



EFFECTOR FINAL AUTO AJUSTABLE PARA TAREAS DE PRENSIÓN

Jhon Alexander Rodríguez Torres

Director
Ing. Oscar Fernando Avilés Sánchez, Ph.D

Codirector
Ing. Oswaldo Rivera Rincón

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
SEDE BOGOTÁ
2018

Agradecimientos

Como primera instancia agradezco a mis padres quienes confiaron en mi durante todo este proceso, a mis hermanos por brindarme un apoyo, guiarme y ser un buen ejemplo, para mí ya que, gracias a ellos soy una persona de bien en este camino el cual se llama vida..

A mi novia, quien es la mejor compañera que puedo tener, quien siempre me brindo su mano ante cualquier circunstancia, quien estuvo conmigo en los momentos más cruciales de este proceso y quien me ayuda a ser mejor persona día a día.

Quiero agradecer muy especialmente al Dr. Oscar Fernando Avilés por confiar en mis capacidades y darme su especial guía, dedicación y paciencia .

A Angie Valencia quien se convirtió en una gran amiga y me brindo su ayuda en toda ocasión que necesite, por apoyarme y darme ánimos en todo momento.

Aquellos que conocí durante este camino y me han brindado su confianza y creyeron en mi. Mario, Edgar, Jorge, Juan David.

Por último, pero no menos, a Diego y Oswaldo, quienes siempre han estado y estarán conmigo para apoyarme y brindarme su mano cuando la necesité, en quienes siempre pude, puedo y podre confiar pese a cualquier cosa, con quienes compartí todo este camino y siempre me ayudaron afrontar las situaciones más adversas.

Contenido

Resumen	X
1. Introducción	6
1.1. Justificación	7
1.2. Estado del Arte	10
1.2.1. Barret Hand:	10
1.2.2. Consideraciones Anatómicas en el diseño de una Mano Artificial	10
1.2.3. Diseño e Implementación de Mecanismo de Presión para Mano Robot Antropomórfica	11
1.2.4. Gripper Multifuncional para Extracción de Granadas	11
1.2.5. Diseño y Construcción de un Dedo para Grippers robóticos	12
1.2.6. Desarrollo de UB Hand3 Early	13
1.2.7. Diseño e Implementación de una Mano Antropomórfica para Replicar las Funciones de Agarre Humano	13
1.2.8. Mano Protésica Antropomórfica de Bajo Costo Utilizando el Motor DC	14
1.2.9. Un Nuevo Método de Diseño de Manos Protésicas Antropomórficas para Reproducir el Agarre de la Mano Humana	15
1.3. Objetivos	16
1.3.1. Objetivo General	16
1.3.2. Objetivos Específicos	16
2. Generalidades y Conceptos	17
2.1. La Muñeca	17
2.1.1. Cinemática articular de la Muñeca:	17
2.2. La Mano Humana	18
2.2.1. Movimientos de la Mano	19
2.2.2. Facultad de prensión de la Mano	19
2.2.3. Arquitectura de la Mano	20
2.2.4. Separación de los dedos	21
2.2.5. Dedo índice.	22
2.2.6. Dedo Pulgar	23
2.3. Ángulos de la Mano Humana	24
2.4. Tipos de Prensión de la Mano Humana	24
2.5. Modelo Dinámico del Dedo Humano	26
2.5.1. Trayectoria dedo índice	30

3. Mecanismos de Transmisión	31
3.1. Mecanismos de Barras	31
3.1.1. Ventaja Mecánica Mecanismo de Barras	33
3.2. Mecanismo con motor en cada Juntura	34
3.2.1. Ventaja Mecánica Motor en cada Juntura	34
3.3. Mecanismo con Poleas-Correas.	34
3.3.1. Ventaja Mecánica Polea-Correa	36
4. Diseño Mecánico	38
4.1. Mecanismo de 4 barras	38
4.2. Cálculo del Mecanismo de 4 Barras	39
4.3. Cálculo de Velocidades del Mecanismo	45
4.4. Diseño CAD.	47
4.5. Ensamble y Simulación	47
4.5.1. Pieza 1 - Metacarpo	48
4.5.2. Pieza 2 - Falange Proximal	48
4.5.3. Pieza 3 - Barra 6	49
4.5.4. Pieza 4 - Articulación Interfalángica Proximal	49
4.5.5. Pieza 5 - Falange Medial	50
4.5.6. Pieza 6 - Barra 8	50
4.5.7. Pieza 7 - Falange Distal	50
4.5.8. Pieza 8 - Barra 3	51
4.5.9. Pieza 9 - Barra 2	51
4.5.10. Simulación de Trayectoria	52
4.5.11. Simulación velocidades de cada falange.	53
4.5.12. Simulación trayectoria ensamble.	54
4.5.13. Selección de Actuadores	56
5. Modelado Biomecánico	57
5.1. Cinemática	57
5.1.1. Cinemática Directa	57
5.1.2. Convención Denavit-Hartenberg	58
5.1.3. Cinemática Inversa	63
5.1.3.1. Solución de un Manipulador Planar de Tres Eslabones.	63
5.2. Espacio de Trabajo	65
6. Implementación	67
6.1. Prototipado Rápido	67
6.2. Control de Posición	67
6.2.1. Modelado del Motor	68
6.3. Interfaz Gráfica	73
6.4. Sistema Eléctrico y de Potencia	75
6.4.1. Comunicación	75
7. Resultados	76
7.1. Ensamble del Efecto Final y Pruebas.	76
7.2. Comparación trayectoria descrita por el dedo Humano y el Efecto final	78
7.3. Ángulos de Entrada vs Ángulos de Salida.	78
7.4. Taxonomía descrita por el Mecanismo Simulación.	79
7.4.1. Agarres de Fuerza Prensil	79

<i>CONTENIDO</i>	V
7.4.2. Agarre de Fuerza no Prensil	80
7.4.3. Agarre de Precisión Circular	81
7.4.4. Agarre de Precisión Prismático	81
7.5. Taxonomía descrita por el Mecanismo Implementación.	82
7.6. Agarre Máximo	83
7.7. Ajustes Finales	84
8. Conclusiones	86
A. Planos Piezas	92

Lista de figuras

1.1. Categorías de Presión definidas por Schñesinger. [1]	8
1.2. Presión de un objeto con los 5 dedos. [2]	8
1.3. Mano estirada con sus respectivos componentes palmares. [3]	9
1.4. Arcos formados por la mano al retener un objeto voluminoso. [3]	9
1.5. Barret Hand. [4]	10
1.6. Dedo índice hecho con resina y movimiento sub actuado. [5]	11
1.7. Mano Adaptativa. [6]	11
1.8. Gripper Multifuncional. [7]	12
1.9. Vistas de dedo sub actuado. [8]	13
1.10. UB Hand 3: Early Results. [9]	13
1.11. Dedo Índice Prótesis [10].	14
1.12. Implementación Prótesis Antropomórfica [10].	14
1.13. Mano Fabricada en ABS [11].	15
1.14. Prototipo final Mano protésica [11].	15
1.15. Mano antropomorfa actuada por mor motores en la palma de la mano [12].	16
2.1. Planos y movimientos de la muñeca. [3]	17
2.2. Presión sobre la muñeca. [13]	18
2.3. Movimientos de la Mano. [14]	19
2.4. Nomenclatura de las diferentes direcciones de acción del dedo índice. [15]	20
2.5. Huesos de la mano. [3]	20
2.6. Ejes de la mano en reposo. [3]	21
2.7. Ejes de la mano abierta. [3]	21
2.8. Arcos de movilidad de la articulación Interfalángica proximal: flexión y extensión. [16]	22
2.9. Arcos de movilidad de la articulación interfalángica distal: Flexión y Extensión. [16]	22
2.10. Abducción y Aducción de los dedos. [3]	23
2.11. Movimiento del pulgar 90°-120°. [13]	23
2.12. Articulaciones dedo índice. [17]	24
2.13. Agarre como parte de una taxonomía	25
2.14. Tipos de Agarre. [18]	25
2.15. Taxonomía de Cutcosky. Combinaciones de agarres de potencia y precisión. [19]	26
2.16. Referencias para los ángulos de flexión y extensión. [20]	27
2.17. Trayectoria descrita por un dedo índice. [21]	30
3.1. Mecanismo 4 barras. [22]	33
3.2. HIT/DLR Dexterous. [23]	34
3.3. Mecanismo Polea-Correa.	35
3.4. Dedo implementado Polea-Correa. [24]	37

4.1. Mecanismo Dedo índice. [8]	39
4.2. Distancias de las Falanges.	39
4.3. Ejes de articulación y perfil del dedo.	40
4.4. Seguimiento de trayectoria. [25]	40
4.5. Trayectoria descrita por el dedo índice en un agarre cilíndrico.	41
4.6. Mecanismos 4 barras. [8]	41
4.7. diseño y posición del mecanismo de 4 barras previamente calculado.	44
4.8. Simulación Mecanismos de 4 barras acoplados y trayectoria en <i>Linkage</i> .	45
4.9. Ensamble Final.	47
4.10. diseño CAD Metacarpo.	48
4.11. diseño CAD Falange Proximal.	48
4.12. diseño CAD Falange Proximal.	49
4.13. diseño CAD Articulación Interfalángica Proximal.	49
4.14. diseño CAD Falange Medial.	50
4.15. diseño CAD Barra 8	50
4.16. diseño CAD Falange Distal.	51
4.17. diseño CAD Falange Distal.	51
4.18. diseño CAD Eslabon Ternario.	52
4.19. Trayectoria descrita por el dedo.	52
4.20. Velocidad falange Proximal.	53
4.21. Torque ejercido por el Motor.	53
4.22. Velocidad Falange Distal.	54
4.23. Velocidad Falange medial.	54
4.24. Trayectoria Ensamble.	55
4.25. Fuerza del motor que realiza el movimiento de oposición.	56
5.1. Descripción de la posición y orientación del marco del efector final [26].	58
5.2. Denavit-Hartenberg Parámetros cinemáticos [27].	59
5.3. Manipulador planar de tres eslabones [28].	61
5.4. Cinemática Directa.	63
5.5. Manipulador planar de tres eslabones	64
5.6. Espacio Trabajo efector final.	66
6.1. Esquema de bloques de un Servomotor de Posición.	68
6.2. Diagrama Motor DC.	69
6.3. Esquema de bloques de un Servomotor de Posición.	70
6.4. Posición cerrada.	71
6.5. Segunda Posición	72
6.6. Tercera Posición	72
6.7. Interfaz Grafica.	73
6.8. Visualización 3D.	74
6.9. Visualización 3D.	74
6.10. Parámetros Actuador.	75
6.11. Relación Ciclo Util-ángulo.	75
7.1. Ensamble Físico Dedo 1.	76
7.2. Ensamble Completo.	77
7.3. Cinemática Directa Implementación.	77
7.4. Comparación de Trayectorias.	78
7.5. Taxonomía de Agarres Envoltura con Fuerza	80

7.6. Taxonomía de Agarres Envoltura Circular	80
7.7. Empuje de plataforma. (15)	81
7.8. Agarre de Precisión Circular	81
7.9. Agarre de Precisión Prismático	82
7.10. Agarre de Fuerza Prensil Circular.	82
7.11. Agarre de Precisión Circular.	83
7.12. Agarre de Fuerza Prismático	83
7.13. Agarre de Fuerza Prismático	84
7.14. Mano Extendida.	84
7.15. Movimiento Pulgar.	84
7.16. Oposición Pulgar.	85

Índice de tablas

2.1. Articulaciones y límites de la mano humana. [17]	24
3.1. Juntas Cinemáticas. [29]	32
4.1. Consideraciones Elección Mecanismo.	38
4.2. Ángulos para la falange Medial θ_1 y θ_3 . [21]	43
4.3. Características motor TowerPro MG90S.	56
4.4. Características motor Dynamixel Ax-12A.	56
5.1. Parámetros D-H Dedo índice.	61
7.1. ángulos Articulación Metacarpiana Mecanismo Físico	78
7.2. ángulos Falange Proximal Mecanismo Físico	79

Resumen

En la presente tesis se muestra la manera en la cual se realiza la construcción de un efector final auto ajustable para tareas de prensión, a partir de un mecanismo de 4 barras cruzado, el cual tiene el propósito final de asemejarse a una mano humana. Este comprende 3 dedos semejantes al dedo índice, donde el primer dedo tiene 4 grados de libertad, el segundo y tercer dedo tienen 3 grados de libertad. El grado extra en el primer dedo es con el fin de realizar la función de dedo índice y dedo pulgar realizando una rotación sobre la palma del efector final de 180° . Para el desarrollo de este efector final se tuvieron en cuenta los diferentes tipos de prensión o agarres que un efector final puede ejecutar, el comportamiento dinámico que un dedo humano posee para observar como es el movimiento de cada falange y finalmente la trayectoria de este. Se muestran diferentes características y la importancia de las articulaciones en el movimiento de la mano. En las características de la mano se estudian los diferentes tamaños y longitudes de manos humanas con el fin de entregar una geometría aproximada para la implementación de los dedos del efector final. Se estudia la capacidad y posición que debe ocupar cada dedo en el mecanismo para ejecutar de mejor manera las trayectorias de cada uno de estos. Posteriormente se evalúan los mecanismos de transmisión más comunes en manipuladores y efectores finales con el fin de evaluar todas las posibilidades de diseño y calcular las velocidades y posiciones que las barras desarrollaran durante el proceso de la trayectoria.

Para el diseño mecánico del efector final se toman las longitudes descritas y se plantea el mecanismo de cuatro barras y su ubicación en el sistema. Se obtienen las posiciones de cada falange y con estos datos se realiza el cálculo de las velocidades de cada barra para establecer el tipo de mecanismo. Se profundiza en los grados de libertad que posee el mecanismo y cuantos actuadores son necesarios para el movimiento de este. En la etapa de ensamble y simulación se muestra cada pieza con su espacio en el ensamble mostrando la construcción de un dedo y se explica el funcionamiento de cada barra dentro del mecanismo. Ya con el ensamble del efector final se realiza la simulación de las trayectorias mostrando las diferentes trayectorias posibles que puede tener el mecanismo completo. Con la simulación de trayectorias se evaluó el comportamiento dinámico del mecanismo con el fin de seleccionar el actuador que cumpla con los requerimientos del mecanismo.

Se utiliza la convención de Denavit - Hartenberg para realizar la solución al problema de la cinemática directa e inversa del efector final el cual por su arquitectura de 3 articulaciones rotacionales se asemeja a un manipulador planar de tres grados de libertad RRR. Con la obtención y simulación de la cinemática del mecanismo se lleva a cabo la implementación del mecanismo. En la etapa de control de dicho mecanismo, se planteó el cálculo del controlador sobre el modelo dinámico interno del actuador con el fin de obtener una simulación y entender el funcionamiento de este. Dentro de las estrategias de control se estableció que se requiere un control por re alimentación de estados para obtener la velocidad y aceleración del mecanismo en cada punto de la trayectoria.

