

PROTOTIPO DE MANO MECATRÓNICA PARA APLICACIONES EN ROBÓTICA INDUSTRIAL

**BRIAN MORENO BETANCUR
ESTEBAN VELÁSQUEZ TORO**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecatrónico**

Daniel Felipe López Montes



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
ENVIGADO
2013**

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas las personas que participaron e hicieron posible este proyecto, muchas gracias por su apoyo y enseñanzas, especialmente a los profesores Daniel Felipe López, Yesid Montoya y Luis Vicente Wilches.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. PRELIMINARES.....	15
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Objetivos del proyecto	17
1.2.1 Objetivo General.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 Marco de referencia.....	17
1.4 Clasificación de los efectores finales	23
1.4.1 Efector final de pinza o dedos mecánicos.....	24
1.4.2 Efector final multiarticulado.....	25
1.4.3 Efector final tipo herramienta.....	25
1.5 Aplicaciones y limitaciones en los efectores finales	25
1.6 Características de la mano humana	26
2. METODOLOGÍA.....	30
2.1 Etapa 1: Diseño de prototipo de mano mecatrónica y guante instrumentado.....	30
2.1.1 Actividad 1: Diseño.....	30
2.1.2 Actividad 2: Diseño a partir de herramientas CAD.....	30
2.1.3 Actividad 3: simulación de circuitos	31
2.1.4 Actividad 4: selección de componentes	31
2.1.5 Actividad 5: Programación de algoritmos de captura de información	32
2.2 Etapa 2: Construcción prototipo de mano Mecatrónica y guante instrumentado	32

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.2.1	Actividad 1: Producción de piezas a usar en el diseño de mano Mecatrónica	32
2.2.2	Actividad 2: Ensamble de los componentes mecánicos y actuadores eléctricos	33
2.2.3	Actividad 3: Ensamble de circuitos	33
2.3	Etapa 3: Evaluación de prototipo de mano Mecatrónica y guante instrumentado	33
2.3.1	Actividad 1: Prueba de ejecución de mandos predefinidos	33
2.3.2	Actividad 2: Prueba de Carga	34
2.3.3	Actividad 3: Prueba de capacidad de control con guante instrumentado	34
2.3.4	Actividad 4: Prueba de batería y resistencia a desgaste	34
2.3.5	Actividad 5: Prueba sobre volúmenes geométricos	34
3.	PROTOTIPO DE MANO MECATRÓNICA PARA APLICACIONES EN ROBÓTICA INDUSTRIAL	35
3.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MANO MECATRÓNICA	35
3.1.1	Diseño conceptual	35
3.1.2	Diseño de detalle	43
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	60
4.1.1	Resultado adicional:	64
5.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	67
	BIBLIOGRAFÍA.....	69
	ANEXO 1. ANÁLISIS ESTÁTICO 1	71
	ANEXO 2. ANÁLISIS ESTÁTICO 2	74
	ANEXO 3. CIRCUITO OPTO-ACOPLADO	76
	ANEXO 4. PRUEBA DE EJECUCIÓN DE MANDOS PREDEFINIDOS	78

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ANEXO 5. PRUEBA DE CARGA	79
ANEXO 6. PRUEBA DE CAPACIDAD DE CONTROL CON GUANTE	84
ANEXO 7. PRUEBA DE CAPACIDAD DE CONTROL INALÁMBRICAMENTE.....	85
ANEXO 8. PRUEBA SOBRE VOLÚMENES GEOMÉTRICOS.....	87
ANEXO 9. PRUEBA EN ROBOT ABB IRB 140	88

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Identificación e interpretación de necesidades.....	36
Tabla 2. Alternativas de solución para las sub-funciones.....	38
Tabla 3. Combinación de conceptos de solución.	39
Tabla 4. Criterios de Selección.	41
Tabla 5. Matriz de Selección.....	41

LISTA DE FIGURAS

	pág.
<i>Figura 1 Mano Robótica Stanford-JPL</i>	19
<i>Figura 2 Mano Robótica UTAH-MIT</i>	20
<i>Figura 3 Mano Robótica DLR-Hand II</i>	21
<i>Figura 4 Mano Robótica GIFU HAND II</i>	22
<i>Figura 5 Fisiología de una Mano Humana</i>	28
<i>Figura 6 Logos herramienta software</i>	30
<i>Figura 7 Arduino UNO</i>	31
<i>Figura 8 Shield Bluetooth Arduino</i>	32
<i>Figura 9 Caja negra de la mano mecatrónica</i>	36
<i>Figura 10 Caja transparente de la mano mecatrónica</i>	37
<i>Figura 11. Diseño Mano Mecatrónica</i>	43
<i>Figura 12 Diseño Mano Mecatrónica</i>	44
<i>Figura 13 Diseño Mano Mecatrónica</i>	44
<i>Figura 14 Diseño Mano Mecatrónica</i>	45
<i>Figura 15 Diseño Mano Mecatrónica</i>	45
<i>Figura 16 Diseño Mano Mecatrónica</i>	46
<i>Figura 17 Simulación del resorte</i>	46
<i>Figura 18 Simulación del resorte</i>	47
<i>Figura 19 Fuerzas ejercidas sobre la mano</i>	48
<i>Figura 20 Fuerzas ejercidas sobre el triángulo soporte</i>	49

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

<i>Figura 21 Fuerzas ejercidas sobre el triángulo soporte (vista cercana)</i>	50
<i>Figura 22 Fuerzas y restricciones aplicadas sobre palma</i>	51
<i>Figura 23 Fuerzas y restricciones aplicadas sobre triángulos soporte</i>	52
<i>Figura 24 Desplazamiento máximo en deformación encontrado en palma</i>	53
<i>Figura 25 Desplazamiento máximo en deformación de triángulos de soporte</i>	54
<i>Figura 26 Esfuerzo máximo encontrado en palma</i>	55
<i>Figura 27 Esfuerzo máximo en triángulos de soporte</i>	56
<i>Figura 28. Circuito Arduino UNO</i>	57
<i>Figura 29. Circuito Arduino MEGA</i>	57
<i>Figura 30. Circuito del opto-acoplador</i>	58
<i>Figura 31 Prototipo mano mecatrónica construida</i>	60
<i>Figura 32 Guante instrumentado construida</i>	61
<i>Figura 33 Diagrama de comunicación Bluetooth Arduino Bluetooth Arduino</i>	65
<i>Figura 34 Montaje de la comunicación</i>	66
<i>Figura 35 Sistemas y ejes mano robótica.</i>	71
<i>Figura 36 Ángulos de estudio.</i>	71
<i>Figura 37 Sistema al flexionar la mano.</i>	74
<i>Figura 38 Simulación en Proteus del Circuito opto-acoplado</i>	76
<i>Figura 39 Tarjeta diseñada del circuito opto-acoplado</i>	77
<i>Figura 40 Montaje de la tarjeta diseñada</i>	77
<i>Figura 41 . Prueba de ejecución de mandos predefinidos</i>	78
<i>Figura 42 Prueba de peso con un gancho</i>	80
<i>Figura 43 Prueba de peso con dos ganchos</i>	81

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

<i>Figura 44</i> Peso resistido	82
<i>Figura 45</i> Prueba de carga máxima.....	82
<i>Figura 46</i> Prueba de resistencia de la mano.....	83
<i>Figura 47</i> Peso máximo probado.....	83
<i>Figura 48</i> Prueba de capacidad de control con guante.....	84
<i>Figura 49</i> Pantalla del programa realizado en el celular.....	85
<i>Figura 50</i> Prueba de capacidad de control inalámbricamente.....	86
<i>Figura 51</i> Prueba sobre volúmenes geométricos.....	87
<i>Figura 52</i> Prueba en Robot ABB IRB 140.....	88

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO 1. Análisis estático 1.....	71
ANEXO 2. Análisis estático 2.....	74
ANEXO 3. Circuito opto-acoplado.....	76
ANEXO 4. Prueba de ejecución de mandos predefinidos	78
ANEXO 5. Prueba de carga.....	79
ANEXO 6. Prueba de capacidad de control con guante.....	84
ANEXO 7. Prueba de capacidad de control inalámbricamente	85
ANEXO 8. Prueba sobre volúmenes geométricos.....	87
ANEXO 9. Prueba en robot Abb irb 140.....	88

RESUMEN

Una de las principales limitaciones que presentan los brazos robóticos industriales está directamente relacionada con el uso de múltiples efectores finales, los cuales se deben intercambiar para poder ejecutar diferentes tareas. Por lo anterior, el presente trabajo expone el desarrollo de un prototipo de elemento terminal, tipo mano mecatrónica, el cual puede ser implementado como efector final genérico en tareas de manipulación. El prototipo construido permite manipular diferentes volúmenes geométricos, emulando en sus movimientos básicos la mano humana. Además, éste puede ser operado por un guante instrumentado e inalámbricamente.

Palabras clave: Efector final, mano mecatrónica, brazo robótico, guante instrumentado, bluetooth.

ABSTRACT

One of the principal limitations of industrial robots is directly related with the use of multiple final effectors, which are exchanged regularly in order to execute different tasks with the same robot. Considering the lost time while changing final effectors, this work is focused on the development of a final effector prototype of the mechatronic hand type, which could be used as a generic final effector on manipulating tasks. The prototype will permit the manipulation of different geometric volumes, emulating the human hand's basic movements, which are operated by an instrumented glove or wirelessly through an android device.

Key words: Final effector, mechatronic hand, industrial robot, instrumented glove, bluetooth

:

INTRODUCCIÓN

Una de las causas por las cuales el ser humano puede realizar diferentes actividades con gran habilidad, se debe a la capacidad de maniobrabilidad que ejerce con el uso de la mano, puesto que con ésta, se puede agarrar, sostener y manipular objetos con gran destreza, haciendo de ella, una herramienta importante en el desempeño de las tareas del diario vivir.

Por lo anterior, lo que se pretende con este proyecto es diseñar y construir un prototipo de mano mecatrónica, con el fin de emular la mano humana en su capacidad de manipulación de diferentes objetos, de tal manera que ésta pueda ser utilizada como *gripper* en robots industriales; buscando así contrarrestar las limitantes que actualmente presentan este tipo de mecanismos, principalmente en el uso de diferentes herramientas, según la tarea a realizar.

Para lograr este propósito se partió del diseño de concepto, y con éste, se identificaron los mecanismos que componen la mano, con el objetivo de dotar al sistema de los elementos idóneos para ejecutar los movimientos deseados. Seguidamente, se realizó el diseño estructural del sistema, a partir de herramientas CAD y tomando como modelo dimensional una mano humano real. Finalizando este proceso, se construyó el sistema, teniendo en cuenta los anteriores elementos.

Adicionalmente a lo descrito, y con el propósito de dotar al sistema de mayor autonomía, se diseñó e implementó un guante instrumentado para operar la mano mecatrónica y además se desarrolló una metodología para operar el sistema de manera inalámbrica.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Por último se realizaron pruebas para evaluar el desempeño y respuesta del prototipo, mediante la capacidad de manipulación de diferentes volúmenes geométricos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, la robótica ya no es vista como una invención ficticia de la imaginación de algunos escritores, sino como una realidad imprescindible en el presente mercado productivo (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 2007), tanto es así que la robótica industrial se considera, hoy en día, como una de las más relevantes áreas de investigación y del desarrollo tecnológico (Olier Caparroso, Avilés, & Hernández Bello, 1999). Lo anterior debido a que, los últimos avances en las ramas de la ingeniería, como lo son: la mecánica, la electrónica, el control, la informática y por ende la mecatrónica, han llevado a que la evolución de esta área sea cada vez más acelerada (Bolton, 2010).

La robótica industrial, se puede definir como el estudio, diseño, fabricación y utilización de robots en los procesos de manufactura (Nof, 1999). En efecto, el término robot industrial es definido por la RIA (Robot Institute of America) como:

“Un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variadas, programadas para realizar diferentes trabajos” (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 2007).

Por consiguiente, se puede entender por robot industrial como aquél brazo mecánico que posee la capacidad de manipulación y el cual incorpora para su funcionamiento un sistema de control.

En general, un robot industrial está constituido por los siguientes elementos: estructura mecánica, transmisiones, sistema de accionamiento, sistema sensorial, sistema de control y elementos terminales (Nof, 1999).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Los elementos terminales, también llamados efectores finales (*“end effector”*) o *gripper*, se encargan de la interacción directa con el entorno del robot. En algunos casos, estas piezas terminales pueden ser elementos de aprehensión y en otros herramientas (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 2007). Generalmente, un robot industrial posee una naturaleza versátil y readaptable, permitiéndole acoplarse en diferentes aplicaciones y superficies. No obstante, estas propiedades no son reproducibles en los efectores finales, ya que en la mayoría de los casos, aquellos son diseñados específicamente para un trabajo determinado (Olier Caparros, Avilés, & Hernández Bello, 1999).

En este sentido, los efectores finales presentan algunos limitantes, ya que su geometría y peso es variante según la tarea que se le asigne, puesto que por una parte, si se tiene en cuenta que las condiciones de operación no son constantes, aquellas diferirán de las óptimas, dificultando, por ende, la selección del elemento terminal (Hesse, 2004); por otro lado, las pinzas comerciales, en muchas ocasiones, no son adecuadas para el trabajo deseado. Es por eso que en los actuales procesos industriales se hace necesario diseñar y desarrollar un *gripper* especial que permita ejecutar tareas específicas, las cuales requieran precisión y/o fuerza; contando con la flexibilidad suficiente, de manera que pueda manipular cualquier objeto, indistintamente de su tamaño, peso y forma.

Por ésta razón, se han venido incorporando manos robóticas, como elementos terminales de manipuladores robóticos en los procesos industriales, con el objetivo de realizar tareas más precisas y con una mayor destreza, emulando las funciones de la mano humana; ya que esta, debido a sus características, es capaz de sujetar y manipular objetos con formas y tamaños diferentes, la cual proporciona, además, la posibilidad de ejecutar movimientos de fuerza y precisión estables y con gran destreza (Caffaz, Casalino, Cannata, Panin, & Massucco, 1998). Esta forma de

construcción de los efectores finales posibilita al sistema de tener una mejor precisión y destreza en el manejo de diversos objetos.

Por lo descrito anteriormente, se hace necesario el diseño de un prototipo de mano mecatrónica que emule la mano humana en sus movimientos básicos, principalmente en su capacidad de maniobrabilidad y agarre de algunos objetos, la cual pueda ser utilizada como elemento terminal en robots industriales.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Diseñar y construir un prototipo de mano mecatrónica, controlada por un guante instrumentado, a fin de probar su capacidad de maniobrabilidad y agarre en volúmenes geométricos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un prototipo de mano mecatrónica mediante simulación por elementos finitos y un circuito de adquisición y transmisión de datos.
- Construir un prototipo de mano mecatrónica, operada mediante comunicación inalámbrica y por medio de un guante instrumentado.
- Evaluar el desempeño y respuesta del prototipo de mano mecatrónica construida mediante la capacidad de agarre de diferentes volúmenes geométricos.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

Los manipuladores robóticos industrial son dispositivos los cuales imita los movimientos del brazo, para que estos sean capaces de realizar los diversos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

trabajos asignados, deben contar con un efector final (Nof, 1999). Los efectores finales son los encargados de ejecutar las tareas asignadas al brazo robótico y debido a las diversas actividades establecidas por los robots, los elementos terminales adoptan un variedad de formas diferentes, esto produce que sea necesario adecuarlo según la operación a realizar (Olier Caparroso, Avilés, & Hernández Bello, 1999).

Muchos investigadores han analizado diferentes tipos de mecanismos los cuales ayuden a llevar a cabo la manipulación y sujeción de objetos tomando como ejemplo el agarre humano, por poseer una gran flexibilidad y destreza. Actualmente son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales los efectores finales que poseen dos dedos o pinzas, pero se están desarrollando dispositivos robóticos con múltiples dedos (Ceccarelli, Nava, Jáuregui, Parada, & Carbone, 2004).

Se han realizado investigaciones y trabajos relacionados con manos robóticas de múltiples dedos, que van desde los mecanismo más esenciales, como los de cuatro barras, la combinación de polea y banda, los de cadenas cinemáticas abiertas, hasta los mecanismos sub-actuados y con un control sofisticado (Lee & Tsai, 2002). Entre los trabajos más relevantes vale la pena resaltar los siguientes:

En 1957 Frank Skinner, desarrolla una mano mecánica basada en el modelo de la mano humana, este diseño sujetaba objetos con formas básicas como triangulares, rectangulares, cilíndricos y esféricos, también definió las seis formas básicas de agarre: Palmar, Lateral, Cilíndrico, Esférico, Puntual y de gancho (Nof, 1999).

