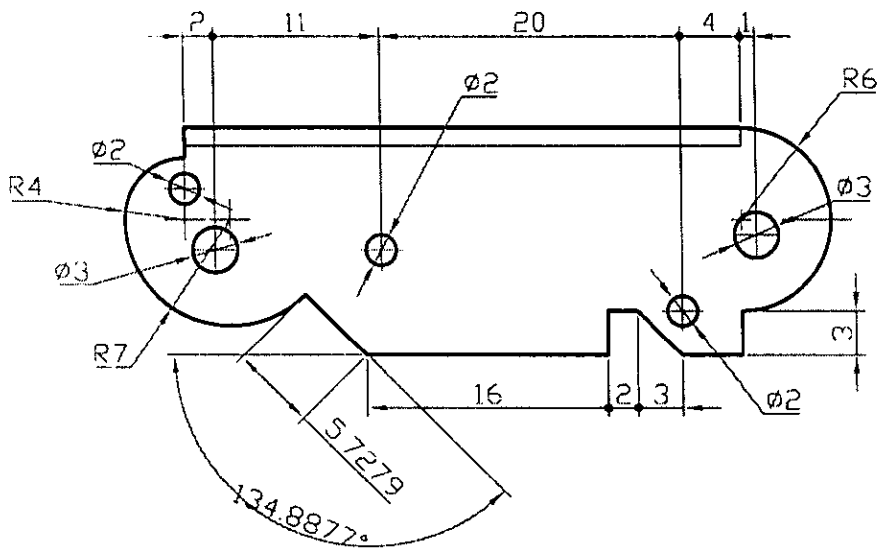
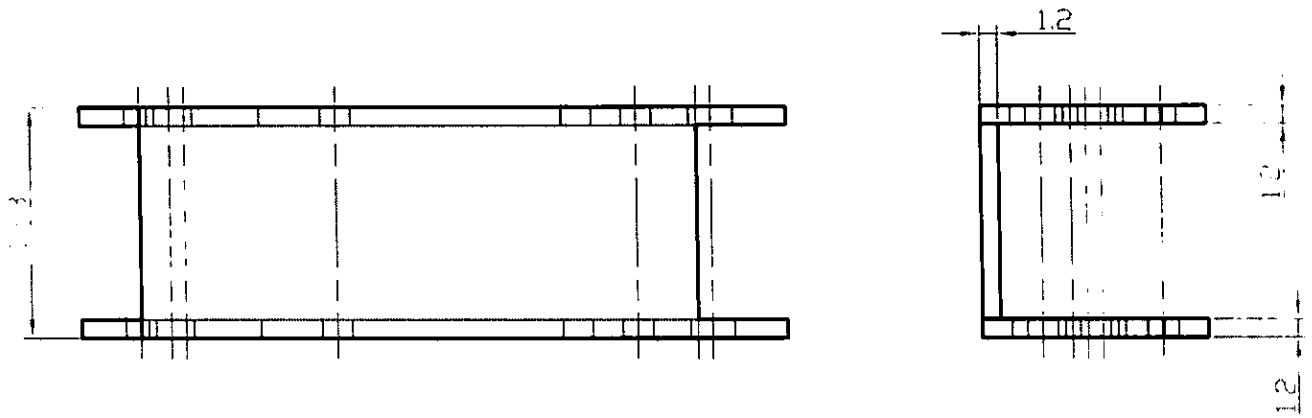



SECCION A-A

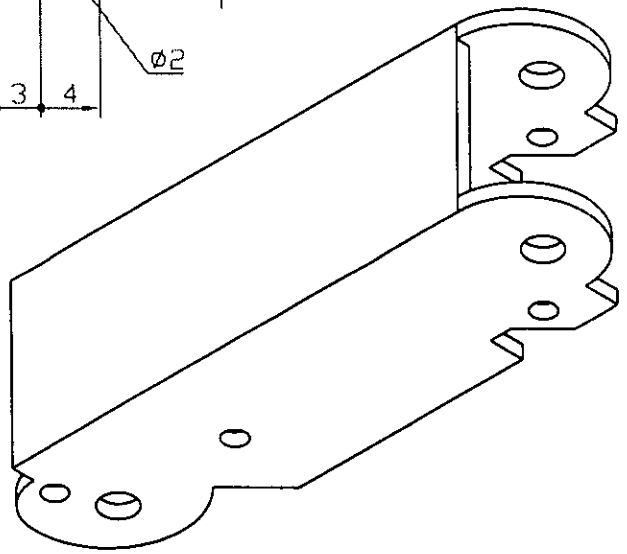
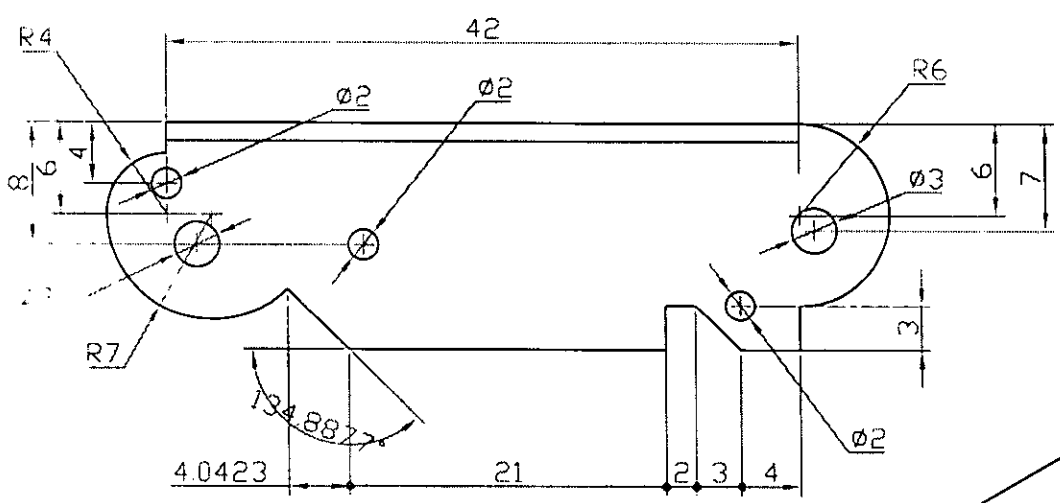
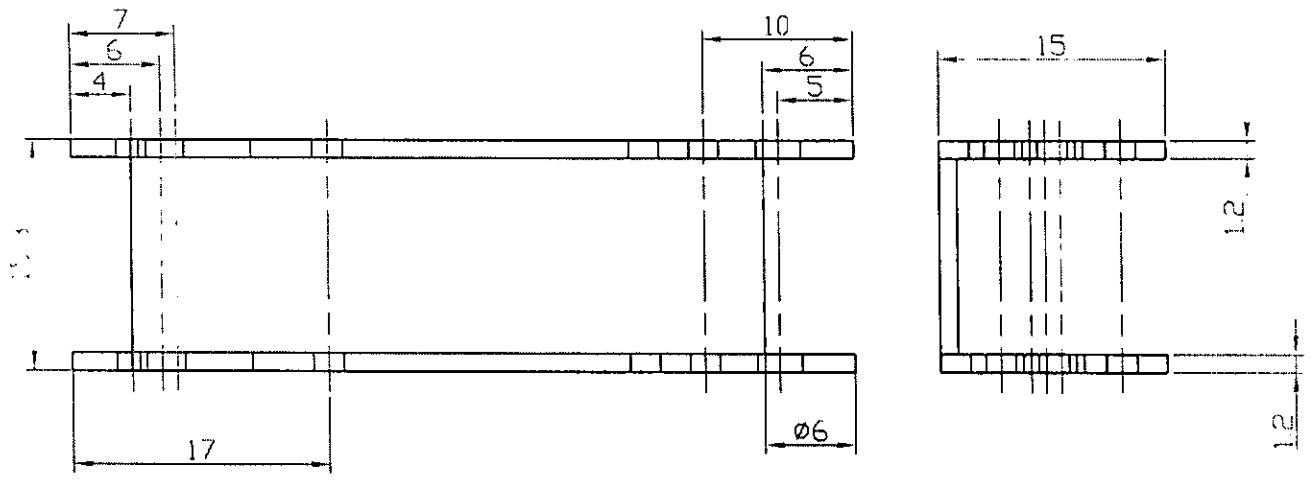



Manipulador Antropomórfico Teleoperado II		
Falange medial		
Material: aluminio	Diseño: EFAR	
Cant. 3	Acot: mm	Dibujó: GLB
Fecha: 21/06/01	Esc: 2:1	Dibujo No. 3

Archivo: fa-Intr.dwg

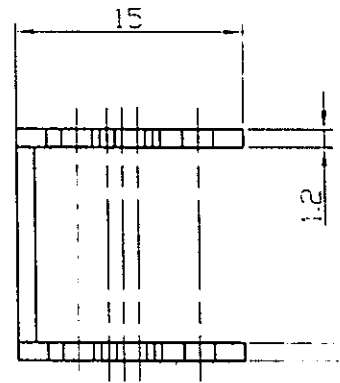
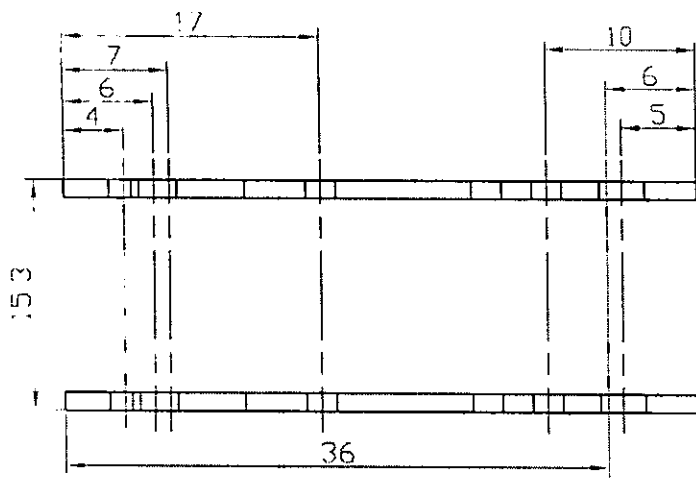


	Manipulador Antropomórfico Teleoperado II		
	Anular - proximal		
Material: aluminio	Diseño: EFAR		
Cant. 1	Acot: mm	Dibujó: GLB	
Fecha: 20/06/01	Esc: 2:1	Dibujo No. 4	
Archivo: anu-prox.dwg			