Finalmente se elabora la interfaz gráfica la cual permite posicionar el mecanismo de la manera deseada y observar el movimiento del mecanismo.

Capítulo 1

Introducción

Cuando se desea realizar una aplicación donde se necesite manipular objetos es necesario resolver problemás como la inmovilidad y la planificación de agarre, involucrando directamente al objeto que se manipulara [1].

Si se desean manipular objetos de diferente tamaño, material o forma en la mayoría de los casos es necesario cambiar el efector final que entra en contacto con la pieza de trabajo llegando a retardar el trabajo.

Un robot para manipulación de objetos desconocidos posee varias configuraciones posibles dependiendo de los objetos a manipular ya sea por su tamaño, forma o material. Los robots para manipulación de objetos desconocidos o para neutralizar bombas como tEODor Robot del Ejército Español [30], RMI-9XD Robot Anti-Bombas Canadiense [31] y Robot Allen Vanguard Digital MKIII Colombiano [32]. Como se observa en cada uno de los robots, estos poseen un efector final tipo mecánico y universal [1], los cuales no tienen una complejidad computacional de planificación de agarre y son sencillos a la hora de su implementación, pero no tienen un amplio margen de prensión debido a que sus articulaciones son auto centrales lo que dificulta manejar objetos de forma irregular. Para estos casos se tendría que cambiar el efector final, pero esto no es muy eficiente o recomendable. Para solucionar la problemática de manipular diferentes objetos sin cambiar el efector final se propone un efector final auto ajustable tipo Barret [4] el cual puede adaptarse a diferentes formas de objetos como una mano robótica “Multi-fingered” pero sin la complejidad de sus 5 dedos y su forma antropomórfica¹ [33].

La complejidad se reduce ya que, un efector final tipo Barret [4] solo cuenta con 3 dedos: 2 dedos móviles y 1 dedo fijo el cual se comporta como pulgar ya que, se opone a los otros dos dedos, pero también puede comportarse como un dedo índice dependiendo de la configuración que se le de al prototipo. Estos dedos al ser móviles pueden abarcar diferentes posiciones las cuales repondrán la fuerza o agarre faltante por los otros dos dedos [34].

La organización del documento se encuentra de la siguiente manera, el capítulo 2 Abarca términos como la anatomía de la mano humana, la facultad de prensión, arquitectura, cinemática articular, Biomecánica de la mano, la extensión de los dedos, el dedo pulgar, movimientos de oposición del pulgar, Funciones de la Mano y los diferentes modelos de prensión con sus características. Necesarios para el desarrollo del mecanismo propuesto. El capítulo 3 abarca algunos de los mecanismos usados para la transmisión de movimiento de manipuladores o manos robóticas. Se realiza la comparación entre los mecanismos partiendo de las características necesarias para el desarrollo del movimiento del efector final, también se tendrán en cuenta diferentes aspectos como tamaño, fuerza y costo entre otras. Se da una breve explicación de cada mecanismo y las bases para su cálculo. El capítulo 4 Se muestra la manera en la cual se realiza la selección del mecanismo partiendo de las características

¹Movimientos de forma igual o semejante a los de una mano humana.

mencionadas en el capítulo 3. También se muestra el mecanismo del cual se basó para la realización de este efector final y el cálculo paso a paso del diseño de éste como los ángulos y las longitudes de las falanges. Se muestra la posición de cada articulación y la manera en la que se transmite la velocidad y fuerza en cada punto del mecanismo. Basándose de los diseños mecánicos se crea el diseño CAD para posteriormente la elaboración del efector final. Por último se seleccionan los actuadores partiendo de las simulaciones de movimiento del mecanismo completo. El capítulo 5 comprende la cinemática es un tema importante para la implementación y desarrollo de un manipulador robótico. En este capítulo se explica y se realizan los cálculos de las cinemáticas del efector final tratando cada dedo como un robot manipulador RRR. Se realiza la simulación en MATLAB® de la trayectoria descrita mediante para obtener las matrices y posiciones específicas del efector final. Por último se realiza el modelo dinámico de la mano humana el cual se utiliza para la generación y control de velocidades de los dedos. En el capítulo 6 Se muestra el material y manera en la que se realizó la implementación del mecanismo. Se muestra la manera en la que se diseñó la interfaz gráfica, la visualización 3D del mecanismo, las características del controlador y su simulación abarcando los 3 estados del motor como lo son posición, velocidad y aceleración. Se muestra el diseño del circuito electrónico para el funcionamiento del mecanismo conjunto a la interfaz gráfica. El capítulo 7 comprende los resultados obtenidos partiendo de los cálculos, simulaciones y la implementación del mecanismo.

1.1. Justificación

Desarrollar e implementar una mano robótica antropomórfica es complejo, debido al mecanismo de la articulación de cada dedo, la fuerza que debe ejercer para la manipulación del objeto y su elevado costo al implementar los 5 dedos que imiten el movimiento de una mano humana, cual consta de 3 dedos, esto reduce esa complejidad debido a que se omiten 2 dedos o mecanismos en el efector final, este tipo de efector final es capaz de abarcar la mayoría de los movimientos de la mano, puede ser más pequeña y la manipulación de los objetos con este tipo de mano no-antropomórfica se asemeja en fuerza y agarre a una mano robótica antropomórfica, como lo demuestran en este artículo [#5], donde se investigó la manipulación robótica de objetos de diferente forma y se evaluaron las acciones básicas como agarrar y colocar, donde una mano robótica antropomórfica lo hacía de una manera muy sutil y precisa, pero la mano robótica de 3 dedos tenía una integración eficiente respecto a la mano antropomórfica, esto quiere decir que comparado a los movimiento, objetivo y finalidad lo hacía de manera muy acertada.

Uno de los aspectos importantes a precisar cuándo se utiliza una mano robótica para el agarre o manipulación de piezas, consiste en definir la forma que adopta la mano humana dependiendo el objeto. Para los efectores finales con características comunes [1]. Se deben tener en cuenta las restricciones impuestas por el objeto como la forma más optima de sostenerlo y el equilibrio para retenerlo. Las diferentes categorías de prensión las cuales fueron descritas por Cutkosky [2]son: Agarre cilíndrico (*cylindrical grasp*), de punta (*tip*), de gancho (*hook*), de palma (*palmar*), esférica (*spherical grasp*) y de lado (*lateral*) como podemos observar en la figura 1.1.



Figura 1.1: Categorías de Prensión definidas por Schñesinger. [1]

El momento mecánico que deben ejercer los dedos para la manipulación de un objeto y mantenerlo en equilibrio debe ser igual a cero, en la figura 1.2 podemos observar como la mása con un peso (W) realiza una fuerza en dirección negativa y con la mano realiza una fuerza opuesta para mantener el objeto en equilibrio. Para realizar este tipo de agarre con la mano de 3 dedos, se debe asegurar que ejerza la misma fuerza en magnitud y dirección que la mano humana.

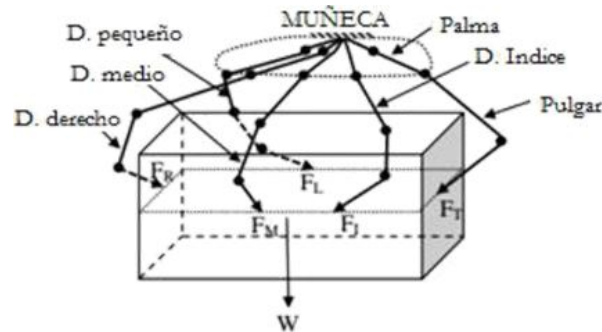


Figura 1.2: Prensión de un objeto con los 5 dedos. [2]

Como se mencionó anteriormente se deben tener en cuenta las restricciones que tiene el objeto y el tipo de prensión que se realizara, ya que, se debe adoptar la posición de los dedos a la forma del objeto por ejemplo, si se desea manipular un objeto plano como puede ser un cristal la mano se expande y se aplatana ver figura 1.3, en la cual la presión o las caras que intervendrán directamente con el objeto son la eminencia tenar 1, la eminencia hipotenar 2, la cabeza de los metacarpianos 3 y la cara palmar de las falanges 4, realizando una distribución de posición de nuestros 3 dedos para abarcar más geometría de nuestro objeto deseado. Ahora si se desea realizar la manipulación de un objeto voluminoso la mano forma unos arcos orientados en 3 direcciones [3]:

En sentido transversal ver figura 1.4, el arco longitudinal y en sentido oblicuo. Los 3 tipos de prensión son principalmente caracterizados por el arco que realiza el dedo pulgar (Dedo 1) el dedo corazón (Dedo 2) y el dedo meñique (Dedo 3), para este ejemplo, se puede evidenciar que solo es necesario el uso de 3 dedos para este tipo de prensión ya que, los dos dedos faltantes se utilizan como soporte [3]. Para este tipo de prensiones, la mano forma bordes constituidos por el pulgar (Dedo 1) el cual constituye el borde externo y el índice (Dedo 2) y meñique (Dedo 5) que limitan el borde interno, con los cuales se pueden desplegar los cuatro arcos oblicuos necesarios para este tipo de prensión.

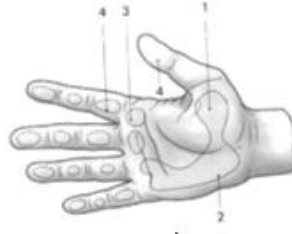


Figura 1.3: Mano estirada con sus respectivos componentes palmares. [3]

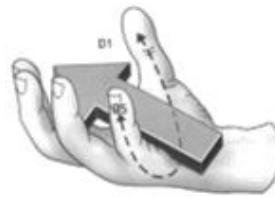


Figura 1.4: Arcos formados por la mano al retener un objeto voluminoso. [3]

Como se puede observar la mano realiza arcos fundamentales de los cuales se derivan los grupos de prensión a trabajar ya descritos anteriormente, con el mecanismo tipo Barret[4] se puede realizar este tipo de movimiento abarcando la fuerza necesaria para el agarre del objeto.

Los objetos en muchos casos no son de forma regular o con una geometría sencilla final y esto eleva la dificultad de prensión que deben ejecutar de los efectores finales más comunes los cuales se mencionaron anteriormente, ya que, no tienen la capacidad de movilidad y de planificación de agarre por la manera en la cual están hechos[1]. Las pinzas son diseñadas en su mayoría para cada forma de pieza y orientación; A menos que el brazo receptor realice perpetuamente la misma tarea, necesita un suministro variable de pinzas y la capacidad de cambiar entre ellas al instante a medida que cambian las formas y orientaciones de los objetos. Un mecanismo de tipo Barret [4] combina la funcionalidad que posee y puede adoptar combinaciones para diferentes tipos de objetos.

La versatilidad que ofrece este efector final es la adaptabilidad que posee para diferentes tipos de aplicaciones, ya que a menos que el manipulador realice perpetuamente la misma tarea, necesita un suministro infinitamente variable de efectores finales y la capacidad de cambiar entre estos al instante a medida que cambian las formas y orientaciones de los objetos. Una torreta esta limitada a cambiar entre 2 o 3 efectores finales y un cambiador de herramientas puede manejar una gran cantidad de efectores finales, los cuales tienen enormes costos por el espacio desperdiciado debido a los accesorios de almacenamiento y los tiempos de ciclo mal ejecutados. Con el mecanismo propuesto se reduce el espacio, costo de herramientas y tiempos de ciclo gracias a su adaptabilidad[35].

Este proyecto tiene la iniciativa de complementar el robot VALI perteneciente a la Universidad Militar Nueva Granada, el cual tiene el objetivo de manipular objetos extraños y peligrosos. Con el mecanismo y el apoyo del robot se logra disminuir la intervención humana en este tipo de aplicaciones con el fin de evitar accidentes que involucren personas.

1.2. Estado del Arte

1.2.1. Barret Hand:

Se trata de un efector final que consta de 3 dedos articulados, los cuales son totalmente autónomos. La integración con cualquier manipulador es rápida y simple. De sus tres dedos articulados, dos tienen un grado de libertad adicional con 180 grados de movilidad lateral sincrona que soporta una gran variedad de tipos de agarre [4]. Se puede observar el desarrollo debido que tiene este tipo de gripper en la figura 1.5.



Figura 1.5: Barret Hand. [4]

1.2.2. Consideraciones Anatómicas en el diseño de una Mano Artificial

Un aspecto importante a la hora de desarrollar un Gripper o efector final es la mano humana ya que, es un modelo insustituible, debido a su complejidad y versatilidad en la manipulación de objetos y ajustes posicionales. En esta investigación proponen el desarrollo de un dedo con 3 grados de libertad, teniendo en cuenta las propiedades de los cartílagos y ligamentos que recubren los extremos de los huesos en las articulaciones. Se tuvo en cuenta el tipo de material que cumplían las características biológicas de la mano. Logro desarrollar una mano virtual en la cual emulo la taxonomía de agarres. [5] En la figura 1.6 podemos observar el prototipo final de esta investigación en la cual se observa la semejanza a un dedo de la mano humana. En este se puede ver como la representación de los cartílagos (Color Blanco) y la representación de los tendones. Para el desarrollo de esta se realizó la debida cinemática directa e inversa y el modelado matemático de esta.



Figura 1.6: Dedo índice hecho con resina y movimiento sub actuado. [5]

1.2.3. Diseño e Implementación de Mecanismo de Prensión para Mano Robot Antropomórfica

La principal característica del Barret Hand es su re-configuración para la manipulación de objetos los cuales pueden tener diversas formas. Esta configuración la cual hace que sea un manipulador muy aplicativo ya que, no solo puede manipular objetos con formas definidas como lo puede ser un objeto cilíndrico, esférica o plano. En este artículo [6] realizan un manipulador re configurable, el cual tiene la capacidad de adaptarse a objetos de formas plana, esférica y cilíndrica, como se puede observar en la figura 1.7, en el cual la mano se adapta a una forma esférica. Para realizar la configuración del manipulador tratan directamente el dedo pulgar ya que, es el que da una gran cantidad de opciones o movimiento para el tipo de prensión.



Figura 1.7: Mano Adaptativa. [6]

1.2.4. Gripper Multifuncional para Extracción de Granadas

A medida que se avanza en la tecnología, los manipuladores finales “Grippers” tienden hacer más precisos con sus movimientos y trayectorias, así lo podemos notar en este documento [7] en el cual plantean un problema, este es extraer granadas incrustadas en miembros inferiores de soldados sin

exponer a todo un grupo medico durante el procedimiento de extracción de la misma. Para esto ellos realizan un control sobre la fuerza ejercida del manipulador sobre dicho objeto a retirar y otro control sobre la fuerza ejercida por los elementos del manipulador que realizaran la debida separación de tejidos e incisión. En la figura 1.8 se puede observar los eslabones más externos los cuales separan los tejidos y los eslabones más internos los cuales realizan la respectiva extracción.



