



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

**INSTRUMENTACIÓN DE UN GUANTE Y ADQUISICIÓN
DE DATOS DE LA POSTURA DE LA MANO HUMANA
PARA LA TELEOPERACIÓN**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

MECÁNICA - MECATRÓNICA

P R E S E N T A :

VÍCTOR GUSTAVO ARNEZ PANIAGUA

TUTOR:

DR. VÍCTOR JAVIER GONZÁLEZ VILLELA

2012

Instrumentación de un guante y adquisición de datos de la postura de la mano humana para la teleoperación

Agradecimientos

Ésta tesis la dedico a mis **padres, hermanos, tíos y amigos**, que su apoyo y alegría los llevaré por siempre conmigo.

Agradezco a mis **padres** todo el soporte incondicional que me han dado toda la vida. Por darme las herramientas para siempre buscar ser alguien mejor y saber perseguir mis sueños.

Agradezco a mis **hermanos** por ser mis mejores amigos en la vida. Que su alegría nunca se apague.

Agradezco a mis tíos **Karin y Claudio**, que por su apoyo estoy viendo realizado mi trabajo en ésta Maestría.

Agradezco a mi amor, **Giovanna**, por saber cómo motivarme cuando me falta actitud y hacerme ver la alegría de la vida.

Agradezco a mis **amigos**, por ser parte esencial de mi vida.

Agradezco a mi tutor, **Víctor Javier González Villela**, por su paciencia y guía durante mi formación como maestro en ingeniería.

Un especial agradecimiento a todos aquellos que me apoyaron durante la realización de ésta tesis: **Víctor González, Giovanna Rivadeneyra, Ernesto Hernández y Sofía Murúa**.

Agradezco en lo que le corresponde a la **DGAPA, UNAM**, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, a través de los proyectos PAPIIT IN108308: "Investigación y desarrollo en robótica móvil, robótica paralela y sistemas mecatrónicos (2008-2010)" y PAPIIT IN115811: "Investigación y desarrollo en sistemas mecatrónicos: robótica móvil, robótica paralela, robótica híbrida y teleoperación (2011-2013)".

Agradezco también el apoyo brindado por **CONACyT**, en la forma de beca para el desarrollo de la Maestría, ésta tesis y la oportunidad de realizar una estancia de investigación en la Universidad de Strathclyde, Glasgow, Escocia. Ya que sin su apoyo no hubiera visto realizar este sueño.

When you make the finding yourself – even if you're the last person on Earth to see the light – you'll never forget it.

Carl Sagan

Contenido

| | |
|---|-----------|
| Objetivo | 7 |
| Resumen | 7 |
| Introducción..... | 7 |
| ¿Qué es tele-presencia?..... | 7 |
| Definición del proyecto..... | 8 |
| Capítulo 1. Mano mecánica | 10 |
| 1.1 Introducción..... | 11 |
| 1.1.1 Estado del arte | 11 |
| 1.2 Diseño mecánico..... | 12 |
| 1.3 Diseño funcional | 17 |
| 1.4 Análisis cinemático | 19 |
| 1.5 Aportaciones..... | 22 |
| Capítulo 2. Guante Instrumental..... | 24 |
| 2.1 Introducción..... | 25 |
| 2.1.1 Estado del arte | 25 |
| 2.1.2 Diseño funcional | 28 |
| 2.2 Sistema de sensado | 29 |
| 2.2.1 Sensores ópticos | 29 |
| 2.2.1.1 Principio de funcionamiento | 29 |
| 2.2.1.2 Caracterización | 30 |
| 2.2.1.3 Calibración | 31 |
| 2.2.2 Sensores piezoeléctricos | 32 |
| 2.2.2.1 Principio de funcionamiento | 32 |
| 2.2.2.2 Caracterización | 33 |
| 2.2.2.3 Calibración | 33 |
| 2.2.3 Sensores por tendones | 37 |
| 2.2.3.1 Principio de funcionamiento | 37 |
| 2.2.3.2 Caracterización | 38 |
| 2.2.3.3 Calibración | 39 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3 Instrumentación del guante | 40 |
| 2.4 Análisis del prototipo | 42 |
| 2.5 Análisis de resultados | 43 |
| Capítulo 3. Del guante a la mano | 46 |
| 3.1 Introducción..... | 47 |
| 3.2 Sistema de coordenadas del guante instrumental | 47 |
| 3.2.1 ¿Por qué es importante el sistema de coordenadas?..... | 51 |
| 3.3 Circuito..... | 51 |
| 3.3.1 Acondicionamiento..... | 52 |
| 3.3.2 Protocolo de comunicación | 54 |
| 3.4 Interfaz gráfica | 57 |
| 3.5 De la computadora a la mano..... | 58 |
| Apéndices | 59 |
| A1. Programa en Wolfram Mathematica para hacer los cálculos matemáticos de coordenadas | 60 |
| A2. Código en Arduino | 61 |
| A3. Programa en LabVIEW | 67 |
| B1. Planos de manufactura de los sensores piezoeléctricos | 73 |
| C1. Planos de construcción de la mano mecánica | 74 |
| Bibliografía | 88 |

Objetivo

Desarrollar un sistema de adquisición de datos que sea capaz de medir las posiciones de las articulaciones de la mano de un usuario. Asimismo, aplicar transformaciones matemáticas para construir un sistema de coordenadas compatible con una mano mecánica antropomórfica, y que el diseño de ésta permita sujetar objetos voluminosos y amorfos, dentro de un volumen de trabajo amplio.

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un proyecto de tele-operación en dos de sus subsistemas, una mano mecánica con cinco dedos capaz de repetir los movimientos de una mano humana y un guante instrumentado que captura las posturas de la mano de un usuario para ser transmitidas a la mano mecánica.

El diseño de la mano mecánica parte de la idea de arcos flexibles presentes en la mano humana, con dichos arcos es posible obtener la destreza característica de los humanos y permite la manipulación de objetos amorfos y de tamaños considerables. De hecho, es gracias a tres arcos principales que la mayoría de los movimientos es posible. Para dicho fin se plantea un diseño partiendo desde la muñeca y construyendo una palma flexible.

Para el guante instrumental, su diseño parte del diseño de la mano mecánica en el sentido de que los grados de libertad obtenidos de la última serán las restricciones de diseño del guante; definiéndolas como el mínimo de variables a medir de la mano humana.

Se analizan diferentes tipos de sensores considerando sus ventajas y desventajas y se seleccionan tres de ellos para articulaciones específicas de la mano en base a sus características. Los sensores a utilizar son de principios físicos ópticos, piezo-resistivos y resistivos.

Finamente, se plantean ecuaciones espaciales para construir un sistema de coordenadas que describa los movimientos de la mano humana en el guante y de esta manera reconstruirlo con los sensores. Este sistema será transmitido a la mano mecánica para imitar las posturas de la mano del usuario y así tener un proyecto de tele-operación.

Introducción

¿Qué es tele-presencia?

En años anteriores se ha buscado crear una herramienta que permita recrear las habilidades y destrezas humanas para transportarlas a cualquier parte del mundo o inclusive fuera de éste, para después tomar datos sensoriales del entorno y retro-alimentarlos al usuario. En un solo concepto “Tele-presencia”.

Normalmente la tele-presencia se investiga usando robótica; tele-robótica, siendo éste uno de los campos más antiguos en la robótica misma. Desde sus inicios en los años 40's cuando el primer tele-operador fue diseñado [1]. Algunas de las aplicaciones que han desarrollado en el campo de la tele-robótica y tele-presencia van desde el fondo del mar, hasta el espacio exterior, pasando por instalaciones nucleares con alta radiactividad, desastres naturales, etc [2].

Si bien las aplicaciones de este campo han sido diversas y variadas a lo largo de las últimas décadas, existe mucho trabajo por hacer para lograr crear un sistema de tele-presencia que sea capaz de lograr su objetivo sin que el usuario sienta que realmente no es él quien está en el lugar. Por ejemplo, se han reportado problemas para superar la barrera del retraso de la señal debido a las distancias que debe recorrer por una infraestructura de internet [3], donde se debe de agregar un compensador de retrasos para no hacer que los dispositivos sean inservibles para los objetivos de las aplicaciones abordadas.

Los avances en el poder de cómputo y en comunicaciones han llevado a emerger una nueva serie de aplicaciones tales como tele-cirugía [4], tele-robótica semi-autónoma[2], control de robots humanoides[5], y otras [1]. En resumen, existen tantas aplicaciones emergiendo día con día que, he de admitir, no se han cubierto todas en ésta introducción.

Definición del proyecto

El proyecto consiste en construir un sistema de tele-presencia que sea capaz de recrear con la mayor precisión posible los movimientos de una mano humana y transferirlos en tiempo real a una estación remota donde las habilidades humanas sean puestas en práctica.

Para lograr lo anterior se plantea un esquema de flujo de la información teniendo en cuenta la respuesta del ambiente, su interacción con el actuador y los efectos que provocan en los controles [4]. Otro esquema que se tiene en cuenta es la información que se le da al usuario como retroalimentación y cómo esta información debe ser obtenida, procesada y utilizada para mayor efectividad [6].

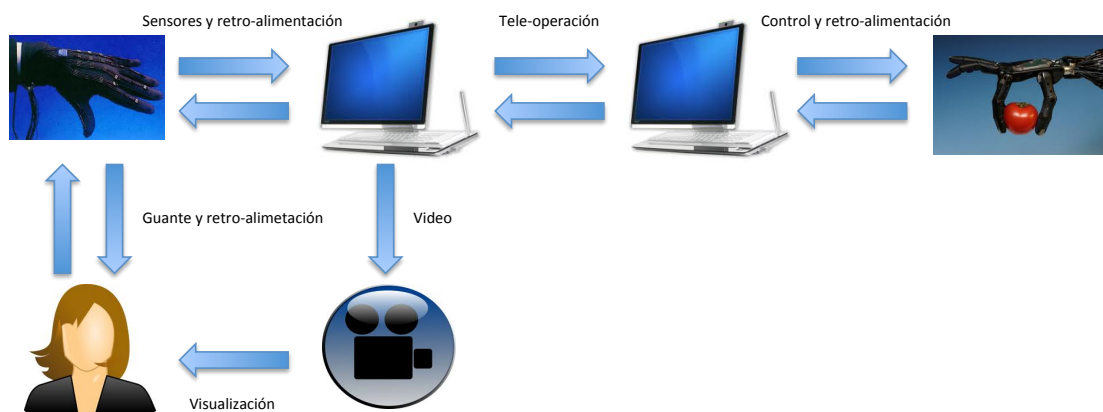


Figura 1. Sistema de tele-presencia.

Debido a la extensión del proyecto, es necesario dividirlo en sub-sistemas para enfocar esfuerzos y no perder de vista el objetivo. Estos sistemas son: adquisición de datos, tele-operación, herramienta de operación, control y retroalimentación sensorial.

Si bien este proyecto tiene como objetivo principal construir un sistema de tele-presencia, el alcance de este trabajo no llega tan lejos. En esta tesis se presentan los avances, resultados y conclusiones de dos sub-sistemas necesarios para construir dicho proyecto, tales sub-sistemas son la herramienta de operación; una mano mecánica antropomórfica, y la adquisición de datos biométricos; guante instrumental. Finalmente se plantea la teoría para la incorporación de un sub-sistema con el otro y se discuten los pasos futuros, y se echa un vistazo rápido a los demás sub-sistemas que se involucran en el proyecto.

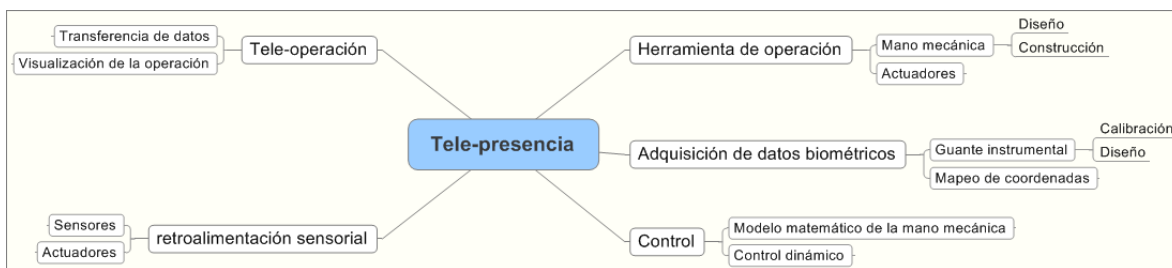


Figura 2. Estructura del proyecto.

Capítulo 1. Mano mecánica

1.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es presentar al lector las restricciones de diseño del guante instrumental. De aquí se obtendrán las variables mínimas que se deben obtener para crear un sistema de tele-operación y que el guante debe medir, estas variables son definidas a partir de los grados de libertad del órgano terminal del sistema; una mano mecánica, por ello que se analiza primero ésta última para después iniciar el diseño y análisis del guante instrumental, que es el foco de investigación de esta tesis.

Este capítulo empieza por exponer avances en manos mecánicas, posteriormente se propone un diseño de una mano mecánica para ser utilizada como órgano terminal del sistema de tele-operación, exponiendo las bases de diseño y las ventajas del mismo.

1.1.1 Estado del arte

Las manos y los brazos son herramientas poderosas para interactuar con el medio ambiente, manipulando objetos y cargando una gran variedad de cosas. Mientras los robots empiezan a ser usados como “robots de servicio” o como brazos prolongados del usuario para ambientes desconocidos a priori o parcialmente indefinidos, es evidente que es necesario equipar robots con manos artificiales para lograr las habilidades derivadas de lo anterior [7].

Las manos mecánicas han aparecido desde principios de los años 60's [8], y su desarrollo ha llevado varias vertientes, una de ellas, quizás la más reconocida socialmente es la de las prótesis. Si bien las prótesis actuales tienen actuadores para poder realizar algunas funciones como agarrar objetos, hacer señas y demás, los objetivos y restricciones con respecto a una mano mecánica son muy distintos [9-12], en pocas palabras, la diferencia entre una mano mecánica y una prótesis de mano es que las primeras buscan recrear el mayor número posible de habilidades que se encuentran en una mano humana, así como duplicar su destreza sin limitantes indispensables de diseño, mientras que las prótesis buscan sustituir la mano humana con restricciones de peso y espacio.

Las aplicaciones que se pueden cubrir con ésta tecnología son muchas, una muy socorrida es en la tele-robótica y tele-presencia, sin embargo, más aplicaciones en varias áreas y campos del conocimiento se encuentran en la bibliografía, como ejemplo están las misiones biológicamente peligrosas para el ser humano, destrucción de dispositivos explosivos, mantenimiento de plantas nucleares, mantenimiento de la estación espacial en órbita, etc. [8]

En años recientes se han presentado soluciones para construir manos antropomórficas, cada una logrando completar posturas y trayectorias más próximas a las encontradas en una mano humana [13], sin embargo, no se han obtenido resultados completos, ya que aún quedan espacios de trabajo que una mano humana puede alcanzar, y que estas soluciones no, por ejemplo, las

soluciones desarrolladas utilizan una palma con una forma plana o rígida [14], usan mecanismos muy simplificados para el anular y el meñique; en otras palabras, cuentan con un modelado cinemático simplificado. Por otro lado, varias de las simplificaciones propuestas tienen sus ventajas al momento de diseñar una mano mecánica, pero sobre todo en las prótesis, por ejemplo algunos diseños incorporan un mecanismo para conectar el movimiento entre la articulación interfalángica media con la distal [8, 15], otra simplificación es utilizar tres dedos articulados y un pulgar (eliminando el dedo meñique) [7, 15-17], ésta última simplificación tiene sus bases en un experimento que se realizó con personas, el cual consistía en anular ordenadamente la funcionalidad de los dedos mediante tablillas para que posteriormente los voluntarios realizaran actividades y se reportaba los tiempos que les llevaba hacer tareas específicas [18], los resultados de este experimento muestran que el uso del meñique no agrega mayor destreza a la mano y, en algunos casos, inclusive puede mellar la capacidad de la persona para realizar tareas más rápidamente, sin embargo, no concluye sobre la capacidad que ofrece el meñique para sostener objetos voluminosos o pesados, por lo que en el diseño de ésta tesis se considera una mano mecánica de cinco dedos para cumplir dicho fin.

Otra variable de diseño es el número de grados de libertad que debe tener la mano mecánica. La discusión alrededor de este punto es debido a la localización de los actuadores; mientras que en algunas propuestas, los motores se encuentran dentro de la mano [7, 14], otras propuestas son actuadas remotamente [15, 19] bajo el principio de que en el humano la mayoría de los músculos de la mano se encuentran en el antebrazo [15] y la ventaja de tener más espacio para colocar actuadores más robustos [13]. Sin embargo, los trabajos realizados y sus resultados documentados en la bibliografía demuestran que existe una ventaja apreciable de las manos mecánicas con mayor número de grados de libertad sobre aquellas con menor [20], ya que las primeras pueden manipular objetos con mayor diversidad en formas y tamaños.

1.2 Diseño mecánico

En un inicio se planteó diseñar una mano mecánica que parta de principios de diseño distintos a los hasta ahora propuestos, sin tener a los dedos como base de la mano, sino tener más bien a la muñeca, y aunque esto pueda parecer obvio, no parece así cuando se revisan las referencias y se distingue una tendencia de planear las manos a partir de los dedos. En tales soluciones propuestas, los enfoques son basados en la habilidad del pulgar, o el número de grados de libertad que poseen los dedos, pero se pierde de vista la ventaja de poseer una palma flexible y moldeable a diversos objetos de formas no definidas, o inclusive a movimientos que se requieren hacer cuando se manipulan.

Y uno puede preguntarse, ¿Qué ventaja existe con construir una mano mecánica a partir de la muñeca?, ¿Cuáles son las diferencias con respecto a los diseños presentados en la referencia?. Para responder a estas preguntas es necesario entender antes un enfoque no mencionado

usualmente, pero que tiene mucha importancia al momento de describir los movimientos de una mano humana, y este enfoque se refiere a los tres arcos principales de la palma [21].

Cuando se observa una mano humana desde un perfil lateral es posible notar que el nudillo del dedo medio está por encima del nudillo del dedo índice, así también, el pulgar esta por debajo del dedo índice. Esto es debido a la presencia de dos arcos transversales a la palma, un presente en la estructura de los huesos carpeanos, y el otro formado por los nudillos. Además de éstos dos arcos transversales, existe otro más longitudinal que es formado por la parte posterior de la palma y la forma de los dedos en una posición natural y relajada de la mano humana.

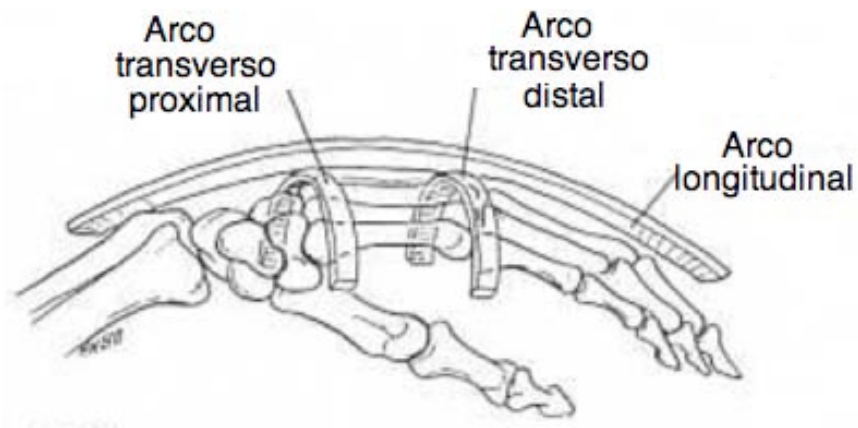


Figura 1.1. Arcos de la mano [21].

La utilidad de éstos arcos en la mano es que es con ellos que la palma obtiene flexibilidad y le permite acomodarse para sujetar una mayor variedad de cuerpos de diversas formas y tamaños. Es gracias a ellos que la mano la podemos pasar de una posición de puño cerrado a una de mano abierta, también podemos sujetar esferas o apoyarnos contra la pared, en pocas palabras, la mano tiene gran versatilidad de funciones debido a la flexibilidad de su palma [15] y, por ende, debido a los arcos de la mano.

Ya habiendo entendido el principio de diseño de la mano mecánica para esta tesis, es necesario entender el resto de la mano humana. La mano humana tiene 27 grados de libertad y su estructura y forma está definida por el sistema óseo, de este se pueden obtener las medidas de los dedos, de la palma, y los ángulos que forman entre todos ellos.



Figura 1.2. Nombre y ubicación de las articulaciones, así como los números asignados a cada dedo [21].

Para diseñar la cinemática de la mano mecánica es necesario ser conscientes de los movimientos y trayectorias que una mano humana promedio es capaz de realizar.

Los ángulos en los cuales se desplazan las articulaciones del segundo al quinto dedo, son de 10° a 15° en el carpo-metacarpiana (CMC) para el cuarto dedo, y de 20 a 30° para el quinto. Para el metacarpo-falángica (MCP) va de 0 a 90° , de la proximal inter-falángica (PIP) es de 0 a 100° y de la distal inter-falángica (DIP) es de 90° [15].

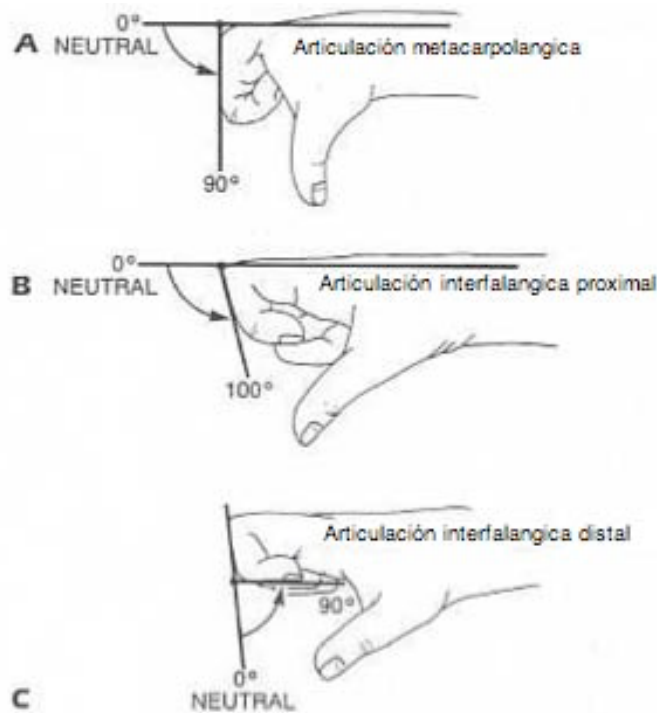


Figura 1.3. Grados que pueden llegar a tener los dedos de la mano humana [21].

Para el pulgar se puede observar que más que ángulos definidos, se tiene que buscar las trayectorias más importantes en nuestra mano, en los que se presentan los de abducción, rotación y flexión.

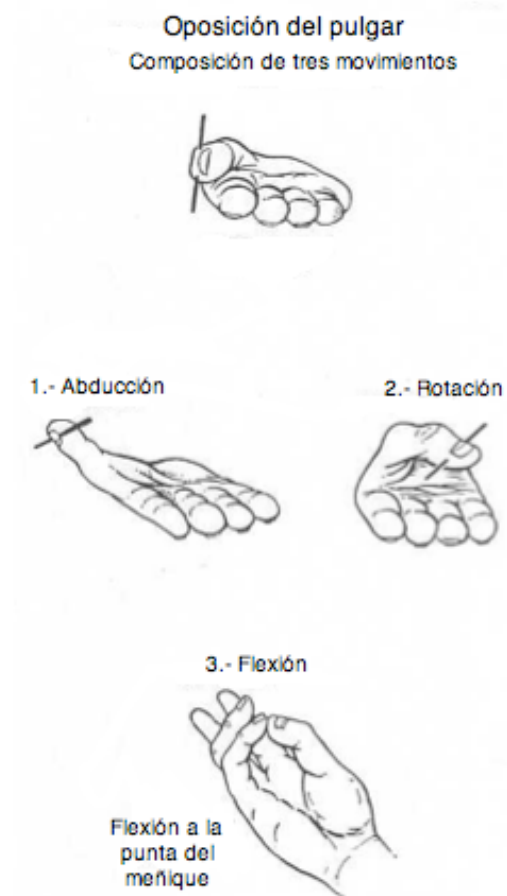


Figura 1.4. Movimientos indispensables en el pulgar [21].

Existe una controversia respecto a la utilización del dedo meñique en el diseño, sin embargo, se decidió implementar debido a que representa una ventaja al momento de manipular objetos voluminosos y pesados, ofreciendo una superficie de trabajo más amplia de hasta un 20%.

Para obtener los perfiles longitudinales de los dedos, se requiere de un diseño de perfil variable, lo cual es costoso en su manufactura. Una propuesta de simplificación es utilizar un tubo de aluminio y de él partir para obtener los perfiles longitudinales de cada falange. Como se muestra en la figura 5, las piezas de tono rojizo constituyen la estructura y funcionan como las falanges en los dedos.

Existe una simplificación mecánica cuando se flexionan los dedos, que puede aplicarse sin comprometer el objetivo del proyecto, ya que se presenta una relación del ángulo relativo entre la falange distal y medial, con el ángulo relativo entre la falange medial y proximal de los dedos.

índice, medio, anular y meñique. Se presentan mejoras sobre la tesis referenciada[22] para poder lograr trayectorias más cerradas en la última falange de los dedos II al V.

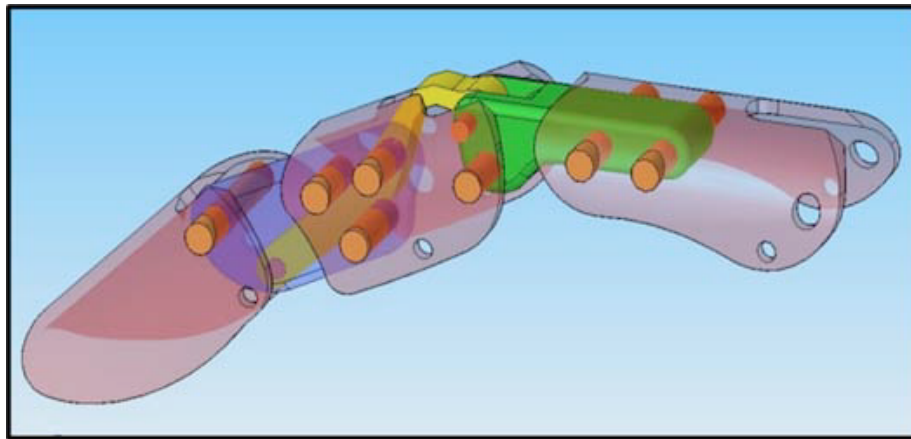


Figura 1.5. Perfil longitudinal de un dedo con su mecanismo de barras articuladas.

Es posible simular los movimientos del dedo pulgar utilizando tres ejes de rotación, dos de ellos ubicados en la articulación carpo-metacarpiana del pulgar, y el tercero se encuentra dentro de la muñeca (articulación entre el trapezoide y el trapecio) para lograr desplazar a los dos primeros y hacer posible que la mano se cierre completamente. Esto se aprecia mejor en la figura 6.

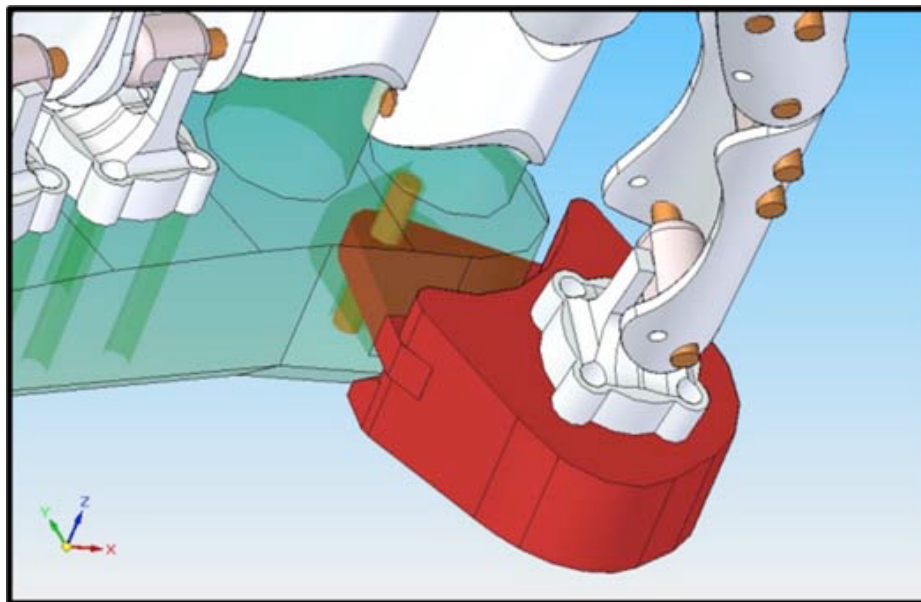


Figura 1.6. Mecanismo para el pulgar.

Otra de las simplificaciones importantes es el efecto de rotación-traslación que se presenta en las articulaciones de la mano humana, sin embargo, la traslación existente puede ser despreciable, comparada con la rotación lograda. Es por ello que el prototipo cuenta con articulaciones de movimientos rotacionales.

