



**DISEÑO ANTROPOMORFICO DE UNA MANO ROBOTICA ARTICULADA**

**ADALBERTO LÓPEZ GÓMEZ**

**YEFFERSON BERTEL MADRID**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA  
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.**

**2012**



**DISEÑO ANTROPOMORFICO DE UNA MANO ROBÓTICA ARTICULADA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
MECATRÓNICO**

**AUTORES**

**ADALBERTO LÓPEZ GÓMEZ**

**YEFFERSON BERTEL MADRID**

**DIRECTOR**

**PHD. EUGENIO YIME RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECÁNICA Y MECATRÓNICA**

**CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.**

**2012**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Cartagena, 2012

Señores  
**COMITÉ DE GRADUACIÓN**  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica  
Universidad Tecnológica de Bolívar  
Ciudad

Respetados señores:

Por medio de la presente, nos permitimos poner a su consideración, el estudio y aprobación del proyecto de grado, titulado "**DISEÑO ANTROPOMORFICO DE UNA MANO ROBOTICA ARTICUDA**" como requisito para optar a los títulos de Ingeniero Mecánico y Mecatrónico.

Atentamente

  
ADALBERTO LÓPEZ GÓMEZ  
Estudiante de ingeniería Mecatrónica

  
YEFFERSON BERTEL MADRID  
Estudiante de ingeniería Mecánica

**Cartagena de Indias, 2012**

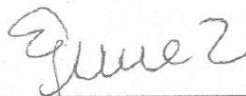
Cartagena, 2012

Señores  
**COMITÉ DE GRADUACIÓN**  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica  
Universidad Tecnológica de Bolívar  
Ciudad

Respetados señores:

La presente es para manifestarles que a petición de los estudiantes **ADALBERTO LÓPEZ GÓMEZ** y **YEFFERSON BERTEL MADRID**, de la facultad de ingeniería mecánica y mecatrónica, he decidido aceptar la dirección de su proyecto de trabajo de grado titulado "**DISEÑO ANTROPOMORFICO DE UNA MANO ROBOTICA ARTICUDA**" como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico y Mecatrónico.

Atentamente



---

**PhD. Eugenio Yime Rodriguez**  
Director de trabajo de grado

**ARTICULO 105**

La universidad Tecnológica de Bolívar se reserva el derecho de propiedad intelectual de todos los trabajos de grado aprobados y no pueden ser explotados comercialmente sin aprobación.

## **DEDICATORIA**

### ***A Dios.***

*Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.*

### ***A mis padres, Adalberto y Alba Rosa.***

*Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.*

### ***Mis hermanos, Alba Rosa, Raíza Brigitte y Kenny Andrés***

*Por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.*

### ***Mi abuela Juana María Epiayú Fernández (Q.E.P.D).***

*Por quererme y apoyarme siempre, esto también te lo debo a ti.*

***Adalberto López Gómez***

## ***DEDICATORIA***

Mis agradecimientos se los doy a mis padres, a mis hermanas y a mi hija la cuales han sido las personas que me han hecho esmerarme para formarme profesionalmente y salir adelante en todos mis propósitos, también le agradezco al señor Guillermo y al señor Cuadro por su colaboración en los procesos de fabricación de nuestra tesis también le agradezco a los profesor Eugenio Yime , al profesor Edgardo Arrieta y al profesor Vladimir Quiroz.

También le agradezco mucho a mis compañeros y amigos Nelson Marsiglia, Jeifher Páez y Adalberto López. En quienes encontré una sincera amistad y compañerismos

**Yefferson Bertel Madrid**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al Profesor Eugenio Yime Rodríguez por brindarme su disponibilidad, tiempo, apoyo y conocimiento durante la ejecución del proyecto.*

*Carlos Cuadro. Encargado de los talleres de la Universidad Tecnológica de Bolívar. Por toda la colaboración prestada y por haber sudado la camiseta con nosotros.*

*A mis compañeros de estudio, que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo amigos, Oscar Vélez, Ronald Cassiani, Nelson Marsiglia, Jheiffer Páez y Héctor Reyes, por haberme ayudado a realizar este trabajo. Por compartir los buenos y malos momentos.*

*Todos mis amigos que no recordé al momento de escribir esto. Gracias por hacer de mi estadía en Cartagena lo más gratificante posible, imposible borrar esos recuerdos de mi mente, Ustedes saben quiénes son !!!*

## INDICE GENERAL

INDICE GENERAL.....	10
II. LISTA DE IMÁGENES.....	13
III. LISTA DE TABLAS.....	15
0. INTRODUCCIÓN.....	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	21
2. OBJETIVOS.....	22
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	22
2.2. OBJETIVO ESPECIFICO.....	22
2.3. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN.....	23
2.4. JUSTIFICACIÓN.....	24
2.5. ESTADO DEL ARTE.....	25
2.6. MARCO CONCEPTUAL.....	35
2.6.1. ANATOMIA DE LA MANO HUMANA.....	35
2.6.1.1. Anatomía de la mano humana.....	36
2.6.1.2. Anatomía de la región palmar.....	36
2.6.1.3. Huevo de la mano.....	37
2.6.1.4. Aponeurosis.....	37
2.6.1.5. Planos de la región palmar.....	37
2.6.1.6. Región dorsal.....	38
2.6.2. ESQUELETO DE LA MANO.....	38
2.6.2.1. Carpo.....	39
2.6.2.2. Articulación radio carpiana.....	39
2.6.2.3. Metacarpo.....	39
2.6.2.4. Articulaciones carpo metacarpianas.....	39
2.6.3. ARQUITECTURA DE LA MANO.....	39
2.6.3.1. Las articulaciones metacarpo falángicas.....	40
2.6.3.2. Amplitud de los movimientos de las articulaciones metacarpo falángicas.....	40
2.6.3.3. Articulaciones interfalángicas.....	41
2.6.3.4. Amplitud de los movimientos de las articulaciones interfalángicas.....	41

2.6.4.	EL PULGAR .....	41
2.6.4.1.	La oposición del pulgar.....	41
2.6.4.2.	Los modos de prensión .....	42
2.6.4.3.	Presas digitales .....	42
2.6.4.4.	Presas palmares .....	42
2.6.4.5.	Presas centradas .....	42
2.6.4.6.	Presas con gravedad.....	43
2.6.4.7.	Presas más acción.....	43
3.	MODELO MECANICO.....	43
3.1.	MODELO MATEMÁTICO.....	45
3.1.1.	Formulación del Modelo .....	45
3.1.2.	Excursión de Tendón y brazo de momento.....	48
3.1.3.	Resultados.....	50
4.	DISEÑO DE LA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÓRFICA.....	57
4.1.	Especificaciones.....	57
4.2.	Estructura .....	58
4.2.1.	Estructura de un dedo.....	58
4.2.2.	Sistema de transmisión.....	58
4.3.0.	ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS .....	63
4.3.1.	Simulación de pieza N°1 .....	63
4.3.2.	Desplazamiento Para la pieza N°1 .....	64
4.3.3.	Simulación para la pieza N° 2 .....	65
4.3.4.	Desplazamiento Para la pieza N°2 .....	66
4.3.5.	Simulación para la pieza N° 3 .....	67
4.3.6.	Desplazamiento Para la pieza N° 3 .....	68
4.3.7.	Simulación para la pieza N° 4 .....	69
5.	ELECTRONICA DE CONTROL DE LA MANO ROBOTICA .....	71
5.1.	CONTROLADOR MAESTRO PARA SERVOMOTORES.....	71
5.1.1.	Micro Maestro pins y componentes.....	72
5.2.	ANÁLISIS .....	73
5.2.1.	Uso del Maestro control Center.....	73
5.2.2.	Requerimientos .....	74

5.2.3. Eventos del Hardware .....	75
5.3. ANÁLISIS DEL SISTEMA EN MATLAB® .....	75
5.3.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CINEMÁTICO. ....	79
5.3.1.1. Velocidad de la articulación A1 .....	79
5.3.1.2. Velocidad de la articulación A2.....	81
5.3.1.3. Velocidad de la articulación A3.....	82
5.3.1.4. Aceleración de la articulación A1.....	83
5.3.1.5. Aceleración de la articulación A2.....	84
5.3.1.6. Aceleración de la articulación A3.....	85
5.3.1.7. Sobre aceleraciones .....	86
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
6.1. CONCLUSIONES.....	88
6.2. RECOMENDACIONES .....	89
Anexo A. Planos de partes del efector .....	90
Anexo B. Manual de instalación de Driver para el Servo Microcontroller. ....	95

## II. LISTA DE IMÁGENES

**Figura 1.1.** Robot antropomórfico IROS que aprende por imitación

**Figura 1.2.** Robot antropomórfico con estructura similar a la de los humanos.

**Figura 1.3.** Robot antropomórfico con capacidades para comportamiento autónomo.

**Figura 1.4.** Robot basado en los rangos de movimiento del brazo humano.

**Figura 1.5.** Robot construido con "Powercubes"

**Figura 1.6.** Robot con 5 GDL.

**Figura 1.7.** Robot de 6 GDL.

**Figura 1.8.** Robot humanoide COG con 6 GDL

**Figura 1.9.** Robot humanoide WHOLE con 6 GDL.

**Figura 1.10.** Robot humanoide WE-4RII con 7 GDL.

**Figura 1.11.** Brazo humanoide con 7 GDL.

**Figura 2.1:** Modelos prensiles humanos, a) cilíndrica palmar, b) subterminolateral, c) centralizado, d) tridigital, e) posición subterminal

**Figura 2.2.** Formas básicas de prensión de la mano

**Figura 2.3.** Mano humana -Músculos extrínsecos e intrínsecos, vista palmar

**Figura 2.4.** La mano humana: Estructura ósea, vista palmar

**Figura 3.1** Modelo Biomecánico de una mano humana

**Figura 3.2.** Sistema de coordenadas usado para definir la localización de los tendones.

**Figura 3.3.** Dos puntos en cada tendón de la articulación tienen relaciones fijas con sus sistemas de coordenadas

**Figura 3.4.** Ecuación de transformación que expresa el tendón y la fuerza.

**Figura 3.5.** Ángulos Eulerianos usados para definir la orientación de los dedos.

**Figura 3.6.** Modelos bidimensionales de Landsmeer de tendón puente de una articulación

**Figura 3.7.** Distancia entre sistemas de coordenadas. Media y desviación estándar.

**Figura 4.1.** Diseño de un dedo de la mano antropomórfica.

**Figura 4.2.** Vistas de dedo diseñado donde se muestra como están conectados el sistema de falanges

**Figura 4.3.** Presiones ejercidas en el dedo.

**Figura 4.4.** Dedo de la mano diseñada.

### III. LISTA DE TABLAS

**Tabla 1.1.** Características del brazo robótico IROS.

**Tabla 1.2.** Características del brazo robótico antropomórfico.

**Tabla 1.3.** Características del brazo robótico

**Tabla 1.4.** Características del brazo robótico con 5 GDL.

**Tabla 1.5.** Características del brazo robótico con 6 GDL.

**Tabla 1.6.** Características del brazo robótico COG

**Tabla 1.7.** Características del brazo robótico WHOLE

**Tabla 1.8.** Características del brazo robótico WE-4RII.

**Tabla 1.9.** Características del brazo robótico

**Tabla 3.1.** Músculos y tendones relacionados con el movimiento de la mano

**Tabla 3.2.** Localización de tendones en el pulgar (valor medio de cinco especímenes)

**Tabla 3.3.** Localización de tendones en el índice (valor medio de quince especímenes)

**Tabla 3.4** Localización de tendones en el medio (valor medio de quince especímenes)

**Tabla 3.5.** Localización de tendones en el anular (valor medio de quince especímenes)

**Tabla 3.6.** Modelo mecánico equivalente para las articulaciones del dedo y pulgar.

**Tabla 4.1.** Especificaciones de la mano antropomórfica.

**Tabla 4.2.** Selección de motores de la marca PowerHD

## RESUMEN

Tomar un objeto y manipularlo es una actividad que nos parece muy natural, y hasta simple, ya que los humanos la realizamos sin esfuerzo. Pero la realidad es que todo aquel que quiso darle esta capacidad a una máquina ha descubierto que se trata de una tarea para nada fácil de implementar.

Además de la cantidad de articulaciones que se necesitan para darle versatilidad a una mano robótica, se necesita sensibilidad táctil.

Para que podamos mover las falanges como lo hacemos, los dedos de la mano humana poseen 3 articulaciones cada uno 15 en total en toda la mano. A éstas hay que agregarles la articulación principal de la muñeca.

De ellas, seis son juntas de doble eje de movimiento o "universales". Traducido a actuadores, o motores, para hablar en términos sencillos, esto significa que para mover una mano de manera diestra deben actuar orquestadamente 21 de estos actuadores, todos ellos ubicados en un espacio bastante acotado.

La mano RMHAND tiene 5 dedos, que en conjunto suman 5 grados de libertad de movimiento (movimientos posibles). Cada dedo tiene 1 grado de libertad; de ellos en la articulación del dedo con la palma y en la falange media del dedo (la falange del extremo del dedo o "yema" se mueve en conjunto con la falange media). Todos los actuadores están incluidos en la palma. Las articulaciones se mueven gracias a engranajes especialmente diseñados, que no utilizan alambres como tendones.

## **ABSTRACT**

Take an object and manipulate it is an activity that seems very natural, and even simple, since humans do effortlessly. But the reality is that anyone who wanted to give this capability to a machine has discovered that this is a task not easy to implement.

Besides the number of joints that need to provide versatility to a robotic hand, tactile sensitivity is needed.

For us to move the phalanges as we do, the human fingers each have 3 joints 15 in total in the whole hand. To these must to add to them the main joint of the wrist.

Of these, six are double joints motion axis or "universal". Translated into actuators, or motors, to speak in simple terms, this means that to move a hand so skilled must act synchronously 21 of these actuators, all located in a fairly limited space.

RMHAND Hand has 5 fingers, which together account for 5 degrees of freedom of movement (movement possible). Each finger has one degree of freedom, of which at the joint of the finger with the palm in the middle phalanx of finger (the end joint of the finger or "yolk" moves along with the middle phalanx). All actuators are included in the palm. The joints move through specially designed gears, which do not use wires and tendons.

## 0. INTRODUCCIÓN

Un aspecto importante en la evolución y desarrollo de nuevas aplicaciones robóticas, reside en el uso y potenciación de los actuadores que contribuyen a un robot. Uno de los actuadores que actualmente es sujeto a estudio dadas las características, es un gripper basado en el diseño antropomórfico de una mano robótica.

Una mano robótica es un dispositivo mecánico basado en la imitación del comportamiento de la mano humana. Concretamente, se trata de un manipulador que es un ensamblaje de eslabones y articulaciones que permiten rotación o traslación entre dos de los eslabones. Estos eslabones son sólidos y están sostenidos por una base (horizontal, vertical o suspendida), con una articulación entre la base y el primer eslabón. El movimiento y las articulaciones definen los "grados de libertad" del robot [1]. Sin embargo, una limitante común es el control de posición del actuador, debido a la dificultad inherente de no linealidad del propio actuador. Una configuración típica de una mano robótica es la de cuatro grados de libertad, a la que se añaden las posibilidades de movimiento en la muñeca, llegando a un total de cuatro a seis grados de libertad. Algunos robots tienen entre siete y nueve grados de libertad, pero por su complejidad, son menos comunes [2][@manufactura].

Aunque ya se han diseñado y construido diversos brazos alrededor del mundo. En Colombia este tipo de desarrollos está en su etapa de crecimiento, es por ello que es importante estudiarlos y desarrollarlos.

En este trabajo se presentan los resultados de la investigación, análisis y diseño realizados en el programa de Ingeniería Mecatrónica, con orientación en el diseño robótico, el objetivo de descubrir los diferentes elementos, procesos y prácticas a través de los cuales se conforman y reconfirman las identidades de un sistema Mecatrónica en sus diferentes niveles: Diseño mecánico, Diseño Electrónico, Sistemas de control y particularmente los significados que se construyen en campos de : La medicina, dispositivos de ayuda a discapacitados, transporte de medicamentos y en el área de la química, para el manejo de elementos radioactivos. Considerados aquí como el punto de partida en un proceso continuo de resignificación de los contenidos propuestos oficialmente en este trabajo de grado.

Para la UTB es importante, dentro de la línea de investigación en Mecatrónica y Robótica, incrementar el conocimiento que permita el desarrollo y perfeccionamiento de los sistemas que emulan los movimientos de algunas partes del cuerpo humano, con el objetivo de diseñar sistemas robóticos que realicen actividades que el ser humano no puede desarrollar, ya sea por limitaciones físicas, por la existencia de ambientes hostiles o manejo de sustancias peligrosas, que ponen en riesgo su seguridad. También, el estudio de estos sistemas obedece a la necesidad de mecanismos que realicen operaciones repetitivas o incluso para

desarrollar prótesis que pudieran ser una alternativa para personas que las requieran.

Inicialmente, la investigación se propuso abarcar diferentes modelos, diseños y aplicaciones de mecanismos mecánicos controlados electrónicamente, y así se planteó en el proyecto, por lo que se aplicaron diversas técnicas de investigación durante cerca de un año, en los que se realizó el trabajo de esta investigación. Sin embargo, la amplitud y riqueza de los materiales recabados, así como los plazos limitados para concluir la investigación, propiciaron que se realizara un recorte para profundizar en algunos aspectos, reservándose una parte de los materiales empíricos obtenidos para ser trabajados en posteriores investigaciones.

El desarrollo que aquí se presenta está dividida en dos partes, y cada una de ella aborda el objeto de estudio desde diferentes ángulos, por lo que siguen su propia lógica, técnicas de investigación y presentación de resultados.

En la primera parte, titulada “Caracterización de la mano Robótica”, se aborda los diversos diseños, modelos y procesos a través de los cuales se realizó el desarrollo, lo que incluye las orientaciones metodológicas y teóricas en manera de información en las que de manera inicial permite al lector ubicarse en el tema a tratar. En esta parte se presenta también, un estudio sobre los escenarios donde se realiza la investigación, punto de partida fundamental, ya que las características históricas y tecnológicas de la robótica marcan singularmente el tipo de procesos de evolución. Por ello se aborda sobre los orígenes y transformaciones históricas, desde sus orígenes aproximadamente en el año 1921, hasta llegar a formar parte de la presente era, con el consecuente impacto creativo y conceptual que esto ha tenido en su fisonomía, las formas en que contribuyen en la de vida de habitantes y los diseños simbólicos y fenómeno cultural que sobre éstos se origina.

El segundo capítulo, titula “Diseño de la mano robótica”, se aborda los diversos planteamientos, procesos y estrategias a través de los cuales se construyó el objeto de estudio, lo que incluyen el modelado matemático, modelos cinemáticos directo e inverso, los modelos dinámicos directo. Se hace un análisis de los modelos obtenidos, resolviendo las ecuaciones resultantes para proceder a la codificación de estas ecuaciones para la simulación en PC del comportamiento del robot. El capítulo tres presenta toda su atención en un trabajo personal y experimental dedicado al mecanismo robótico, comprobando así todas las variantes relevantes que intervienen en este diseño.

Es importante recalcar que el énfasis del estudio está puesto en la conformación de varias etapas de diseño, que corresponden a la relación subjetiva que establece este robot, en el que se busca crear un mecanismo que en parte recre el comportamiento de una mano humana y significaciones directas, ya que no solamente parten de una construcción imaginaria, aunque por supuesto, generalmente existe, sino que se alimenta de la relación inmediata con la extremidad humana, por el que se transita o en el que aparecen varios factores, y

en este caso, especialmente donde va orientada esta tesis y en la cual los alumnos que participaron en ella quisieron orientar esta investigación.

Así pues, la intención de este análisis es doble: por un lado, se propone desentrañar los complejos mecanismos a través de los cuales un grupo de alumnos de Mecatrónica han conformado su propia identidad dentro de esta ingeniería, considerando los diferentes elementos que se han conjugado en cada construcción particular, el peso que ha tenido cada uno de ellos, así como los sentidos y contenidos simbólicos que han adoptado a través de las trayectorias vitales personales y universitarias. En suma, el objetivo central de los relatos es estudiar las fuentes, elementos y procesos a través de los cuales se realiza la construcción subjetiva de las identidades de un robot.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la vida contemporánea con ayuda de los avances de la tecnología es posible la conectividad de dispositivos remotos y se ha estado en la búsqueda de algunos que puedan suplir el funcionamiento total o parcial de algunos miembros o partes del cuerpo humano bajo circunstancias especiales como la pérdida de algún miembro o para lograr llegar a lugares de difícil acceso para las personas, es así como se necesita la construcción de robots que suplan estas necesidades, y la creación de sistemas que realicen esta conectividad que es tan necesaria en el ámbito actual de las empresas y de las personas del común.

Teniendo en cuenta estas obligaciones es como llegamos a la construcción de robots que reemplacen o suplanten al ser humano total o parcialmente en ciertas tareas que ya sea por incapacidad propia o por falencia de ciertas habilidades no se pueden realizar. Uno de los robots que hoy en día podría ser de gran ayuda en nuestra región es la mano robótica para que supla los movimientos normales de la mano humana para personas que no pueden estar presentes en el lugar donde se necesite dicha manipulación como es caso de la manipulación de objetos explosivos, su uso en la medicina ya sea como prótesis o en cirugías donde se puedan llevar a cabo procedimientos quirúrgicos remotamente. De acuerdo al registro para la localización y caracterización de las personas con discapacidad adelantado por el DANE en 2010 , en Colombia existen alrededor de 413.269 personas que presentan alteraciones en el movimiento del cuerpo, manos, brazos y piernas. Una buena parte de esta discapacidad tiene su origen en la ausencia total o parcial de una o ambas manos<sup>1</sup>.

Además de comunicar en tiempo real el dispositivos, se necesita un diseño el cual le permita a la mano robótica capacidades para manipular y desarrollar todos los movimientos que es necesario que haga o mejor dicho que se pueda manipular lo más aproximadamente posible a cómo funciona la mano humana.

Por lo expuesto anteriormente, el problema de la falta de desarrollo tecnológico alrededor de las aplicaciones de la robótica en instancias humanoides radica en las dificultades al acceso al conocimiento y a sus aplicaciones por parte de las universidades y por parte del sector empresarial. Precisamente lo que se quiere con este proyecto es proporcionar unas bases para que desarrollos tecnológicos se puedan hacer a partir de los conocimientos que aquí se comparten.

---

<sup>1</sup>**DANE.** Registro para la localización y caracterización de las personas con discapacidad. Noviembre 2010.

En Línea: [http://www.dane.gov.co/index.php?option=com\\_content&view=article&id=74&Itemid=120](http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=74&Itemid=120)

## **2. OBJETIVOS.**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Análisis y diseño de un prototipo de una mano robótica con un grados de libertad, capaz de ser dirigida a través de conexión USB en tiempo real.

### **2.2. OBJETIVO ESPECIFICO.**

- ❖ Diseñar y construir un efector antropomórfico que emule los movimientos de flexión y extensión de los dedos de la mano humana, a base de sensores actuados por músculos servomotores.
- ❖ Conocer la cinemática involucrada en el sistema.
- ❖ Investigación del estado del arte de un prototipo de mano robótica.
- ❖ Contribuir al fortalecimiento de una línea de investigación en robótica en la UTB.
- ❖ Elaborar una serie de prácticas para la utilización de la mano robótica como parte de la infraestructura para el apoyo de la docencia e investigación.

### 2.3. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

Los alcances de este trabajo de investigación son los siguientes:

- ❖ **Modelos:** Una vez finalizada la búsqueda de los modelos matemáticos cinemáticos y dinámicos, se adecuarán a la mano robótica.
- ❖ **Parámetros:** Se obtuvieron los parámetros del robot sin necesidad de desmontar las piezas que lo conforman.
- ❖ **Simulación:** Se programaran los modelos del robot para simulación, empleando software ya existente en la UTB.
- ❖ **Validación:** La validación del modelo se irá con el robot real, comparando las mediciones con los resultados de las simulaciones. Se usará la instrumentación con la que cuenta la UTB.
- ❖ **Prácticas:** Éstas son para que cualquier profesor-investigador y/o alumno las realice de forma sencilla y entendible sin necesidad de tener un amplio conocimiento en la robótica.

## 2.4. JUSTIFICACIÓN

En el área de Mecatrónica de la UTB cuenta con algunas investigaciones relacionadas con el desarrollo de manipuladores que reproducen algunos movimientos de extremidades superiores humanas. Con este proyecto se busca incrementar dicho conocimiento en esta línea de investigación. Su beneficio es aportar diferentes alternativas de solución para problemas específicos que involucran la integración de las áreas de Electrónica, Mecánica y Computación desde un punto de vista mecatrónico. Para esto se abordan los problemas que surgen en el estudio de los movimientos de la mano humano.

Los beneficios que se obtendrán al realizar este proyecto es que al implementar el control de la mano robótica simplemente tendrán un movimiento más dinámico (que se puedan mover de una forma menos rígida y con más grado de libertad de movimiento) además de que al implementarlo en la industria se podrá trabajar de una manera más rápida y eficiente y no solo en la industria ya que esta mano si es llevado al campo de la educación (en instituciones de educación superior) a los alumnos se les puede dar clases acerca de cómo es que puede operar en caso de que no tengan idea de cómo funciona el control de este robot.