Figura 1.8: Gripper Multifuncional. [7]

1.2.5. Diseño y Construcción de un Dedo para Grippers robóticos

Se debe tener en cuenta el diseño y modelo de los dedos humanos para realizar el respectivo prototipo e implementación dellos existen diversas maneras para diseñar estos tipos de dedos como pueden ser sub actuados, poleas y correas o con actuador directamente en cada articulación. En este trabajo desarrollaron estudios y diseños de una mano Robótica la cual imita los modelos prensiles humanos reduciendo el número de actuadores y costo de fabricación [8]. Este modelo de dedo puede ser muy útil para implementarlo debido a su baja complejidad de fabricación y su reducción de costo al minimizar el número de actuadores a utilizar como se mencionó anteriormente. En la figura 1.9 se puede observar el sistema de 4 barras por falange que posee, dando como resultado dos sistemas de 4 barras simultáneos.

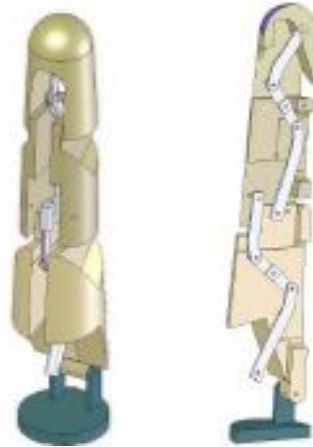


Figura 1.9: Vistas de dedo sub actuado. [8]

1.2.6. Desarrollo de UB Hand3 Early

Esta mano robótica antropomórfica fue desarrollada con eslabones rígidos conectados con bisagras elásticas, accionadas por vaina enrutada con tendones. Los tendones de este van directamente a la articulación y le permite operar las diferentes combinaciones que tiene la mano humana, pero la rigidez y fuerza del dedo no puede ser controlada del todo debido al sistema de bisagras que tiene implementad, en la figura 1.10 se puede observar la manera en la cual los tendones actúan sobre la falange distal flexionandola para que produzca el movimiento del dedo índice [9].



Figura 1.10: UB Hand 3: Early Results. [9]

1.2.7. Diseño e Implementación de una Mano Antropomórfica para Replacar las Fuciones de Agarre Humano

En este trabajo se diseño una mano antropomorfica con el objetivo principal de replicar las funciones de agarre de la mano humana, para esto establecieron un patron de agarres los cuales estan basados en

la taxonomía de cutcosky [19]. Con el movimiento, la fuerza y velocidad que la mano realiza en varios movimientos establecen un mecanismo de flexión y extensión. Para realizar los movimientos plantean un movimiento de flexión sub actuado mediante un mecanismo de polea-correa y para el movimiento de extensión proponen resortes para el retorno de los dedos a su posición de equilibrio o natural. Utilizan un actuador de entrada para el mecanismo de polea-correa como se puede ver en la figura 1.11 [10]. Se puede observar como las correas del mecanismo emulan las fuerzas de los tendones. Para realizar la trayectoria establecen las relaciones entre los centros de las poleas y los diámetros de esta para hacer el movimiento sub actuado.

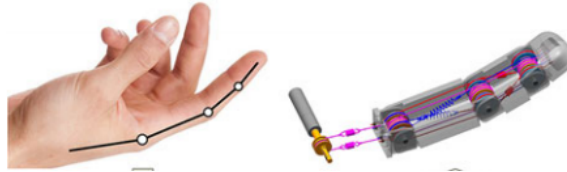


Figura 1.11: Dedo Índice Protésis [10].

En la figura 1.12 se observa la implementación final del prototipo donde utilizan un motor para el dedo índice, otro para el pulgar y otro para los 3 dedos restantes [10]. Además tiene el grado de libertad extra que posee el dedo pulgar para realizar el trabajo de oposición que posee este.

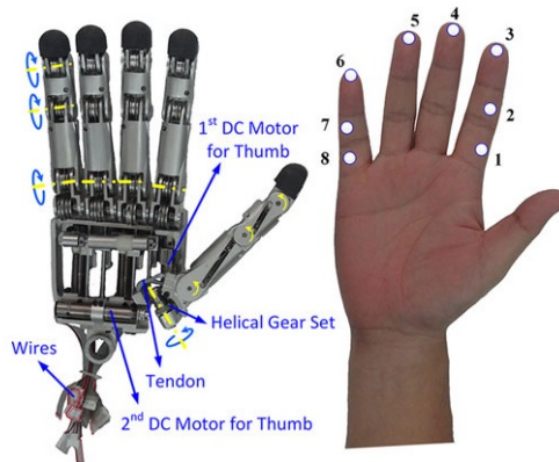


Figura 1.12: Implementación Protésis Antropomórfica [10].

1.2.8. Mano Protésica Antropomórfica de Bajo Costo Utilizando el Motor DC

Este trabajo se enfoca en el desarrollo de una mano protésica de bajo costo utilizando un motor de engranajes debido a que es un actuador de bajo costo, poco peso y es comercial. Para realizar el prototipo se basan en el material de 3D ABS el cual le permite al prototipo ser liviano, fácil de fabricar y se pueden reponer las partes muy fácil en caso de un daño [11]. En la figura 1.13 se puede observar el prototipo en ABS, donde implementan la muñeca, la palma y cada dedo de la mano humana.



Figura 1.13: Mano Fabricada en ABS [11].

El mecanismo de la mano se basa en un tendedor de resorte para realizar el movimiento de extensión y el motor con poleas para el movimiento de flexión. La mano protésica tiene cinco grados de libertad y dos articulaciones en cada dedo para realizar las actividades de la vida diaria, la mano está diseñada con siete patrones de agarre. En la figura 1.14 se observa el montaje final del prototipo de la mano.

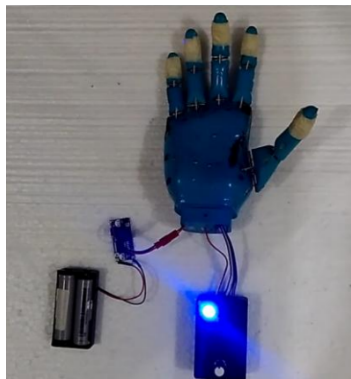


Figura 1.14: Prototipo final Mano protésica [11].

1.2.9. Un Nuevo Método de Diseño de Manos Protésicas Antropomórficas para Reproducir el Agarre de la Mano Humana

El planteamiento inicial de este proyecto es diseñar una mano protésica que pueda emular los complejos agarres de la mano humana para personas con amputaciones. En el trabajo se plantea la capacidad que puede tener una mano protésica dependiendo del número de actuadores que esta posea. Este trabajo [12] tiene como objetivo diseñar un mecanismo de transmisión con pocos motores que actúen sobre los dedos para que realicen el movimiento de agarre. Establecen un índice para evaluar la capacidad de movimiento antropomórfico de una mano protésica. Con base en la optimización del índice, determinaron el número de actuadores en los dedos y las relaciones de transmisión entre los actuadores y las articulaciones. En la figura 1.15 se observa la posición de los motores en la palma de la mano los cuales tienen una transmisión mediante piñones y un motor para realizar el movimiento de oposición del dedo pulgar.

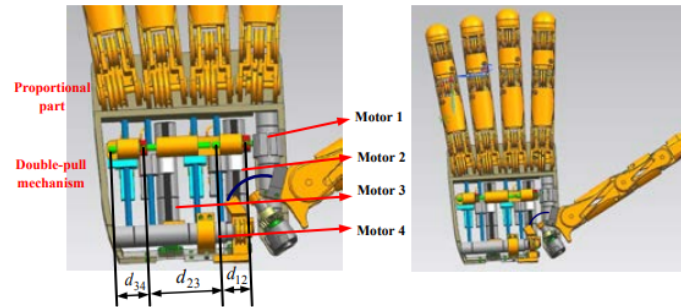


Figura 1.15: Mano antropomorfa actuada por cuatro motores en la palma de la mano [12].

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar un mecanismo artificial que permita emular los comportamientos de la mano humana en cuanto a agarres de sujeción y presión con el fin de manipular objetos de diferente geometría dentro del espacio de trabajo del prototipo.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Calcular los modelos cinemáticos que describen el comportamiento en posición articular X-Y-Z de los dedos que componen el prototipo y que son base para el diseño mecánico del dispositivo.
- Determinar los comportamientos dinámicos en cada articulación por medio de herramientas CAD que permita obtener el torque mínimo en el eslabón para la elección de los actuadores.
- Diseñar y construir un prototipo que permita emular los comportamientos de sujeción y presión de la mano humana a través de la implementación de mecanismos de cuatro barras.
- Establecer un lazo de control cinemático que garantice error en estado estable de cero para trayectorias de movimiento predefinidas las cuales garantizan los comportamientos de sujeción y presión deseados para ejecutar tareas requeridas por el usuario.

Capítulo 2

Generalidades y Conceptos

2.1. La Muñeca

Es una articulación la cual permite que la mano (segmente efector) adopte la posición óptima para la prensión. En la muñeca del miembro superior humano cuenta con dos grados de libertad. Con la pronosupinación, rotación del antebrazo sobre su eje longitudinal, que añade un tercer grado de libertad a la muñeca, la mano humana se puede orientar en cualquier ángulo para coger o sujetar un objeto. Los movimientos de la muñeca ver figura 2.1, se efectúan en torno a dos ejes [3]:

- - Un eje A' , transversal, perteneciente al plano frontal T . En torno a este eje se realizan los movimientos de flexión y extensión.
- - Un eje B' , perpendicular a el plano frontal T . En torno a este eje, en el plano frontal, se efectuar los movimientos de aducción y abducción.

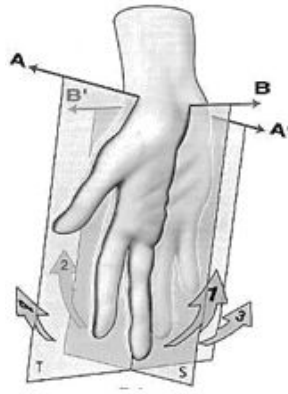


Figura 2.1: Planos y movimientos de la muñeca. [3]

2.1.1. Cinemática articular de la Muñeca:

Al estar compuesta de varias articulaciones como ya lo describimos anteriormente, todo movimiento global de esta debe considerarse como el resultado de la interacción y acumulación de los movimientos que ocurren en las distintas articulaciones que la componen. El conocimiento de la cinemática articular

de cada una de esas articulaciones o huesos en movimiento nos facilita la interpretación del movimiento de esta para lograr emularla, con sus capacidades y movimientos, ya que, es en donde empieza el movimiento y capacidad de prensión de la mano. Claro está que el enfoque del trabajo no se centra en la completa emulación de la muñeca, pero si debe tener en cuenta el patrón de movimiento y fuerzas que recaen sobre esta para realizar el debido movimiento de los dedos que se trabajaran, debido a a que toda actividad manual en la cual necesite contraer cualquier dedo de la mano, genera fuerzas axiales a compresión que serán transmitidas a los huesos del antebrazo a través de la muñeca, esto para que nuestro efector final tenga la facultad de ser utilizado en diversas aplicaciones disminuyendo el riesgo de daño al actuador que genera el movimiento de la muñeca o de la falange proximal [13]. También se demostró que por cada kilogramo-fuerza realizada con el puño cerrado el carpo recibe fuerzas a compresión de entre $5 - 7Kg - Fuerza$.

Con esta apreciación para el desarrollo del mecanismo, en el cual se emulará la mueca o la palma se debe tener cuenta la distribución entre las distintas articulaciones y actuadores para que no se produzcan concentraciones excesivas de fuerza que provoquen una fractura en el material o una contra corriente producida por un sobre torque en el actuador.

La muñeca para no sufrir cuando es sometida a estos tipos de presiones que deben ser absorbidas ya sea provocando un desplazamiento óseo Intracarpiano o disipándolas proximalmente sobre los huesos del ante brazo.

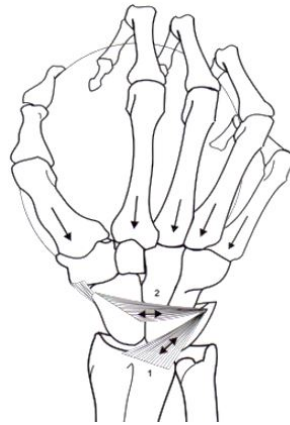


Figura 2.2: Presión sobre la muñeca. [13]

En la figura 2.2 se puede observar el comportamiento de la muñeca sometida a una carga axial, el cóndilo carpiano no se subluxa cubital mente, dada la presencia de los ligamentos radio carpianos palmares y dorsales (1), cuya oblicuidad de fuera adentro y de proximal a distal resulta perfectamente planeada para evitar dicha inestabilidad. Así mismo, la disposición transversa del ligamento transversal dorsal del carpo (2), junto a la acción de los ligamentos interóseos escafolunar y lunopiramidal, resulta especialmente eficaz para evitar que se produzcan separaciones entre los huesos de la hilera proximal, cuando ésta es comprimida por los huesos grande y ganchoso.

2.2. La Mano Humana

Es una herramienta capaz de ejecutar innumerables acciones gracias a su función principal la prensión.

La facultad de prensión se puede encontrar desde la pinza de cangrejo a la mano del simio, pero en ningún otro sé que no sea el hombre ha alcanzado este grado de perfección [3]. Esto se debe a la

disposición tan particular del pulgar, que se puede oponer a todos los demás dedos. Sin embargo, la mano no es solo un órgano de ejecución, también es un receptor sensorial extremadamente sensible y preciso cuyos datos son imprescindibles para su propia acción.

2.2.1. Movimientos de la Mano

Para el desarrollo del mecanismo es necesario tratar los movimientos naturales de la mano, con el fin de crear un mecanismo que se asemeje al movimiento natural de esta.

La flexión y la extensión del dedo se produce en las articulaciones metacarpofalángica (MF), Interfalángica proximal (IFP) e Interfalángica distal (IFD), mientras que la aducción y la abducción sólo se producen en las articulaciones metacarpofalángicas [14].

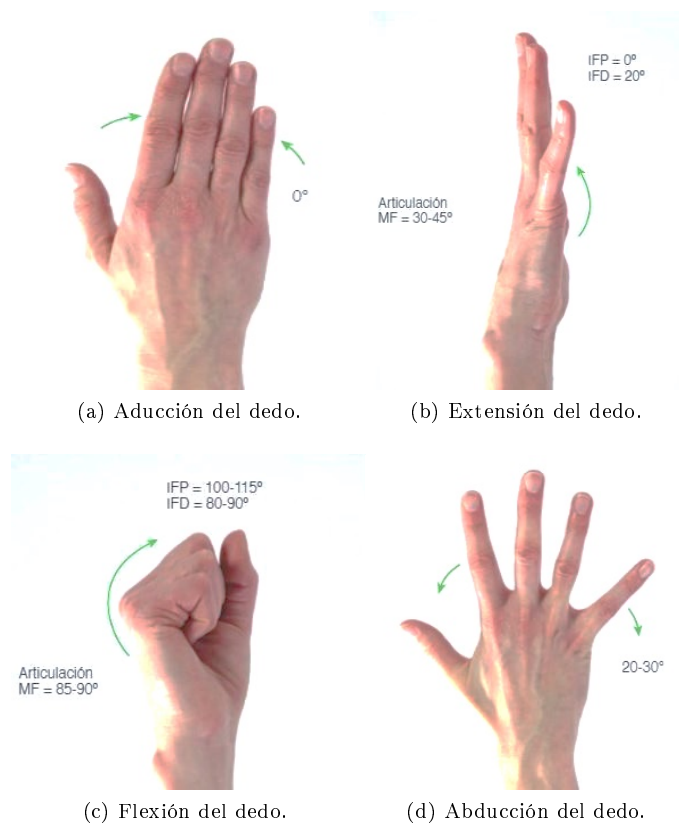


Figura 2.3: Movimientos de la Mano. [14]

Se puede observar en las figuras 2.3c, 2.3b, 2.3a y 2.3d los ángulos e intervalos de estos que pueden tomar los dedos en los movimientos básicos de la mano. La separación máxima de los dedos es de 30° y la distancia entre ellos depende de la longitud de cada uno de estos.