En 1982 fue diseñado la mano robótica *Stanford-JPL*, la cual posee seis grados de libertad, para brindarle precisión cada dedo cuenta con articulaciones actuadas por alambres, recubiertos de teflón, y además posee cuatro servomotores para dar movimiento a cada dedo (Brock, 2005)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

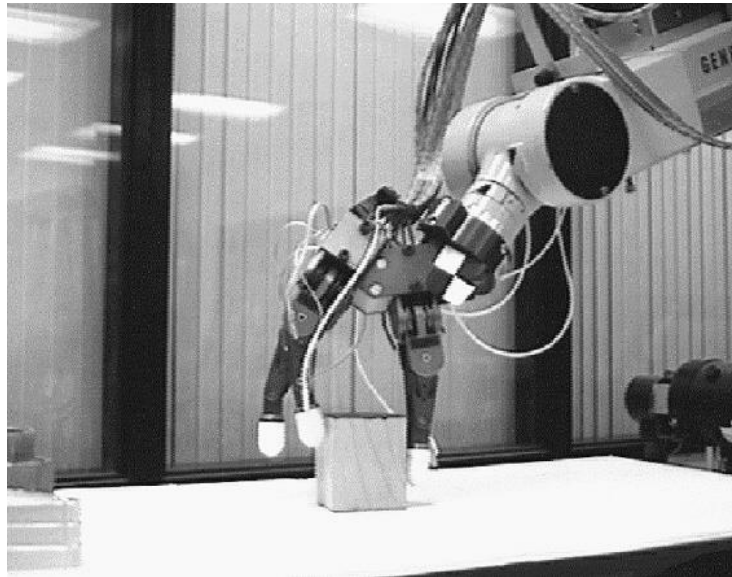


Figura 1 Mano Robótica Stanford-JPL

Tomado de: <http://www.davidbuckley.net/RS/HandResearch.htm>

En 1984 fue desarrollada la mano robótica *UTAH-MIT*, la cual cuenta con características antropomórficas parecidas a las de la mano humana, este modelo permite una manipulación bastante precisa de los objetos, debido a las articulaciones que posee las cuales funcionan con ayuda de un par de tendones los cuales son operados por un cilindro neumático, esta mano posee tres dedos y un pulgar y cada dedo tiene cuatro grados de libertad (Brock, 2005).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Figura 2 Mano Robótica UTAH-MIT

Tomado de: <http://www.computerhistory.org/collections/accession/102693567>

En 1998, fue presentado el diseño de una mano robótica multiarticulada con cuatro dedos, semi-antropomórfica llamada *DLR-Hand*, esta posee sensores de torque, fuerza y posición en cada uno de sus dedos (Butterfass, Hirzinger, Knoch, & Liu, 1998). En el año 2001, son presentadas las mejoras realizadas al diseño de la mano *DLR-Hand*, la cual recibió el nombre de *DLR-Hand II*, en este se implementa una estructura denominada “Esqueleto Abierto”, la cual brinda un mejor acceso a los circuitos, mecanismos y sensores de la mano, en esta la palma está equipada con actuadores más poderosos y con sensores de fuerza y torque de 6 grados de libertad en cada dedo. (Butterfass, Grebenstein, Liu, & Hirzinger, 2001)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Figura 3 Mano Robótica DLR-Hand II

Tomado de: <http://www.service-robots.org/technologies.htm>

En el año 2001 se presenta el desarrollo de la mano *Gifu Hand*, esta tiene cinco dedos multiarticulados, los cuales son actuados por medio de servomotores instalados en las articulaciones de ellos, la mano robótica posee con 20 articulaciones y 16 grados de libertad, los dedos están sub-actuados, también cuenta con un sensor de fuerza y torque montado en cada yema y un encoder magnético en cada articulación. Al año siguiente se presenta la mejora de este diseño con la mano *GIFU HAND II*, la cual cuenta con cuatro dedos y un pulgar, todas estas articulaciones son actuadas por servo motores, adicionalmente está equipada con sensores de fuerza y un arreglo matricial de sensores táctiles con 624 puntos de detección ubicados en la superficie de la palma (Kawasaki, Komatsu, & Uchiyama, 2002).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

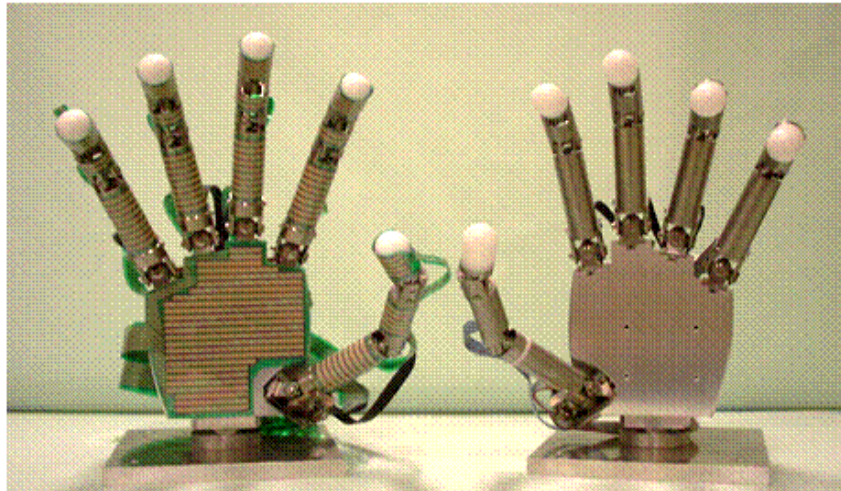


Figura 4 Mano Robótica GIFU HAND II

Tomado de: http://www.rsj.or.jp/rij_e/?page_id=73

Entre los últimos avances presentados en este tipo de sistemas vale la pena resaltar, que estos se centran en la inteligencia artificial y la cognitiva, lo que está permitiendo que los sistemas robóticos sean más sofisticados, haciendo que el comportamiento, habilidad y capacidad tanto de agarre como de movilidad sea cada vez más similar al humano, es por esto, que estos nuevos sistemas son conocidos como biomiméticos y bioinspirados (Mattar, 2013). También se están desarrollando modelos que permiten comprender de mejor manera el agarre característico de la mano y esto ha permitido desarrollar algoritmos de control que permiten regular la fuerza de compresión que se debe ser proporcionada por cada dedo para lograr un agarre firme en condiciones tanto estáticas como dinámicas (Carbone & González, 2011).

Las manos robóticas actualmente diseñadas están siendo equipadas con gran cantidad de sensores táctiles de alta precisión, los cuales son distribuidos por todo el sistema de tal manera que puedan proporcionar continuamente información sobre la magnitud y dirección de las fuerzas en los puntos de contacto entre el *gripper* y

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

el objeto con que se está interactuando (Yousef, Boukallel, & Althoefer, 2011). Adicionalmente se están desarrollando prototipo de manos tele-operadas por medio de guantes maestros, las cuales se operan inalámbricamente (Zaid & Yaqub, 2012).

Actualmente los manipuladores robóticos son ampliamente utilizados en los procesos industriales. Entre las tareas más comunes que éstos ejecutan se encuentran, entre otras, el manejo de objetos calientes, peligrosos, muy pesados o en procesos monótonos (Bolton, 2010). Es de gran importancia en el momento de diseñar este tipo de sistemas que posean arquitectura abierta o modular, con el fin de que presenten adaptabilidad y de esta manera los robots podrán realizar tareas de campo variadas (Simanca, Aviles, & Calle, 2005). Para ejecutar de manera óptima las anteriores actividades, los manipuladores robóticos cuentan con un *gripper* o efector final, el cual es el encargado de ejecutar las tareas designadas (Boubekri & Chakraborty, 2002).

1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS EFECTORES FINALES

Es considerado como efector final a todo elemento que se fija al final del brazo manipulador en un robot industrial, el cual se emplea como herramienta en la ejecución de las tareas. Los efectores finales en general se clasifican en Herramientas y Pinzas (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 2007).

Las pinzas son utilizadas para tomar un objeto, que por lo general es la pieza de trabajo y es sujeta durante el ciclo de operación del robot. Existen diversos métodos de sujeción adicional a los mecánicos de agarre entre dos o más dedos, estos métodos suplementarios son; el manejo de boquillas de sujeción, imanes, ganchos y cucharas (Simanca, Aviles, & Calle, 2005).

Las herramientas son utilizadas como efector final en aplicaciones en las cuales el robot realiza algunas operaciones sobre la pieza de trabajo. Entre las aplicaciones más comunes se encuentran; la soldadura por puntos, la soldadura por arco, la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

pintura por pulverización y las operaciones de taladro, por mencionar algunas, en estos casos, la herramienta se une a la muñeca del robot para que este realice la operación (Simanca, Aviles, & Calle, 2005).

1.4.1 Efecto final de pinza o dedos mecánicos.

Los efectores finales de sujeción son utilizados para; agarrar, sostener y colocar los objetos a manipular, en la posición y la orientación adecuada para el trabajo, a este tipo de efectores finales se le conoce como efectores de pinzas. Estos se pueden clasificar de acuerdo al tipo de agarre y al sistema de sujeción que se emplea, enfatizando principalmente en los que emplean mecanismos para el agarre y los que utilizan algún otro tipo de sujeción (ventosas, elementos magnéticos, adhesivos, ganchos, entre otros), también son ampliamente utilizados los accionamientos de eléctricos (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 2007).

En las pinzas generalmente se sitúan sensores los cuales detectan el estado en que se encuentra esta (abierto o cerrado), adicionalmente se pueden incorporar otro tipo de sensores los cuales permitan controlar el estado de la pieza manipulada y también se pueden adicionar sistemas de visión, detectores de proximidad, sensores fuerza, entre otros (Olier Caparroso, Avilés, & Hernández Bello, 1999).

En la elección o diseño de una pinza se debe tener en cuenta diversos factores, como el tipo de objeto a sujetar y la operación a realizar, considerando el peso, la forma, el tamaño del objeto y la fuerza necesaria para sostenerlo firmemente (Boubekri & Chakraborty, 2002). Se han diseñado elementos comerciales los cuales son utilizados como base y de esta manera a partir de ellos construir efectores para cada aplicación concreta, sin embargo, en muchas otras aplicaciones el efector debe ser desarrollado íntegramente (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 2007).

Entre los efectores finales de pinza más comunes, se encuentran los de dedos angulares o paralelos (Simanca, Aviles, & Calle, 2005). El efector final de dos dedos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

es utilizado para la sujeción de piezas huecas o sólidas. Las pinzas con tres dedos se asemejan a las funciones que realizan el dedo pulgar, el índice y el medio. El efector final con cuatro dedos, es de gran utilidad en la sujeción de piezas cuadradas (Boubekri & Chakraborty, 2002).

1.4.2 Efector final multiarticulado.

La complejidad de los movimientos hechos por la mano de la especie humana, la cual se trata de emular en este tipo de efectores, hace más complejo el diseño de estos ya que se requiere un alto grado de precisión, por ejemplo para lograr controlar la fuerza necesaria a la hora de manipular objetos frágiles, esto se logra por medio de complejas configuraciones de sensores de presión, proximidad y micro-controladores (Brock, 2005).

1.4.3 Efector final tipo herramienta.

En muchas ocasiones, el robot realiza operaciones las cuales no están relacionadas directamente con la manipulación de objetos, sino con el uso de una herramienta, por ejemplo cuando se requiere que un robot realice soldadura por puntos, soldadura por arco, pintura por pulverización, husillos giratorios para operaciones tales como: taladrado, ranurado, cepillado y rectificado, aplicaciones de pegamento para montaje de partes, sopletes de calentamiento, herramienta de corte por chorro de agua, entre otras (Nof, 1999).

1.5 APLICACIONES Y LIMITACIONES EN LOS EFECTORES FINALES

Los parámetros principales que deben ser considerados a la hora de realizar el diseño de un efector final tipo pinzas, comprende dos partes importantes: el objeto a manipular y el método de agarre (Hesse, 2004).

Entre los parámetros del objeto que deben ser considerados se encuentran: la masa, la forma, las dimensiones y la tolerancias, la posición del centro de gravedad,

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

estabilidad, propiedades superficiales, material, rigidez y temperatura (Hesse, 2004).

Entre los datos necesarios para determinar el método de agarre de la pinza deben incluirse los propios errores de posicionamiento, aceleración de los ejes y condiciones de conexión. Adicionalmente se deben tener en cuenta los parámetros relacionados con el espacio de trabajo, es decir el espacio disponible para el agarre, las condiciones de asentamiento, la suciedad, humedad y vibraciones, que puedan existir en el momento en el que el manipulador realiza el trabajo (Hesse, 2004).

Por otra parte, para la selección o diseño de un efector final se debe de tener en cuenta que generalmente no es posible sujetar una pieza por todos sus lados; por ejemplo, podría ser necesario evitar palpar superficies que posean mecanizados de precisión, adicionalmente en una secuencia de alimentación específica para una máquina herramienta podría también imponer limitaciones en la selección. La fuerza de sujeción aplicada a las piezas manipuladas representa otra limitación en la selección de las pinzas, puesto que hay muchas piezas las cuales no soportan la fuerza necesaria y sufrirían daños, o piezas que están pulidas, o de pared delgada, blandas, frágiles o con acabados finísimos la cuales pueden sufrir daños durante el agarre, especialmente si son manipuladas con pinzas cuya sujeción supone una carga puntual (Hesse, 2004).

1.6 CARACTERÍSTICAS DE LA MANO HUMANA

El uso principal de las manos es tomar y sostener objetos, aunque de éstos usos se derivan muchos otros, dada la gran versatilidad de los movimientos que realiza la mano; además de la precisión que se alcanza con los mismos. (Portilla Flores, Avilés Sánchez, Piña Quintero, Niño Suárez, Moya Sánchez, & Molina Vilchis, 2010). En efecto, la mano humana puede maniobrar en muchas posiciones, y para

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

lograr aquello, cuenta con la destreza de los dedos y la habilidad de la muñeca para acomodarla en la posición deseada (Quiroz Gutiérrez, 1962).

Desde una perspectiva netamente anatómica, la mano y la muñeca se componen de veintisiete (27) huesos, de los cuales catorce (14) son falanges en los dedos, cinco (5) metacarpianos en el área de la palma y ocho (8) carpos en la muñeca (Quiroz Gutiérrez, 1962), tal y como se observa en la Figura 5.

Por estas características, la mano humana es considerada como un instrumento de instrumentos (Hernández Santos & Montoya Mejía, 2007), toda vez que la mano humana cuenta con una estructura compleja de veintiún (21) grados de libertad (GDL), repartidos de la siguiente manera: los dedos tienen tres (3) falanges y cuatro (4) grados de libertad; dos (2) de ellos en su articulación con la palma (llamada metacarpo-falangeal, ya que articula la falange proximal con el hueso metacarpiano) y los otros dos (2) del movimiento entre la falange media y distal, y cinco (5) GDL para el pulgar que tiene dos (2) falanges y un (1) metacarpo (Portilla Flores, Avilés Sánchez, Piña Quintero, Niño Suárez, Moya Sánchez, & Molina Vilchis, 2010), como se puede observar en la Figura 5.

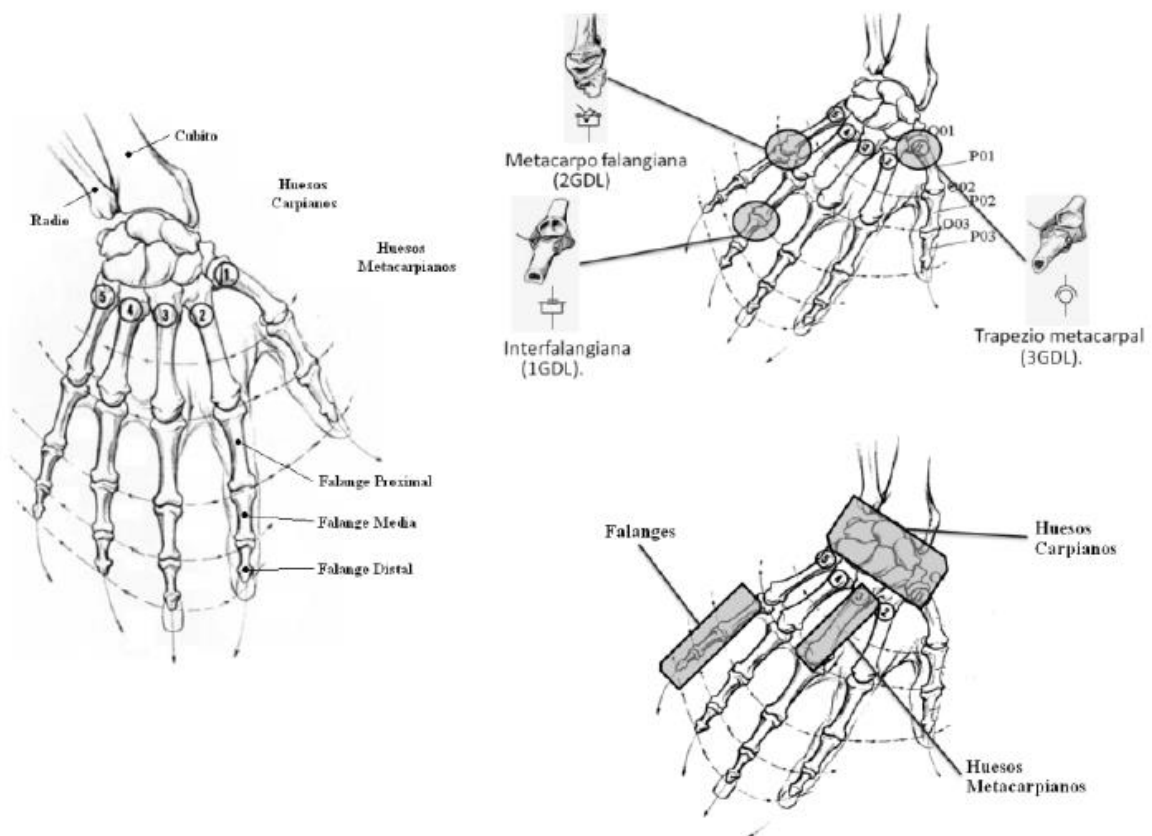


Figura 5 Fisiología de una Mano Humana

Tomado de: http://www.umng.edu.co/documents/63968/74763/Vol20_1art_4.pdf

La mano humana realiza tres (3) funciones esenciales, de las cuales deriva su agilidad, a saber:

- **Pronación y supinación:** Son los movimientos del antebrazo que tienen como efecto, lograr que la mano realice la rotación de afuera hacia adentro, y contribuyen a colocar la mano con la palma hacia arriba y el pulgar hacia afuera. Estos movimientos adaptan la mano a cualquier circunstancia (Quiroz Gutiérrez, 1962). Esta función no es muy relevante en la tarea de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

manipulación de objetos (Portilla Flores, Avilés Sánchez, Piña Quintero, Niño Suárez, Moya Sánchez, & Molina Vilchis, 2010).

- **Flexión y cierre de los dedos:** Esta capacidad posibilita realizar una gran variedad de tareas; este movimiento es muy importante para atrapar objetos y mantenerlos con seguridad (Hernández Santos & Montoya Mejía, 2007).
- **Oposición del dedo pulgar:** Situado al frente de la palma y de los demás dedos, permite múltiples ajustes para la manipulación de diversos objetos (Hernández Santos & Montoya Mejía, 2007).

Teniendo en cuenta lo anterior, la destreza que posee la mano humana para realizar algunas tareas, permite concluir que son difíciles o imposibles de ser simularlas en una máquina, por ejemplo, el movimiento de tomar y manipular un objeto es una actividad al parecer, natural y simple, puesto que la logramos realizar sin esfuerzo; pero es en realidad una tarea difícil de implementar en un manipulador robótico, ya que se requiere una gran cantidad de articulaciones, para darle versatilidad a éste, de tal manera que logre moverse como las falanges de los dedos humanos (Hernández Santos & Montoya Mejía, 2007).

2. METODOLOGÍA

2.1 ETAPA 1: DISEÑO DE PROTOTIPO DE MANO MECATRÓNICA Y GUANTE INSTRUMENTADO

2.1.1 Actividad 1: Diseño

Esta actividad tiene como objetivo realizar los diseños mecánicos y electrónicos generales apropiados basados en bosquejos, teniendo en cuenta características mecánicas como esfuerzos sobre los materiales, resistencia, etc. Como también conceptos electrónicos como la potencia a usar, baterías a usar, protecciones al circuito, etc.