Para obtener la configuración de los dos arcos transversales deseados en la mano mecánica, se parte de una base fija compuesta por los metacarpianos de los dedos índice y medio, y la muñeca con la forma del primer arco transversal al nivel del carpo. A partir de las cabezas de los metacarpianos mencionados, se forma el segundo arco transversal móvil al nivel de estos. La propiedad móvil de este arco es lograda con un mecanismo de junta universal en la unión de los dedos meñique y anular con la muñeca (CMC). Para el tercer arco, el longitudinal, la configuración es propia de los movimientos naturales de la mano, ya que ésta es formada por la posición de los dedos en una vista lateral.

Las dimensiones de la mano mecánica son tomadas de la mano humana mediante calibradores Vernier para asemejarla a la morfología del usuario y así reducir la curva de aprendizaje para usar la herramienta [8].

1.3 Diseño funcional

En cada falange se construyó un perfil que pueda cumplir con características parecidas en forma con aquellas de la mano humana, con una visión final de hacerla capaz de sostener objetos de formas diversas, y abierta a la posibilidad de añadir un material que funja como piel, y además, que pueda cubrir los tendones que pasen por en medio de la falange.

Durante todo el diseño se tuvo especial cuidado con buscar que cada ángulo; cada articulación, tenga un recorrido similar al encontrado en las manos humanas, para lo que se tuvo que generar perfiles y piezas especiales.

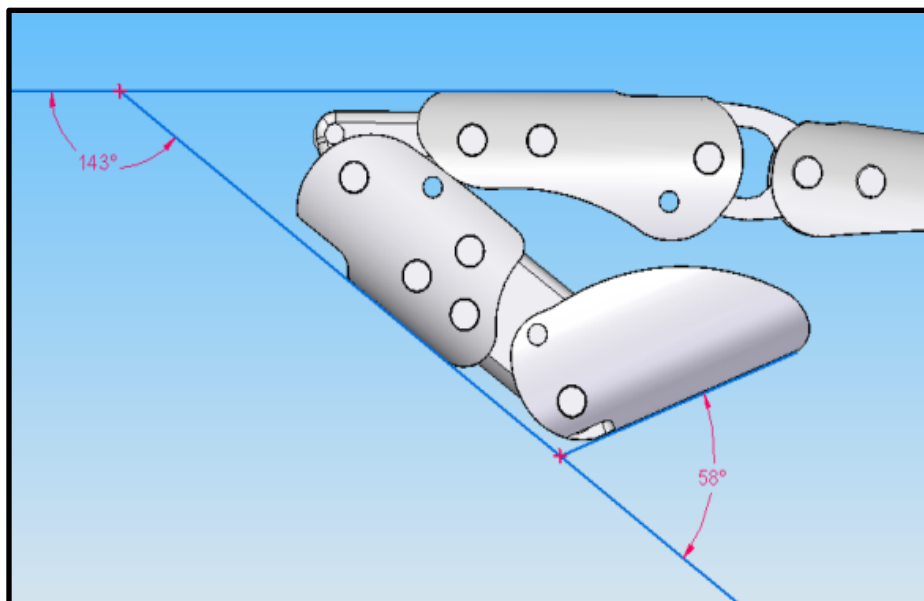


Figura 1.7. Vista lateral de un dedo, medición de los ángulos entre las falanges proximal-media y media-distal.

La falange media tiene un desplazamiento máximo de 143° , cuando este desplazamiento ocurre la falange distal llega a desplazarse 58° . Por otro lado, si se busca comparar este ángulo con el de la referencia, cuando la falange media mide 100° , se puede llegar a una rotación de 63° en la falange distal. El ángulo máximo de rotación obtenido entre el metacarpo y la falange proximal es de 93° .

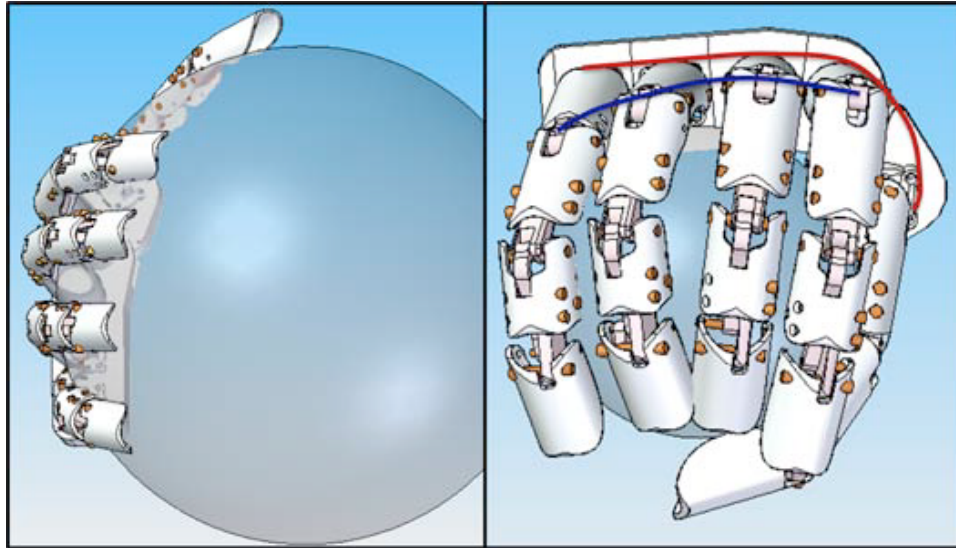


Figura 1.8. Aplicación de los arcos principales en objetos esféricos de diferente diámetro.

Para poder observar la versatilidad del dedo pulgar, se presentan las siguientes figuras, las cuales, basadas en la reseña, muestran las principales posiciones que se deben lograr con este dedo. Tales posiciones son flexión a la punta del dedo meñique, abducción y rotación.

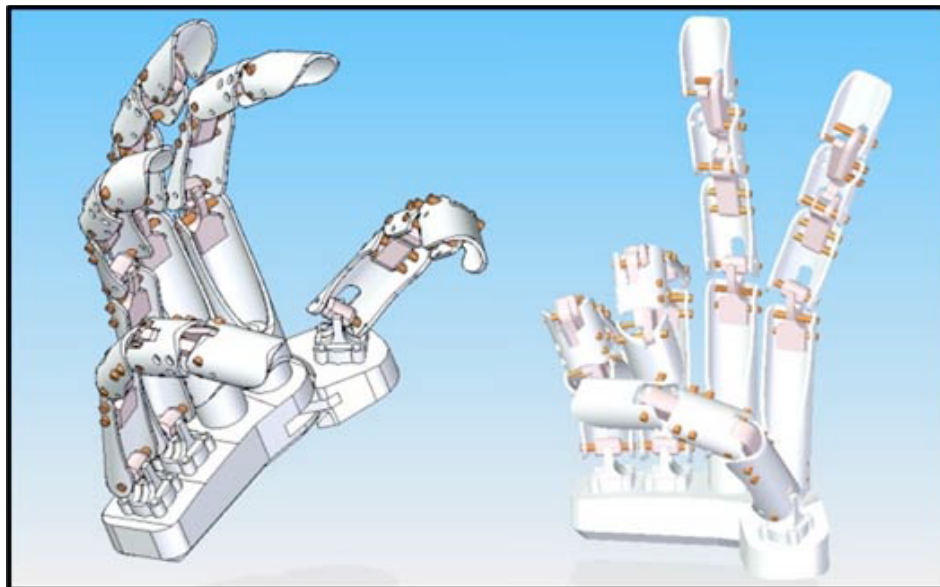


Figura 1.9. Posiciones logradas.

1.4 Análisis cinemático

Mediante una simulación utilizando *Solid Edge*, se estiman los ángulos y trayectorias que puede hacer la mano mecánica, así como las distancias y límites de movimiento.

Para poder corroborar estas estimaciones se usó el método de matrices homogéneas, este método consiste en una representación matricial con dimensiones de 4x4, donde la cuarta columna representa una traslación y las primeras tres columnas son rotaciones sobre cada eje coordenado; el último renglón se completa con ceros y un uno para la última columna. De tal manera que se pueden construir 6 matrices de transformación básicas, tres para las rotaciones en cada eje y otras tres para traslaciones sobre los ejes.

Traslación sobre el eje x.

$$T_{z1}[x] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Traslación sobre el eje y.

$$T_{z2}[y] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Traslación sobre el eje z.

$$T_{z3}[z] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Rotación sobre el eje x.

$$T_{z4}[\theta_x] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\text{sen}(\theta_x) & 0 \\ 0 & \text{sen}(\theta_x) & \cos(\theta_x) & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Rotación sobre el eje y.

$$T_{z5}[\theta_y] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \text{sen}(\theta_y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Rotación sobre el eje z.

$$T_{z6}[\theta_z] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\text{sen}(\theta_z) & 0 & 0 \\ \text{sen}(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Con las ecuaciones anteriores se puede construir la cinemática de la mano mecánica de ésta tesis, sólo se requiere proponer una base inercial para cada dedo a partir de la cual se irán construyendo bases locales sucesivamente hasta haber descrito cada eslabón del mecanismo.

Los cálculos se hacen a partir de la muñeca, no de la palma, por lo que las bases inerciales para todos los dedos se encuentran allí.

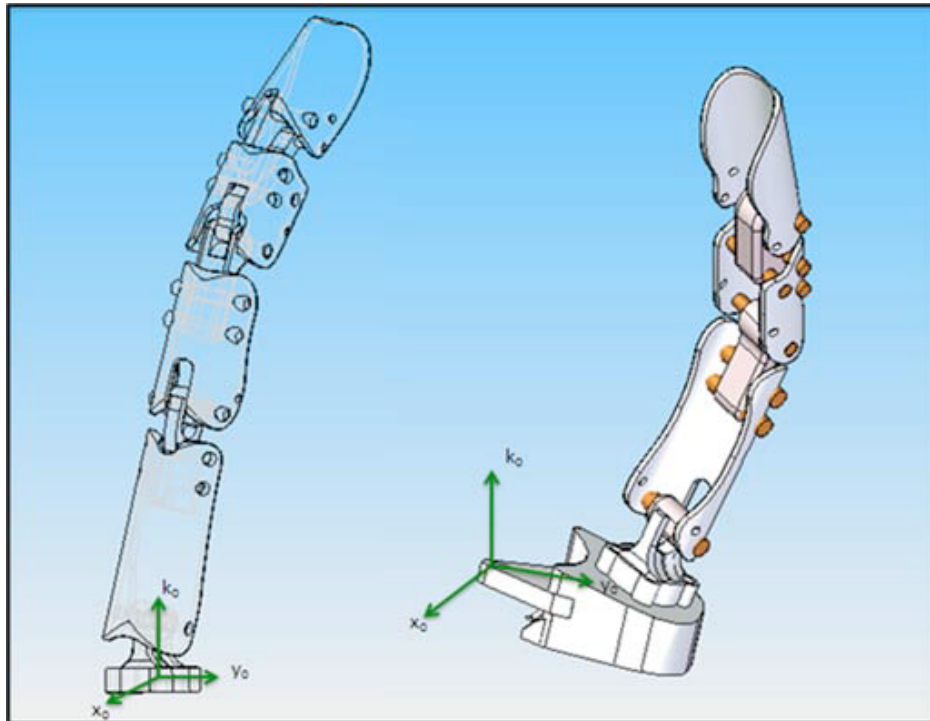


Figura 1.10. Bases inerciales de los dedos.

Utilizando el método de bases homogéneas para mecanismos espaciales con las ecuaciones 1.1-1.5 se obtienen las siguientes ecuaciones para el dedo meñique:

$$T_{z3}[a_{m1}] \cdot T_{z5}[\gamma_{m1}] \cdot T_{z4}[\gamma_{m2}] \cdot T_{z3}[a_{m2}] \cdot T_{z5}[\gamma_{m3}] \cdot T_{z4}[\gamma_{m4}] \cdot T_{z3}[a_{m3}] \cdot T_{z4}[\gamma_{m5}] \cdot T_{z3}[a_{m4}] \cdot T_{z4}[\gamma_{m6}] \cdot T_{z3}[a_{m5}] = T_{z1}[X_m] \cdot T_{z2}[y_m] \cdot T_{z3}[Z_m] \cdot T_{z4}[\theta_{m1}] \cdot T_{z5}[\theta_{m2}]$$

Ecuación 1.6

Y para el dedo pulgar:

$$T_{z6}[\gamma_{p1}] \cdot T_{z1}[a_{p1}] \cdot T_{z3}[a_{p2}] \cdot T_{z5}[\gamma_{p2}] \cdot T_{z4}[\gamma_{p3}] \cdot T_{z3}[a_{p3}] \cdot T_{z5}[\gamma_{p4}] \cdot T_{z3}[a_{p4}] \cdot T_{z5}[\gamma_{p5}] \cdot r = [x_p, y_p, z_p, 1]^T$$

Ecuación 1.7

Posteriormente se propone una trayectoria y se introducen datos a todos los grados de libertad, con la idea de que la mano pase de una posición cerrada en forma de puño, hasta una posición completamente abierta, se grafican las trayectorias utilizando el software *Mathematica*.

Se presentan los resultados evaluados en el dedo meñique; las gráficas en los dedos II, III, y IV tienen formas muy parecidas a las mostradas para este dedo.

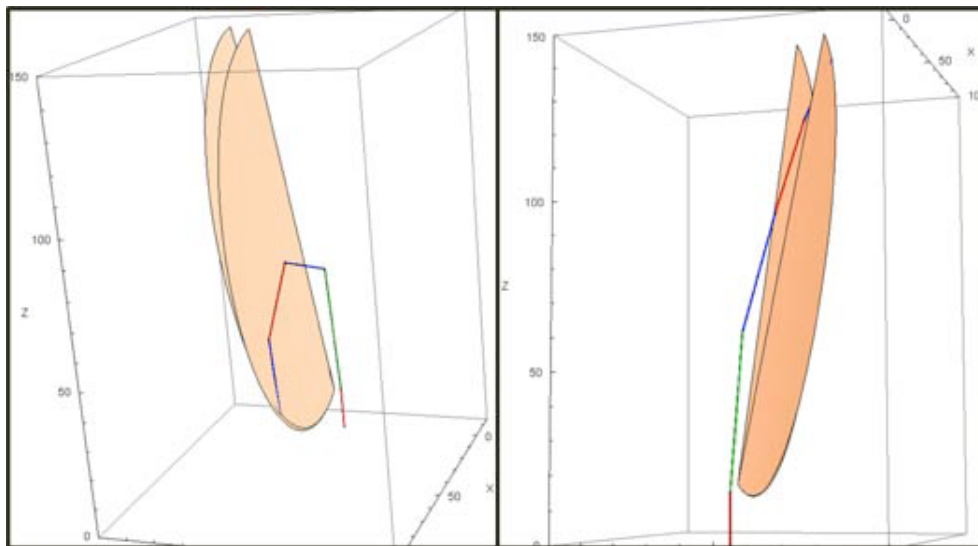


Figura 1.11. Movimientos de los dedos II al V.

Por último se presentan las trayectorias y área de trabajo para el dedo pulgar.

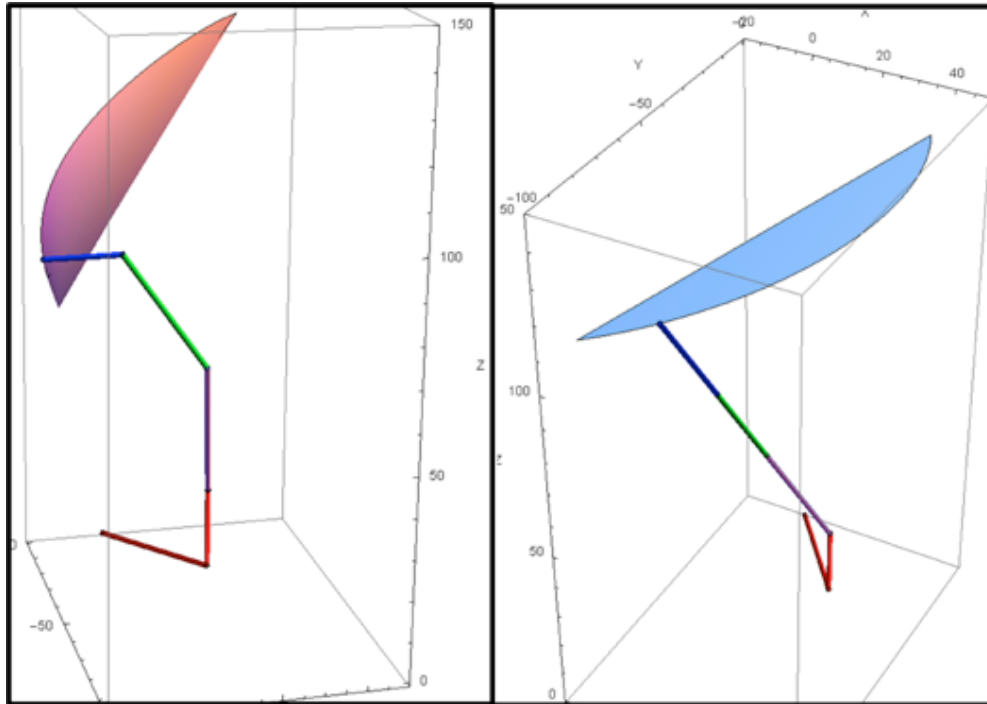


Figura 1.12. Trayectorias del dedo pulgar a diferentes movimientos de las articulaciones.

1.5 Aportaciones

La más importante aportación de este capítulo a la tesis es que propone las variables cinemáticas mínimas que debe medir el guante instrumental, es decir, que el guante debe ser capaz de enviar la información necesaria para que la mano mecánica pueda construir su espacio de coordenadas y así replicar los movimientos del usuario, estas variables cinemáticas son precisamente los grados de libertad de la mano mecánica. Lo anterior es debido a que el proyecto mayor es construir un sistema de tele-operación en el cual el guante comanda a la mano mecánica propuesta en este capítulo, aún cuando existen otras maneras de comandar una mano mecánica como podría ser mediante señales biomiméticas [19], o agregando cierta autonomía para hacer posible la tele-operación [3].

Por otro lado, en una manera independiente de la tesis, las aportaciones de este capítulo también abarcan otros aspectos, por ejemplo, el diseño de una mano mecánica de cinco dedos con 22 GDL, con los cuales es posible recrear la mayoría de los movimientos que una mano humana puede hacer, por lo que se puede utilizar para trasladar la habilidad y destreza humana a una zona remota mediante un sistema de tele-operación.

Para mejorar el desempeño de la mano para incluirse en un sistema de tele-operación es agregar los actuadores, este diseño tiene considerado utilizar motores DC remotos accionados con tendones. Sobre este tema se tiene varios estudios en la bibliografía para modelar la teoría de tendones, así como ejemplos de manos mecánicas actuadas con tendones [19].

Requerirá de sensores de posición para su uso en tele-presencia, la mano mecánica aquí expuesta funciona como herramienta general en los ambientes inciertos con tareas indefinidas, por lo que la versatilidad es un factor imprescindible. Además, se tiene un modelo cinemático para poder hacer un mapeo de coordenadas con el guante instrumental y así crear el sistema de tele-operación, ya que el mapeo directo con el guante es a manera más sencilla de tele-operar manos mecánicas multidedo [8].

Por último en el diseño hace falta agregar los sensores de contacto, fuerza, presión, etc. Además la bibliografía coincide en que un diseño basado en las superficies de contacto es necesario para dar mayor estabilidad a la manipulación de objetos de todos tamaños [7, 8].

Como consideración en la etapa de control, un esquema de agarre preposicionando la mano mecánica con respecto a la taxonomía del objeto a manipular aumenta considerablemente la estabilidad del agarre así como la destreza, esto fue reportado cuando se hicieron experimentos con voluntarios que agarraban objetos de variadas formas y se grababa en video la postura natural de la mano humana antes del agarre para después aplicarlo a dos manos mecánicas de diferente número de grados de libertad y analizar la eficacia del esquema de agarre [20, 23, 24].

Otro enfoque para el agarre de objetos con manos mecánicas es analizando la fuerza que se genera y calcular la necesaria para sujetar firmemente un objeto [25]. Esta aproximación no usa las geometrías para definir el agarre, sino que trabaja con un enfoque basado en la fuerza de agarre, lo cual permite lograr otras funciones como rotaciones.

Las desventajas encontradas en este diseño propuesto son la complejidad en la mecánica; dando como resultado una manufactura lenta por el nivel de cuidado que se debe tener en las piezas, y la dificultad de modelado dinámico para diseñar un sistema de autonomía de la mano mecánica.

Cabe señalar que el trabajo realizado en este capítulo fue reconocido para ser parte de dos congresos mediante la publicación de dos artículos; uno en el *XVI Congreso Anual de la SOMIM*, y en el *Seventh Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA-IEEE) 2010*.

Capítulo 2. Guante Instrumental

2.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es presentar al lector el principio de funcionamiento del guante instrumental, explicando el uso de los sensores con los que se va a instrumentar, ventajas y desventajas de cada uno y las razones por las que se decidió emplearlos. Las restricciones de diseño del guante fueron presentadas en el capítulo anterior, donde se especifica cuáles son los grados de libertad de la mano humana que se deben medir para cumplir con su función en el sistema de tele-operación.

Igualmente, en este capítulo se presentan los principios de calibración y caracterización y los resultados obtenidos de cada uno de los sensores. El acondicionamiento de las señales obtenidas, así como los circuitos con los que se comunica el guante con la computadora son presentados en el capítulo 3.

2.1.1 Estado del arte

El deseo de completar diferentes tareas que aparecen en el día a día o en procesos industriales con una sola herramienta ha llevado al desarrollo de mano mecánicas, persiguiendo la flexibilidad y destreza de la mano humana. Una mano mecánica es un mecanismo complejo que involucra un gran número de grados de libertad. Varias manos mecánicas multidedo han sido desarrolladas hasta ahora, tal como la Utah/MIT Hand [16], la DLR hand [7] y la MA-I hand [17] con cuatro dedos, y la Shadow Hand [26], la GIFU Hand [14] y la Bolonia Hand 3 [27] con cinco dedos. Y a pesar de las avanzadas características de éstas manos mecánicas, la determinación automática de sus movimientos sigue siendo complicado, principalmente debido al gran número de grados de libertad involucrados, lo cual hace que la búsqueda de espacio (el espacio de la configuración de la mano) sea de gran dimensión y por lo tanto la búsqueda de colisiones y la búsqueda de una trayectoria de articulaciones válida tenga un costo computacional extremadamente alto. Dado lo anterior, nuevas aproximaciones son necesarias para ampliar el uso de las manos mecánicas al introducir soluciones más eficientes en este sentido [28].

Para fines de este trabajo, se define un guante instrumental como un arreglo de sensores, electrónica para adquisición, procesamiento de datos y alimentación, y un soporte para los sensores que puede ser usado en la mano del usuario [29]. Usualmente los guantes son hechos de lycra, y sobre de ella se añaden los sensores.

Para medir los movimientos de la mano humana o sus posturas existen diversas aproximaciones dependiendo de la aplicación específica a la que se quiera abordar. Hay situaciones donde sólo se requiere identificar el momento en que la mano realiza una seña o adquiere una postura específica, por lo que las trayectorias son desconocidas, o incluso existen situaciones donde no

sólo se requiere conocer la trayectoria de cada dedo, sino también de velocidad con la que se mueve, la fuerza, etc. Es por ello que se utilizan una gran variedad de sensores en todos los guantes instrumentales. Por ejemplo, se usan sensores en forma de anillos magnéticos donde se mide el campo que generan, esto para identificar las posturas de personas que han sufrido un accidente y hayan quedado discapacitadas y estén llevando una terapia de rehabilitación [30]; éstos sensores están reportados con una buena repetibilidad y confiabilidad, sin embargo la resolución que ofrecen es variante a lo largo del rango de operación, por lo que en otras soluciones para ésta aplicación se usan otro tipo de sensores [31-33], en éstas propuestas usan sensores de flexión en cada articulación, funcionan con materiales piezoeléctricos que varían su resistividad conforme se les aplica fuerza de deformación, en algunos casos se puede usar el guante para dar una retroalimentación al paciente ya sea mediante una fuerza generada por actuadores o mediante impulsos eléctricos para estimular los músculos.

Más aplicaciones en el campo de los guantes instrumentales varían desde juguetes [34] hasta el espacio exterior [35], pasando por control de brazos mecánicos mediante gestos con la mano [36], tareas conjuntas entre humano máquina [37], en la educación [38], idioma de señas [39], verificación de firmas electrónicas [40, 41], manipulación de eventos en ambientes virtuales[42], entre otras [29].

En resumen, un guante instrumental puede ser realizado con los sensores basados en diferentes principios:

- Ópticos: cámaras con [43, 44] o sin marcas de referencia [45], con fibra óptica [41].
- Magnéticos: de efecto Hall [30].
- Físico: por presión [46].
- Eléctrico: potenciómetros [29], piezoeléctricos [33, 47-50], acelerómetros [51].
- Híbridos: unión de principios anteriores.

Como es de esperarse, todos los principios expuestos tienen sus ventajas y desventajas, y la decisión para usarlos debe ser en base a cada articulación que se vaya a medir.

Anteriormente se mencionó la posibilidad de agregar actuadores a un guante instrumental para dar una retroalimentación al usuario, una señal en particular es digna de mencionarse; la fuerza. Para que un sistema de tele-operación pase a ser de tele-presencia un paso indispensable es agregar un control de fuerza, o un ambiente háptico (se refiere a la interacción con el sentido del tacto). Usualmente se utilizan mecanismos instalados por encima del guante (exo-esqueletos), sostenidos por la mano del usuario, los cuales llevan consigo motores para restringir el movimiento del guante instrumental [52]. Este tipo de control también funciona para crear un

modelo de agarre para cuerpos deformables y así poder plantear una autonomía a la herramienta final cuando se trabaja en un ambiente tele-operado [53].

Existen varias formas de validar la utilidad del guante instrumental para cada aplicación específica, esto para determinar características como repetibilidad, confiabilidad, exactitud, precisión, etc. En muchas ocasiones se utiliza un molde de la mano humana en alguna postura definida por el usuario y posteriormente se pide que repetidamente se tome el molde para tener una posición de control con el guante, y así se mida la repetibilidad del mismo [47], normalmente los moldes son de yeso y son personalizados para cada usuario, aunque algunas veces se usa un sólo molde para todos [49].

Otra cuestión importante para validar un guante es considerar la opinión del usuario, ya que es él quien va a usar el guante durante la aplicación. Normalmente se realiza un cuestionario con respuestas ponderadas para buscar calificar el diseño del guante, las preguntas van orientadas a la comodidad con la que se pusieron y quitaron el guante, cuánto tiempo pueden usarlo sin que sientan que lo llevan puesto [54], que tan sencillo era mover la mano con el guante puesto, etc. [48]

Algunos factores importantes que hay que considerar para obtener resultados útiles son aquellos que alteran la calibración de los sensores en el guante instrumental, si bien existen esfuerzos por reducir los tiempos de calibración hasta el punto en que no sea necesaria [55], la mayoría de los guantes sí requiere de ese tiempo por usuario para obtener una confiabilidad aceptable [48, 49, 54]. Por ejemplo, si se tienen guantes no calibrados es posible obtener alguna utilidad de ellos implementando redes neuronales, redes de Bayes, lógica difusa, o algo de inteligencia artificial para que el sistema mismo aprenda a reconocer las posturas de la mano humana a través del guante; este sistema se auxilia de trabajos previos en taxonomía (taxonomía de Schlezinger) y en estudios de agarres canónicos de la mano humana. Por el otro lado, algunos sistemas de adquisición de datos como los que emplean cámaras de video para calcular la posición de la mano requieren de una calibración de video cuando emplean visión estereoscópica o multicanal, o utilizar marcadores especiales para evitar la oclusión [44].

Ya se mencionó que la forma más simple para comandar una mano mecánica desde un guante instrumental es mediante un mapeo directo de coordenadas, considerando que los sensores en el guante instrumental no representan directamente un valor en ángulo de alguna articulación de la mano humana y menos aún de la mano mecánica [55]. Sin embargo, en la bibliografía se encontró con una propuesta de reducción de los sistemas de coordenadas multidimensional a dos sistemas tridimensionales; uno para la mano humana y otro para la mano mecánica [28], empleando un concepto llamado direcciones de movimientos principales (PMD por sus siglas en inglés), esto reduce la carga computacional para comandar una mano mecánica, lo cual es muy conveniente en

ciertas aplicaciones donde la velocidad es primordial y se pueden considerar simplificaciones a la cinemática de la mano humana.

2.1.2 Diseño funcional

La mano humana cuenta con articulaciones con grados de libertad múltiples, por lo que los sensores deben de poder medir cada uno de estos si se desea reconstruir la posición absoluta de la mano. Además, la mano cuenta con tres arcos principales, los cuales provocan la flexibilidad en la palma, haciéndola capaz de sostener objetos de diferentes formas [21, 56]. La siguiente figura muestra la relación de grados de libertad (GDL) por cada articulación.