2.2.2. Facultad de prensión de la Mano

La facultad de prensión de la mano del hombre es gracias a la arquitectura que posee, la cual le permite tener una amplia apertura, como un cierre sobre si misma o en torno a un objeto. Generalmente

primero se coloca al objeto encima de la palma, flexionando la articulación MCP primero, luego la IFP y la IFD rodeando el objeto [15]. En la figura 2.4 se observan los diferentes nombres que se le dan a las direcciones en las cuales el dedo puede aplicar fuerzas.

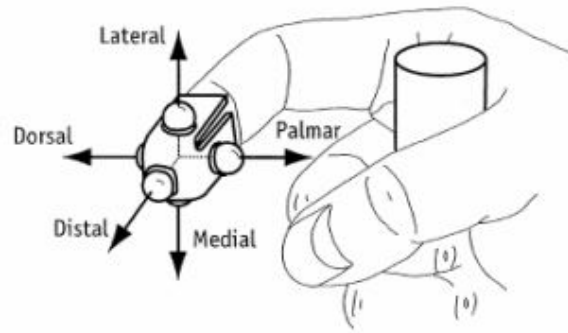


Figura 2.4: Nomenclatura de las diferentes direcciones de acción del dedo índice. [15]

2.2.3. Arquitectura de la Mano

La mano está constituida por 27 huesos que se agrupan en tres áreas distintas:

1. Huesos del Carpo (Muñeca).
2. Huesos del Metacarpo (Palma).
3. Huesos de los Falanges (Dedos).

Esta división de los huesos está compuesta por 8 carpelos en la muñeca, 5 metacarpelos en la palma y 14 falanges (cada dedo tiene 3, excepto el pulgar, que tiene 2) [3], ver figura 2.5.

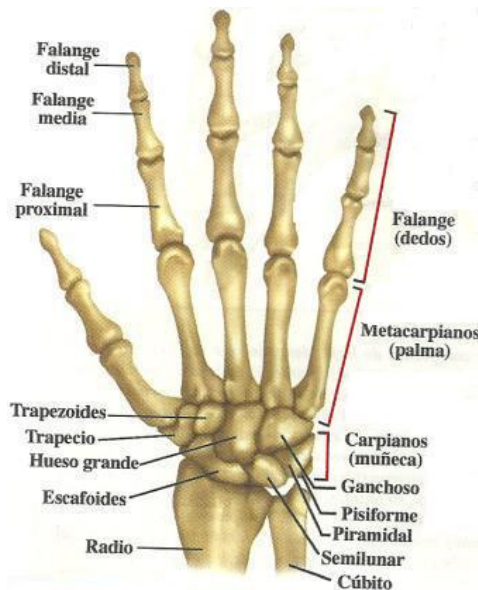


Figura 2.5: Huesos de la mano. [3]

2.2.4. Separación de los dedos

Cuando dejamos que la mano adopte su posición natural, el eje de cada uno de ellos converge con la base de la eminencia tenar, en un punto que corresponde aproximadamente al tubérculo del escafoides, fácil de palpar ver figura 2.6.

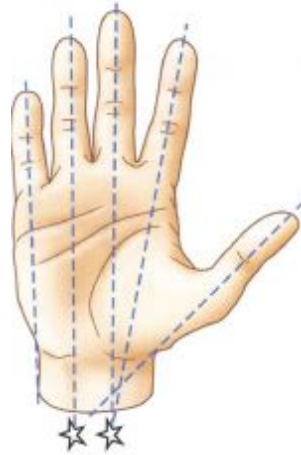


Figura 2.6: Ejes de la mano en reposo. [3]

Al separar los dedos ver figura 2.7, el eje de cada uno de ellos converge en un punto que corresponde aproximadamente al túberculo del escafoides. En la mano, los movimientos de los dedos en el plano frontal, movimientos de aducción-abducción, no se realizan habitualmente en relación al plano de simetría del cuerpo, sino en relación al eje de la mano, constituido por el tercer metacarpiano y el dedo corazón; entonces se habla de movimientos de separación.

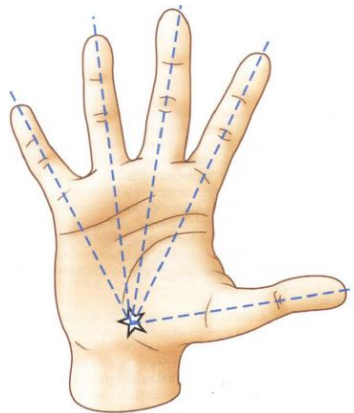


Figura 2.7: Ejes de la mano abierta. [3]

Lo anterior es útil para realizar el movimiento sobre el eje correcto de cada dedo y que la oposición del pulgar sea lo más acertada posible.

2.2.5. Dedo índice.

El movimiento de los dedos se mide en términos del grado máximo de flexión hasta el grado máximo de extensión, es importante observar que la hiperextensión esta medida con un ángulo negativo, por lo tanto, el rango total del movimiento de cada uno de los dedos se determina restando el ángulo de extensión del ángulo de flexión[16].

El movimiento de las articulaciones interfalángicas y metacarpofalángicas del dedo pulgar está determinado de la misma forma que los demás dedos, empleando el criterio anterior para cada una de las articulaciones.

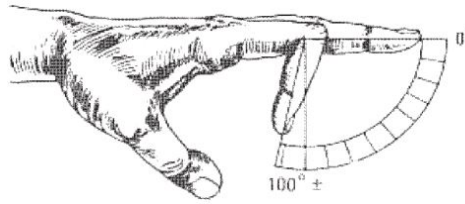


Figura 2.8: Arcos de movilidad de la articulación Interfalángica proximal: flexión y extensión. [16]

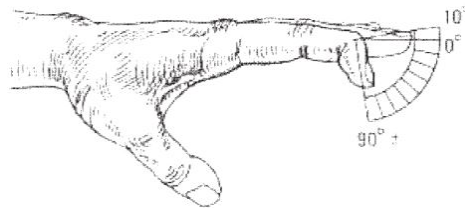


Figura 2.9: Arcos de movilidad de la articulación interfalángica distal: Flexión y Extensión. [16]

Durante la flexión normal de los dedos, éstos se encuentran juntos en movimiento continuo y tocan la palma aproximadamente al nivel del surco palmar distal, como se muestran en las figuras 2.8 y 2.9. En la extensión normal los dedos se mueven de forma conjunta y se extienden hasta la posición recta. Para la falange distal debemos tener en cuenta que su grado máximo de apertura será 90° respecto a la falange medial y la falange medial puede tener un ángulo máximo de 100 grados respecto a la falange proximal.

La abducción y la aducción se miden a partir de la línea axial de la mano, todos los dedos se separan en arcos aproximadamente de 30°, mientras que en aducción se junta y tocan entre sí, como se muestra en la figura donde se puede hablar de abducción A y aducción B como se puede ver en la figura 2.10 [3].



Figura 2.10: Abducción y Aducción de los dedos. [3]

2.2.6. Dedo 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. El pulgar posee cuatro articulaciones: La del escafoides con el trapecio, la trapecio metacarpiana, la metacarpo falángica, la interfalángica, dándoles en total cinco grados de libertad que permiten realizar la operación de oposición del pulgar.

El dedo parte de su posición inicial en extensión máxima, con la palma abierta, se coloca en una posición intermedia frente al dedo índice y termina en oposición máxima contactando con el dedo meñique [13]. Si observamos el plano de la uña, comprobaremos que el dedo pulgar realizó una rotación de 90° a 120° como se ve en la figura 2.11.

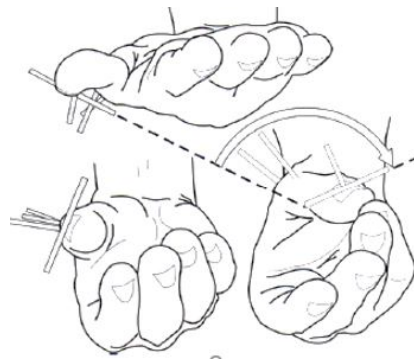


Figura 2.11: Movimiento del pulgar 90° - 120° . [13]

2.3. Ángulos de la Mano Humana

De acuerdo a estudios de biomecánica de la mano y de medidas antropométricas, en la tabla 2.1 se presenta las características del dedo índice cuyo aspecto es muy similar a los demás dedos [36][37].

Los dedos de la mano humana poseen tres tipos de articulación; articulación metacarpo falángica, (MCP) la cual une la falange metacarpiana y la proximal de un dedo o pulgar; articulación interfalángica proximal (PIP) la cual esta localizada entre las falanges media y proximal del dedo; articulación interfalángica proximal (DIP) esta esta ubicada entre las falanges media y distal del dedo [17]. La figura 2.12, la ubicación y unión de cada articulación, esto para entender la manera y el grado de libertad que posee cada dedo en su articulación y elaborar un diseño con una cercanía más profunda al movimiento natural del esté.

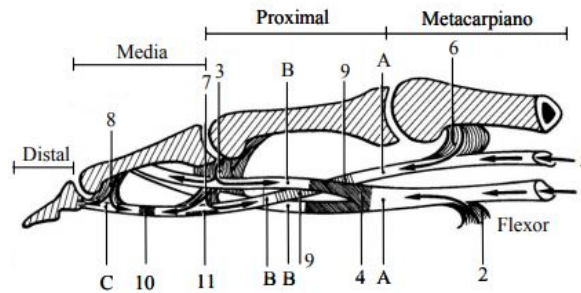


Figura 2.12: Articulaciones dedo índice. [17]

Tabla 2.1: Articulaciones y límites de la mano humana. [17]

Parte	Articulaciones	DOF	Flexión Extensión	Abducción Aducción
Dedos	DIP	1	60°	-
	PIP	1	100°	-
	MCP	2	90°	60°
Pulgar	IP	1	85°	-
	MCP	2	50°	30°
	CMC	2	120°	45°

Para la figura 2.12 : (A) zona proximal, (B) zona intermedio, (C) zona distal, (1) micro vasos longitudinales intrínsecos, (2) vaina sinovial, (3) viculum brevis, (4) segmento avascular, (5) y (6) vasos comparables a los del flexor supercial, (7) viculum longus, (8) viculum brevis sobre la tercera falange, y (9,10 y 11) segmentos de zonas avasculares.

2.4. Tipos de Prensión de la Mano Humana

Los modelos analíticos de agarre y manipulación en su mayoría contienen simplificaciones y suposiciones que limitan los movimientos de una mano robótica o dedos antropomórficos, debido a esto Cutkosky realizó un estudio de agarres más utilizados por operarios en una fábrica por lotes [19]. Lo anterior es necesario ya que, si las manos de un robot van a tener éxito en un pequeño lote o una línea de ensamble, etc; es necesario que muestren algunos de los aspectos de adaptabilidad y sensibilidad que las manos humanas poseen o realizan. Analizar estos comportamientos y sus características es útil

no para imitar pero si para entender y establecer una relación directa entre los requerimientos de las tareas y la «solución» necesaria para cumplir los requisitos. Debido a que nuestro mecanismo no será totalmente antropomórfico a excepción de los dedos es necesario establecer esta relación para encontrar la solución más aproximada posible. Los requerimientos y los atributos de las tareas se combinan para la elección de prensión necesaria. Los requisitos de tarea y los atributos de un objeto se combinan para dictar la elección de compresión, ver figura 2.13.



Figura 2.13: Agarre como parte de una taxonomía

Otro aspecto importante según Napier [18], son los movimientos de la mano para agarrar un objeto de donde se basa principalmente la taxonomía de Cutkosky los cuales se pueden dividir en dos grupos: 1) Movimientos Prensiles: Son movimientos en los que un objeto es capturado y cubre parcial o totalmente a la palma de la mano. y 2) Movimientos no Prensiles: Son movimientos en los que no se puede agarrar o sostener, pero por los cuales los objetos pueden manipularse empujando o levantando el objeto con la totalidad de la mano.

La estabilidad de un objeto se puede dar de dos formas: 1) El objeto puede ser sostenido entre el arco formado por dedos y la palma, y puede ser fijado con la oposición del pulgar respecto a la palma. Este agarre se refiere a Agarre de Potencia, ver figura 2.14a. 2) El objeto puede ser apretado entre las yemas de los dedos y la oposición del pulgar a cada dedo. Este agarre hace referencia a Agarre de Precisión, ver figura 2.14b.

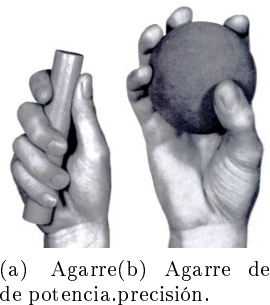


Figura 2.14: Tipos de Agarre. [18]

Una vez se ha realizado la elección entre un agarre de potencia o un agarre de precisión, se puede

entrar a ver las consideraciones geométricas y relaciones con la tarea, en la figura , podemos observar las diferentes combinaciones básicas de agarre más habituales en tareas cotidianas como por ejemplo, en la figura 2.15. Por ejemplo, el agarre (13) lo utilizamos al cargar un maletín, una bolsa, una maleta etc. Con estas combinaciones podemos diseñar el efector final de tal forma que se aproxime a la mayor cantidad de agarres o los haga de forma más ideal.