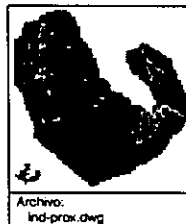
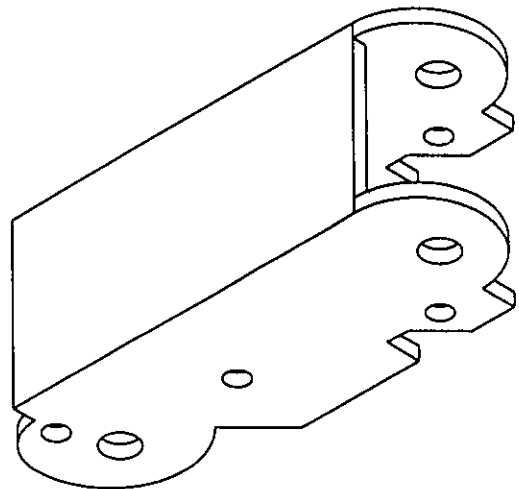
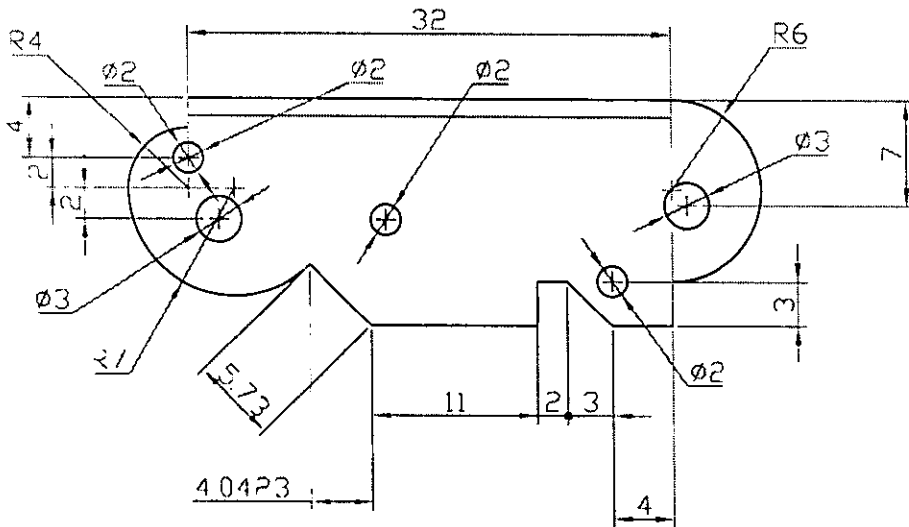


	Manipulador Antropomórfico Teleoperado II		
	Medio - proximal		
	Material: aluminio		Diseño: EFAR
	Cant. 1	Acot: mm	Dibujó: GLB
	Fecha: 21/06/01	Esc: 2:1	Dibujo No. 5

Archivo:  
med-prax.dwg



1:2

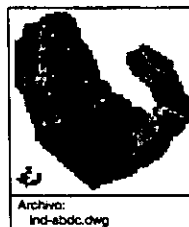
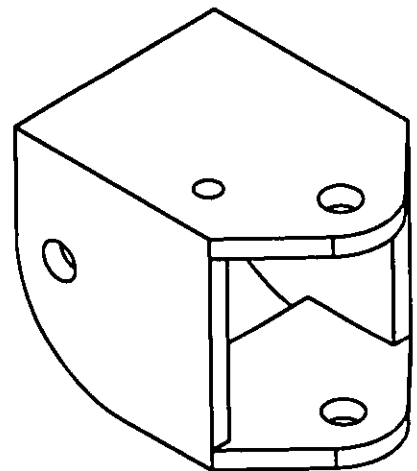
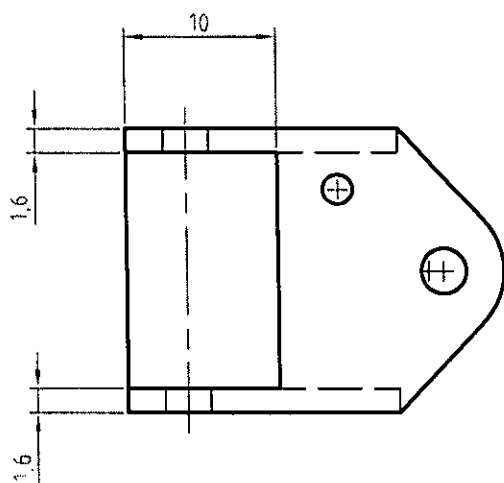
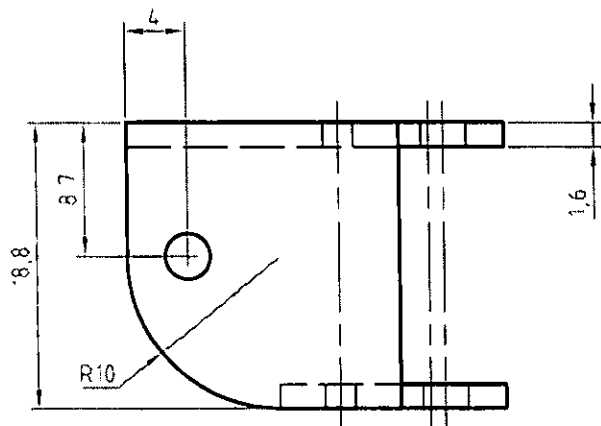
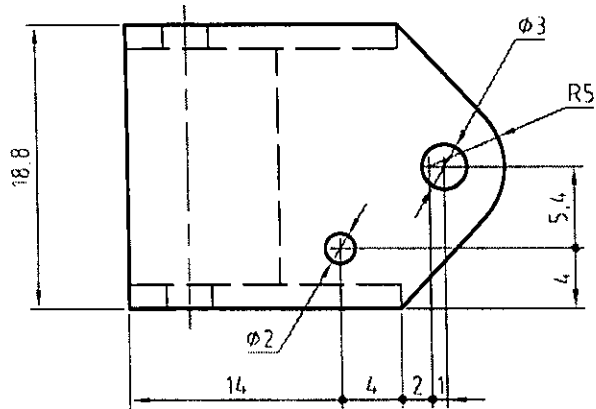


Archivo:  
Ind-prox.dwg

Manipulador Antropomórfico Teleoperado II

Indice - proximal

Material: aluminio	Diseño: EFAR	
Cant. 1	Acot: mm	Dibujó: GLB
Fecha: 21/06/01	Esc: 2:1	Dibujo No. 6



Archivo:  
ind-abdc.dwg

Manipulador Antropomórfico Teleoperado II

Abductor del índice

Material: aluminio

Diseño: EFAR

Cant. 1

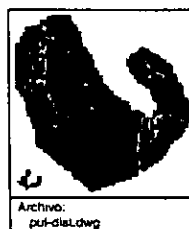
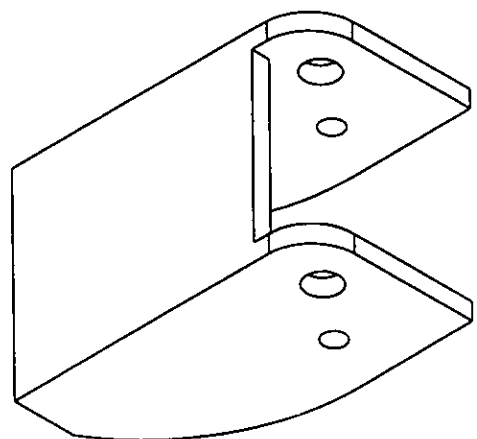
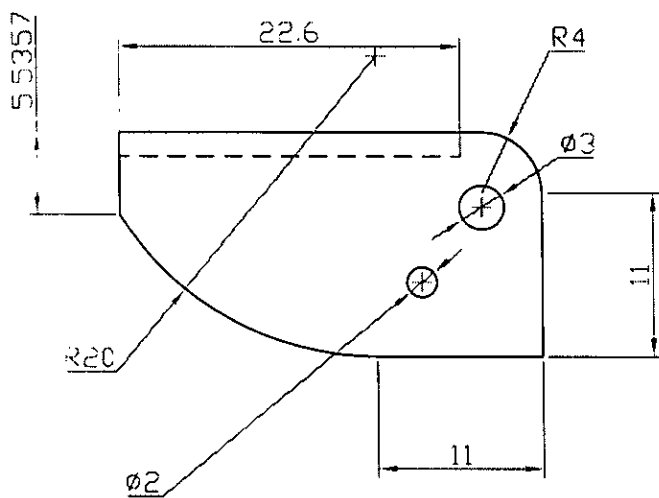
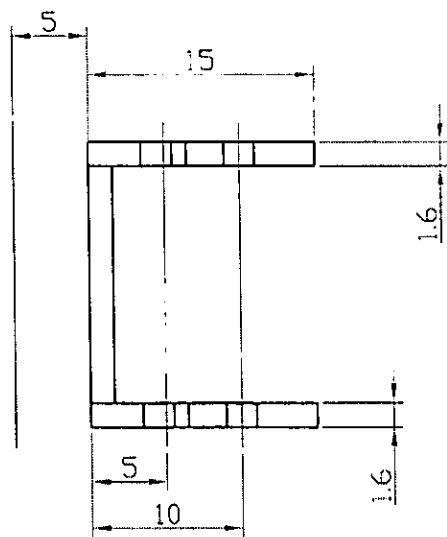
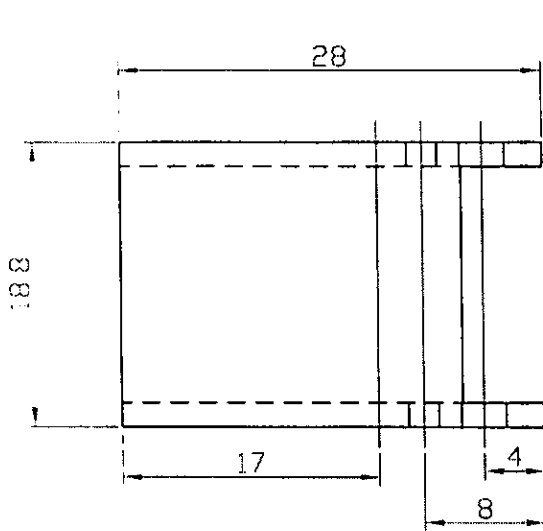
Acot: mm