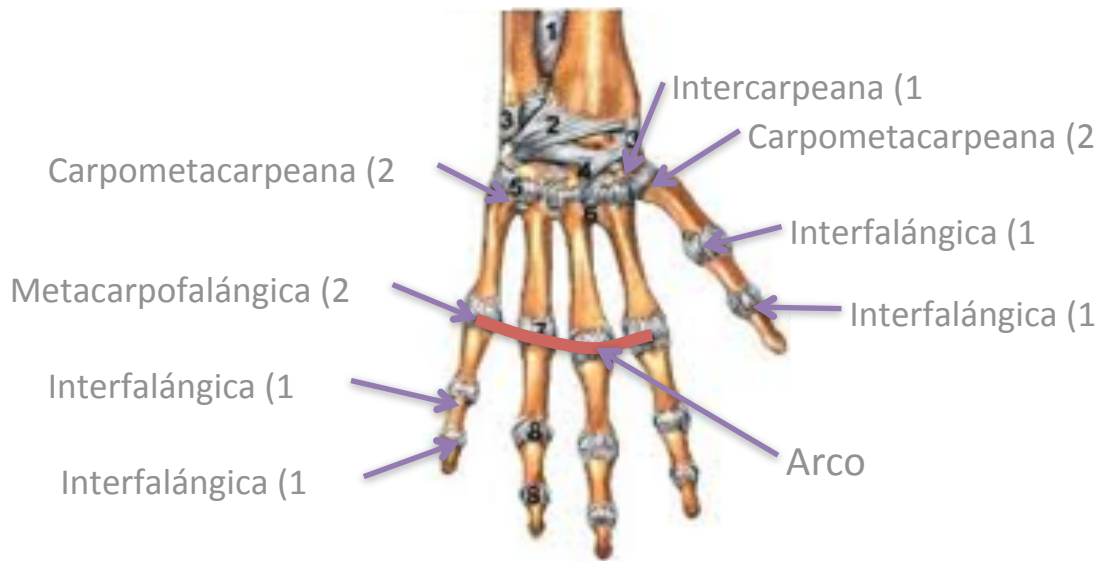


Figura 2.1. Anatomía de la mano y grados de libertad.

La aplicación que se le va a dar al guante desarrollado en esta tesis es la de comandar la mano mecánica descrita en el capítulo anterior. Cabe señalar que un proyecto similar se realizó en la Facultad de Ingeniería a principios de siglo [22], además de que la bibliografía nos indica que existen guantes instrumentales exclusivamente para hacer mediciones de la mano humana con diversos sensores para determinar la eficacia de cada uno [48].

En el presente trabajo se plantean las bases para la construcción, caracterización y calibración de un sistema de medición y adquisición de datos mediante el uso de un guante instrumental. Éste último funciona con la tecnología de 3 tipos de sensores; optoelectrónicos, piezoeléctricos y por tendones. Los principios de funcionamiento de cada uno, así como el proceso de caracterización, se desarrollan en este trabajo.

2.2 Sistema de sensado

Para medir los movimientos de las articulaciones de la mano es necesario entender cómo funciona cada una de ellas y utilizar el sensor correcto en base a su rango de operación, facilidad de implementación y costo. Así, las articulaciones del pulgar, debido a la gran cantidad de músculos que las rodean, son fácilmente de medir utilizando sensores optoelectrónicos o piezoeléctricos, pero por otro lado, las articulaciones de las falanges son un ejemplo excelente para usar sensores por tendones.

La siguiente tabla ayuda a entender las ventajas y desventajas para cada sensor seleccionado.

| SENSOR | OBSERVACIONES | RANGO | VENTAJAS | DESVENTAJAS | LOCALIZACIÓN |
|----------------------|--|--|--|--|--|
| Piezoeléctrico | Mide la deformación del sensor y se puede interpretar en un ángulo de movimiento. | Desde 0 a 135 grados de torsión, no detecta sentido de giro. | Fácil de implementar en un guante. Muy utilizado en la bibliografía. | Precio relativamente elevado. No es fácil de conseguir en México. | Para medir el arco flexible de los nudillos. Para medir el ángulo relativo entre dedos. |
| Optotransistor | Mide la intensidad de luz infrarroja que incide en el receptor. | Desde 0 a 90 grados, no detecta sentido de giro. | Muy bajo costo. Sencillo de implementar en un guante. | Su rango de operación puede variar por la distancia entre el emisor y el receptor. | En las articulaciones interfalángicas distales. Para la base del pulgar y la articulación intercarpeana. |
| Tendón-potenciómetro | Mide los giros de las articulaciones a través de tendones que a su vez giran un potenciómetro. | Virtualmente ilimitado para la aplicación en guantes instrumentales. Sí detecta sentido de giro. | Bajo costo. Se ajusta a las articulaciones que presentan un movimiento mayor a los 90 grados. No se ve afectado por movimientos ajenos a los que mide. | Implementación en el guante complicada. La calibración puede ser muy sensible. | Para los movimientos de los nudillos en su movimiento de aducción. Para las articulaciones interfalángicas proximales. |

Tabla 2.1. Sensores a utilizar; ventajas y desventajas.

2.2.1 Sensores ópticos

2.2.1.1 Principio de funcionamiento

Se requieren de dos elementos, un LED en el espectro infrarrojo y un transistor fotosensible. El primero está emitiendo constantemente, mientras que el segundo es parte de un circuito conversor de corriente a voltaje, como se muestra en la siguiente figura.

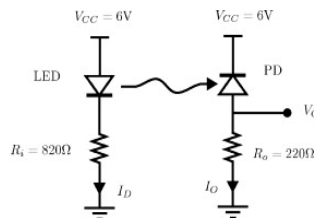


Figura 2.2. Conversor de corriente a voltaje.

Cuando la aplicación de este tipo de sensor es para guantes instrumentales o actuadores antropomórficos, y lo que se requiere es medir la rotación de articulaciones, vienen a consideración dos variables principales; la distancia focal y el ángulo entre los ejes focales [45]. La siguiente figura explica mejor estas variables.

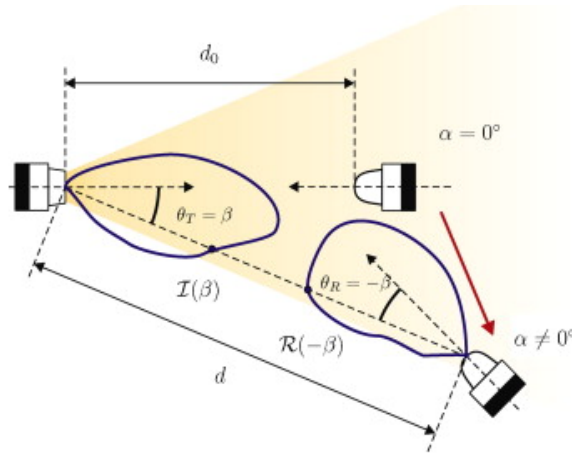


Figura 2.3. Sensor optoelectrónico no lineal.

Este fenómeno se presenta siempre que se gire la articulación a medir y el sensor tenga una excentricidad, es decir, que no se encuentre en el eje longitudinal del dedo. Para el caso de los guantes, esto siempre se presenta ya que no se puede incrustar el sensor en medio del dedo.

Como la medición de la rotación con este tipo de sensores depende de dos variables que cambian mutuamente a lo largo del desplazamiento de la articulación, hace que la caracterización de este sensor sea considerando un sistema no lineal. Sin embargo, es posible encontrar una relación entre estas variables para buscar una linealización por medio de una combinación lineal a lo largo de la trayectoria definida por el dedo. Finalmente, como se observó en la tesis del 2001 [22], el rango de operación de este tipo de sensores está acotado y los límites de operación rondan por los valores de 30 a 60 grados, por lo que su aplicación conviene que se presente en articulaciones con poco movimiento.

2.2.1.2 Caracterización

Para encontrar la relación que existe entre las dos variables, es posible proponer un experimento para controlar el comportamiento del sensor. Este experimento consiste en cambiar el ángulo entre los ejes focales del sensor a varias distancias. La siguiente figura es un esquema de lo que se propone hacer.

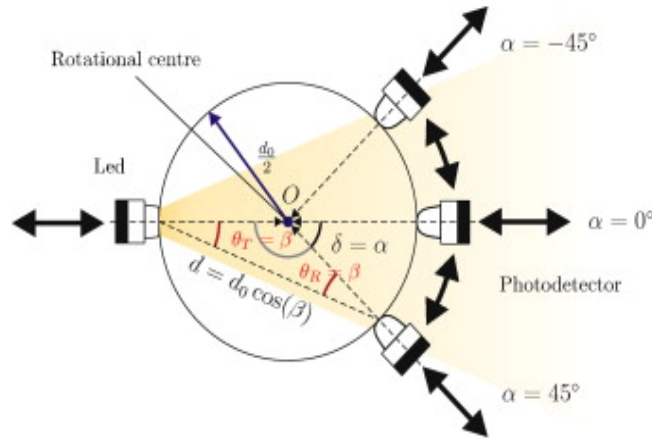


Figura 2.4. Propuesta de experimento para caracterizar un sensor optoelectrónico.

Como sucede con pocas cosas, en la práctica este experimento es más sencillo de lo que parece, ya que se mide el sensor directo desde el guante, dibujando un perfil de comportamiento del cual se puede proponer una ecuación linealizante para el rango de aplicación.

Los resultados de este experimento ya han sido publicados en la referencia [45]. Por lo que se puede utilizar como prueba de que el experimento funciona y es posible considerar el rango como lineal [22].

2.2.1.3 Calibración

Después de ser instalados en el guante, se propone hacer un experimento para calibrar los sensores. Este experimento consiste en colocar plantillas con el propósito de que el usuario del guante posicione su mano a manera de tener una referencia medible con la cual calibrar el sensor.

La calibración del sensor es a nivel software, por lo que es necesario repetir el proceso cada vez que se encienda el sistema.

A continuación se presenta una tabla con los resultados obtenidos a lo largo de la trayectoria del dedo.

| Ángulo | Voltaje |
|--------|---------|
| 0 | 0.06 |
| 30 | 0.2 |
| 45 | 2.1 |
| 60 | 3.88 |
| 75 | 3.92 |

Tabla 2.2. Resultados de la calibración del sensor optoelectrónico.

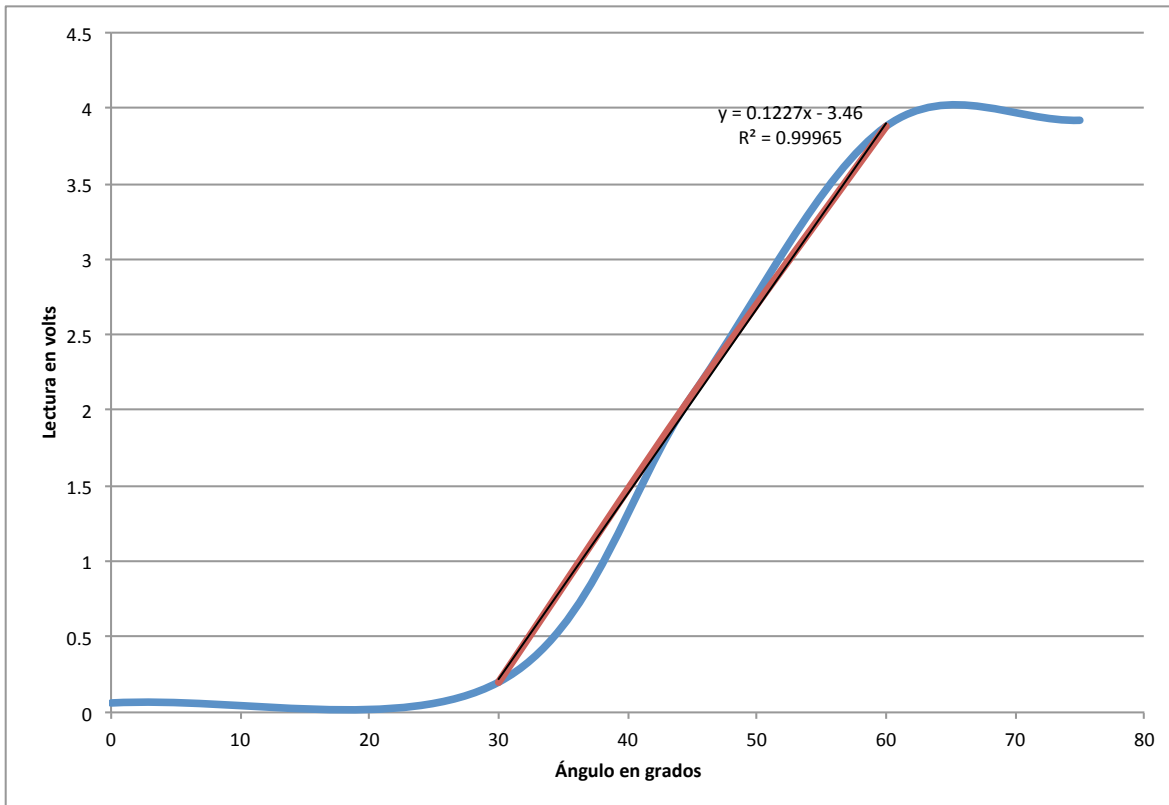


Figura 2.5. Trayectoria del dedo con las lecturas del sensor optoelectrónico.

Se observa nuevamente, que el rango de operación óptimo de este sensor se encuentra entre los 30 y 60 grados, y es allí donde se tiene un comportamiento lineal.

2.2.2 Sensores piezoeléctricos

2.2.2.1 Principio de funcionamiento

Una material piezoeléctrico es aquel que produce un cambio en una propiedad eléctrica del material cuando una tensión mecánica es aplicada (el material es apretado o estirado). Por el contrario, una deformación mecánica (el material se expande o contrae) se produce cuando se aplica un campo eléctrico.

Existen diferentes materiales que poseen esta característica, y varios de ellos han sido empleados en la construcción de guantes instrumentales, por lo que hay proveedores de sensores piezoeléctricos. Una opción para este sensor es el "Bend sensor" de *Inventables*, este sensor fue utilizado para un guante instrumental desarrollado por *Nintendo*[29], posee una buena resolución del ángulo de flexión, y cuenta con propiedades eléctricas que lo hacen atractivo. El sensor que se emplea para instrumentar el guante es adquirido de la empresa *Sensor Products Inc*, el *Flex Sensor*.

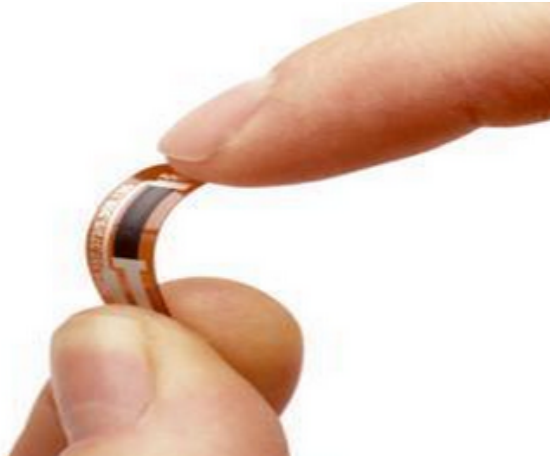


Figura 2.6. Sensor de flexión piezoeléctrico.

2.2.2.2 Caracterización

Para caracterizar este tipo de sensores, se propone un experimento que consiste en colocar el sensor directamente en el guante y añadir un transportador para medir el ángulo entre los huesos que conforman la articulación, ya que se propuso utilizar este tipo de sensor en articulaciones con un sólo grado de libertad. Se coloca el sensor de manera tal que cuando se rote la articulación, flexione el sensor y así medir el cambio de resistencia del sensor en función del ángulo de rotación.

2.2.2.3 Calibración

Una vez instalado en el guante, se utilizan plantillas similares a las explicadas para el sensor anterior y así se obtiene la relación entre la posición real de la mano con lo medido por el sensor, y calibrarlo mediante software.

Debido a que para obtener mediciones del valor de una resistencia se emplean circuito que convierten ese valor a una señal variable en voltaje, se tienen dos opciones principales: un divisor de voltaje, o un puente de Wheatstone[57]. La ventaja del primero es su sencillez, la desventaja es que como sólo uno de sus elementos varía, el voltaje obtenido es no-lineal y tiene baja sensibilidad en los extremos del rango; la ventaja de emplear un puente es que existen varias propuestas de circuito que mantienen la linealidad del sensor, la desventaja es que como el valor de resistencia del sensor varía desde 1K a 50K o desde 20K a 250K, un puente de Wheatstone no es lo suficientemente sensible para ser una opción viable. Debido a lo anterior, se decidió usar un divisor de voltaje con una alimentación de 10V y una resistencia de 530K (un valor intermedio en el rango de operación del sensor).

Para linealizar la señal, se propone una ecuación obtenida del análisis del circuito.

$$\theta = \frac{1}{m} \left(\frac{V_o R}{V_{cc} - V_o} - b \right) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde m es la pendiente que relaciona la resistencia del sensor con el ángulo de flexión, V_o es el voltaje de salida y V_{cc} es el voltaje de alimentación. Con ésta ecuación es posible relacionar el voltaje leído con el ángulo, sólo hace falta calcular m .

Otra forma en la que se utilizó este sensor es para medir distancia entre sus puntas, de tal manera que se encuentra una relación entre la distancia a medir y la resistencia del sensor. Ésta es una forma que no ha sido reportada en las referencias encontradas para la tesis, y su caracterización es muy similar a la forma en que se calibra para medir ángulos, y después de hacer el análisis, la ecuación que resulta se presenta a continuación.

$$\delta = \frac{1}{m} \left(\frac{V_o R}{V_{cc} - V_o} - b \right) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

En el experimento de calibración, se hacen varias mediciones del sensor sin conectarlo a ningún circuito o alimentación y se flexiona en posiciones conocidas y se hacen las mediciones de resistencia, con los resultados se calcula una pendiente m para cada sensor.

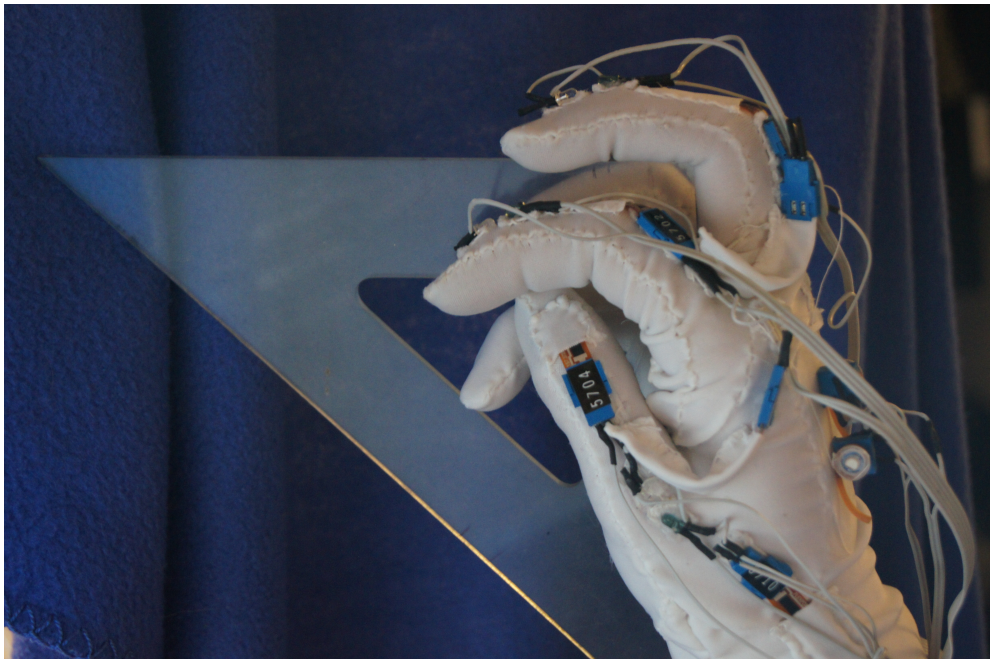


Figura 2.7. Calibración de guante.

| Pulgar | | Muñeca | | Pulgar-Índice | | Índice | | Índice-Medio | | Medio | |
|--------|-------------|--------|-------------|---------------|-------------|--------|-------------|--------------|-------------|--------|-------------|
| Ángulo | Resistencia | Ángulo | Resistencia | Distancia | Resistencia | Ángulo | Resistencia | Distancia | Resistencia | Ángulo | Resistencia |
| 0 | 4.6 | 0 | 7.9 | 19 | 246 | 0 | 1.85 | 11.8 | 227 | 0 | 1.77 |
| 90 | 66.3 | 30 | 12.1 | 35 | 50 | 90 | 45.2 | 15 | 191 | 90 | 37 |
| 45 | 27 | | | 20 | 225 | 45 | 14 | 20 | 138 | 45 | 7.5 |
| 30 | 19.6 | | | 25 | 169 | 30 | 6.9 | 25 | 95 | 30 | 4.1 |
| 60 | 31.3 | | | 30 | 116 | 60 | 23.9 | 28.3 | 79 | 60 | 14.4 |
| | | | | 39 | 23 | | | | | 75 | 20.9 |
| | | | | | | | | | | 105 | 42.8 |

Tabla 2.3. Tabla de resultados de calibración de los sensores de flexión (los ángulos están en grados y la resistencia en Kilo-ohms).

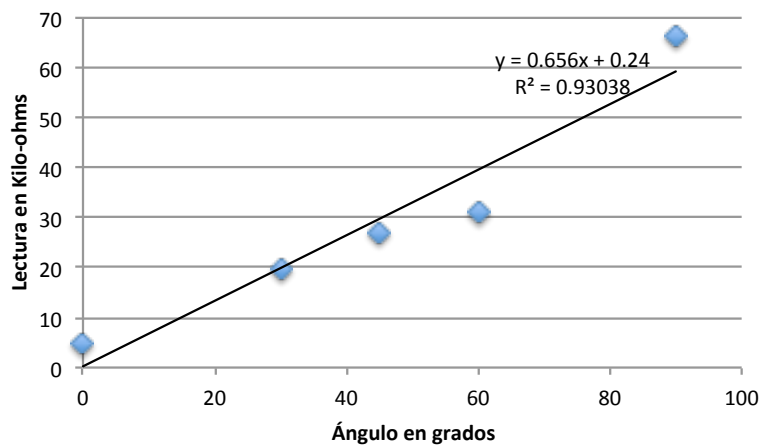


Figura 2.8a. Sensor de flexión en la articulación interfalángica del dedo pulgar

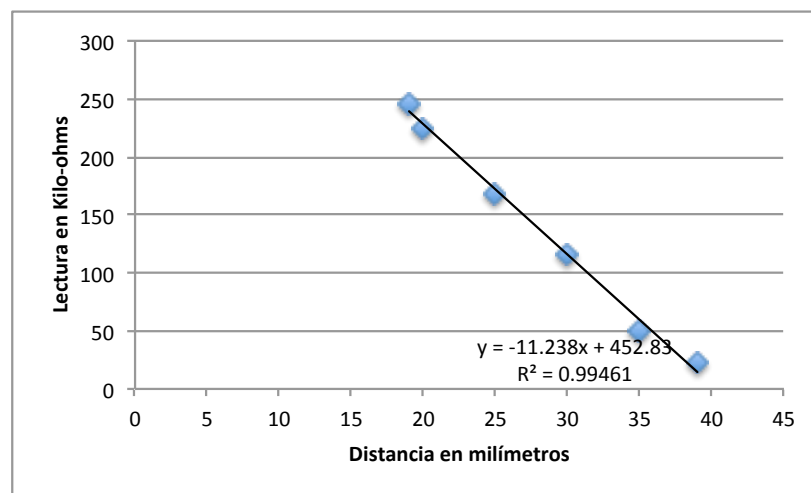


Figura 2.8b. Sensor de distancia entre el dedo índice y del dedo pulgar.

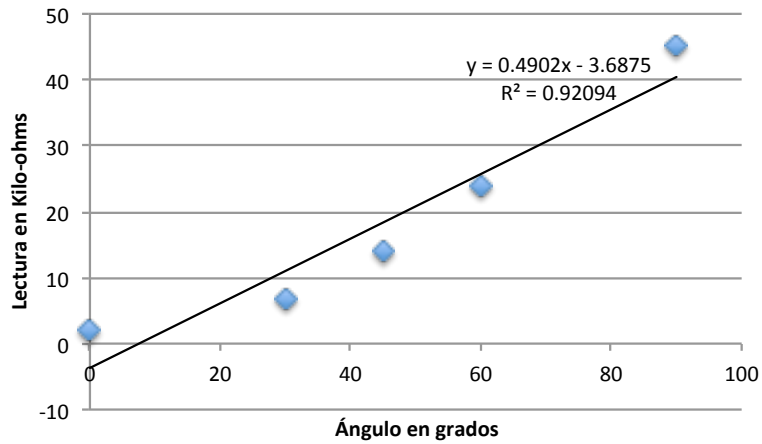


Figura 2.8c. Sensor de flexión en la articulación interfalángica del dedo índice.

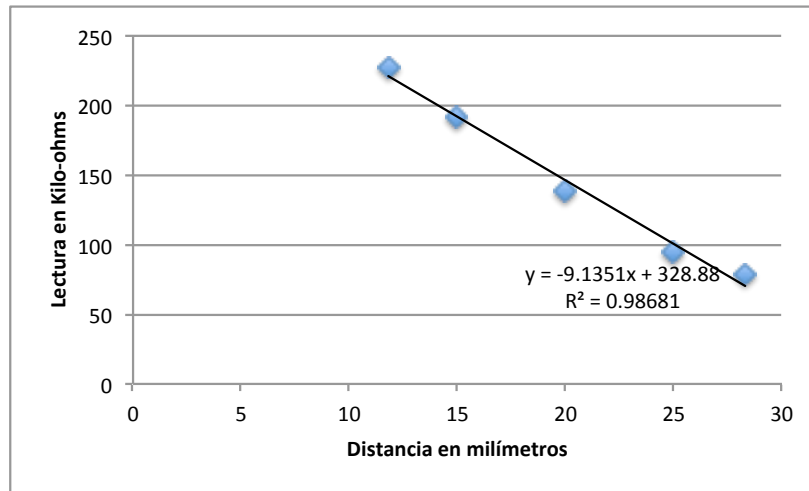


Figura 2.8d. Sensor de distancia entre el dedo índice y el dedo medio.

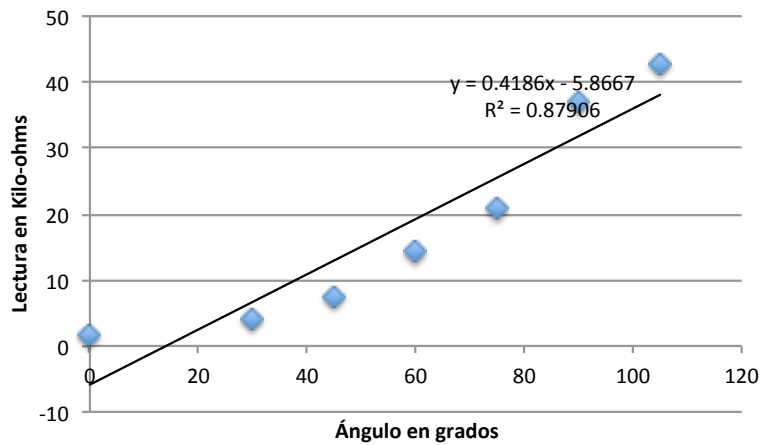


Figura 2.8e. Sensor de flexión en la articulación interfalángica del dedo medio.

Figura 2.8. Gráficas de las caracterizaciones de los sensores de flexión y de distancia.

2.2.3 Sensores por tendones

2.2.3.1 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento parte de la teoría de tendones para actuadores. Esta teoría dice que es posible actuar un mecanismo con motores fuera de este, utilizando tendones y poleas para girar los eslabones.

Usualmente esta teoría es utilizada para manos mecánicas, pero la propuesta de tesis es proponer un sistema basado en tendones para medir desplazamientos en las falanges. Para lograr esto se plantea el sistema considerando la mano humana como el mecanismo a actuar, esto es, que como consideración hipotética se dice que se va a mover la mano con tendones. La ecuación matricial para mover las primeras dos falanges de un dedo con dos tendones (sub-actuado) se describe a continuación.

$$S = A * \theta \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde S es el vector de longitudes de arco desplazados por los tendones, A es la matriz de coeficientes, y θ es el vector de ángulos entre falanges.

$$\begin{bmatrix} s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_1 & -r_2 \\ -r_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{1,0} \\ \theta_{2,1} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Para estimar los ángulos en función del desplazamiento de los tendones se hace un despeje matricial, por lo que se requiere obtener la inversa de la matriz de coeficientes.

$$\begin{bmatrix} \theta_{1,0} \\ \theta_{2,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{r_1} \\ -\frac{1}{r_2} & \frac{1}{r_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Posteriormente se tiene que estimar el ángulo desplazado en la articulación en función del voltaje en el potenciómetro. Por lo que se agrega la caracterización del mismo, considerando su comportamiento como lineal.

$$\begin{bmatrix} \theta_{1,0} \\ \theta_{2,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\mu_p r_p}{r_1} V_2 \\ \frac{\mu_p r_p}{r_2} (V_2 - V_1) \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde μ_p es la pendiente de la función lineal entre el voltaje del potenciómetro y el ángulo de rotación del mismo, r_p es el radio del potenciómetro, r_1 es el radio de la articulación metacarpofalángica, r_2 es el radio de la articulación interfalángica proximal, V_2 es el voltaje del

potenciómetro de la articulación interfalángica, y V_1 es voltaje del potenciómetro de la articulación metacarpofalángica.

Así, es posible medir la rotación de las articulaciones de los dedos sin que los movimientos de los nudillos agreguen ruido a la medición, y con un sistema económico con base en potenciómetros que son un elemento eléctrico confiable y fácil de calibrar.

Por otro lado, cuando el dedo se flexiona está claro que el tendón va a sufrir una tensión que se traducirá en una rotación del eje del potenciómetro, sin embargo, cuando el dedo se relaja no existe alguna fuerza, almacenada o provocada, que regrese al potenciómetro a su posición inicial, por lo que se propone agregar un elemento que almacene energía con respecto a la posición, para posteriormente usar esa energía para mover el potenciómetro; este elemento puede ser un resorte rotacional o traslacional.