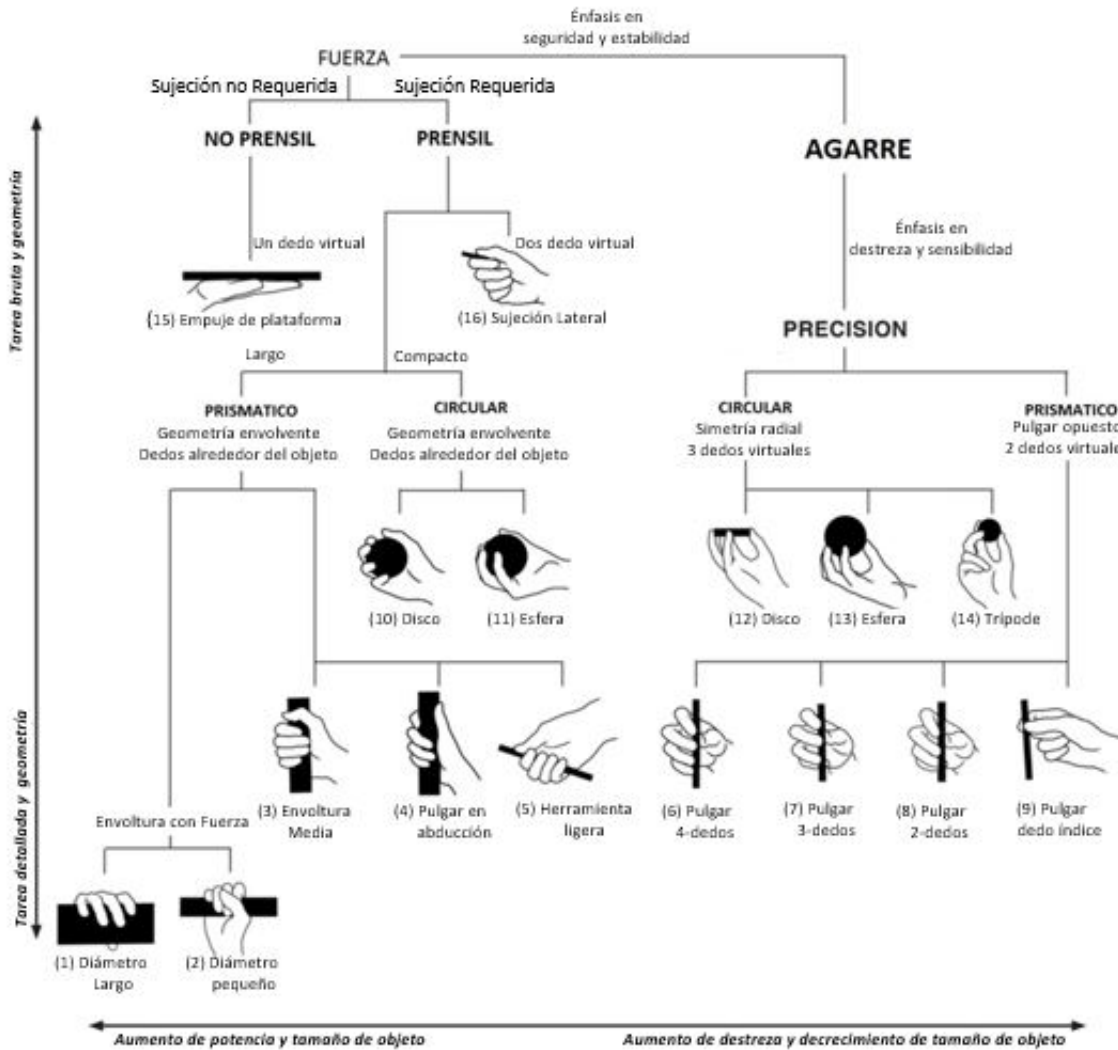


Figura 2.15: Taxonomía de Cutcosky. Combinaciones de agarres de potencia y precisión. [19]

2.5. Modelo Dinámico del Dedo Humano

Para realizar una variedad de tareas tales como agarrar y manipular objetos en el campo de aplicaciones de la robótica, el primer paso para crear un mecanismo completamente funcional es desarrollar y calcular el modelo dinámico. Se basó de [20], para la solución de este donde proponen un modelo dinámico de un mecanismo de un dedo robótico completamente antropomórfico. Para esto es necesario

determinar la ubicación o los ejes respecto a los cuales se realizara la toma de ángulos, esto se muestra en la figura 2.16. Para el cálculo del modelo dinámico se basó de las ecuaciones de *Lagrange* para derivar la dinámica.

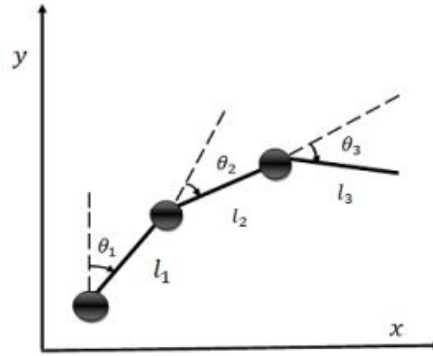


Figura 2.16: Referencias para los ángulos de flexión y extensión. [20]

$$x = Lpp\cos\theta_1 + Lmp\cos(\theta_1 + \theta_2) + Ldp\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.1)$$

$$y = Lpp\sen\theta_1 + Lmp\sen(\theta_1 + \theta_2) + Ldp\sen(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.2)$$

Refiriéndose a la ecuación de cinemática directa ya calculadas y la velocidad angular se calcula usando la fórmula de *Euler Lagrange* [38].

$$w_i = \frac{d\theta_i}{dt} \quad (2.3)$$

$$w_1 = \dot{\theta}_1$$

$$w_2 = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2$$

$$w_3 = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3$$

Entonces la velocidad lineal del centro de masá de cada eslabón del dedo se encuentra utilizando la fórmula de *Euler Lagrange*[38].

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{2}LppS_1\dot{\theta}_1 \quad (2.4)$$

$$\dot{y}_1 = \frac{1}{2}LppC_1\dot{\theta}_1 \quad (2.5)$$

$$\dot{x}_2 = -Lpp \cdot S_1\dot{\theta}_1 - \frac{1}{2}LmpS_{12}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (2.6)$$

$$\dot{y}_2 = -LppC_1 \cdot \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} \cdot LmpC_{12}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (2.7)$$

$$\dot{x}_3 = -LppS_1\dot{\theta}_1 - \frac{1}{2} \cdot LmpS_{12}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - \frac{1}{2}LdpS_{123}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \quad (2.8)$$

$$\dot{y}_3 = -LppC_1\dot{\theta}_1 - \frac{1}{2} \cdot LmpC_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - \frac{1}{2}LmpC_{123} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \quad (2.9)$$

La ecuación de la velocidad lineal debe ser una suma de cuadrados así que de la siguiente forma se halla v_1, v_2 y v_3

$$v_1 = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 \quad (2.10)$$

$$v_1 = \left(-\frac{1}{2}LppS_1 \cdot \theta_1 \right)^2 + \left(\frac{1}{2}LppC_1\dot{\theta}_1 \right)^2 \quad (2.11)$$

$$v_1 = \frac{1}{4}Lpp^2\dot{\theta}_1^2 \quad (2.12)$$

$$v_2 = \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 \quad (2.13)$$

$$v_2 = \left(-LppS_1 \cdot \dot{\theta}_1 - \frac{1}{2} \cdot LmpS_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \right)^2 + \left(LppC_1 - \frac{1}{2} \cdot LmpC_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \right)^2 \quad (2.14)$$

$$v_2 = Lpp^2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{4} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + LppLmpC_2 \cdot \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (2.15)$$

$$v_2 = Lpp^2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{4} (\dot{\theta}_1 + 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) + LppLmpC_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2) \quad (2.16)$$

$$v_3 = \dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2 \quad (2.17)$$

$$v_3 = \left(-LppS_1\dot{\theta}_1 + Lmp \cdot S_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + LdpS_{123} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \right)^2 + \left(LppC_1 \cdot \dot{\theta}_1 + Lmp \cdot C_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + Ldp \cdot C_{123} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \right)^2 \quad (2.18)$$

$$v_3 = Lpp^2\dot{\theta}_1^2 + Lmp^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + \frac{1}{4} \cdot Ldp^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2$$

$$+ 2LppLmp \cdot C_2\dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + LppLdpC_{23} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2$$

$$+ LmpLdp \cdot C_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + Lpp\dot{\theta}_1^2 + Lmp (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + Ldp (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \quad (2.19)$$

De igual forma la energía cinética en las juntas

$$(K) = K_i = \frac{1}{2} \sum (m_i v + L_i w_i^2) \quad (2.20)$$

$$K = \frac{1}{2} m_1 (v_1) + \frac{1}{2} m_2 (v_2) + \frac{1}{2} m_3 (v_3) + \frac{1}{2} Lpp \cdot w_1^2 + \frac{1}{2} Lmp \cdot w_2^2 + \frac{1}{2} Ldp \cdot w_3^2 \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned}
K = & \frac{1}{2}m_1 \left(\frac{1}{4} \cdot Lpp^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 \right) + \frac{1}{2} \cdot m_2 \left(Lpp^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 \right) + \frac{1}{4} \cdot Lmp^2 \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \right)^2 + Lpp \cdot Lmp \cdot C_2 \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \right) \\
& + \frac{1}{2}m_3 [Lpp^2 \dot{\theta}_1^2 + Lmp^2 \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \right)^2 + \frac{1}{4}Ldp^2 \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \right)^2 \\
& + 2LppLmpC_2 \cdot \theta_1 \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \right) + LppLdpC_{23} \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \right)^2 \\
& + Ldp^2C_3 \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \right) \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \right)^2 + \frac{1}{2}Lpp\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}Lmp \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \right) \\
& + \frac{1}{2}Ldp \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \right)^2 + \frac{1}{2}Lpp\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}Lmp \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \right)^2 \\
& + \frac{1}{2}Ldp \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \right)^2 + Lpp\dot{\theta}_1^2 + Lmp \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \right)^2 + Ldp \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \right)^2] \quad (2.22)
\end{aligned}$$

La energía cinética en forma matricial esta expresada en la ecuación 2.23

$$K = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 & \dot{\theta}_2 & \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned}
A_{11} = & \frac{1}{4}m_1Lpp^2 + m_2 \left(Lpp^2 + \frac{1}{4}Lmp^2 + LppLmpC_2 \right) + m_3(Lpp^2 + Lmp^2 \\
& + \frac{1}{4}Ldp^2 + 2LppLmpC_2 + LppLdpC_{23} + LmpLdpC_3) + Lpp + Lmp + Ldp \quad (2.24)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{12} = & \frac{1}{2} \left[m_2 \left(\frac{1}{2}Lmp^2 + Lpp \cdot LmpC_2 \right) + m_3(2Lmp^2 + \frac{1}{2}Ldp^2 + 2 \cdot LppLmpC_2 + LppLdpC_{23} \right. \\
& \left. + LmpLdpC_3 + Lmp + Ldp) \right] \quad (2.25)
\end{aligned}$$

$$A_{13} = \frac{1}{2}m_3 \left(\frac{1}{2}Ldp^2 + LmpLdpC_{23} \right) + Ldp \quad (2.26)$$

$$A_{21} = A_{12} \quad (2.27)$$

$$A_{22} = \frac{1}{4}Lmp^2m_2 + m_3 \left(Lpp^2 + \frac{1}{2}Ldp^2 + LmpLdpC_3 \right) + Lmp + Ldp \quad (2.28)$$

$$A_{23} = \frac{1}{2}m_3 \left(\frac{1}{2}Ldp^2 + LmpLdp \cdot C_3 \right) + Ldp \quad (2.29)$$

$$A_{31} = A_{13} \quad (2.30)$$

$$A_{32} = A_{23} \quad (2.31)$$

$$A_{33} = \frac{1}{4}m_3Ldp^2 + Ldp \quad (2.32)$$

La energía cinética es:

$$K = \frac{1}{2} \left(A_{11}\dot{\theta}_1^2 + 2A_{12}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + 2A_{13}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + A_{22}\dot{\theta}_2^2 + 2A_{13}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + A_{33}\dot{\theta}_3^2 \right) \quad (2.33)$$

La energía potencial es:

$$(p) = p_i = \frac{1}{2} \sum_1^3 (m_i g y_i)$$

$$p_1 = \frac{1}{2}m_1 \cdot g \cdot LppS_1 \quad (2.34)$$

$$p_2 = m_2 \cdot g \left(LppS_1 + \frac{1}{2}LmpS_{12} \right) \quad (2.35)$$

$$p_3 = m_3 \cdot g \left(LppS_1 + LmpS_{12} + \frac{1}{2}LdpS_{123} \right) \quad (2.36)$$

$$p = p_1 + p_2 + p_3 \quad (2.37)$$

$$p = \frac{1}{2}m_1 \cdot g \cdot LppS_1 + m_2 \cdot g \left(LppS_1 + \frac{1}{2}LmpS_{12} \right) + m_3 \cdot g \left(LppS_1 + LmpS_{12} + \frac{1}{2}LdpS_{123} \right) \quad (2.38)$$

-El lagrangiano es computado así:

$$L = K - P$$

Utilizando la ecuación de *Euler-Lagrange* la ecuación de los tres grados de libertad de un dedo se escribe de la siguiente forma

$$\frac{d}{dy} (\delta/\delta\dot{\theta}_i) - \delta/\delta\theta_i = \tau_i \quad i = 1 - 3 \quad (2.39)$$

Por lo tanto, lo anterior completa el modelado dinámico de los mecanismos de un dedo antropomórfico. Estas ecuaciones se utilizan para ver el comportamiento de un dedo respecto a la velocidad de entrada, la gravedad u otras fuerzas externas que perturben su movimiento.

2.5.1. Trayectoria dedo índice

Es importante conocer la trayectoria principal descrita por dedo humano con fin de aproximar a este movimiento [21], ver figura 2.17.



Figura 2.17: Trayectoria descrita por un dedo índice. [21]

Capítulo 3

Mecanismos de Transmisión




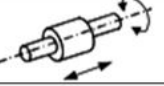
Para realizar un determinado agarre como se observó en el capítulo anterior es necesario tener el mayor control posible sobre la articulación de cada dedo y la magnitud de giro para el caso del pulgar. Los movimientos en las articulaciones de las manos robóticas generalmente utilizan mecanismos que permiten flexionar o tensionar las falanges de los dedos. Siendo un mecanismo un medio, sistema o dispositivo que transforma una fuerza, una velocidad o un movimiento de entrada en una reacción de estas en la salida [8]. Existen diferentes tipos de mecanismos para las manos robóticas, en donde desean imitar el comportamiento de los tendones hasta realizar directamente el movimiento en la articulación. Los mecanismos por barras, motores instalados en cada articulación y por poleas son los más comunes en el diseño y elaboración manos robóticas [39].

3.1. Mecanismos de Barras

Se presentarán los conceptos básicos de los mecanismos de barras. Se verán los mecanismos de cuatro barras abiertos y cerrados comparando estos a la hora de ejercer un movimiento con más o menor torque. Para esto se debe tener en cuenta el grado de libertad que posee este mecanismo [40].

Un mecanismo puede estar compuesto por un grupo de piezas o eslabones que al estar ínter conectados generan un movimiento final específico. Para el cálculo o desarrollo de este movimiento final se realiza un análisis por «cuerpos rígidos». Estos se conectan entre sí, mediante enlaces o pares cinemáticos o juntas cinemáticas [29]. Se abordaran 4 casos de enlaces cinemáticos, en la figura 3.1 se muestran tales casos con su determinado grado de libertad: Un grado de libertad ($f = 1$), Dos grados de libertad ($f = 2$), Tres grados de libertad ($f = 3$).