## 2.5. ESTADO DEL ARTE

El agarre humano posee una sorprendente flexibilidad e incomparable destreza, tal que ha llamado la atención de muchos investigadores, [3-12]. El estudio del agarre humano como modelo ha llevado a la construcción de innovadores pero costosos prototipos de dedos, para ser utilizados como partes funcionales de robots antropomórficos. Ejemplos de referencia pueden ser la manos de el Instituto Politécnico de Setúbal, [3], Institute of Robotics and Mechatronics German Aerospace Center” [5], La Universidad de Karlsruhe [6],[7], DLR Hand, [4], Robonaut hand de la Nasa [6], Los cuales se pueden observar en las siguientes figuras.

La mayoría de los prototipos disponibles tienen un número alto de GDL, un control complejo y por tanto un alto costo.

Recientemente se han desarrollado estudios en la Universidad Tecnológica de Bolívar, en donde se desarrolló una mano antropomórfica que imita los modelos prensiles humanos pero cuyo inconveniente sigue siendo el elevado número de actuadores utilizados y el costo para su implementación.

En este trabajo de investigación se trata del diseño de un prototipo de mano antropomórfica pues tiene el tamaño similar al de una mano humana y el cual utiliza el menor número de actuadores, además de ser económico y de funcionamiento sencillo. Este prototipo puede usarse como módulo para una mano robótica antropomórfica. Para el diseño de este mecanismo ha sido de gran importancia el uso de software de simulación mecánica como SolidEdge®, con el fin de tomar decisiones de los elementos que se deben usar para la transmisión de movimiento entre el actuador (Servomotor) y las partes móviles que componen la estructura.

**En el Instituto Politécnico de Setúbal,[3],** Portugal se diseñó un robot antropomórfico denominado IROS, que combina una cabeza binocular, un brazo y una mano, para investigación en coordinación de un “visuomotor” y aprendizaje por imitación. El objetivo fue producir un sistema semejante a la cinemática del brazo y mano. Los movimientos del hombro de este robot fueron modelados a base de tres GDL, el codo con dos GDL y la muñeca del brazo tiene un GDL. La cinemática inversa de este robot fue realizada en dos partes: posición de la muñeca y orientación de la mano, donde los tres primeros GDL sirven para posicionar la muñeca y los otros tres para orientar la mano.



**Figura 1.1.** Robot antropomórfico IROS que aprende por imitación.

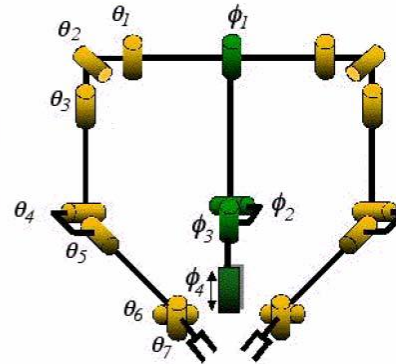
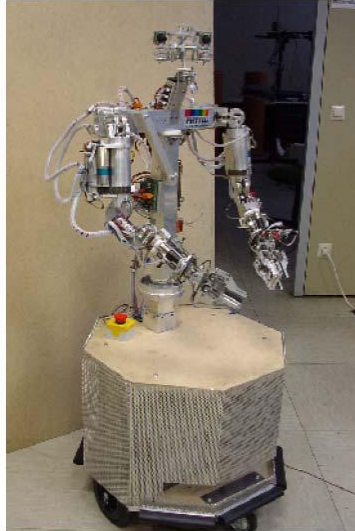
<b>GRADOS DE LIBERTAD</b>	6
<b>Tipo de Actuadores</b>	Motores DC
<b>Tipo de Transmisión</b>	Polea – Correa
<b>Efactor Final</b>	Mano Antropomórfica

**Tabla 1.1.** Características del brazo robótico IROS.

**Forschungszentrum Informatik Karlsruhe [4].** Se diseñó un robot con un torso y dos brazos con una estructura similar a la de los humanos. Los brazos tienen siete grados de libertad (GDL): tres en el hombro, dos en el codo y tres en la muñeca. La longitud del brazo es de 65 cm. (incluyendo la pinza); el peso total del brazo es de 45kg. Lo novedoso de la pinza es que es de peso ligero y sus movimientos se realizan con un solo actuador.

En este brazo robótico, la estructura física del brazo antropomórfico (tamaño, forma y cinemática) se desarrolló tan cerca como fue posible al brazo humano, en términos de longitudes, eje de la rotación y espacio de trabajo.

El control de los motores se realizó a base de un microcontrolador C-167 y una PC estándar. Los microcontroladores trabajan en conjunto con tarjetas de potencia especiales; cada tarjeta controla 4 motores. Las tarjetas de los microcontroladores se conectan vía Bus- CAN con un índice de transferencia máximo de 1 Mbit/s a la PC.



**Figura 1.2.** Robot antropomórfico con estructura similar a la de los humanos.

<b>GRADOS DE LIBERTAD</b>	7
<b>Tipo de Actuadores</b>	Motores DC
<b>Tipo de Transmisión</b>	Polea – Correa
<b>Efecto Final</b>	Mano Antropomórfica

**Tabla 1.2.** Características del brazo robótico antropomórfico.

En el “Institute of Robotics and Mechatronics German Aerospace Center” [5], se desarrolló un sistema de mano y brazo con características antropomórficas con algunas capacidades para comportamiento autónomo. El sistema se basa en principios de construcción de peso ligero del brazo y una mano articulada con cuatro dedos. El sistema realiza análisis de escenas en tiempo real por visión, control de par adaptable y una interfaz hombre-máquina intuitiva.

El brazo tiene siete GDL. Cada articulación se compone de un motor de CD sin escobillas y un reductor armónico. Cuenta con un freno magnético de emergencia por GDL.

Para lograr el peso ligero del brazo, cada uno de sus eslabones se diseñó en fibra de carbón. El brazo tiene 13 kg de peso total y es capaz de sostener en su efector final cargas de 15kg.

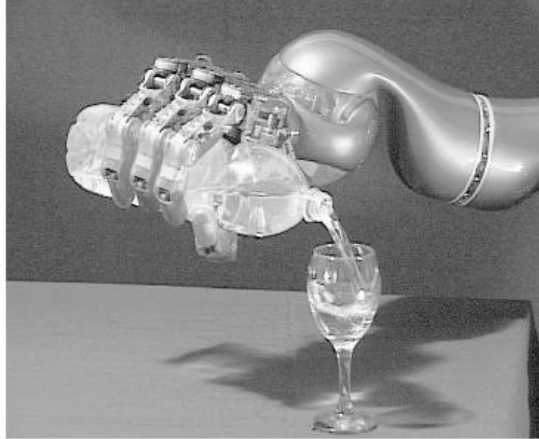


Figura 1.3. Robot antropomórfico con capacidades para comportamiento autónomo.

La Universidad de Karlsruhe[6], desarrolló un brazo robot antropomórfico llamado brazo- FZI. El diseño se basó en la observación de los rangos de movimiento del brazo humano. El mecanismo consta de siete GDL: tres en el hombro, dos en el codo y dos en la muñeca. Lo novedoso de este brazo fue la utilización de motores ultrasónicos de alto par en la parte del hombro y de la muñeca.

Las ventajas son que tiene tamaño pequeño, peso ligero (aproximadamente 20 kg.) y alto par a baja velocidad; trabaja a una velocidad de 80°/s. La carga máxima que puede sostener en su efector final es de 4 kg.



Figura 1.4. Robot basado en los rangos de movimiento del brazo humano.

GRADOS DE LIBERTAD	7
Tipo de Actuadores	Motores Ultrasonicos
Tipo de Transmisión	Cables, Poleas y Correa
Efector Final	Pinza

Tabla 1. 3. Características del brazo robótico

Institute of Process Control and Robotics, University of Karlsruhe, Germany[6]. Diseñaron un brazo robótico que consta de seis, así llamados, “Powercubes” por AMTEC y tiene siete GDL en una configuración de forma humana

Tres cubos representan una junta esférica del hombro; otros dos cubos se usan como las juntas rotatorias para el codo y para el antebrazo; un módulo llamado muñeca consta de dos juntas ortogonales que representan las últimas dos uniones localizadas en la muñeca del brazo del robot, cada módulo rota con una velocidad máxima de 180°/s. El brazo tiene una masa de 14.2 kg. y la carga máxima que puede levantar en el efector final es de 2 kg.

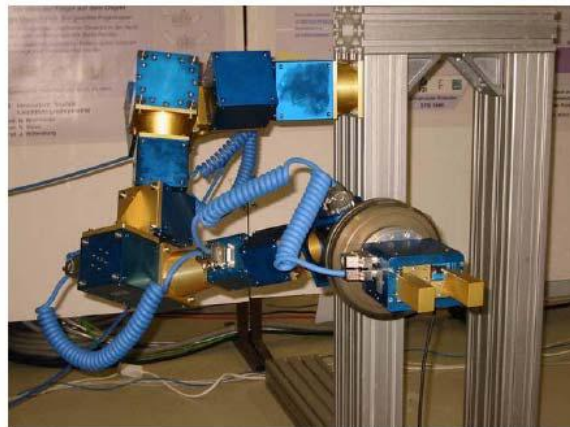


Figura 1.5. Robot construido con “Powercubes”.

École Polytechnique Fédérale de Lausanne[7], diseñó un brazo mecánico de cinco grados de libertad. El proyecto se desarrolló con la meta de hacer un juguete educativo para los niños normales o discapacitados. Este proyecto se basa en la comunicación y el entrenamiento por la vista y los gestos.



Figura 1.6. Robot con 5 GDL.

GRADOS DE LIBERTAD	5
Tipo de Actuadores	Motores DC
Tipo de Transmisión	Engranajes - Cables
Efecto Final	Pinza

Tabla 1.4. Características del brazo robótico con 5 GDL.

[8] El Instituto de Tecnología de Massachussets diseñó un brazo de seis grados de libertad; el objetivo principal fue que el brazo fuera pasiva y activamente adaptable y capaz de sensor y dominar fuerzas de torsión en cada grado de libertad.



Figura 1.7. Robot de 6 GDL.

GRADOS DE LIBERTAD	6
Tipo de Actuadores	Motores sin escobillas en DC
Tipo de Transmisión	Cables - Poleas
Efecto Final	Pinza

Tabla 1.5. Características del brazo robótico con 6 GDL.

La Universidad de Oxford [9], diseñó un humanoide con 2 brazos. Cada brazo tiene seis grados de libertad y están dispuestos de manera similar y tienen aproximadamente la misma longitud que el brazo humano.

La cinemática de los brazos está diseñada para ser similar a un brazo humano, con dos uniones tanto para el hombro, codo y muñeca. Cada unión es actuada mediante una serie de actuadores elásticos, que consisten en un motor de CD ordinario con una caja reductora y un resorte en serie con la salida del motor.

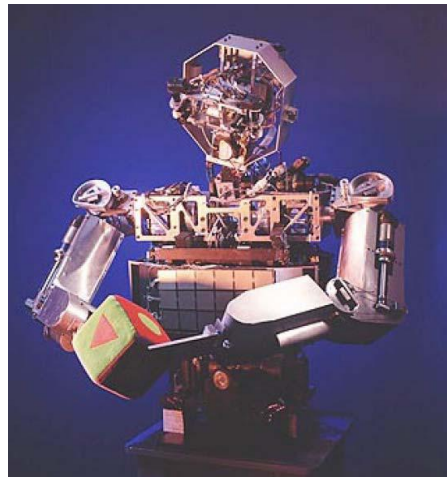


Figura 1.8. Robot humanoide COG con 6 GDL.

GRADOS DE LIBERTAD	6
Tipo de Actuadores	Motores sin escobillas en DC
Tipo de Transmisión	Cables, Poleas y Resortes
Efecto Final	Pinza

Tabla 1. 6. Características del brazo robótico COG.

La Universidad de Southampton [10], diseñó un brazo robótico con seis GDL. Su objetivo principal fue obtener conocimientos sobre las características del brazo y mano humana y que sea capaz de maniobrar 4 kg. en su efector final.

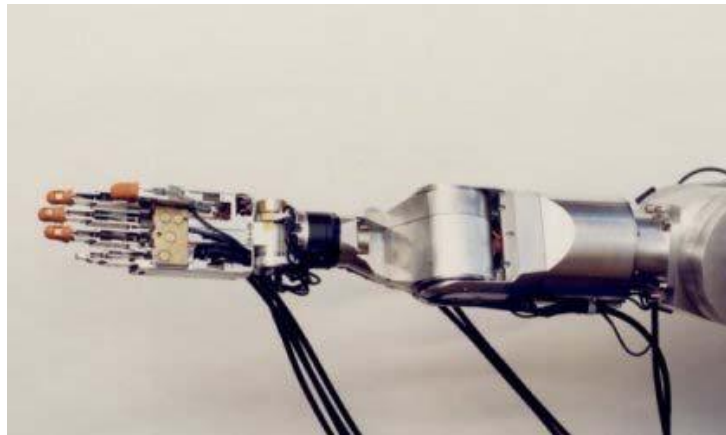


Figura 1.9. Robot humanoide WHOLE con 6 GDL.

GRADOS DE LIBERTAD	6
Tipo de Actuadores	Motores DC
Tipo de Transmisión	Armonic Drive
Efector Final	Pinza

Tabla 1.7. Características del brazo robótico WHOLE

En la Universidad de Waseda [11], se diseñó un brazo de 7 grados de libertad donde el rango móvil de cada unión es como la de un humano, esto con el objetivo de obtener una expresión más emocional como la humana. Se diseñó el robot para tener las mismas dimensiones que un varón promedio y tener una apariencia natural.



Figura 1.10. Robot humanoide WE-4RII con 7 GDL.

GRADOS DE LIBERTAD	7
Tipo de Actuadores	Motores DC
Tipo de Transmisión	Armonic Drive
Efecto Final	Mano Antropomorfa

Tabla 1.8. Características del brazo robótico WE-4RII.

Universidad de Tokio [12]. Se diseñó un brazo de siete grados de libertad; el objetivo principal fue desarrollar el brazo robótico para un sistema combinado maestro-esclavo para mantener una “tele-existencia mutua”, con lo cual realiza comunicación física cercana con otras personas usando gestos y las tareas diestras de manipulación.

Lo novedoso de este brazo fue que el diseño se realizó muy ligero con el objetivo de moverlo muy rápido, lo cual se logra a base de reductores armónicos, motores de CD y bandas para cada GDL. El brazo tiene una masa total de 7.3 kg. y puede sostener una carga de 0.5 kg. en su efecto final, alcanzando velocidades de 1.2 m/s.

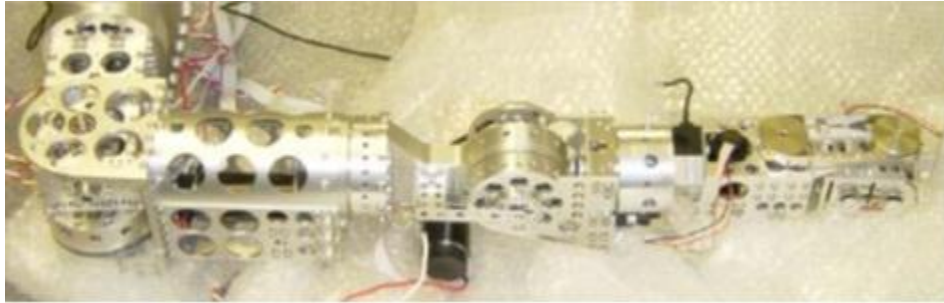


Figura 1.11. Brazo humanoide con 7 GDL.

GRADOS DE LIBERTAD	7
Tipo de Actuadores	Motores DC
Tipo de Transmisión	Armonic Drive
Efecto Final	Mano Antropomorfica

Tabla 1.9. Características del brazo robótico

## 2.6. MARCO CONCEPTUAL

El aparato locomotor permite al ser humano o a los animales en general interactuar con el medio que le rodea mediante el movimiento o locomoción. Éste agrupa una serie de estructuras, órganos y sistemas; concretamente los huesos, las articulaciones y los músculos, cuya función es brindar soporte, protección al organismo y posibilitar sus desplazamientos [13].

El aparato locomotor funciona como un conjunto complejo de palancas en el que los músculos aportan la fuerza, las articulaciones hacen las veces de punto de apoyo y los huesos se comportan como segmentos móviles. La coordinación en las posiciones que adoptan y los movimientos que describen los huesos, articulaciones y músculos; es posible gracias a la presencia de una amplia red de nervios que llevan y traen información, hacia y desde, el sistema nervioso central.

A continuación se presentan un compendio de información entorno a los músculos biológicos y neumáticos, la cual ha dado la pauta para la realización de este trabajo.

### 2.6.1. ANATOMIA DE LA MANO HUMANA

La mano del hombre es una excelente herramienta, posee una gran flexibilidad y destreza, lo cual le permite realizar innumerables acciones gracias a su función esencial: la presión. Posee un sin número de funcionalidades que le otorgan múltiples acciones, posiciones y movimientos, todo esto se debe particularmente por el dedo pulgar, el cual puede oponerse al resto de los dedos. En la naturaleza se encuentra diversos animales con la facultad de presión en sus manos, pero sin el grado de perfección que ha alcanzado el ser humano. En los simios el pulgar es oponible, pero no alcanza la amplitud del pulgar humano.

El dedo pulgar está fijo por debajo de los otros dedos, lo cual permite que se pueda realizar los movimientos de cierre y rotación, debido a la gran movilidad de su metacarpo esto permite variar la orientación del plano en que se desarrolla su movimiento de doblado y extensión del dedo pulgar, propiedades que permiten oponer el dedo pulgar a los otros dedos, a lo que se le llama abducción al movimiento de salida del dedo del eje del brazo.

En 1919 Schlesinger desarrolló una clasificación de la taxonomía para el estudio de la destreza de las manos humanas. Agrupó en seis categorías de agarre de la mano humana: agarre cilíndrico, de punta, de gancho, de palma (Palmar), esférico y de lado (Lateral)<sup>2</sup>, como se muestra en la siguiente figura:

---

<sup>2</sup>S. C. Jacobsen; J. E. Wood; D. F. Knutti y K. B. Biggers. "The UTAH/MIT dextrous hand: Work in progress". In Robot, Grippers, Springer-Verlag, Berlin, 1986.

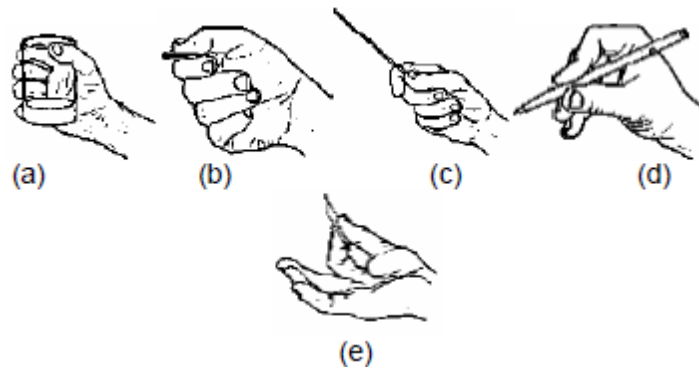


Figura 2.1: modelos prensiles humanos, a) cilíndrica palmar, b) subterminolateral, c) centralizado, d) tridigital, e) posición subterminal.



Figura 2.2. Formas básicas de prensión de la mano

### 2.6.1.1. Anatomía de la mano humana

La base estructural de la mano, está conformada por un complejo y altamente interrelacionado sistema de huesos, ligamentos, poleas, tendones flexores y extensores extrínsecos, músculos intrínsecos con sus respectivos tendones, nervios y vasos. Sin embargo, la mano no solo es un órgano de ejecución, también es un receptor sensorial extremadamente sensible y preciso.

### 2.6.1.2. Anatomía de la región palmar.

La mano humana posee una forma aplanada y ensanchada. La cara anterior o palma posee tres eminencias rodeando un hueco.

Eminencia tenar.- Situada por arriba y por fuera, posee forma de gota de agua, constituye la base del pulgar, la eminencia tenar está formada por cuatro músculos, los cuales están destinados al movimiento del dedo pulgar.

Eminencia hipotenar.- Situada por arriba y por dentro de la palma, junto con la eminencia tenar se les denominan el talón de la mano.

Eminencia Inferior.- También denominada eminencia de los dedos se halla separada por el pliegue dígito palmar y surco de flexión de los cuatro últimos dedos.

### **2.6.1.3. Hueco de la mano**

En el hueco de la mano se encuentran tres pliegues: superior, medio e inferior, a menudo cortados estos dos últimos por un pliegue longitudinal; estos cuatro pliegues dibujan una M.

### **2.6.1.4. Aponeurosis**

Es una membrana formada por tejidos conjuntivos fibrosos entrecruzados los cuales sirven de envoltura a los músculos.

Aponeurosis superficial.- Se divide en porciones externa, media e interna, de las cuales parten dos tabiques antero posteriores conformando tres compartimientos, uno externo que contiene los cuatro músculos anexos al pulgar junto con el tendón flexor largo. Uno interno con los tres músculos insertos en el índice y la rama profunda del nervio cubital. El medio comprende el arco palmar superficial arterial, los nervios colaterales palmares, los tendones de los flexores y capa celuloadiposa profunda.

Aponeurosis profunda.- Comprende las ramas profundas de la arteria cubital, y radial, el arco palmar profundo.

### **2.6.1.5. Planos de la región palmar**

De la superficie al interior, la región palmar comprende tres planos:

- 1) Plano Superficial.- Está constituido por la piel, tejido celular subcutáneo, vasos y nervios superficiales.
- 2) Plano Medio.- Constituido por la aponeurosis y sus compartimientos.

- 3) Plano profundo.- Formado por la aponeurosis palmar profunda, arco palmar profundo, rama profundo del cubital y plano de los interóseos.

### 2.6.1.6. Región dorsal

Está compuesta por la piel, tejido celular subcutáneo, vasos y nervios superficiales, aponeurosis superficial y después los tendones vasos y nervios profundos, por último se encuentra la aponeurosis profunda.

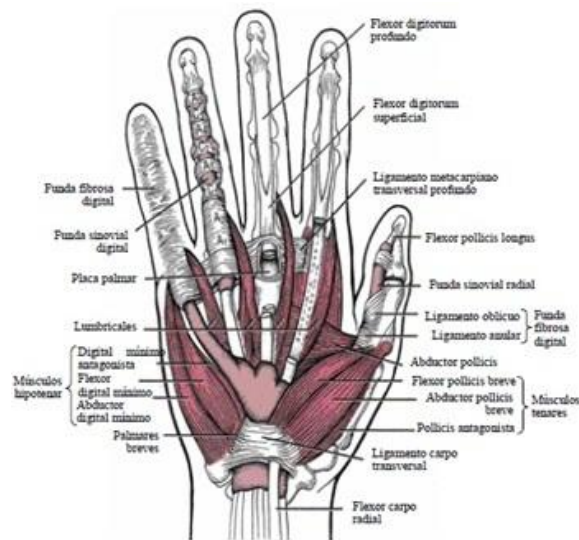


Figura 2.3. Mano humana -Músculos extrínsecos e intrínsecos, vista palmar [14]

### 2.6.2. ESQUELETO DE LA MANO

La mano humana posee veintisiete huesos, distribuidos de la siguiente manera: ocho en el carpo, cinco metacarpianos y un total de catorce falanges. La muñeca es considerada como una sola articulación compuesta por una serie de huesos individuales del carpo, así como interacciones distales con las bases de los metacarpianos y en dirección proximal con las superficies articulares distales del cubito y el radio.

### **2.6.2.1. Carpo**

Está conformado por ocho huesos organizados en dos hileras una proximal y una distal, la proximal está compuesta de los huesos escafoides, semilunar, piramidal y pisiforme. La hilera distal la forman el trapecio, trapezoide, hueso grande y ganchoso. Los escafoides hacen la función de punto de unión entre las dos hileras.

### **2.6.2.2. Articulación radio carpiana**

Está formada por la articulación de la hilera proximal del carpo con la superficie articular distal del radio y el complejo fibrocartilaginoso triangular.

### **2.6.2.3. Metacarpo**

Está integrado por cinco huesos largos llamados metacarpianos y por los falanges, las cuales toman el nombre falange, falangina y falangeta, todos los dedos tienen tres falanges, a excepción del pulgar que solo posee dos.

### **2.6.2.4. Articulaciones carpo metacarpianas**

Están recubiertas de una gruesa capsula y cobertura ligamentaria. El segundo y tercer metacarpiano se encuentran rígidamente fijos al trapezoide y hueso grande, lo que permite que el pulgar y los dos metacarpianos cubitales giren durante los movimientos de la mano.

## **2.6.3. ARQUITECTURA DE LA MANO**

La forma de la mano se puede adaptar de diversas formas dependiendo del objeto que tome contacto con ella, sobre una superficie plana, la mano se extiende y se aplana por la eminencia tenar, la eminencia hipotenar, la cabeza de los metacarpianos y la cara palmar de las falanges.

En el caso de los objetos voluminosos, la mano toma una forma hueca con unos arcos orientados en tres direcciones, lo cual da lugar a una bóveda, un canal de concavidad anterior, con sus orillas limitadas por tres puntos: el pulgar, el índice y el meñique.