2.1.2 Actividad 2: Diseño a partir de herramientas CAD

Esta actividad tiene como objetivo realizar los diseños CAD y su respectiva simulación del sistema mecánico, utilizando las herramientas SOLID-EDGE y ALGOR (Multiphysics), y de este modo lograr un modelamiento de elementos finitos de esfuerzos mecánicos, deformaciones plásticas de los materiales, y fuerzas máximas soportadas por el sistema.



Figura 6 Logos herramienta software.

Tomado de: <http://dsdtelectro.blogspot.com/2009/11/>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.1.3 Actividad 3: simulación de circuitos

Esta actividad tiene como objetivo simular los circuitos implementados en el sistema utilizando la herramienta PROTEUS, logrando de este modo una simulación adecuada de los circuitos de control y de comunicación dentro del sistema mecatrónico.

2.1.4 Actividad 4: selección de componentes

Esta actividad tiene como objetivo la identificación de los componentes electrónicos existentes en el mercado y los materiales de construcción a usar; la selección se hará a partir de las características más adecuadas para lograr una óptima integración ente los dispositivos mecánicos y los componentes de control de señales.

Estos componentes incluyen dispositivos como:

- Arduino (UNO): Por su versatilidad, facilidad de uso y relativo bajo costo como plataforma de desarrollo.



Figura 7 Arduino UNO

Tomado de: <http://dsdtelectro.blogspot.com/>

- Shields: el ArduMoto permite la implementación de motores DC de máximo 18 V-1A, controlando tanto su sentido de giro como la magnitud de su velocidad.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

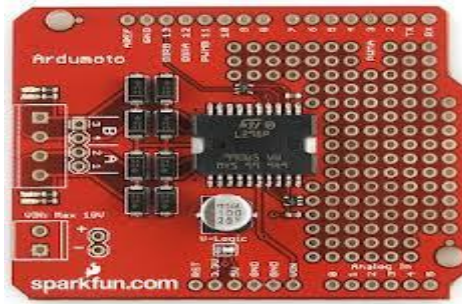


Figura 8 Shield Bluetooth Arduino.

Tomado de: <http://dsdtelectro.blogspot.com/>

- ServoMotores y Motores DC, el primero por su facilidad de control de posición y fuerza (debido a su sistema de reducción interna), y el segundo por su economía y versatilidad al usarse con el Shield ArduMotor.
- Circuitos Shield creados a la medida para garantizar la fiabilidad de las señales, como la protección del controlador usado.
- Módulo bluetooth BlueSmirf Gold, por ser una solución de relativo bajo costo, fácil implementación y comprobada durabilidad y confiabilidad a la hora de enviar datos inalámbricamente.

2.1.5 Actividad 5: Programación de algoritmos de captura de información

Se crearán los algoritmos que controlaran los actuadores eléctricos ubicados en la mano mecatrónica. Estos algoritmos tendrán como entrada el agarre deseado, y su respuesta será ejecutar los comandos recibidos.

2.2 ETAPA 2: CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO DE MANO MECATRÓNICA Y GUANTE INSTRUMENTADO

2.2.1 Actividad 1: Producción de piezas a usar en el diseño de mano

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Mecatrónica

Teniendo en cuenta los diseños mecánicos realizados en la etapa 1, se procede a crear estas piezas creando un archivo que contenga todos los datos geométricos asociados al diseño, y luego se procederá a utilizar una máquina herramienta de corte por láser para sacarlos en el material elegido.

2.2.2 Actividad 2: Ensamble de los componentes mecánicos y actuadores eléctricos

Se ensamblaran las piezas a utilizar basándose en el modelo CAD previamente realizados. El acople será realizado con cianoacrilato y nylon trenzado. Sobre los lugares pertinentes se colocaran los actuadores eléctricos que le darán el movimiento a la mano mecatrónica. También se fijaran los sensores y el módulo de comunicación al guante instrumentado.

2.2.3 Actividad 3: Ensamble de circuitos

Se fabricara el PCB de los circuitos diseñados, y se les soldara los componentes. Estos circuitos cumplen la tarea de dar potencia a los actuadores, como también proteger los componentes de procesamiento de señal.

2.3 ETAPA 3: EVALUACIÓN DE PROTOTIPO DE MANO MECATRÓNICA Y GUANTE INSTRUMENTADO

2.3.1 Actividad 1: Prueba de ejecución de mandos predefinidos

Se evaluara la capacidad de la mano mecatrónica para ejecutar comandos predefinidos, los cuales permitirán comprobar los movimientos básicos que podrá realizar el prototipo y ejecutando fielmente las instrucciones introducidas en el programa

2.3.2 Actividad 2: Prueba de Carga

Se evaluará la capacidad de carga de la mano mecatrónica, usando el agarre y estando perpendicular al piso.

2.3.3 Actividad 3: Prueba de capacidad de control con guante instrumentado

Se evaluará la fidelidad de los movimientos basados en el guante instrumentado y su respectiva certeza en el elemento final de control.

2.3.4 Actividad 4: Prueba de batería y resistencia a desgaste

Se ejecutarán las pruebas realizadas en la actividad 1 por un tiempo prolongado, hasta que la batería de alarma de estar bajando su nivel de voltaje. Al mismo tiempo se analizará la capacidad de la mano de realizar movimientos repetitivos durante un tiempo considerable. Se considerarán varios ciclos en la prueba, para garantizar un número significativo de repeticiones.

2.3.5 Actividad 5: Prueba sobre volúmenes geométricos

Se utilizará la tecnología del guante instrumentado para probar la capacidad de agarre de la mano robótica al coger diferentes volúmenes geométricos.

3. PROTOTIPO DE MANO MECATRÓNICA PARA APLICACIONES EN ROBÓTICA INDUSTRIAL

3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MANO MECATRÓNICA

3.1.1 Diseño conceptual

Para desarrollar el proyecto objeto de análisis, se parte de unos supuestos iniciales los cuales corresponden a las necesidades básicas del sistema, los cuales son:

- Sistema que emule los movimientos básicos de la mano humana.
- El sistema debe tener un buen agarre y maniobrabilidad, para manipular diferentes volúmenes geométricos.
- Los componentes utilizados en la construcción del sistema deben ser económicos.
- El sistema debe ser maniobrado por un guante instrumentado.
- La manipulación del sistema debe hacerse de forma inalámbrica y la respuesta debe ser rápida.

A partir de las necesidades, se obtienen las especificaciones de diseño básicas para la mano mecatrónica, las cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Identificación e interpretación de necesidades.

Número de Necesidad	Interpretación	Importancia
1	Se debe diseñar un mecanismo con varios grados de libertad de movimiento, que emule la mano humana.	5
2	Los actuadores utilizados en el sistema deben poseer buena potencia y velocidad de respuesta.	5
3	Los componentes a utilizar serán escogidos de acuerdo a su precio.	3
4	Instrumentación por medio de los sensores adecuados de un guante para la manipulación del sistema.	4
5	La comunicación debe ser inalámbrica y debe poseer una buena velocidad.	3

A partir de los requerimientos anteriores, se construye el diagrama de caja negra de la mano mecatrónica, el cual se muestra en la Figura 9.



Figura 9 Caja negra de la mano mecatrónica.

De la Figura 9, se extraen las señales de energía, materia y señal que entran y salen del sistema. Para este caso en particular no existe transformación de materia, por lo tanto se omite este análisis.

- **Electricidad:** esta señal corresponde a la energía requerida para el funcionamiento del sistema en su totalidad.
- **Señal de Activación:** Se entenderá como los comandos de movimiento enviados al sistema.

De la Figura 8, también se extraen la correspondiente salida la cual es la siguiente:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- **Movimiento del sistema:** corresponde al movimiento que realizara el sistema.

Para entender mejor el funcionamiento de la mano mecatrónica, se procede a la construcción de la caja transparente la cual se muestra en la Figura 10.

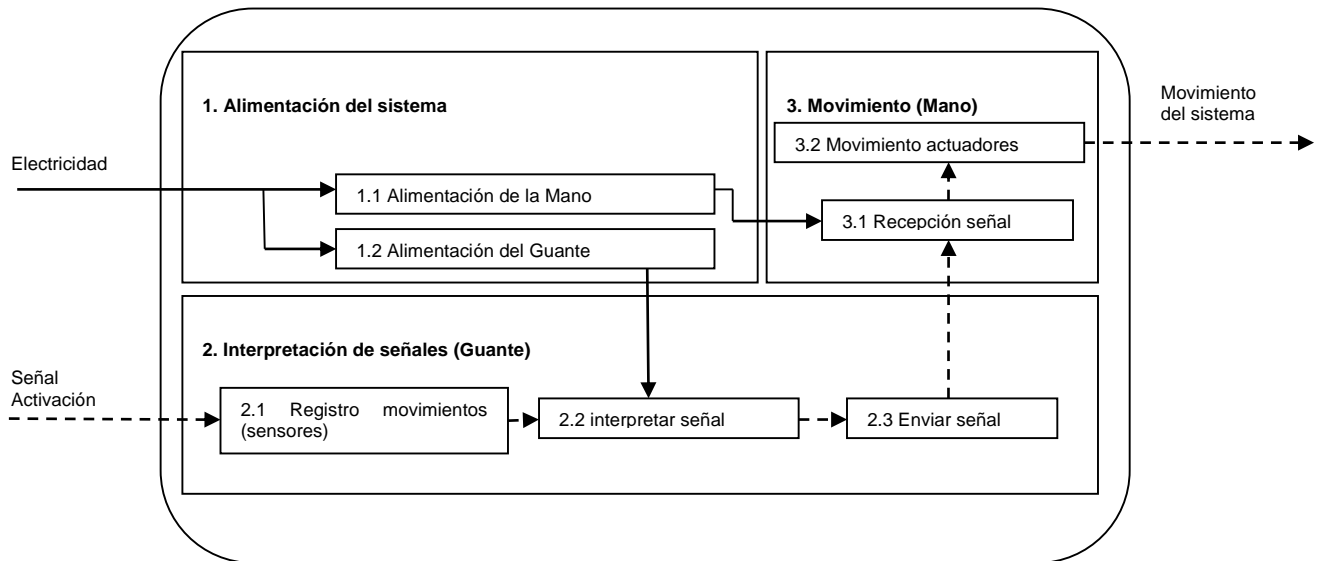


Figura 10 Caja transparente de la mano mecatrónica.




























A partir de la Figura 10, se obtienen las sub-funciones del sistema, las cuales especificamos a continuación:

- Alimentación de la mano
- Alimentación del guante
- Registro de movimientos
- Interpretar señal
- Enviar la señal
- Recepción de la señal
- Movimiento de actuadores

Para cada una de estas sub-funciones, se planteara diferentes alternativas de solución las cuales se presentan en la Tabla 2.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 2. Alternativas de solución para las sub-funciones.

FUNCIONES	ALTERNATIVAS		
	A	B	C
Alimentación de la mano	Batería LiPo  <i>Tomado de: http://topracingmodelismo.com/</i>	Puerto USB desde un PC  <i>Tomado de: http://www.bosche.es/icons.htm</i>	Fuente Conmutada  <i>Tomado de: http://www.ikkaro.com/fuentes-alimentacion-atx</i>
	Batería LiPo  <i>Tomado de: http://topracingmodelismo.com/</i>	Puerto USB desde un PC  <i>Tomado de: http://www.bosche.es/icons.htm</i>	Fuente Conmutada  <i>Tomado de: http://www.ikkaro.com/fuentes-alimentacion-atx</i>
Alimentación del guante	Batería LiPo  <i>Tomado de: http://topracingmodelismo.com/</i>	Puerto USB desde un PC  <i>Tomado de: http://www.bosche.es/icons.htm</i>	Fuente Conmutada  <i>Tomado de: http://www.ikkaro.com/fuentes-alimentacion-atx</i>
	Sensor giroscópico  <i>Tomado de: http://img.directindustry.es/images</i>	Flexo sensor  <i>Tomado de: http://silicio.mx/grove-sensor-tactil</i>	Acelerómetro  <i>Tomado de: http://www.bricogeek.com/shop</i>
Registro de movimientos	PC  <i>Tomado de: http://epsilonelectronic.com.ar/pc</i>	PIC  <i>Tomado de: http://elcodis.com/PIC16F877A</i>	Arduino  <i>Tomado de: http://dsdtelectro.blogspot.com/</i>
	Interpretar señal  <i>Tomado de: http://epsilonelectronic.com.ar/pc</i>	PIC  <i>Tomado de: http://elcodis.com/PIC16F877A</i>	Arduino  <i>Tomado de: http://dsdtelectro.blogspot.com/</i>
Enviar la señal	Xbee  <i>Tomado de: http://dsdtelectro.blogspot.com/</i>	Bluetooth BlueSmirf  <i>Tomado de: https://www.sparkfun.com/products/10269</i>	Arduino Wifi Shield  <i>Tomado de: http://arduino.cc/ArduinoWirelessShield</i>
	Recepción de la señal  <i>Tomado de: http://epsilonelectronic.com.ar/pc</i>	PIC  <i>Tomado de: http://elcodis.com/PIC16F877A</i>	Arduino  <i>Tomado de: http://dsdtelectro.blogspot.com/</i>
Movimiento actuadores	Servomotor  <i>Tomado de: http://pt.wikipedia.org/wiki/Servomotor</i>	Motor DC  <i>Tomado de: http://blog.i-glamour.com/tech-glossary/</i>	Motor paso a paso  <i>Tomado de: http://www.superrobotica.com/</i>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- **Selección de las alternativas de solución**

Para seleccionar la alternativa de solución, se procederá a realizar la combinación de las diferentes opciones presentadas para cada sub-función (Tabla 2) del sistema. Esta combinación se presenta en la Tabla 3.

En la medida en que aquellas alternativas serán evaluadas, será posible seleccionar la más adecuada, según las necesidades del sistema. (Tabla 1)

Tabla 3. Combinación de conceptos de solución.

	Sub-funciones						
	Alimentación de la mano	Alimentación del guante	Registro de movimiento	Interpretar Señal	Enviar señal	Recepción de señal	Registro de Movimiento
Alternativas de Solución	Batería LiPo	Batería LiPo	Sensor Giroscópico	PC	Xbee	PC	Servomotor
	Puerto USB	Puerto USB	Flexo sensor	PIC	Bluetooth	PIC	Motor DC
	Fuente Conmutada	Fuente Conmutada	Acelerómetro	Arduino	Wifi	Arduino	Motor paso a paso

Nota: Para la Tabla 3, cada uno de los colores representa una alternativa de solución la cual cumple con las necesidades del sistema (Tabla 1).

- **Selección de los conceptos**

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la Tabla 3, se generaron los siguientes conceptos:

Concepto 1: El sub-sistema de la mano y el guante se alimentaría por puerto USB desde un PC cada uno, el registro de los movimientos será realizado por medio de acelerómetros, además la interpretación y la recepción de las señales se realizaría

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

con ayuda de un PC para cada sub-sistema. Para enviar la señal se implementaría un protocolo Wifi y para los actuadores se emplearían motores DC.

Concepto 2: El sub-sistema de la mano se alimentaría con ayuda de una fuente conmutada y el guante se alimentará con ayuda de una batería LiPo, el registro de los movimientos será realizado por medio de sensores giroscópicos, además la interpretación y la recepción de las señales se realizará con ayuda de un micro-controlador PIC para cada sub-sistema. Para enviar la señal se implementaría un protocolo Xbee y para los actuadores se emplearían motores paso a paso.

Concepto 3: El sub-sistema de la mano se alimentaría con ayuda de una batería LiPo y el guante se alimentará con ayuda de una fuente conmutada, el registro de los movimientos será realizado por medio de flexo sensores, además la interpretación y la recepción de las señales se realizaría con ayuda de un micro-controlador Arduino para cada sub-sistema. Para enviar la señal se implementaría un protocolo Bluetooth y para los actuadores se emplearían servos motores.

- **Evaluación de los conceptos**

Para la evaluación de los conceptos presentados anteriormente, se enumerarán los diferentes criterios de selección; éstos se obtienen a partir de la interpretación de las especificaciones del sistema (Tabla 1). Los anteriores criterios son presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Criterios de Selección.

Criterio	Especificación
C1	Potencia de los actuadores
C2	Velocidad de respuesta de los actuadores
C3	Costo total del sistema
C4	Tamaño de los componentes
C5	Portabilidad
C6	Durabilidad
C7	Compatibilidad
C8	Ruido generado

Teniendo en cuenta los criterios de selección (Tabla 4), se desarrolló la matriz de selección (Tabla 5) en la cual evaluaremos los diferentes conceptos de acuerdo a los criterios.

Tabla 5. Matriz de Selección.