Dibujó: GLB

Fecha: 20/06/01

Esc: 2:1

Dibujo No. 7



Manipulador Antropomórfico Teleoperado II

Pulgar - distal

Material: aluminio

Diseño: EFAR

Cant. 1

Acot: mm

Dibujó: GLB

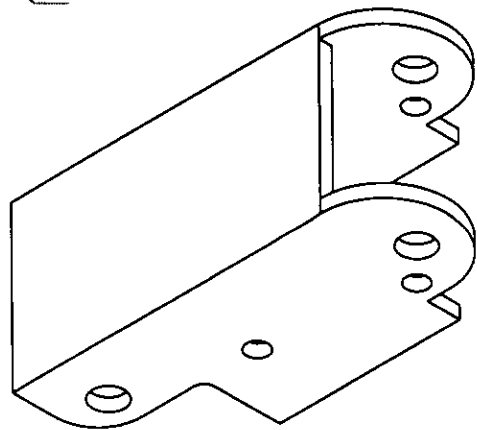
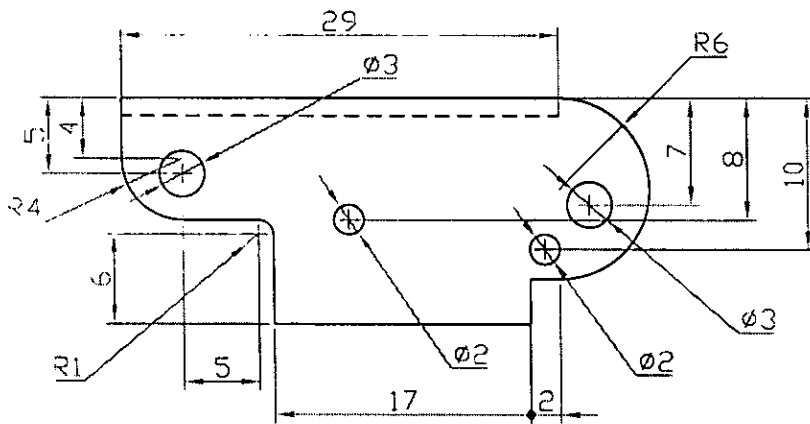
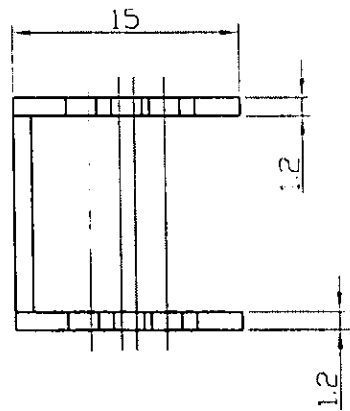
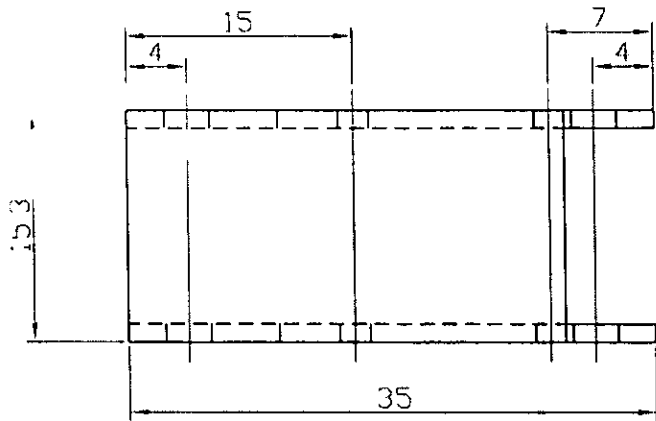
Fecha: 21/06/01


Esc: 2:1

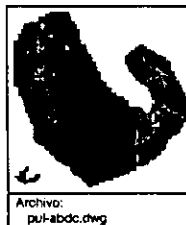
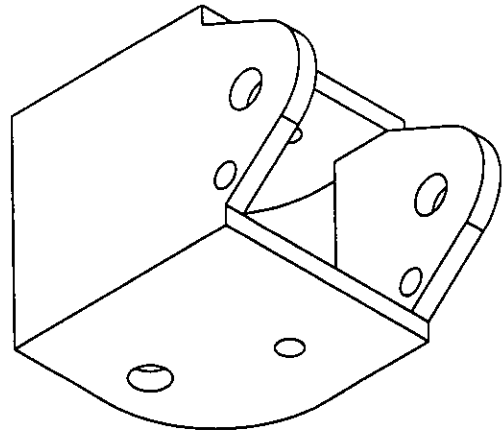
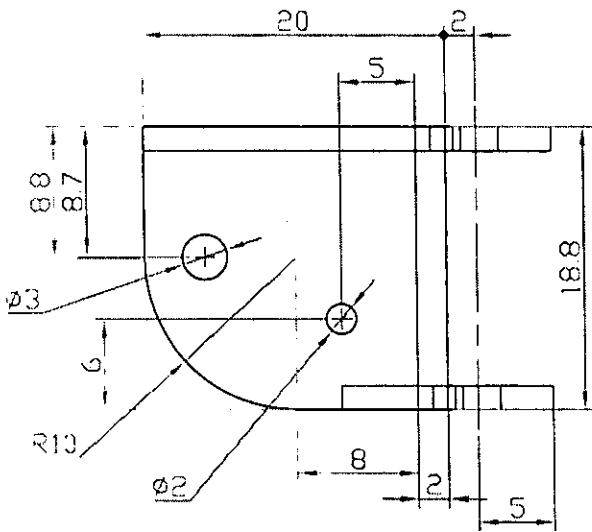
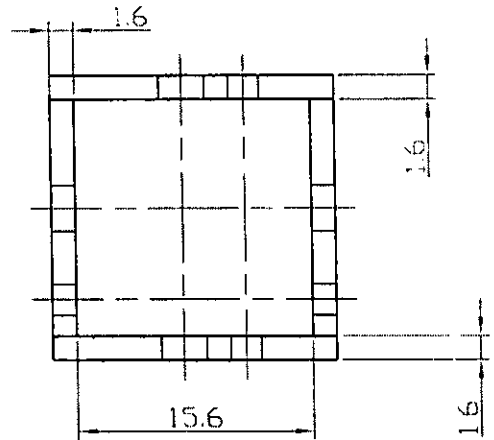
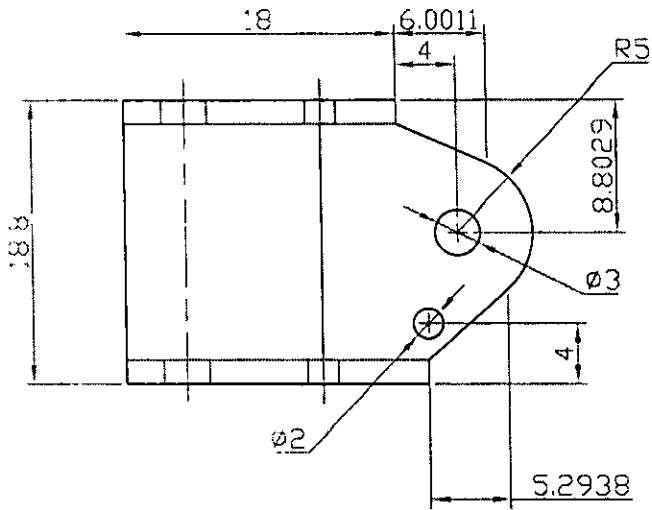
Dibujo No. 8

Archivo:  
pul-distal.dwg





	Manipulador Antropomórfico Teleoperado II		
	Pulgar - proximal		
	Material: aluminio	Diseño: EFAR	
	Cant. 1	Acot: mm	Dibujó: GLB
Archivo: pul-prox.dwg	Fecha: 21/06/01	Esc: 2:1	Dibujo No. 9



Manipulador Antropomórfico Teleoperado II

Abductor del pulgar

Material: aluminio

Diseño: EFAR

Cant. 1

Acot: mm

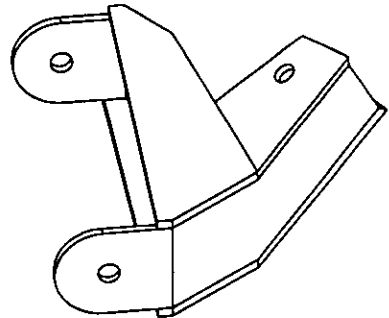
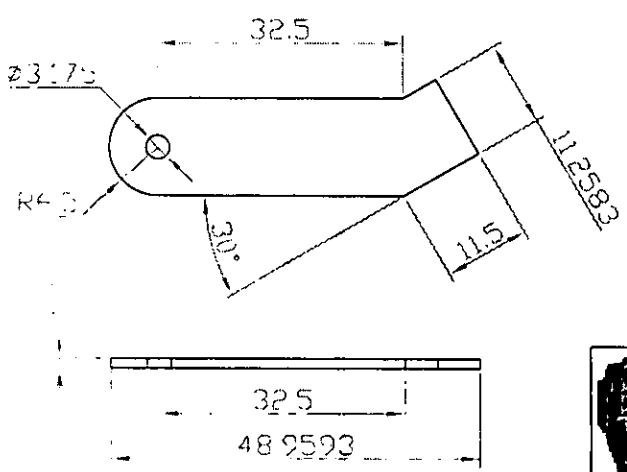
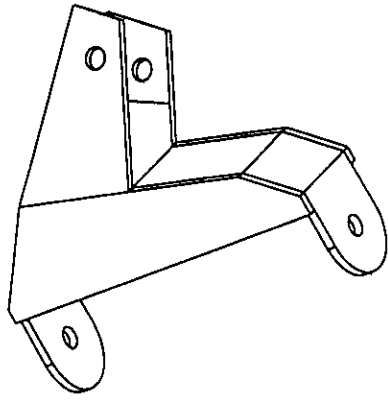
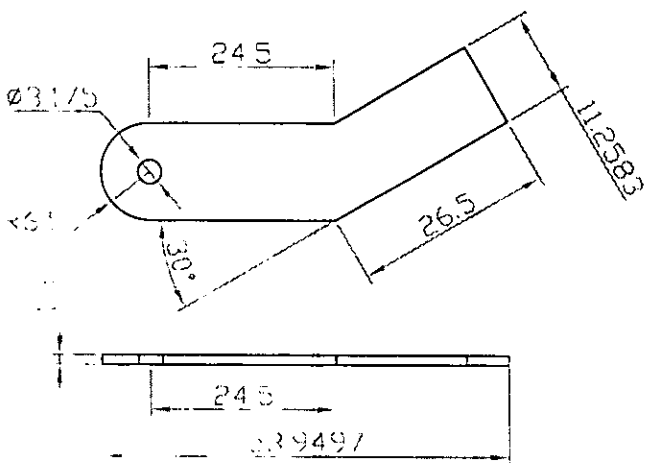
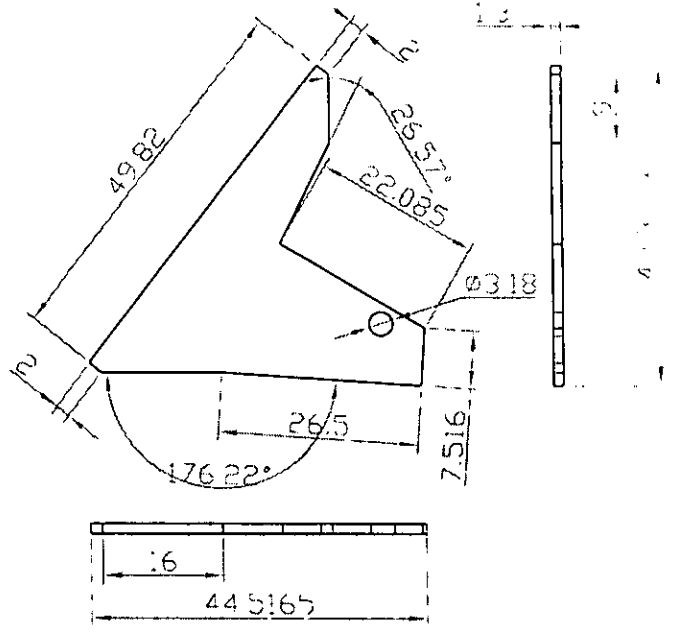
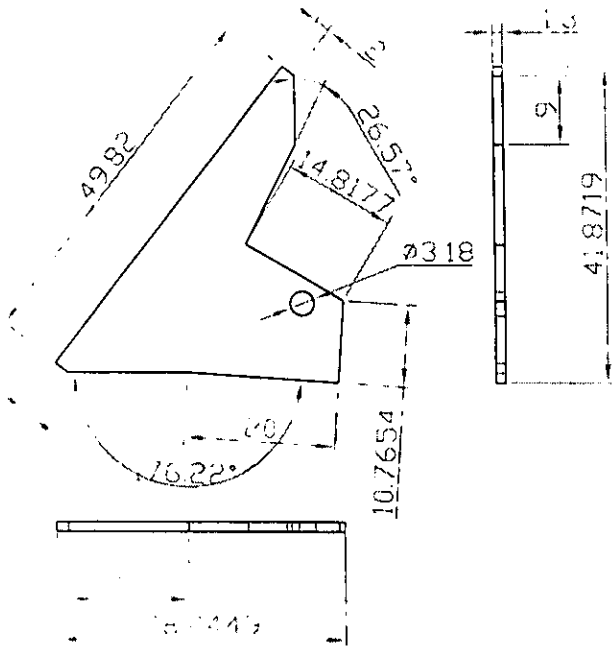
Dibujó: GLB