Cuando los dedos se separan, sus ejes vienen a converger hacia la base de la eminencia tenar, en un punto que corresponde más o menos al tubérculo escafoides.

Cuando el puño se cierra los ejes de las dos últimas falanges de los cuatro dedos últimos y el eje del pulgar convergen en un punto situado en la parte baja del canal del pulso. Se puede observar que el eje longitudinal es el del índice, mientras que los ejes de los tres últimos dedos son tanto más oblicuos cuanto más se alejan del índice, esto permite a los dedos más internos oponerse al pulgar así como también al índice.

### **2.6.3.1. Las articulaciones metacarpo falángicas**

Su libertad de movimiento se realiza en dos sentidos: 1. flexión-extensión en torno al eje YY' transversal. 2. inclinación lateral en torno al eje XX' antero posterior.

A cada lado de esta articulación se extienden dos tipos de ligamentos: un ligamento metacarpo glenoideo que regula los movimientos del fibrocartílago glenoideo y un ligamento lateral los cuales mantienen en las superficies de las articulaciones en contacto y limitan su movimiento. En el movimiento de extensión los ligamentos laterales permiten los laterales uno se tensa mientras que el otro se distiende.

Los ligamentos laterales se integran en un aparato fibroso más complejo que suspende y centra los tendones extensores y flexores. Obteniendo varios tendones como el extensor común, los flexores (el profundo y el superficial).

### **2.6.3.2. Amplitud de los movimientos de las articulaciones metacarpo falángicas**

La amplitud de la flexión es casi de 90°. La flexión aislada de un dedo está limitada. La amplitud de la extensión activa es variable según los individuos pudiendo alcanzar de 30° a 40°. La extensión pasiva puede alcanzar casi 90° en algunos individuos.

El dedo índice es el que posee la mayor amplitud de movimiento lateral con unos 30°, y como es fácil moverlo aisladamente se puede hablar de abducción y aducción.

### **2.6.3.3. Articulaciones interfalángicas**

La cabeza de la falange presenta una forma de polea dejándola con un sólo grado de libertad, alrededor del eje XX'.

### **2.6.3.4. Amplitud de los movimientos de las articulaciones interfalángicas.**

La amplitud de la flexión en las articulaciones interfalángicas aumenta del segundo al quinto dedo, para alcanzar hasta 135° a nivel del meñique. La amplitud de flexión en las articulaciones interfalángicas distales es ligeramente inferior a 90°. La amplitud de la extensión activa en las articulaciones interfalángicas es nula en las articulaciones proximales y nulas o muy débiles en las articulaciones distales.

## **2.6.4. EL PULGAR**

Gracias al pulgar la mano obtiene una gran cantidad de funcionalidades, esto se debe a que está situado por delante de la palma y de los otros dedos lo cual le permite en el movimiento de oposición ir al encuentro de los otros dedos ya sea de forma aislada o global, como también separarse por el movimiento de contraoposición para relajar la toma o sujeción. El pulgar tiene una gran flexibilidad funcional debido a su forma y posición osteoarticular, como también a sus músculos.

Está constituido por los huesos: escafoides, trapecio, el primer metacarpiano, la primera falange y la segunda falange. Posee cuatro articulaciones: La del escafoides con el trapecio, la trapecio metacarpiana, la metacarpo falángica, la interfalángica, dándole en total cinco grados de libertad que permiten realizar la operación de oposición del pulgar.

### **2.6.4.1. La oposición del pulgar**

La oposición del pulgar consiste en que un punto dado A, la punta del pulgar sea tangente sobre la punta de otro dedo ubicado en el punto B, haciendo coincidir en el espacio los puntos A+B en un plano tangente con sus puntas. Para ubicar los puntos en el espacio se debe utilizar tres grados de libertad, tomando las coordenadas x, y, z. Se requieren además otros dos grados de libertad para hacer coincidir los planos de las puntas por rotación alrededor de los ejes t y u. Necesitando así cinco grados de libertad para realizar la oposición. La oposición del pulgar es un movimiento de tres componentes: la anteposición, la flexión y la pronación de la columna osteoarticular del pulgar.

#### **2.6.4.2. Los modos de prensión**

Se distribuyen en tres grupos, las presas, las presas con gravedad y las presas con acción. Además la prensión es capaz de percusiones, de contacto y de expresión de gestos. Las presas se clasifican en tres grupos: las presas digitales, las presas palmares y las presas centradas.

#### **2.6.4.3. Presas digitales**

Está conformada por varios grupos:

Las presas bidigitales.- Se tratan del agarre en el que intervienen el pulgar y otro dedo, normalmente pulgar e índice, esta acción permite coger objetos.

Las presas tridigital.- Intervienen el pulgar, el índice y el medio. Esta forma de presa permite un mayor agarre y estabilidad.

Las presas tetradigitales.- Generalmente son utilizadas para coger un objeto grueso firmemente.

Las presas pentadigitales.- Se utilizan todos los dedos de la mano, con el pulgar oponiéndose de forma variada al resto de dedos. Este modo de prensión se da cuando se cogen grandes objetos.

#### **2.6.4.4. Presas palmares**

Son en las que interviene la palma de la mano además de los dedos, si en este tipo de presa interviene el pulgar se le llama prensión palmar a plena mano o a plena palma. Es utilizada para coger objetos pesados y relativamente voluminosos. Las presas palmares en las que no interviene el pulgar se denominan prensión digito palmar.

#### **2.6.4.5. Presas centradas**

Las presas centradas permiten una simetría alrededor de un eje longitudinal, que en general coincide con el eje del antebrazo.

### 2.6.4.6. Presas con gravedad

En esta presa la mano sirve de soporte al sostener algún objeto.

### 2.6.4.7. Presas más acción

Cuando se realiza un tipo de prensión combinado con algún movimiento de la mano se da este tipo de presa.

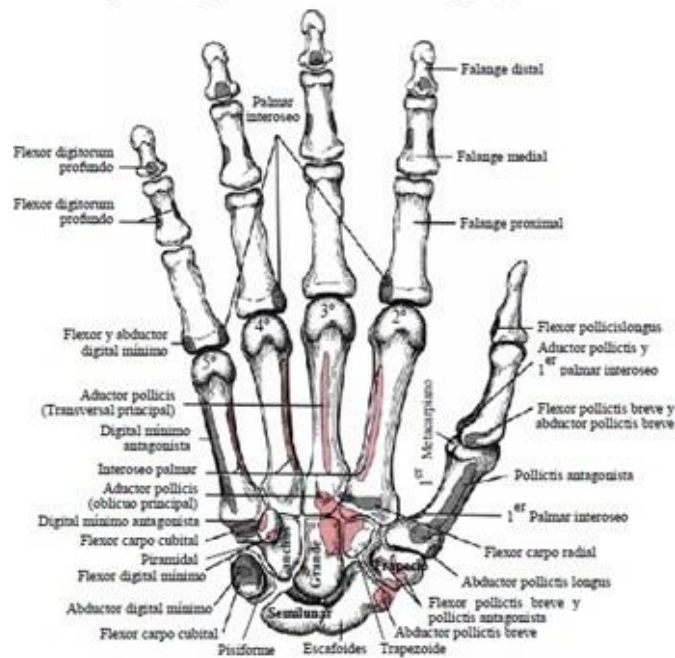


Figura 2.4. La mano humana: Estructura ósea, vista palmar [14]

## 3. MODELO MECANICO.

Para poder determinar un buen modelo matemático es necesario tomar seis sistemas cartesianos de referencia. Estos sistemas se usan para definir la posición y orientación de los tendones y también se pueden utilizar para describir la configuración de las articulaciones.

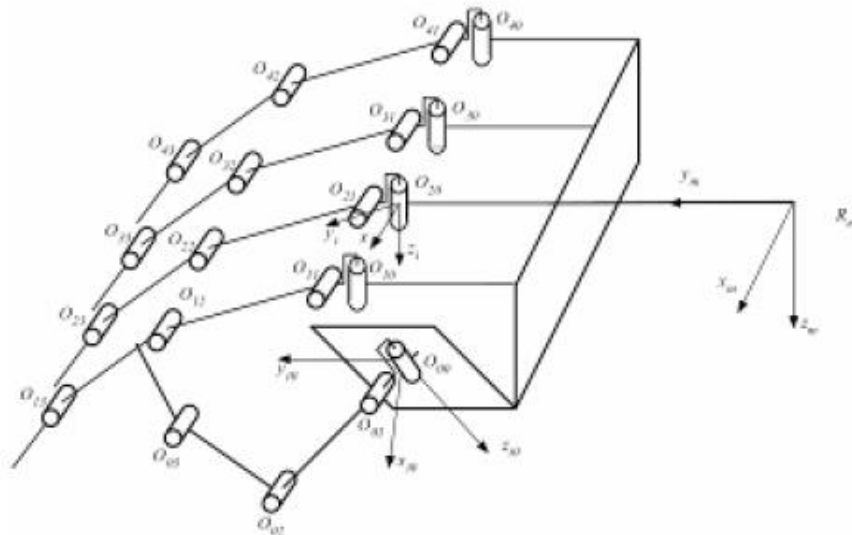


Figura 3.1 Modelo Biomecánico de una mano humana [15]

El eje Y se proyecta a lo largo del eje de las falanges y del metacarpiano, pasando desde el centro de rotación al centro de la superficie cóncava articular en el extremo proximal. El eje X se proyecta dorsalmente, y el eje Z se proyecta hacia el cuerpo.

Por medio de este sistema de referencia se puede determinar la posición de los dedos en un espacio de tres dimensiones. Cada par de puntos se expresa con respecto a los sistemas de referencia distal y proximal de cada articulación. Se supone que los tendones se contraen permaneciendo constantes con respecto a los sistemas de coordenadas distal y proximal.

$X_d, Y_d, Z_d$  son las coordenadas de un punto respecto al sistema distal.

$X_p, Y_p, Z_p$  son las coordenadas de un punto respecto al sistema proximal.

$X_o, Y_o, Z_o$  son las coordenadas del origen del sistema proximal expresada en el sistema distal.

Tanto el sistema distal como el proximal, se relacionan con una rotación y una translación.

ELEMENTO DE LA MANO	ARTICULACION	MUSCULOS Y TENDONES
DEDO	DIP	Extensor Terminal (TE) Flexor Profundo (FP)
	PIB	Extensor (ES) Banda Radial (RB) Banda Ulnar (UB) Flexor (FS)

	MP	Extensor largo (LE) Radial Interóseo (RI) Ulnar Interóseo (UI) Lumbrical (LU)
PULGAR	IP	Flexor largo (FPL) Extensor largo (EPL)
	MCP	Abductor corto (APB) Flexor corto (FPB) Abductor (ADD) Extensor corto (EPB)
	CMC	Oponente al pulgar (OPP) Abductor largo (APL)

Tabla 3.1. Músculos y tendones relacionados con el movimiento de la mano [15]

### 3.1. MODELO MATEMÁTICO.

#### 3.1.1. Formulación del Modelo

En orden a lo establecido en el modelo matemático, seis coordenadas cartesianas fueron establecidas, según lo muestra la Figura 3.1. Estas coordenadas son usadas para definir la localización y la orientación de los tendones y también son utilizadas para describir el movimiento. Hay dos sistemas de coordenadas para las falanges proximales y mediales, y solo uno para las falanges distales y metacarpianas.

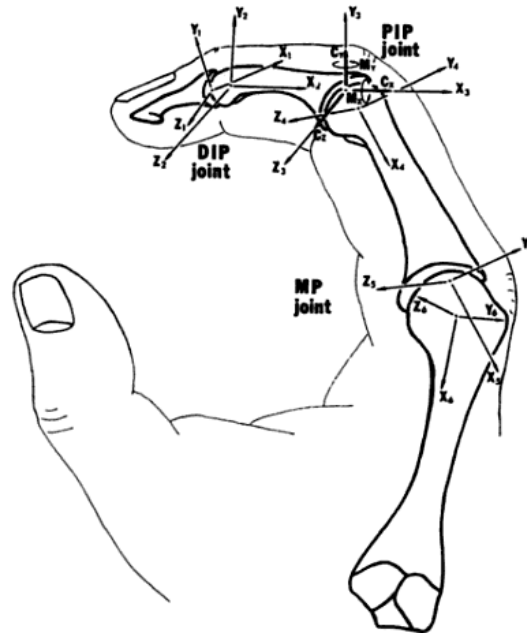


Figura 3.2. Sistema de coordenadas usado para definir la localización de los tendones. [15]

Los sistemas primarios (2, 4 y 6) están localizados aproximadamente en el centro de rotación de las cabezas metacarpianas y de las falanges, y los sistemas secundarios (1, 3 y 5) están en el sistema proximal del centro de las superficies articulares cóncavas. La X es proyectada a lo largo del eje de las falanges y del metacarpiano, la Y está proyectada dorsalmente, y la Z está proyectada radialmente hacia el cuerpo.

Con la ayuda de este sistema de coordenadas, la localización de los tendones puede ser determinada y localizada en un espacio de 3 dimensiones. Para cada articulación, el tendón es representado por una línea recta uniendo los dos puntos designados por los marcadores; uno en el lado distal y otro en el lado proximal. Dos parámetros son usados para describir la orientación y la localización de cada uno de los tendones para el modelo final, estos parámetros son la fuerza potencial y el momento potencial. La fuerza potencial es expresada en términos del coseno con respecto al ángulo que forma el tendón y el sistema distal, el momento potencial que da la fuerza potencial, especifica el momento con respecto al centro de la articulación en cada una de las direcciones del sistema distal. La aplicación de la fuerza y el momento potencial puede ser demostrado por el análisis de la fuerza de la mano bajo funciones isométricas, desarrollando ecuaciones de equilibrio sobre el centro de rotación de las articulaciones.

Ecuaciones de la Fuerza potencial  
 $\sum \alpha_i F_i + C_x + R_x = 0,$

$$\Sigma \beta_i F_i + C_y + R_y = 0,$$

$$\Sigma \gamma_i F_i + C_z + R_z = 0,$$

Ecuaciones para el Momento potencial

$$\Sigma a_i F_i + M_x + T_x = 0,$$

$$\Sigma b_i F_i + M_y + T_y = 0,$$

$$\Sigma c_i F_i + M_z + T_z = 0,$$

Donde:

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  = Parámetros de fuerza potencial.

$a_i, b_i, c_i$  = Parámetros de momento potencial.

$C_x, C_y, C_z$  = Constantes desconocidas de Fuerza.

$M_x, M_y, M_z$  = Constantes desconocidas de Momento.

$F_i$  = Fuerza desconocida del tendón o músculo.

$R_x, R_y, R_z$  = Fuerzas externas aplicadas.

$T_x, T_y, T_z$  = Momentos externos aplicados.

Las coordenadas de dos puntos pueden ser determinados por los valores de la fuerza y el momento potencial como lo muestra la figura.

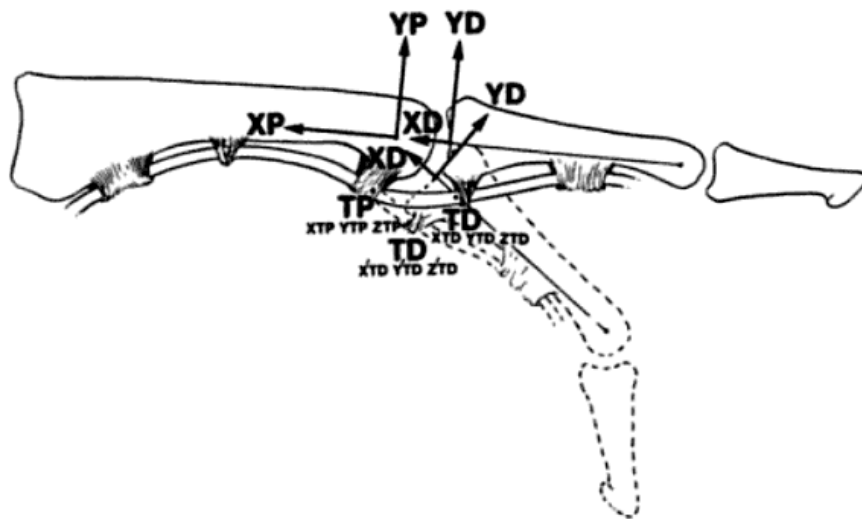


Figura 3.3. Dos puntos en cada tendón de la articulación tienen relaciones fijas con sus sistemas de coordenadas

El sistema proximal se puede relacionar con el sistema distal mediante una rotación y una translación. La rotación queda definida mediante los ángulos de Euler clásicos. Estos ángulos corresponden a la flexión-extensión ( $\phi$ ), desviación radio-ulnar ( $\Theta$ ) y la rotación axial ( $\Psi$ ). La secuencia rotacional de estos ángulos es relacionada por el movimiento distal y el proximal.

$$\begin{pmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c\theta c\phi & c\theta c\phi & -s\theta \\ -c\theta c\phi + s\phi s\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & s\psi c\theta \\ s\phi s\psi + c\psi c\phi s\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & c\psi c\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{pmatrix}$$

Figura 3.4. Ecuación de transformación que expresa el tendón y la fuerza. [15]

Donde

$X_D, Y_D, Z_D$  = coordenadas de un punto del tendón respecto al sistema distal.

$X_P, Y_P, Z_P$  = coordenadas de un punto del tendón con respecto al sistema proximal.

$X_O, Y_O, Z_O$  = coordenadas del origen del sistema proximal en el sistema distal.

s = Seno.

c = Coseno.

Esta ecuación de transformación es utilizada en el análisis de fuerza para expresar el tendón y la fuerza vectorial externa aplicada en un sistema de coordenadas apropiadas donde el cuerpo libre es tomado.

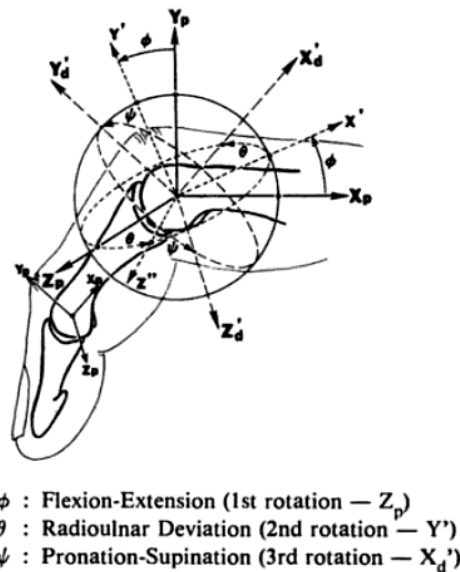


Figura 3.5. Ángulos Eulerianos usados para definir la orientación de los dedos.

[15]

### 3.1.2. Excursión de Tendón y brazo de momento

El procedimiento para obtener la excursión de los tendones es realizado mediante la observación de la rotación y el desplazamiento de los tendones, donde fueron tomadas las variaciones de la excursión en varios puntos, como información adicional se tomó el brazo de momento, además, de reducir los datos de la excursión y desplazamiento de las articulaciones. La relación entre la excursión de los tendones, el desplazamiento de las articulaciones y el brazo de momento es

demostrada por Brand<sup>3</sup>. El brazo de momento instantáneo del tendón en el plano de movimiento en una articulación específica puede obtenerse a partir de la pendiente de la gráfica de la excursión del tendón contra el desplazamiento rotacional de la articulación. Esta relación existe independientemente de si la gráfica es lineal o no lineal.

En base a los tres modelos de Landsmeer<sup>4</sup> y el modelo normativo expuesto previamente, fueron derivadas las fórmulas para calcular el brazo de momento instantáneo (M) por la pendiente de la excursión (E) contra el ángulo de la articulación ( $\Phi$ ).

### Modelo I

Este modelo describe la situación en que los tendones siguen la curvatura de la superficie articular.

$$E = r \cdot \Phi$$

$$M = r$$

$$dE/d\Phi = r = M$$

Donde r es el radio de la curvatura de la superficie articular.

### Modelo III

En este modelo, el tendón corre en una vaina que lo sostiene firmemente en una posición constante contra el eje del hueso pero, permite que el tendón se curve suavemente, conforme a la arquitectura de la articulación.

$$E = 2y + \phi \cdot d' - \phi \cdot y/\tan(\phi/2)$$

$$M = h = d' - y/\tan(\phi/2) + y/\sin(\phi/2)$$

$$\frac{dE}{d\phi} = d' - \frac{y}{\tan\left(\frac{\phi}{2}\right)} + \frac{y}{\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)} \cdot \frac{\phi/2}{\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}$$

$$\frac{dE}{d\phi} = M, \text{ donde } \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \approx \phi/2$$

<sup>3</sup> BRAND, P.W., BEACH, R.B. y THOMPSON, D.E., "Relative tension and potential excursion of muscles in the forearm and hand", /. HandSurg., 6:209-219 (1981).

<sup>4</sup> LANDSMEER, J.M.F., "Study in the anatomy of articulation. The equilibrium of the 'intercalated' bone", Acta Morph. Neerl.-Scand., 3:287-303 (1961).

Las definiciones para  $y$ ,  $h$  y  $d'$  son ilustradas en la Figura 3.5.

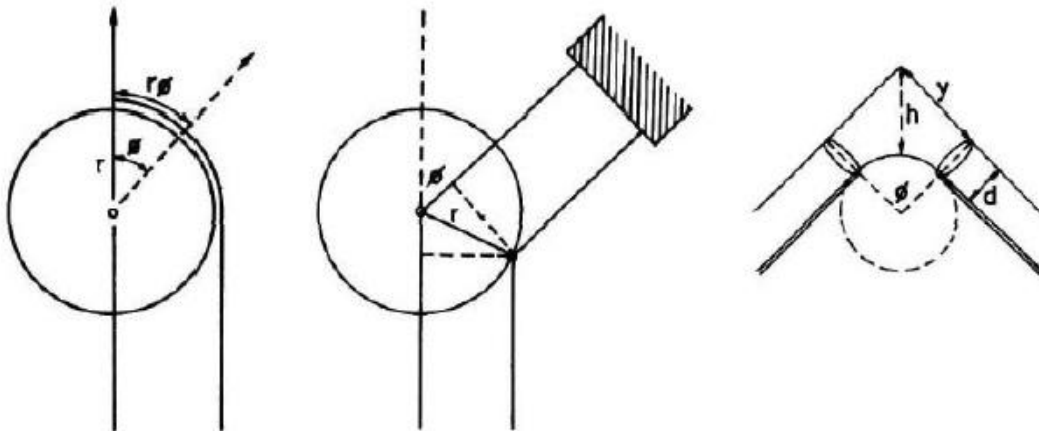
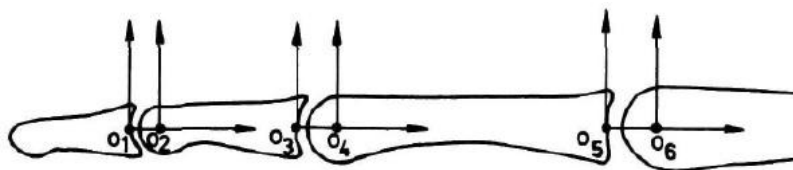


Figura 3.6. Modelos bidimensionales de Landsmeer de tendón puente de una articulación. [15]

### 3.1.3. Resultados

La estructura de enlace de los elementos óseos se relacionó con los sistemas de coordenadas. La distancia entre los orígenes de dos sistemas de coordenadas, por ejemplo, el centro de rotación y el centro de la superficie articular cóncava de la articulación se usaron para especificar la localización de los seis sistemas de coordenadas. La figura 3.6 muestra el promedio y la desviación estándar de estas distancias. Las dimensiones están todas normalizadas con respecto a la distancia entre  $O_2$  y  $O_3$ ; esto es, la distancia entre los centros de rotación de las articulaciones DIP y PIP.



Distances Between Coordinate Systems  
(mean and standard deviations)

	$o_1o_2$	$o_2o_3$	$o_3o_4$	$o_4o_5$	$o_5o_6$
Thumb	$0.243 \pm 0.035$	$1.0 \pm 0$	$0.338 \pm 0.042$	$1.424 \pm 0.097$	$0.333 \pm 0.047$
Index	$0.224 \pm 0.034$	$1.0 \pm 0$	$0.288 \pm 0.036$	$1.919 \pm 0.227$	$0.432 \pm 0.058$
Middle	$0.184 \pm 0.032$	$1.0 \pm 0$	$0.233 \pm 0.041$	$1.608 \pm 0.087$	$0.365 \pm 0.052$
Ring	$0.166 \pm 0.031$	$1.0 \pm 0$	$0.224 \pm 0.041$	$1.576 \pm 0.068$	$0.346 \pm 0.030$
Little	$0.230 \pm 0.042$	$1.0 \pm 0$	$0.304 \pm 0.046$	$1.797 \pm 0.145$	$0.506 \pm 0.082$

Figura 3.7. Distancia entre sistemas de coordenadas. Media y desviación estándar. [15]

En el análisis de datos de quince especímenes, la localización exacta con respecto a cada sistema de coordenadas localizados fueron expresadas en términos dimensionales, normalizando sus coordenadas de acuerdo con la longitud de la falange media del dedo, para minimizar las variaciones antropométricas. En el caso del pulgar, la longitud de la falange proximal es usada como un común denominador.