Criterios de Selección	Conceptos Evaluados		
	1	2	3
C1	0	0	0
C2	-1	1	1
C3	-1	0	0
C4	-1	1	1
C5	-1	-1	1
C6	1	0	0
C7	0	0	0
C8	-1	-1	1
Suma +	1	2	4
Suma 0	2	4	4
Suma -	5	2	0
Puntuación neta	-4	2	4
Rango	3	2	1
¿Continúa?	No	No	Si

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Según la evaluación de los conceptos mostrada en la Tabla 5, la mejor solución al problema corresponde al concepto 3, para el cual se procederá con su construcción y desarrollo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.1.2 Diseño de detalle

- **Diseño a partir de herramientas CAD**

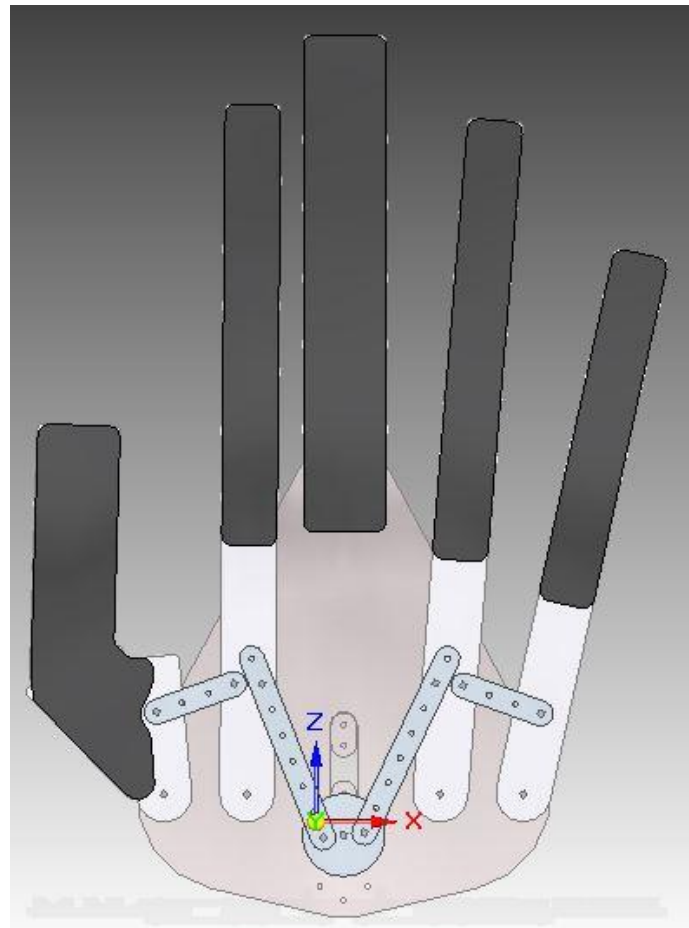


Figura 11. Diseño Mano Mecatrónica

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

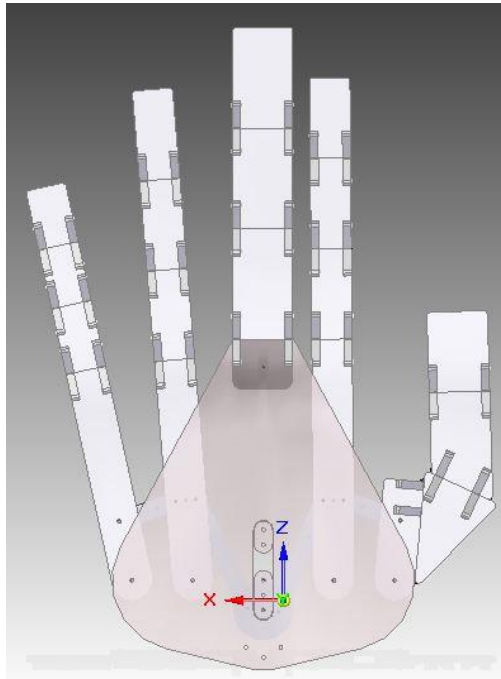


Figura 12 Diseño Mano Mecatrónica

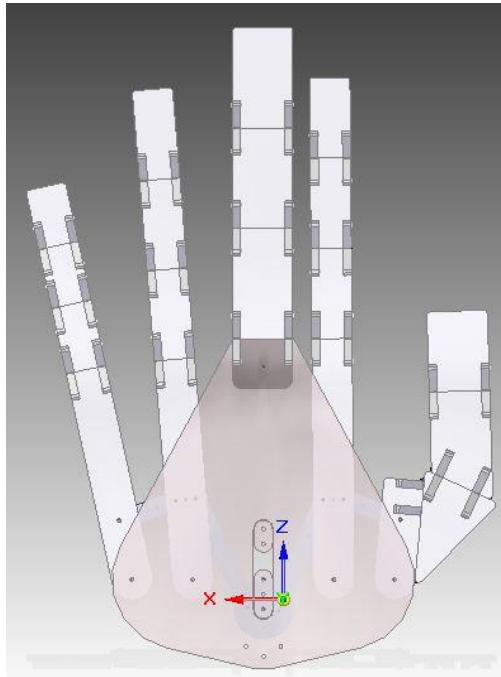


Figura 13 Diseño Mano Mecatrónica

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

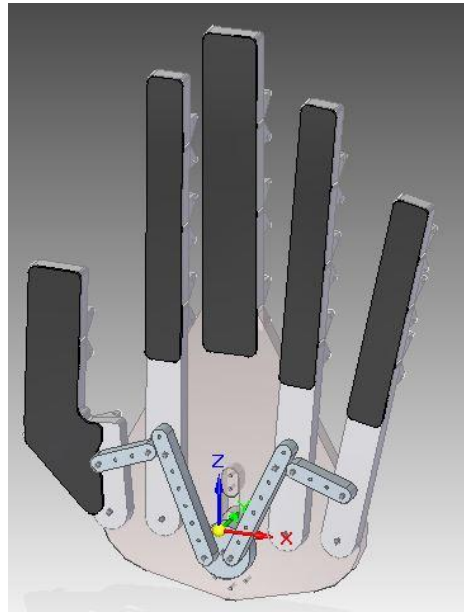


Figura 14 Diseño Mano Mecatrónica

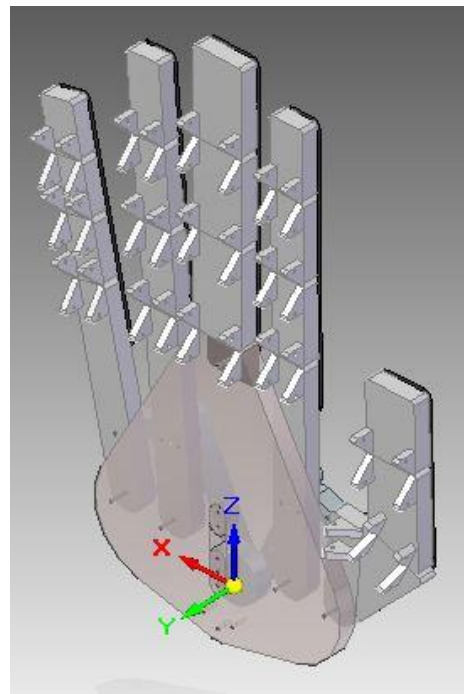


Figura 15 Diseño Mano Mecatrónica

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

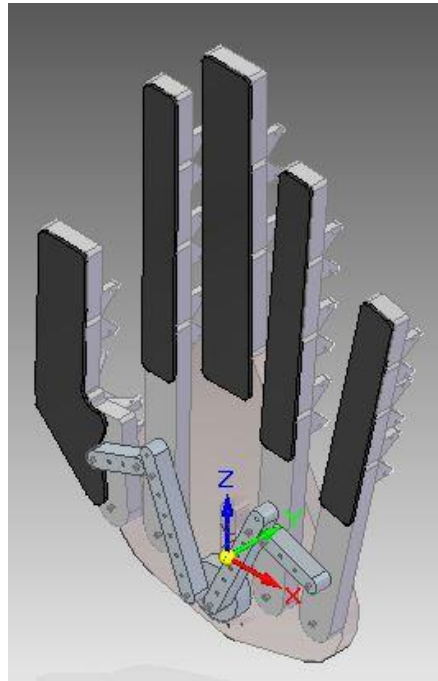


Figura 16 Diseño Mano Mecatrónica

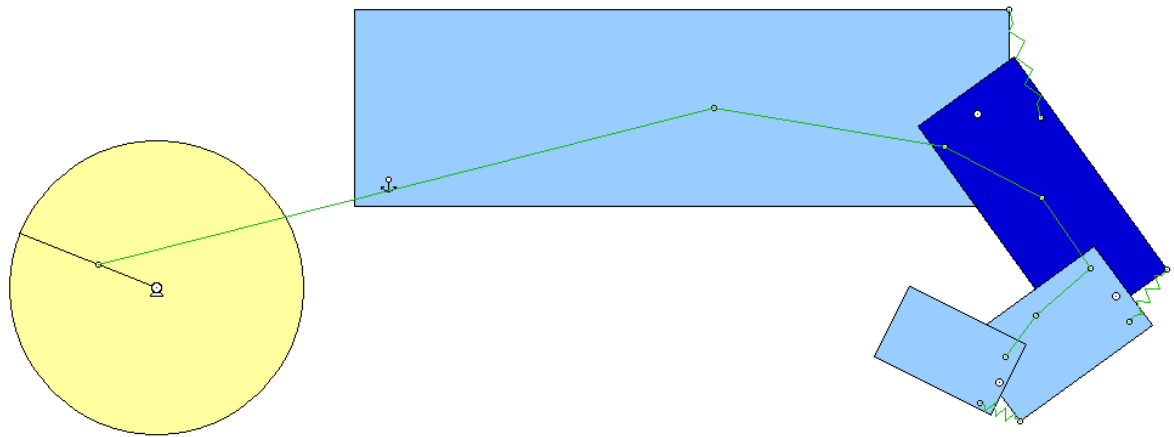


Figura 17 Simulación del resorte

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

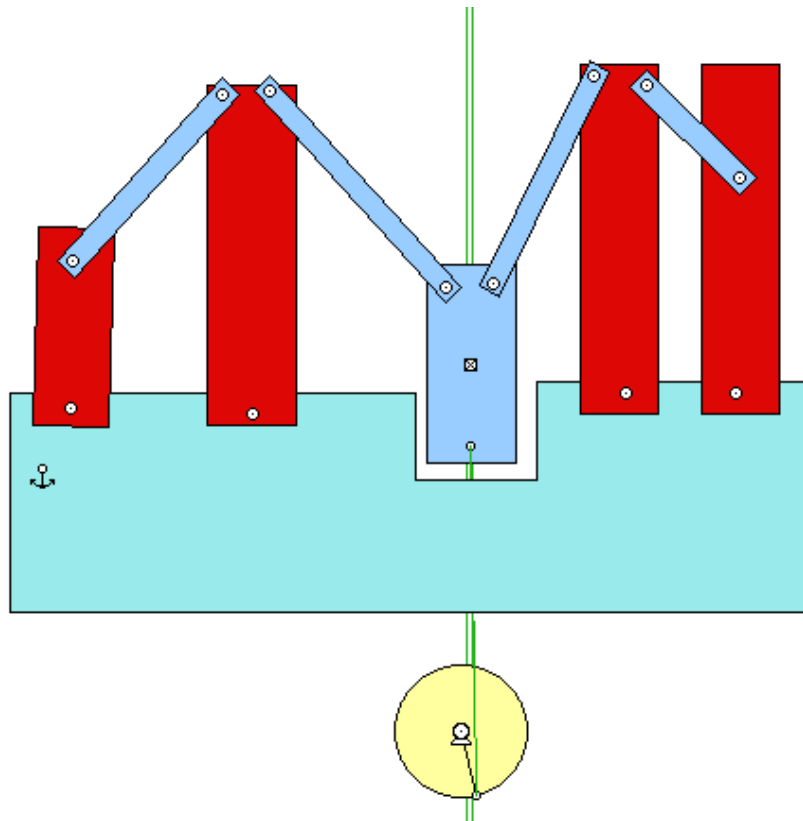


Figura 18 Simulación del resorte

Estos diseños están basados en las proporciones biológicas tomadas de la mano de una persona. A partir de estas proporciones se generaron las diferentes piezas que se encuentran en el ensamble (Figura 11-12-13-14-15 y 16), entre estas piezas se encuentran; la palma, las falanges y sus soportes de giro (los análisis estáticos del sistema se encuentran en el Anexo 1 y 2).

También se puede observar la simulación del resorte (Figura 17 y 18), la cual fue realizada teniendo en cuenta la información obtenida en el programa “Working Model 2D”, este programa fue usado para la simulación de los movimientos de los dedos y garantizando de esta manera que tanto las proporciones, como el lugar donde se realiza el pivote en los movimientos, fueran los adecuados para la generación de los movimientos específicos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- **Modelamiento de elementos finitos (FEA)**

Adicional al modelamiento de las piezas en CAD, se realizó la simulación del sistema mecánico, utilizando las herramientas SOLID-EDGE y ALGOR (Multiphysics), y de este modo se logró realizar un modelamiento de elementos finitos de esfuerzos mecánicos, el cual se explica a continuación

La figura 19 representa el lugar por el cual las fuerzas son ejercidas sobre la palma de la mano mecatrónica. Se puede observar que las fuerzas son ejercidas por los ejes con los cuales los dedos están acoplados a la palma, como también la dirección de dicha fuerza. El dedo corazón ejerce su fuerza sobre el área de contacto de los triángulos de soporte, en la dirección orientada por la tensión generada por los servomotores.

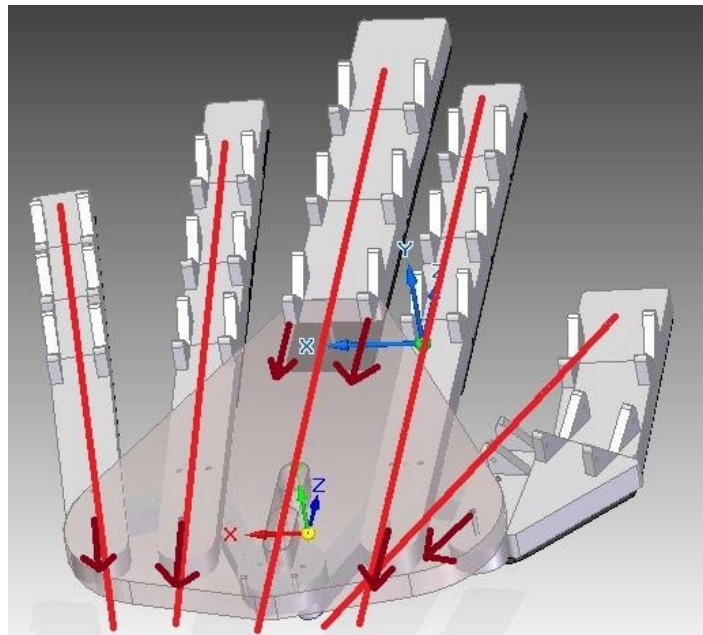


Figura 19 Fuerzas ejercidas sobre la mano

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La figura 20 y 21 se representa las tensiones ejercidas sobre los triángulos de soporte, que se traducen en la fuerza ejercida sobre el eje que cruza ambos triángulos de soporte. Estas fuerzas luego se condensan en su sumatoria vectorial, vector usado a la hora de aplicar las fuerzas en la simulación FEA.

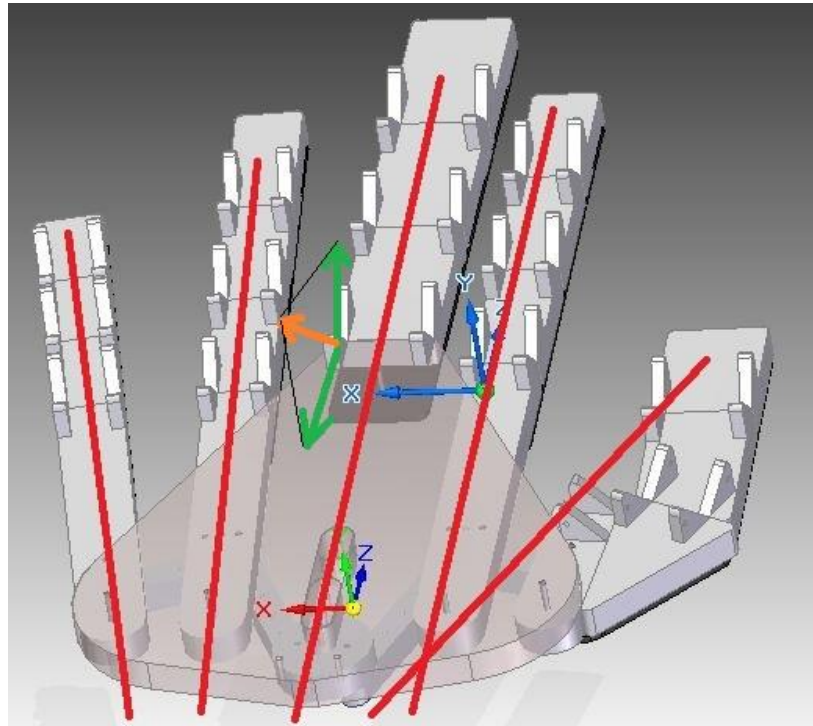


Figura 20 Fuerzas ejercidas sobre el triángulo soporte

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

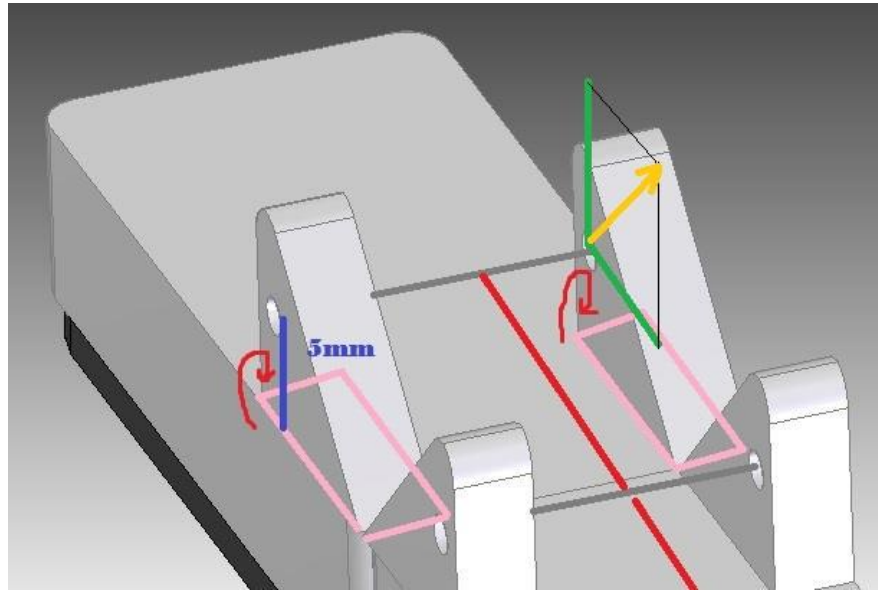


Figura 21 Fuerzas ejercidas sobre el triángulo soporte (vista cercana)

La figura 22 muestra cómo se ejercieron las restricciones sobre los soportes inferiores en la palma, lugar donde la mano mecatrónica está acoplada a el sistema con los motores. Debido al tipo de acoplamiento realizado, se restringen todos los movimientos, los cuales se resumen en: tres traslacionales y tres rotacionales. También representa las fuerzas en ambos triángulos de soporte superior, que soportan el dedo corazón. Estas fuerzas tienen una magnitud de 35 N, debido a que los motores tienen un torque de 3.5 kg*cm y la fuerza se aplica a una distancia de un cm, distribuidos sobre toda el área sobre la cual la fuerza es ejercida. Adicionalmente se observan las fuerzas sufridas por la mano debido a las tensiones de los demás dedos sobre el acople tubular entre los dedos y la palma, las cuales tienen la misma distribución y magnitud previamente descrita. (La simulación se realizó con un enmallado de 35,372 elementos, tipo hexagonal).