2.2.3.2 Caracterización

En este sistema se requiere de más caracterizaciones pero son muy sencillas de llevar a cabo. Lo primero que se puede buscar hacer es medir el radio de las articulaciones; puede ser con un calibrador Vernier. Lo que sí se requiere es caracterizar el potenciómetro, que en este caso serán trimpots, esta caracterización es muy sencilla, y con un osciloscopio y un transportador para medir el ángulo de giro del tornillo del trimpot se puede encontrar la relación entre voltaje y ángulo y calcular la pendiente.

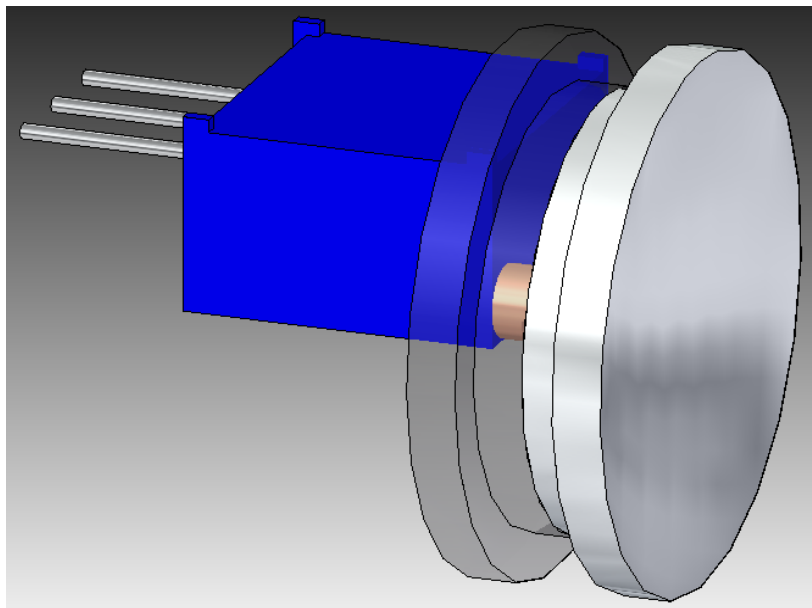


Figura 2.9a. Diseño del sensor por tendones.

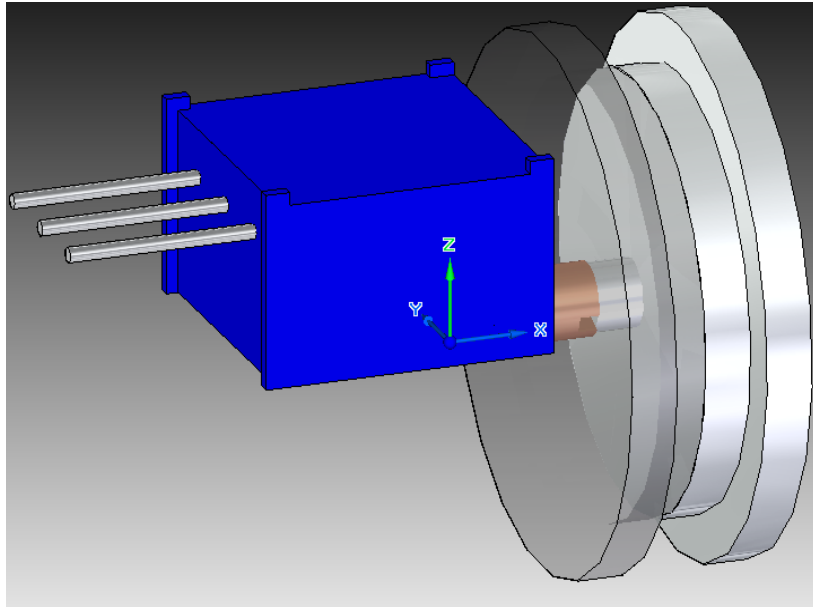


Figura 2.9b. Diseño del sensor por tendones.

2.2.3.3 Calibración

Utilizando un sistema de plantillas descrito anteriormente se puede comprobar las mediciones anteriormente descritas. Es importante asegurar que el resorte incorporado al potenciómetro no deforme la estructura del guante, para ello se incorpora una placa plástica en el dorso de la mano para fungir como plataforma rígida y darle mayor soporte a éstos sensores y minimizar los errores de medición.

2.3 Instrumentación del guante

Para explicar dónde se utilizó cada sensor se presenta el siguiente diagrama esquemático de los grados de libertad de la mano en un enfoque para ser aplicado en la mano mecánica (con las simplificaciones que se plantearon para el diseño de la mano mecánica).

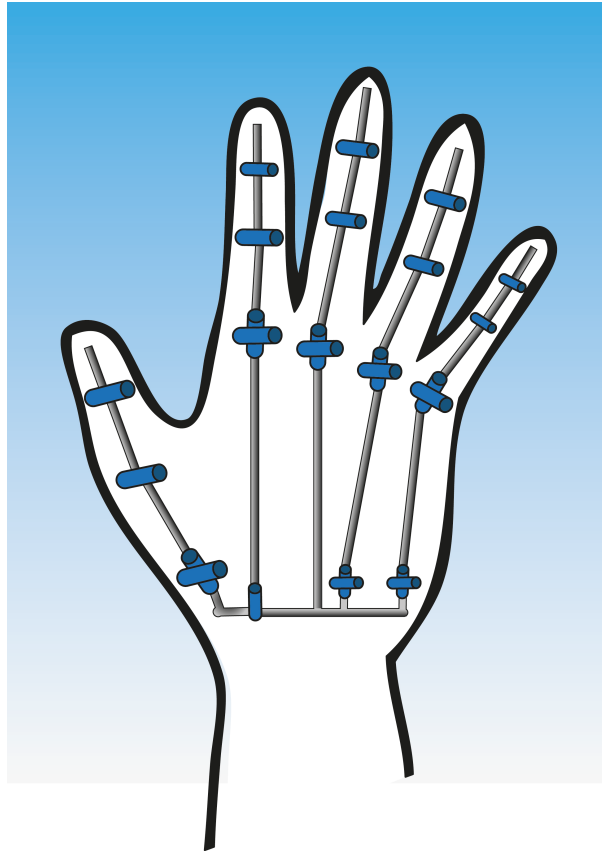


Figura 2.10. Diagrama esquemático de los movimientos de la mano humana con simplificaciones, cada cilindro representa un grado de libertad en la articulación.

Para la mayoría de las articulaciones de un solo grado de libertad los sensores optoeléctricos presentan la mejor solución, salvo por aquellas articulaciones donde su rango de movimiento pasa los 80 grados de movimiento, pero los sensores de flexión piezoeléctricos cubren ésta dificultad aunque sea a un costo mayor. La dificultad se presenta cuando hay varias articulaciones juntas definiendo un movimiento conjunto y no es posible medir cada una por separado, o la articulación es de dos grados de libertad. Es entonces donde se plantean nuevas soluciones para instrumentar la mano humana. En el caso particular de articulaciones con múltiples movimientos, las de los nudillos por ejemplo, se propone usar la teoría de tendones y potenciómetros, mientras que para el caso de articulaciones múltiples no medibles individualmente, como es en la base del pulgar y el arco de los nudillos, se utiliza un sensor de flexión con una longitud mayor que sea capaz de medir

todas las articulaciones juntas y se plantea una ecuación arbitraria para estimar los movimientos individuales.

A continuación se presenta un dibujo esquemático del diseño del guante con los sensores incluidos para definir la localización de cada uno.

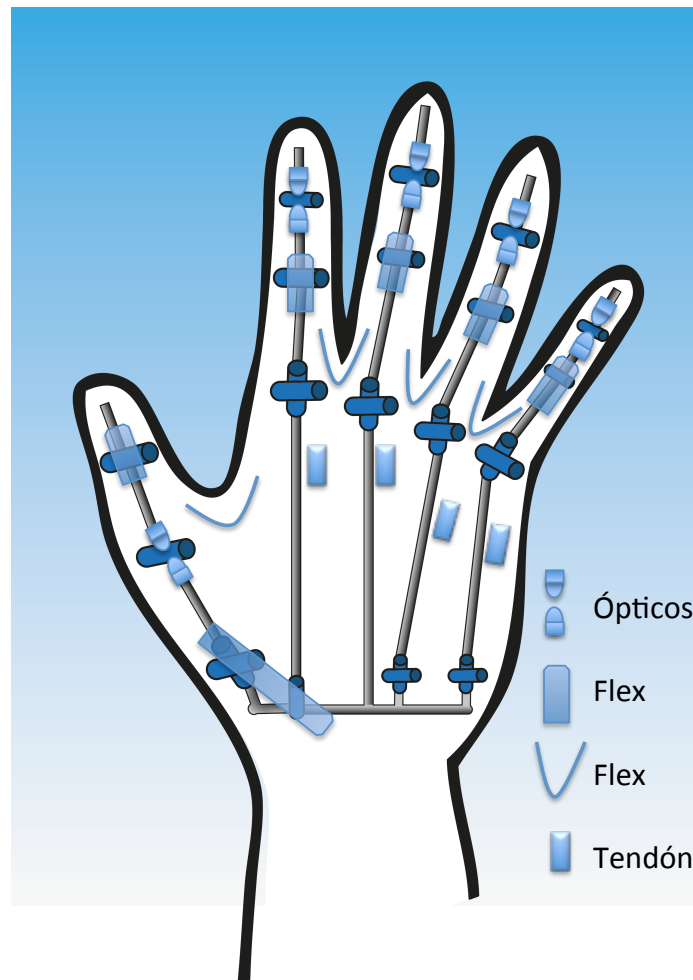


Figura 2.11. Dibujo esquemático del guante instrumental.

Para hacer los experimentos iniciales se decidió instrumentar tres dedos: el pulgar, el índice y el medio. De ésta manera se puede probar la efectividad y resolución de los sensores para obtener conclusiones acerca del diseño del guante.

Se utilizaron los tres tipos de sensores dependiendo de la articulación que se requería medir; en base al número de grados de libertad, el rango de operación y a la resolución. La siguiente figura presenta el material utilizado en el guante.



Figura 2.12. Guante instrumental, sensores optoelectrónicos, piezoeléctricos y potenciómetros.

Con todo lo anterior se construye un sistema de coordenadas de la mano completa que posteriormente se mapea con el sistema de coordenadas de la mano mecánica, haciendo que sea sencillo la definición de las posiciones de la mano mecánica a partir de las mediciones obtenidas en el guante instrumental.

2.4 Análisis del prototipo

Para comprobar la utilidad del guante se requiere comprobar la precisión que es la capacidad de un instrumento de dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones.

El diseño del experimento consiste en construir un modelo que tiene como objetivo definir una posición arbitraria pero a la que siempre se puede llegar de nuevo. El usuario se coloca el guante instrumentado y sujeta el molde, se registran las mediciones de cada sensor y se libera el molde para extender la mano completamente, nuevamente se sujeta el molde procurando colocar la mano en la misma posición que en el anterior registro y se obtienen los valores de cada sensor.

Este proceso se realiza 10 veces y se calcula la desviación estándar de cada sensor y del guante completo con un promedio de cada tipo de sensor.

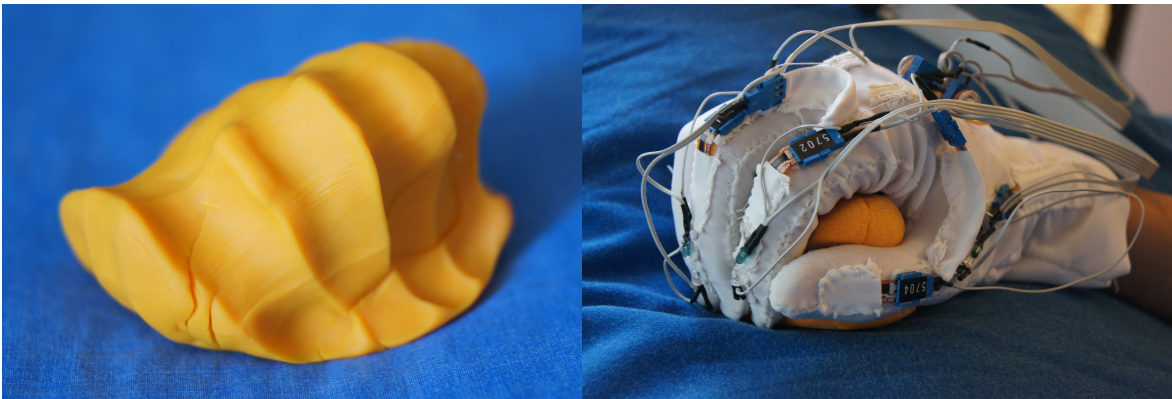


Figura 2.13. Molde para pruebas de repetibilidad.

Después del experimento se obtuvo que la desviación estándar del guante instrumental para repetir la posición del molde es de 1.755774, esto se hizo obteniendo la desviación estándar de cada sensor y posteriormente haciendo un promedio de todos. De tal manera que para cada tipo de sensor se tiene una desviación estándar, siendo los sensores por flexión los más confiables con un valor de 0.216025, seguidos por los sensores ópticos con un valor de 1.369509 y finalmente los sensores por tendones con un valor de 3.681789.

2.5 Análisis de resultados

Gracias a los guantes instrumentales, los trabajadores pueden mejorar sus habilidades, simulando las consecuencias de sus manipulaciones en un ambiente virtual de condiciones riesgosas para cuestiones de seguridad, y así, personal profesional puede ser entrenado tales como soldados, astronautas, bomberos, etc., sus acciones y la ergonomía de su ambiente puede ser evaluada, los programadores pueden ser auxiliados con herramientas de programación automática, personas pueden ser ayudadas en un aparato de control remoto, y muchas otras situaciones donde el uso de un guante instrumental puede mejorar el desarrollo o una labor [49].

Para la construcción del guante instrumental de ésta tesis se utilizaron, caracterizaron y calibraron tres tipos de sensores. Los sensores optoelectrónicos son baratos de adquirir, no son sencillos en su caracterización, pero si se logra bien esta parte, es posible obtener mediciones correctas de la mano y así ser capaz de reconstruir sus posturas. La mayor limitante que tiene es que para valores de ángulos mayores a los 60 grados y menores a 30, empiezan a dar errores de medición y a perder la visión entre el emisor y el receptor, lo que se puede entender como una sensibilidad baja, por lo que no son buenos para medir articulaciones con un rango de movimiento amplio. Otra desventaja en este tipo de sensores, y una vez superada la dificultad de la no linealidad, es

que se ven afectados también por movimientos fuera del eje al cual fueron considerados, ya que no son capaces de distinguir si el movimiento medido es parte del grado de libertad al que fueron fijados, o si es de un grado de libertad extra presente en la misma articulación. Por lo que no son buenos para ser agregados en articulaciones con múltiples grados de libertad.

Los sensores piezoeléctricos superan esta última desventaja de los sensores optoelectrónicos, pero cuando el usuario desea hacer el movimiento en el grado de libertad extra, se ve impedido físicamente por la presencia de este sensor, y compromete la estructura del guante, provocando una posible interferencia con otros sensores circundantes. Además de que son capaces de medir movimientos superiores a los 60 grados de rotación sin mayor dificultad, sin embargo, la diferencia entre los valores de caracterización de un sensor a otro es notable y dificulta la construcción del circuito en el sentido de que se debe calibrar la resistencia para cada sensor. Por otra parte, el enfoque extra que se le dio a este sensor al medir distancia y no sólo ángulos resultó ser muy precisa y confiable, ya que en los resultados presentó un comportamiento lineal con poca varianza y error, incluso mejores que cuando se usaron como sensores de ángulo.

La opción de los sensores por tendones cubre con todas las dificultades de los sensores anteriores; pueden medir ángulos mayores a 60 grados sin presentar en ningún momento no linealidades, son muy fáciles de conseguir y su precio es relativamente bajo. Además cuentan con una resolución infinita; su resolución en el sistema depende del CAD empleado. Pero tienen la dificultad de la implementación en el guante, ya que, si bien las piezas a manufacturar son sencillas, sí ocupan un espacio en el dorso de la mano que limita el número de sensores posibles a utilizar, y esto provoca además de todo, que la calibración sea sensible a la estructura del guante, que en el caso de este tipo de sensores, si no se toman las debidas precauciones, puede verse comprometida ya que los tendones generan una fuerza que pudiera doblar el guante en pliegues.

Finalmente, hablando acerca de la repetibilidad y exactitud, los sensores por flexión resultaron ser muy confiables y fáciles de calibrar, lo complicado con ellos es la sensibilidad en todo el rango de operación, pues para convertir la señal de resistencia en una de voltaje es necesario un circuito divisor de voltaje cuya sensibilidad será variable en todo el rango de operación del sensor, sin embargo, este sensor es capaz de registrar cambios pequeños en la postura del guante, lo cual hizo algo truculento el experimento pues era posible variar un poco la postura de la mano dentro del molde y así variar el valor de la lectura a conveniencia. Con respecto a los sensores ópticos, su sensibilidad depende del circuito de acondicionamiento (siguiente capítulo), por lo que no es muy sencillo su caracterización y calibración, además de que poseen un rango de operación limitado, sin embargo, debido a que su funcionamiento no involucra una fuerza sobre el guante, son confiables y sencillos de implementar. Por último, los sensores por tendones, éstos son los más fáciles de calibrar y caracterizar, su inconveniencia radica en que ejercen la mayor fuerza sobre el

guante, y en algunos casos es posible que deformen la tela del mismo y eso les afecta en la repetibilidad, por ello son los que tienen el mayor valor en la desviación estándar.



Figura 2.14. Guante instrumental.

Capítulo 3. Del guante a la mano

3.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es presentar al lector los sistemas de coordenadas del guante instrumental a partir de los cuales se reconstruyen los valores de los ángulos presentes en la mano mecánica. Posteriormente, se analizan los circuitos empleados para acondicionar las señales de los sensores, la conversión analógico-digital mediante Arduino (*ver apéndice A2*) y la adquisición de datos y análisis de las señales utilizando LabVIEW (*ver apéndice A3*).

3.2 Sistema de coordenadas del guante instrumental

Para construir el sistema de coordenadas del guante instrumental se plantea que para las articulaciones sencillas (de un sólo grado de libertad y medible individualmente) es suficiente con caracterizar el sensor y los resultados en grados son directos. Sin embargo, para el resto de las articulaciones, se deben plantear ecuaciones o sistemas de ecuaciones para calcular los grados de movimiento de las articulaciones; ya que el sensor no mide directamente el movimiento de la articulación.

Primeramente, es en éstas últimas articulaciones donde se comienza por el análisis para al final plantear las coordenadas completas del guante instrumental.

En el caso particular de los nudillos, se tienen dos grados de libertad después de las simplificaciones (ver el capítulo de la mano mecánica), uno de los grados de libertad; el de aducción, se puede medir directamente con el sensor propuesto a base de tendones, pero el movimiento lateral del dedo no se mide directamente, sino que se mide la distancia relativa entre dedos con un sensor de flexión piezoeléctrico en forma de “U”, y se plantea un análisis cinemático por el método de matrices homogéneas usando las *ecuaciones 1.1 a 1.5*.

$$\begin{aligned} -x_a + x_1 \cos(\theta_2) - y_1 \text{Sen}(\theta_2) + x_p (\cos(\theta_2)\cos(\theta_3) - \text{Sen}(\theta_2)\text{Sen}(\theta_3)) &= 0 \\ -y_a + y_1 \cos(\theta_1)\cos(\theta_2) - z_1 \text{Sen}(\theta_1) + x_1 \cos(\theta_1)\text{Sen}(\theta_2) + x_p (\cos(\theta_1)\cos(\theta_3)\text{Sen}(\theta_2) + \cos(\theta_1)\cos(\theta_2)\text{Sen}(\theta_3)) &= 0 \\ -z_a + y_1 \text{Sen}(\theta_1)\cos(\theta_2) + z_1 \cos(\theta_1) + x_1 \text{Sen}(\theta_1)\text{Sen}(\theta_2) + x_p (\text{Sen}(\theta_1)\cos(\theta_3)\text{Sen}(\theta_2) + \text{Sen}(\theta_1)\cos(\theta_2)\text{Sen}(\theta_3)) &= 0 \\ x_2 - x_a + x_3 \cos(\theta_6) - y_2 \text{Sen}(\theta_6) &= 0 \\ -y_a + y_2 \cos(\theta_5)\cos(\theta_6) + x_3 \cos(\theta_5)\text{Sen}(\theta_6) &= 0 \\ -z_a + y_2 \text{Sen}(\theta_5)\cos(\theta_6) + x_3 \text{Sen}(\theta_5)\text{Sen}(\theta_6) &= 0 \end{aligned}$$

Ecuación 3.1

Estas ecuaciones se buscan igualar a ceros para obtener los valores de θ_2 , θ_3 , θ_6 , x_a , y_a y z_a . Para el resto de las variables se debe de medir directamente en el guante las dimensiones, los valores de los sensores de tendones se sustituyen por su valor en ángulo, y el sensor de flexión sustituye su valor en milímetros.

Las siguientes figuras muestran la construcción de las bases.

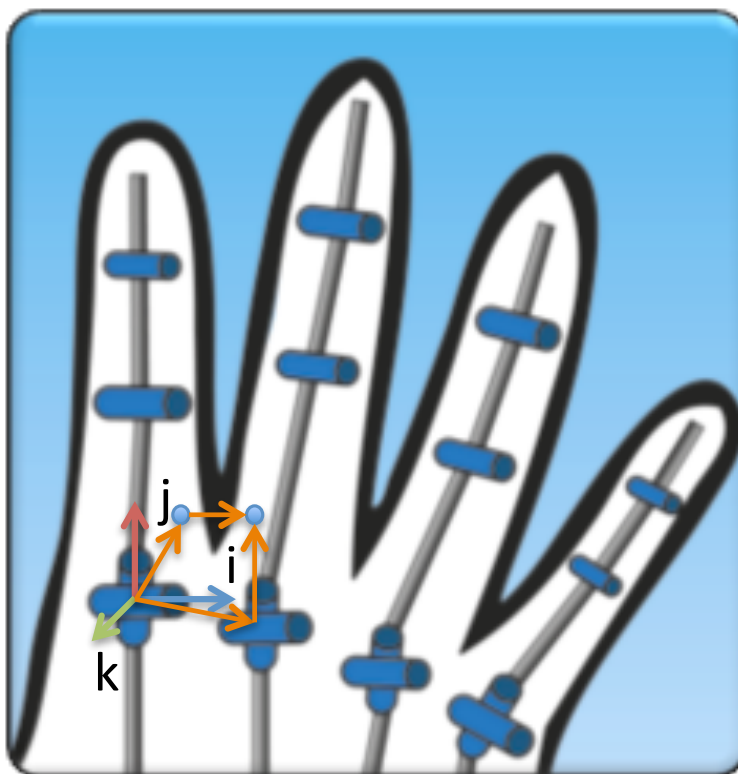


Figura 3.1. Base local y vectores para la construcción de las ecuaciones de posición de los dedos índice y medio.

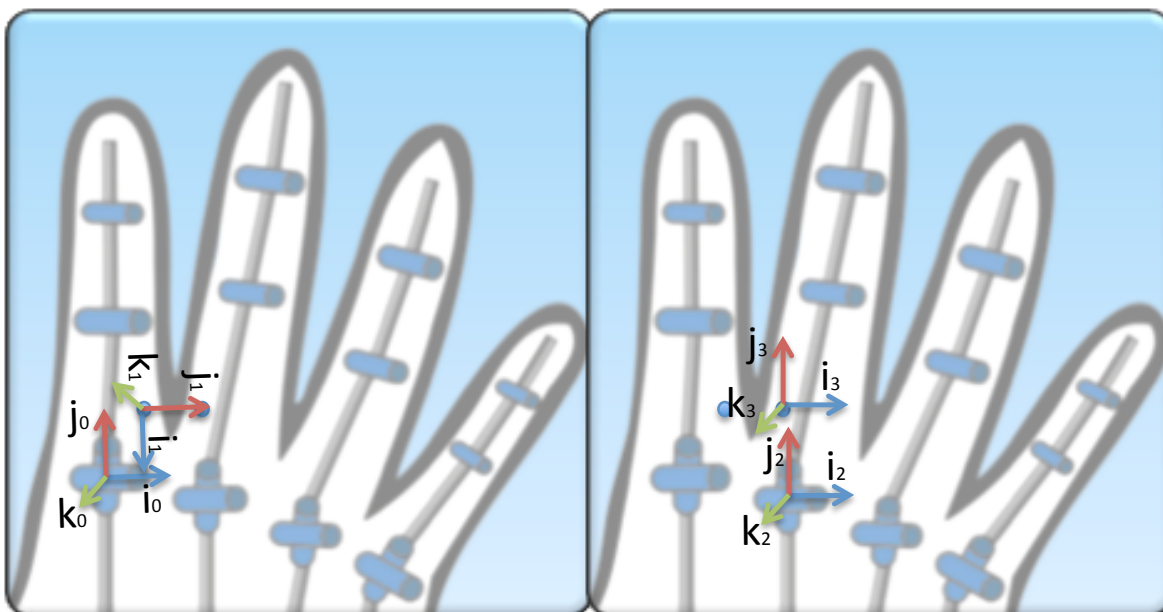


Figura 3.2. Construcción de las bases locales (1, 2, 3) a partir de la base inercial (0).

Los puntos señalados en las imágenes corresponden al centro de los nudillos y los puntos donde el sensor de flexión se une con el guante. De ésta manera, lo que este sensor mide es la distancia entre puntos en el guante.

La construcción de las *ecuaciones 3.1* se empieza con la *figura 3.2*, partiendo de la base inercial (0) y realizando cuatro transformaciones, primero dos translaciones sobre los ejes j e i y luego dos rotaciones sobre los ejes j y k , de tal manera que se obtenga la base local 1. De ahí, se realiza una translación sobre el eje j . Por otro lado, se realiza una translación desde la base inercial sobre el eje i , para llegar a la base local 2, posteriormente se realizan dos translaciones sobre los ejes j e i . Finalmente, se igualan ambos desarrollos para construir seis ecuaciones escalares, que son precisamente las *ecuaciones 3.1*.

Para el pulgar y de manera muy similar utilizando matrices homogéneas se plantean las bases que definen el movimiento del pulgar, la diferencia radica en que hay dos movimientos en la base del pulgar que no pueden ser medidos individualmente, sino que se usa un sensor de flexión para medir ambos movimientos y posteriormente estimar el movimiento de cada uno con una ecuación propuesta arbitrariamente.

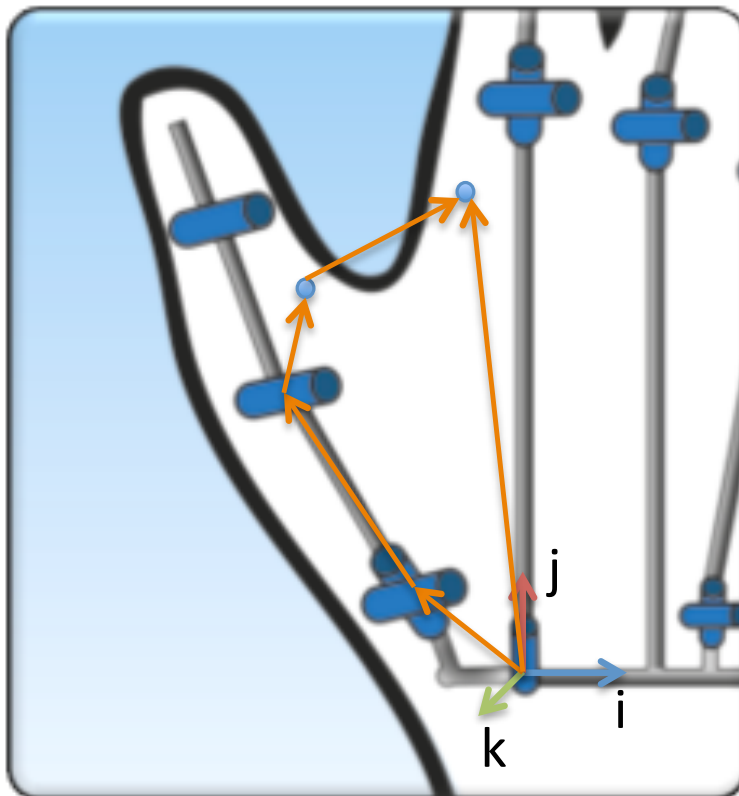


Figura 3.3. Base local y vectores para la construcción de las ecuaciones de posición del dedo pulgar.