Fecha: 21/06/01

Esc: 2:1

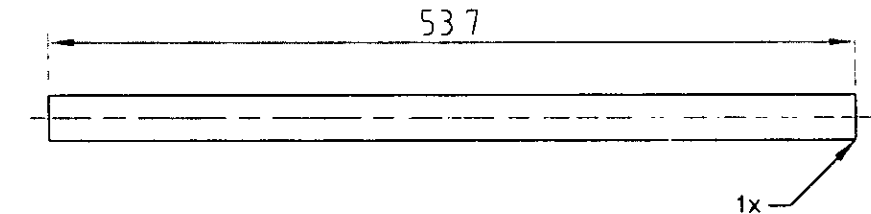
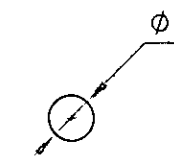
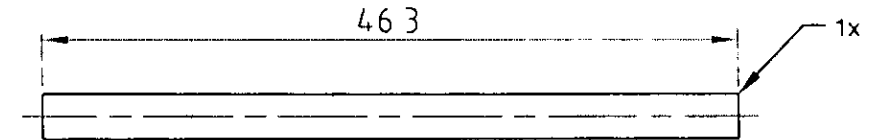
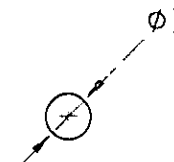
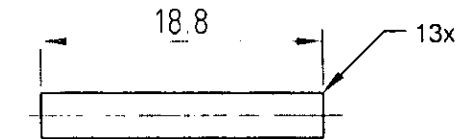
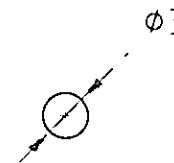
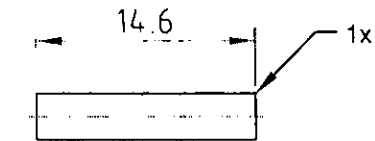
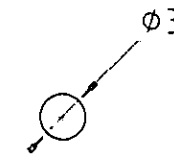
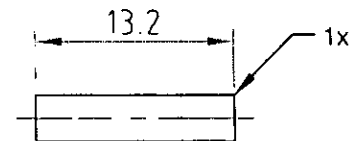
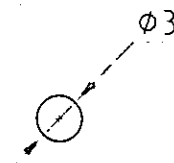
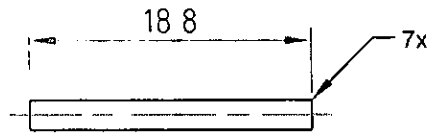
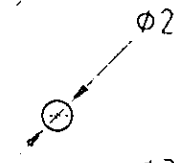
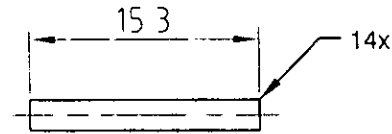
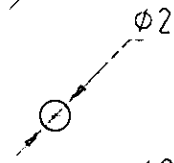
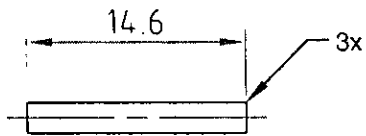
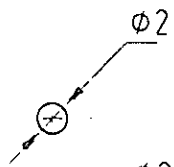
Dibujo No. 10

Archivo:  
pu-abdc.dwg



	Manipulador Antropomórfico Teleoperado II	
	Pulgar - Metacarpo	
Material: aluminio	Diseño: EFAR	
Cant. 1	Acot: mm	Dibujó: GLB
Fecha: 24/09/01	Esc: 1:1	Dibujo No. 11

Archivo: pulg\_0.dwg



Manipulador Antropomórfico Teleoperado II

Ejes de rotación y reorientación

Material: acero

Diseño: E y G

Cant.

Acot: mm

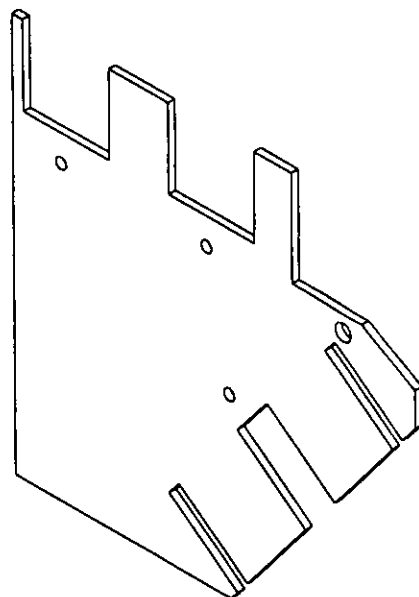
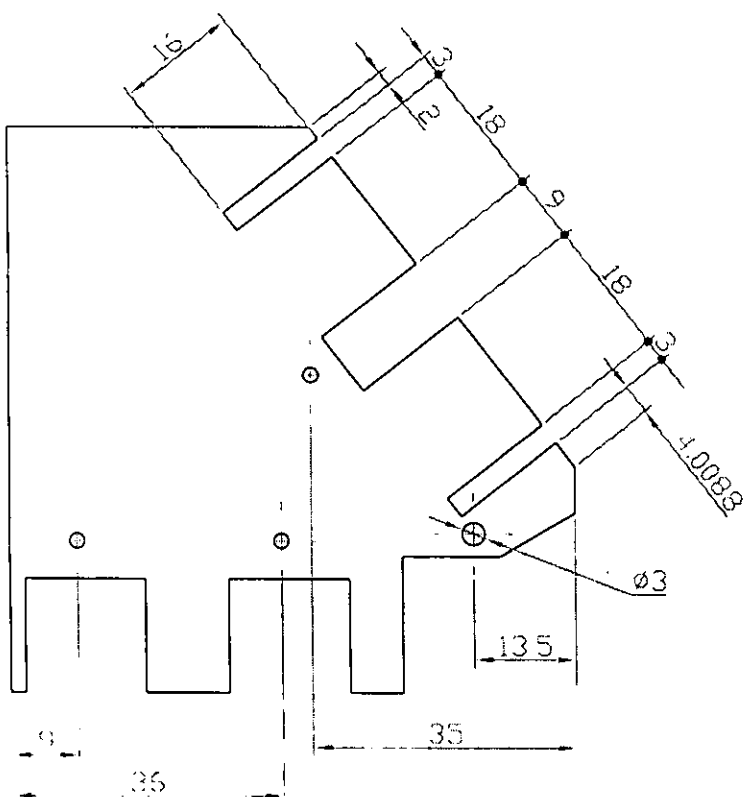
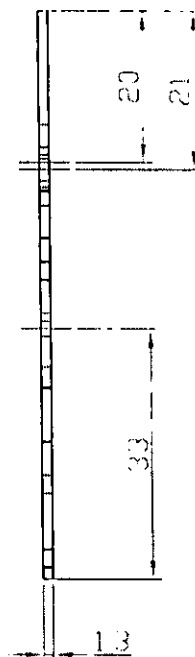
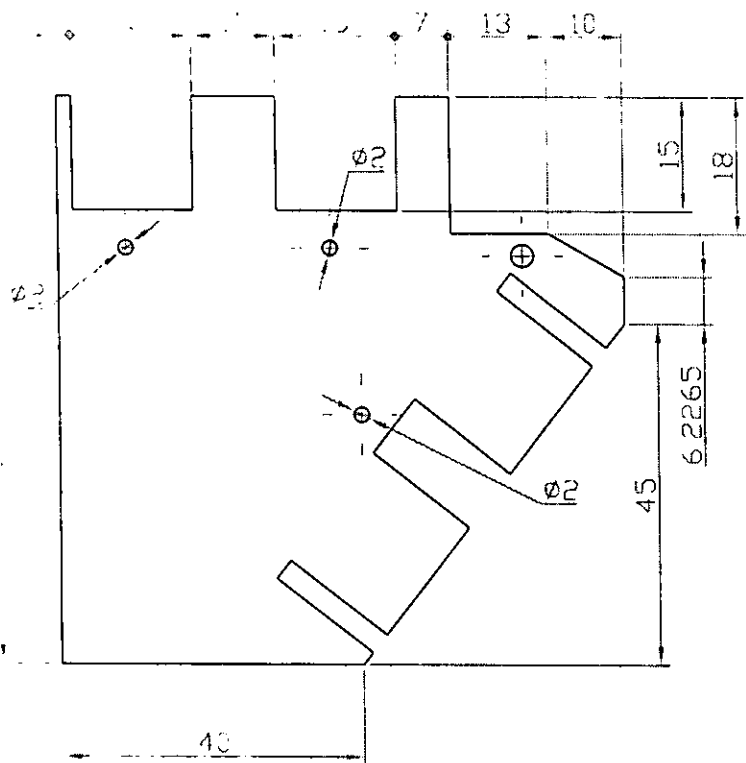
Dibujó: E y G