Los dos puntos representativos de cada tendón a su articulación asociada, fueron resumidos en forma adimensional en las tablas 3.2 a la 3.6. Como se mencionó anteriormente, los puntos distal y proximal de un tendón fueron medidos respecto al sistema de coordenadas distal y proximal de la articulación, respectivamente.

Joint	Tendon	Distal Point			Proximal Point		
		X	Y	Z	X	Y	Z
IP	EPL	0.000	0.192	-0.057	-0.050	0.201	-0.044
	FPL	-0.007	-0.224	0.049	0.100	-0.318	0.034
MP	EPL	0.000	0.280	-0.157	-0.050	0.247	-0.224
	FPL	-0.062	-0.318	0.009	0.100	-0.521	-0.012
	ADD	-0.062	-0.224	-0.280	0.100	-0.575	-0.346
	EPB	0.000	0.265	0.057	-0.050	0.268	-0.019
	FPB	-0.062	-0.094	0.285	0.100	-0.416	0.435
	APB	-0.062	0.007	0.288	0.100	-0.160	0.533
CMC	EPL	0.000	0.179	-0.385	-0.050	0.225	-0.076
	FPL	-0.067	-0.476	-0.046	0.100	-0.152	-0.276
	ADD	-0.067	-0.065	-0.395	0.100	0.269	-0.589
	EPB	0.000	0.302	0.029	-0.050	0.184	0.132
	FPB	-0.067	-0.351	-0.284	0.100	0.004	-0.848
	APB	-0.067	-0.140	1.098	0.100	-0.273	0.410
	OPP	-0.067	-0.236	0.090	0.100	-0.493	-0.074
	APB	-0.067	0.346	0.212	0.100	0.136	0.239

Tabla 3.2. Localización de tendones en el pulgar (valor medio de cinco especímenes) [15]

Joint	Tendon	Distal Point			Proximal Point		
		X	Y	Z	X	Y	Z
IP	TE	0.004	0.199	-0.010	0.000	0.196	-0.009
	FDP	0.004	-0.184	0.026	0.300	-0.245	0.054
PIP	FDP	-0.212	-0.308	0.009	0.400	-0.409	0.027
	RB	-0.112	0.186	0.223	0.100	0.181	0.268
	UB	-0.112	0.151	-0.290	0.100	0.131	-0.312
	FDS	-0.212	-0.249	0.015	0.400	-0.311	0.028
	ES	-0.038	0.278	-0.027	0.000	0.266	-0.026
MP	FDP	-0.118	-0.386	0.031	0.300	-0.619	0.004
	FDS	-0.118	-0.477	-0.074	0.300	-0.689	-0.114
	RI	-0.318	-0.033	0.443	0.400	-0.362	0.629
	LU	-0.318	-0.148	0.370	0.400	-0.704	0.541
	UI	-0.318	-0.039	-0.461	0.400	-0.379	-0.442
	LE	-0.018	0.421	-0.033	0.000	0.483	-0.026

Tabla 3.3. Localización de tendones en el índice (valor medio de quince especímenes) [15]

Joint	Tendon	Distal Point			Proximal Point		
		X	Y	Z	X	Y	Z
IP	TE	-0.036	0.157	-0.014	0.000	0.169	-0.017
	FDP	-0.036	-0.158	0.054	0.300	-0.239	0.050
PIP	FDP	-0.267	-0.308	0.009	0.400	-0.251	-0.007
	RB	-0.167	0.206	0.237	0.100	0.132	0.262
	UB	-0.167	0.132	-0.262	0.100	0.079	-0.290
	FDS	-0.267	-0.217	0.054	0.400	-0.248	0.023
	ES	-0.017	0.241	-0.019	0.000	0.234	-0.009
MP	FDP	-0.317	-0.334	0.009	0.300	-0.522	0.001
	FDS	-0.185	-0.355	0.065	0.300	-0.593	0.063
	RI	-0.185	0.011	0.340	0.400	-0.499	0.491
	LU	-0.385	-0.174	0.311	0.400	-0.680	0.403
	UI	-0.385	0.011	-0.135	0.400	-0.185	-0.119
	LE	-0.085	0.352	-0.015	0.000	0.416	-0.013

Tabla 3.4 Localización de tendones en el medio (valor medio de quince especímenes) [15]

Joint	Tendon	Distal Point			Proximal Point		
		X	Y	Z	X	Y	Z
IP	TE	-0.054	0.141	-0.016	0.000	0.154	-0.021
	FDP	-0.054	-0.160	0.001	0.300	-0.239	0.027
PIP	FDP	-0.276	-0.281	0.011	0.400	-0.306	-0.007
	RB	-0.176	0.142	0.176	0.100	0.092	0.256
	UB	-0.176	0.141	-0.215	0.100	0.088	-0.238
	FDS	-0.276	-0.218	0.048	0.400	-0.263	0.029
	ES	-0.026	0.221	0.004	0.000	0.204	0.023
MP	FDP	-0.204	-0.302	0.022	0.300	-0.509	0.053
	FDS	-0.204	-0.352	0.035	0.300	-0.567	0.057
	RI	-0.404	-0.035	0.284	0.400	-0.302	0.316
	LU	-0.404	-0.112	0.186	0.400	-0.477	0.265
	UI	-0.404	0.047	-0.197	0.400	-0.240	-0.244
	LE	-0.104	0.313	0.062	0.000	0.352	0.052

Tabla 3.5. Localización de tendones en el anular (valor medio de quince especímenes) [15]

Seis coordenadas cartesianas fueron definidas para proveer la orientación de las articulaciones y la localización de los tendones, las fuerzas ( $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_z$ ) y los momentos ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ) junto con la articulación PIP también es mostrada en la tabla 3.6. Estas fuerzas y momentos son el resultado de una fuerza llevada por la articulación haciendo uso de su superficie y estructura de sus ligamentos. La orientación de los ángulos entre dos elementos óseos es descrita como flexión-

extensión.

Elemento de la mano	Articulación	Equivalente mecánico	Grados de libertad	Restricciones desconocidas
Dedo	Articulación interfalángica distal (DIP)	Rótula	1	Fuerza de compresión axial ( $C_{x1}$ )
				Fuerza de corte dorsovolar ( $C_{y1}$ )
				Fuerza de corte radio-cubital ( $C_{z1}$ )
				Momento de torsión axial ( $M_{x1}$ )
				Momento de restricción radio cubital ( $M_{y1}$ )
	Articulación interfalángica Proximal (PIP)	Rótula	1	Fuerza de compresión axial ( $C_{x3}$ )
				Fuerza de corte dorsovolar ( $C_{y3}$ )
				Fuerza de corte radio-cubital ( $C_{z3}$ )
				Momento de torsión axial ( $M_{x3}$ )
				Momento de restricción radio cubital ( $M_{y3}$ )
	Articulación maticarpofal ángicas (MP)	Cardán	2	Fuerza de compresión axial ( $C_{x5}$ )
				Fuerza de corte dorsovolar ( $C_{y5}$ )
Fuerza de corte radio-cubital ( $C_{z5}$ )				
Momento de torsión axial ( $M_{x5}$ )				
Pulgar	Articulación interfalángica (IP)	Rótula	1	Fuerza de compresión axial ( $C_{x1}$ )
				Fuerza de corte dorsovolar ( $C_{y1}$ )
				Fuerza de corte radio-cubital ( $C_{z1}$ )
				Momento de restricción radio cubital ( $M_{y1}$ )
	Articulación maticarpofal ángicas (MCP)	Cardán	2	Fuerza de compresión axial ( $C_{x3}$ )
				Fuerza de corte dorsovolar ( $C_{y3}$ )
				Fuerza de corte radio-cubital ( $C_{z3}$ )
				Momento de torsión axial ( $M_{x3}$ )
	Articulación carpometacarpiana (CMC)	Cardán	2	Fuerza de compresión axial ( $C_{x5}$ )
				Fuerza de corte dorsovolar ( $C_{y5}$ )
				Fuerza de corte radio-cubital ( $C_{z5}$ )
				Momento de torsión axial ( $M_{x5}$ )

Tabla 3.6. Modelo mecánico equivalente para las articulaciones del dedo y pulgar. [15]

La ecuación de equilibrio para las articulaciones de los dedos o el pulgar cuando la mano está sometida a una acción isométrica puede ser escrita en la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^n |\overline{T}_i| \cdot \overline{e}_i + \overline{F} + \sum_{j=1}^m |A_j| \cdot \overline{e}_j = \mathbf{0}$$

$$\sum_{i=1}^n |\overline{T}_i| \cdot (\overline{r}_i \times \overline{e}_i) + \overline{M} + \sum_{j=1}^m |A_j| \cdot (\overline{S}_j \times \overline{e}_j) = \mathbf{0}$$

Donde:

$T_i$  = Vector fuerza en el tendón.

$e_i$  = Vector unitario en la dirección de  $T_i$ .

$F$  = Vector fuerza de contracción de la articulación.  
 $A_j$  = Fuerzas externas.  
 $E_j$  = Vector unitario en la dirección de  $A_j$ .  
 $r_i$  = Vector de posición de  $T_i$ .  
 $m$  = Vector de momentos de contracción.  
 $s_j$  = Vector de posición de  $A_j$ .

En base a la estructura anatómica y las limitaciones fisiológicas, condiciones adicionales fueron establecidas. Primero, ciertas fuerzas de tendón fueron relacionadas en la siguiente forma:

$$\sum_{j=1}^n d_{ij} |\bar{T}_j| = 0$$

$i=1,2,3\dots s$

Donde:

$d_{ij}$  = coeficiente de coacción.  
 $n$  = número de fuerzas en los tendones que tiene relaciones de coacción.  
 $s$  = número de coacciones que se han supuesto.

En segundo lugar, la máxima fuerza que puede realizar un músculo está limitada por razones fisiológicas. Este límite es proporcional a la sección transversal de cada músculo.

$$T_j \leq T_j^m$$

$$j=1,2,3\dots n$$

Donde:

$T_j^m$  = máximo de fuerza que puede realizar un musculo.  
 $n$  = numero de coacciones condicionados por el sistema.

A partir de los datos anatómicos disponibles se establecen las siguientes restricciones para cada uno de los dedos.

Dedo índice

$$TE = RB + UB$$

$$RB = 0.667 LU + 0.167 LE$$

$$UB = 0.333 UI + 0.167 LE$$

$$ES = 0.333 LU + 0.167 LE + 0.333 UI + 0.333 RI$$

Dedo anular

$$TE = RB + UB$$

$$RB = 0.333 RI + 0.167 LE + 0.667 LU$$

$$UB = 0.200 UI + 0.167 LE$$
$$ES = 0.333 RI + 0.200 UI + 0.167 LE + 0.333 LU$$

Dedo meñique

$$TE = RB + UB$$

$$RB = 0.317 RI + 0.167 LE + 0.667 LU$$

$$UB = 0.100 UI + 0.167 LE$$

$$ES = 0.317 RI + 0.100 UI + 0.167 LE + 0.333 LU$$

Ecuaciones similares también pueden ser asumidas para el pulgar en orden al sistema de equilibrio.

Cuando se analiza todas las articulaciones de los dedos y del pulgar, se obtiene un total de dieciocho fórmulas de equilibrio, además se incluyen cuatro grupo de ecuaciones como las anteriores, el total de variables desconocidas es de veinticuatro, lo cual excede el número de ecuaciones disponibles (veintidós), esto hace que el problema quede indeterminado con una redundancia en segundo grado, métodos especiales deben ser usados para resolver este problema indeterminado.

#### 4. DISEÑO DE LA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÓRFICA.

Para el diseño de la mano se toman en cuenta las características mencionadas(en 2.6.1) y las dimensiones de una mano humana promedio. Los cálculos y análisis necesarios para especificar el sistema se detallan a continuación.

##### 4.1. Especificaciones.

La tabla 4.1 muestra las especificaciones de la mano robótica antropomórfica.

Estructura mecánica	Antropomórfica.
Grados de libertad (GDL)	1
Rango de movimiento:	
Falange proximal	90°
Falange medial	110°
Falange distal	60°-70°
Actuadores	Servomotores - 5VDC
Capacidad de los motores	
Velocidad	0.16 seg/60°
Torque	6.00 Kg/cm
Transmisión	Cables
Carga máxima estimada	0.500 kg.
Longitud máxima de la mano (De la punta del dedo medio al inicio de la muñeca)	0.219 m.
Masa de la mano	0.445 kg.

Tabla 4.1. Especificaciones de la mano antropomórfica.

Cada GDL del robot es operado por un motor de CD, Los motores que se busca utilizar son de la marca PowerHD® con las características que muestra la tabla 4.2.

Designación	Voltaje	Cantidad
Servo R&D Manufacturer Motor	5V	5

Tabla 4.2. Selección de motores de la marca PowerHD®

## 4.2. Estructura

La mano diseñada puede analizarse en 2 partes: sus dedos y su palma. Los dedos son los encargados de maniobrar y sujetar las piezas que se desee. La palma juega una función esencial en la sujeción de las piezas y el ensamble con la muñeca de la base de la mano robótica.

### 4.2.1. Estructura de un dedo

Cada dedo de la mano robótica cuenta con 1 GDL. Para facilidad en el diseño, se decidió subactuar los grados de libertad, entre la falange medial y la falange distal, incluyendo también los del dedo pulgar. En la figura 3.4 se muestra el diseño de uno de los dedos.

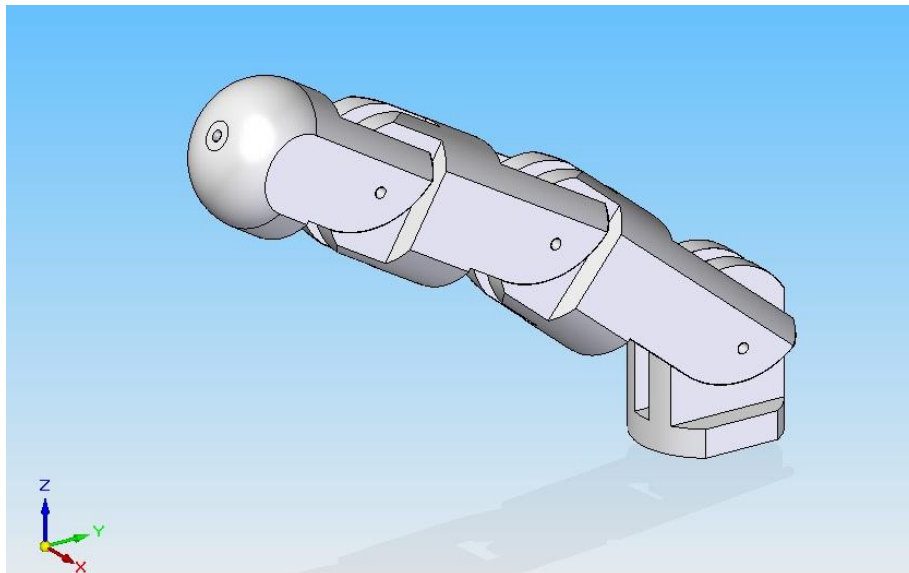


Figura 4.1. Diseño de un dedo de la mano antropomórfica.

### 4.2.2. Sistema de transmisión

El movimiento dotado a la falange medial se transmite a la falange distal a través de un cable de acero. Se la transmisión de movimiento para cumplir con los rangos de movilidad de la tabla 4.1.

El movimiento rotatorio del motor se convierte en lineal con un arreglo de en la base de la muñeca y se transmite con un cable delgado de acero a través de la funda plástica, al llegar a la parte donde se encuentra la articulación a accionar el movimiento se convierte de nuevo en giratorio.

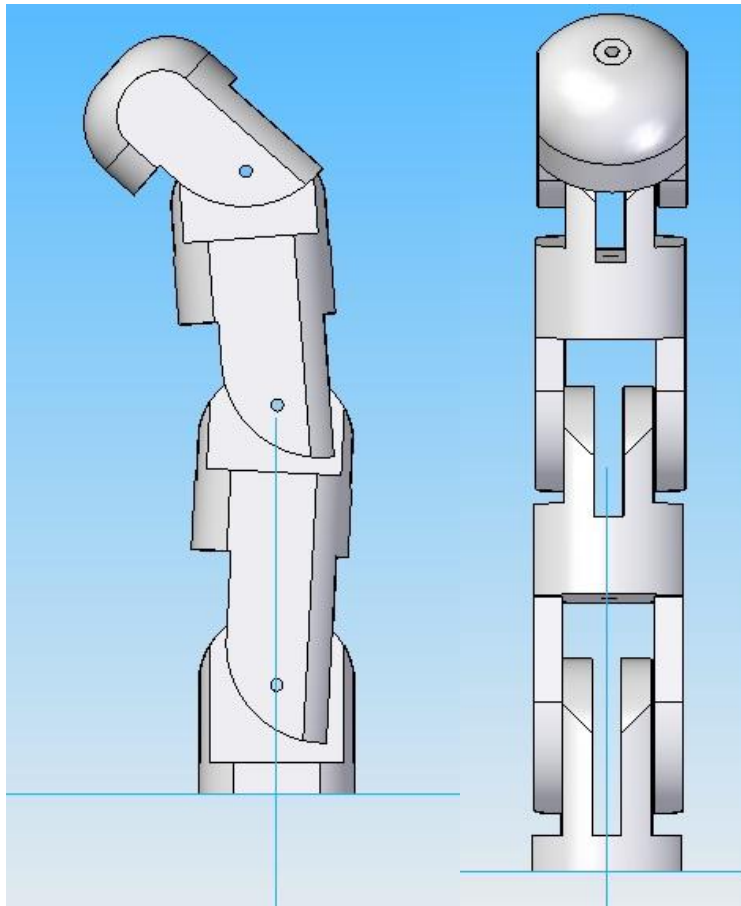


Figura 4.2. Vistas de dedo diseñado donde se muestra como están conectados el sistema de falanges

La presión que puede ser ejercida por cada dedo se puede calcular considerando el área de contacto y el par proporcionado por los motores en cada falange (figura 4.3).

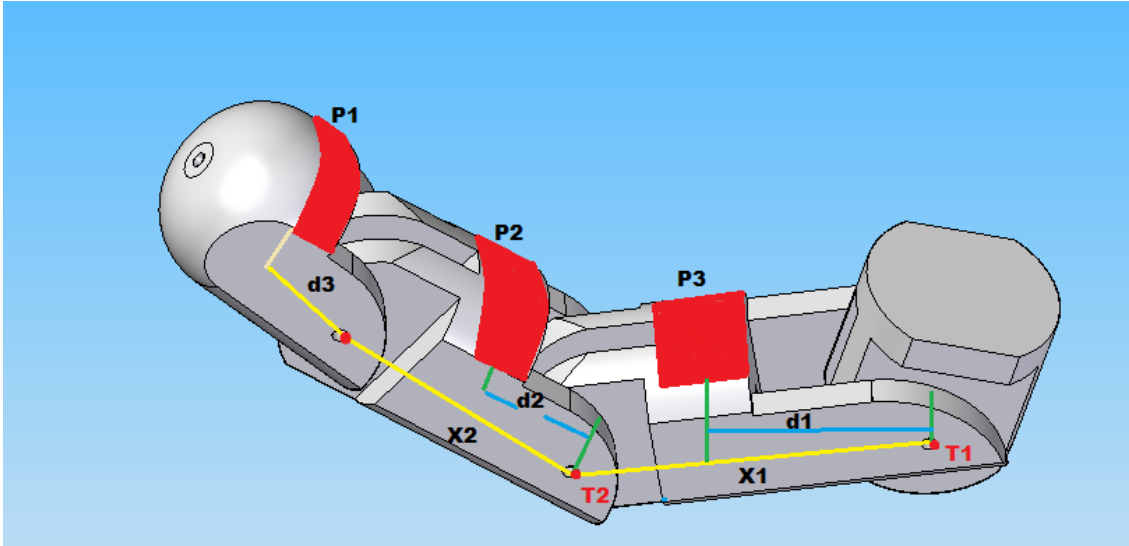


Figura 4.3. Presiones ejercidas en el dedo. Las áreas de contacto, los pares y las distancias tienen los valores:

$$A_1 = (0.015m)^2 = 0.00025m^2 \quad d_1 = 0.025m$$

$$A_2 = (0.0125m)^2 = 0.015625m^2 \quad d_2 = 0.015m$$

$$A_3 = (0.01m)^2 = 0.0001m^2 \quad d_3 = 0.015m$$

$$T_1 = T_2 = 0.011Nm \quad x_1 = 0.05m$$

$$x_2 = 0.03m$$

Para calcular la presión  $P_1$  se aplica la fórmula de la presión sobre determinada área:

$$P_1 = \frac{F_1}{A_1} = \frac{1}{A_1} \frac{T_1}{d_1} = \frac{1}{(0.00025m^2)(0.025m)} \frac{0.11Nm}{1} = 17600 \frac{N}{m^2}$$

$P_1$  es la presión máxima que se ejerce sobre la falange proximal debida al par  $T_1$ .

Este valor de presión da una idea de la masa que se puede soportar como máximo, y se calcula tomando en cuenta la fuerza que se ejerce por , de la cual se obtiene la masa:

$$P_1 = \frac{17600N}{m^2} = 1.76N/cm^2$$

$$1.76 \Rightarrow \frac{0.176 \frac{kgm}{s^2}}{9.81 \frac{m}{s^2}} = 0.1794 kg = 179.4 gr$$

De forma similar, las presiones  $P_2$  y  $P_3$  se obtienen con las ecuaciones:

$$P_2 = \frac{1}{A_2} \left[ \frac{T_1}{x_1 + d_2} + \frac{T_2}{d_2} \right] \text{ y } P_3 = \frac{1}{A_3} \left[ \frac{T_1}{x_1 + x_2 + d_3} + \frac{T_2}{x_3 + d_3} \right]$$

$$P_2 = 57764.1025 \text{ N/m}^2 = 5.7764 \frac{N}{cm^2} \Rightarrow 0.588kg = 588.8 gr$$

$$P_3 = 36023.3 \text{ N/m}^2 = 3.6023 \frac{N}{cm^2} \Rightarrow 0.3672kg = 367.2 gr$$

Los valores obtenidos indican la carga máxima que se soporta por cada falange individualmente. Estos valores serán próximos a los valores reales, que se pueden obtener estimando la fricción dinámica presente en el sistema de transmisión.

#### 4.1. Cinemática inversa de la mano robótica.

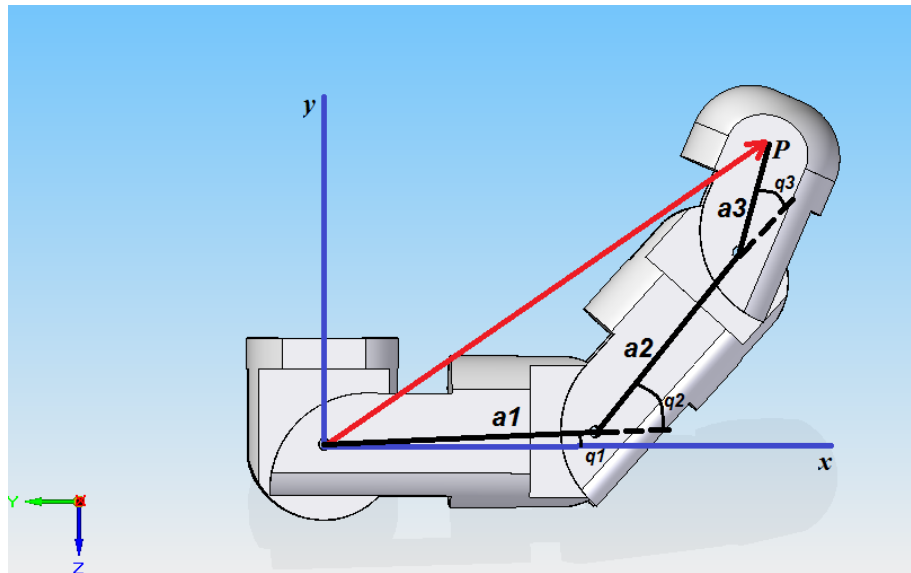


Figura 4.4. Dedo de la mano diseñada.

Para obtener las variables articulares  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  que dan las flexiones de los dedos de la mano se utiliza un método geométrico [16], por su simplicidad (figura 4.4), los valores de los ángulos obtenidos son:

$$q_1 = \tan^{-1} \left( \frac{p_y}{p_x} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{a_1 \sin(q_2) + a_3 \sin(2q_2)}{a_1 + a_2 \cos(q_2) + a_3 \cos(2q_2)} \right)$$

$$q_2 = \cos^{-1} \left( -\frac{A + B \mp \sqrt{(A + B)^2 - 8C(D - C)}}{4C} \right)$$

$$q_3 = kq_2k \approx \frac{7}{11}$$

Donde

$$A = 2a_1a_2$$

$$B = 2a_2a_3$$

$$C = 2a_1a_3$$

$$D = a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 - p_x^2 - p_y^2$$

Del resultado obtenido se observa que hay 2 valores posibles para  $q_2$ , de los cuales debe discriminarse el valor negativo del ángulo, ya que ese movimiento es imposible para la mano humana. Cabe mencionar que, para la solución de la cinemática inversa en forma cerrada, existen varias soluciones posibles o bien no existe solución para determinados casos de posición.