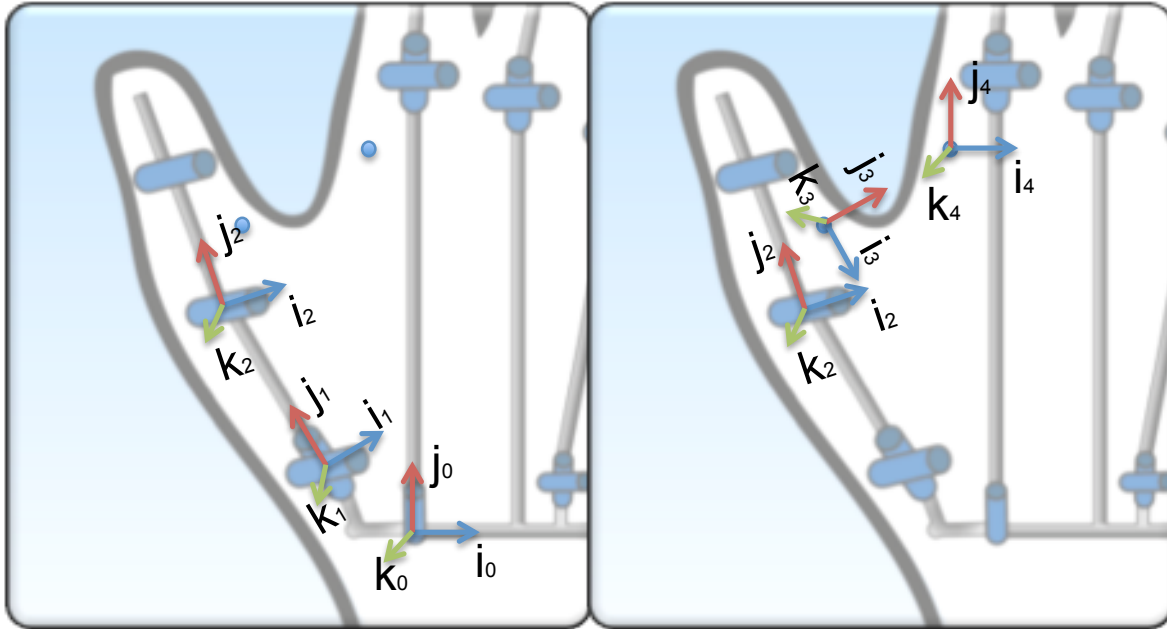


Figura 3.4. Construcción de las bases locales (1, 2, 3, 4) a partir de la base inercial (0).

Los puntos señalados en las imágenes corresponden a las articulaciones y a los puntos donde el sensor de flexión que mide la aducción del pulgar se une con el guante. Nuevamente, este sensor mide distancia que se utilizará en las ecuaciones de posición.

Con las figuras 3.3 y 3.4 y las ecuaciones de matrices homogéneas 1.1 a 1.6, se van construyendo las transformaciones pertinentes desde la base inercial hasta la base local 4. El proceso inicia con dos translaciones sobre los ejes i y k de la base inercial y luego dos rotaciones sobre los ejes j y k para llegar a la base local 1. Después se hace un desplazamiento sobre el eje j de la última base y una rotación sobre el eje k ; se llega a la base 2. Nuevamente se realizan dos translaciones sobre los ejes i y k para posicionar el origen de la base sobre el punto de la izquierda en la figura (que representa la inserción del sensor en el guante) y luego se realizan dos rotaciones sobre los ejes j y k , con lo que se llega a la base 3. A continuación se realiza un desplazamiento sobre el eje j hasta llegar a el origen de la base 4. Por el otro lado de la ecuación, se parte desde la base inercial (0) con dos desplazamientos sobre los ejes j y k , llegando al origen de la base 4 igualando ambas partes de la ecuación. Finalmente se hace un arreglo de la ecuación para ser igualada a 0.

$$\begin{aligned}
& 14 + 19\text{Sen}(\phi_1) + \text{Cos}(\phi_1 + \phi_2) \left(\left(19 + z_p \text{Cos}(\phi_5) \text{Cos}(\phi_6) \right) \text{Sen}(\phi_4) + \text{Cos}(\phi_4) \left(5 + z_p \text{Sen}(\phi_6) \right) \right) \\
& \quad + \text{Sen}(\phi_1 + \phi_2) \left(\text{Sen}(\phi_3) \left(3 - z_p \text{Cos}(\phi_6) \text{Sen}(\phi_5) \right) \right. \\
& \quad \left. + \text{Cos}(\phi_3) \left(46 + \text{Cos}(\phi_4) \left(19 + z_p \text{Cos}(\phi_5) \text{Cos}(\phi_6) \right) - \text{Sen}(\phi_4) \left(5 + z_p \text{Sen}(\phi_6) \right) \right) \right) = 0 \\
& \quad - 49 + \text{Cos}(\phi_3) \left(3 - z_p \text{Cos}(\phi_6) \text{Sen}(\phi_5) \right) \\
& \quad + \text{Sen}(\phi_3) \left(-46 - \text{Cos}(\phi_4) \left(19 + z_p \text{Cos}(\phi_5) \text{Cos}(\phi_6) \right) + \text{Sen}(\phi_4) \left(5 + z_p \text{Sen}(\phi_6) \right) \right) = 0 \\
& -\text{Sen}(\phi_1 + \phi_2) \left(5\text{Cos}(\phi_4) + \left(19 + z_p \text{Cos}(\phi_5) \text{Cos}(\phi_6) \right) \text{Sen}(\phi_4) \right) - z_p \text{Cos}(\phi_2) \text{Cos}(\phi_4) \text{Sen}(\phi_1) \text{Sen}(\phi_6) \\
& \quad + \text{Cos}(\phi_1) \left(19 - z_p \text{Cos}(\phi_4) \text{Sen}(\phi_2) \text{Sen}(\phi_6) \right) \\
& \quad + \text{Cos}(\phi_1 + \phi_2) \left(\text{Sen}(\phi_3) \left(3 - z_p \text{Cos}(\phi_6) \text{Sen}(\phi_5) \right) \right. \\
& \quad \left. + \text{Cos}(\phi_3) \left(46 + \text{Cos}(\phi_4) \left(19 + z_p \text{Cos}(\phi_5) \text{Cos}(\phi_6) \right) - \text{Sen}(\phi_4) \left(5 + z_p \text{Sen}(\phi_6) \right) \right) \right) = 0
\end{aligned}$$

Ecuación 3.2

De éstas ecuaciones se obtienen los valores de ϕ_3 , ϕ_6 y ϕ_5 .

3.2.1 ¿Por qué es importante el sistema de coordenadas?

El guante instrumental adquiere la magnitud de un ángulo o una distancia entre puntos de la mano del usuario, sin embargo, sólo con las magnitudes no se puede controlar la mano mecánica, se requiere reconstruir la postura de la mano humana con todo y los tamaños de huesos; de palma y dedos, por ello que se construye un sistema de coordenadas del guante que posteriormente se hace una transformación de sistemas para mapear cada variable en la mano mecánica.

Como la mano mecánica está basada en los arcos principales de la mano humana y los grados de libertad son los mismo, y además el guante instrumental, a su vez, está basado en la cinemática de la mano mecánica, todos los sistemas de coordenadas son iguales, cambiando solamente en las dimensiones de los huesos. De tal manera que cuando se adquieren los valores de las variables de la mano humana con el guante instrumental y se reconstruye un sistema de coordenadas del guante a partir de dichos valores usando las ecuaciones del apartado anterior, se tienen las variables necesarias y suficientes para comandar la mano mecánica.

3.3 Circuito

Las señales obtenidas por los sensores no son útiles para ser medidas directamente por Arduino y con el propósito de aprovechar al máximo el convertidor analógico-digital de la tarjeta (0-5 V) se deben de acondicionar para una mayor eficacia.

Posteriormente, como la conversión analógico-digital da una palabra de 10 bits (0-1023) es necesario traducir esa palabra a la variable que el sensor está leyendo. Este paso va de la mano con la calibración de los sensores.

Finalmente, para lograr la comunicación con la computadora a través del puerto USB es necesario proponer un protocolo de comunicación y acondicionar una vez más el resultado para ser transmitido.

3.3.1 Acondicionamiento

Para los sensores optoelectrónicos se emplea un amplificador operacional alimentado por 5 volts de corriente directa. Este AO está configurado para funcionar como un convertidor de corriente a voltaje[22].

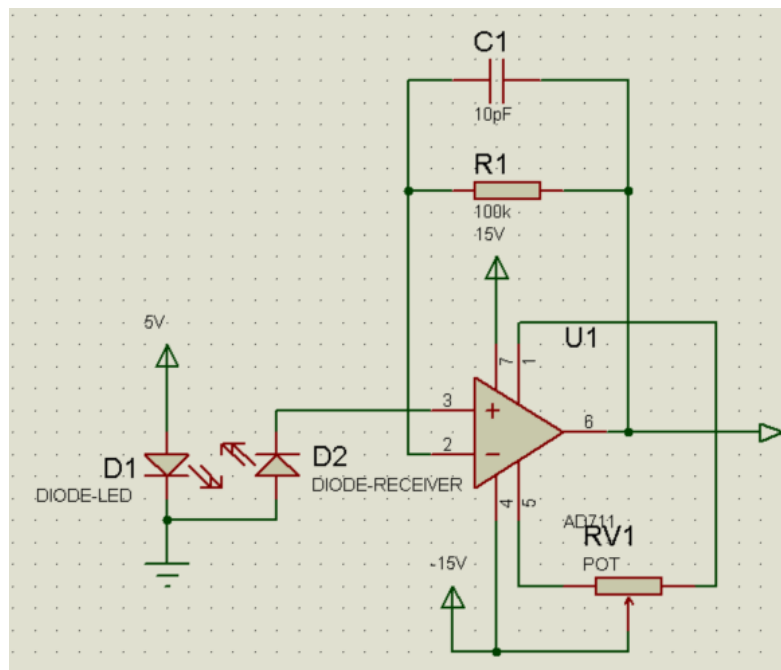


Figura 3.5. Circuito de acondicionamiento de la señal de los sensores optoelectrónicos.

Los resultados del circuito anterior provocan que la señal de voltaje obtenida varíe desde 0.7[V] a 4.8[V], lo que es un buen rango para usarse con la tarjeta de Arduino.

Para los sensores de flexión piezoeléctricos, *Flex Sensors*, se propuso usar un divisor de voltaje con una alimentación de 10 volts y una resistencia equivalente al valor medio del rango en el que el sensor se mueve en la aplicación. A continuación se presenta el circuito y el análisis matemático.

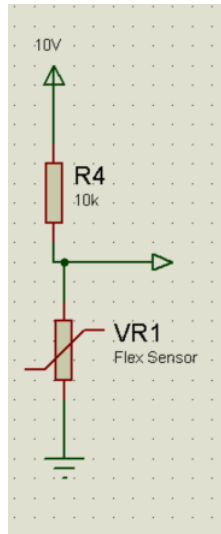


Figura 3.6. Circuito de acondicionamiento de la señal de los sensores piezoeléctricos.

La ecuación de un divisor de voltaje es la siguiente.

$$V_o = \frac{x}{R + x} V_{cc} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Definiendo la resistencia del sensor (x) como una función lineal respecto al ángulo de flexión.

$$x = m * \theta + b \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Sustituyendo y despejando el ángulo.

$$\theta = \frac{1}{m} \left(\frac{V_o R}{V_{cc} - V_o} - b \right) \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Definiendo la resistencia del sensor (x) como una función lineal respecto a la distancia de punto a punto.

$$x = m * \delta + b \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Sustituyendo y despejando la distancia.

$$\delta = \frac{1}{m} \left(\frac{V_o R}{V_{cc} - V_o} - b \right) \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Para los sensores por tendones, se utilizan como divisores de voltaje, pero como su desplazamiento en grados no es muy amplio, la salida en voltaje no tiene un rango con el que se aproveche el conversor analógico-digital, por lo que una amplificación es conveniente en este caso.

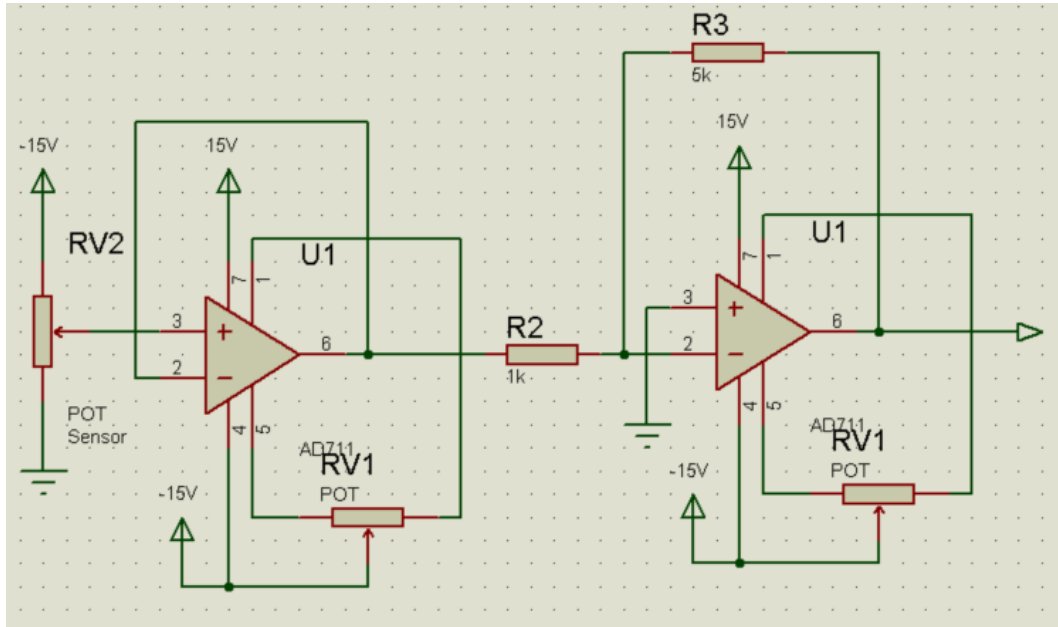


Figura 3.7. Circuito de acondicionamiento de la señal de los sensores por tendones.

Así, la señal resultante oscila entre los 0[V] y 4.6[V].

3.3.2 Protocolo de comunicación

El protocolo consiste en una manera para que Arduino y LabVIEW siempre se logren comunicar y entender para todos los valores de los sensores. En otras palabras, construir un idioma con el cual van a transmitir información.

Si bien LabVIEW sólo tiene que recibir los datos obtenidos por Arduino, en este protocolo sí se va a transmitir información en ambos canales. La razón es que Arduino tiene que saber cuál valor es el que necesita LabVIEW y, además, tiene que darle tiempo a que LabVIEW esté listo para recibir información. Dicho esto, lo primero que hace Arduino es adquirir el valor del primer sensor, acondicionarlo, y preguntar al buffer de comunicaciones si LabVIEW está listo para recibir el dato, si estuviera listo, escribe el valor del sensor pero acondicionándolo por segunda vez para evitar errores, esto es, multiplicando el resultado por 100; para mantener dos decimales en la resolución, y sumándole 100,000; para que la palabra siempre tenga el mismo tamaño, es decir, el mismo número de cifras. De tal manera que LabVIEW reciba 6 dígitos, el primero siempre siendo un 1, y el resto es el número correspondiente al valor de la variable, con los primeros 3 los enteros y los últimos 2 los decimales.

Una vez que Arduino envía el dato, obtiene el valor del segundo sensor, lo acondiciona, y pregunta al buffer si LabVIEW está listo, y así con cada sensor repitiendo el ciclo indefinidamente. Si en algún punto LabVIEW no estuviera listo cuando Arduino lo está, éste último sigue su rutina sin esperar al primero.

Para explicar mejor el proceso, el siguiente diagrama de flujo del programa en Arduino.

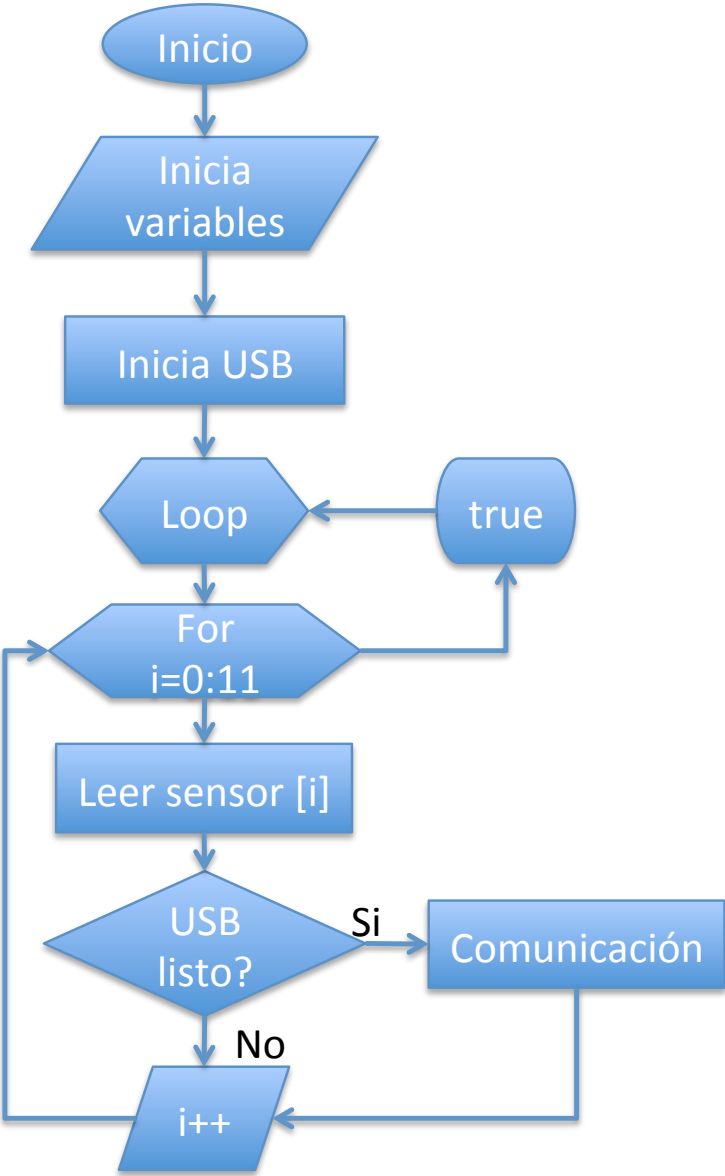


Figura 3.8. Diagrama de flujo del programa en Arduino.

Desde el punto de vista de LabVIEW, lo primero que hace en su rutina es avisar a Arduino que está listo para recibir el valor del primer sensor, y a diferencia de Arduino, LabVIEW sí espera hasta tener una respuesta, o hasta que salga un error del buffer. Una vez que Arduino le transmite el primer dato, lo siguiente es asegurarse que exista un 1 al inicio de la palabra para confirmar que el

protocolo se está cumpliendo, a continuación se convierte a variable numérica y se despliega el valor en pantalla para que el usuario sea consciente que el proceso se está llevando a cabo. Posteriormente, LabVIEW avisa a Arduino que está listo para recibir el segundo dato y hace lo mismo que hizo para el primero y para todos los demás.

Una vez que LabVIEW obtuvo los valores de todos los sensores, utiliza los necesarios para resolver las ecuaciones simultáneas y así calcular el valor de todos los datos necesarios para construir el sistema de coordenadas de la mano mecánica. Al final, despliega los resultados obtenidos al usuario y el proceso se inicia nuevamente.

Nuevamente, una imagen vale más que mil palabras, a continuación el diagrama de flujo del programa.

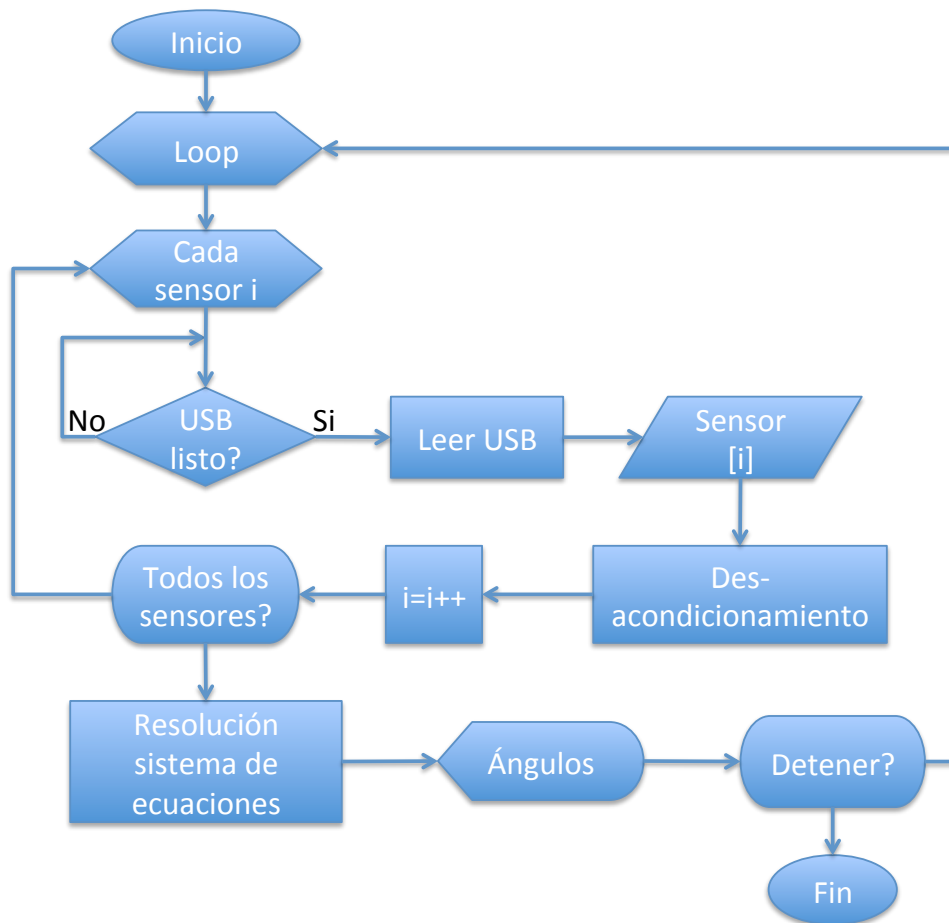


Figura 3.9. Diagrama de flujo del programa en LabVIEW.

3.4 Interfaz gráfica

Ya se presentaron los pasos necesarios para comunicar el guante con la computadora pero ¿qué es lo que el usuario recibe de información? Una vez más es con LabVIEW con lo que se despliega la información al usuario.

LabVIEW presenta dos ventanas, una en la cual se puede hacer toda la programación gráfica y la otra es tal cual una interfaz gráfica. A continuación se ilustra la pantalla de interfaz y se explican sus componentes.

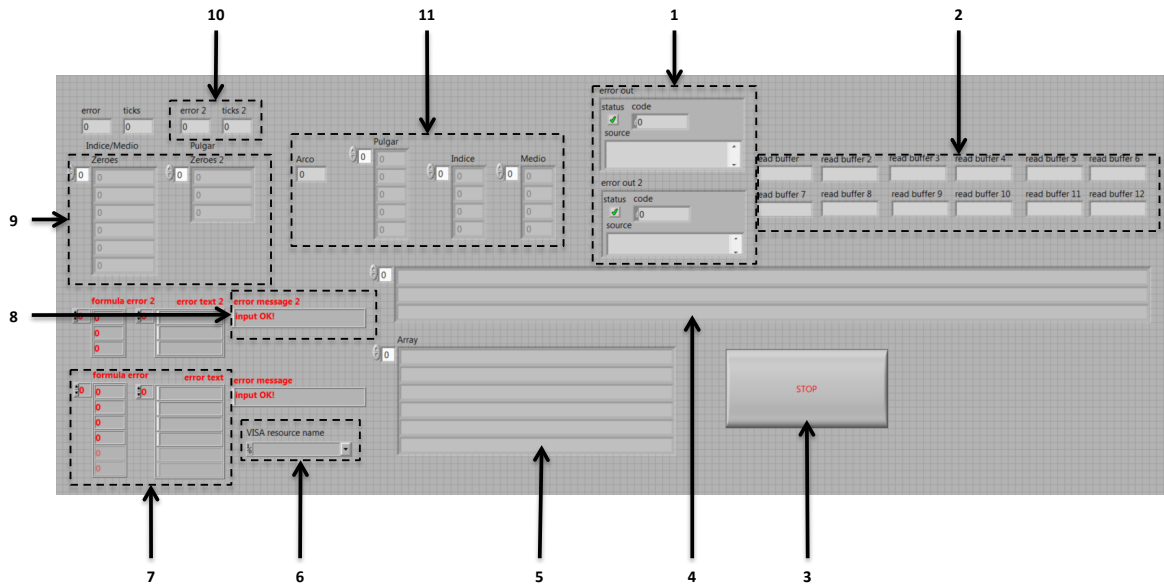


Figura 3.10. Interfaz gráfica con el usuario.

1. Indicadores de error en la comunicación con el puerto USB.
2. Lecturas de los valores obtenidos del buffer después de la comunicación con Arduino.
3. Botón de paro general.
4. Despliegue de las ecuaciones simultáneas para el dedo pulgar.
5. Despliegue de las ecuaciones simultáneas para el dedo índice y medio.
6. Control del puerto serial USB.
7. Despliegue de errores en la construcción de las fórmulas e indicación de en cuál de ellas está el error.
8. Mensaje de error en las fórmulas.
9. Resultados de la solución de los sistemas de ecuaciones no lineales.

10. Despliegue de error en la solución del sistema de ecuaciones y el tiempo que tarda en resolver en caso de que no exista error.
11. Despliegue de todos los valores de las variables del sistema de coordenadas de la mano mecánica.

Para ver el programa gráfico en LabVIEW véase el apéndice C3.

3.5 De la computadora a la mano

Ya que se tienen todos los datos, el usuario es consciente que el sistema de adquisición está completo y funcionando, ¿qué hacer con la información?

Se propuso desde un inicio que ésta tesis iba a sentar las bases para un proyecto más grande de tele-operación. Lo siguiente a hacer es transmitir los resultados del sistema a una etapa de control de la mano mecánica.

En ésta etapa de control se considera el diseño mecánico de la mano propuesta en ésta tesis para la dinámica, de tal manera que al final se tendrá un sistema completo de tele-operación. ¿Y después? Lo siguiente será implementar sensores a la mano mecánica y actuadores al guante y crear un tele-control para un sistema de tele-presencia.

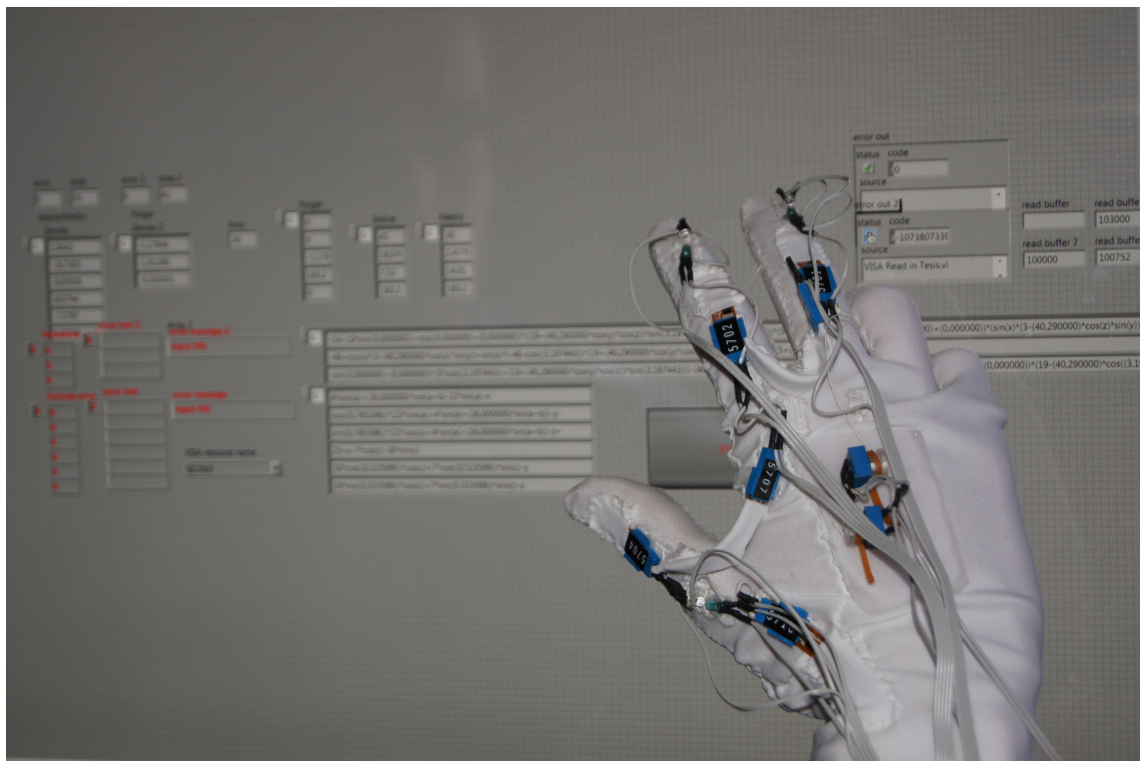


Figura 3.11. Del guante a la computadora.