Fecha: 21/06/01

Esc: 2:1

Dibujo No. 12

Archivo:  
ejes.dwg

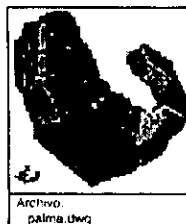
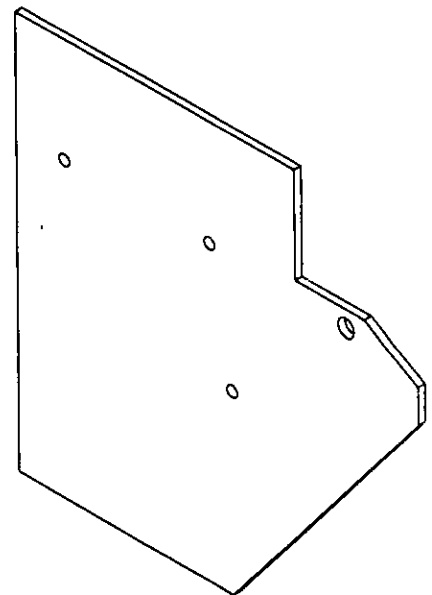
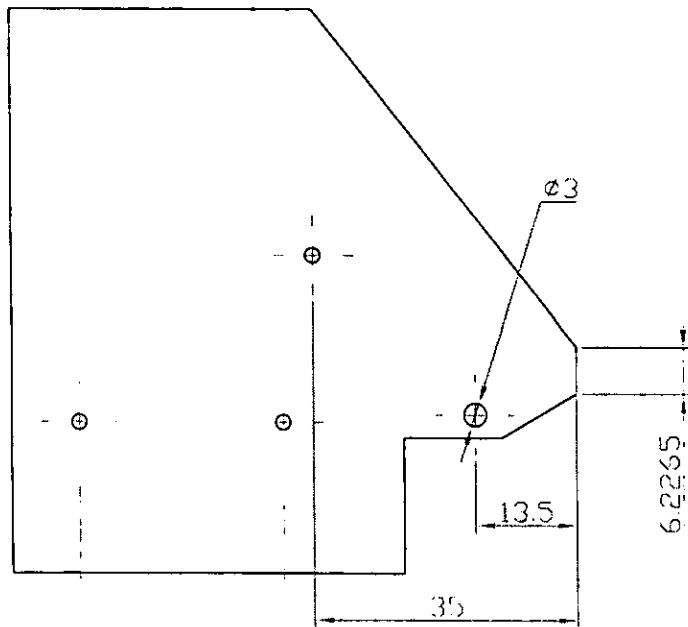
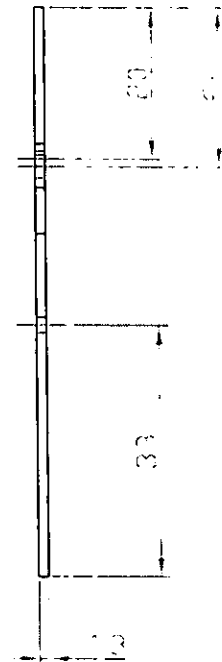
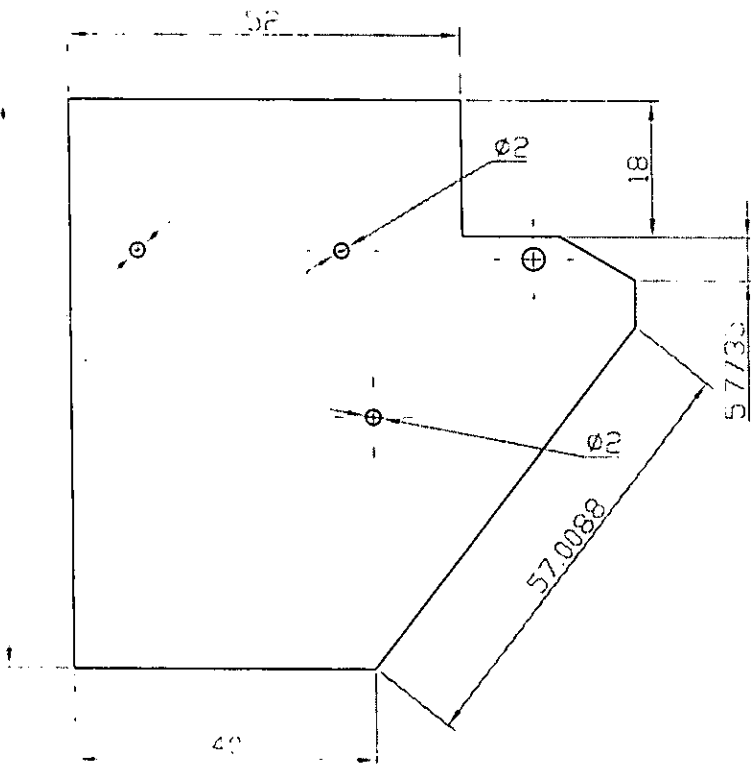


Manipulador Antropomórfico Teleoperado II

Palma - cara anterior

Material: aluminio	Diseño: EFAR
Cant. 1	Acot: mm
Fecha: 25/06/01	Esc: 1:1
	Dibujo No. 13

Archivo palma.dwg

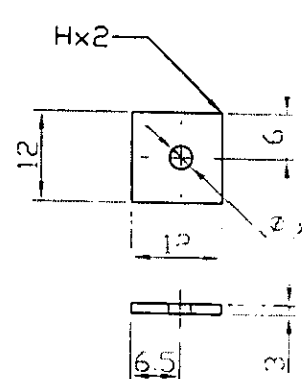
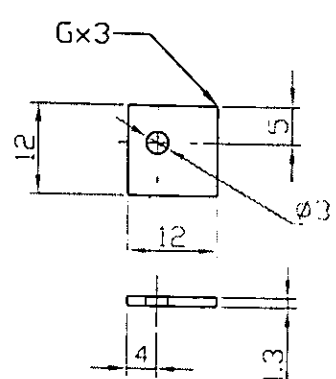
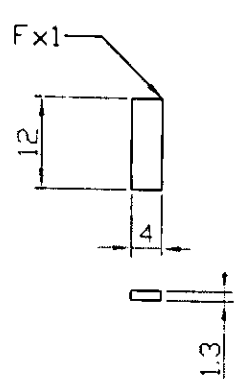
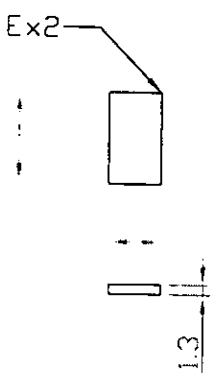
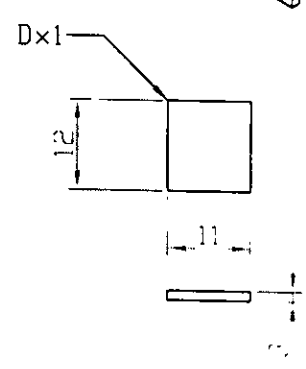
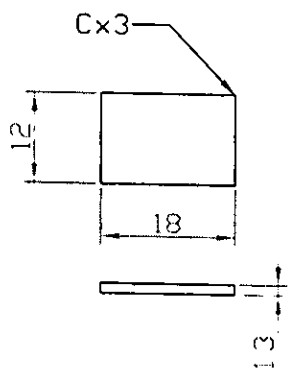
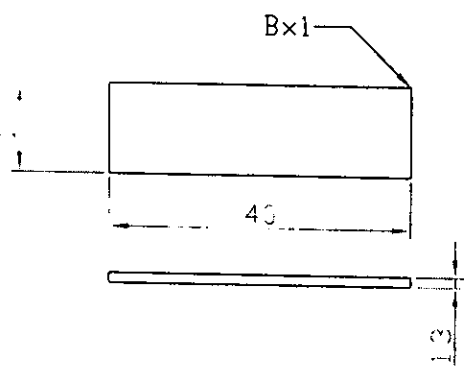
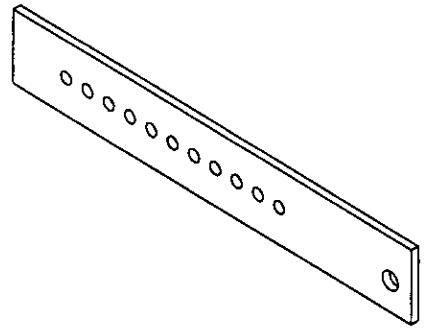
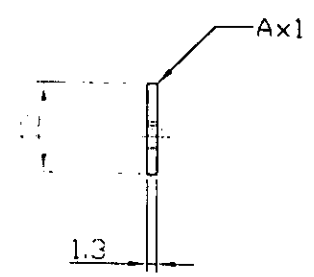
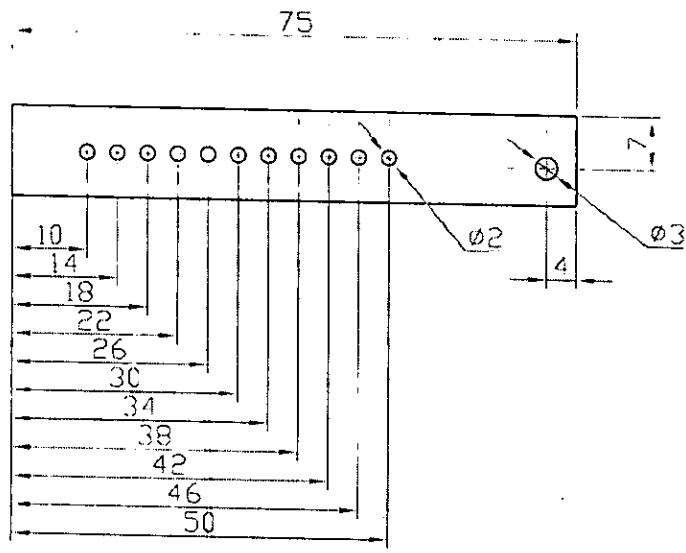