### 4.3.0. ANALISIS DE ELEMENTOS FINITOS

#### 4.3.1. Simulación de pieza N°1

podemos observar que los esfuerzos generados por la cupla del motor están situados en el orificio donde va alojado el pasador que sujeta la pieza numero 2 y estos esfuerzos se encuentran en un rango bastante seguro, esto lo podemos apreciar en la siguiente imagen

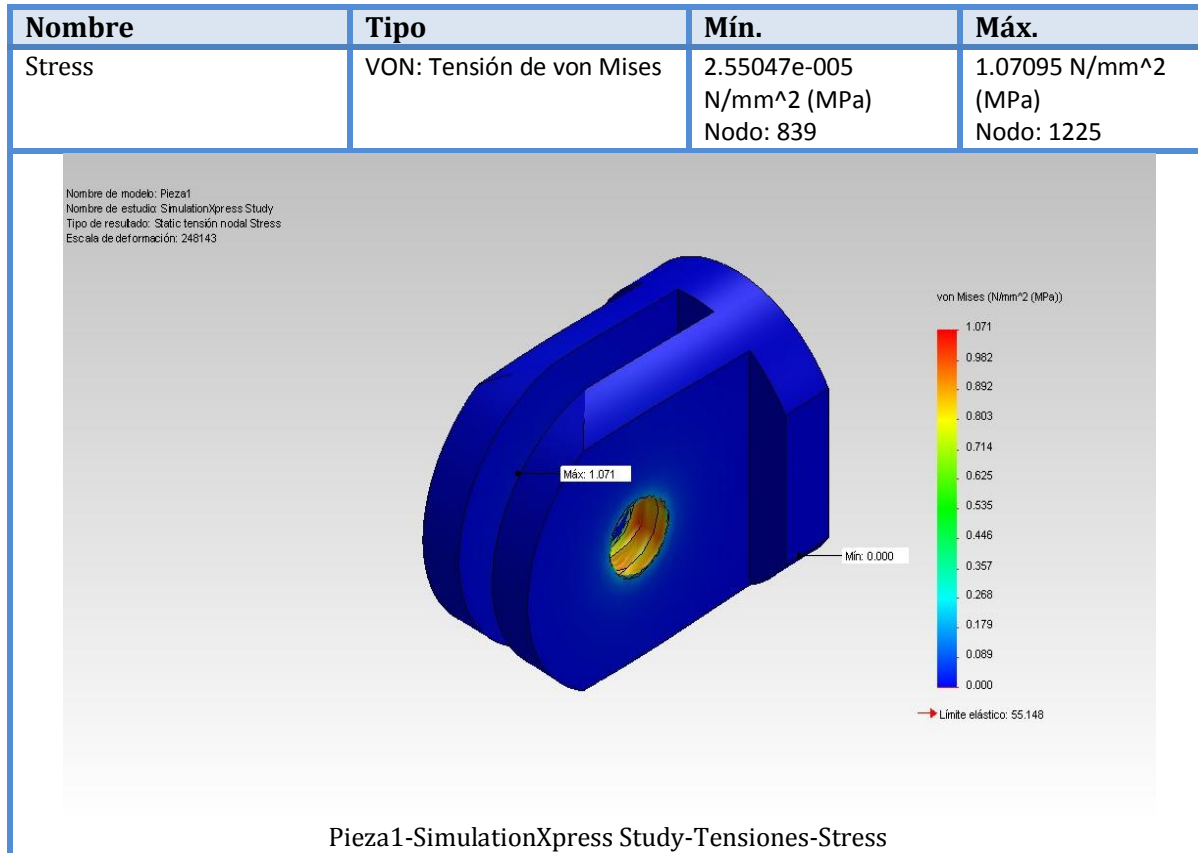


Figura 4.5. Simulación de análisis de tensiones para la pieza N°1

### 4.3.2. Desplazamiento Para la pieza N°1

Los desplazamientos de la piza muero uno se ven representados en la siguiente imagen donde podemos observar que las deformaciones para esta fuerza será bastante pequeñas

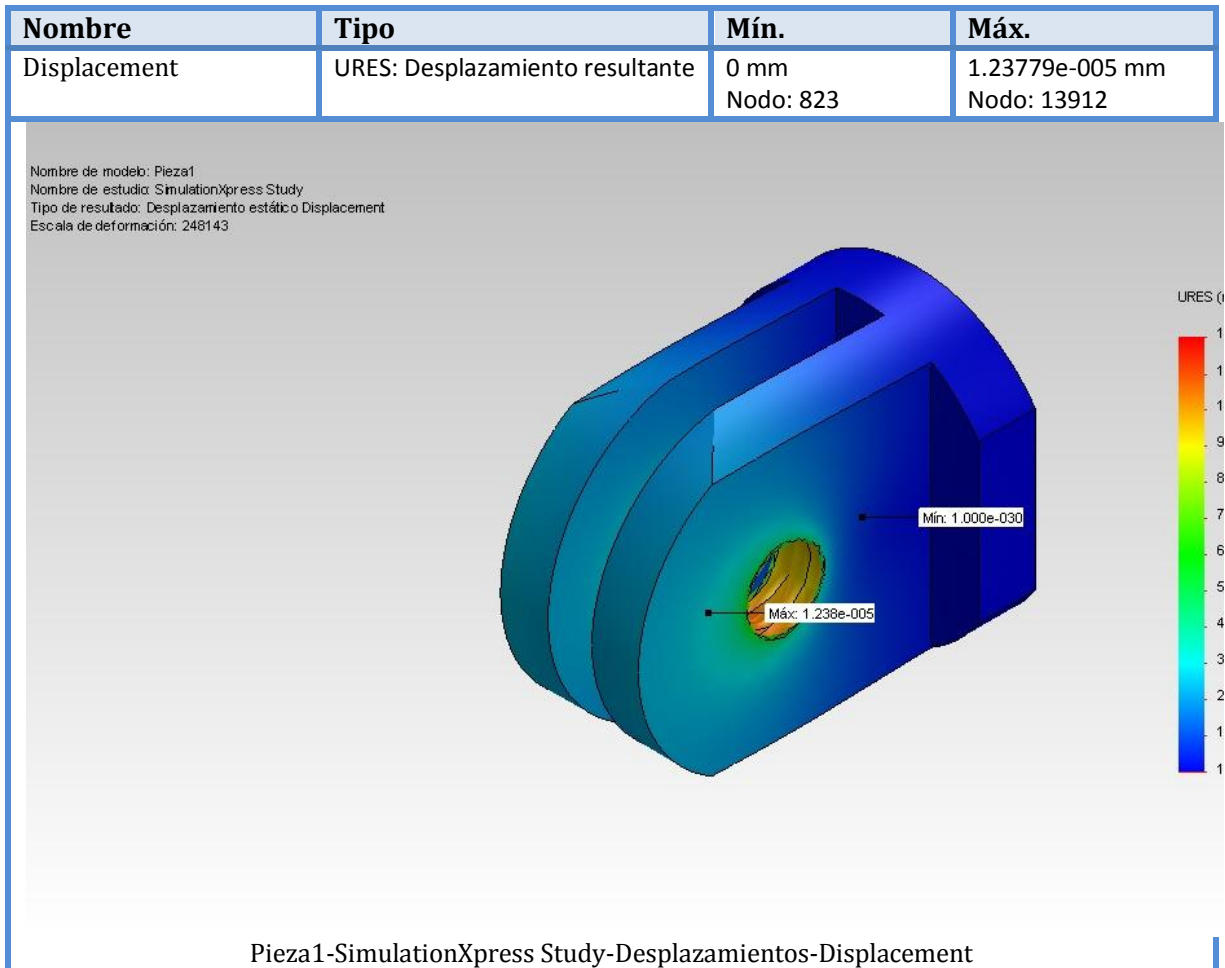


Figura 4.6. Simulación de análisis de desplazamiento para la pieza N°1



#### 4.3.4. Desplazamiento Para la pieza N°2

Los desplazamientos de la piza muero uno se ven representados en la siguiente imagen donde podemos observar que las deformaciones para esta fuerza será bastante pequeñas

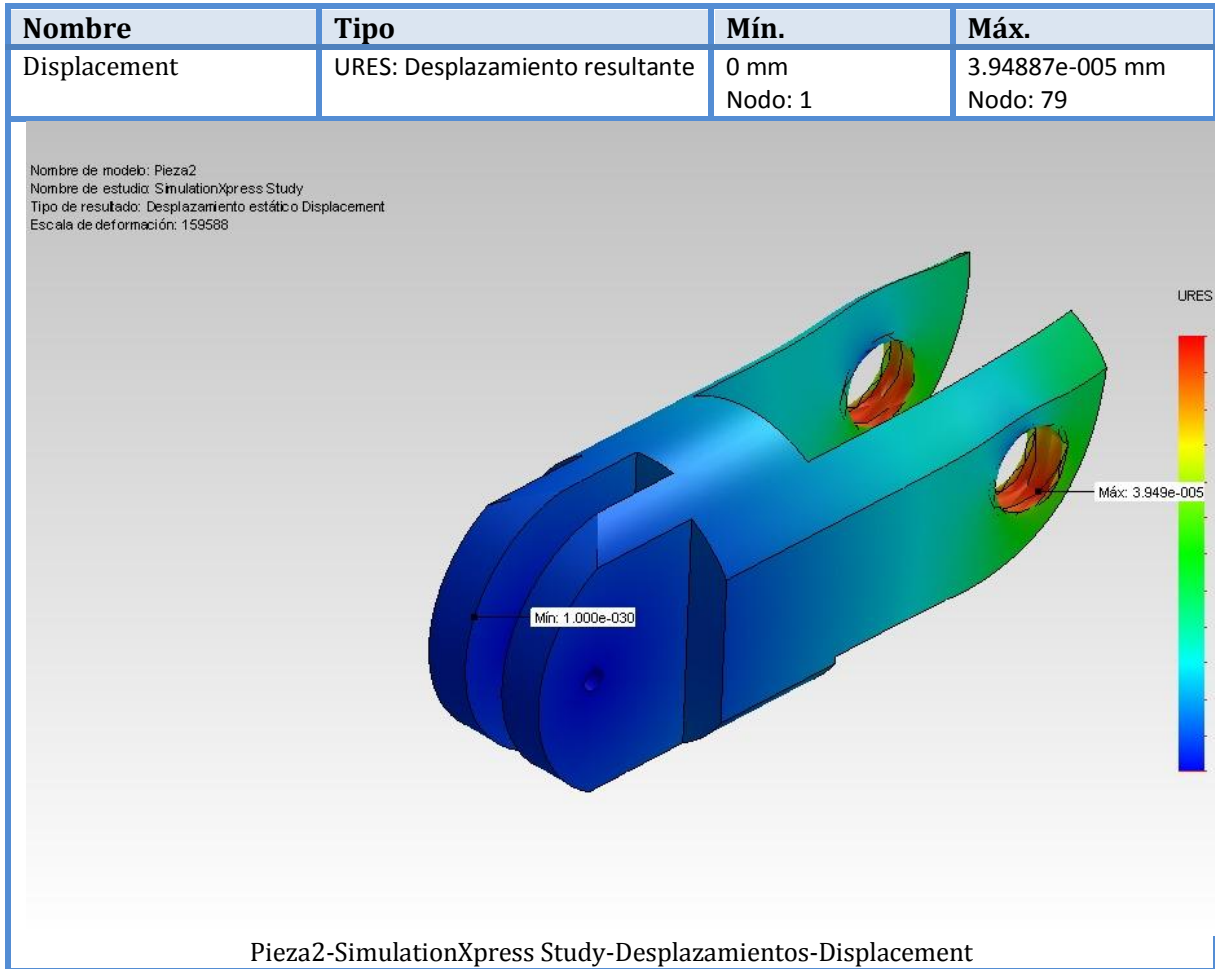


Figura 4.8. Simulación de análisis de desplazamiento para la pieza N°2

### 4.3.5. Simulación para la pieza N° 3

Para esta pieza nosotros podemos observar la distribución de los esfuerzos generados por la carga de 29,41 N en el agujero donde se aloja el pasador de sujeción de la pieza número 3 y observábamos una vez más la seguridad de esta pieza al someterla a este esfuerzo

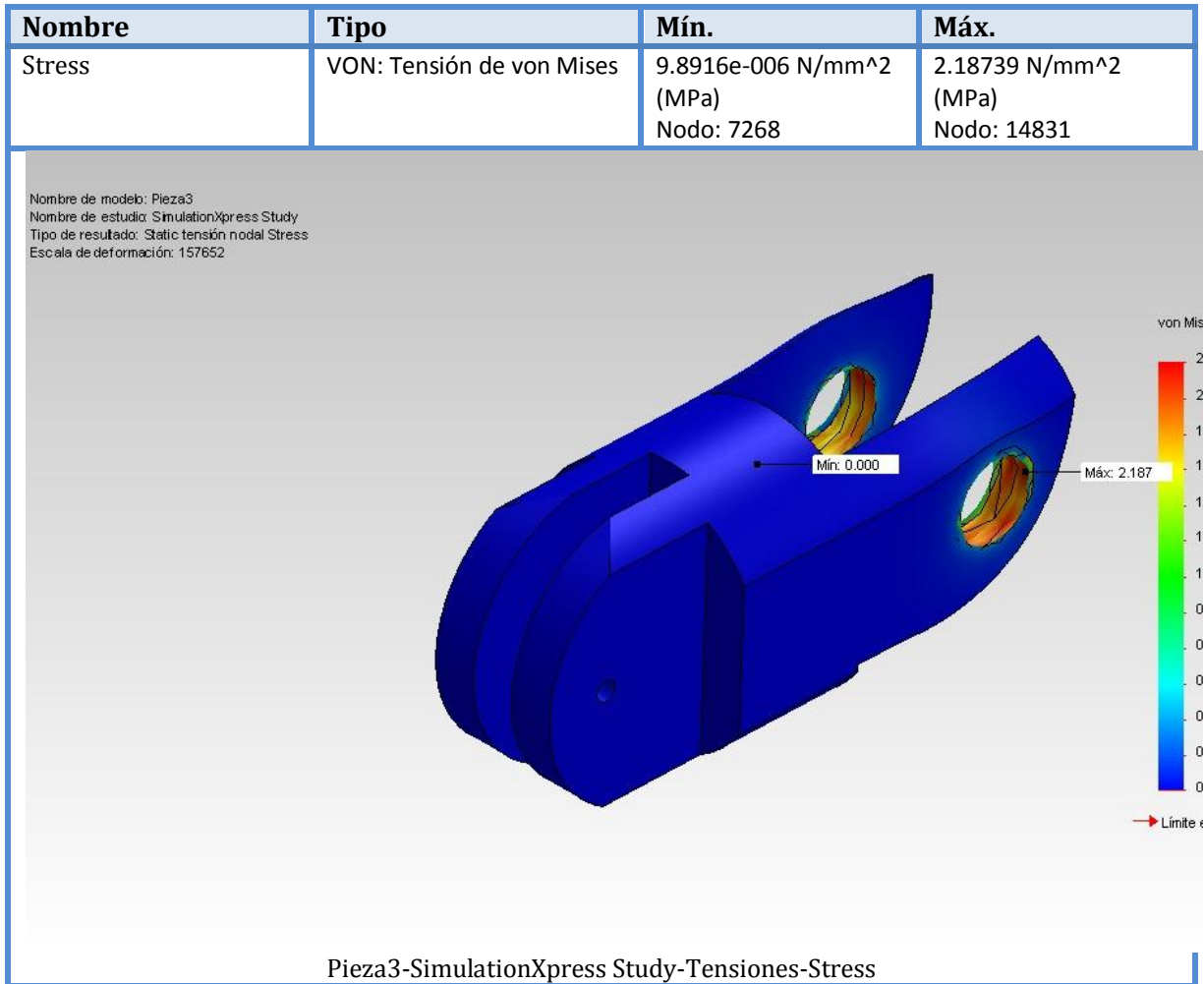


Figura 4.9. Simulación de análisis de tensiones para la pieza N°3

### 4.3.6. Desplazamiento Para la pieza N° 3

Los desplazamientos de la piza muero uno se ven representados en la siguiente imagen donde podemos observar que las deformaciones para esta fuerza será bastante pequeñas

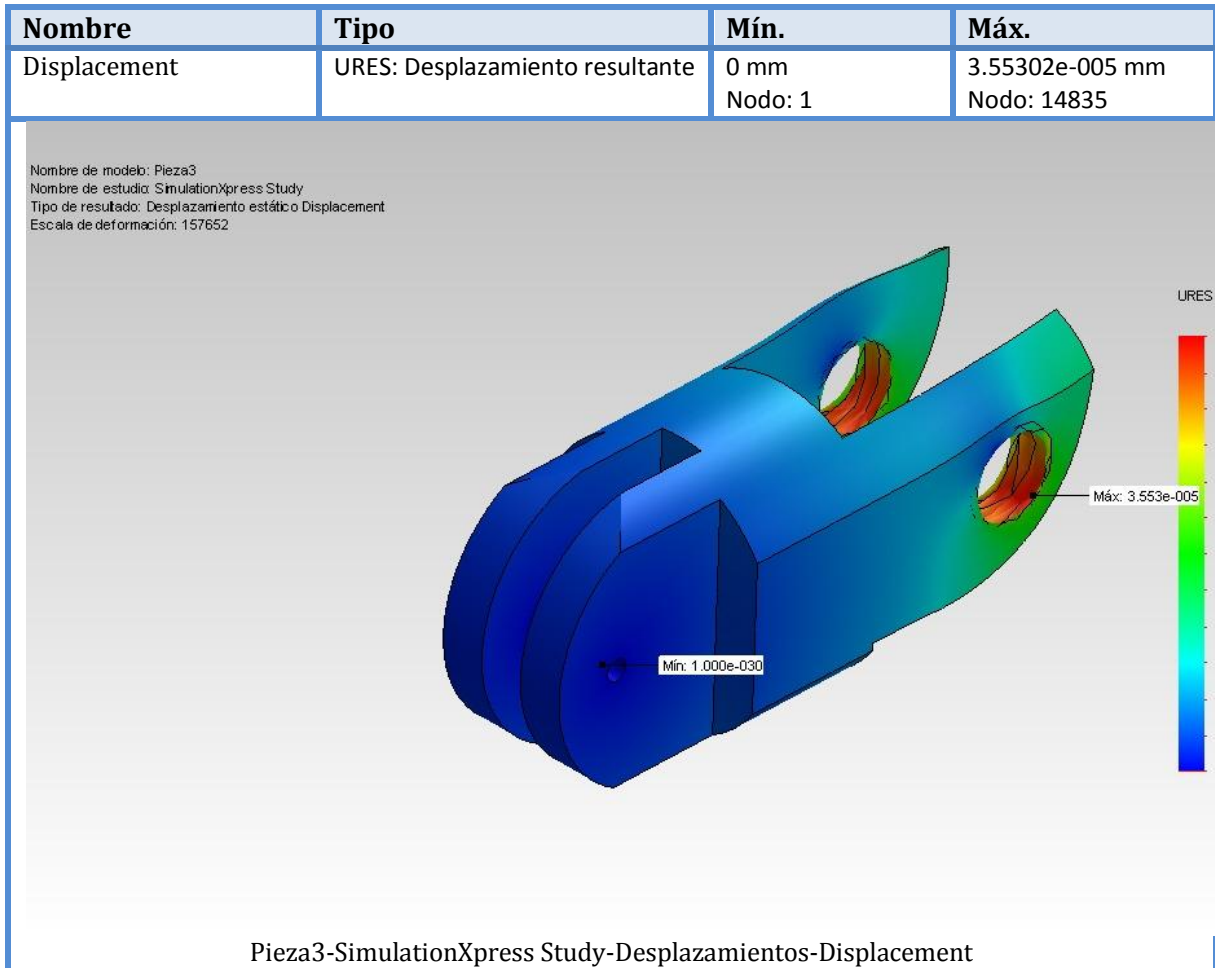


Figura 4.10. Simulación de análisis de desplazamiento para la pieza N°3

### 4.3.7. Simulación para la pieza N° 4

Para esta pieza nosotros podemos observar la distribución de los esfuerzos generados por la carga de 29,41 N en el agujero donde se aloja el pasador de sujeción y el agujero donde sujeta el cable que tensiona todo el mecanismo y observábamos una vez más la seguridad de esta pieza al someterla a estos esfuerzos

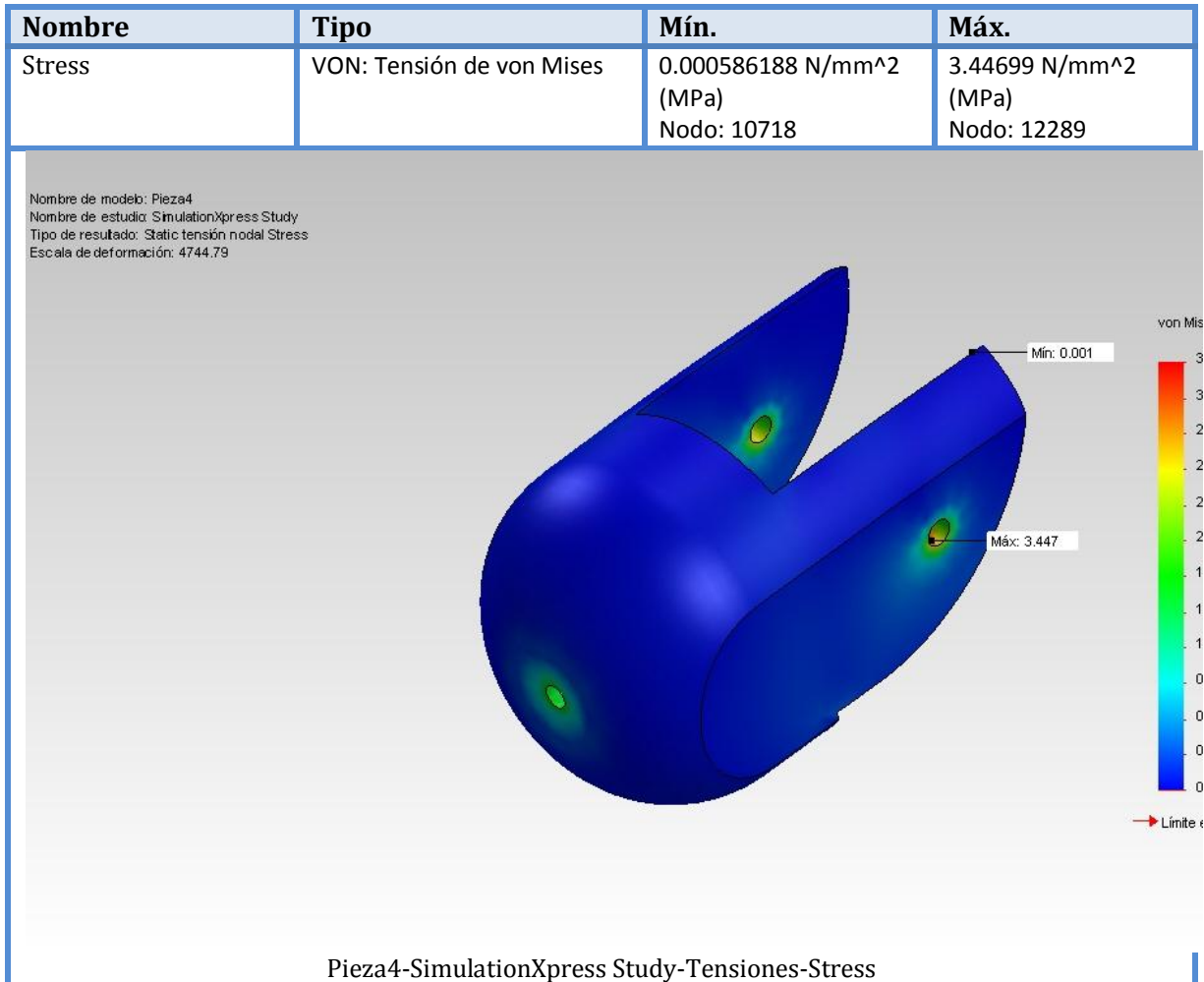


Figura 4.11. Simulación de análisis de tensiones para la pieza N°4

## Desplazamiento Para la pieza N° 4

Los desplazamientos de la piza muero cuatro se ven representados en la siguiente imagen donde podemos observar que las deformaciones para esta fuerza será bastante pequeñas

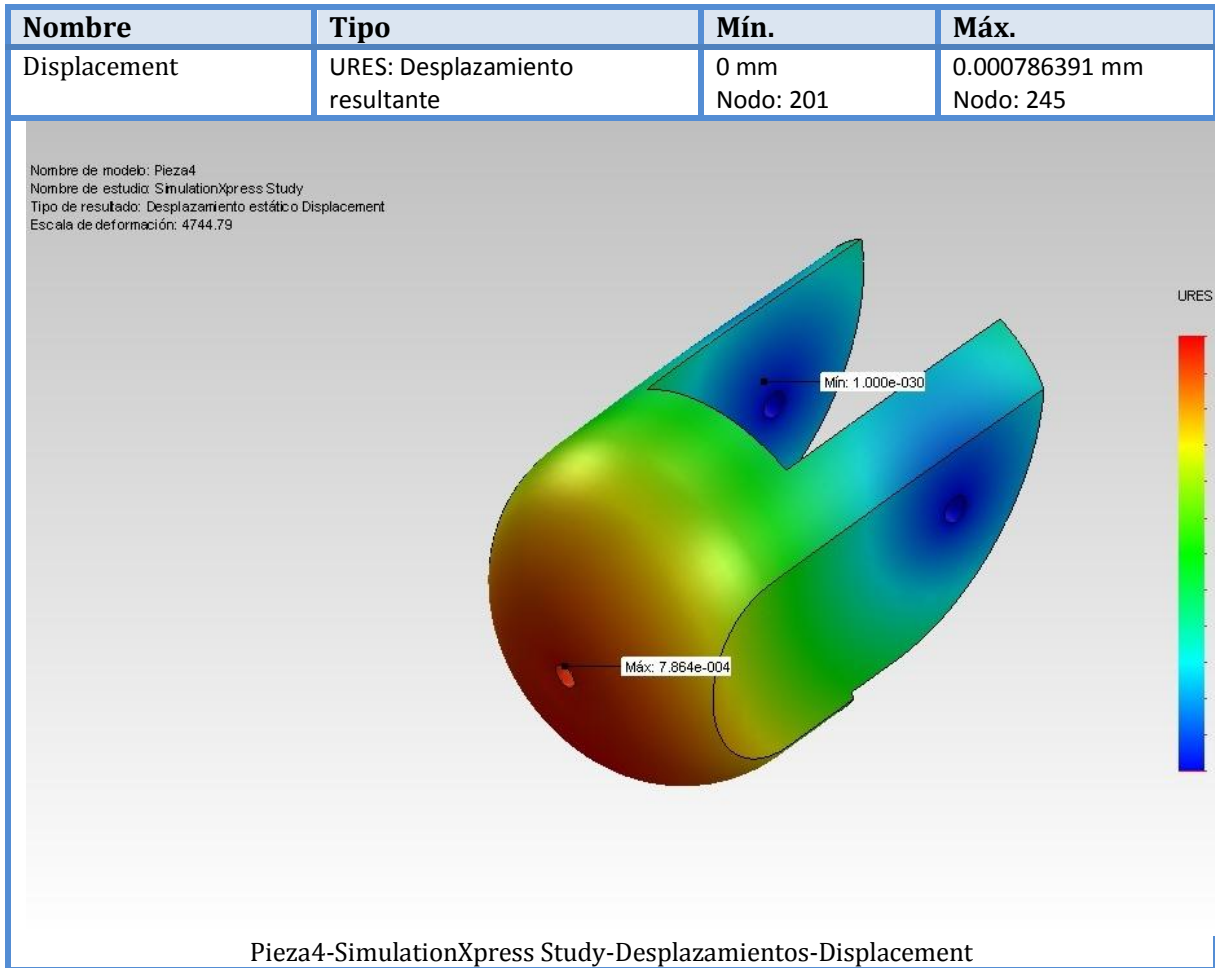


Figura 4.12. Simulación de análisis de desplazamiento para la pieza N°4

## 5. ELECTRONICA DE CONTROL DE LA MANO ROBOTICA

Una vez que se cuenta con el diseño mecánico, y se ha comprobado su resistencia y movilidad, es necesario diseñar una etapa que permitirá comunicar a los actuadores con una computadora para su control para dar movimiento al sistema. Ambas etapas deben trabajar en coordinación para posicionar correctamente cada articulación, de acuerdo a cierta configuración especial deseada u obtenida en la solución de la cinemática directa o inversa del sistema robótico completo.