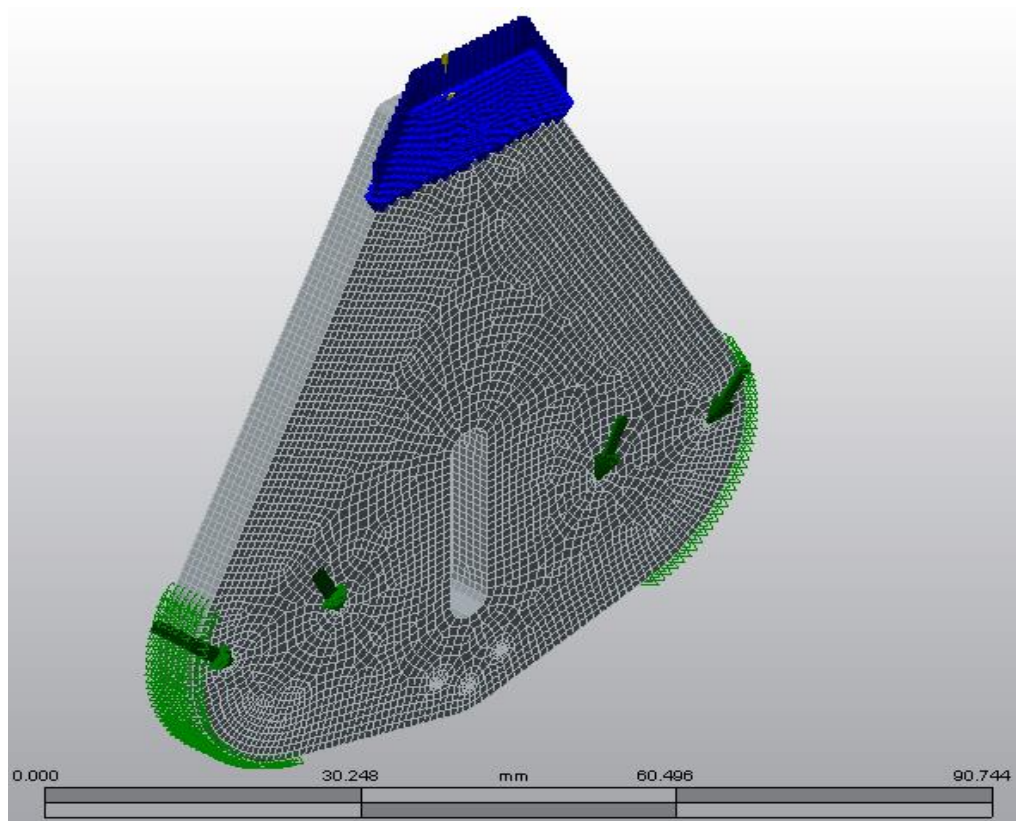


Figura 22 Fuerzas y restricciones aplicadas sobre palma

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La figura 23 muestra las restricciones (restringen tanto traslación como rotación en todos los ejes) generadas por el acople a la palma (o a las falanges) y las fuerzas sufridas por los triángulos de soporte. El ángulo de las fuerzas se debe a la sumatoria vectorial representada en la figura 20 y figura 21. La magnitud de las fuerzas fue de 35 N, debido a la capacidad máxima del servomotor. (La simulación se realizó utilizando 12 917 elementos de tipo hexagonal).

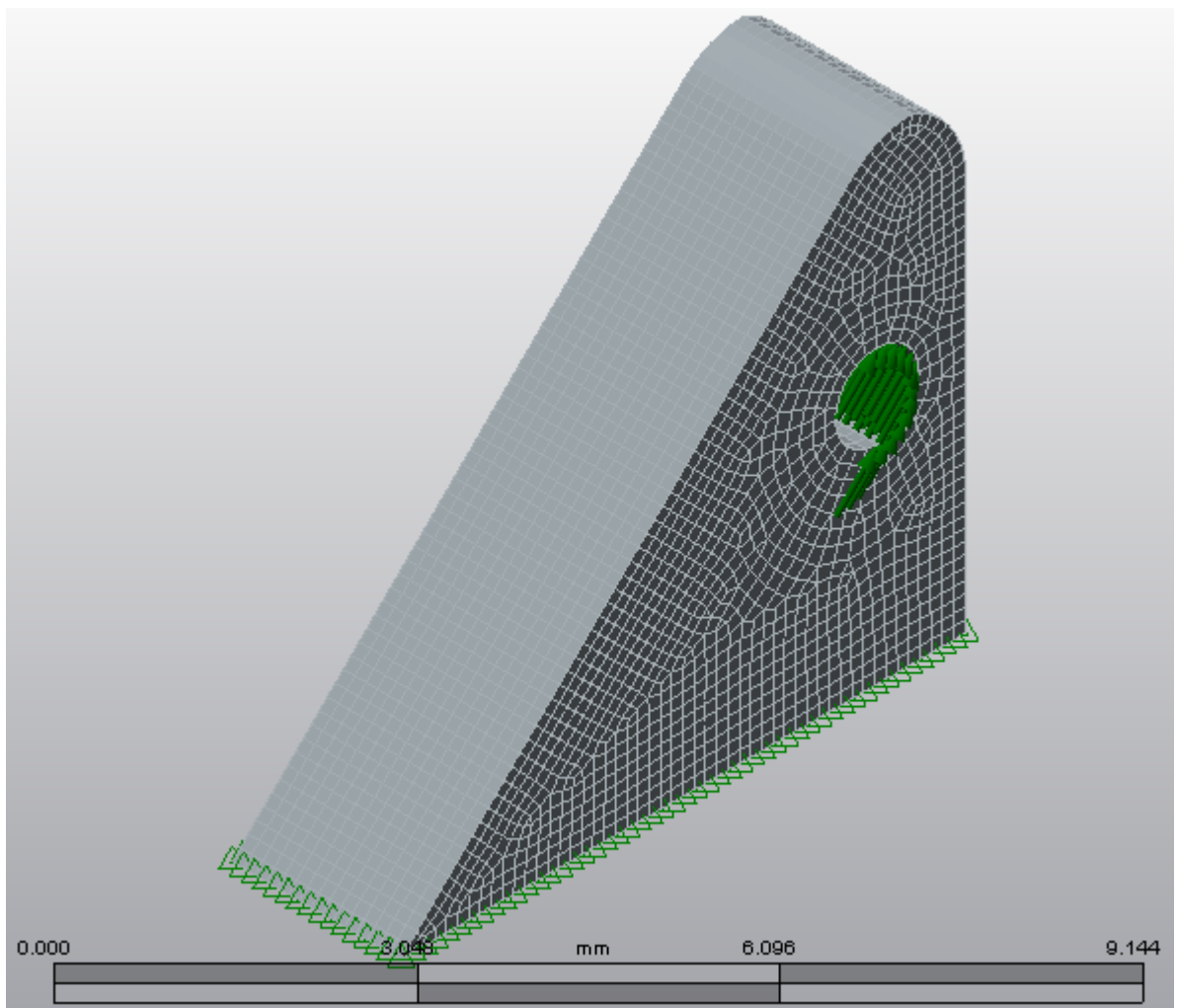


Figura 23 Fuerzas y restricciones aplicadas sobre triángulos soporte

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En la figura 24 se presentan los resultados del análisis por elementos finitos (FEA), donde se muestra la deformación exagerada de la palma. Se puede apreciar un desplazamiento máximo en comparación a la ubicación sin considerar las fuerzas aplicadas de 174.8 pm.

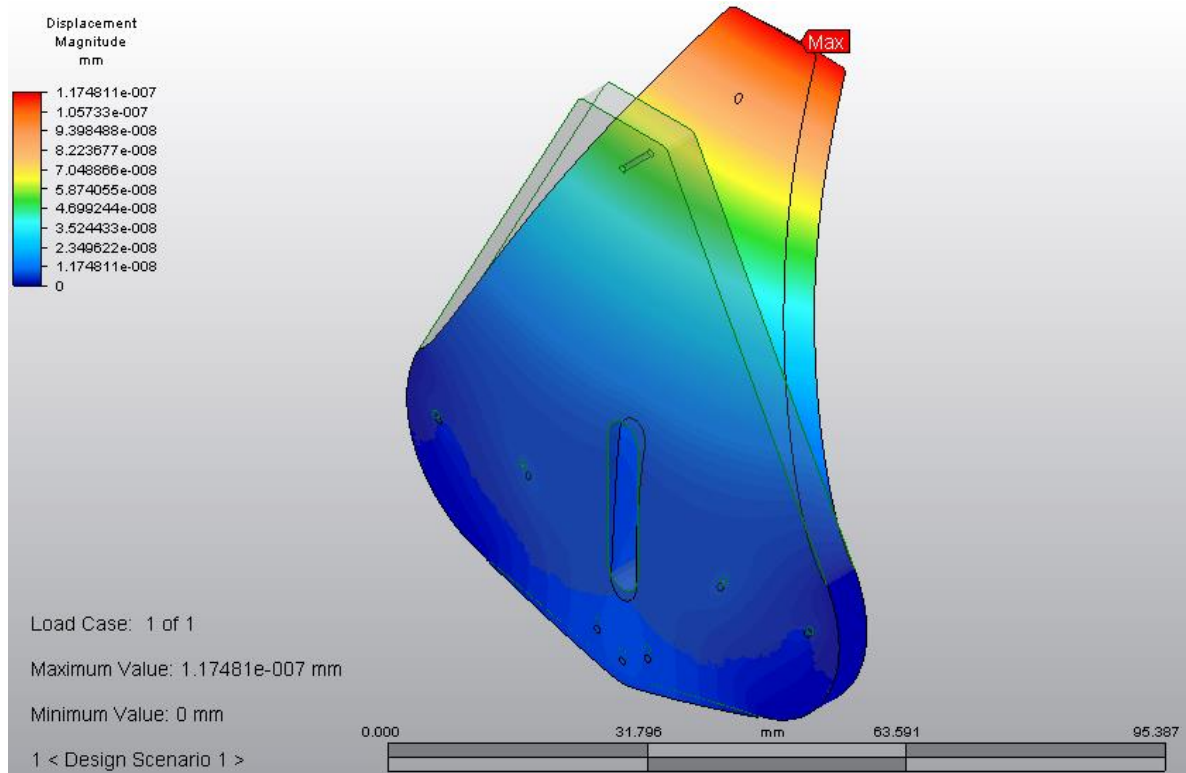


Figura 24 Desplazamiento máximo en deformación encontrado en palma

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En la figura 25 se presentan los resultados del análisis por elementos finitos (FEA), donde se muestra la deformación exagerada de los triángulos de soporte. Se puede apreciar un desplazamiento máximo en comparación a la ubicación sin considerar las fuerzas aplicadas de 8.56 pm.

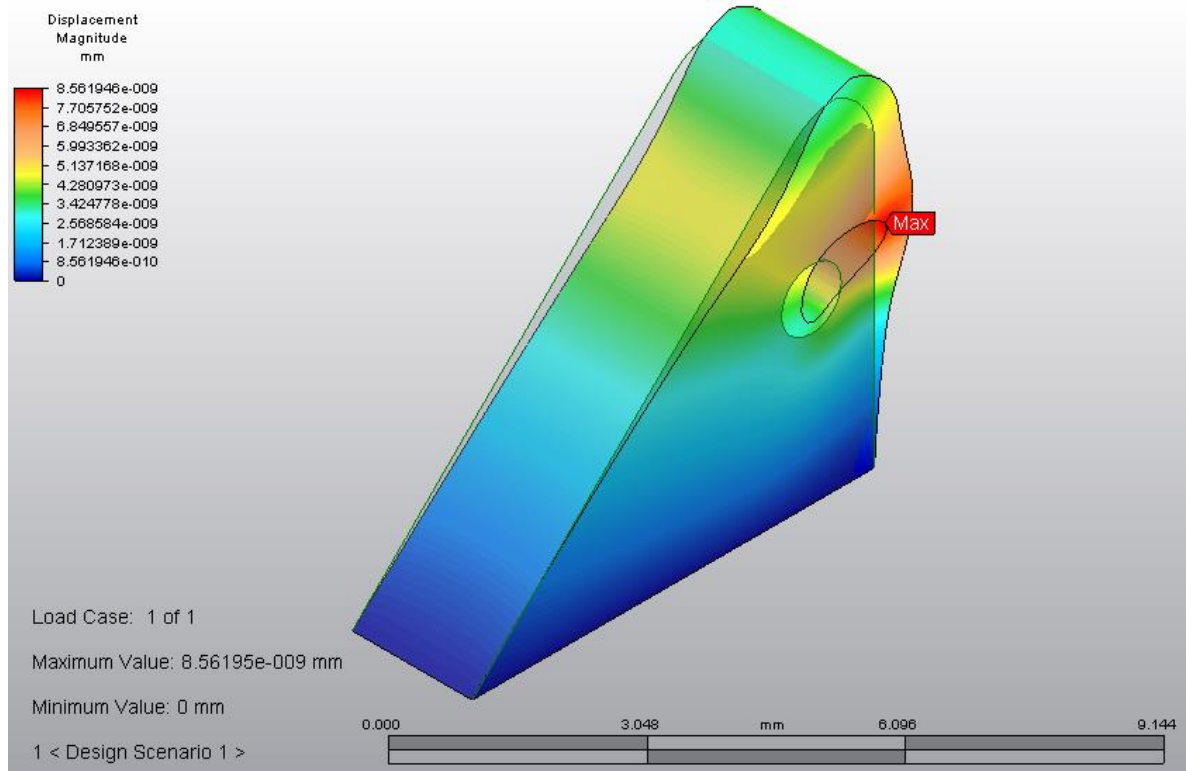


Figura 25 Desplazamiento máximo en deformación de triángulos de soporte

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En la figura 26 se presentan los resultados del análisis por elementos finitos (FEA), donde se muestran los esfuerzos sobre la palma. Se puede apreciar un esfuerzo máximo sobre la pieza con magnitud de 4.93 MPa. Que está por debajo del esfuerzo de cedencia del material con magnitud promedio de 63 MPa

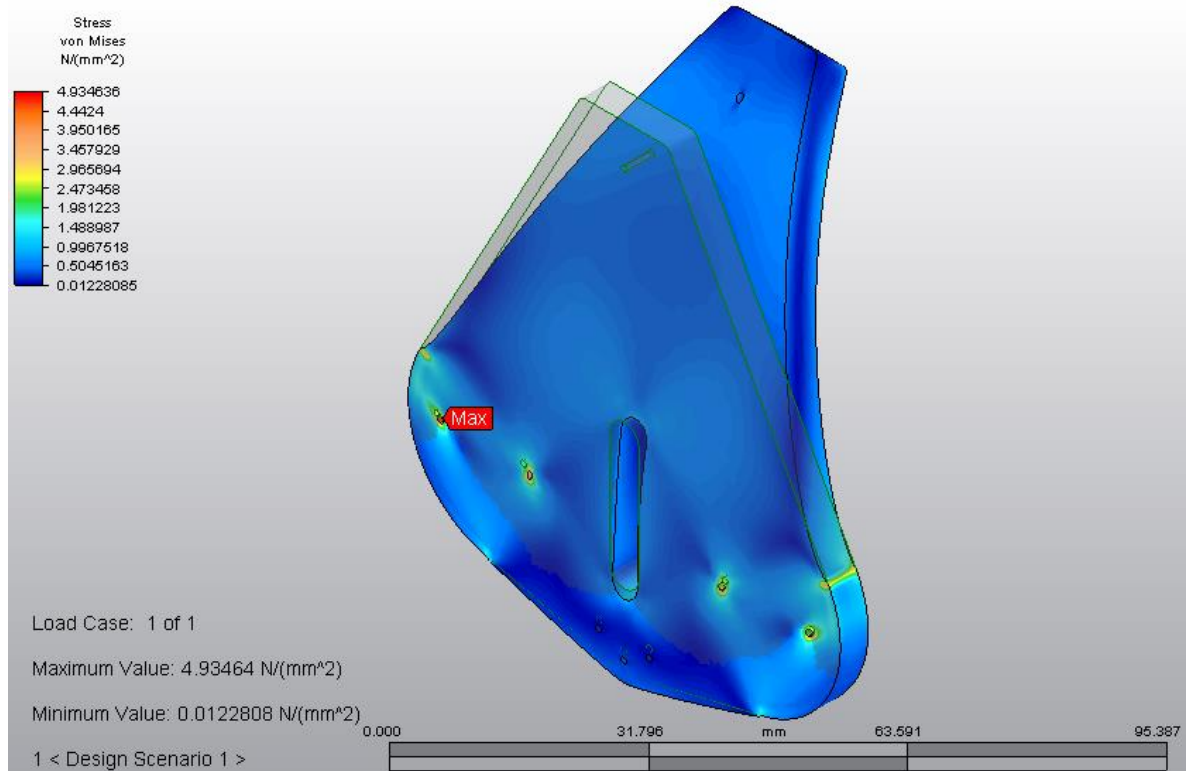


Figura 26 Esfuerzo máximo encontrado en palma

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En la figura 27 se presentan los resultados del análisis por elementos finitos (FEA), donde se muestran el esfuerzo sobre los triángulos de soporte. Se puede apreciar un esfuerzo máximo sobre la pieza con magnitud de 17 932 MPa. Que está por debajo del esfuerzo de cedencia del material con magnitud promedio de 63 MPa

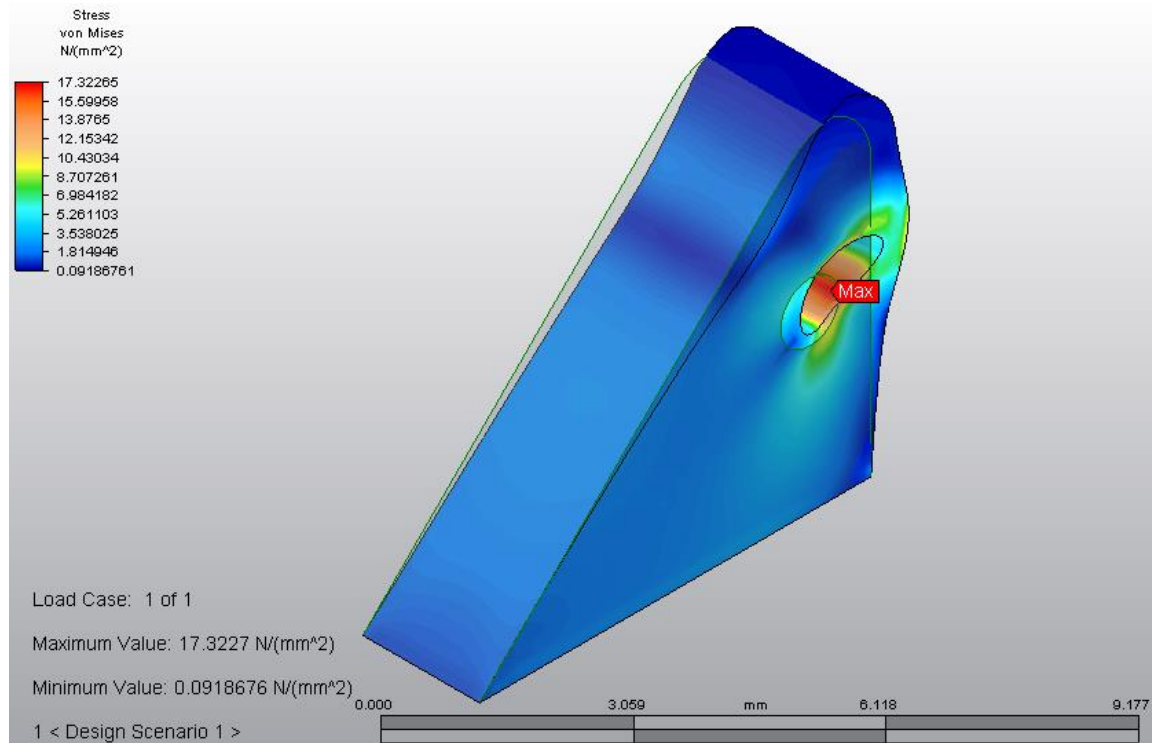


Figura 27 Esfuerzo máximo en triángulos de soporte

Para estas simulaciones, los valores de la resistencia del acrílico, material usado para la construcción de las diversas partes de la mano, fueron extraídos de: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3cb08da2a0054447a3790015b7214d07&ckck=1>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La figura 28 y la 29, muestran la configuración de los micro-controladores la cual viene de esta manera como diseño del fabricante de este tipo de sistemas.