Tabla 3.1: Juntas Cinemáticas. [29]

JUNTAS CINEMATICAS			
DESIGNACIÓN	GEOMETRIA	SIMBOLO	GRADOS DE LIBERTAD
ROTACIONAL		R	1
PRISMÁTICA		P	1
ESFÉRICA		E	3
CILINDRICA		C	2

Las juntas de rotación y prismáticas son muy frecuentes en mecanismos y concebibles en un plano; Mientras que las juntas cilíndricas y esféricas son más comunes en los mecanismos de movimientos espaciales o en tres dimensiones. Partiendo de esto es necesario tener presente en el análisis y diseño del mecanismo la cantidad de grados de libertad que este tendrá, también conocido como movilidad del dispositivo [41]. La movilidad de un mecanismo es el número de parámetros de entrada (por lo general variables de par). Es necesario considerar que un mecanismo plano posee tres grados de libertad cuando se mueve en relación al eslabón fijo. Cuando se calcula el número de grados de libertad del mecanismo en nuestro caso esto se refiere al número de motores que son necesario para que el mecanismo realice su movimiento completo, para esto se utiliza el criterio de Kutzbach-Grubler [42], el cual se puede implementar para cadenas cinemáticas abiertas o cerradas. La ecuación está descrita por:

$$F = 3(N - 1) - 2P_I \quad (3.1)$$

Donde F es el número de grados de libertad del eslabonamiento, N es el número de eslabones que forman el eslabonamiento, P_I es el número de pares de la clase I que forman parte del eslabonamiento.

Si $F = 1$, el mecanismo se puede impulsar con un solo movimiento de entrada, en nuestro caso un actuador, si $F = 2$, entonces se necesitan dos movimientos de entrada. Si $F = 0$, el movimiento resulta imposible y forma una estructura.

En la figura 3.1 nos referimos al tipo de articulación y su número de grados de libertad, ahora se dará una explicación breve de su definición[43].

Rotacional: Sólo permite rotación relativa. Con frecuencia este par se denomina articulación de pasador o de espiga.

Prismática: Sólo permite movimiento relativo de deslizamiento. Y como su nombre lo indica se conoce como articulación de deslizamiento.

Cilíndrico: Permite tanto, rotación angular como un movimiento de deslizamiento independiente.

Esférica: Es una articulación de rotula, el cual posee una rotación en torno a cada uno de os ejes coordenados.

La consideración de mayor importancia cuando se diseña un mecanismo que se impulsará con un motor, es asegurarse de que la manivela de entrada pueda realizar la revolución inicia de manera eficiente, en otro caso la revolución completa dependiendo la aplicación u objetivo del mecanismo. Un mecanismo que no presente esta característica de revolución no serían útiles para estas aplicaciones. Existe una prueba sencilla para saber si se presenta este caso.

La ley de *Grashof* afirma que, la suma del eslabón más corto con el eslabón más largo no puede ser mayor que la suma de los eslabones restantes, si se desea que exista una revolución continua entre dos elementos [22]. Siguiendo lo anterior la ley de *Grashof* especifica que uno de los eslabones, en particular el más pequeño, girará continuamente en relación con los otros tres sólo cuando:

$$s + l \leq p + q \quad (3.2)$$

Donde s es el eslabón más corto y p es el eslabón más largo, siendo l y q los eslabones restantes en un mecanismo de 4 barras.

3.1.1. Ventaja Mecánica Mecanismo de Barras

Para explicar la ventaja mecánica de este mecanismo se analiza la figura 3.1 donde se desprecia la fuerza de fricción o la inercia durante su funcionamiento, o que son despreciables en relación a la torsión de entrada T_2 ; aplicado al eslabón 2, y el momento de torsión de salida T_4 , el momento de carga, fuerza opuesta o fuerza requerida en el eslabón 4, entonces se puede establecer una relación entre T_2 y T_4 .

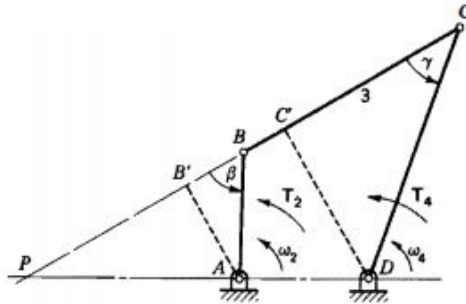


Figura 3.1: Mecanismo 4 barras. [22]

La potencia de salida en el eslabón 4 es la opuesta a la potencia de entrada en el eslabón 2; con esto se puede establecer que:

$$T_2 w_2 = -T_4 w_4 \quad (3.3)$$

$$\frac{T_4}{T_2} = -\frac{w_2}{w_4} = -\frac{R_{PD}}{R_{PA}} \quad (3.4)$$

La ventaja mecánica de un eslabonamiento es la razón del momento de torsión de salida ejercido por el eslabón impulsado, al momento de torsión de entrada que se necesita en el impulsor[22]. La ventaja mecánica de un mecanismo es la razón instantánea de la fuerza (momento de torsión) de la salida a la fuerza (momento de torsión) de entrada. ya que, la distancia de $P - D$ es mayor que $P - A$ se tiene que 1, haciendo $\frac{R_{PD}}{R_{PA}} = A$, tenemos que A es el multiplicado de potencia de entrada T_2 con la cual tenemos la potencia T_4 de salida mayor que la potencia de entrada.

3.2. Mecanismo con motor en cada Juntura

Es muy utilizado en manos robots. Consiste en ubicar micro motores o motores pequeños en cada articulación rotacional de una cadena cinemática abierta, pero esto conlleva a elevar los costos, espacio, peso y recursos del mecanismo.

La mano HIT/DLR Dexterous [23] ver figura 3.2, donde los motores o actuadores están posicionados en la base y cuerpo del dedo.



Figura 3.2: HIT/DLR Dexterous. [23]

3.2.1. Ventaja Mecánica Motor en cada Juntura

Al estar posicionado en la juntura o articulación del dedo o el eslabón, este recibe en la totalidad el torque generado por el actuador, donde se debe tener cuidado con que el motor no fracture las barras, bases o acoples del mecanismo. La velocidad de este también es directamente proporcional a la velocidad del motor.

3.3. Mecanismo con Poleas-Correas.

Si se desea implementar un mecanismo que no ocupe demasiado espacio dentro de las falanges de los dedos, las transmisiones por poleas y correas permiten que los actuadores puedan ubicarse de manera remota de los ejes de la articulación, disminuyendo la masa del robot en movimiento y controlar su dinámica de manera más fácil. Debido a esto lo que se reduce en peso de los dedos se puede ganar en fuerza ejercida por estos [44].

Para el diseño de una transmisión Polea-Correa es necesario tener en cuenta las condiciones de trabajo tales como [45]:

- Característica de la máquina motriz y accionada.
- Potencia por transmitir (N).
- Frecuencia de rotación de una de las dos poleas.
- Relación de transmisión (i) o frecuencia de rotación de la otra polea.

Se debe tener en cuenta la potencia que se necesitara aplicar en el punto de operación final del efector final en este caso una mano robótica.

$$N_D = N \times f_s \quad (3.5)$$

Donde N_D es la potencia requerida en articulación. A la hora de escoger la potencia de diseño es necesario conocer la velocidad a la que operara la polea, con el fin de aprovechar la transmisión mecánica por la correa lo mejor posible.

Las poleas arrastran por adherencia las correas, y a su vez la correa arrastra y hace girar la otra polea (polea conducida o de salida), transmitiendo así el movimiento.

Al igual que en un tren de engranajes o un sistema rueda-piñón, el número de revoluciones de cada eje vendrá dado por el tamaño de las poleas, de modo que, la polea de mayor diámetro girara a una velocidad más baja que la polea de menor diámetro, ver figura 3.3.

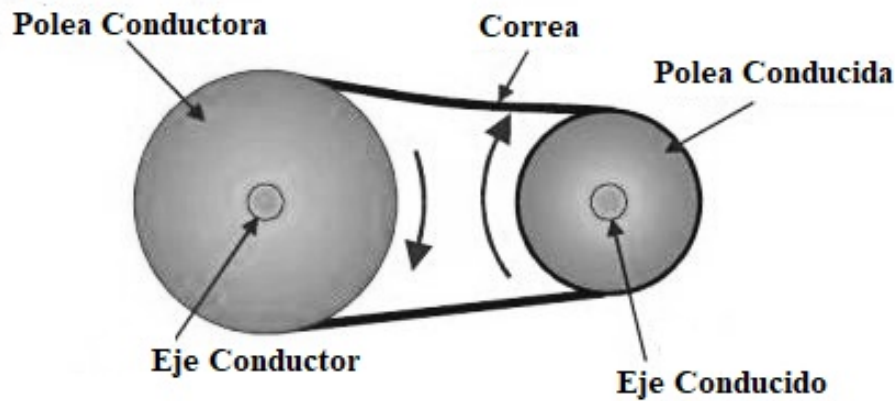


Figura 3.3: Mecanismo Polea-Correa.

- El eje conductor es el eje motriz, el cual dispones del movimiento que tenemos que transmitir al otro eje
- El eje conducido es el eje que tenemos que mover.
- Polea conductora es la que está unida al eje conductor.
- Polea conducida es la que está unida al eje conducido.
- La correa es un aro flexible que abraza ambas poleas y transmite el movimiento de una a otra.

Ya entendiendo lo anterior, para la selección de diámetros de las poleas es necesario tener en cuenta la velocidad que transmitirá o la velocidad de entrada en el eje conductor, con esto tenemos la siguiente relación.

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{D_1}{D_2} \quad (3.6)$$

- n_2 es la velocidad de la polea conducida.
- n_1 es la velocidad de la polea conductora.
- D_1 Diámetro de la rueda conductora.
- D_2 Diámetro de la rueda conducida.

Si la relación de transmisión del sistema es $i < 1$ nos encontramos con un reductor de velocidad, en dicho caso por i vueltas que, de la polea conducida, la polea conductora girara i veces las vueltas de la polea conducida.

Si la relación de transmisión del sistema es $i > 1$ nos encontramos un multiplicador de velocidad. En este caso por i vueltas que gire la polea conducida, la polea conductora girara i veces menos vueltas que la polea conducida.

Otro aspecto importante para este caso es la distancia entre los centros de la polea para calcular la longitud aproximada de la correa L_o con la distancia entre centros de las poleas a_o .

$$L_o = 2 \times a_o + \frac{\pi}{2} \times (D_2 + D_1) + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4 \times a_o} \quad (3.7)$$

Cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo capaz de girar sobre un eje, produce un movimiento de rotación o giro. La magnitud que mide la intensidad del giro se denomina momento torsor. El momento torsor y la velocidad transmitidos por un sistema de poleas están estrechamente relacionados con el valor de la relación de transmisión del sistema siendo M_1 y M_2 los momentos torsores respectivos de cada polea.

$$i = \frac{M_1}{M_2} \quad (3.8)$$

Con la ecuación 3.8 se puede observar que si $i < 1$ (reductor), $M_2 > M_1$. En este caso la velocidad de la polea conducida es menor que la de la polea conductora, pero el momento torsor resultante es mayor. Si $i > 1$ (multiplicador), $M_2 < M_1$. En este caso la velocidad de la polea conducida es mayor que la de la polea conductora, pero el momento torsor¹ resultante es menor.

3.3.1. Ventaja Mecánica Polea-Correa

Al momento de diseñar un mecanismo o una mano robótica se puede ahorrar espacio con este tipo de transmisión, con esto tenemos que la potencia de salida tiene prioridad sobre las dimensiones mecánicas. Además, el cable permite una fácil modificación del movimiento de los dedos, ya que, las poleas, cuyos diámetros prescriben las relaciones de torque de las juntas, pueden ser simplemente reemplazadas y el sistema de cable tensado también. Se pueden tener diferentes consideraciones tipos de correas, como pueden ser lisas, dientes rectos, dientes en V, etc. Esto permite escoger entre fuerza, velocidad o precisión en el movimiento [24].

¹Al momento torsor también se le denomina par de fuerza o par motor.

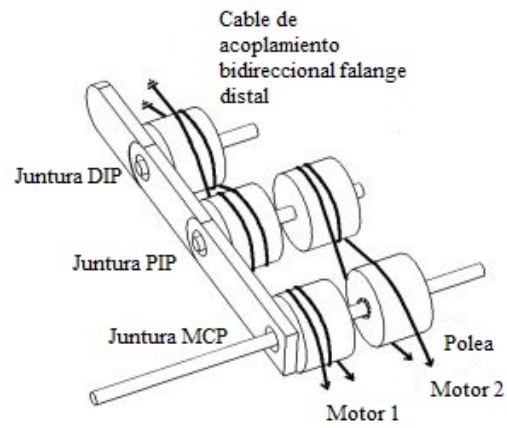


Figura 3.4: Dedo implementado Polea-Correa. [24]

En la figura 3.4, [44] se puede observar el mecanismo implementado con poleas y correas, donde utiliza una polea con las correas entrecruzadas para generar el movimiento flexión y extensión de las falanges. Al colocar las correas de esta forma pueden llegar a desgatar mucho más rápido su condición inicial y estirarse, aunque en el caso de la figura 3.5 el movimiento es necesario que sea ejercido por dos motores.

Capítulo 4

Diseño Mecánico

Para el diseño de una mano robótica no-antropomórfica basada en *Barret Hand* [4] y teniendo en cuenta la taxonomía de *Cutcosky* [19], se establece diseñar una mano compuesta con 3 dedos capaces de generar el mayor tipo de agarres ya descritos y una palma donde se apoyaran los objetos dependiendo su forma. Un dedo de estos 3 tendrá la capacidad de adoptar la posición de un dedo índice teniendo en cuenta la magnitud de su movilidad, ver figura 2.10 vista en el capítulo 2. Este dedo movable adoptará la posición de un pulgar, realizando el trabajo de oposición en algunos agarres de potencia y precisión, esto se da cuando el dedo movable sobre pasa los 80° y queda en total oposición en 180° aproximadamente.

En el anterior capítulo se abarcaron los mecanismos de manos robóticas más usuales donde se estableció la ventaja mecánica de cada uno de estos. Se tuvieron en cuenta el espacio, velocidad, potencia y utilidad para la selección del mecanismo.

4.1. Mecanismo de 4 barras

Los problemas de actuación y transmisión de potencia son de suma importancia a la hora del diseño de un manipulador o un efector final [46]. Para la selección del mecanismo se tuvo en cuenta diferentes aspectos, como lo son la potencia, velocidad, utilidad en relación en vida útil, espacio en la mano o posición y el peso para ganar fuerza en la transmisión, las cuales se abarcaron en el capítulo anterior en la sección de ventajas mecánicas respectivamente.

Tabla 4.1: Consideraciones Elección Mecanismo.