Archivo:  
palma.dwg

Manipulador Antropomórfico Teleoperado II

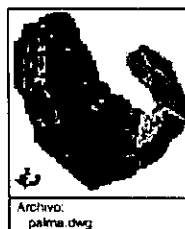
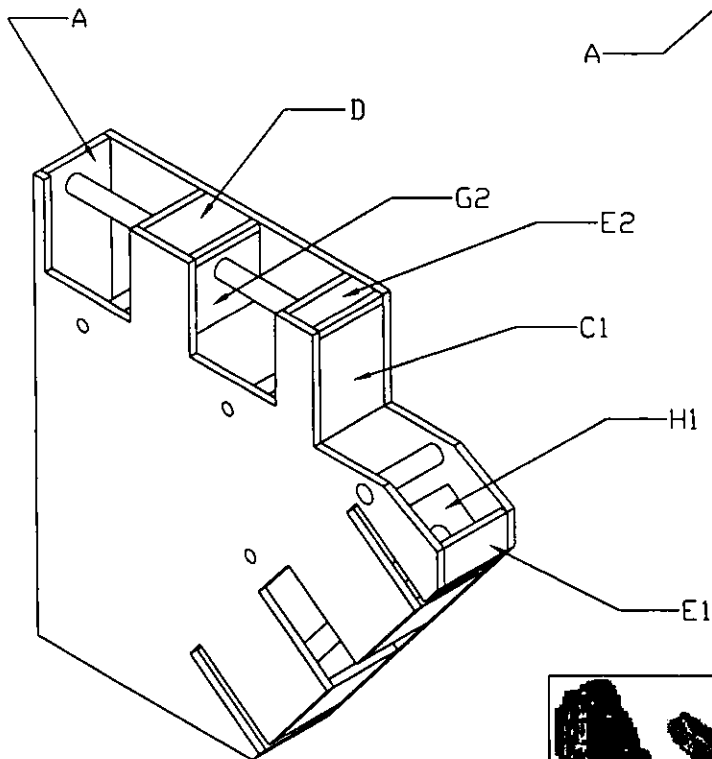
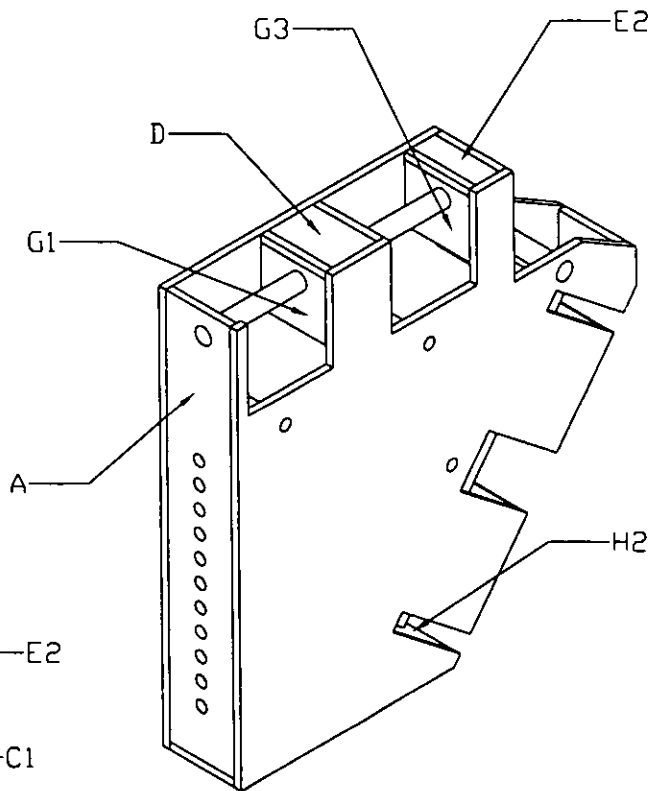
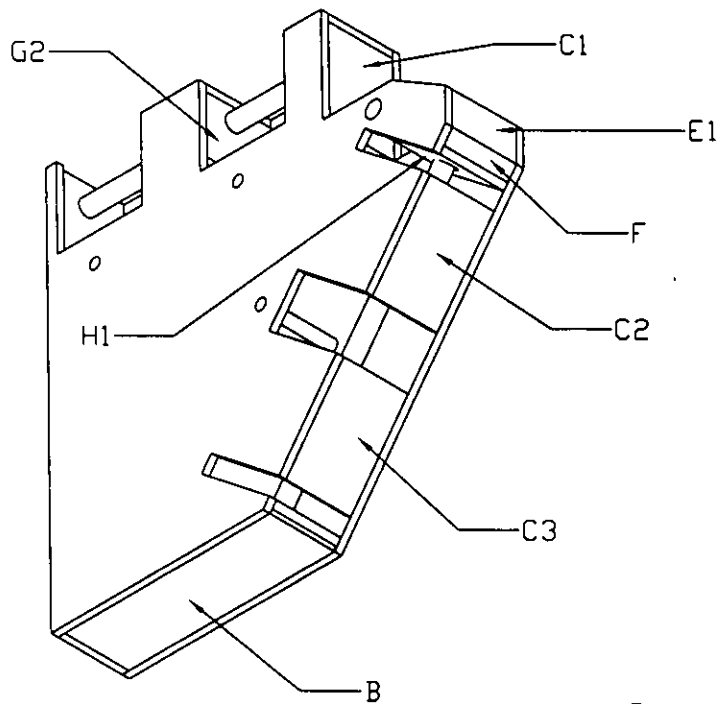
Palma - cara posterior

Material: aluminio	Diseño: EFAR	
Cant. 1	Acot: mm	Dibujó: EFAR
Fecha: 25/06/01	Esc: 1:1	Dibujo No. 14



Archivo: palma.dwg

Manipulador Antropomórfico Teleoperado II			
Palma - caras laterales			
Material: aluminio		Diseño: E y G	
Cant.	Acot: mm	Dibujó: E y G	
Fecha: 25/06/01	Esc: 1:1	Dibujo No. 15	



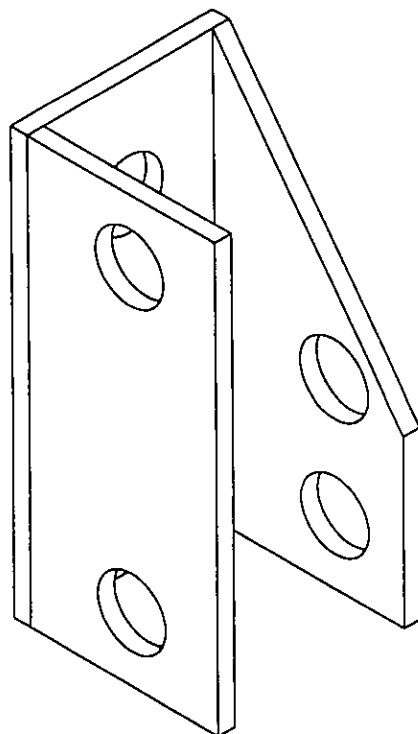
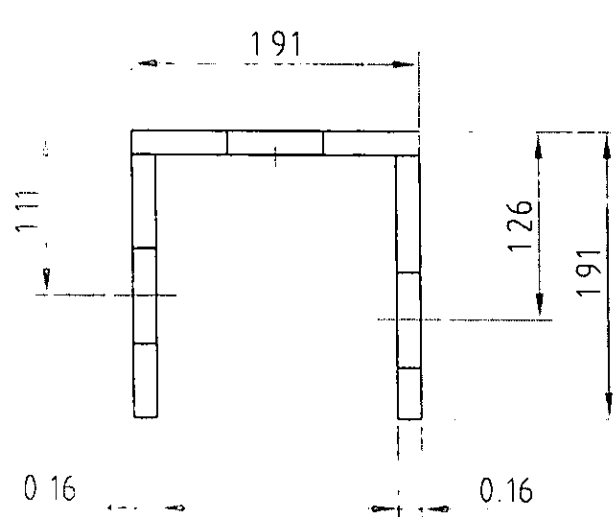
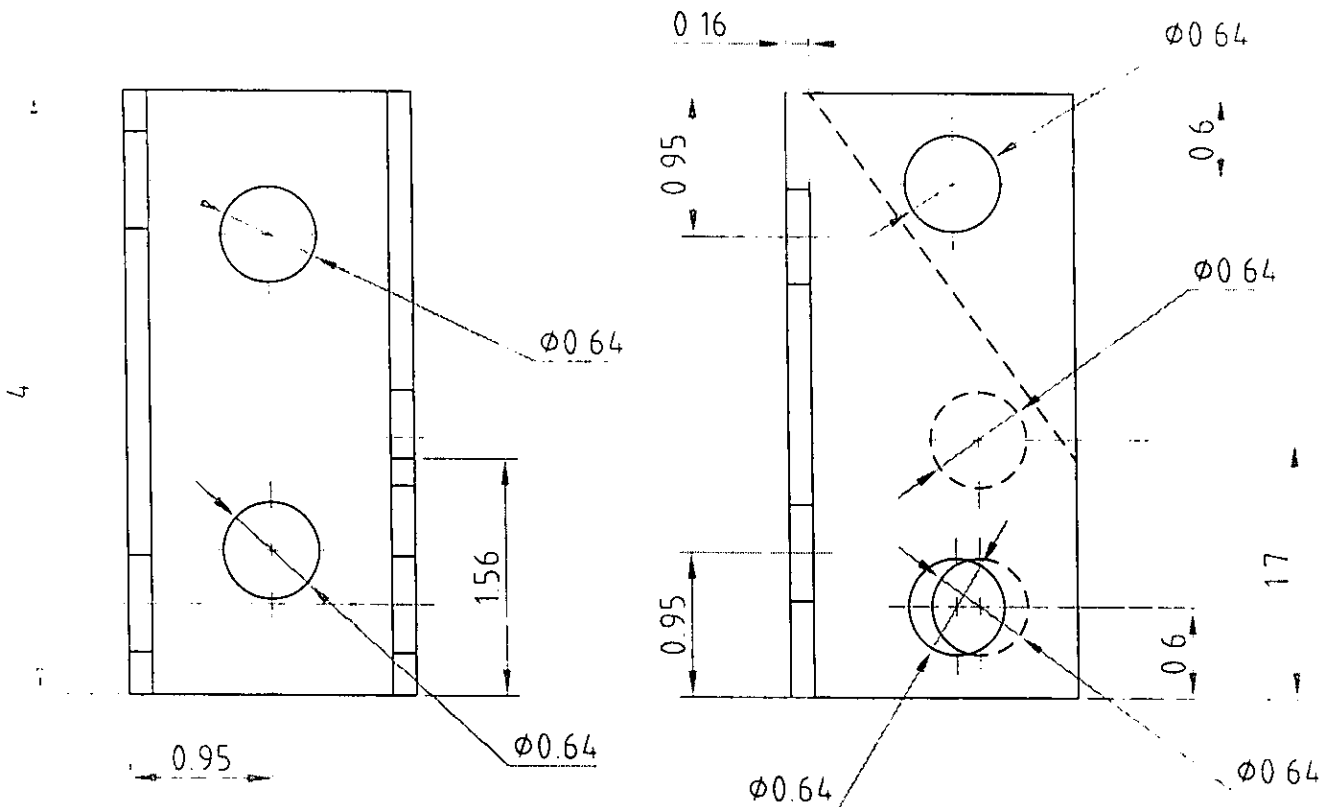
Archivo:  
palma.dwg