Esta etapa será la encargada de dotar de inteligencia al sistema para que sea capaz de resolver la configuración a adoptar por las articulaciones para cumplir con cierto objetivo en específico. Se necesita conocer la electrónica involucrada en la tarjeta de adquisición de datos a emplear y programarla por medio de un software especializado.

### 5.1. CONTROLADOR MAESTRO PARA SERVOMOTORES

El controlador Maestro de segunda generación Pololu de controladores USB servo, Con tres modos de control: USB para conexión directa al PC, TTL serie para usar con sistemas embebidos y mediante scripts internos para su funcionamiento autónomo, control host de aplicaciones libres y canales que pueden configurar las salidas para servos de uso en radio control o control electrónico de velocidad (ESCs), salidas digitales o entradas analógico-digitales.

Los Maestro son dispositivos versátiles para control de servos y con entradas y salidas analógico-digitales dentro de una placa muy compacta. Su gran precisión y alta resolución de pulsos en un margen de menos de 200ns, hacen que la familia Maestro sea adecuada para un alto rendimiento mecánico y electrónico, con un exacto control de aceleración y velocidad pueden hacer fácil la consecución de movimientos suaves, sin golpes, sin necesidad del control desde el código fuente para calcular constantes intermedias de actualización.



Figura 5.1. Micro maestro Popolu Servocontroller [17]

Canales:	6
Entradas analógicas	6
Entradas digitales	0
Ancho:	0.85" (2.16 cm)
Largo:	1.20" (3.05 cm)
Peso	3.0 g
Pulso Alto	33–100 Hz
Pulso rango	64–3280 $\mu$ s
Scrip tamaño	1 KB

Tabla 5.1. Tabla Comparativa del Micro Maestro Servocontroller

### 5.1.1. Micro Maestro pins y componentes

El controlador Pololu Micro Maestro 6-canales puede conectarse a un PC vía puerto USB con un cables USB A a mini-B (no incluido). La conexión USB se usa para configurar el controlador y también para enviar comandos al controlador y recoger información del estado del mismo, enviando y recibiendo vía TTL bytes de datos por las líneas RX y TX.

El procesador y los servos pueden tener alimentación separada. La alimentación del procesador se puede tomar desde la conexión USB o externamente con valores de 5 a 16V conectados a las entradas VIN y GND.

Se puede tener una fuente de alimentación externa conectada al mismo tiempo que el USB, en cuyo caso el procesador se alimenta de la fuente de alimentación externa. Tenga en cuenta que si la fuente de alimentación externa cae por debajo de 5V, no está garantizado el funcionamiento correcto incluso estando conectado desde el USB.

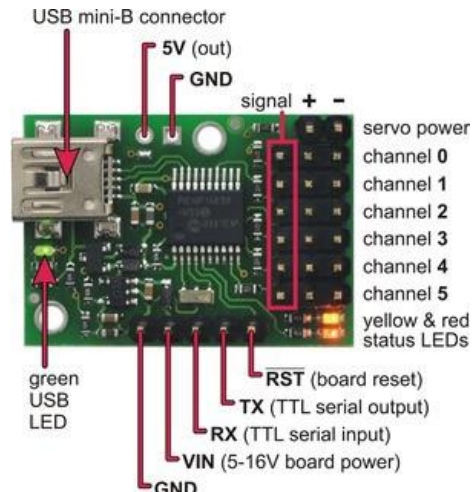


Figura 5.2 Pins y Partes del Micro Maestro [17]

## 5.2. ANÁLISIS

Para la construcción de la mano robótica con cinco grados de libertad se requiere la creación de un sistema capaz de interactuar con el prototipo de hardware, enviar órdenes y recibir resultados por medio del puerto USB.

Se debe de tener en cuenta los protocolos utilizados en el puerto USB, así también como el firmware necesario para que el sistema operativo reconozca el dispositivo.

El sistema deberá funcionar sobre una plataforma la cual permitirá el control en tiempo real, capaz de interactuar con el puerto USB.

Deberá enviar por medio del puerto USB una serie de instrucciones para el control de los motores servomotores, encargados del movimiento de los dedos de la mano

### 5.2.1. Uso del Maestro control Center

La aplicación para Maestro's USB da acceso a todas las opciones de configuración soportando control en tiempo real, reacción y depuración. El Maestro Control Center es una herramienta grafica que facilita el trabajo a través de USB; para muchos proyectos puedes usar la aplicación para ajuste y verificación del Maestro. Esta sección explica muchas de las características de Maestro y del Maestro Control Center.

La pestaña **Status** se utiliza para controlar las salidas de Maestro y el seguimiento de su estado en tiempo real. Hay una fila separada con los controles para cada uno de los canales de Maestro. En la imagen vemos los 12 canales que aparecen en Maestro Control Center y que está conectado a un Mini Maestro 12. Cuando se conectan otros modelos de Maestro el número de canales disponibles se mostraran en pantalla.

Según este la casilla del canal configurada como servo o como salida, la barra de control deslizante te servirá para ajustar el objetivo deseado y la bola verde indica la posición actual del canal. Por ejemplo, si el canal está ajustado a una velocidad relativamente baja, cuando muevas el control a una nueva posición, la bola verde se moverá lentamente hasta que haya alcanzado al control deslizante, lo que nos hace intuir como se alcanzara el objetivo. Para un control más preciso, también se puede introducir un valor objetivo directamente en la casilla "Target (destino)". El control deslizante automáticamente se escala para que coincida con los valores mínimo y máximo que figuran en la pestaña de configuración.

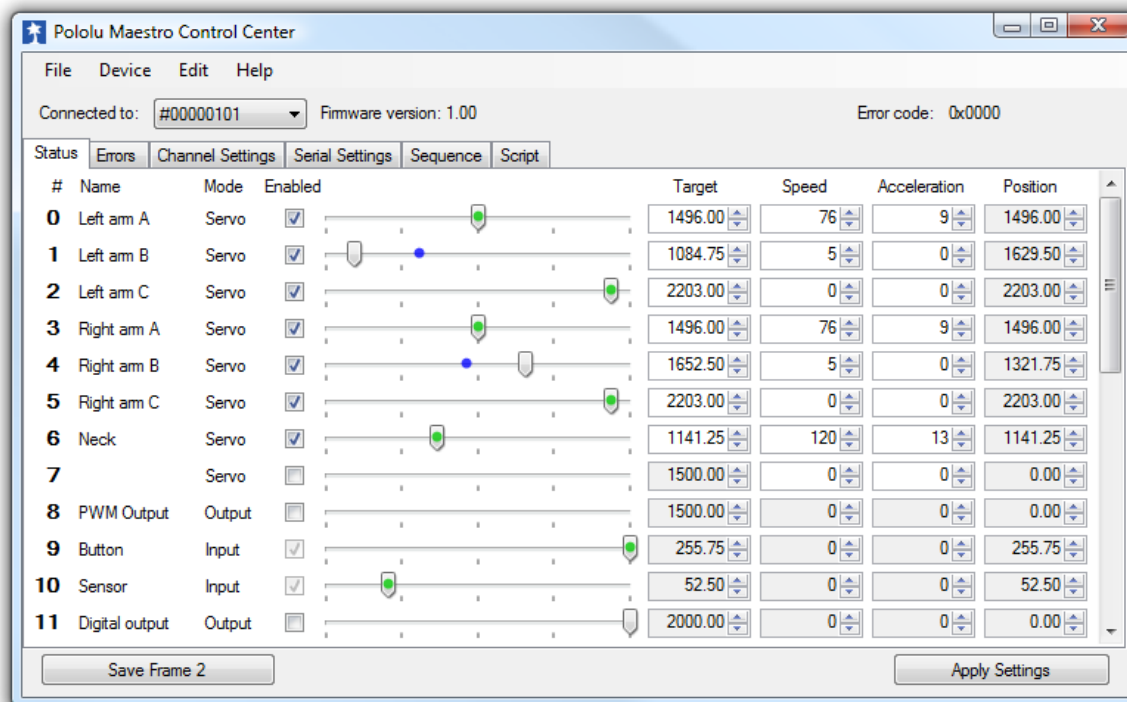


Figura 5.2.1 Interfaz Pololu Maestro Control Center

### 5.2.2. Requerimientos:

Se requiere un sistema que permita:

- Establecer una conexión con el dispositivo.
- Enviar los datos de movimiento.
- Interpretar los datos enviados por el puerto USB.

- Enviar órdenes a los diferentes motores según los datos recibidos

### 5.2.3. Eventos del Hardware

Nombre: Se conecta el periférico.

Descripción: El periférico se conecta al puerto USB del computador el cual debe identificarlo y prepararlo para el envío de datos.

Datos del evento: Identificación del dispositivo USB, número de identificación, versión y nombre del dispositivo.

Nombre: Toma de datos.

Descripción: El microcontrolador toma una serie de datos a través del buffer de la conexión USB para ser interpretados.

Datos del evento: Trama de datos.

Nombre: Se detecta un error en el dispositivo.

Descripción: Se presenta una mala conexión con el dispositivo, no se reconoce o no se pueden enviar los datos.

Datos del evento: Trama de datos.

Nombre: Desconectar.

Descripción: Se desconecta el dispositivo.

## 5.3. ANÁLISIS DEL SISTEMA EN MATLAB ®

En un análisis de la cinemática de un mecanismo la posición, velocidad y aceleración de todos los eslabones se calculan sin tener en cuenta las fuerzas que causan este movimiento. Por ello, este test consistirá en producir el movimiento real que haría la mano y ver cómo se comporta el mecanismo en términos de velocidad y aceleración.

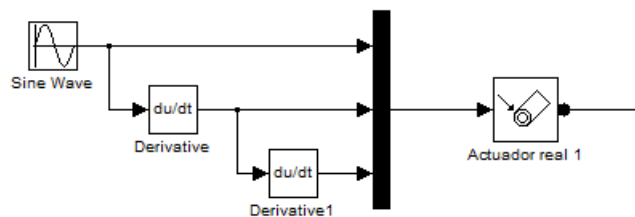


Figura 5.3. Función sinusoidal en Simmechanics.

Para reproducir el movimiento de la mano se han conectado los actuadores a las articulaciones del dedo que reproducen una onda sinusoidal (Figura 5.3) de una frecuencia y amplitud equivalente a la máxima que se pueden necesitar en tareas de manipulación (0,5 Hz). De esta manera el dedo se moverá con un movimiento periódico continuo y nos permitirá analizar el movimiento del mecanismo mediante la trayectoria que seguirán algunos puntos importantes del mecanismo.

Para determinar el punto más interesante de anclaje de los tendones en los eslabones para futuras optimizaciones de la velocidad y aceleración hemos conectado sensores en dichos puntos (Figura 5.4).

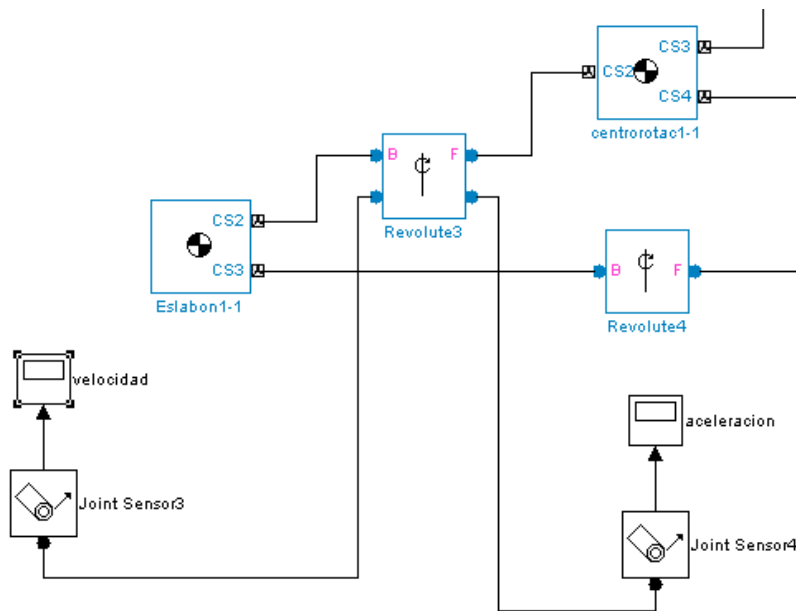


Figura 5.4. Esquema de conexión de los sensores.

Abrimos el cuadro de dialogo (Figura 5.5) correspondiente a la velocidad y aceleración y configuramos los parámetros que queremos medir y las unidades en las que los mediremos en este caso hemos elegido rad/s para la velocidad angular y rad/s<sup>2</sup> para la aceleración angular.

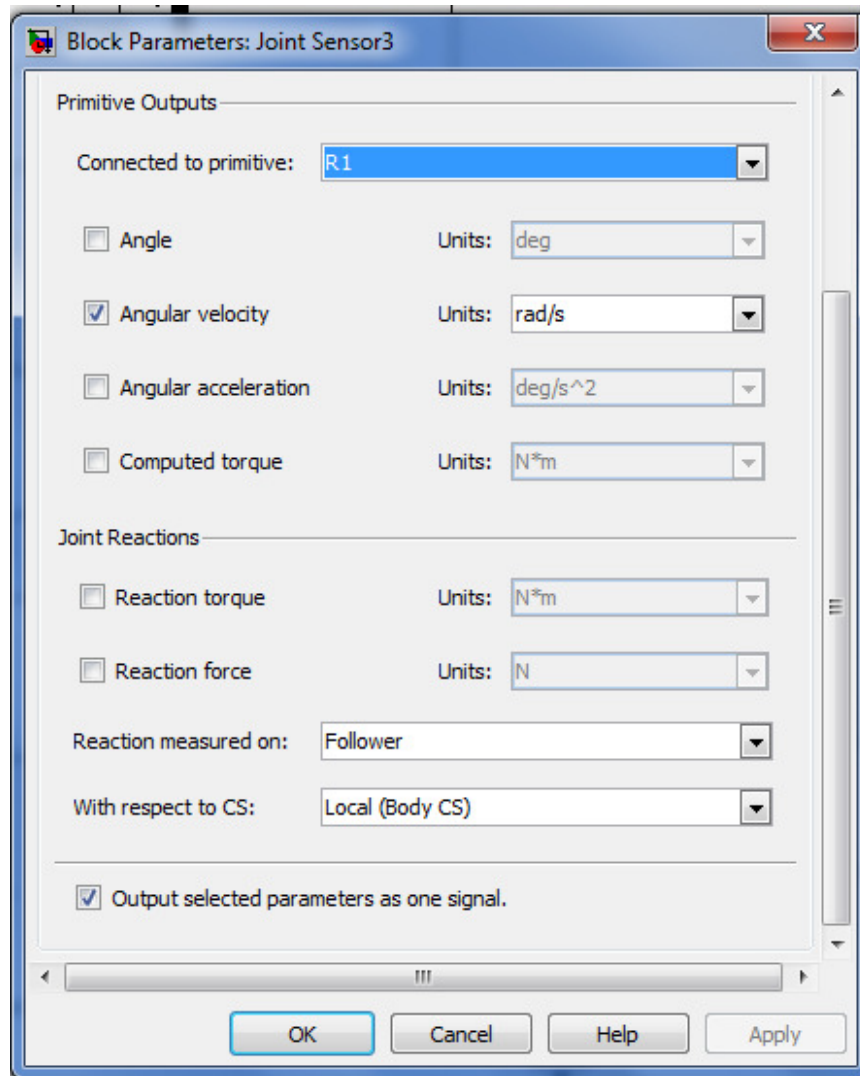


Figura 5.5. Cuadro de diálogo de los sensores.

Para que el movimiento periódico sea un movimiento realista y no lleve nuestro mecanismo hasta posiciones que un dedo real no puede conseguir hemos introducido un offset. El offset sitúa el punto intermedio del movimiento y configura la amplitud del mismo. Para introducir los parámetros del offset hemos cliqueado en el cuadro de diálogo de la función seno. (Figura 5.6).

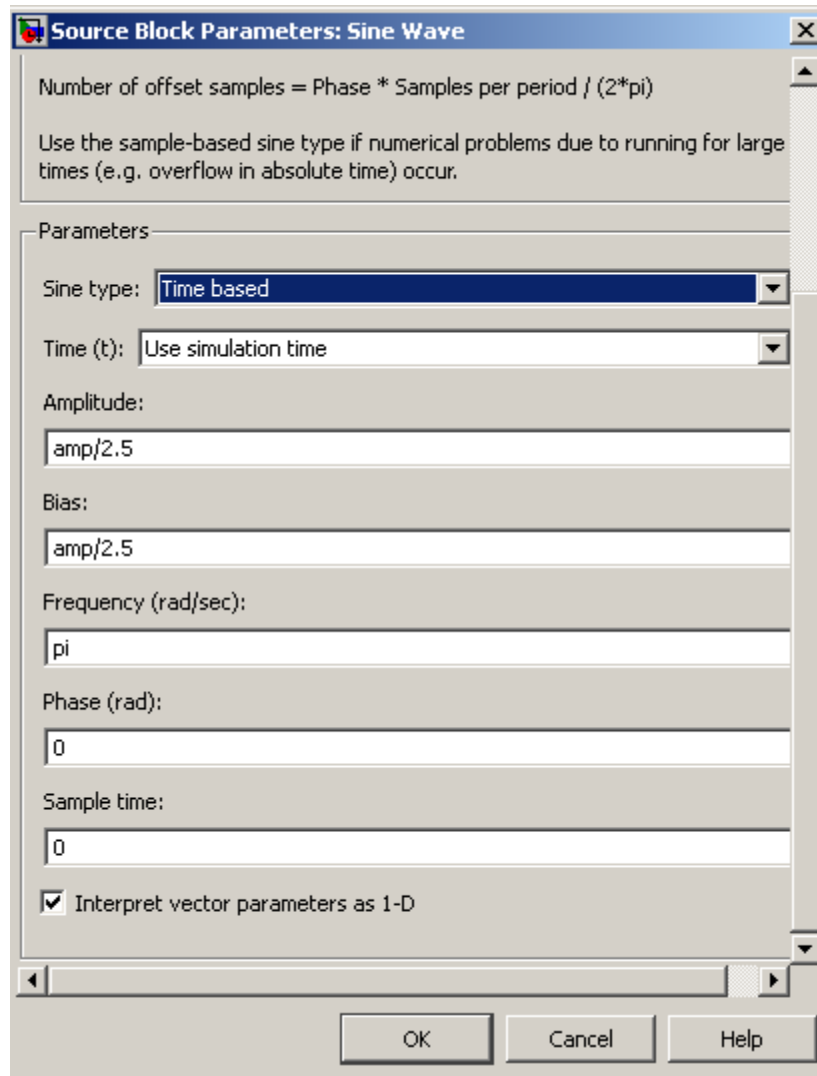


Figura 5.6. Cuadro de diálogo de la función sinusoidal.

En los parámetros Amplitud y Bias se ha utilizado una variable de nombre 'amp' para realizar un análisis iterativo que nos ha permitido conocer el comportamiento del mecanismo durante su movimiento. Para el estudio final se ha considerado un valor de 'amp' igual a  $\pi/2$  o  $90^\circ$  ya que todas las articulaciones del dedo humano giran aproximadamente  $90^\circ$  desde su posición inicial de dedo recto. Por lo que la aproximación de  $90^\circ$  es bastante acertada y nos ha permitido conocer el comportamiento cinemático del mecanismo.

Una vez realizado las configuraciones pertinentes, ponemos en marcha la simulación pulsando el botón de reproducir en el menú de simulación (Figura 5.7). Con los resultados podremos obtener conclusiones acerca del comportamiento cinemático del mecanismo y ver si se produce algún tipo de fallo durante su funcionamiento que pueda afectar a la fiabilidad del mismo.

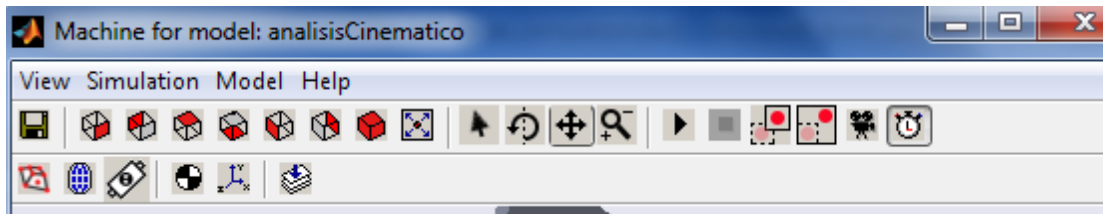


Figura 5.7. Barra de herramientas del menú de simulación.

### 5.3.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CINEMÁTICO.

En este apartado analizaremos los resultados que hemos obtenido del programa en forma de gráficas y sacaremos las conclusiones pertinentes que darán lugar a cambios en el diseño para su futura optimización o comprobarán la validez de nuestras hipótesis previas acerca de la longitud de los eslabones.

Para realizar los análisis se ha utilizado comandos de posición en forma de seno (Figura 5.3). El objetivo es comprobar si existen no-linealidades importantes que puedan afectar al mecanismo. Generalmente, los más importantes a tener en cuenta son cambios bruscos en las aceleraciones provocados por sobre aceleraciones fuertes. La razón de utilizar un seno es que tanto la velocidad como la aceleración y demás derivadas son senoidales. Así resulta más fácil de analizar a simple vista las no linealidades en todo el rango de movimiento.

#### 5.3.1.1. Velocidad de la articulación A1

En la primera gráfica (Figura 5.8) podemos observar una secuencia de varios ciclos de la simulación donde se aprecia que la trayectoria seguida por la articulación A1 sigue la función de partida la senoide. Lo que demuestra que existe linealidad entre los parámetros de estudio en este caso la velocidad y la posición del mecanismo.