Meca	CONSIDERACIONES						Total
	Potencia	Velocidad	Vida Útil	Espacio	Peso	Costo	
Barras	Alta	Alta	Muy Alta	Bajo	Bajo	Bajo	25
Motor	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto	16
Polea	Alta	Alta	Baja	Muy Bajo	Muy Bajo	Bajo	24

- Para las consideraciones de Potencia, Velocidad y Utilidad, se cuantificaron los datos. Se tomaron valores de 1 a 5 siendo 1 Muy bajo y 5 Muy Alto.
- Para las consideraciones de Espacio, Peso y Costo, se tomaron valores de 1 a 5 siendo 1 Muy Alto y 5 Muy Bajo.

Finalmente se seleccionó el mecanismo de barras según las consideraciones tenidas en cuenta, a pesar de la limitación que posee frente al movimiento de cada falange, puesto que se daría un movimiento sub-actuado entre ellas, esto quiere decir que cada falange dependerá del ángulo de salida del mecanismo de la falange anterior.

De esta forma, el mecanismo diseñado para cada dedo cuenta con dos mecanismos de 4 barras acoplados entre ellos. Para el diseño del mecanismo se basó en Avilés et al [8], el cual presenta un diseño y construcción de un dedo robótico. El mecanismo actuador está integrado por dos elementos cruzados de cuatro barras acoplados entre ellos ver figura 4.1, donde la falange distal, medial y proximal se denominan *FE*, *F2* Y *F1* respectivamente. Se puede observar el mecanismo actuador representado mediante juntas rotatorias. El eslabón de entrada *A, B*, se desplaza en forma línea, provocando el movimiento de mecanismo *D-H-I-E-J* mediante un par rotacional *C*; ASÍ mismo el par rotacional *K* activa el segundo mecanismo *G-F-M-L*, con el fin de describir la trayectoria de un dedo de la mano humana.

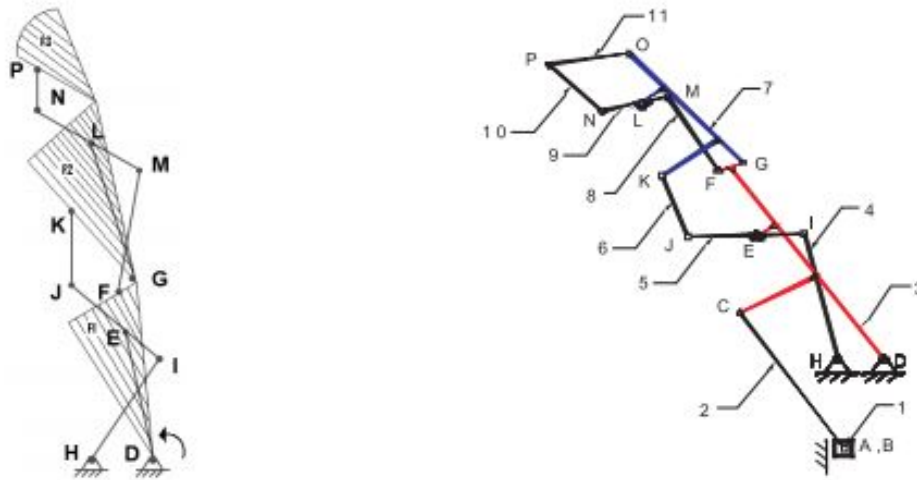


Figura 4.1: Mecanismo Dedo índice. [8]

4.2. Cálculo del Mecanismo de 4 Barras

Considerando la tabla presentada en el capítulo 2, en la que se muestran la longitud promedio de la falange proximal, media distal, así como el rango máximo de movimiento de cada articulación, se determina la longitud y rango de movimiento que tendrá cada eslabón del dedo robótica, como se muestra en la figura 4.2.

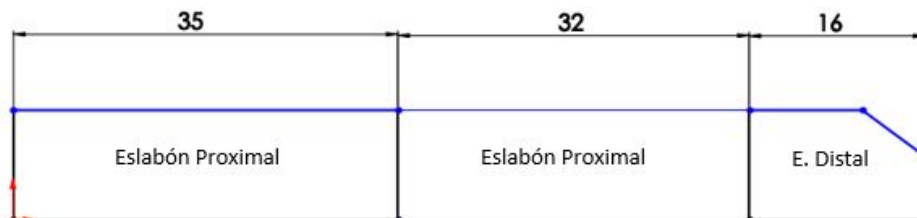


Figura 4.2: Distancias de las Falanges.

Una vez establecida las distancias entre falanges se asignan los ejes de la articulación de rotación, estos se sitúan en la parte proximal de cada falange, ver figura 4.3.

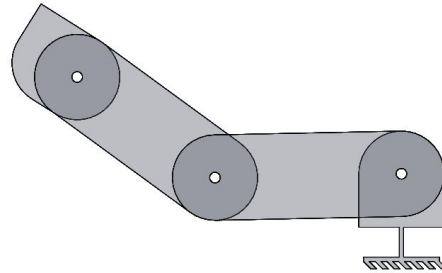


Figura 4.3: Ejes de articulación y perfil del dedo.

Ahora se realizará la síntesis cinemática, la cual es el proceso de encontrar la mejor geometría y dimensiones del mecanismo que producirá el movimiento deseado. Donde los datos necesarios para cumplir con esta son la posición inicial, desplazamientos finitos, velocidades y aceleraciones del mecanismo con el fin de obtener la geometría y dimensiones del mecanismo y posición de los elementos de entrada [25].

Para la síntesis del mecanismo es importante conocer la trayectoria deseada, la cual el mecanismo sea capaz de seguir, ver figura 4.4.

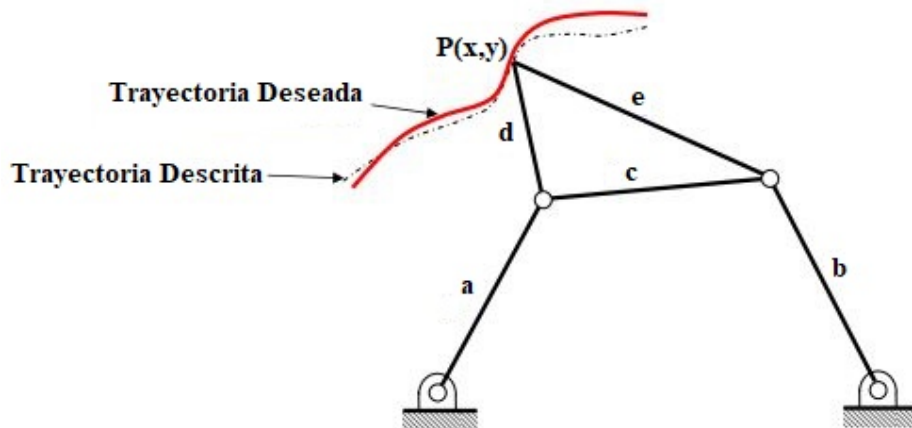


Figura 4.4: Seguimiento de trayectoria. [25]

En general las trayectorias de los dedos son diferentes o similares pero nunca iguales debido a la estructura ósea de cada persona, pero en [41, 47] analizaron y presentaron un Análisis Cinemático del dedo índice de la Mano con un agarre cilíndrico y puntual, donde destacan la trayectoria creada por el mismo, ver figura 4.5. Donde se puede observar el movimiento de cada articulación y cada falange.

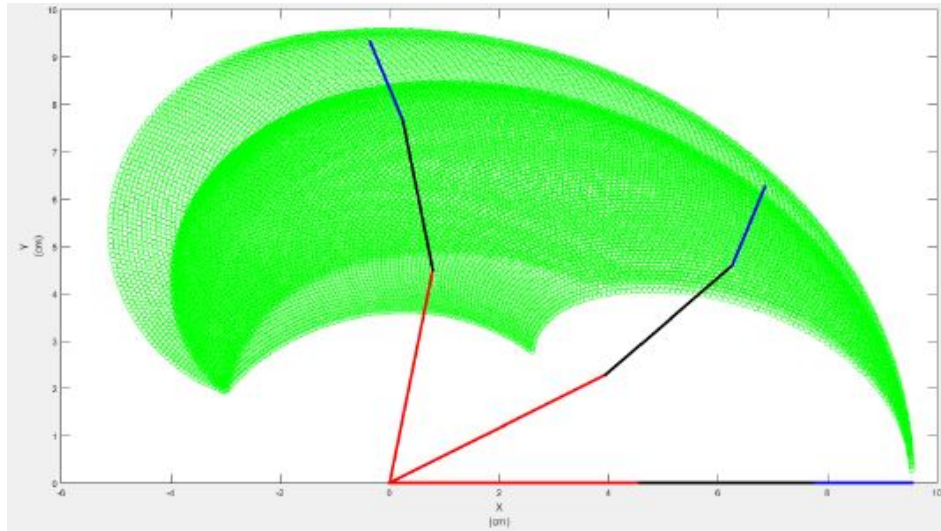


Figura 4.5: Trayectoria descrita por el dedo índice en un agarre cilíndrico.

Esta trayectoria también la toman como base en [21, 8], para generar la síntesis de generación de la función a realizar o a trazar. Para encontrar la relación o magnitudes de las barras del sistema se procede a describir el mecanismo, ver figura 4.5. Donde se puede observar un mecanismo de 4 barras cruzado, el cual posee un movimiento más central sobre su centroide y la velocidad angular de salida del sistema es menor o diferente a la velocidad angular de entrada del sistema.

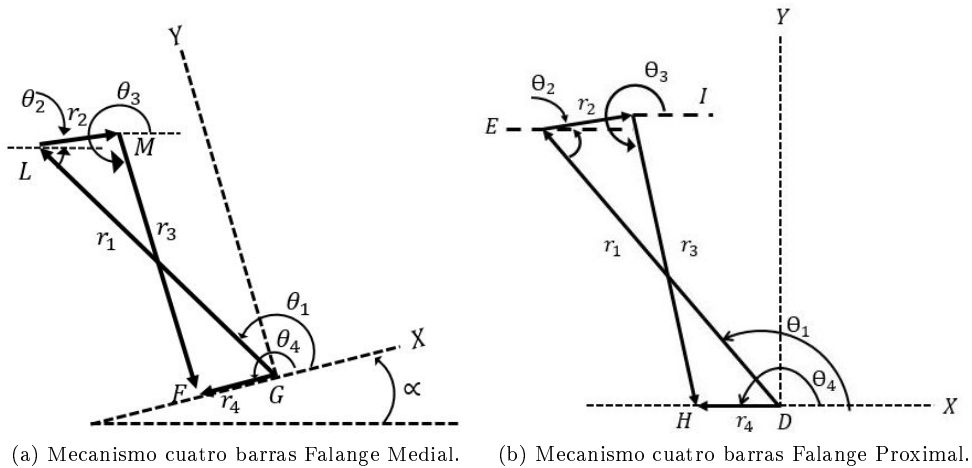


Figura 4.6: Mecanismos 4 barras. [8]

En la figura 4.6b, se puede observar la representación vectorial del mecanismo de la falange proximal, donde la barra r_4 es fija, el ángulo de entrada es θ_3 y el ángulo de salida es θ_1 . En la figura 4.6a, se observa la representación vectorial del mecanismo de la falange medial, con r_4 fija, θ_3 el ángulo de entrada y θ_1 el ángulo de salida.

Para cada mecanismo se plantea la ecuación 3.1. Para este mecanismo se tiene:

- $N = 4$.
- $P_I = 3$

$$F = 3(4 - 1) - 2 \times 4 = 1 \quad (4.1)$$

Con $F = 1$ se tiene que el mecanismo puede ser impulsado por un solo actuador en su eslabón de entrada θ_3 para los mecanismos de 4.6a y 4.6b. Con esto se procede a realizar el cálculo de las longitudes de los eslabones teniendo en cuenta la ecuación 3.2. Considerando que los mecanismos son cruzados y de cuatro barras, la metodología de síntesis es la misma, excepto que el segundo mecanismo sufre una rotación respecto al movimiento relativo del primer mecanismo donde se genera un ángulo α , con lo que se procede a desarrollar las ecuaciones matemáticas para un solo mecanismo.

La ecuación general de cierre del mecanismo se presenta de la siguiente manera:

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_2 + \vec{r}_3 - \vec{r}_4 = 0 \quad (4.2)$$

Se expresa cada termino en los componentes del sistema coordenado establecido, y teniendo en cuenta que debe cumplir las posiciones deseadas las componentes del mecanismo en x y y :

$$r_1 \cos(\theta_1) + r_2 \cos(\theta_2) + r_3 \cos(\theta_3) + r_4 = 0 \quad (4.3)$$

$$r_1 \sin(\theta_1) + r_2 \sin(\theta_2) + r_3 \sin(\theta_3) = 0 \quad (4.4)$$

Sabiendo que el ángulo de entrada es θ_3 y el ángulo de salida es θ_1 se debe dejar la ecuación en termino de estos dos ángulos, para esto despejamos los términos que están en función de θ_2 de la siguiente manera:

$$r_2 \cos(\theta_2) = -r_1 \cos(\theta_1) - r_3 \cos(\theta_3) - r_4 \quad (4.5)$$

$$r_2 \sin(\theta_2) = -r_1 \sin(\theta_1) - r_3 \sin(\theta_3) \quad (4.6)$$

Para resolver el sistemas de ecuaciones se procede a elevar 4.5 y 4.6 al cuadrado y sumarlas:

$$r_2^2 \cos^2(\theta_2) + r_2^2 \sin^2(\theta_2) = (-r_1 \cos(\theta_1) - r_3 \cos(\theta_3) - r_4)^2 + (-r_1 \sin(\theta_1) - r_3 \sin(\theta_3))^2 \quad (4.7)$$

Resolviendo los cuadrados y aplicando identidades trigonométricas de 4.7 se tiene que:

$$r_2^2 = r_1^2 + r_3^2 + r_4^2 + 2r_1 r_3 \cos(\theta_1 - \theta_3) + 2r_1 r_4 \cos(\theta_1) + 2r_3 r_4 \cos(\theta_3) \quad (4.8)$$

Se despeja el termino que depende de θ_1 y θ_3 lo que resulta en:

$$\cos(\theta_1 - \theta_3) = \frac{r_2^2 - r_1^2 - r_3^2 - r_4^2}{2r_1 r_3} - \frac{r_4 \cos(\theta_1)}{r_3} - \frac{r_1 \cos(\theta_3)}{r_4} \quad (4.9)$$

Se definen las variables k_1, k_2 y k_3 :

$$k_1 = -\frac{r_4}{r_3}, k_2 = -\frac{r_4}{r_1}, k_3 = \frac{r_2^2 - r_1^2 - r_3^2 - r_4^2}{2r_1 r_3} \quad (4.10)$$

$$\cos(\theta_1 - \theta_3) = k_1 \cos(\theta_1) - k_2 \cos(\theta_3) + k_3 \quad (4.11)$$

Para el cálculo de las distancias de los eslabones se debe tener en cuenta como se transmitirá la velocidad y el movimiento a la siguiente falange (Medial) como se observa en la figura 4.1 en los eslabones 5 y 6 los cuales transmiten la velocidad, potencia y movimiento a K .