Manipulador Antropomórfico Teleoperado II

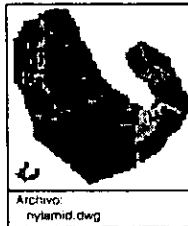
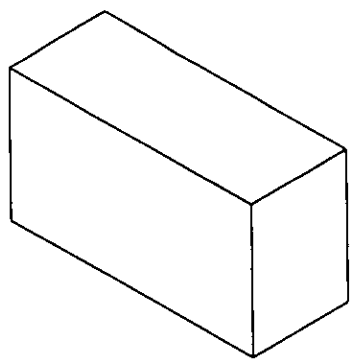
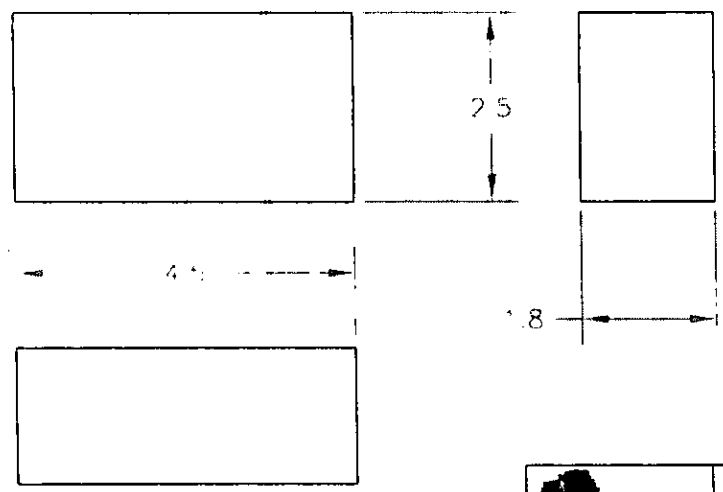
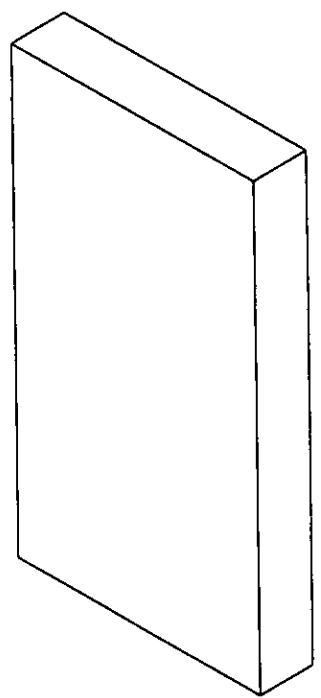
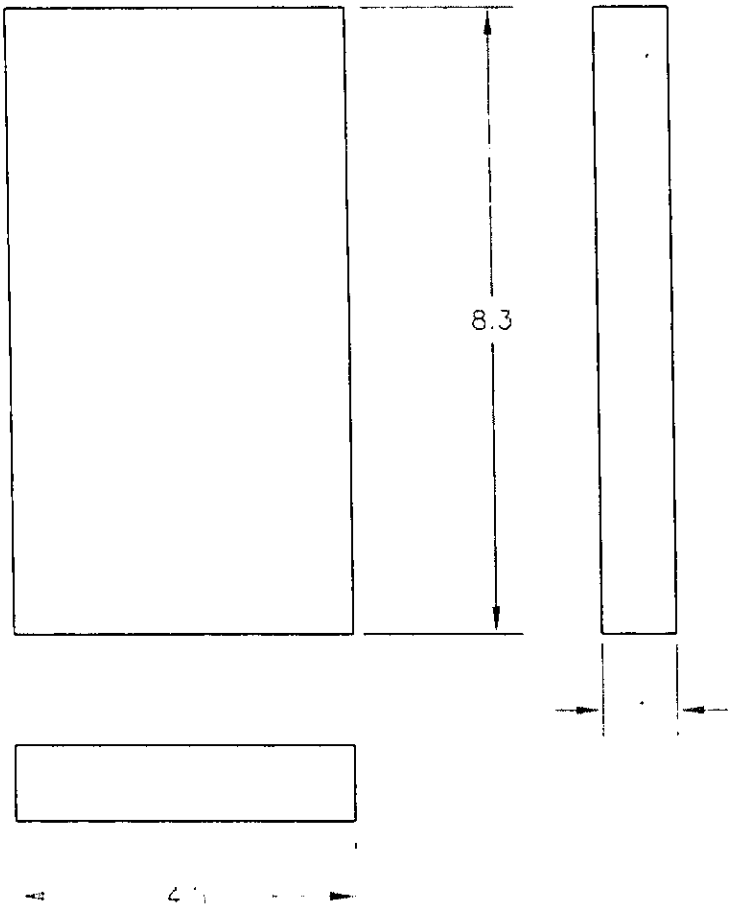
Palma - isométricos

Material: aluminio		Diseño: EFAR
Cant.	Acot: mm	Dibujó: E y G
Fecha: 25/06/01	Esc: 1:1	Dibujo No. 16





	Manipulador Antropomórfico Teleoperado II		
	Soporte para la mano		
Material: aluminio	Cant. 1		Diseño: EFAR
Acot: cm	Fecha: 22/06/01	Esc: 2:1	Dibujó: EFAR
Archivo sop-mano.dwg			Dibujo No. 17

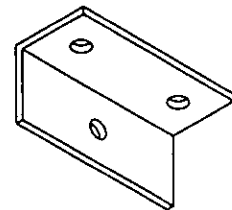
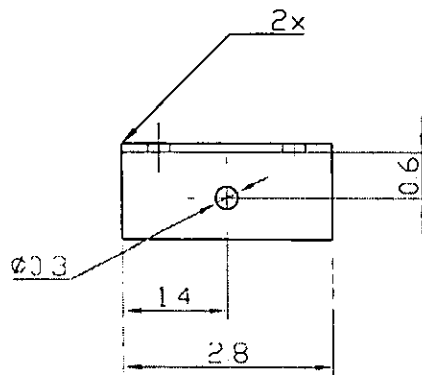
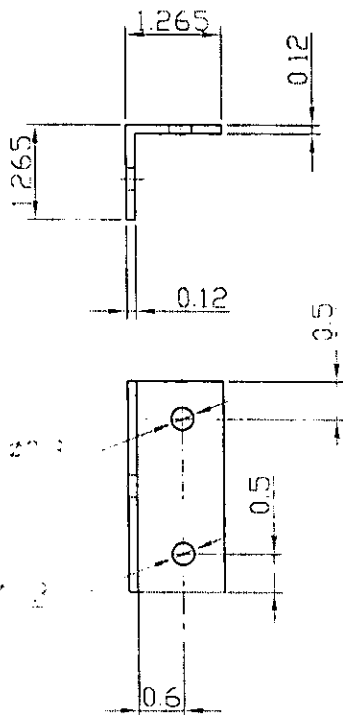
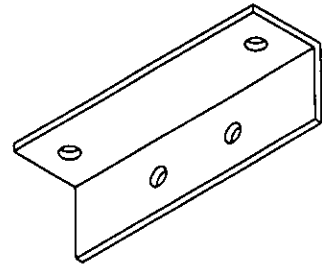
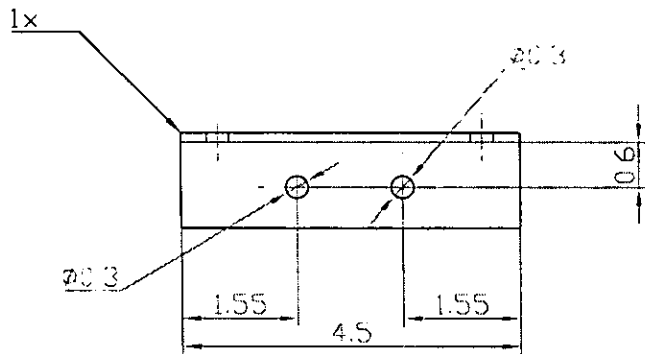
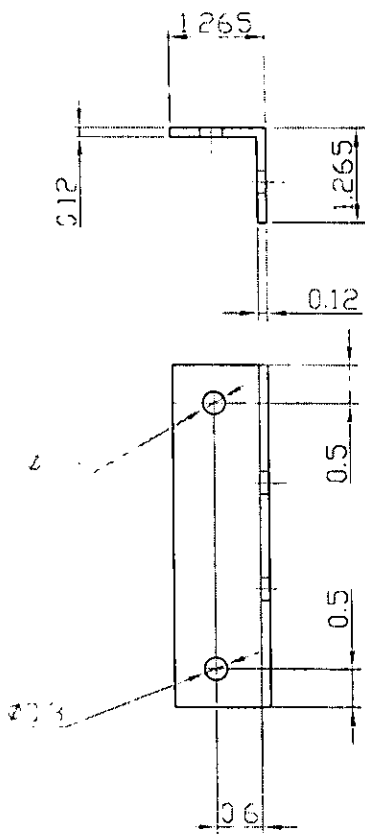


Archivo:  
nylamid.dwg

Manipulador Antropomórfico Teleoperado II

Soportes de nylamid

Material: nylamid (nylon 6/6)	Diseño: EFAR
Cant. 1	Acot: cm
Fecha: 22/06/01	Esc: 1:1
	Dibujo No. 18



Archivo  
nylamide.dwg

Manipulador Antropomórfico Teleoperado II

Perfiles del soporte de la mano

Material: aluminio

Diseño: EFAR

Cant.