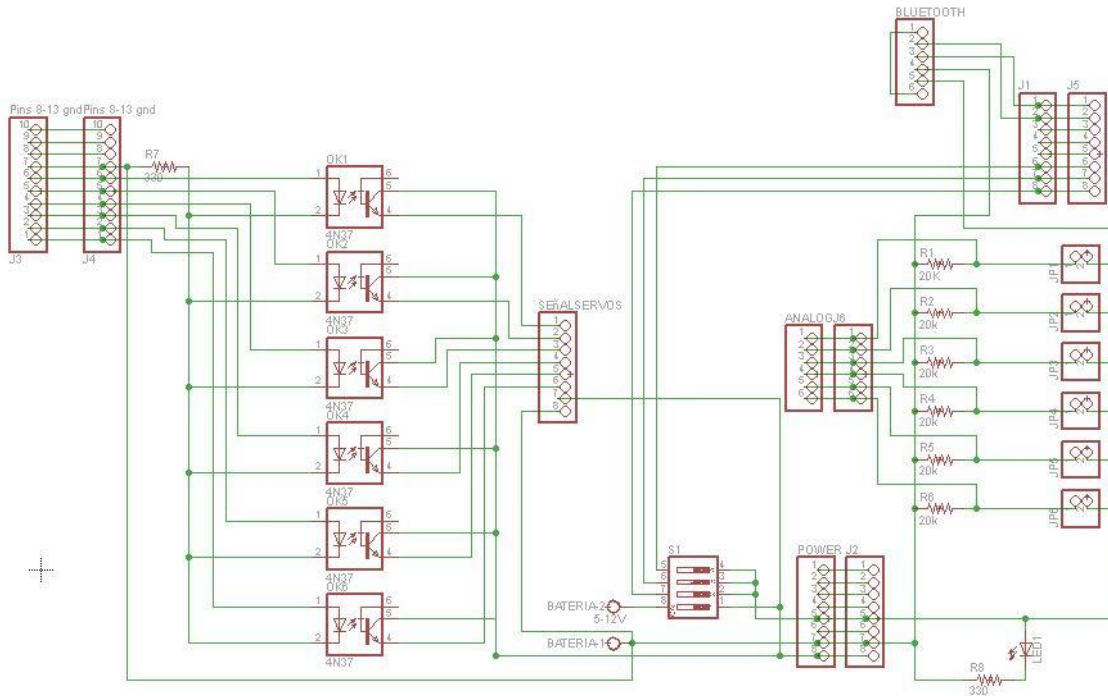


Figura 30. Circuito del opto-acoplador

El circuito de la figura 30, está diseñado con la capacidad de adaptarse físicamente en forma de un Shield o Stack encima de los Arduinos tanto UNO como MEGA. Esta particularidad permite una sencilla conexión eléctrica entre todos los puertos del Arduino, especificados en el programa para ejecutar la rutina deseada. El circuito cuenta con un sistema de divisores de voltaje conectados a los pines de captura análoga, donde la resistencia variable es un flexo sensor, sensor diseñado específicamente para capturar un movimiento de flexión, dando un rango de variación hasta de 10KOhms de forma lineal. Este sistema lineal, acoplado con el algoritmo de regresión lineal utilizado para la calibración, garantiza una salida hacia los servomotores linealmente consistente con los valores introducidos por los sensores, pero este sistema se vuelve no lineal a la hora de hacer el agarre, debido

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

a que cada dedo cuenta con un grado de libertad, y mueve sus falanges debido a la tensión producida por los motores. Adicionalmente al manipular, estas articulaciones por métodos mecánicos se pierde la relación uno a uno entre el dedo del guante y el dedo de la mano mecatronica, a excepción de una franja corta de movimiento cerca del máximo de flexion de los flexosensores, donde ambos sistemas están cerca de su máximo agarre.

Este circuito también contiene una salida de los pines RX y TX colocados para la fácil instalación de los módulos de conexión bluetooth Bluesmirf Gold. Para finalizar, también se tiene un Dip switch en el cual se puede prender la unidad y energizar los motores, que está opto acoplados a las salidas digitales, (para ver el diseño completo del circuito ver Anexo 3).

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Conforme al diseño de concepto elaborado, se logró seleccionar los elementos requeridos a fin de obtener un sistema idóneo que cumpliera con los objetivos planteados en el presente proyecto.

En efecto, al finalizar el diseño de detalle se obtuvo un prototipo de mano mecatrónica (se puede observar en la figura 31), la cual cuenta con los elementos necesarios para manipular algunos volúmenes geométricos, y permite que su funcionamiento se efectúe mediante un guante instrumentado (puede observarse en la figura 32), por una parte y por la otra, de manera inalámbrica, a través de un celular por Bluetooth.



Figura 31 Prototipo mano mecatrónica construida

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Figura 32 Guante instrumentado construida

Asimismo, para evaluar el comportamiento del sistema, se plantearon diferentes pruebas, las cuales se describen en el apartado 2.3. Partiendo de aquellas, fue posible obtener las siguientes características del prototipo construido, a saber:

- El prototipo puede emular, en sus movimientos básicos, la mano humana. Para mostrar lo anterior, se realizó la “Prueba de ejecución de mandos predefinidos”, la cual se encuentra en detalle en el anexo 4 del proyecto. Esta prueba permitió implementar una secuencia automática a ser ejecutada por el sistema, el cual realiza los movimientos sin ninguna dificultad y de manera óptima. Igualmente, en esta secuencia se muestran los movimientos básicos que pueden ser efectuados con los seis grados de libertad que se implementaron. Adicionalmente cada dedo de la mano mecatrónica posee un

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

movimiento independiente, proporcionándole al sistema un mayor volumen de trabajo.

- Para determinar la carga que puede soportar el prototipo se realizó una prueba de carga, la cual se puede observar en el anexo 5 del trabajo. En dicha prueba se logró determinar que cada dedo puede soportar más de 1.000 gramos. Lo anterior permite demostrar que el diseño fue idóneo, toda vez que se obtuvo un sistema robusto, el cual permite manipular objetos con pesos considerables, en caso de ser necesario.
- El guante implementado en el sistema permite manipular el prototipo en sus movimientos básicos. La prueba de maniobrabilidad con el guante puede examinarse en el anexo 6 del presente proyecto. La implementación de este guante instrumentado, que contiene flexo sensores, posibilita que la mano mecatrónica cuente con un sistema de manipulación sencillo de operar; lo que permite que el prototipo ejecute los movimientos deseados con el sistema, es decir, se logra emular los movimientos que realiza una mano humana.
- El sistema puede ser operado inalámbricamente, mediante la programación de un dispositivo móvil Android, como lo es un celular o a través de cualquier otro dispositivo que sea compatible con la comunicación Bluetooth. Esta característica del prototipo implementado puede ser útil en algunas aplicaciones en las que sea necesario manipular materiales peligrosos, los cuales pueden materializar un riesgo para los operadores si se tiene un contacto cercano. La prueba de maniobrabilidad inalámbrica se encuentra detallada en el anexo 7 del trabajo.
- Para complementar la característica inalámbrica que posee el sistema, éste puede contar con una batería LiPo, la cual posibilita que el prototipo pueda

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ser alimentado aisladamente. Para probar la viabilidad de utilizar este tipo de batería, se realizó una prueba consistente en ejecutar movimientos consecutivos con la mano mecatrónica que permitió evidenciar la durabilidad de la misma, en términos de tiempo, el cual oscila en treinta (30) minutos aproximadamente.

- La funcionalidad del sistema en la manipulación de volúmenes geométricos puede ser evidenciada en el anexo 8, donde se puede verificar como el prototipo se comporta cuando se manipula algunos objetos. Esta tarea es muy común en los robots industriales, en los cuales generalmente se utiliza un *gripper* diferente para manipular algunos objetos con volúmenes asimétricos. La implementación de este prototipo permite evidenciar como podría llegar a funcionar un sistema, si se desarrollara industrialmente esta clase de elementos terminales.
- Adicionalmente se realizó el montaje del sistema diseñado al acoplarlo en un Robot ABB IRB 140, probando de esta manera la adaptabilidad del prototipo en un sistema industrial, esta prueba se encuentra detalladamente en el anexo 9.

Las características anteriormente descritas permiten concluir que el sistema puede ser un elemento terminal recomendable para la manipulación de diferentes objetos, el cual ayudaría a suplir la necesidad que actualmente presentan algunos de los robots industriales, los cuales utilizan diferentes *grippers*, dependiendo de la actividad a realizar. En efecto, las propiedades del presente diseño, implementadas de manera real, podrían no solamente efectuar tareas de manipulación de volúmenes geométricos, sino también manipular objetos con configuraciones asimétricas y a su vez, algunas herramientas que son empleadas en procesos industriales.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Para finalizar, es importante aclarar que en concordancia con el objetivo general del proyecto y los alcances propuestos, lo diseñado y construido en el presente trabajo es un prototipo de mano mecatrónica la cual tiene como finalidad emular la mano humana en su capacidad de maniobrabilidad y agarre básicos. Una implementación real de este prototipo requiere de un análisis y de un estudio pertinente de otras variables y factores, según las condiciones del entorno al cual estaría sometido el sistema, que permitirán en su momento, determinar si es viable su implementación. Este estudio arroja unas conclusiones generales que eventualmente se podrían tener en cuenta a la hora de desarrollar de este prototipo de forma real.

4.1.1 Resultado adicional:

Se realizó un desarrollo adicional para obtener una comunicación serial entre dos Arduinos, de manera inalámbrica, mediante dos módulos bluetooth bluesmirf. Este sistema está en una frecuencia ultra alta (UHF), a 2.4 GHz.

En la medida en que no se pueden modificar las interrupciones del Arduino, no fue posible realizar una comunicación bluetooth convencional usando librerías; por lo que fue necesario crear un protocolo específico para esta comunicación. Este protocolo original tiene la capacidad de comunicarse automáticamente entre los Arduinos utilizados (el maestro conectado a los sensores y el esclavo conectado a los servomotores de la mano mecatrónica), inclusive éste se reconecta de forma automática, en caso de que se produzca una falla de comunicación por fuera del rango. Dicho protocolo tiene un check sum y un ACK (acknowledgement), y envía 6 datos de 8 bits, cada uno, en orden específico para transmitir los datos de los 6 flexo-sensores hacía el Arduino que controla la mano mecatrónica.

Este desarrollo se logró al hacer que, al iniciar el código del Arduino, éste se parametrize con el módulo de comunicación bluetooth por comandos AT (Attention, comando usados para modificar los parámetros de un modem). Estos comandos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

fueron inscritos al principio del código tanto del Arduino maestro como el del esclavo, donde el mismo Arduino programaba el modulo bluetooth. Esta comunicación se realizaba en modo automático pre-programado por los comandos AT, donde el maestro buscaba la conexión con el esclavo únicamente, y donde, en caso de un fuera de rango, este intentaba volver a restablecer la comunicación caída de forma autónoma. Debido a la inhabilidad de poder controlar las interrupciones en el Arduino, fue necesario crear un protocolo propio, donde se realizaba y se comparaba una paridad y un checksum, para comprobar la fiabilidad del sistema. La Figura 33 muestra el diagrama de la comunicación realizada.

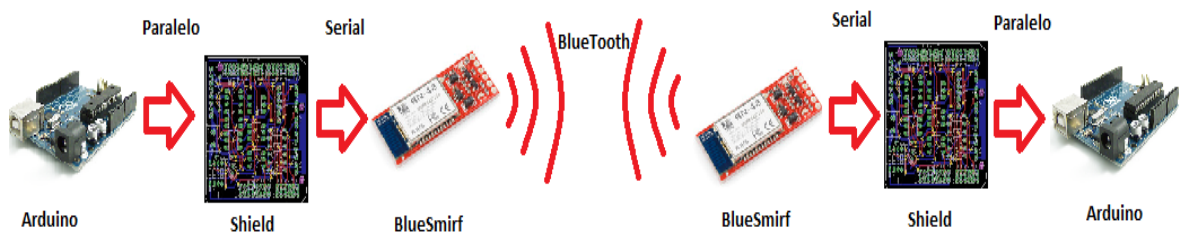


Figura 33 Diagrama de comunicación Bluetooth Arduino Bluetooth Arduino

En este sentido, para garantizar una comunicación exclusiva entre los dos Arduinos, al maestro se le pre-programa el MAC address y un password del módulo esclavo, y al esclavo se le da la orden de esperar una conexión con cualquier maestro que conozca la clave pertinente al caso. El Mac Address es una dirección única para cada dispositivo de interfaz en una red, que puede ser usada para identificar cada objeto por separado, e interactuar con él. Al enlazar dichos dispositivos con sus MAC Address por bluetooth, se crea una picored entre los mismos (el montaje realizado se observa en la Figura 34).

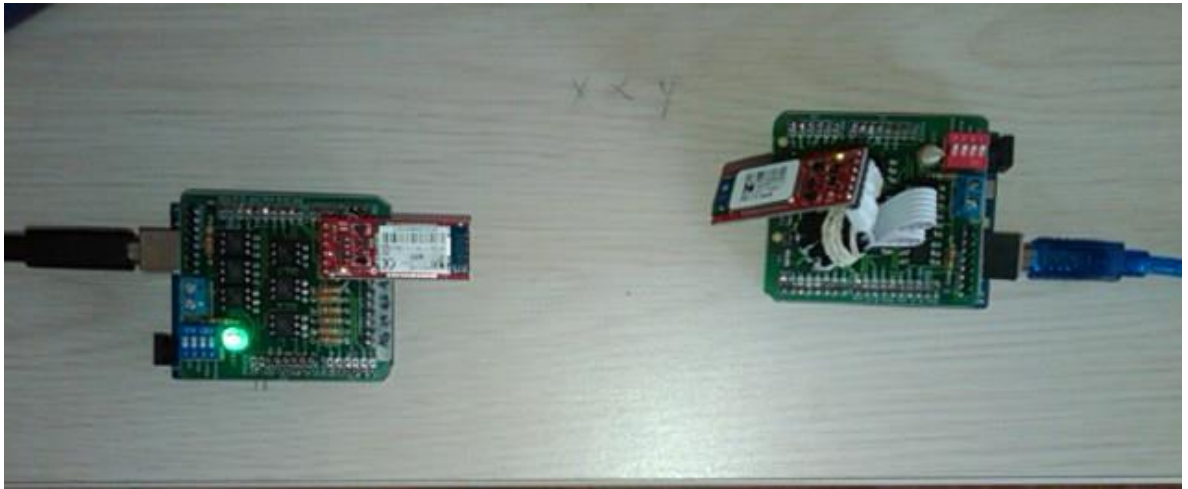


Figura 34 Montaje de la comunicación

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

- Conforme al diseño del concepto desarrollado, se identificaron los elementos físicos necesarios para el desarrollo del prototipo de mano mecatrónica, a fin de que ésta cumpliera con los requerimientos básicos que permitieran emular la mano humana en sus movimientos principales. En este punto, para posteriores desarrollos, se recomienda realizar un nuevo diseño de concepto que abarque las características de la aplicación a la cual se dirigirá el sistema.
- Teniendo en cuenta el diseño de detalle, se logró realizar los diseños CAD del sistema mecánico del prototipo. Asimismo, para comprobar la idoneidad se efectuó la simulación por elementos finitos, la cual permitió identificar la deformación de los materiales y la fuerza máxima soportada por el sistema. El presente diseño se desarrolló basándose en los seis grados de libertad con los que cuenta el prototipo objeto del estudio; no obstante, si se desea tener mayores grados de libertad para desarrollos futuros, éste diseño deberá adecuarse a las características requeridas.
- La mano mecatrónica construida tiene la capacidad de manipular volúmenes geométricos y soportar una carga considerable, toda vez que con base al diseño de detalle elaborado, se construyeron las piezas idóneas para la correcta funcionalidad del prototipo; en el cual se integran los elementos físicos que permiten dotar al sistema con la maniobrabilidad y el agarre propio de una mano humana, y así lograr emular sus movimientos básicos.
- El guante instrumentado que se implementó en el sistema, permitió que el mismo pudiera trabajar de manera sencilla, toda vez que al ejecutar algunos movimientos básicos con el guante, el elemento terminal tipo mano mecatrónica interpretaba dichos movimientos de manera apropiada, de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

acuerdo con la disposición y la cantidad de flexo sensores propias de este diseño. Para una mayor fidelidad de los movimientos en un futuro desarrollo, es recomendable implementar más flexo sensores o en su defecto, utilizar otro tipo de sensores que permitan emular más exactamente los movimientos realizados con un guante instrumentado.