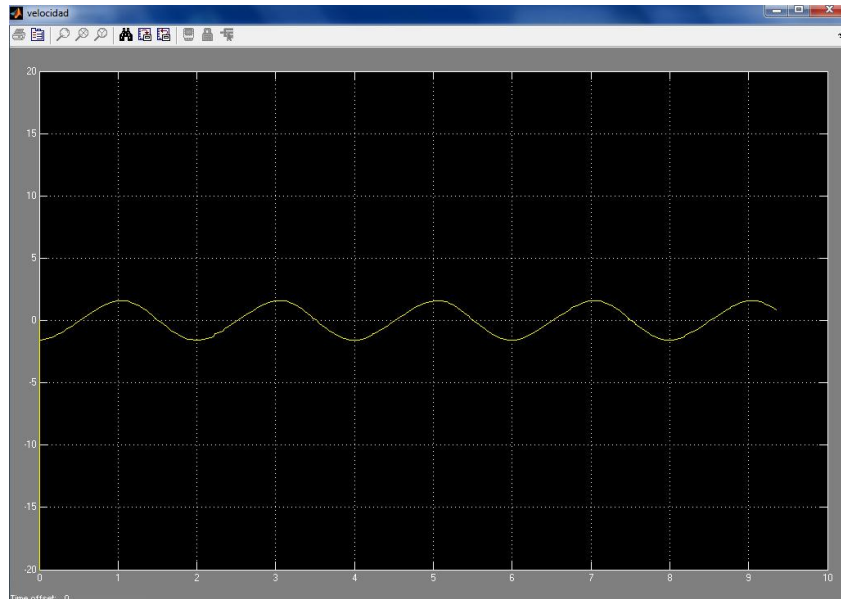


Figura 5.8: Detalle Velocidad A1.

Para ver con más detalle la senoide hacemos zoom para fijarnos en un único ciclo (Figura 5.9). Gracias al zoom podemos observar ciertas irregularidades en la forma de la senoide lo que puede indicar que la linealidad que presuponíamos no era tal.

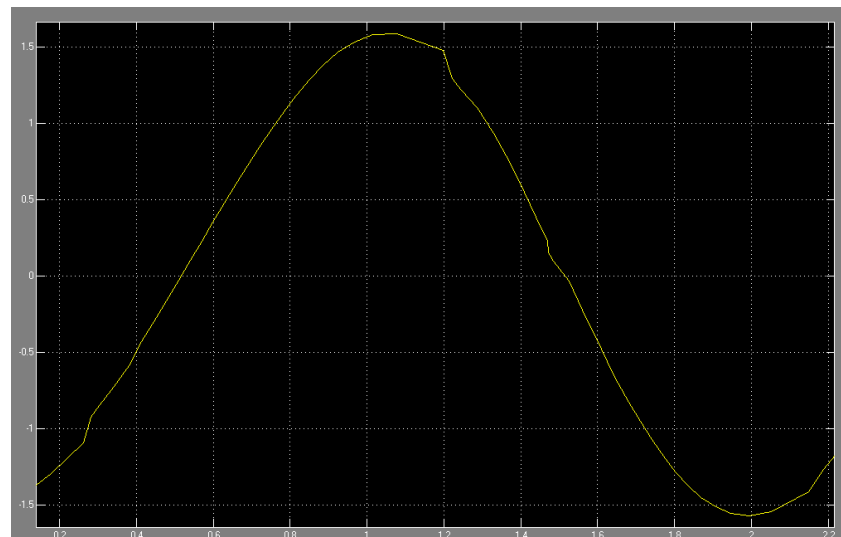


Figura 5.9. Detalle de un ciclo de la velocidad A1.

### 5.3.1.2. Velocidad de la articulación A2.

Observamos el mismo comportamiento en la articulación A2 lo que refuerza nuestra hipótesis de partida (Figura 5.10).

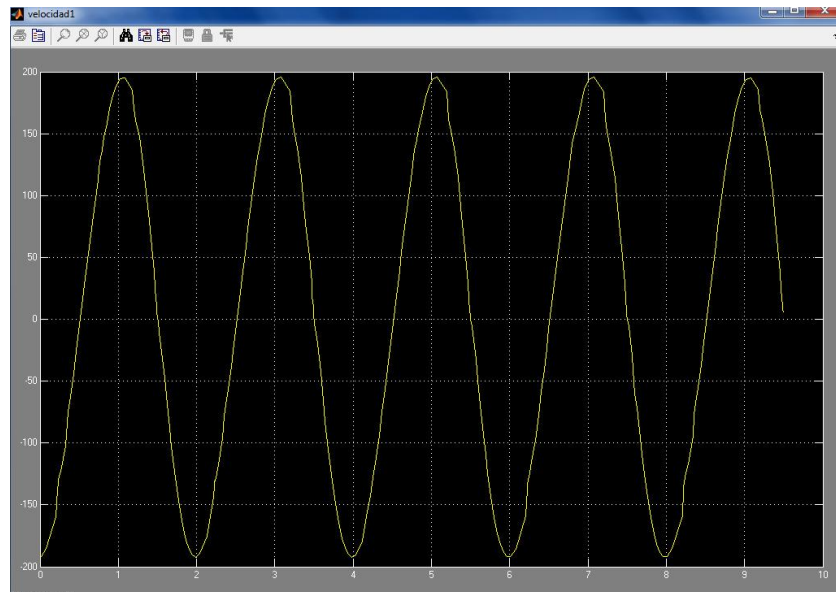


Figura 5.10. Detalle Velocidad A2.

Volvemos a realizar zoom para ver con más detalle un único ciclo del movimiento (Figura 5.11). Se repite la aparición de irregularidades en la forma del senoide, aunque estas son apenas imperceptibles al ser la primer derivada de la posición, la velocidad.

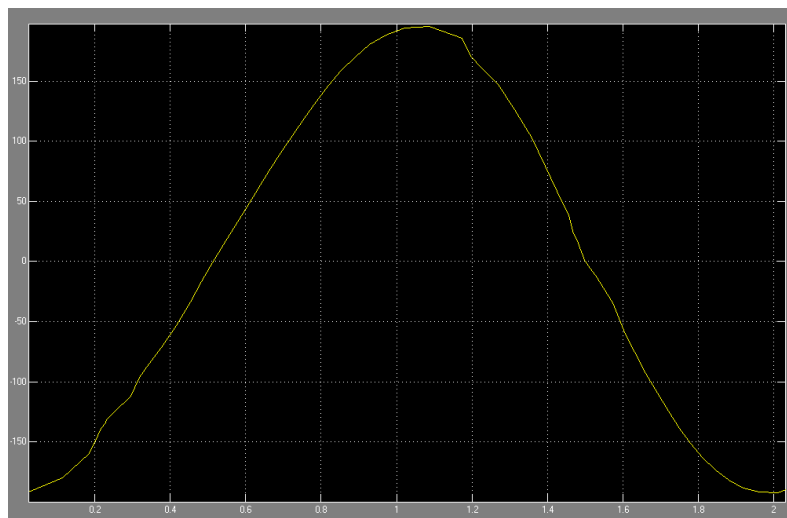


Figura 5.11: Zoom para un ciclo Velocidad A2.

### 5.3.1.3. Velocidad de la articulación A3.

Para completar el análisis de la velocidad analizamos la velocidad de la articulación A3 a lo largo de la simulación. Podemos ver en la Figura 5.12 una secuencia de ciclos. Se ajustan a la forma senoidal impuesta por nosotros como trayectoria por lo que el dedo sigue las trayectorias marcadas sin mucho error.

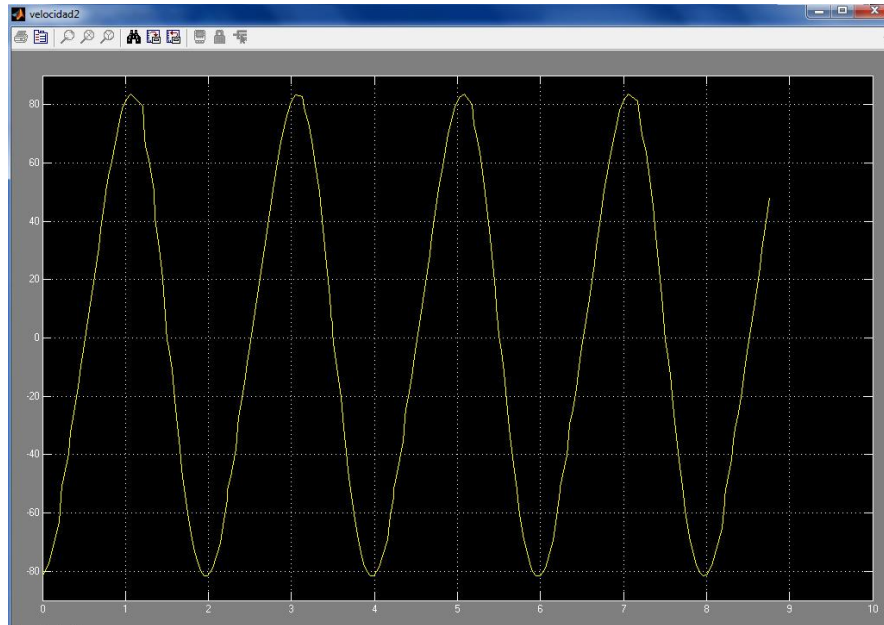


Figura 5.12 Detalle Velocidad A3.

Haciendo zoom para observar un solo ciclo (Figura 5.13) de la simulación se siguen produciendo irregularidades en la forma de la senoide. Aunque podemos despreciar dichas irregularidades por casi insignificantes.

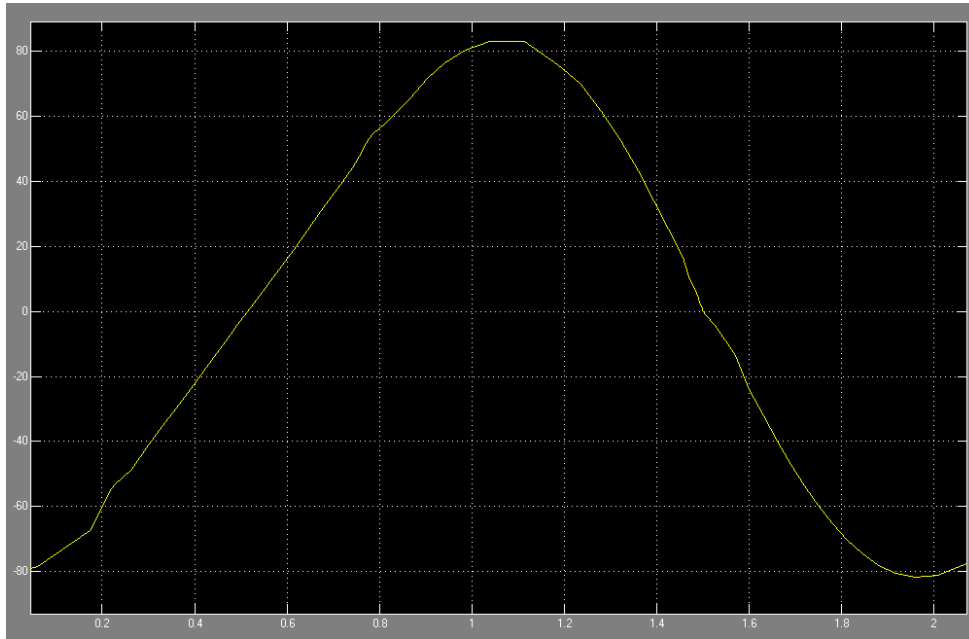


Figura 5.13. Detalle un ciclo Velocidad A3.

Una vez hemos visto los resultados de la velocidad, pasamos a ver cómo se comportan los eslabones en términos de aceleración.

#### 5.3.1.4. Aceleración de la articulación A1

Al simular el mecanismo se han obtenido los siguientes resultados para la aceleración de la articulación A1 (Figura 5.14).

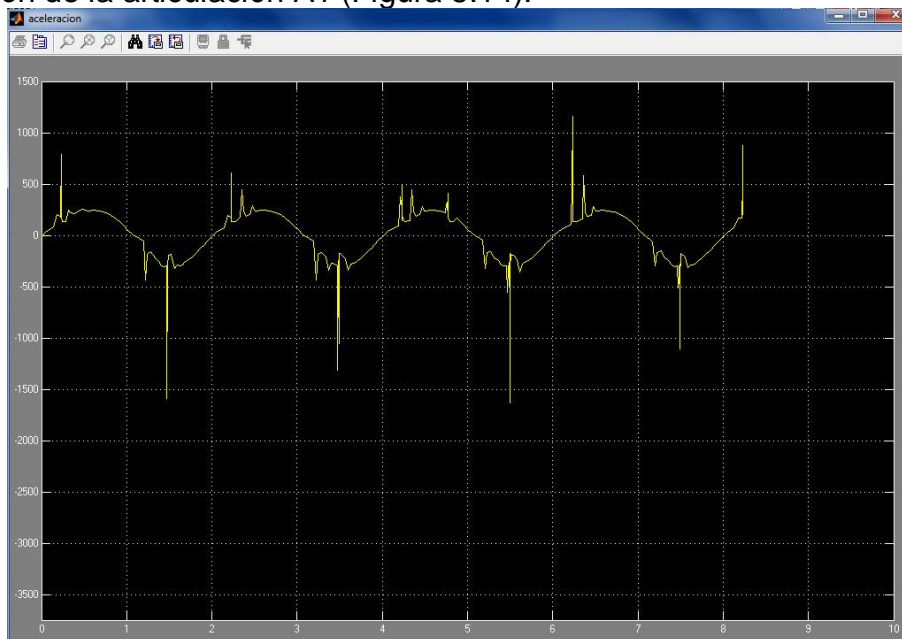


Figura 5.14. Detalle Aceleración A1.

Sin necesidad de hacer zoom ya se puede apreciar que, aunque mantiene una estructura senoidal, se producen irregularidades y saltos que nos inducen a pensar que existe algún tipo de fallo en la linealidad. Aún así realizaremos un zoom para ver con detalle un único ciclo (Figura 5.15).

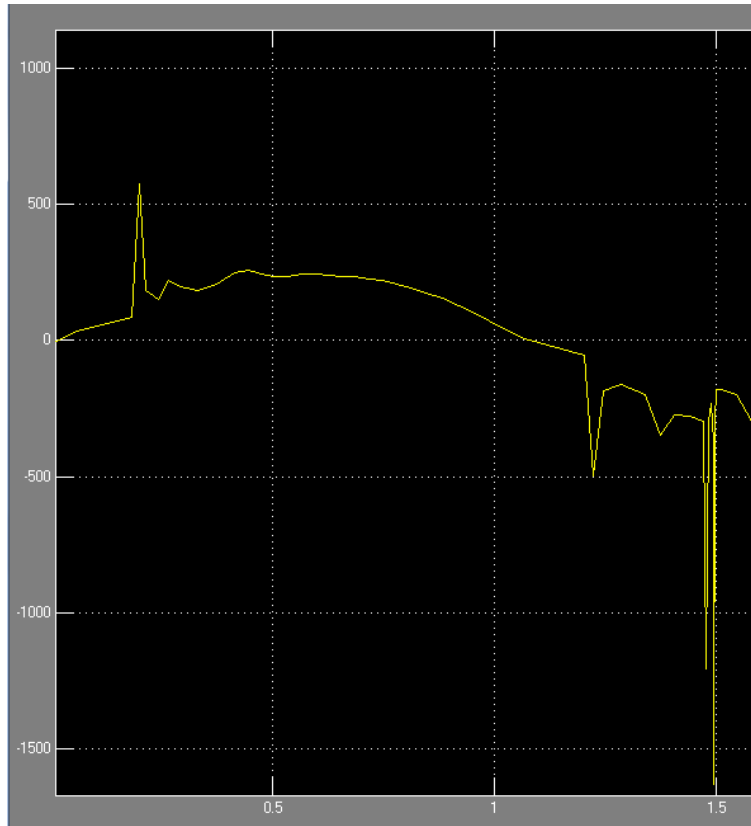


Figura 5.15. Detalle Zoom Aceleración A1.

Se observan grandes irregularidades que pueden producir fallos debidos al desgaste en la articulación que hagan disminuir la fiabilidad del mecanismo.

### 5.3.1.5. Aceleración de la articulación A2

En la articulación A2 vemos que se repiten las mismas características que hemos visto en la articulación anterior.

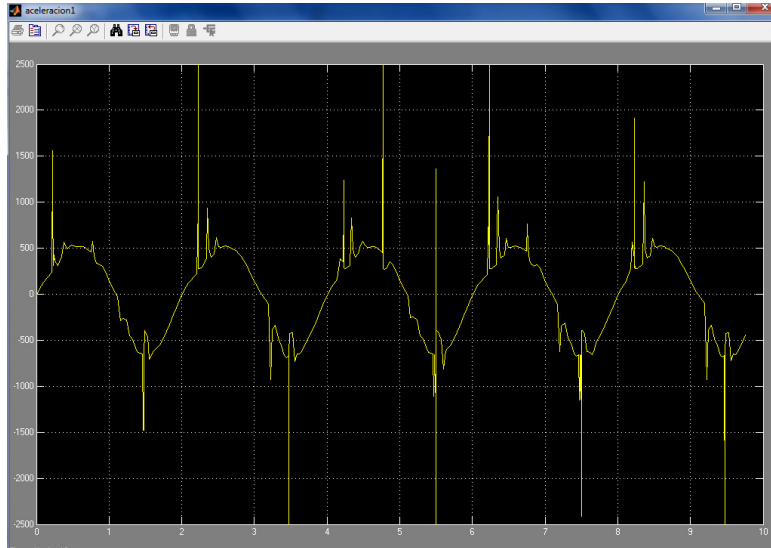


Figura 5.15. Detalle Aceleración A2.

Otra vez sin necesidad de realizar un zoom en la secuencia de ciclos se pueden apreciar grandes saltos e irregularidades en la forma de la senoide.

### 5.3.1.6. Aceleración de la articulación A3

Los resultados para la articulación A3 no hacen más que comprobar la aparición de irregularidades en el diseño. Una vez más se pueden observar las irregularidades sin necesidad de hacer zoom (Figura 5.16) sobre la secuencia de ciclos lo que no hace más que demostrar que el diseño actual podría provocar fallos en el mecanismo.

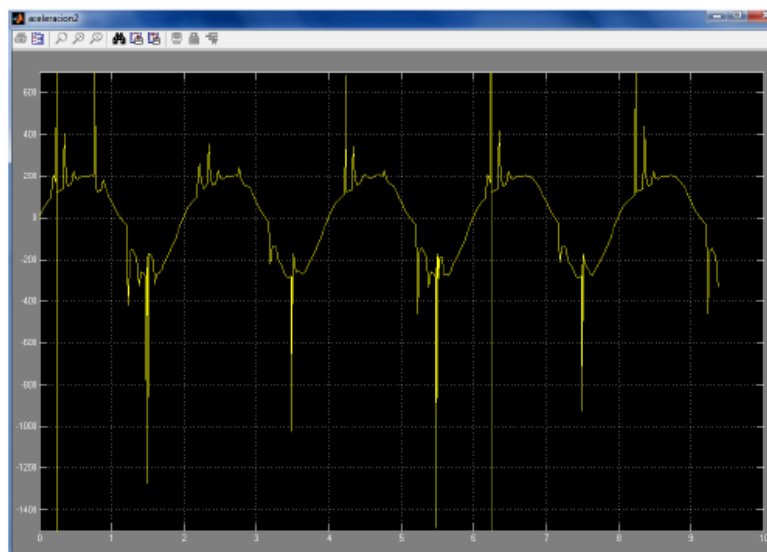


Figura 5.16. Detalle Aceleración A3.

A la vista de las irregularidades observadas en la aceleración, se ha decidido estudiar también las sobre aceleraciones. Así conoceremos si estas irregularidades son producidas a sobre aceleraciones de valor infinito.

### 5.3.1.7. Sobre aceleraciones

El estudio de las sobreaceleraciones nos permite conocer cambios bruscos en la aceleración del mecanismo mientras sigue una trayectoria determinada. Tras haber visto las irregularidades en las aceleraciones, más pronunciadas que en el caso de la velocidad, se puede adivinar que las irregularidades en las sobreaceleraciones seguirán el mismo patrón. Esto es debido al tratarse de derivadas.

En las figuras 5.17, 5.18 y 5.19 se pueden ver las sobreaceleraciones en las articulaciones A1, A2 y A3 respectivamente.

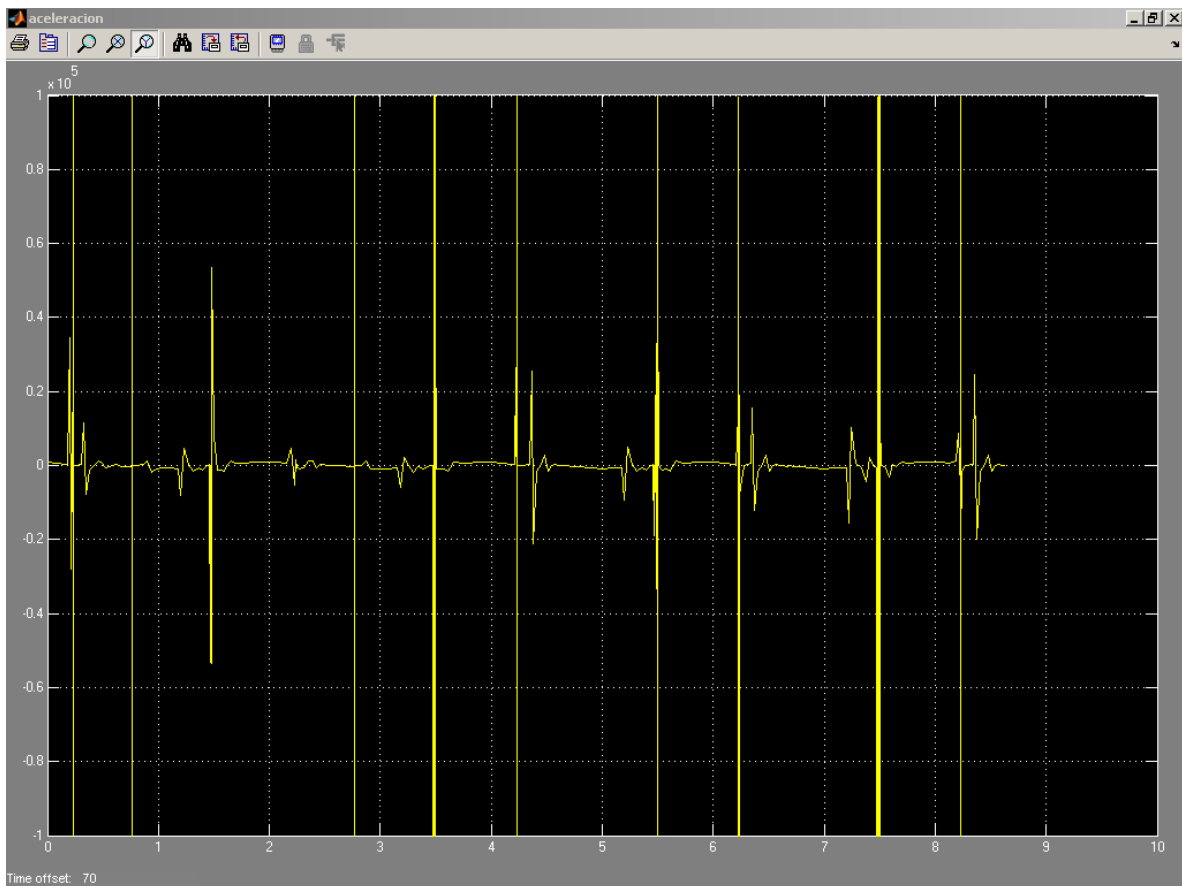


Figura 5.17. Detalle Sobreaceleración A1.



Figura5.18. Detalle Sobreaceleración A2.

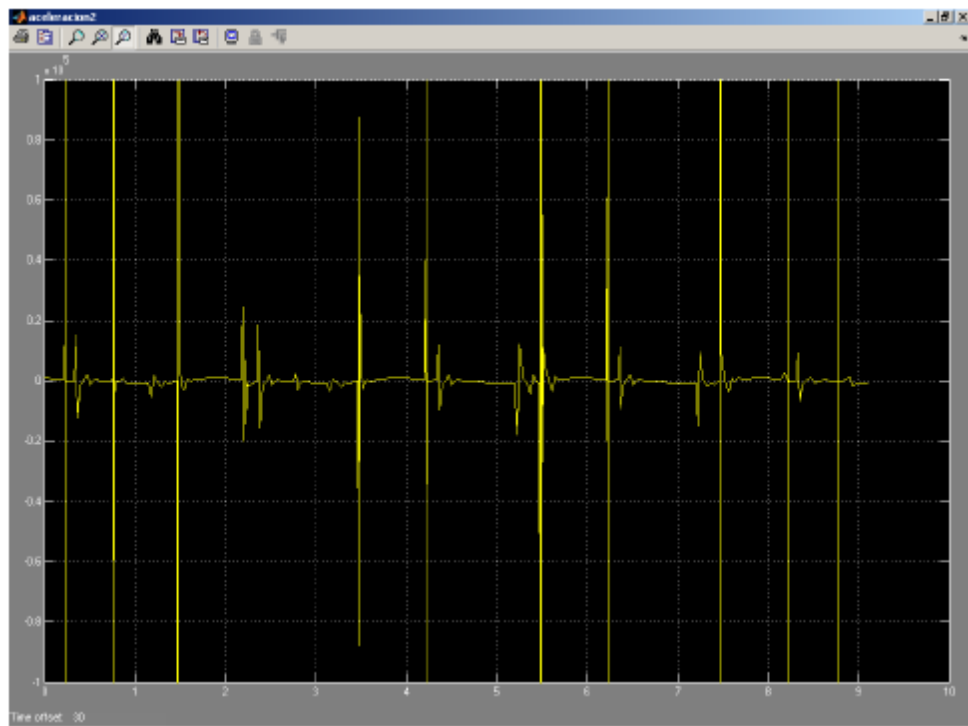


Figura 5.19. Detalle Sobreaceleración A3.