Apéndices

A1. Programa en Wolfram Mathematica para hacer los cálculos matemáticos de coordenadas

Análisis cinemático de los sensores del guante instrumental

Método de matrices homogéneas

Funciones

(*Matrices Básicas*)

Tz1[x_]:={{1,0,0,x},{0,1,0,0},{0,0,1,0},{0,0,0,1}};

Tz2[y_]:={{1,0,0,0},{0,1,0,y},{0,0,1,0},{0,0,0,1}};

Tz3[z_]:={{1,0,0,0},{0,1,0,0},{0,0,1,z},{0,0,0,1}};

Tz4[θx_]:={{1,0,0,0},{0,Cos[θx],-Sin[θx],0},{0,Sin[θx],Cos[θx],0},{0,0,0,1}};

Tz5[θy_]:={{Cos[θy],0,Sin[θy],0},{0,1,0,0},{-Sin[θy],0,Cos[θy],0},{0,0,0,1}};

Tz6[θz_]:={{Cos[θz],-Sin[θz],0,0},{Sin[θz],Cos[θz],0,0},{0,0,1,0},{0,0,0,1}};

Datos

(*Valores geométricos del guante*)

y1=22;

x1=4;

z1=5;

x2=25;

x3=7;

y2=30;

(*Valores de los sensores, en un ejemplo para obtener soluciones el sistema de ecuaciones*)

θ1=0*Degree;

θ5=0*Degree;

xp=16;

Ecuaciones de Posición

Clear[θ2,θ3,θ4,xa,ya,za,θ6];

T02=Tz4[θ1].Tz6[θ2];

T24=Tz2[y1].Tz1[x1].Tz3[z1];

T46=Tz6[θ3].Tz4[θ4];

ra={{xa},{ya},{za},{1}};

r1={{xp},{0},{0},{1}};

r2={{x3},{y2},{0},{1}};

T07=Tz1[x2].Tz4[θ5].Tz6[θ6];

LI1=T02.T24.T46.r1;

```
LD1=ra;
```

```
LI2=T07.r2;
```

```
LD2=ra;
```

Solución de la posición: índice/medio

Solucion Inicial

```
Clear[θ2,θ3,θ4,xa,ya,za,θ6];
```

```
SollInicial=FindRoot[{  
  LI1[[1,1]]==LD1[[1,1]],  
  LI1[[2,1]]==LD1[[2,1]],  
  LI1[[3,1]]==LD1[[3,1]],  
  LI2[[1,1]]==LD2[[1,1]],  
  LI2[[2,1]]==LD2[[2,1]],  
  LI2[[3,1]]==LD2[[3,1]]  
},
```

```
{θ2,30*Degree},
```

```
{θ3,30*Degree},
```

```
{θ6,30*Degree},
```

```
{xa,1},
```

```
{ya,1},
```

```
{za,1},
```

```
MaxIterations->15]
```

Solución:

```
{θ2->0.36923,θ3->-0.36923,θ6->0.36923,xa->1.57171,ya->1.2935,za->3.83275*10-30}
```

A2. Código en Arduino

El Arduino Mega es una placa microcontrolador basada ATmeg1280. Tiene 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 14 proporcionan salida PWM), 16 entradas digitales, 4 UARTS (puertos serie por hardware), un cristal oscilador de 16MHz, conexión USB, entrada de corriente, conector ICSP y botón de reset. Contiene todo lo necesario para hacer funcionar el microcontrolador; simplemente conéctalo al ordenador con el cable USB o aliméntalo con un transformador o batería para empezar.

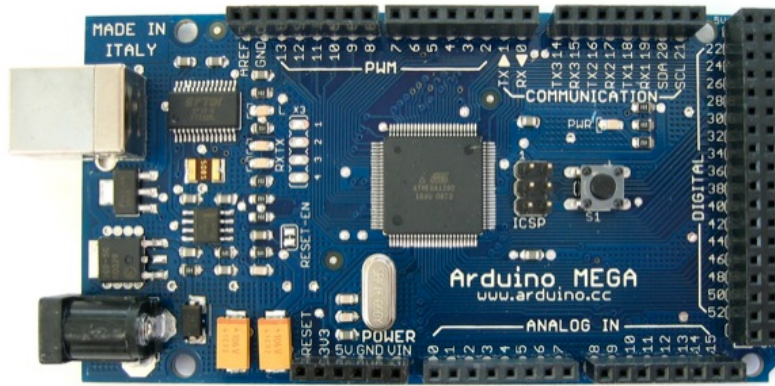


Figura 7. Arduino Mega.

La programación de Arduino es sencilla ya que utiliza un lenguaje desarrollado sobre C++.

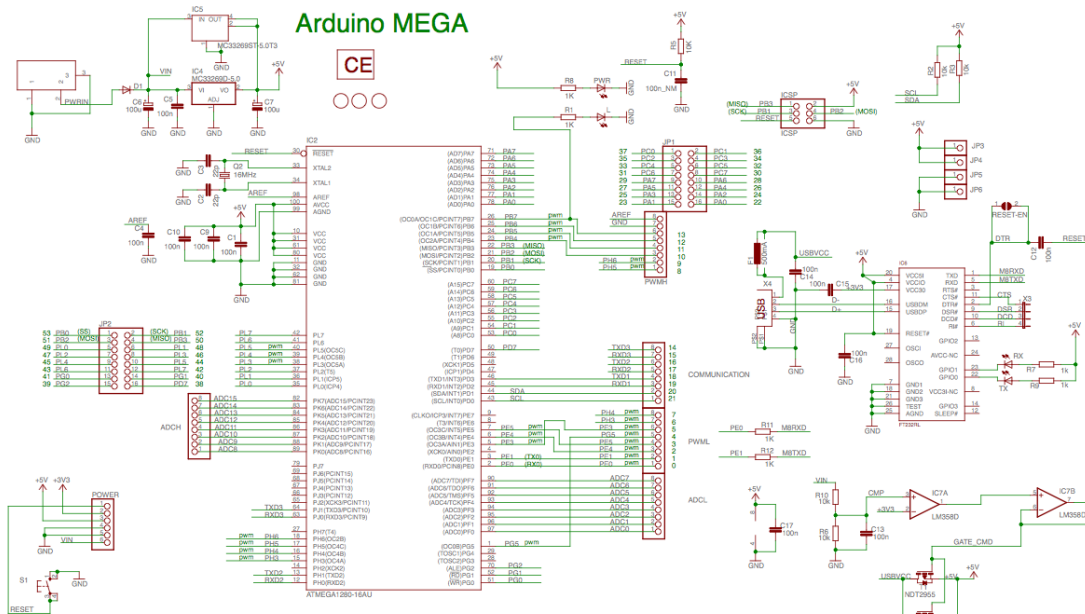


Figura. Circuito esquemático de Arduino Mega.

A continuación se presenta el código para leer las señales analógicas y transmitir las por el puerto serial USB.

```
int byteRecibido = 0;
int ConstComm1 = 100000;
int ConstComm2 = 100;
```

```
float VoltByte = 5/1023;
```

```

float valorSensor1 = 0; // variable local del sensor
float pendiente1 = 0.656; //variable local para caracterización
float calibracion1 = 0.24;

float valorSensor2 = 0; // variable local del sensor
float pendiente2 = 1; //variable local para caracterización
float calibracion2 = 0;

float valorSensor3 = 0; // variable local del sensor
float pendiente3 = -11.238; //variable local para caracterización
float calibracion3 = 452.83;

float valorSensor4 = 0; // variable local del sensor
float pendiente4 = 0.4902; //variable local para caracterización
float calibracion4 = -3.6875;

float valorSensor5 = 0; // variable local del sensor
float pendiente5 = -9.1351; //variable local para caracterización
float calibracion5 = 328.88;

float valorSensor6 = 0; // variable local del sensor
float pendiente6 = 0.4186; //variable local para caracterización
float calibracion6 = -5.8667;

float valorSensor7 = 0; // variable local del sensor
float pendiente7 = 0.1227; //variable local para caracterización
float calibracion7 = -3.46;

float valorSensor8 = 0; // variable local del sensor
float pendiente8 = 0.1227; //variable local para caracterización
float calibracion8 = -3.46;

float valorSensor9 = 0; // variable local del sensor
float pendiente9 = 0.1227; //variable local para caracterización
float calibracion9 = -3.46;

float valorSensor10 = 0; // variable local del sensor
float pendiente10 = 72; //variable local para caracterización
float calibracion10 = 0;

float valorSensor11 = 0; // variable local del sensor
float pendiente11 = 72; //variable local para caracterización
float calibracion11 = 0;

float valorSensor12 = 0; // variable local del sensor
float pendiente12 = 1; //variable local para caracterización
float calibracion12 = 0;

int wait = 3;

```

```

void setup() {
  // inicializa el puerto de bus de datos a 9600 bauds
  Serial.begin(9600);
}

void Communication ();

void loop() {
  // lee el valor del sensor
  valorSensor1 = VoltByte*analogRead(10);
  valorSensor1 = 1/pendiente1 * ( valorSensor1*530000/(10-valorSensor1) - calibracion1);
  Communication();
  delay(wait);

  // lee el valor del sensor
  valorSensor2 = VoltByte*analogRead(11);
  valorSensor2 = 1/pendiente2 * ( valorSensor2*530000/(10-valorSensor2) - calibracion2);
  Communication();
  delay(wait);

  // lee el valor del sensor
  valorSensor3 = VoltByte*analogRead(12);
  valorSensor3 = 1/pendiente3 * ( valorSensor3*530000/(10-valorSensor3) - calibracion3);
  Communication();
  delay(wait);

  // lee el valor del sensor
  valorSensor4 = VoltByte*analogRead(13);
  valorSensor4 = 1/pendiente4 * ( valorSensor4*530000/(10-valorSensor4) - calibracion4);
  Communication();
  delay(wait);

  // lee el valor del sensor
  valorSensor5 = VoltByte*analogRead(14);
  valorSensor5 = 1/pendiente5 * ( valorSensor5*530000/(10-valorSensor5) - calibracion5);
  Communication();
  delay(wait);

  // lee el valor del sensor
  valorSensor6 = VoltByte*analogRead(15);
  valorSensor6 = 1/pendiente6 * ( valorSensor6*530000/(10-valorSensor6) - calibracion6);
  Communication();
  delay(wait);

  valorSensor7 = VoltByte*analogRead(5);
  valorSensor7 = 1/pendiente7 * valorSensor7 - calibracion7;
  Communication();
  delay(wait);
}

```

```

// lee el valor del sensor
valorSensor8 = VoltByte*analogRead(6);
valorSensor8 = 1/pendiente8 * valorSensor8 - calibracion8;
Communication();
delay(wait);

// lee el valor del sensor
valorSensor9 = VoltByte*analogRead(7);
valorSensor9 = 1/pendiente9 * valorSensor9 - calibracion9;
Communication();
delay(wait);

// lee el valor del sensor
valorSensor10 = VoltByte*analogRead(9);
valorSensor10 = pendiente10 * valorSensor10 + calibracion10;
Communication();
delay(wait);

// lee el valor del sensor
valorSensor11 = VoltByte*analogRead(10);
valorSensor11 = pendiente11 * valorSensor11 + calibracion11;
Communication();
delay(wait);

// lee el valor del sensor
valorSensor12 = VoltByte*analogRead(11);
valorSensor12 = pendiente12 * valorSensor12 + calibracion12;
Communication();
delay(wait);
}

void Communication ()
{
if( Serial.available() > 0 ) {
// Leer lo que hay en el buffer
byteRecibido = Serial.read( );
Serial.flush( );

switch ( byteRecibido ){
case '7': //sensor de flexion en el pulgar
// Escribir la cadena de valores de los sensores
Serial.print ( int(valorSensor1*ConstComm2+100000) );
//Serial.print ( 103000 );
break;

case '4': //Base del pulgar, 2 angulos
// Escribir la cadena de valores de los sensores
Serial.print ( int(valorSensor2*ConstComm2+ConstComm1) );
//Serial.print ( 104500 );

```

```

break;

case '6': //Distancia entre el indice y pulgar
// Escribir la cadena de valores de los sensores
Serial.print ( int(valorSensor3*ConstComm2+ConstComm1) );
//Serial.print ( 101600 );
break;

case '8': //Sensor de flexion en el indice
// Escribir la cadena de valores de los sensores
Serial.print ( int(valorSensor4*ConstComm2+ConstComm1) );
//Serial.print ( 103000 );
break;

case '3': //Distancia entre el dedo indice y medio
// Escribir la cadena de valores de los sensores
Serial.print ( int(valorSensor5*ConstComm2+ConstComm1) );
//Serial.print ( 102000 );
break;

case 'a': //Sensor de flexion en el medio
// Escribir la cadena de valores de los sensores
Serial.print ( int(valorSensor6*ConstComm2+ConstComm1) );
//Serial.print ( 102000 );
break;

case '5': //Opto en el pulgar
// Escribir la cadena de valores de los sensores
Serial.print ( int(valorSensor7*ConstComm2+ConstComm1) );
//Serial.print ( 104500 );
break;

case '9': //Opto en el indice
// Escribir la cadena de valores de los sensores
Serial.print ( int(valorSensor8*ConstComm2+ConstComm1) );
//Serial.print ( 104500 );
break;

case 'b': //Opto en el medio
// Escribir la cadena de valores de los sensores
Serial.print ( int(valorSensor9*ConstComm2+ConstComm1) );
//Serial.print ( 104500 );
break;

case '1': //Potenciometro indice
// Escribir la cadena de valores de los sensores
//Serial.print ( int(valorSensor10*ConstComm2+ConstComm1) );
Serial.print ( 104500 );
break;

```



```

case '2': //Potenciometro medio
// Escribir la cadena de valores de los sensores
//Serial.print ( int(valorSensor11*ConstComm2+ConstComm1) );
Serial.print ( 104500 );
break;

case 'c': //Arco
// Escribir la cadena de valores de los sensores
//Serial.print ( int(valorSensor12*ConstComm2+ConstComm1) );
Serial.print ( 104500 );
break;

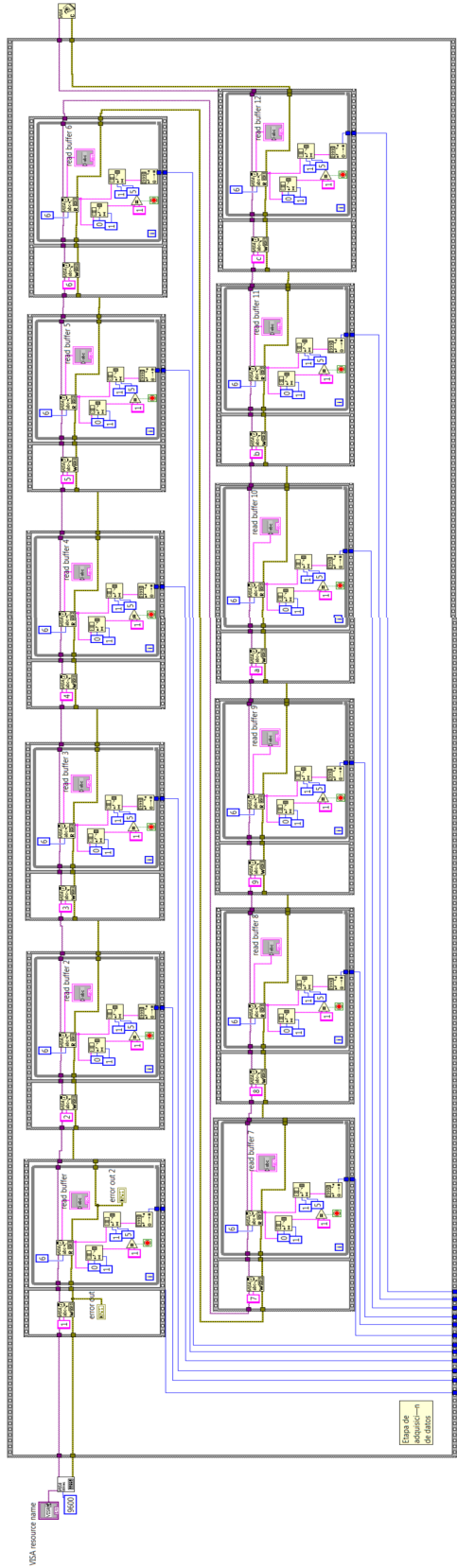
default:
Serial.print ( 0 );
break;
}
}
}

```

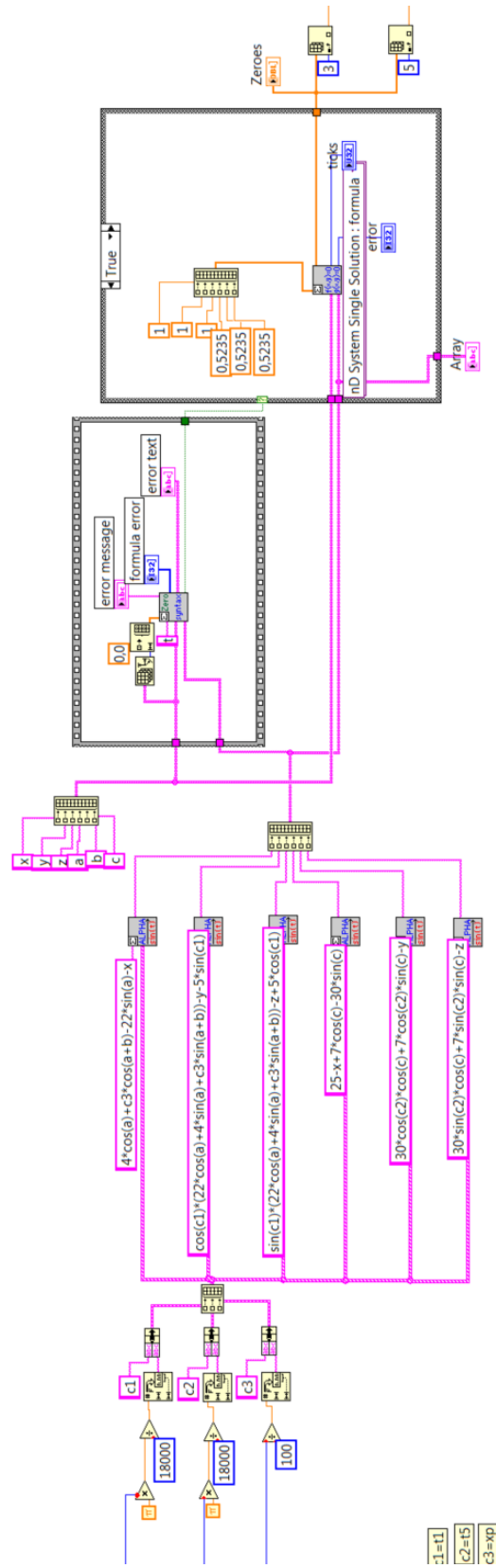
Como se puede observar, el programa es simple. En la implementación final se utilizarán CAD externos para las señales que no tengan espacio en los convertidores integrados en Arduino, y así la entrada es con señales digitales.

A3. Programa en LabVIEW

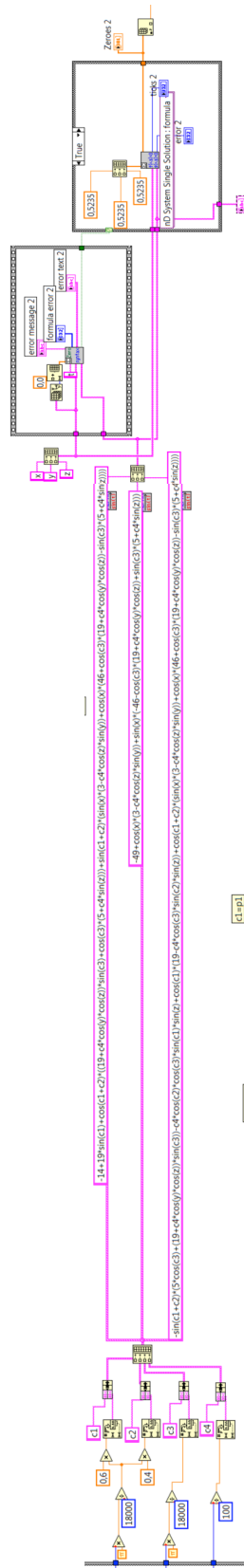
En ésta sección se presenta el programa gráfico de LabVIEW por secciones, la primera corresponde a la comunicación, la segunda a la solución de los sistemas de ecuaciones no lineales y la última al despliegue de los resultados y variables del sistema de coordenadas.



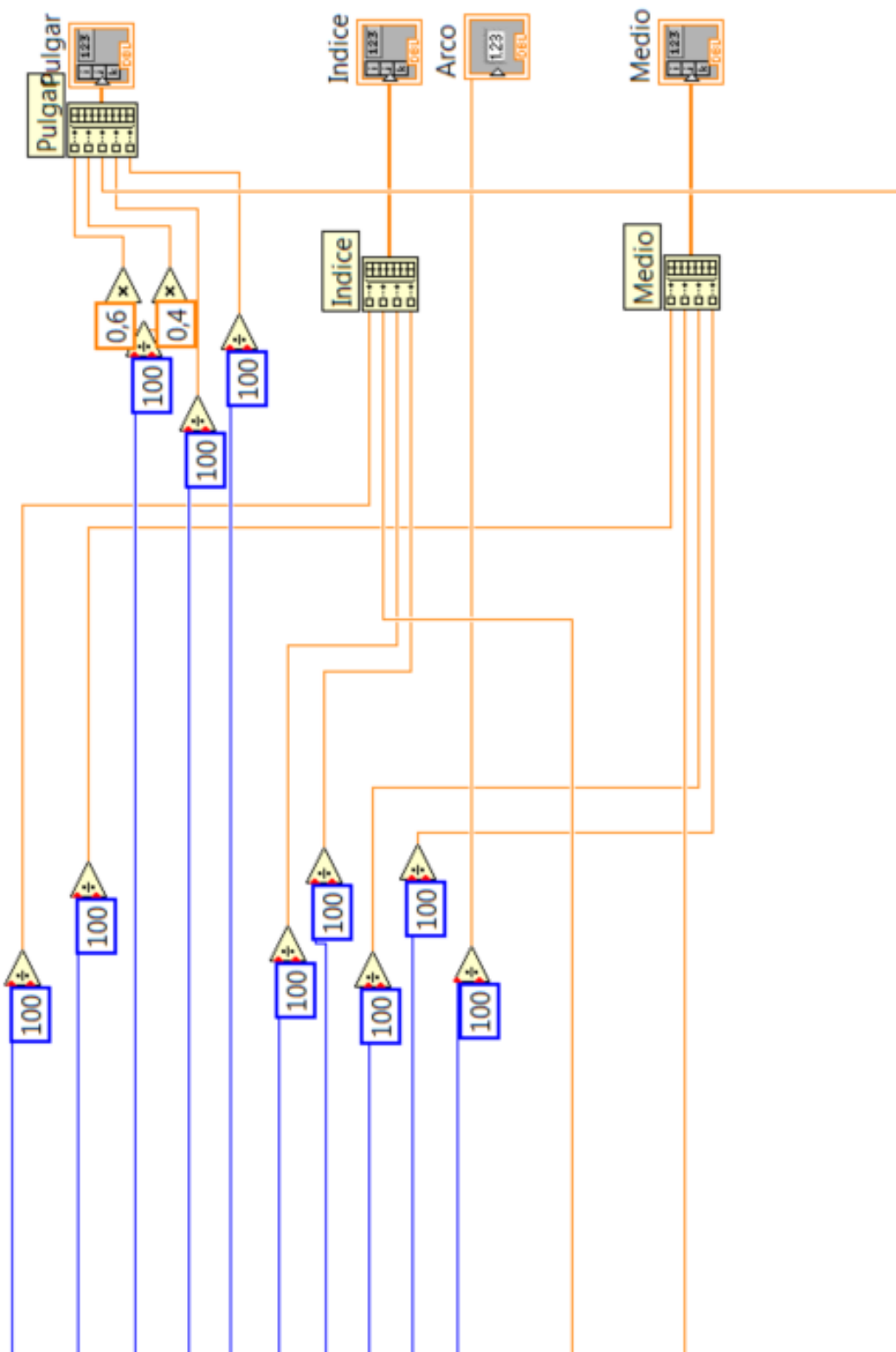
Bloque de comunicación.



Bloque de solución del sistema de ecuaciones del dedo índice y medio.



Bloque de solución del sistema de ecuaciones del dedo índice y medio.



Despliegue de resultados al usuario.

B1. Planos de manufactura de los sensores piezoeléctricos

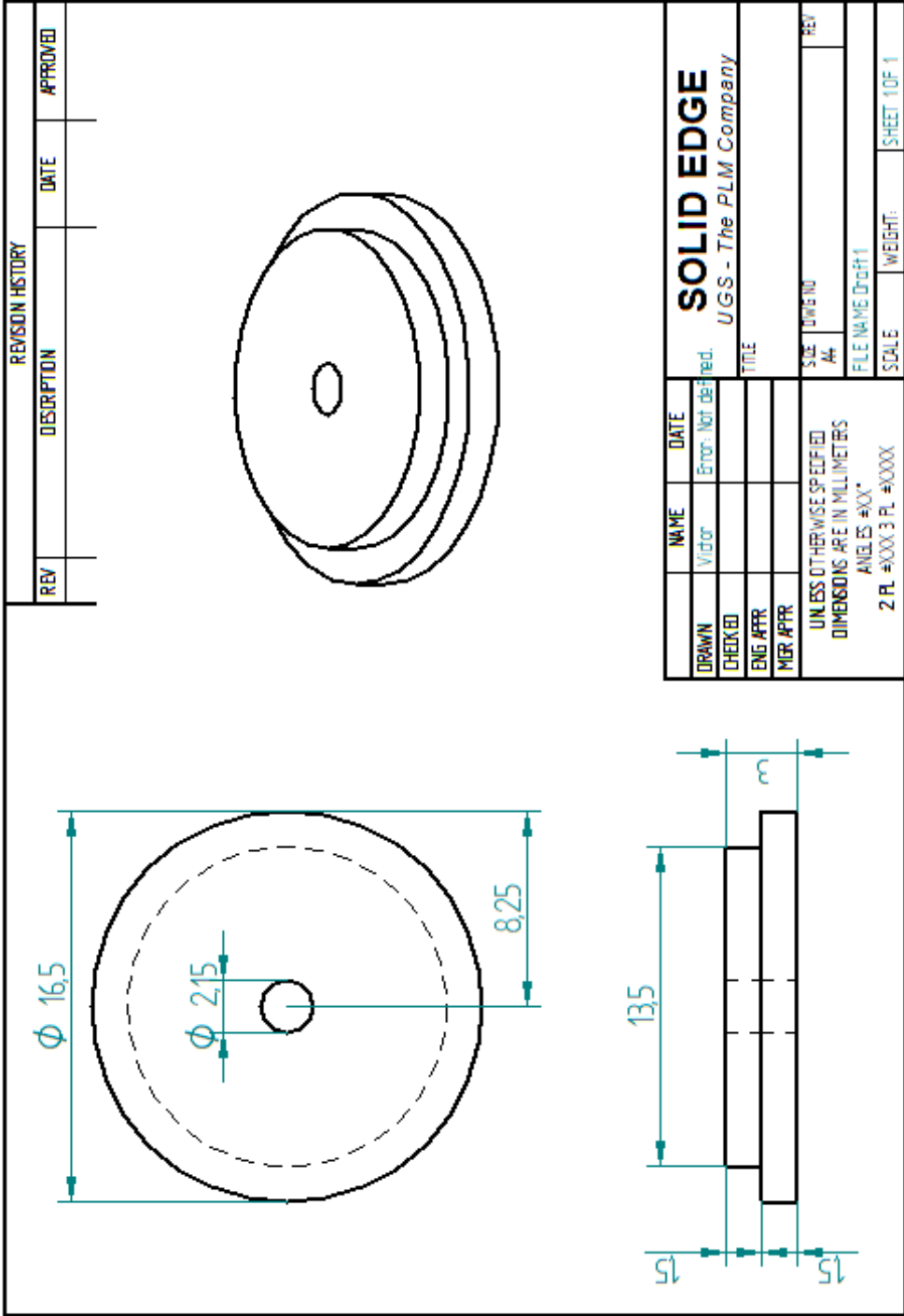


Figura 8. Plano de la pieza I del sensor por tendones.