- La característica inalámbrica del prototipo implementado fue desarrollada mediante comunicación Bluetooth con ayuda de un dispositivo móvil. Este protocolo es muy fiable, dadas las características que presenta, pues facilita la comunicación entre el equipo móvil y la mano mecatrónica, eliminando de tal forma los cables y conectores entre éstos, y generando así una pequeña red inalámbrica entre el dispositivo móvil y el prototipo, en donde la sincronización es bastante óptima. Para complementar esta propiedad se incorporó una batería tipo LiPo, dotando de esta manera al prototipo con una independencia absoluta de cables. Esta propiedad permite, de ser necesario, que el sistema en su conjunto sea ejecutado a una distancia segura para el operador.
- Con las pruebas efectuadas, se logró comprobar el buen desempeño del prototipo en la ejecución de los movimientos básicos que emulan la mano humana, de forma predefinida, por medio de un guante instrumentado y por medio de un dispositivo móvil inalámbricamente. Adicionalmente se logró verificar el agarre del prototipo, el cual permite manipular algunos volúmenes geométricos de manera adecuada.

BIBLIOGRAFÍA

- Barrientos, A., Peñín, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica*. Madrid: McGraw-Hill.
- Bolton, W. (2010). *Mecatrónica* (4 ed.). Edinburgh Gate: Alfaomega.
- Boubekri, N., & Chakraborty, P. (2002). Robotic grasping: Gripper designs, control methods and grasp configurations - A review of research. *Integrated Manufacturing Systems*, 13(7), 520-531.
- Brock, O. (2005). A Framework for learning and control in intelligent humanoid robots. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2(3), 301-336.
- Butterfass, J., Grebenstein, M., Liu, H., & Hirzinger, G. (2001). DLR-Hand ii: Next Generation of a Dexterous Robotic Hand. *International Conference on Robotics & Automation* (págs. 109-114). Seoul: IEEE.
- Butterfass, J., Hirzinger, G., Knoch, S., & Liu, H. (1998). DLR's Multisensory Articulated Hand Part 1: Hard and software architecture. *International conference on Robotics & Automation* (págs. 2081-2086). Leuven: IEEE.
- Caffaz, A., Casalino, G., Cannata, G., Panin, G., & Massucco, E. (1998). The DIST-Hand, an Anthropomorphic, Fully Sensorized Dexterous Gripper. *International Congress of robotics and automation*. Leuven: ICRA98.
- Carbone, G., & González, A. (15 de September de 2011). A numerical simulation of the grasp operation by LARMHand. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27, 450-459.
- Ceccarelli, M., Nava, N., Jáuregui, J. M., Parada, J., & Carbone, G. (2004). Diseño y experimentación de un dedo articulado antropomorfo con un grado de libertad para una mano robotica. *Iberoamericana de ingeniería mecánica*, 8(12), 15-24.
- Hernández Santos, C., & Montoya Mejía, C. (2007). *Diseño de un Sistema Emulando el Movimiento Articulado de una Mano, Brazo y Antebrazo*. Tesis de maestría en ciencias, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Ingeniería Mecatrónica, Cuernavaca.
- Hesse, S. (2004). *Las pinzas y sus aplicaciones*. Festo.
- Kawasaki, H., Komatsu, T., & Uchiyama, K. (September de 2002). Dexterous anthropomorphic robotic hand with distributed tactile sensor. *Transactions on Mechatronics*, 7(3), 296-303.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Lee, J.-J., & Tsai, L.-W. (June de 2002). Structural Synthesis of Multi-Fingered Hands. *Journal of Mechanical Design*, 124, 272-276.
- Mattar, E. (18 de January de 2013). A survey of bio-inspired robotics hands implementation. *Robotics and Autonomous Systems*, 61, 517-544.
- Nof, S. Y. (1999). *Handbook of industrial robotics* (2 ed.). Endorsed by the Robotic Industries Association.
- Olier Caparroso, I., Avilés, O., & Hernández Bello, J. (1999). Una introducción a la robótica industrial. *Revista de la facultad de ingeniería*(8), 53-67.
- Portilla Flores, É. A., Avilés Sánchez, O. F., Piña Quintero, R., Niño Suárez, P. A., Moya Sánchez, E., & Molina Vilchis, M. A. (Junio de 2010). ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DISEÑO DE UN MECANISMO DE CUATRO BARRAS PARA FALANGE PROXIMAL DE DEDO ANTROPOMÓRFICO. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1), 45-59.
- Quiroz Gutiérrez, F. (1962). *Anatomía humana*. Porrúa México.
- Simanca, P. S., Aviles, O., & Calle, G. (2005). DEDOS PARA "GRIPPERS" ROBÓTICOS - REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. *Scientia Et Technica Vol XI Num 27*, 97-102.
- Yousef, H., Boukallel, M., & Althoefer, K. (2 de March de 2011). Tactile sensing for dexterous in-hand manipulation in robotics. *Sensors and Actuators*, 167, 171-187.
- Zaid, A. M., & Yaqub, M. A. (2012). UTHM HAND: Performance of Complete System of Dexterous Anthropomorphic Robotic Hand. *Procedia Engineering*, 41, 777-783.

ANEXO 1. ANÁLISIS ESTÁTICO 1

Mirado desde el plano XY, el mecanismo cuenta con 1GDL (grados de libertad) y 5GDM (grados de movimiento)

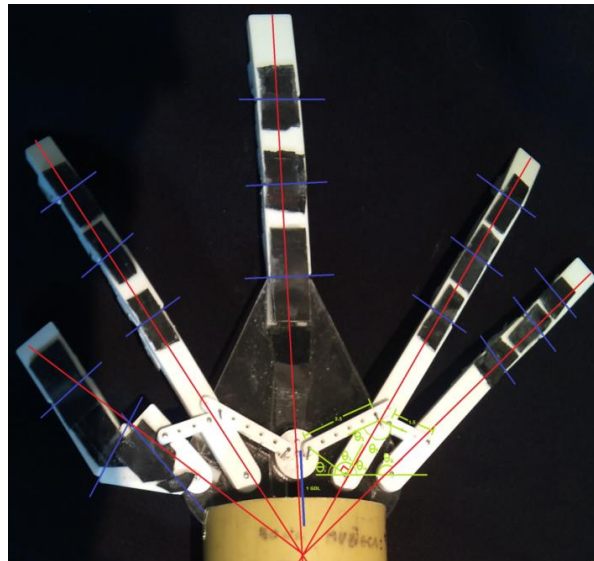


Figura 35 Sistemas y ejes mano robótica.

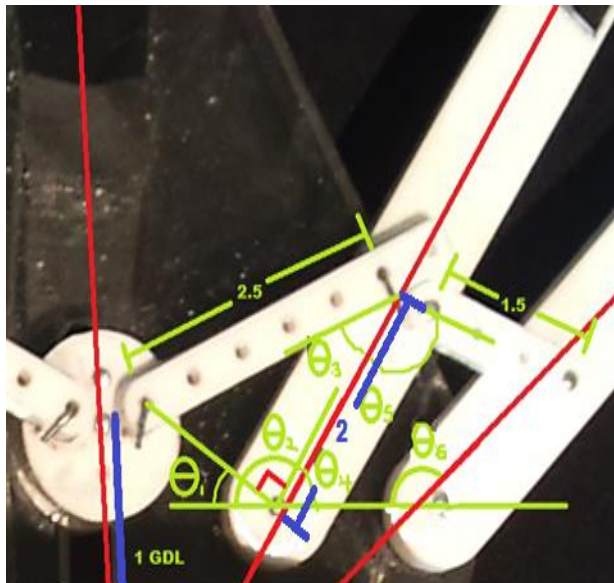


Figura 36 Ángulos de estudio.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Considerando el movimiento entre el dedo Anular y Corazón

$$1.5 = L_1 \cos(\theta_1)$$

Se sabe que:

$$L_1 = f(\theta_1)$$

Con las medidas se puede obtener, respecto al eje (-X):

$$\theta_{1max} = \tan^{-1}\left(\frac{1}{1.5}\right) = 33^\circ$$

Geoméricamente, se puede obtener, respecto al eje (-X):

$$\theta_{2max} = \theta_{1max} + 90^\circ$$

$$\theta_{2max} = 123^\circ$$

Ahora analizando el movimiento entre el meñique y el corazón:

$$\theta_{3max} = \cos^{-1}\left(\frac{2}{2.5}\right)$$

$$\theta_{3max} = 36^\circ$$

$$\theta_{4max} = 180^\circ - \theta_{2max}$$

$$\theta_{4max} = 57^\circ$$

$$\theta_{1max} + \theta_{3max} + \theta_{4max} + \theta_{5max} = 180^\circ$$

$$\theta_{5max} = 180^\circ - (\theta_{1max} + \theta_{3max} + \theta_{4max})$$

$$\theta_{5max} = 54^\circ$$

$$L_2 = 1.5 \cos \theta_4 = 0.82$$

$$\theta_{6max} = \theta_{1max} + \theta_{2max}$$

Por lo que θ_{6max} respecto a (-X) es:

$$\theta_{6max} = 156^\circ$$

Obteniendo la relación entre ΔY y θ_1 cuando ΔY depende del momento del servomotor:

$$\Delta Y = 1.5 \sin(\theta_1)$$

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta Y}{1.5}\right) \quad 0^\circ \leq \theta_1 \leq 33^\circ$$

Recopilando, resumiendo y utilizando el mismo procedimiento para los dedos Índice y Pulgar:

$$\textit{Anular respecto a } (-X): \theta_2 = \left[\sin^{-1} \left(\frac{\Delta Y}{1.5} \right) \right] + 90^\circ$$

$$\textit{Meñique respecto a } (-X): \theta_6 = 2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{\Delta Y}{1.5} \right) \right] + 90^\circ$$

$$\textit{Índice respecto a } (X): \theta_2 = \left[\sin^{-1} \left(\frac{\Delta Y}{1.5} \right) \right] + 90^\circ$$

$$\textit{Anular respecto a } (X): \theta_2 = 2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{\Delta Y}{1.5} \right) \right] + 90$$

ANEXO 2. ANÁLISIS ESTÁTICO 2

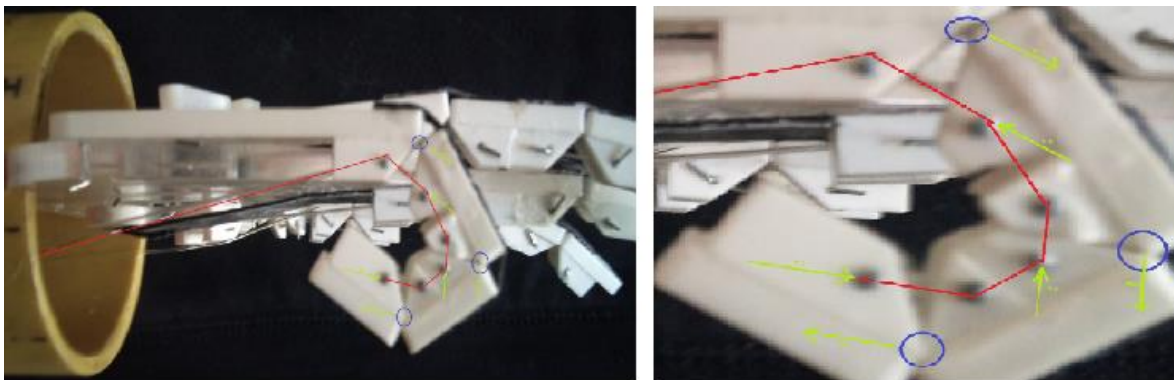


Figura 37 Sistema al flexionar la mano.

Mirado desde el plano YZ, se ve que el mecanismo cuenta con 1GDL+3GDM:

Analizando el Cierre completo del dedo:

$$\sum F = 0$$

$$\sum M_{A1} = \sum M_{A2} = \sum M_{A3} = 0$$

Ya que todos los cortes son a 45° :

$$\begin{aligned} \text{Fuerzas en Y:} \quad & [T_1 - R_1 + T_2 - R_2 - T_3 + R_3] \cos(45^\circ) \\ = 0 \text{ Fuerzas en Z:} \quad & [-T_1 + R_1 + T_2 - R_2 + T_3 - R_3] \sin(45^\circ) = 0 \end{aligned}$$

Ya que no hay Movimiento relativo entre falanges debido al sistema en equilibrio:

$$\|T_1\| = \|R_1\| \quad \|T_2\| = \|R_2\| \quad \|T_3\| = \|R_3\|$$

Realizando la sumatoria de momentos en un los diferentes puntos de análisis:

$$A_3: \quad M_6 + T_2(0.6) = T_1(0.6) + R_2(1.2)$$

$$M_6 = T_1(0.6) + T_2(0.6)$$

$$A_2: \quad M_5 + T_1(0.8) + T_3(0.8) = T_2(0.6) + R_1(1.4) + R_3$$

$$M_5 = T_2(0.6) + T_1(0.6) + T_3(0.6)$$

$$A_1: \quad M_4 + T_2(1.2) = T_3(0.6) + R_2(1.2)$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$M_4 = T_3(0.6) + T_2(0.6)$$

La Tensión generada por el motor es:

$$T_{motor} = T_1 + T_2 + T_3$$

Las distancias varían dependiendo de T_{motor} :

$$D(T_{motor}) = f(T_{motor}) + D_{min}$$

$$D_{min} = 0.4 \quad \text{Medida minima observada}$$

Si T es max, f(T) es max, por lo que se puede reescribir M_4 , M_5 , M_6 :

$$M_4 = D_2T_3 + D_2T_2 \quad M_5 = D_2T_2 + D_2T_1 + D_2T_3 \quad M_6 = D_1T_1 + D_1T_2$$

Conociendo el comportamiento modelado como una recta, se puede describir D(T) así:

$$D(T) = \frac{D_{max} - D_{min}}{T_{max}} T + D_{min}$$

Se puede aproximar luego las distancias de las falanges como iguales:

$$D_1(T) = D_2(T) = D_3(T) = D(T)$$

Reemplazando los datos encontrados y resumiendo los momentos:

$$M_4 = \left(\frac{0.2T}{T_{max}} + 0.4 \right) (T_3 + T_2)$$

$$M_5 = \left(\frac{0.2T}{T_{max}} + 0.4 \right) (T_3 + T_2 + T_1)$$

$$M_6 = \left(\frac{0.2T}{T_{max}} + 0.4 \right) (T_1 + T_2)$$

ANEXO 3. CIRCUITO OPTO-ACOPLADO

El circuito opto-acoplado diseñado permite que se adapte un Arduino ya sea UNO o MEGA. En la figura 38 se muestra el bosquejo realizado en Proteus, con el cual se realizaron las simulación del circuito, particularmente se comprobaron los divisores de voltaje, los cuales están conectados a los pines de captura análoga, y también se verifico el funcionamiento de la salida de los pines RX y TX los cuales permiten una fácil instalación de los módulos de conexión Bluetooth Bluesmirf Gold. Adicionalmente se probó el funcionamiento del Dip switch con el cual se puede prender la unidad y energizar los motores, finalmente se comprobó el funcionamiento de los opto acopladores a las salidas digitales. La tarjeta diseñada puede observarse en la figura 39 y el montaje de este diseño puede observarse en la figura 40.

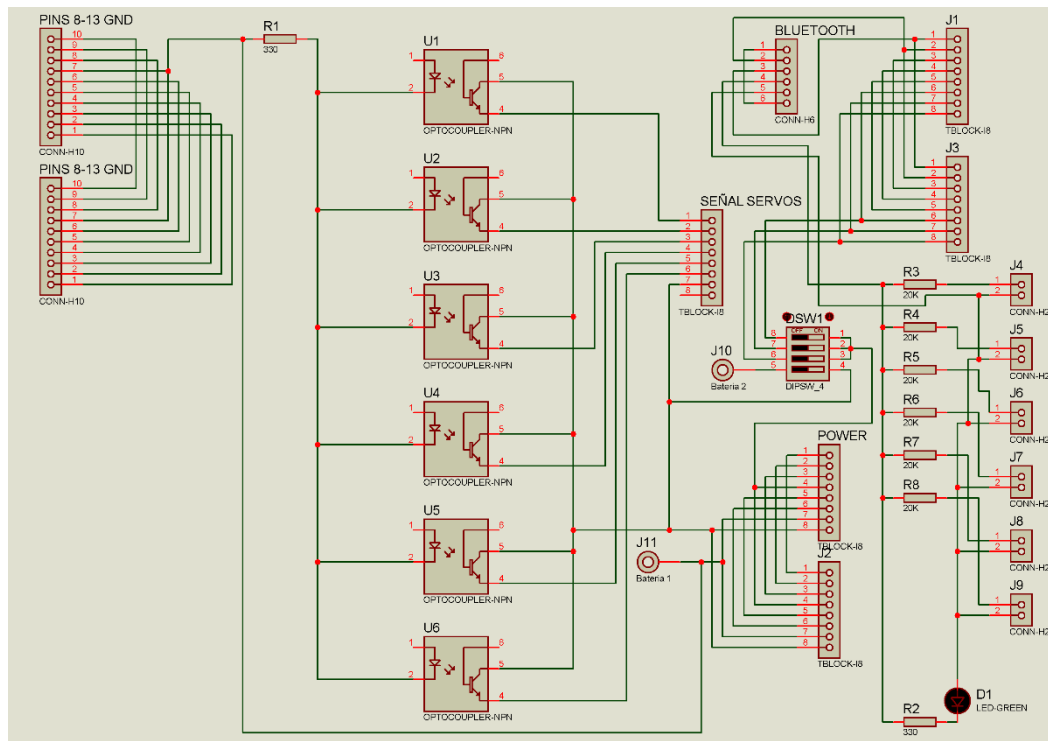


Figura 38 Simulación en Proteus del Circuito opto-acoplado

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ANEXO 4. PRUEBA DE EJECUCIÓN DE MANDOS PREDEFINIDOS

Para esta prueba se programó en el Arduino una secuencia a ser ejecutada por el prototipo, de tal manera que se pudiera observar algunos movimientos realizados por la mano mecatrónica. Se programaron por lo tanto algunos de los movimientos básicos que pueden ser efectuados con los seis grados de libertad desarrollados en el prototipo, adicionalmente la secuencia predefinida que se implementó permite evidenciar el movimiento independiente de cada dedo del sistema, algunos de los movimientos realizados por el prototipo en esta prueba se pueden observar en la figura 41, está secuencia fue ejecutada por el sistema sin ninguna dificultad y de manera óptima.