Como se puede apreciar en las figuras 5.17, 5.18 y 5.19 se producen sobre aceleraciones de valor infinito. Esto significa que el mecanismo, durante su movimiento, estará sometido a tirones o sacudidas que podrían provocar el desgaste del mecanismo disminuyendo su fiabilidad.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. CONCLUSIONES**

La mano humana es una excelente herramienta, posee una gran flexibilidad y destreza lo cual permite realizar innumerables acciones gracias a su función esencial: la presión. Posee un sin número de funcionalidades que le otorgan múltiples acciones, posiciones y movimientos.

Existe un modelo matemático para la mano humana que consiste en seis sistemas cartesianos de referencia los cuales se usan para definir la posición y orientación de los tendones y para describir la configuración de las articulaciones. Por medio de este sistema de referencia se puede determinar la posición de los dedos en un espacio de tres dimensiones.

Los grados de libertad están directamente relacionados a la cantidad de movimiento y para el caso de este trabajo se tendrán en cuenta cinco grados de libertad, por ejemplo, el dedo índice tiene un grados de libertad por cada articulación entre las falanges, en el mismo caso están los dedos meñique, anular, medio y pulgar. Sumando en total cinco grados de libertad.

Las articulaciones tienen un solo eje de rotación por lo que basta con colocar un eje para lograr su movimiento, lo que permite concluir que para el prototipo es necesario un motor por cada grado de libertad para un total de cinco motores.

El uso de los microcontroladores ayuda a optimizar diferentes procesos industriales mediante el uso de su lógica programable; los microcontroladores Pololu Servocontrorller son ampliamente conocidos en el mercado debido a su tiempo de permanencia, diferentes gamas y facilidad de uso, además, permite un bajo consumo de corriente por lo cual es posible alimentarlos directamente desde el voltaje arrojado por el puerto USB y por tales características fueron seleccionados en el diseño del prototipo de mano robótica.

Para la conexión del prototipo con el computador se utiliza la interface USB permite mejorar la capacidad de interconexión de dispositivos permitiendo adjuntar periféricos rápidamente sin necesidad de reiniciar la computadora, permite la transmisión de datos a alta velocidad y la distribución de energía.

Los periféricos para puertos USB son reconocidos automáticamente por el computador (y se configuran casi automáticamente) lo cual permite instalar un nuevo dispositivo en el PC de forma sencilla. Los aparatos conectados a un puerto USB estándar no necesitan estar enchufados a la corriente o disponer de baterías para funcionar. El propio puerto está diseñado para transmitir energía eléctrica al dispositivo conectado.

Para el diseño de la mano robótica se optó por el uso de servomotores ya que permiten controlar su funcionamiento de forma precisa y práctica, y son de fácil implementación.

La comunicación entre el usuario y el prototipo de la mano robótica en cuanto a instrucciones de movimiento es facilitada por medio de una interfaz que a través de una conexión USB permite la transmisión de las instrucciones desde un equipo remoto hasta el equipo donde se encuentra instalado el dispositivo y de este equipo las instrucciones son enviadas al dispositivo a través de un puerto USB donde el controlador procesa la información recibida y la traduce en movimientos de los servomotores.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

Dando continuidad a este trabajo sería conveniente la fabricación de un primer prototipo de mano robótica siguiendo el diseño presentado.

En la construcción es necesario contar con materiales livianos, la adición de peso aumenta la complejidad en el mecanismo en el uso de motores con mayor potencia, las poleas dentadas usadas en las impresoras son una buena opción, ya que se acoplan fácilmente a los piñones de los motores paso a paso, son livianas y permite un buen agarre. El uso del aluminio como material principal de los dedos permite disminuir el peso del prototipo al mismo tiempo que proporciona la dureza necesaria para su funcionamiento.

Para futuros proyectos, se podría utilizar un medio de transmisión inalámbrico entre computador y la mano robótica, a fin de ganar mayor libertad e independencia.

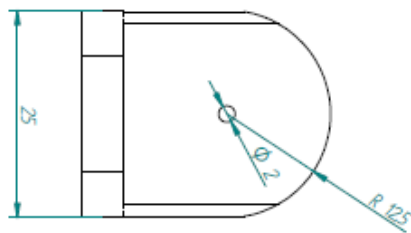
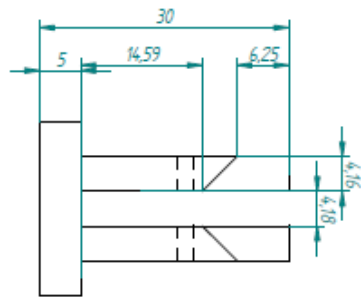
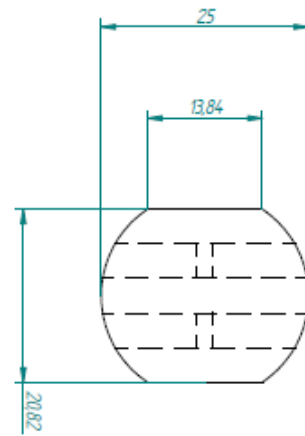
La implementación de un sistema que le permita a la mano robótica simular la sensación de tacto que posee una mano humana, con ello se podría realizar optimizar las tareas de agarre.

Realizar análisis numéricos en forma estática y dinámica de los elementos que componen la mano robótica, con la finalidad de determinar los puntos críticos que posee el prototipo para posteriormente realizar las adecuaciones necesarias para asegurar el óptimo funcionamiento mecánico del sistema.

## **Anexo A. Planos de partes del efector**

Los planos agrupados en este anexo son una muestra de la documentación conformada por 4 planos, contenida en el “Documento Técnico” dentro del CD que acompaña a esta tesis

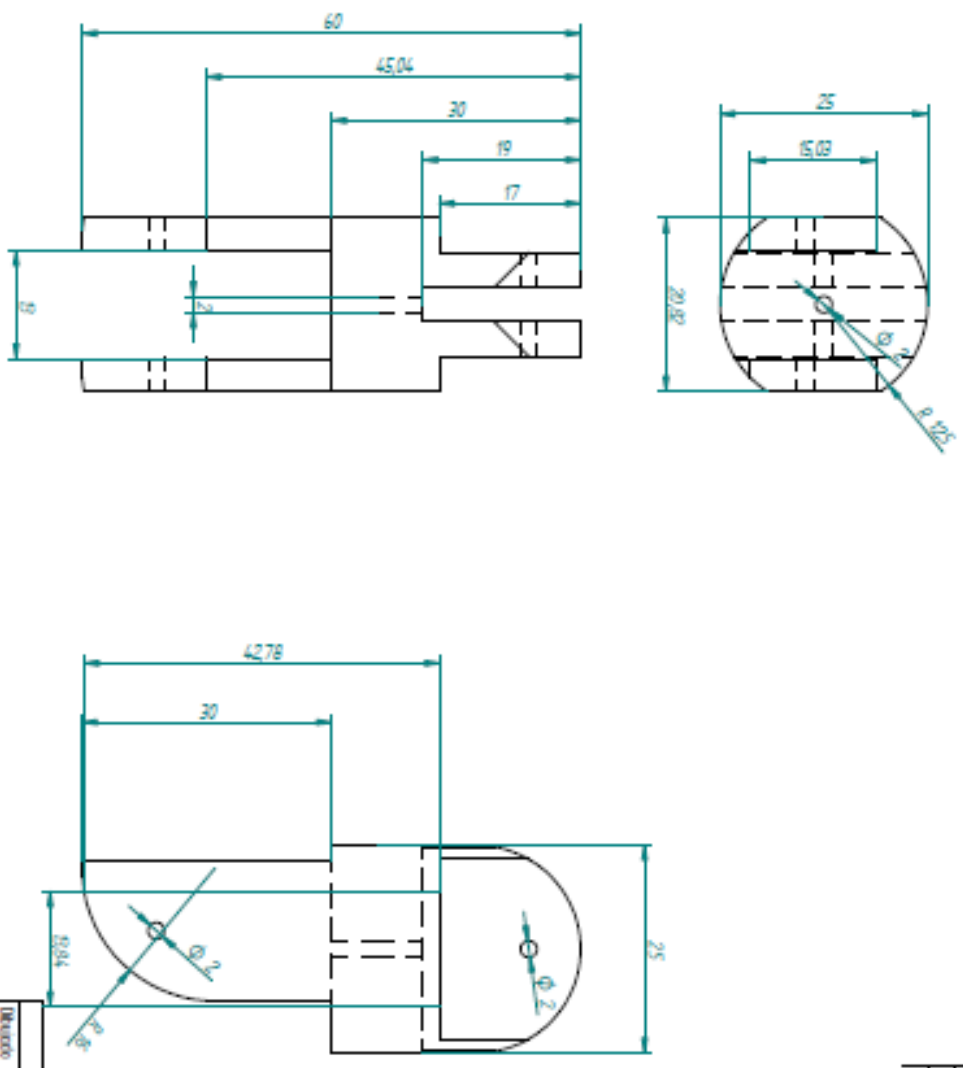
SOLID EDGE ACADEMIC COPY



Revisions			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

Nombre	FECHA	<b>SOLID EDGE</b> EDS-DM SOLUTIONS	
Dibujado: SRY_ALEJLO	5/07/12		
Comprobado		Título	
Aprobado 1			
Aprobado 2		Plano	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		Archivo Pico1.dft	Hoja 1 de 1
		Escala	Paso

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

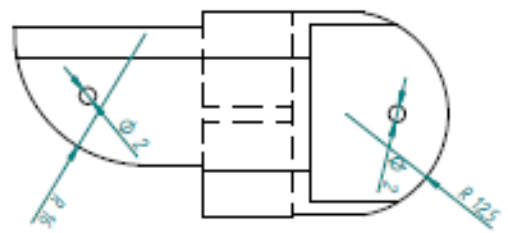
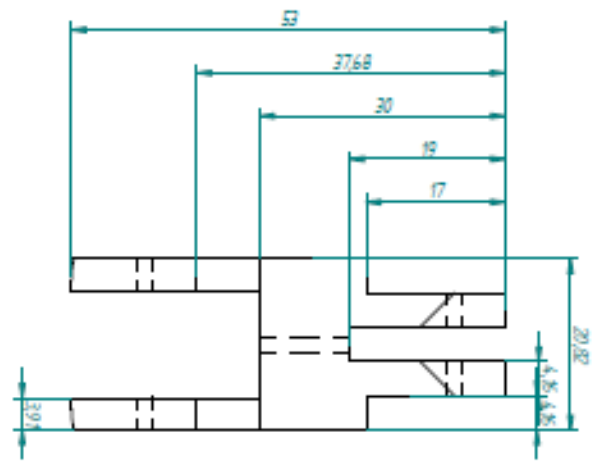
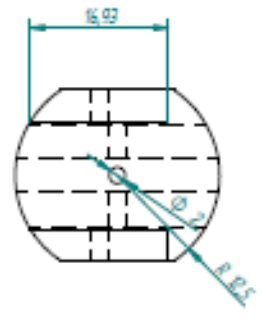


Rev	Descripción	Fecha	Aprobado
-----	-------------	-------	----------

Dibujante	SVT/JUTIK	Fecha	
Comprador			
Aprobado 1			
Aprobado 2			
Se ha incluido información crítica en rojo Angles in grades tolerances 45 y 45			
Archivo: Pico220 Formato: Pico		Hoja: 100-1	

**SOLID EDGE**  
3D-CAD SOLUTIONS

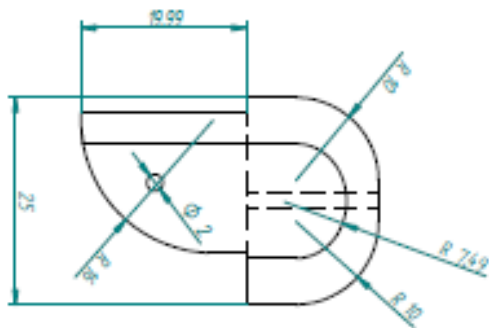
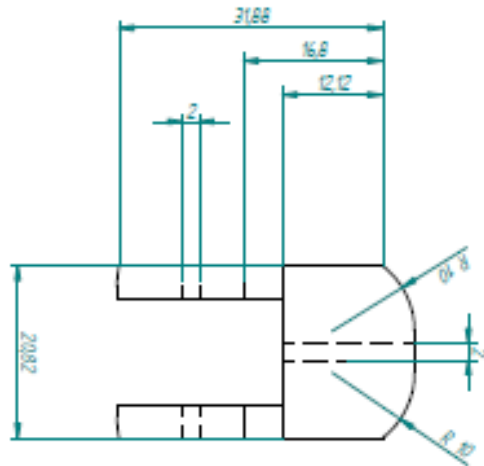
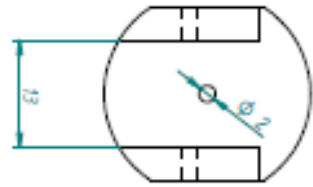
Reservados			
Res	Usurpador	Fecha	Aprobado



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Modelo	SIN_AJUDAR	Fecha	
Comprobado			
Aprobado 1			
Aprobado 2			
Solid Edge académico con licencia gratis en universidades de grado en español Microsoft, Autodesk y HP			
Archivo: RES31.DBT Formato: DWG		Versión: 10.0 Fecha: 10/01/2010	Usuario: Fecha: Hora: 10:01

Des	Desarrollado	Fecha	Aprobado
-----	--------------	-------	----------



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Material	ST1.2UTi06	Fecha	5/07/02
Desarrollado			
Archiado 1			
Archiado 2			
Subindicador de control corte en radiografía después de grabado valoración 4/5 y 4/4			
Archivo: P133-01 Fecha: P133		Título: <b>SOLID EDGE</b> 003-214-02010103	
Des	Desarrollado	Fecha	5/07/02

## **Anexo B. Manual de instalación de Driver para el Servo Microcontroller.**

La explicación en este anexo son una muestra de la documentación conformada el siguiente manual, contenida con sus correspondientes archivos de instalación de Drivers que se encuentran alojados dentro del CD que acompaña a esta tesis



**DISEÑO ANTROPOMORFICO DE UNA MANO ROBOTICA ARTICULADA**

**ADALBERTO LÓPEZ GÓMEZ**

**YEFFERSON BERTEL MADRID**

**MANUAL DE INSTALACION PARA EL SERVO MICROCONTROLLER**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA**

**CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.**

**2012**

# MANUAL DE INSTALACIÓN DE DRIVERS

Los controladores Maestro y su configuración de software USB trabajan igual bajo Microsoft Windows XP, Windows Vista, Windows 7 y Linux. No es compatible con Mac Os.

## PRIMEROS PASOS

### a. INSTALACIÓN DE LOS DRIVERS Y SOFTWARE EN WINDOWS

Si estas usando Windows XP necesitas tener instalado el Service Pack 3 antes usar los drivers para Maestro. Sigue los detalles. Antes de conectar Maestro al PC debes instalar los drivers para Microsoft Windows de esta manera:

1.- Descarga Maestro Servo Controller Windows Drivers y Software (6MB zip).

2.- Abre el fichero ZIP y corre setup.exe. El instalador te guiara a traves de pasos en la instalacion de del Maestro Control Center, la utilidad de Maestro Command-line (UscCmd) y los drivers para el PC. Si el instalador falla debes de extraer los ficheros a un directorio temporal y luego darle al setup.exe como "administrador".



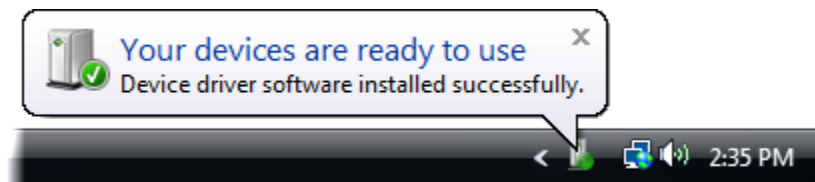
### Ventana de instalación del drivers para el servocontrolador

3.- Durante la instalacion Windows te mostrara una pantalla de alarma diciendo que los drivers no estan testados por Microsoft y no son recomendables. Ni caso, clic en "Continue" (Windows XP) o "Instalar el driver siempre" (Windows 7 y Vista).



**Ventana de confirmación de seguridad de instalación de software en Microsoft Windows ®**

4.- Una vez finalizada la instalación inicia el menú desde el enlace de Maestro Control Center (en el directorio de Pololu). Esta es una aplicación Windows que permite configurar, controlar y depurar en tiempo real con Maestro. Tiene una utilidad de Comando-línea llamada UscCmd que permite comandos rápidos



**Conformación de nuevo Hardware instalado**

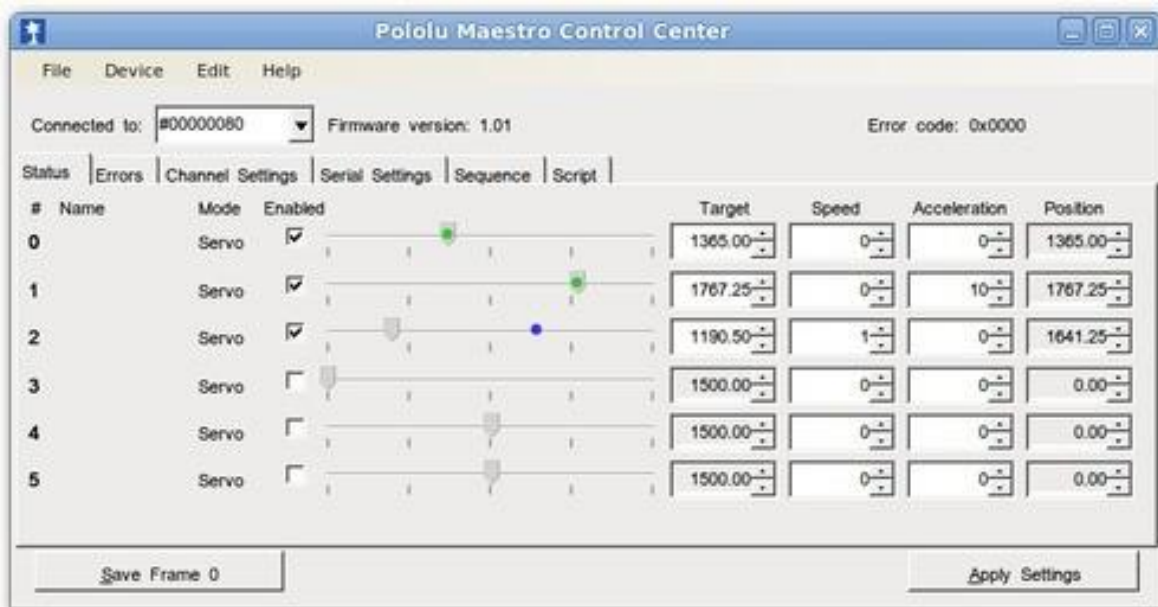
## **b. INSTALACIÓN DE DRIVERS Y SOFTWARE EN LINUX**

Debes descargar el fichero Maestro Servo Controller Linux Software (112k gz) Desempaqueta el archivo tar/gz haciendo “tar -xzf” seguido del nombre del fichero. Después sigue las instrucciones que hay en README.txt y ya podrás ejecutar los programas MaestroControlCenter y UscCmd.

También puedes descargar el código fuente en C# para UscCmd que forma parte del Pololu USB Software Development Kit. Lee README.txt en el SDK para más información.

Los dos puertos serie de Maestro pueden usarse en Linux sin necesidad de instalar drivers. Los puertos son manejados por el módulo kernel *cdc-acm*, cuyo código fuente puede encontrarse en el kernel's source code `drivers/usb/class/cdc-`

acm.c. Cuando conectas Maestro al PC los dos puertos virtuales aparecen y los dispositivos se renombran como /dev/ttyACM0 y /dev/ttyACM1 (el numero dependera de cuantos dispositivos ACM esten conectados). El puerto con numero menor es el Command Port, el de mayor numeracion sera el TTL serie. Puedes usar un Terminal (como kermi) para enviar y recibir bytes por estos puertos.



**Interfaz de Pololu Maestro Control Center en Linux**

## BIBLIOGRAFIA GENERAL.

- [1] Hesse Stefan, *“El músculo neumático y sus aplicaciones”*, Blue Digest on Automation, Festo AG & Co. KG, Esslingen, Alemania, 2003.
- [2] Fundamentos de robótica,  
A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer, R. Aracil  
McGraw Hill, 1997
- [3] Manuel López, Ricardo Beira, Miguel Praca y José Santos. Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal ‘An anthropomorphic robot torso for imitation: design and experiments’. Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 28 – October 2, 2004, sedai, Japan
- [4] Tamim Asfour, Karsten Berns, y Rüdiger Dillmann,  
Forschungszentrum Informatik Karlsruhe, ‘The Humanoid Robot ARMAR: Design and Control’.  
<http://www.ipr.ira.uka.de/asfour/armar>.
- [5] Ulrich Hillenbrand, Bernhard Brunner, Christoph Borst, y Gerd Hirzinger. Institute of Robotics and Mechatronics German Aerospace Center. ‘The Robotler: a Vision-Controlled Hand-Arm System for Manipulating Bottles and Glasses’. 82234 Wessling, Germany,  
[Ulrich.Hillenbrand@dlr.de](mailto:Ulrich.Hillenbrand@dlr.de)
- [6] T. Asfour y R. Dillman, Institute For Process Control And Robotics. La Universidad de Karlsruhe ‘Design and Control Architecture of an Anthropomorphic Robot Arm’. The 1st intern. Workshop on Humanoid Robots and Human Friendly Robots. (IARP’98), Japan, Oct. 1998
- [7] Oliver Kerpa, Dirk Osswald, Sadi Yigit, Catherina Burghart y Heinz Woern, Institute of Process Control and Robotics, University of Karlsruhe, Germany, ‘Arm-Hand-Control by Tactile Sensing for Human Robot Co-operation’. In A. Zelinsky (ed): field and service robotics. Springer, London, 1998, pp. 485 - 492.
- [8] Florent Günter, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, ‘Construction et contrôle d’un bras mécanique pour le robot humanoïde Robota.’ Project de diplôme 2003-2004
- [9] Aaron Edsinger, Massachusetts Institute of Technology, ‘Manipulating Machines: Designing Robots to Grasp Our World’ Proposal for Thesis Research In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
- [10] Matthew M. Williamson, University of Oxford, S.M Massachusetts Institute of

Technology (1995) 'Robot Arm Control Exploiting Natural Dynamics', Submitted to the Department of Electrical Engineering and Computer Science in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

[11] Kazuko Itoh, Hiroyasu Miwa, Munemichi Matsumoto, Massimiliano Zecca, Waseda University, Tokyo Japan, 'Various Emotional Expressions with Emotion Expression Humanoid Robot WE-4RIL'II, IROS 2002, Vol. III pp. 2443 – 2448.

[12] Riichiro Tadakuma, Ichiro Kawabuchi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi, University of Tokyo, 'Mechanism of an Anthropomorphic 7-DOF Slave Arm for Telexistence.' Proc. Int'l Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS'90), pp. 343-348, 1990.

[13] Pedreño J.L., Guerrero A., López J., "*Estudio de los sensores táctiles artificiales aplicados a la robótica de agarre*". Universidad Politécnica de Cartagena. Campus Muralla del Mar. Cartagena (Murcia). España.

[14] <http://www.monografias.com/trabajos57/huellas-lofoscopicas/huellas-lofoscopicas5.shtml>

[15] EDMUND Y S Chao, KAIN-NAN An, COONEY P William y LINSCHIED L Ronald. Biomechanics of the hand. A basic research study: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltda ISBN 9971-50-103-1 1989

[16] HERRERA, Gustavo; CIMADEVILLA, Hernando.  
Tesis: "*Diseño de un sistema articulado emulando el movimiento de una mano*".  
Cenidet, 2006.

[17] <http://www.pololu.com/catalog/category/12>

## PAGINAS WEB.

[@ Basañez]

<http://www.metalunivers.com/1pm/Pm02/Robotica.html>

[@ Brandeis]

<http://www.demo.cs.brandeis.edu/golem>

<http://www.demo.cs.brandeis.edu/golem/simulator/poscilate1.mov>

[@ Manufactura]

<http://www2.ing.puc.cl/icm cursos/procesos/apuntes/cap4/42/421/>

[@ Mecanismos]

[http://webs.demasiado.com/ing\\_industrial/ingenieria/mecanismos/](http://webs.demasiado.com/ing_industrial/ingenieria/mecanismos/)

[@ Motores 98]

<http://www.angelfire.com/sc/felipemeza/pub1.html>

[@ Pérez 01]

<http://www.geocities.com/Eureka/Office/4595/robotica.html>

[@ udlap]

[http://mailweb.udlap.mx/~tesis/razo\\_r\\_af/c2.html](http://mailweb.udlap.mx/~tesis/razo_r_af/c2.html)

[@humadoid].

<http://www.humanoid.waseda.ac.jp>