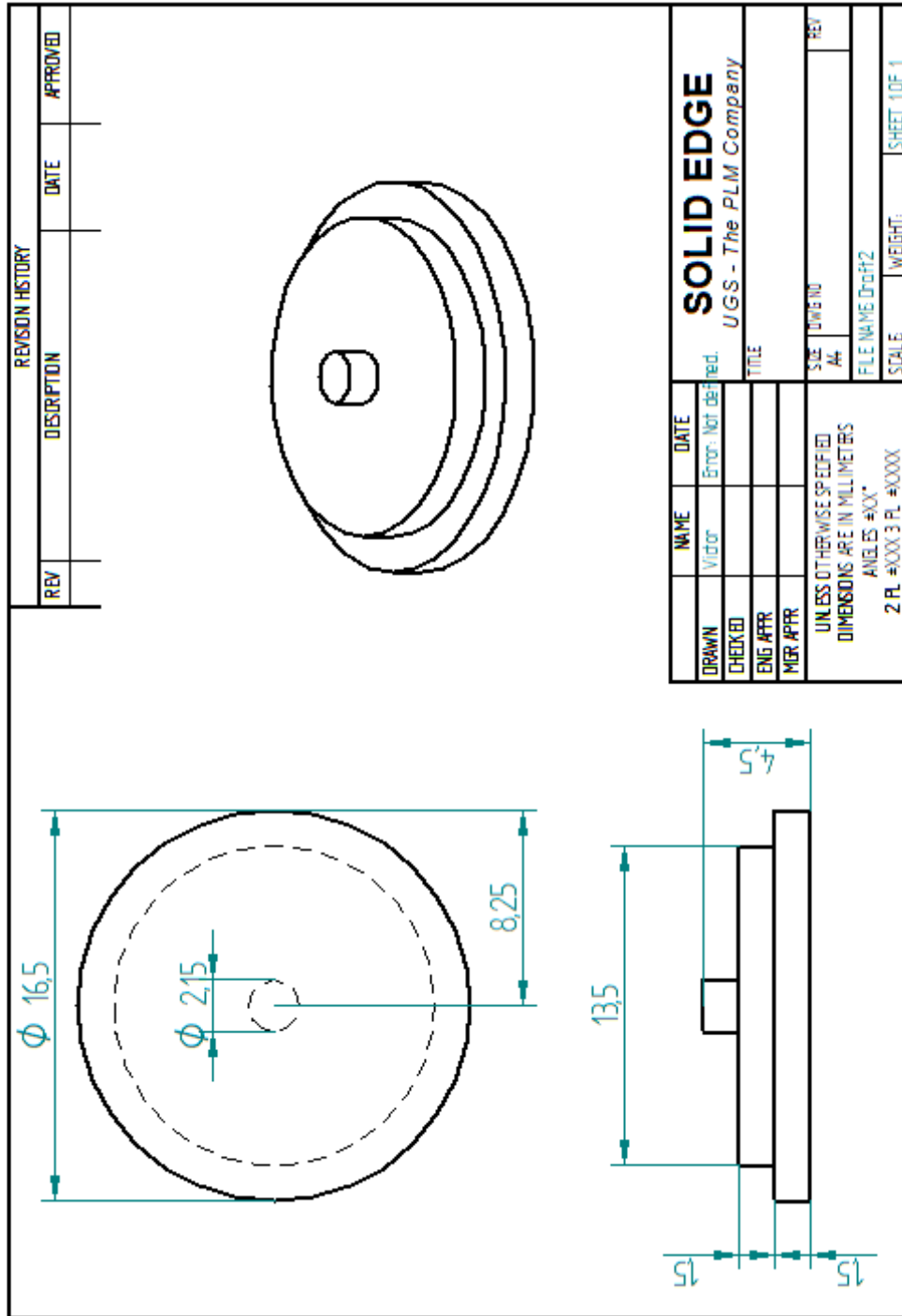
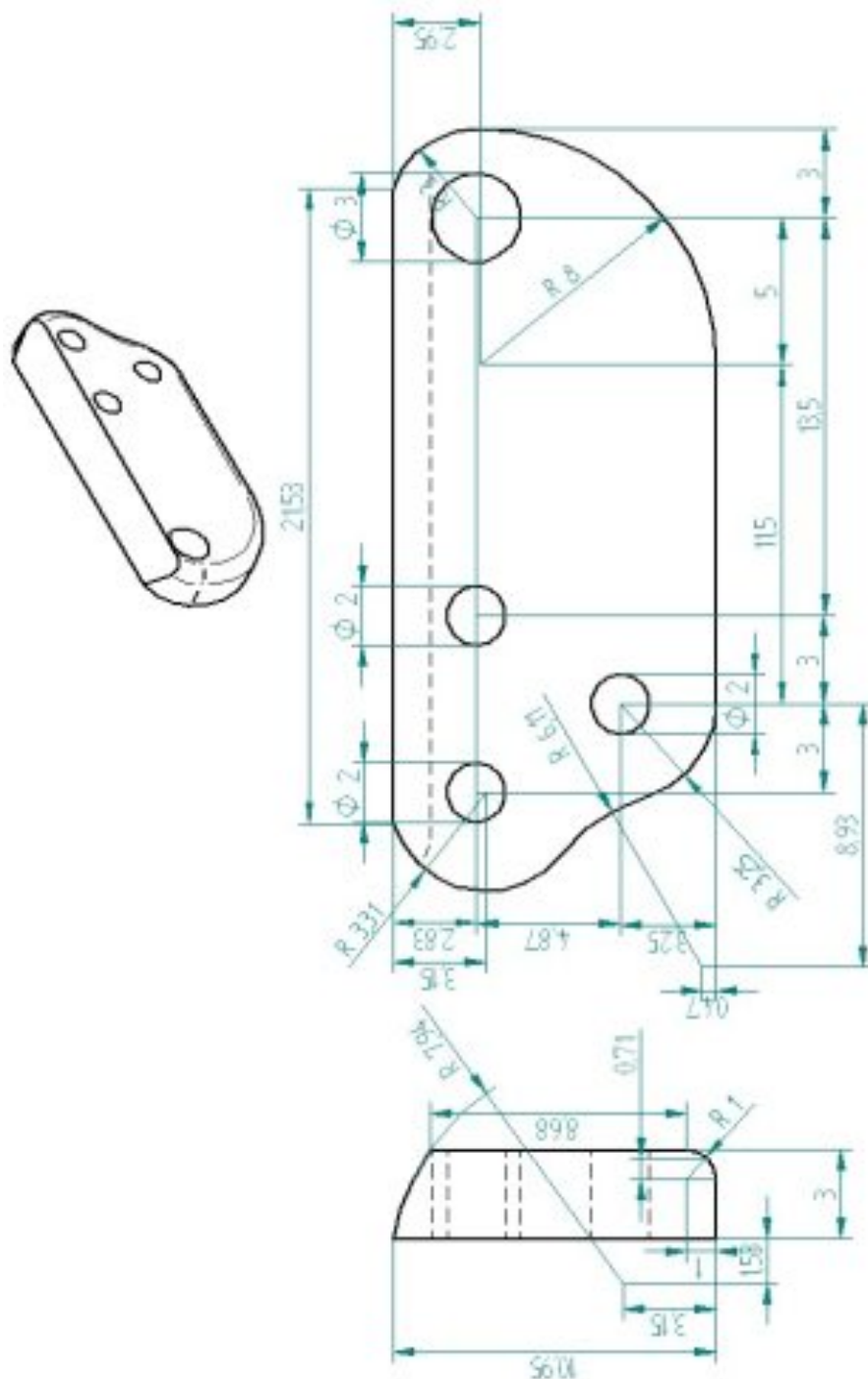
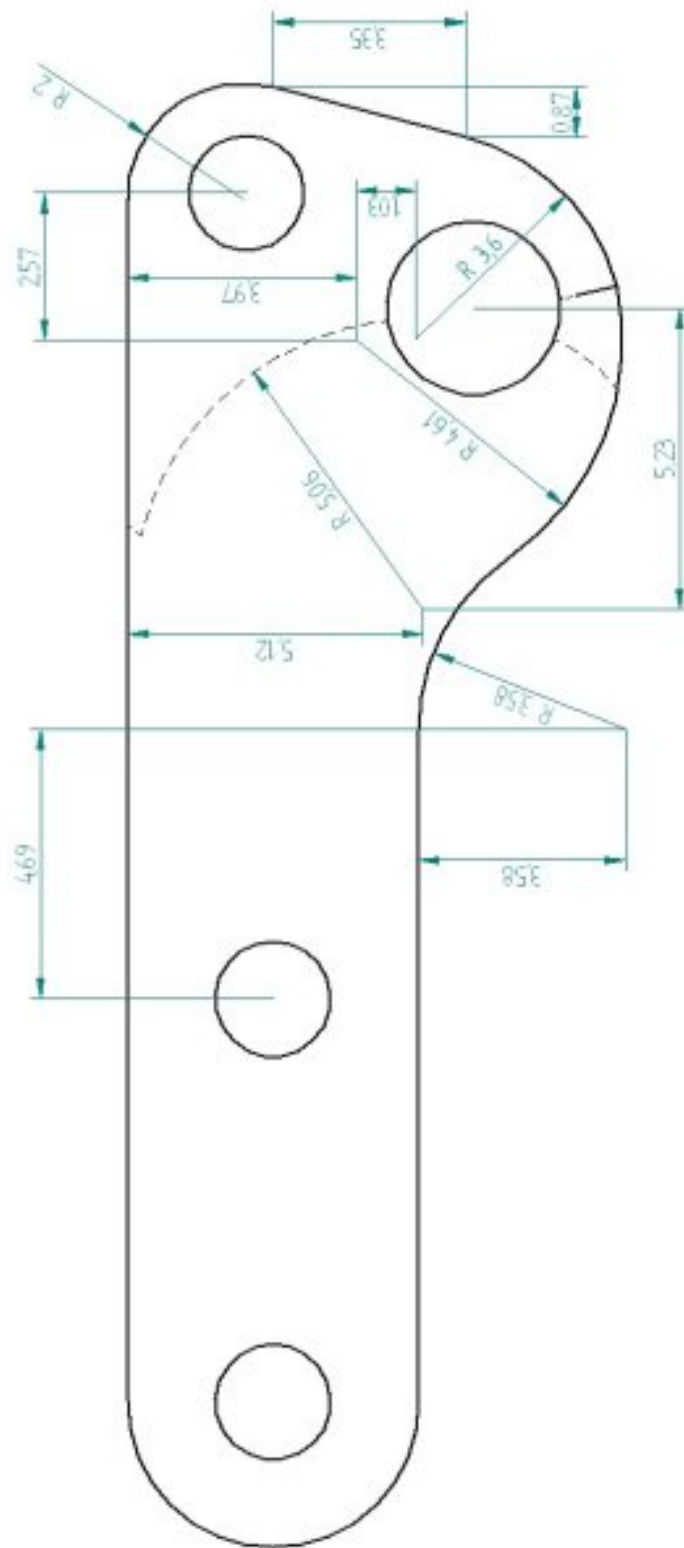


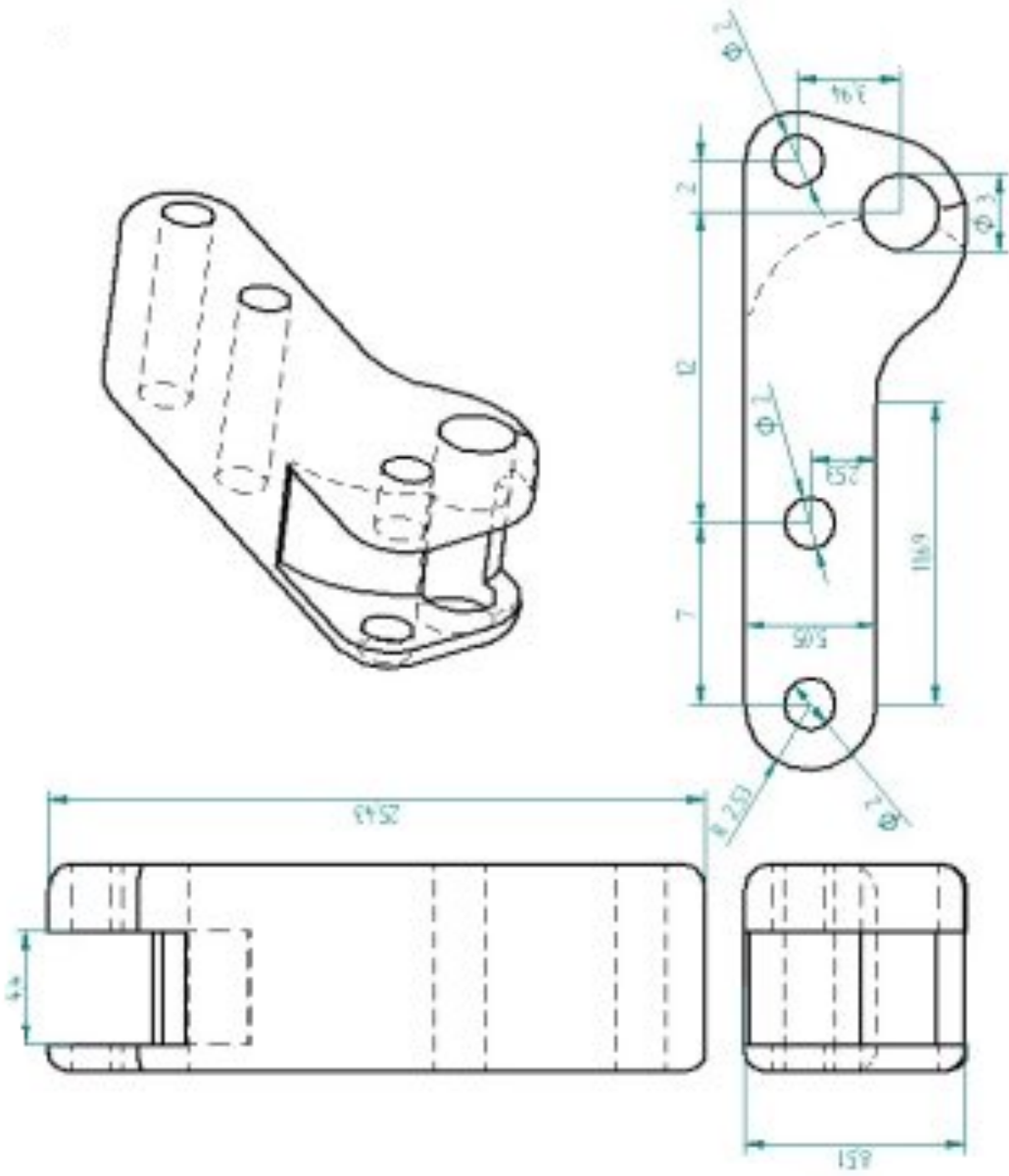
Figura 9. Plano de la pieza II del sensor por tendones.

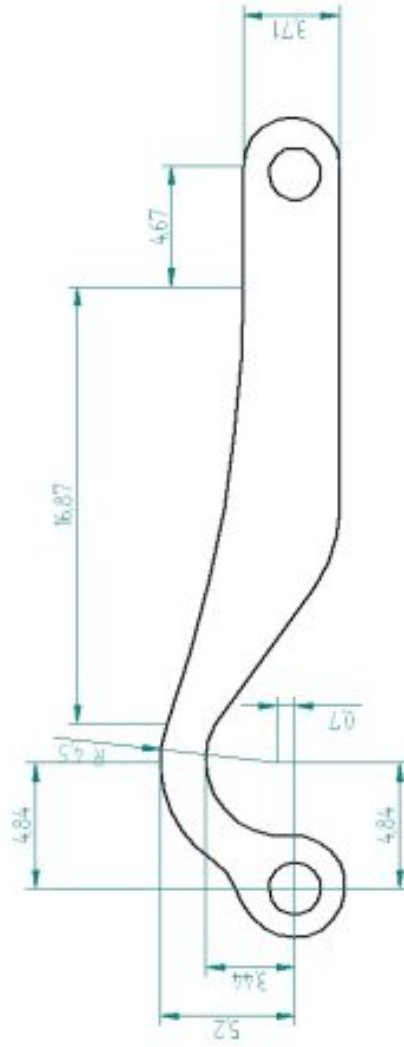
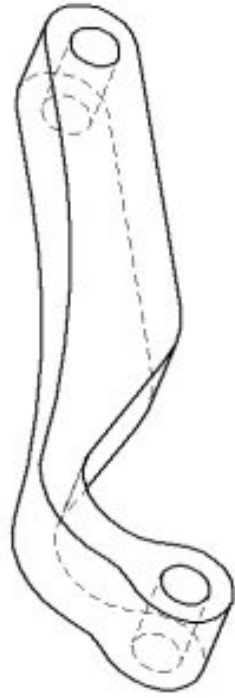
C1. Planos de construcción de la mano mecánica

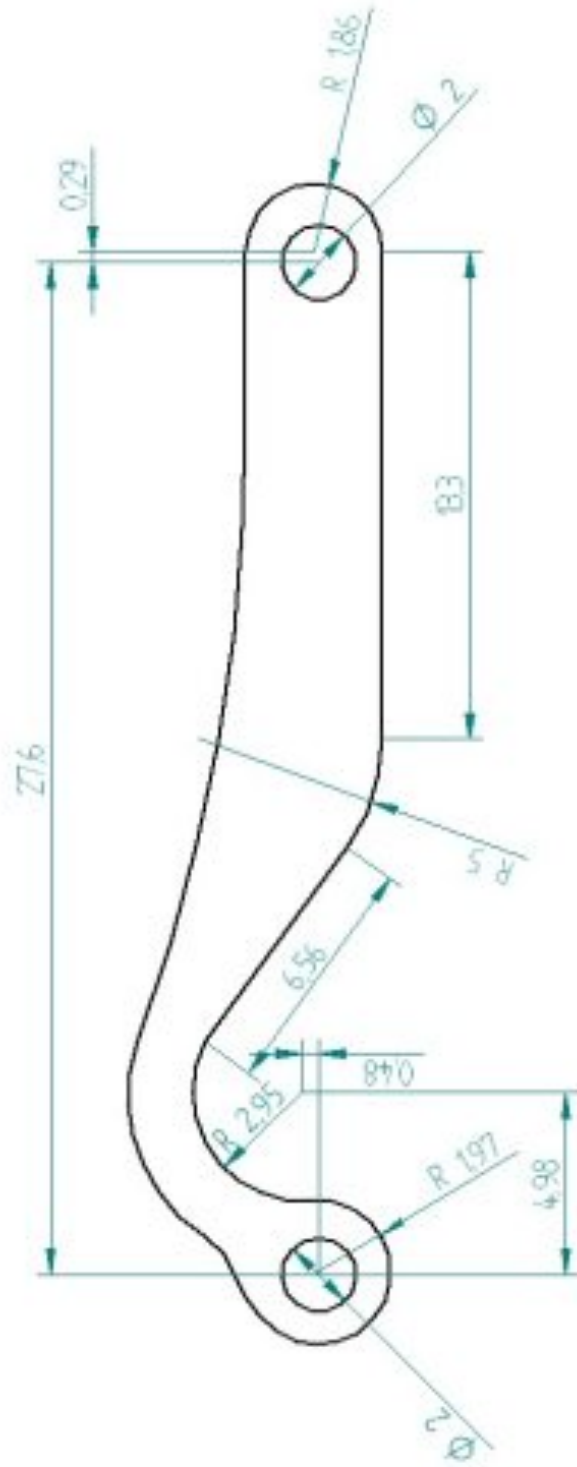
A continuación se presentan los planos de construcción de cada una de las piezas de la mano mecánica.

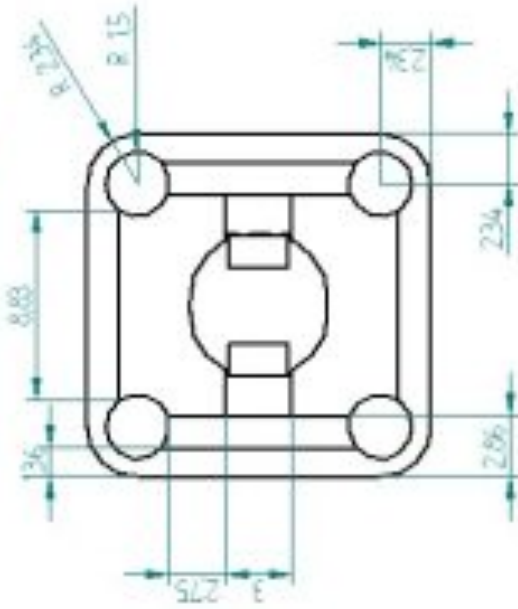
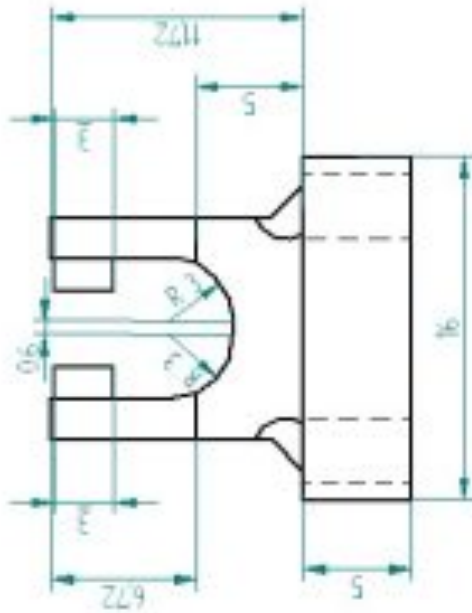
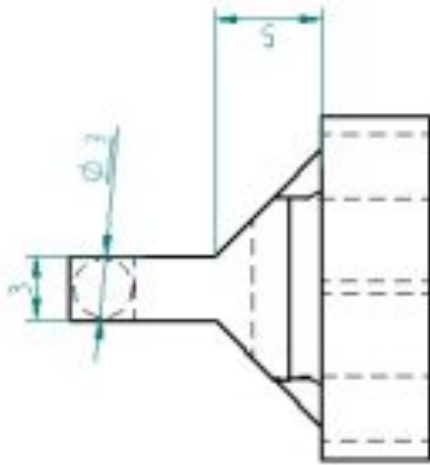


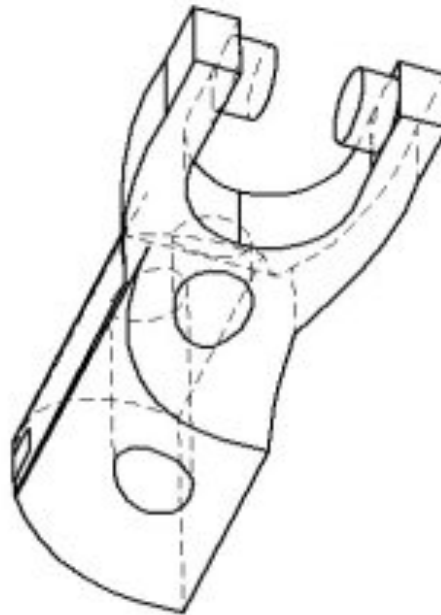
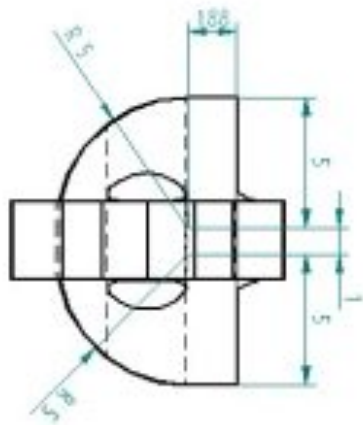
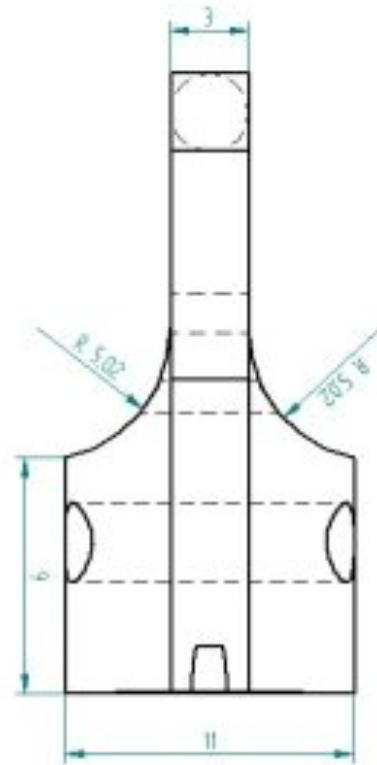
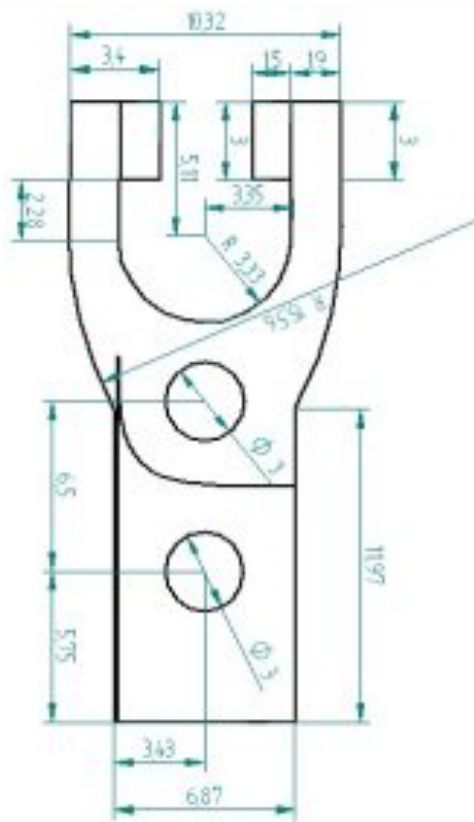