Figura 41 . Prueba de ejecución de mandos predefinidos

ANEXO 5. PRUEBA DE CARGA

En esta prueba se evaluó la capacidad de carga de la mano mecatrónica, poniendo un gancho en el prototipo, en el cual se puso el peso a ser resistido, en este gancho se fueron poniendo pesas de 100 gramos cada una, con esto se fue aumentando el peso paulatinamente, en la figura 42 se puede ver la secuencia de esta prueba. Luego de que en este gancho no se podía poner más pesos se agregó otro en el cual se fue poniendo más pesas de 100 gramos, en la figura 43 puede ser observada esta secuencia, el peso total resistido en esta prueba fue de 1025,81 gramos como lo muestra la figura 44.

Para llevar el sistema a una prueba de resistencia máxima se utilizó un peso de aproximadamente el doble al puesto en la prueba anterior, en esta se verifico tanto la resistencia de un dedo (figura 45), como de toda la mano (figura 46), la carga total resistida por el sistema en esta prueba fue de 1729,57 gramos como lo muestra la figura 47.



Figura 42 Prueba de peso con un gancho

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

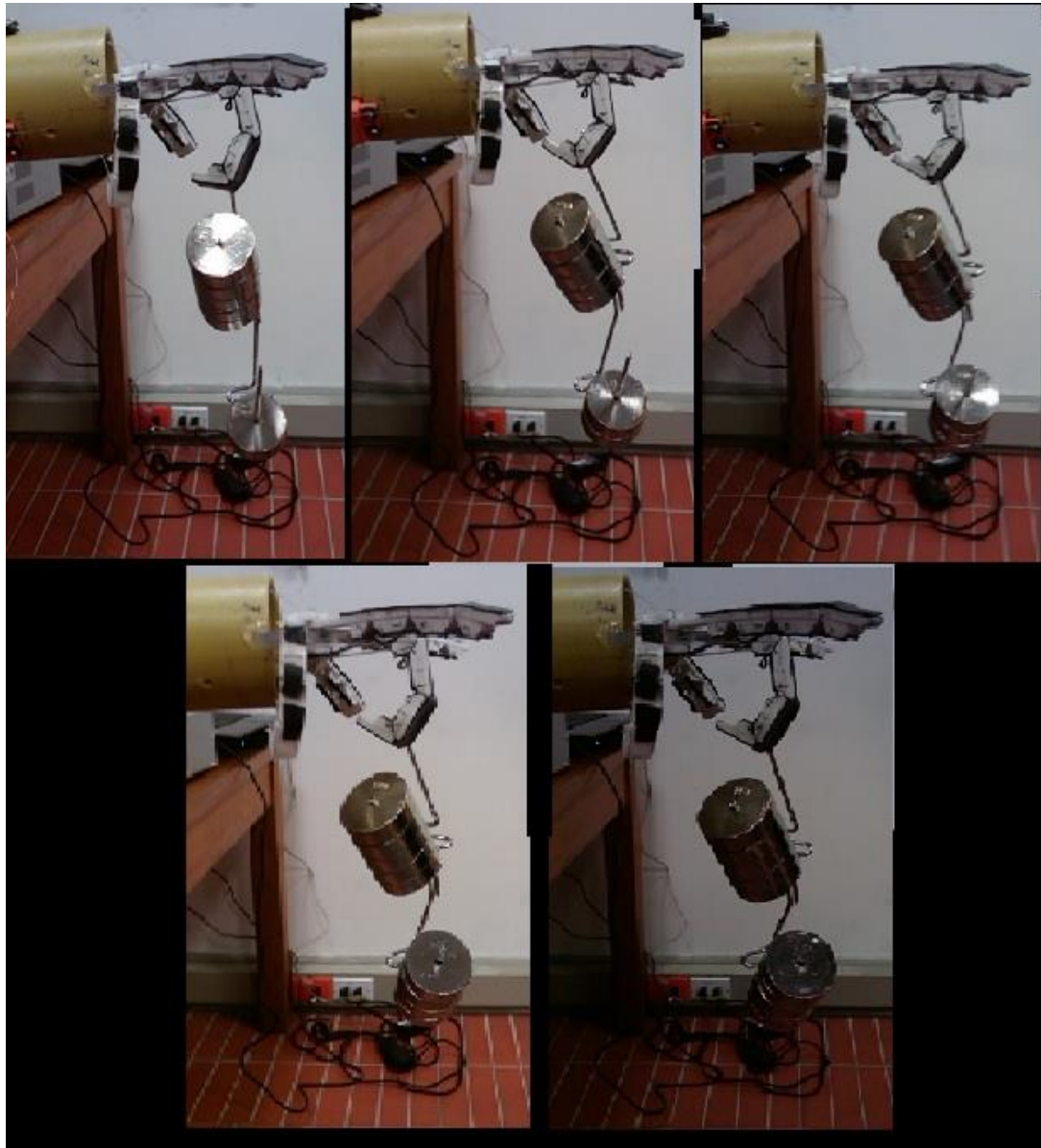


Figura 43 Prueba de peso con dos ganchos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Figura 44 Peso resistido



Figura 45 Prueba de carga máxima

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Figura 46 Prueba de resistencia de la mano



Figura 47 Peso máximo probado

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ANEXO 6. PRUEBA DE CAPACIDAD DE CONTROL CON GUAANTE

En esta prueba se comprobó la fidelidad de los movimientos en el guante instrumentado desarrollado y la respectiva ejecución del elemento final de control, tipo mano mecatrónica, en la figura 48 se puede observar algunos movimientos que se realizan con el guante, los cuales son ejecutados de manera correcta por el prototipo.

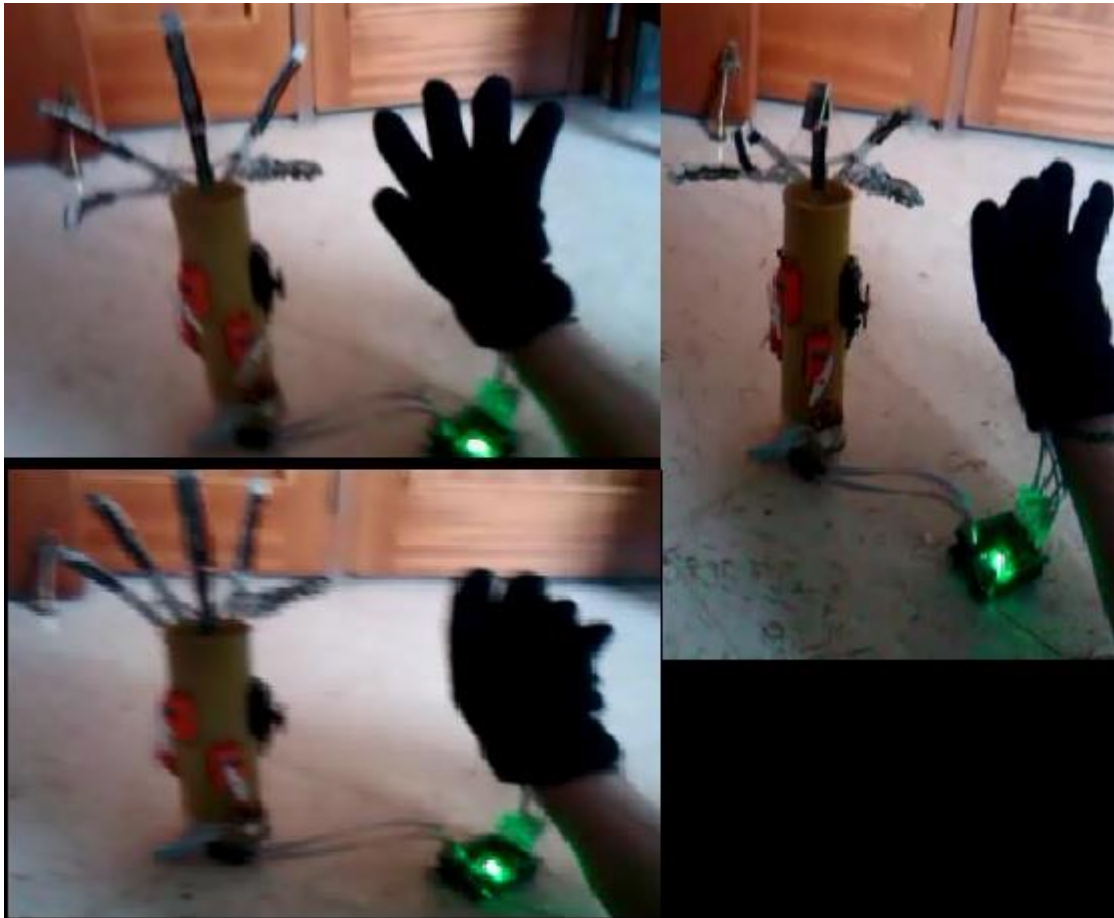


Figura 48 Prueba de capacidad de control con guante

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ANEXO 7. PRUEBA DE CAPACIDAD DE CONTROL INALÁMBRICAMENTE

En esta prueba se comprobó la programación de un dispositivo móvil tipo Android realizada, la cual permite por medio de comunicación Bluetooth operar la mano mecatrónica. La pantalla que permite operar el sistema con el celular se puede observar en la figura 49, y algunas imágenes de la prueba ejecutada pueden verificarse en la figura 50.

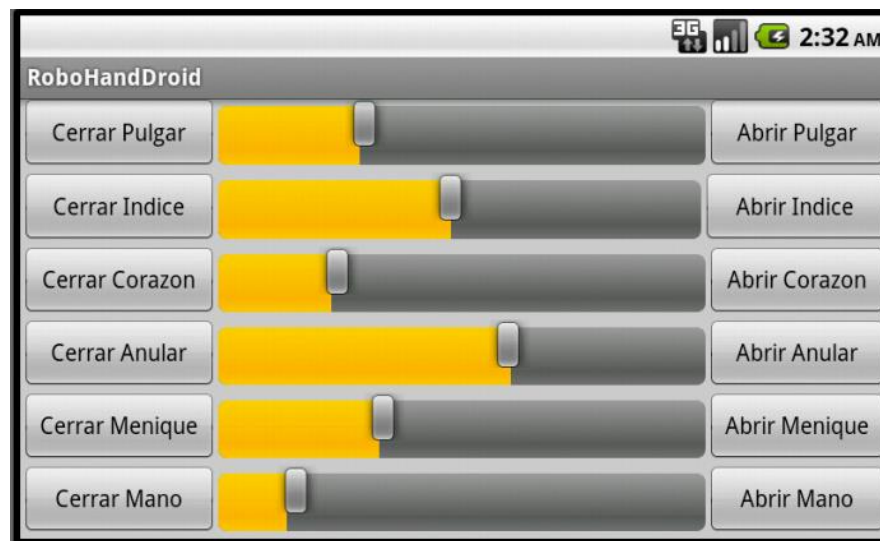


Figura 49 Pantalla del programa realizado en el celular

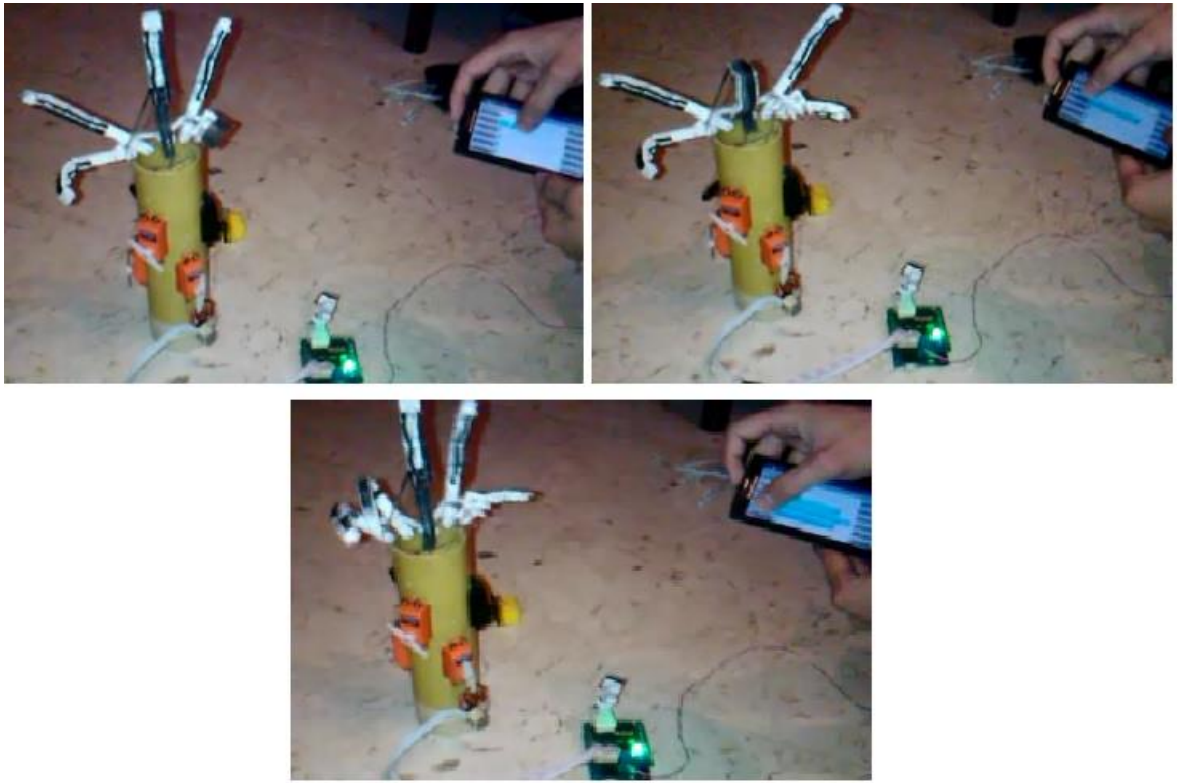


Figura 50 Prueba de capacidad de control inalámbricamente

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ANEXO 8. PRUEBA SOBRE VOLÚMENES GEOMÉTRICOS

En esta prueba se probó el funcionamiento del prototipo desarrollado en el agarre de algunos volúmenes geométricos, esta prueba se realizó sobre una esfera, una pirámide y un cubo, los cuales estaban compuestos de espuma, algunas imágenes de esta prueba se encuentran en la figura 51.



Figura 51 Prueba sobre volúmenes geométricos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ANEXO 9. PRUEBA EN ROBOT ABB IRB 140

En esta prueba se probó el funcionamiento del prototipo desarrollado, al adaptarlo en un robot ABB IRB 140, en la figura 52 se muestra una imagen de este funcionamiento, para esta prueba se realizó el programa pertinente en Robot Studio generando el RAPID para hacer el agarre y un recorrido sencillo de manera automática.

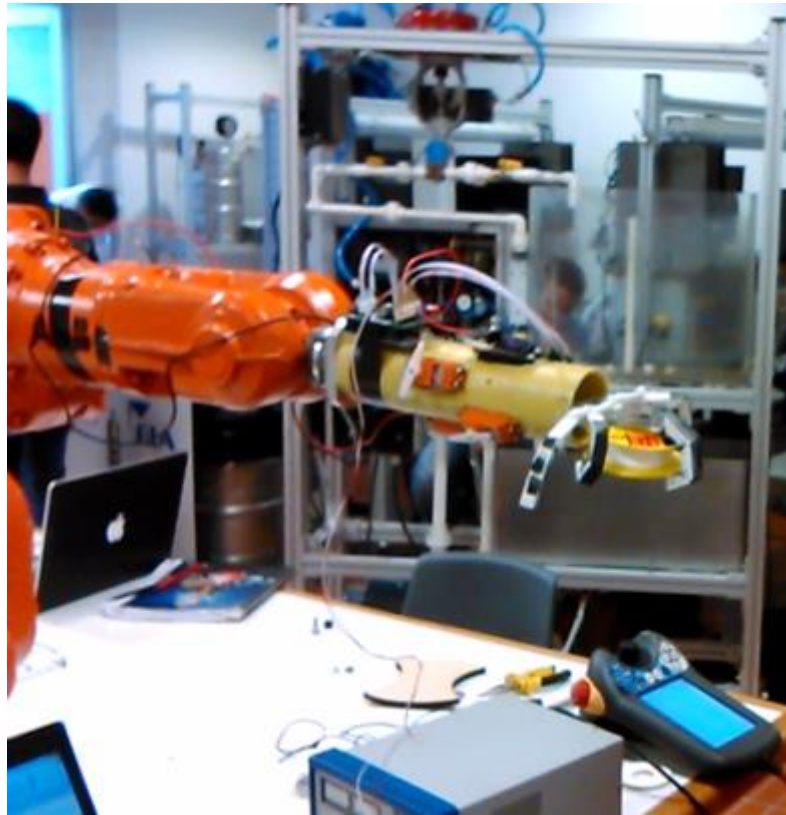


Figura 52 Prueba en Robot ABB IRB 140

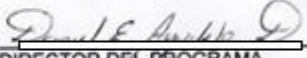
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

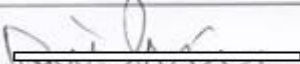



ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA

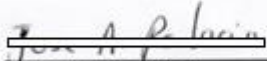
ACTA DE EVALUACIÓN FINAL DE TRABAJO DE GRADO

Fecha: (dd /mm / aa)	23 /11/ 2013						
Nombre del Proyecto:	Prototipo de Mano Mecatrónica para aplicaciones en Robótica Industrial						
Nombre del Director:	Daniel Felipe López Montes						
<table border="1"><tr><td>Nombre del estudiante</td><td>Programa académico</td></tr><tr><td>Brian Moreno Betancur</td><td>Ingeniería Mecatrónica</td></tr><tr><td>Esteban Velásquez Toro</td><td>Ingeniería Mecatrónica</td></tr></table>		Nombre del estudiante	Programa académico	Brian Moreno Betancur	Ingeniería Mecatrónica	Esteban Velásquez Toro	Ingeniería Mecatrónica
Nombre del estudiante	Programa académico						
Brian Moreno Betancur	Ingeniería Mecatrónica						
Esteban Velásquez Toro	Ingeniería Mecatrónica						
Nombre de los Jurado:	Mauricio Vásquez Carvajal José Alfredo Palacio						
Evaluación del proyecto: Espacio exclusivo para jurado							
<input type="checkbox"/> No aprobado <input type="checkbox"/> Aprobado sin mención							
<input checked="" type="checkbox"/> con Mención Pública <input type="checkbox"/> con Mención honorífica <input type="checkbox"/> Trabajo laureado							
Justificación del reconocimiento: (Artículo 28 del Acuerdo 11: "El director del Programa presentará el acta final de evaluación al Consejo Académico, donde consta la solicitud de mención especial debidamente justificada y el Consejo determinará si se otorga o no")							


DIRECTOR DEL PROGRAMA


DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO


JURADO (Si lo hubo)


JURADO (Si lo hubo)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.