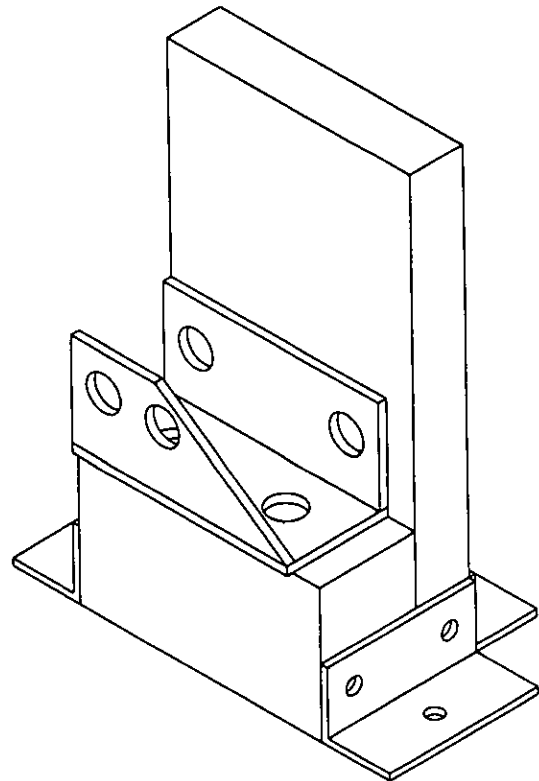
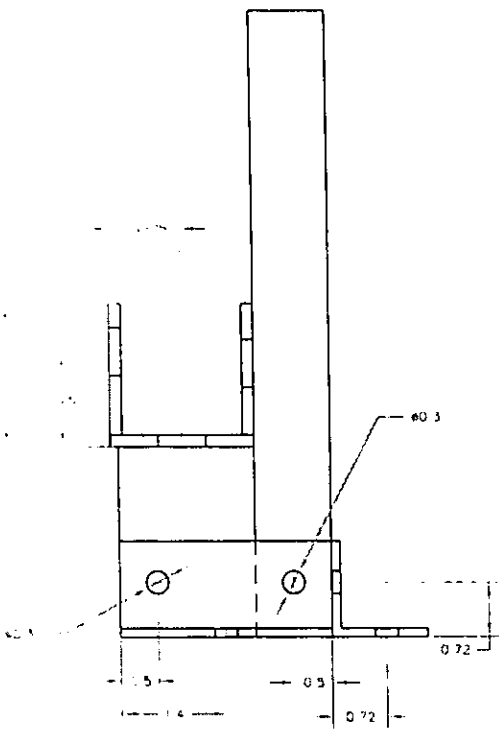
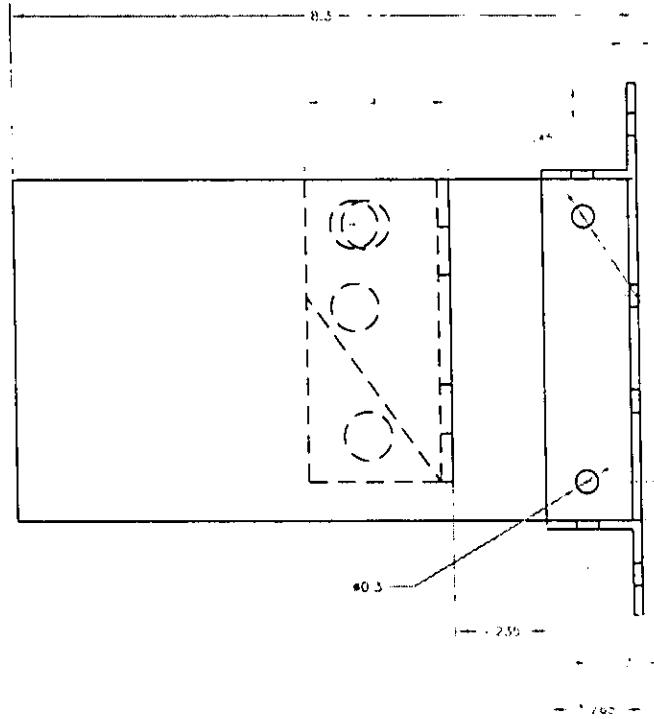
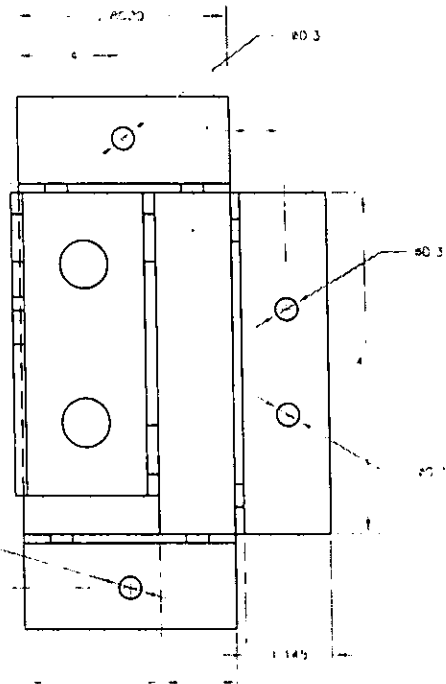
Acot: cm

Dibujó: EFAR

Fecha: 22/06/01

Esc: 1:1

Dibujo No. 19

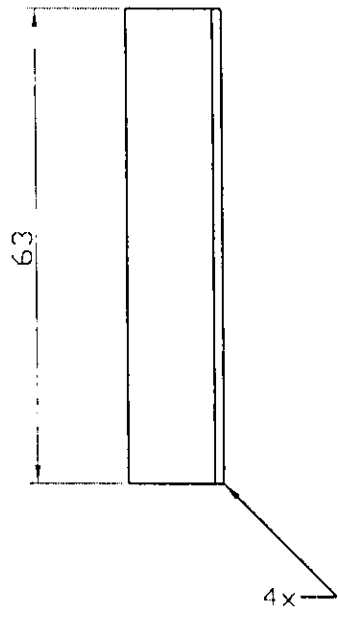
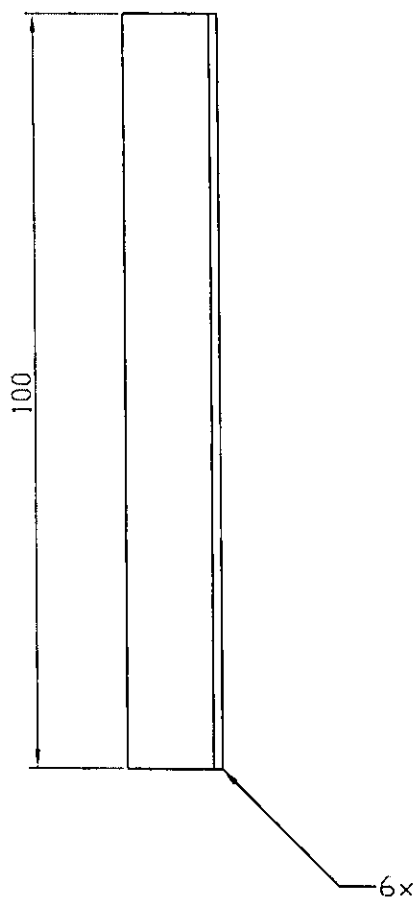
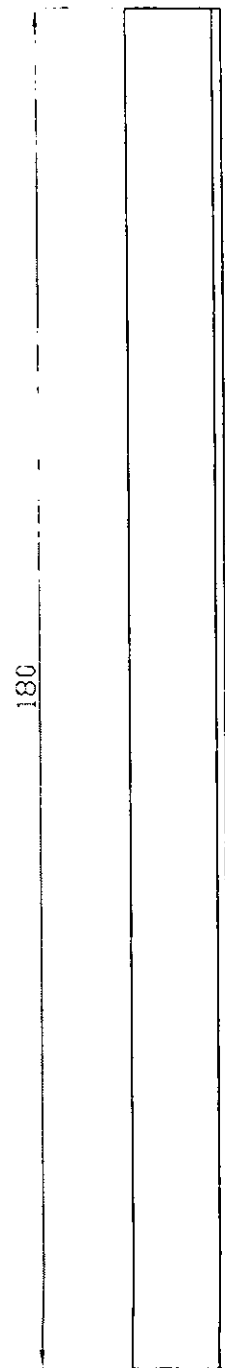
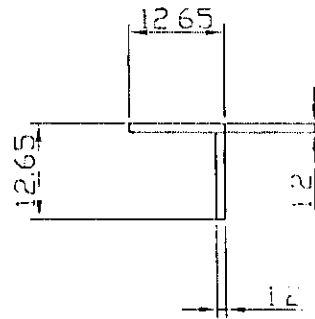
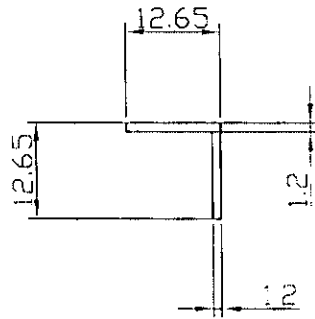
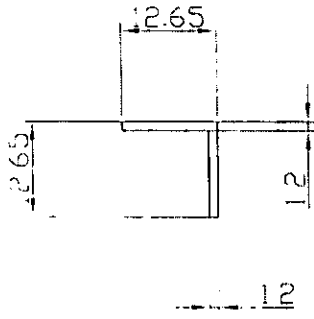


Manipulador Antropomórfico Teleoperado II

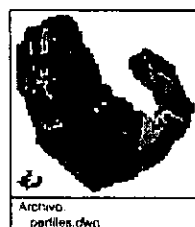
Soporte del manipulador

Material: nylamid y aluminio		Diseño: EFAR
Cant. 1	Acot: cm	Dibujó: EFAR
Fecha: 22/06/01	Esc: 1:1	Dibujo No. 20

Archivo:  
mano-409.dwg



8x



Manipulador Antropomórfico Teleoperado II			
Perfiles para el soporte de los servomotores			
Material: aluminio	Diseñó: EFAR		
Cant.	Acot: mm	Dibujó: EFAR	
Fecha: 22/06/01	Esc: 1:1	Dibujo No. 21	

Archivo: perfiles.dwg