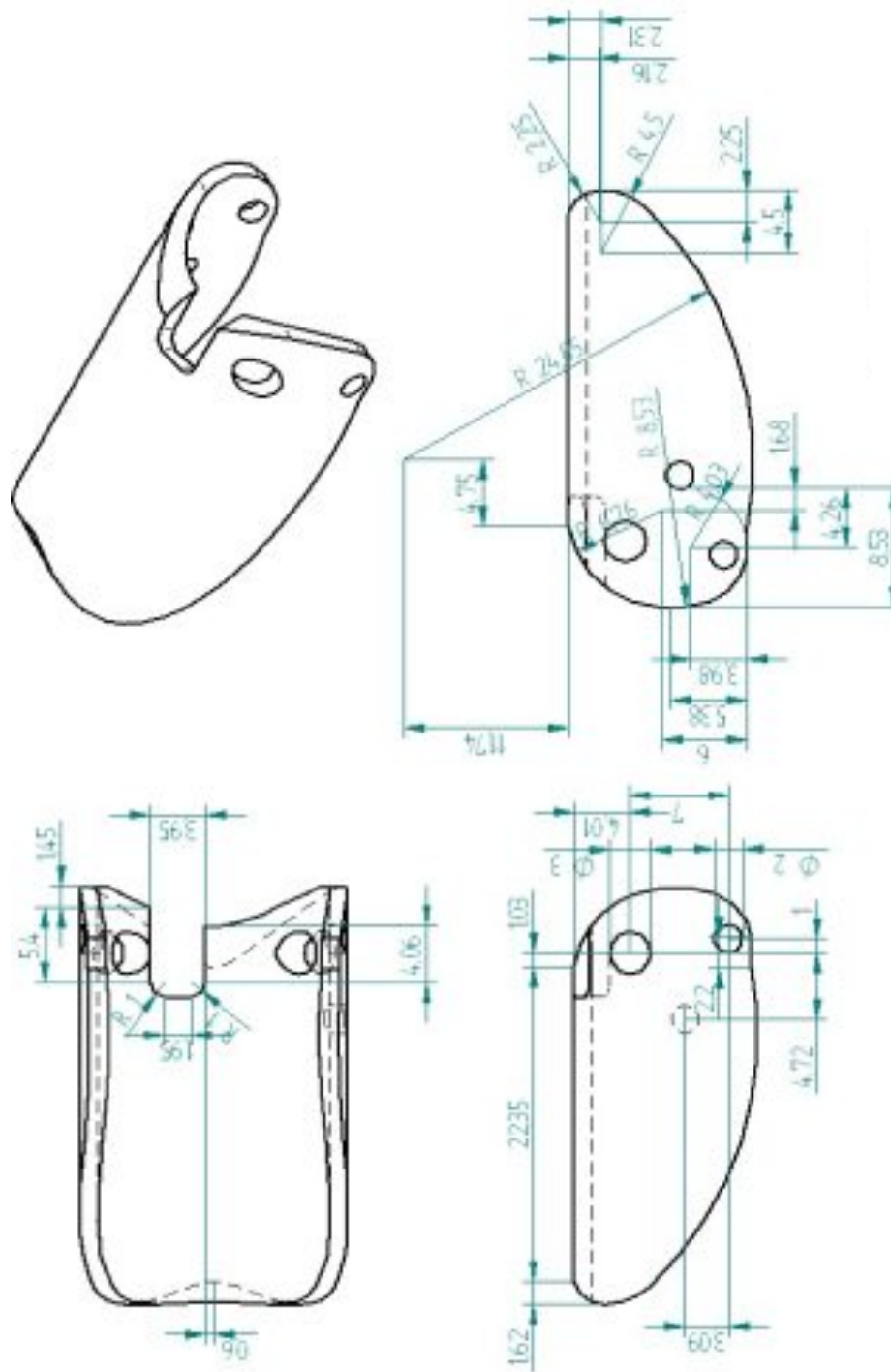


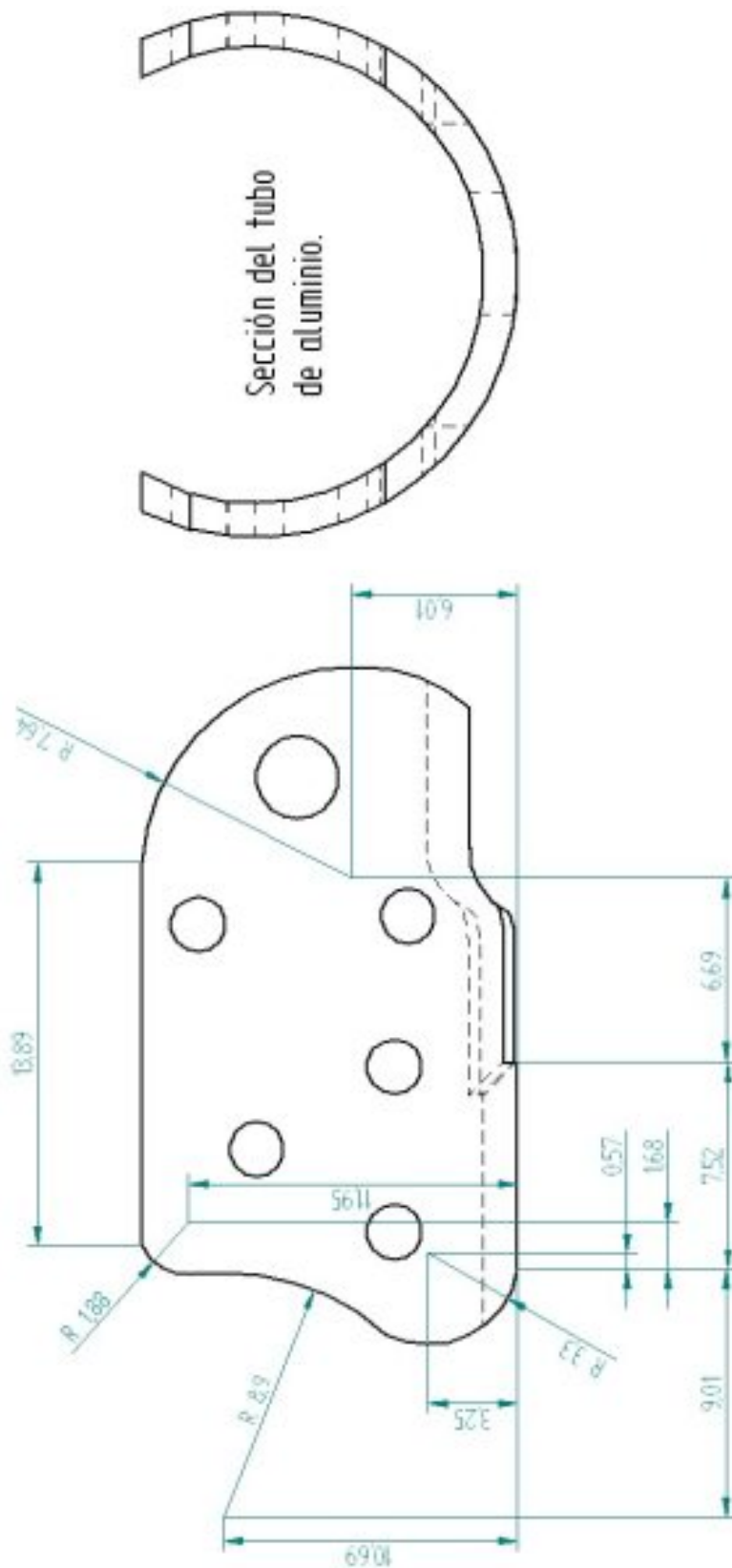


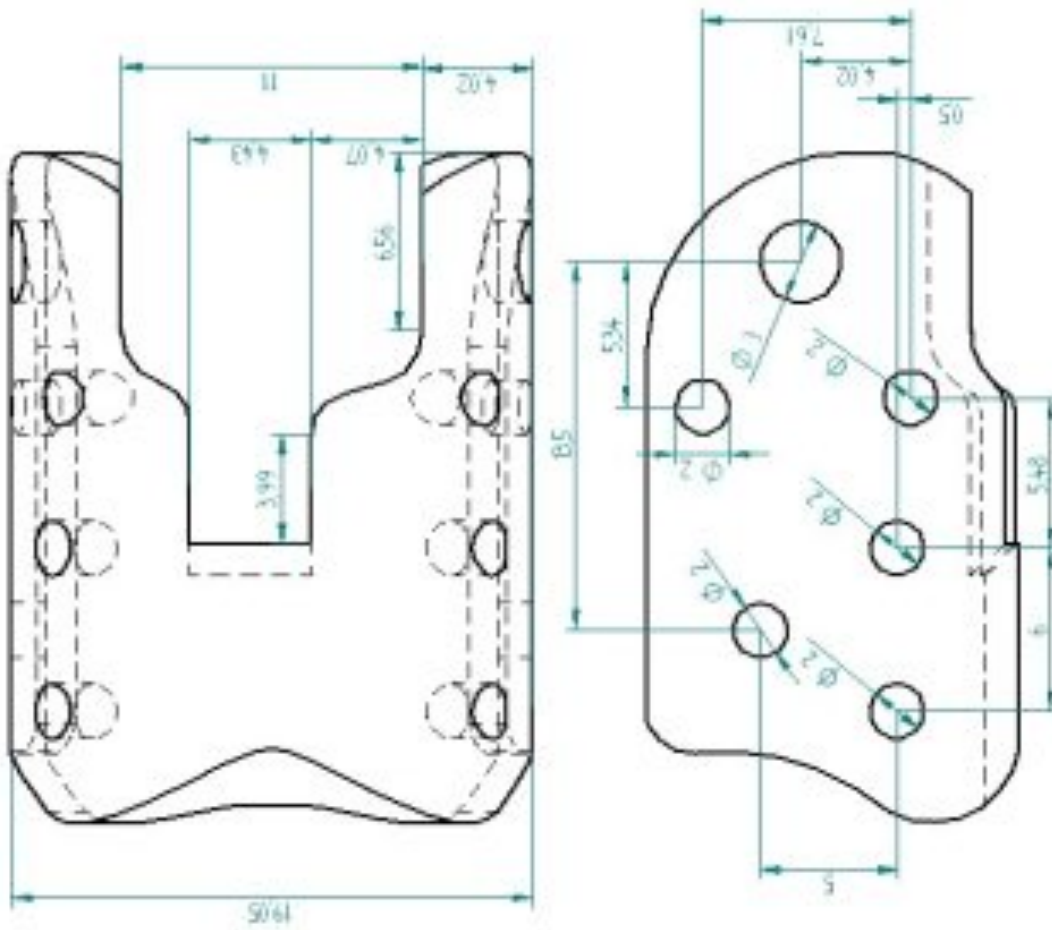


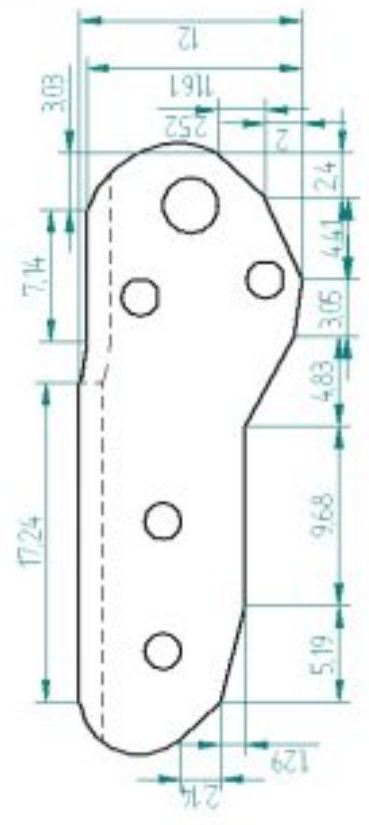
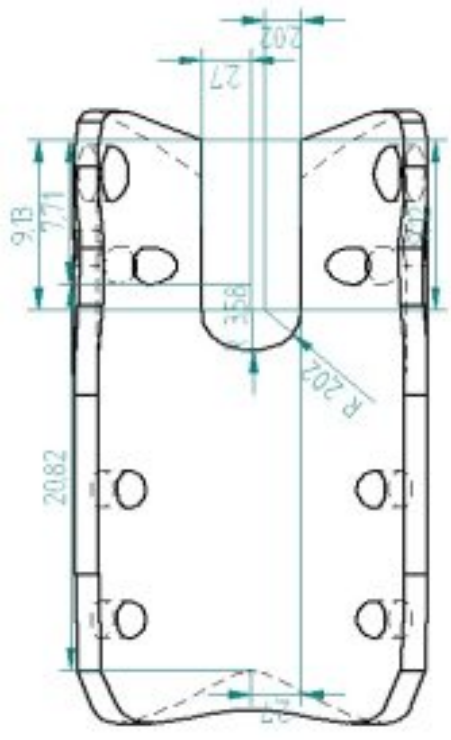
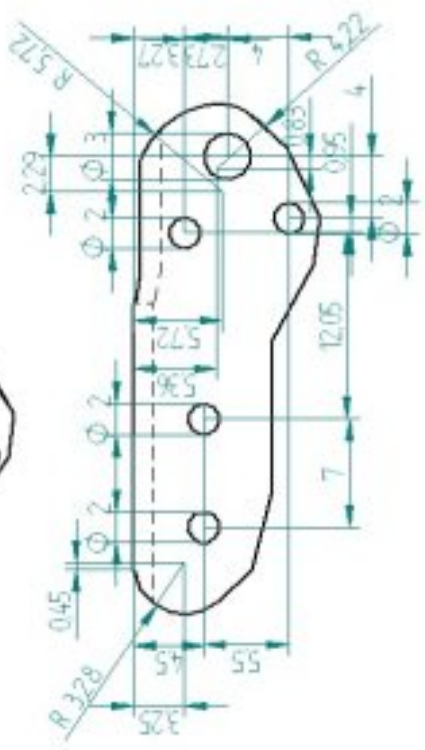
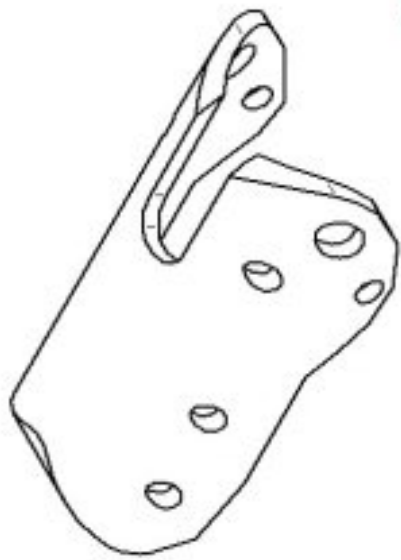


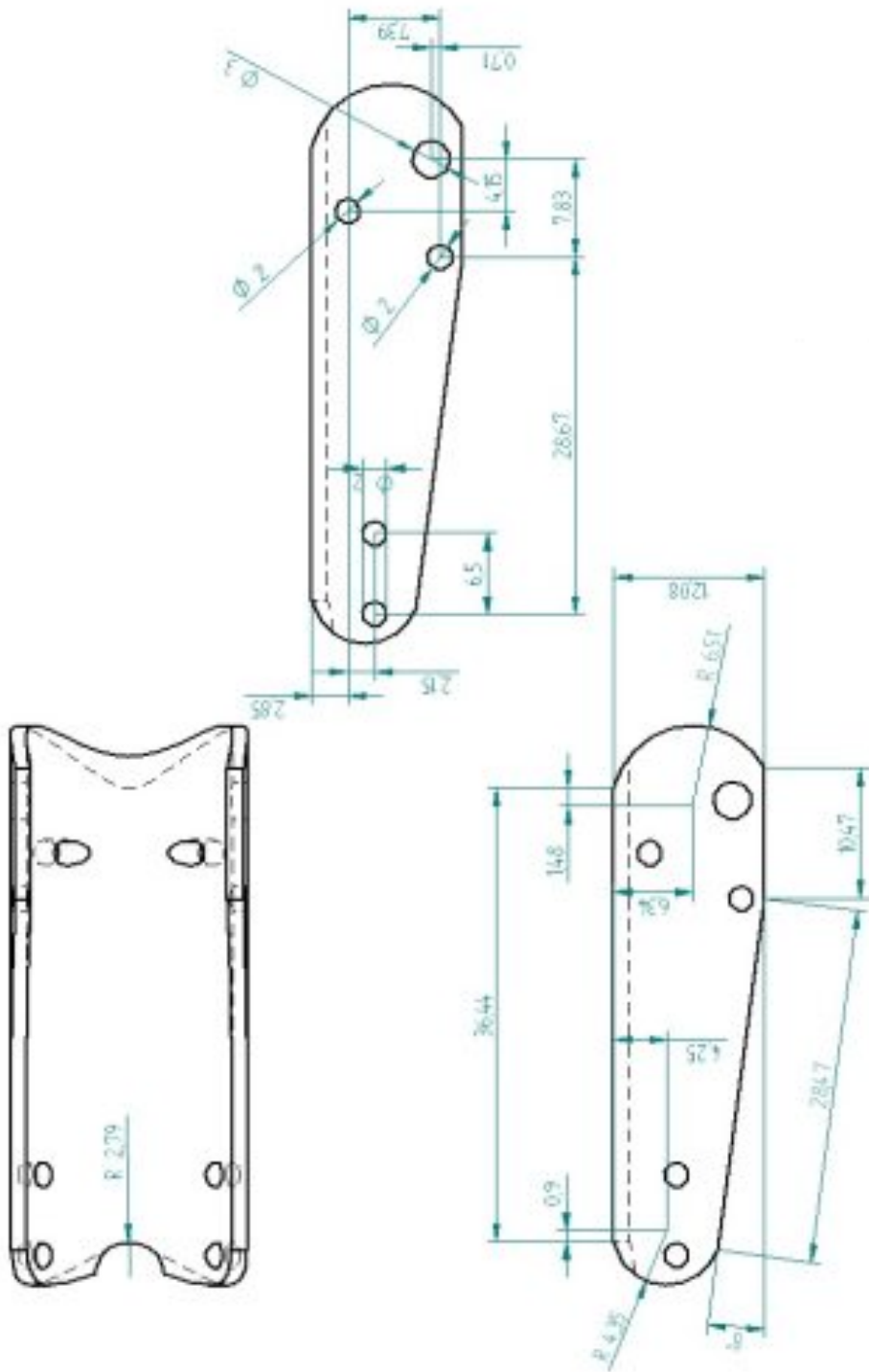


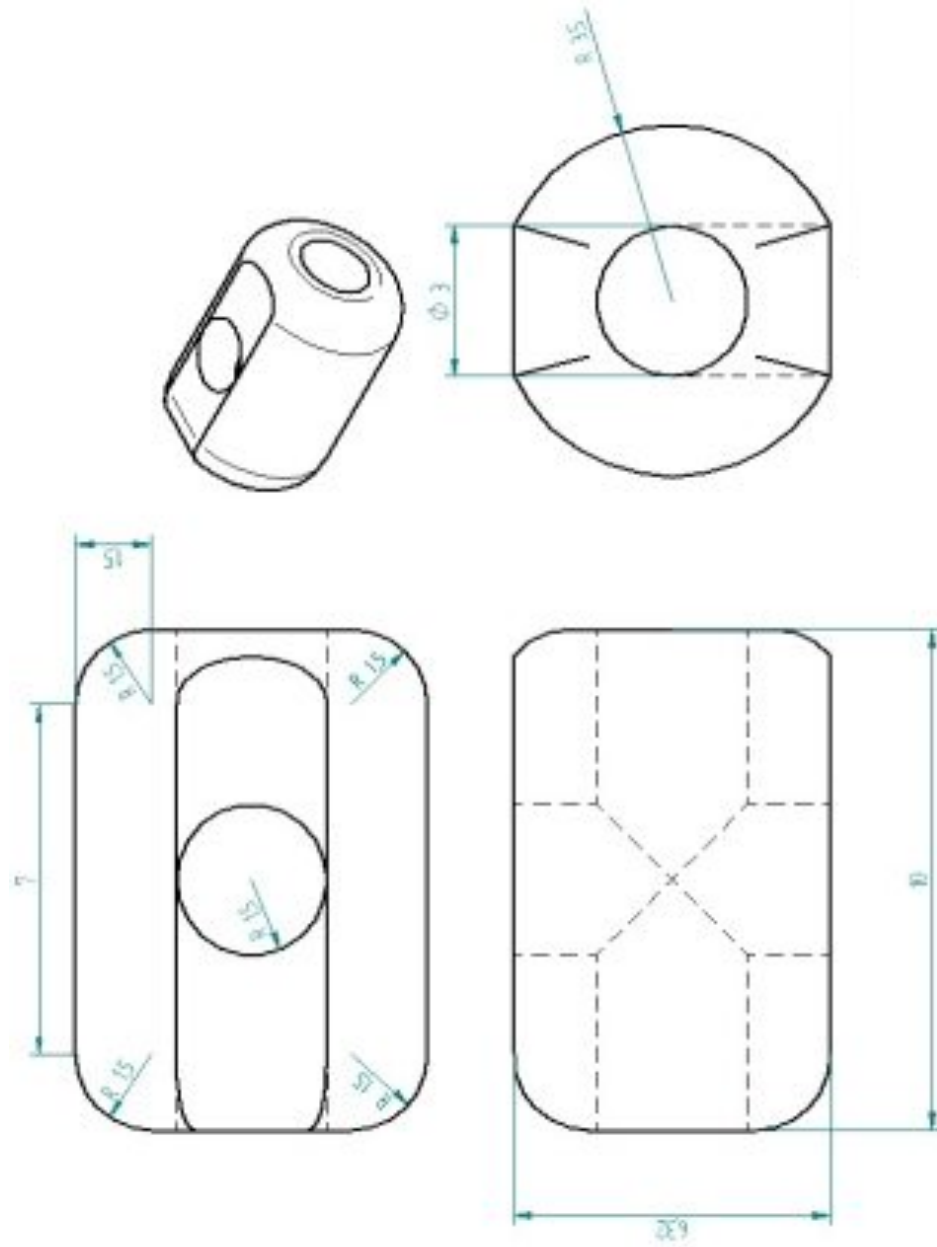


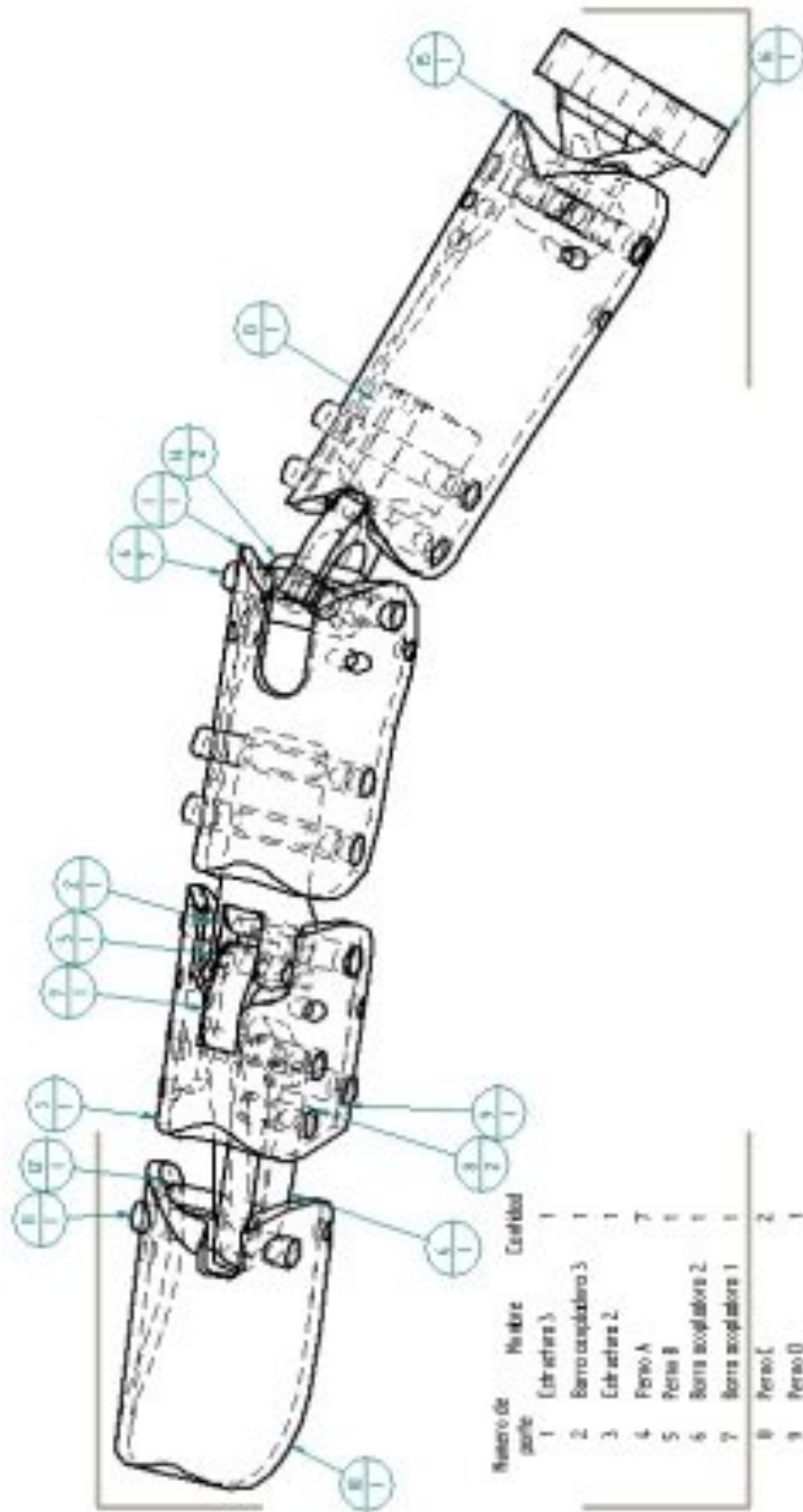












| Numero de parte | Nombre | Cantidad |
|-----------------|------------------------|----------|
| 1 | Estructura 3 | 1 |
| 2 | Borro capuladero 3 | 1 |
| 3 | Estructura 2 | 1 |
| 4 | Perno A | 7 |
| 5 | Perno B | 1 |
| 6 | Borra acopladora 2 | 1 |
| 7 | Borra acopladora 1 | 1 |
| 8 | Perno E | 2 |
| 9 | Perno D | 1 |
| 10 | Estructura 1 | 1 |
| 11 | Perno C | 1 |
| 12 | Perno F | 1 |
| 13 | Borra de corrimiento 1 | 1 |
| 14 | Rodillo | 2 |
| 15 | Estructura 4 | 1 |
| 16 | Borra de corrimiento 2 | 1 |

Bibliografía

1. Nikhil Chopra, M.F., Angelika Peer, *The field of telerobotics*, in *IEEE Robotics and automation magazine* 2008.
2. Mingfu Li, e.a., *A semi autonomous tele-operation system based on robotic hand-eye coordination*. IEEE International conference on mechatronics and automation, 2008.
3. David Wang, e.a., *The effect of time delays on tele-haptics*. IEEE, 2003.
4. M. Tavaloki, R.D.H., *Improving teleoperation performance in the presence of non-ideal robot dynamics*. IEEE, 2008.
5. Neo Ee Sian, e.a., *Whole body teleoperation of a humanoid robot - A method of integrating operator's intention and robot's autonomy* -. IEEE Robotics and automation, 2003.
6. Mayez Abdullah Al-Mouhamed, e.a., *Design and instrumentation of force feedback in telerobotics*. IEEE Instrumentation and measurement, 2009. **58-6**.
7. J. Butterfaß, M.F., M. Grebenstein, S. Haidacher, G. Hirzinger, *Design and experiences with DLR Hand II*. Symposium on robotics with applications, 2004.
8. Konstantinos J. Kyriakopoulos, J.V.R., Andrew Zink, Harry Stephanou, *Kinematic analysis and position/force control of the anthropot dextrous hand*. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 1997.
9. Chistian Cipriani, M.c., M. Chiara Carrozza, *Progress towards the development of the smarthand transradial prosthesis*. IEEE 11th international conference on rehabilitation robotics, 2009.
10. Skyler A. Dalley, T.E.W., Thomas J. Withrow, Michael Goldfarb, *Design of a multifunctional anthropomorphic prosthetic hand with extrinsic actuation*. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2009.
11. Jingdong Zhao, L.J., Schicai Shi, Hegao Cai, Hong Liu, Gerd Hirzinger, *A five-fingered underactuated prosthetic hand system*. IEEE, 2006: p. 6.
12. D. W. Zhao, L.J., H. Huang, M. H. Jin, H. G. Cai, H. Liu, *Development of a multi-DOF anthropomorphic prosthetic hand*. IEEE International conference on robotics and biomimetics, 2006.
13. company, S.r. *The shadow dextrous hand*. Available from: <http://www.shadow.org.uk/products/newhand.shtml>.
14. Haruhisa Kawasaki, T.K., Kazunao Uchiyama, *Dextarous Anthropomorphic Robot Hand with Distributed Tactile Sensor: Gifu Hand II*. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2002. **7-3**: p. 8.
15. Michael A. Saliba, e.a., *Design of a compact, dexterous robot hand with remotely located actuators and sensors*. Mediterranean conference on control and automation, 2007.
16. S. C. Jacobsen, J.E.W., D. F. Knutti, K. B. Biggers, *The Utah/MIT dextrous hand: Work in progress*. International Journal of Robotics Research, 1984.
17. R. Suarez, P.G., *Mechanical hand MA-I as experimental system for grasping and manipulation*. IEEE Robotics and automation, 2005.

18. M. J. Farrugia, M.A.S., *Optimisation of anthropomorphic hand design through human manual dexterity testing*. International Symposium of Robotics 2006.
19. Vishalini Bundhoo, e.a., *A shape memory alloy-based tendon-driven actuation system for biomimetic artificial fingers, part I: design and evaluation*. Robotica, 2008.
20. Frank Röthling, R.H., Jochen J. Steil, Helge Ritter, *Platform anthropomorphic grasping with the bielefeld 20-DOF shadow and 9-DOF TUM hand*. IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, 2007.
21. Nordin, M., et.al., *Basic biomechanics of the musculoskeletal system*. 2nd ed1980: LEA & FEBIGER.
22. Aguilar Romero, E.F., López Batiz, Germán, *Manipulador Antropomórfico Teleoperado II*, in *Departamento de mecánica* 2001, Universidad Nacional Autónoma de México: Ciudad de México.
23. Wenzeng Zhang, D.C., Qiang Chen, Dong Du, *A dextrous and self-adaptive humanoid robot hand: gesture-changeable under-actuated hand*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
24. R. Haschke, J.J.S., I. Steuwer, H. Ritter, *Situated robot learning for multimodal instruction and imitation of grasping*.
25. R. Haschke, J.J.S., I. Steuwer, H. Ritter, *Task-oriented quality measures for dextrous grasping*. CIRA, 2005.
26. company, S.r., *Design of a dextrous hand for advanced clawar applications*. Climbing and walking robots and the supporting technologies for mobile machines: CLAWAR, 2003.
27. F. Lotti, P.T., G. Vassura, L. Biagiotti, G. Palli, C. Melchiorri, *Development of UB hand 3: Early results*. IEEE Robotics and automation, 2005.
28. Hao-Chun Sun, C.R., Raúl Suárez, *Study of coordinated motions of the human hand for robotic applications*. IEEE International conference of Information and Automation, 2010.
29. Laura Dipietro, A.M.S., Paolo Dario, *A survey of glove-based systems and their applications*. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, 2008.
30. Lisa K. Simone, e.a., *A low cost instrumented glove for extended monitoring and functional hand assessment*. Journal of neuroscience methods, 2007.
31. Lauri Connelly, e.a., *A pneumatic glove and immersive virtual reality environment for hand rehabilitative training after stroke*. IEEE, 2010.
32. Dominic E. Nathan, e.a., *Design and validation of low cost assistive glove for hand assessment and therapy during activity of daily living-focused robotic stroke therapy*. Journal of rehabilitation research & development, 2009.
33. Chan-young Park, J.-h.B., Inhyuk Moon, *Development of wireless data glove for unrestricted upper-extremity rehabilitation system*. IEEE ICROS-SICE, 2009.
34. Jwu-Sheng Hu, J.-J.W., Guan-Qun Sun, *The glove puppet robot: X-puppet*. IEEE Intelligent robots and systems, 2008.

35. F. Adam Korona, D.L.A., *Evaluation of a hybrid elastic EVA glove*. SAE, 2002.
36. Marcelo Romero Huertas, J.R.M.R., Héctor A. Montes Venegas, *A robotic arm telemanipulated through a digital glove*. IEEE, Robotics and Automotive Mechanics, 2007.
37. Stephen Mascaro, H.H.A., *Hand-in.glove human-machine interface and interactive control: task process modeling using dual petri nets*. IEEE, 1998.
38. Bin He, K.W., Chun Fang, Tao Zhang, *A research of virtual experiment in physics using data glove*. IEEE, 2007.
39. Yunli Lee, S.M., HwangKyu Yang, Keechul Jung, *Motion sensitive glove-based korean fingerspelling tutor*. IEEE, 2007.
40. Shohel Sayeed, N.S.K., Rosli Besar, *Virtual Reality Based dynamic signature verification using data glove*. IEEE, 2007.
41. Shohel Sayeed, N.S.K., Rosli Besar, *Enhancement of glove-based approach to dynamic signature verification by reducing number of sensors*. IEEE, 2008.
42. Qing Chen, e.a., *A dynamic gesture interface for virtual environments based on hidden Markov models*. IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications, 2005.
43. Yingzhen Liu, G.W., *Techniques for selecting and manipulating object in virtual environment based on 3-DOF trackers and data glove*. IEEE Artificial reality and telexistence, 2006.
44. Han, Y., *A low-cost visual motion data glove as an input device to interpret human hand gestures*. IEEE, 2010.
45. A. Cavallo, e.a., *Optoelectronic joint angular sensor for robotic fingers*. IEEE, 2009.
46. Kostas N. Tarchanidis, J.N.L., *Data glove with force sensor*. IEEE Instrumentation and measurement, 2001.
47. Lisa K Simone, e.a., *Design considerations for a wearable monitor to measure finger posture*. Journal of neuroengineering and rehabilitation, 2005.
48. Reinhard Gentner, J.C., *Development, evaluation of a low cost sensor glove for assessment of human finger movements in neurophysiological settings*. Journal of neuroscience methods, 2008.
49. Giovanni Saggio, e.a., *Improving performances of data gloves based on bend sensors*. 2010.
50. Nattapong Tongrod, T.K., Natthapol Watthanawisuth, Adisorn Tuantranont, *A low-cost data-glove for human computer interaction based on Ink-Jet printed sensors and zigbee networks*.
51. Ji-Hwan Kim, N.D.T., Tae-Seong Kim, *3-D Hand motion tracking and gesture recognition using a data glove*. IEEE Industrial electronics, 2009.
52. Chou Wusheng, W.T., Hu Lei, *Design of data glove and arm type haptic interface*. IEEE Haptic interfaces, 2003.
53. Tong Cui, A.S., Wu Juan, *A minimizing force model based on bounded force closure in multi-fingered grasping deformable object*. IEEE International conference on robotics and biomimetics, 2007.

54. Alessandro Tognetti, N.C., Giuseppe Zupone, Danilo De Rossi, *Characterization of a novel data glove based on textile integrated sensors*. IEEE EMBS, 2006.
55. Guido Heumer, e.a., *Grasp recognition with uncalibrated data gloves - A comparison of clasification methods*.
56. VILLELA, V., ARNEZ, Víctor, HERNÁNDEZ, Ernesto, *Mechanic Design of Anthropomorphic Hand for Shapeless Objects Subjection*. IEEE Cerma, 2010.
57. Areny, R.P., *Sensores y acondicionadores de señal*. 4a Edición ed. Alfaomega Marcombo2007: Boixareu Editores.
58. José Rafael Lajara Viscaíno, J.P.S., *LabVIEW Entorno gráfico de programación*. Boixareu Editores2007: Alfaomega Marcombo.