Se debe tener en cuenta que para cada valor cualquiera de las constantes k_i , la ecuación se verificará también si se sustituyen los ángulos por su diferencia a 360 grados. Equivale esta propiedad a construir el cuadrilátero articulado que es imagen del dado respecto a la barra fija. La eliminación de θ_2 de la ecuación introduce otra solución, debido a la elevación al cuadrado de la ecuación 4.7, lo que quiere decir que para valores de k_i existen dos valores de θ_1 y θ_3 a lo largo del eje.

Para la solución y cálculo de las longitudes del mecanismo, con la longitud de cada falange ya descrita anteriormente se pueden tomar los ángulos de flexión, ya que, es un movimiento sub actuado el ángulo de entrada de la falange medial depende del ángulo de salida de la falange proximal con lo cual se tienen los siguientes ángulos:

Tabla 4.2: Ángulos para la falange Medial θ_1 y θ_3 . [21]

ángulo	θ_1	θ_3
1	63,19°	111,18°
2	66,26°	113,86°
3	84,22°	126,16°

Con los ángulos de la tabla 4.2 los cuales fueron tomados como base de [21] donde muestran las 10 posiciones utilizadas para determinar las dimensiones del mecanismo. Con la ecuación 4.10 se procede a realizar el cálculo de k_i para cada par de ángulos de la siguiente manera:

$$k_1 \cos(111,18) - k_2 \cos(63,19) + k_3 = \cos(111,18 - 63,19) \quad (4.12)$$

$$k_1 \cos(113,86) - k_2 \cos(66,26) + k_3 = \cos(113,86 - 66,26) \quad (4.13)$$

$$k_1 \cos(126,16) - k_2 \cos(84,22) + k_3 = \cos(126,16 - 84,22) \quad (4.14)$$

Se puede observar que se tienen 3 ecuaciones con 3 incógnitas las cuales tienen la siguiente solución:

$$k_1 = 0,4556 \quad (4.15)$$

$$k_2 = 0,5104 \quad (4.16)$$

$$k_3 = 1,064 \quad (4.17)$$

Se dará un valor al eslabón r_4 el cual estará fijo y tendrá efecto en la longitud de las barras, con este valor de r_4 se pueden utilizar las igualdades de 4.9 para despejar y reemplazar los valores obtenidos con el fin de calcular el valor de los demás eslabones.

$$r_4 = 7,08mm \quad (4.18)$$

$$r_1 = 15,5mm \quad (4.19)$$

$$r_2 = 5mm \quad (4.20)$$

$$r_3 = 13,85mm \quad (4.21)$$

Se realizó el mismo cálculo matemático para la falange medial y con esto tener por completo las longitudes del mecanismo, ángulos y posiciones.

Tener en cuenta que el principal objetivo de este primer mecanismo es ingresar una velocidad y una potencia a la siguiente cadena cinemática, como se muestra en el mecanismo de la figura 4.1 donde el eslabón 5 y 6 son el medio con el cual se ingresa la velocidad, ya que, son eslabones fijos sin movimiento, realizando el cálculo de las velocidades lineales y angulares del mecanismo se puede calcular la velocidad angular en el caso de la figura 4.1 en el punto K . En la figura 4.7 se puede observar la posición y barras desarrolladas con su respectivo asignamiento, donde las barras rojas son las que transmiten la velocidad de mecanismo a mecanismo y la transmisión de movimiento.

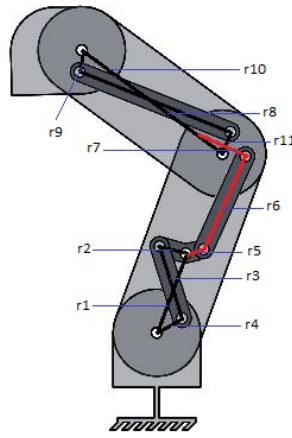


Figura 4.7: diseño y posición del mecanismo de 4 barras previamente calculado.

Con la longitud de las barras se utiliza la ecuación 3.2 (ley de *Grashof*) para determinar si el mecanismo si puede ser impulsado con un solo motor como se especifico en 4.1 donde F es igual a 1.

$$15,5 + 5 \leq 13,85 + 7,08 \quad (4.22)$$

$$20,5 \leq 20,93 \quad (4.23)$$

Como se puede observar en la desigualdad (30) el mecanismo cumple con la ley con lo que se puede continuar con este mecanismo. Para comprobar lo anterior se monta el mecanismo de 4 barras sobre el software *Linkage* el cual permite emular cadenas cinemáticas abiertas o cerradas permitiendo observar si el mecanismo sufre fallos o tiene singularidades en su movimiento. En la figura 4.8 se puede observar la trayectoria posible que puede realizar el dedo y se observa que la hace sin interferencias ni singularidades.

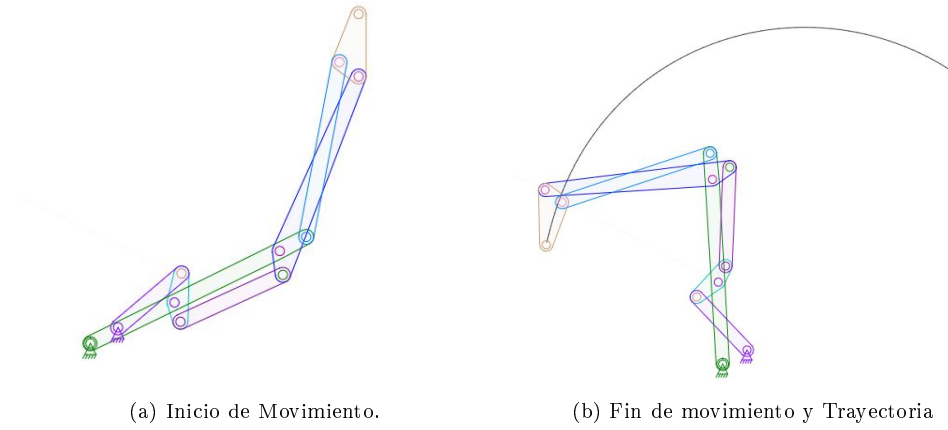


Figura 4.8: Simulación Mecanismos de 4 barras acoplados y trayectoria en *Linkage*.

4.3. Cálculo de Velocidades del Mecanismo

Un aspecto importante con el mecanismo es conocer cómo se comporta su velocidad de salida respecto a su velocidad de entrada, ya que, esto lo debemos tener en cuenta para el cálculo de la trayectoria mediante la cinemática inversa. con la magnitud de los eslabones se puede calcular la velocidad angular de r_2 en cualquier instante de la trayectoria, ya que, esta velocidad angular será la transmitida a la barra r_5 y r_6 y mediante un nodo r_7 le proporcionara una velocidad angular a la barra r_8 teniendo en cuenta que la velocidad angular de una barra es constante a lo largo de esta, y lo que varía es la velocidad lineal [48]. Para el cálculo de las velocidades angulares se toman las velocidades angulares positivas cuando gira en contra de las manecillas del reloj.

La velocidad de I tiene que ser perpendicular a la r_1 para calcular la velocidad angular en I .

Para simplificar las ecuaciones se supuso lo siguiente:

- $\cos = c$.
- $\text{sen} = s$.

$$\vec{V}_I = \vec{V}_D + \vec{V}_{I/D} \quad (4.24)$$

$$\vec{V}_I = 0 + \vec{w}_1 \times \vec{r}_1 \quad (4.25)$$

$$\vec{V}_I = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & w_1 \\ r_1 c(\theta_1) & r_1 s(\theta_1) & 0 \end{vmatrix} \quad (4.26)$$

$$\vec{V}_I = -w_1 r_1 s(\theta_1) \vec{i} + w_1 r_1 c(\theta_1) \vec{j} \quad (4.27)$$

Ahora se calcula la velocidad de E .

$$\vec{V}_E = \vec{V}_I + \vec{V}_{E/I} \quad (4.28)$$

De la ecuación 4.28 recordar que ya conocemos el valor de V_I .

$$\overrightarrow{V_{E/I}} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & w_2 \\ r_2c(\theta_2) & r_2s(\theta_2) & 0 \end{vmatrix} \quad (4.29)$$

$$\overrightarrow{V_{E/I}} = -w_2r_2s(\theta_2)\vec{i} + w_2r_2c(\theta_2)\vec{j} \quad (4.30)$$

$$\overrightarrow{V_E} = \overrightarrow{V_D} + \overrightarrow{V_{E/D}} \quad (4.31)$$

$$\overrightarrow{V_E} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & w_3 \\ r_3c(\theta_3) & r_3s(\theta_3) & 0 \end{vmatrix} \quad (4.32)$$

$$\overrightarrow{V_E} = -w_3r_3s(\theta_3)\vec{i} + w_3r_3c(\theta_3)\vec{j} \quad (4.33)$$

Ahora poseemos 2 ecuaciones con dos incógnitas, lo que se hará es igualar las componentes de las velocidades. ya que, conocemos el valor de todas las longitudes de los eslabones y el valor del ángulo de entrada al mecanismo se pueden calcular los demás ángulos en cualquier instante de tiempo t de movimiento del mecanismo.

$$-w_3r_3s(\theta_3) + w_2r_2s(\theta_2) = -w_1r_1s(\theta_1) \quad (4.34)$$

$$w_3r_3c(\theta_3) - w_2r_2c(\theta_2) = w_1r_1c(\theta_1) \quad (4.35)$$

Para simplificar la ecuación y darle un mejor manejo a esta se hacen los siguientes reemplazos:

$$a = r_3s(\theta_3) \quad (4.36)$$

$$b = r_2s(\theta_2) \quad (4.37)$$

$$c = r_3c(\theta_3) \quad (4.38)$$

$$d = r_2c(\theta_2) \quad (4.39)$$

$$e = -w_1r_1s(\theta_1) \quad (4.40)$$

$$f = w_1r_1c(\theta_1) \quad (4.41)$$

Se reemplazan las igualdades:

$$-w_3a + w_2b = -w_1r_1s(\theta_1) \quad (4.42)$$

$$-w_3c + w_2d = -w_1r_1s(\theta_1) \quad (4.43)$$

De 4.42 se despeja w_3 para reemplazar en 4.43 y despejar w_2 :

$$w_3 = \frac{-e + w_2b}{a} \quad (4.44)$$

$$f = \frac{-ce}{a} + \frac{cw_2b}{a} - w_2d \quad (4.45)$$

$$w_2 \left[\frac{cb - ad}{a} \right] = f + \frac{ce}{a} \quad (4.46)$$

Con las velocidades, longitudes y ángulos calculados se procede a realizar el diseño del mecanismo mediante SolidWorks®

$$w_2 = \frac{af + ce}{cb - ad} \quad (4.47)$$

4.47 se reemplaza en 4.44 para tener el valor de w_3 :

$$w_3 = \frac{-ecb + ade + afb + ceb}{acd - a^2d} \quad (4.48)$$

4.4. Diseño CAD.

Con los cálculos anteriores se diseñó cada falange mediante el software de modelado mecánico SolidWorks® 2018. Se realizó cada pieza y luego se hizo un ensamble de cada pieza para un dedo, y otro ensamble para generar la mano con los 3 dedos. Para identificar la posición de cada eslabón, falange y articulación ver 4.7.

4.5. Ensamble y Simulación

Mediante el software SolidWorks® se evaluarán las fuerzas, y las velocidades a las que está expuesto el mecanismo. En la figura 4.9 se muestra la forma en la que se ensambla y se acopla cada barra, falange y articulación del dedo.

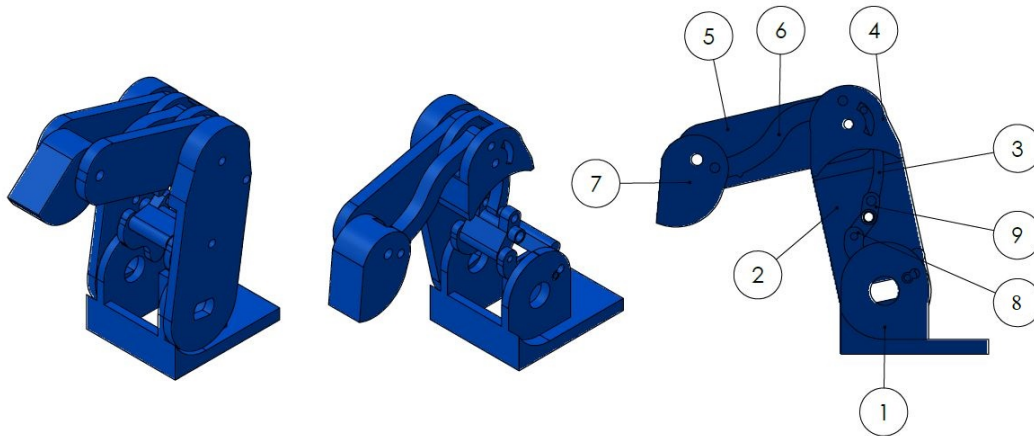


Figura 4.9: Ensamble Final.

Para el análisis de movimiento del dedo se utiliza el complemento SolidWorks® Motion para este análisis, teniendo en cuenta que las colisiones y tolerancias del mecanismo deben ser las correctas para que la simulación funcione de la manera más adecuada. Con esta simulación podemos tener un

punto de referencia para las características mecánicas del actuador que se puede utilizar, como torque y velocidad angular. En el capítulo anterior se mostró que las falanges son comprendidas como barras con lo siguiente se tienen las vistas de cada componente del mecanismo y en el Anexo 1 se pueden encontrar los planos debidamente acotados de cada una de las piezas utilizadas en el ensamble.

4.5.1. Pieza 1 - Metacarpo

Con la ecuación 4.1 se estableció que el mecanismo puede ser por un solo actuador, el cual estará dentro de la articulación para aumentar la potencia de entrada y disminuir un poco la complejidad de un tren de engranajes.

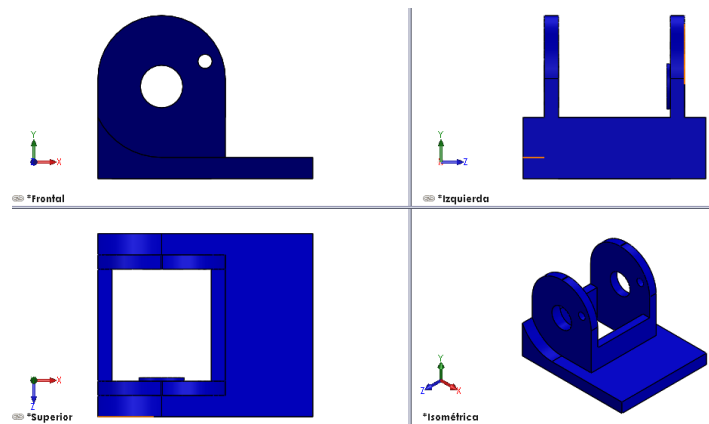


Figura 4.10: diseño CAD Metacarpo.

4.5.2. Pieza 2 - Falange Proximal

La falange proximal es la que inicia con la transmisión de movimiento y comunica el metacarpo y la falange medial.

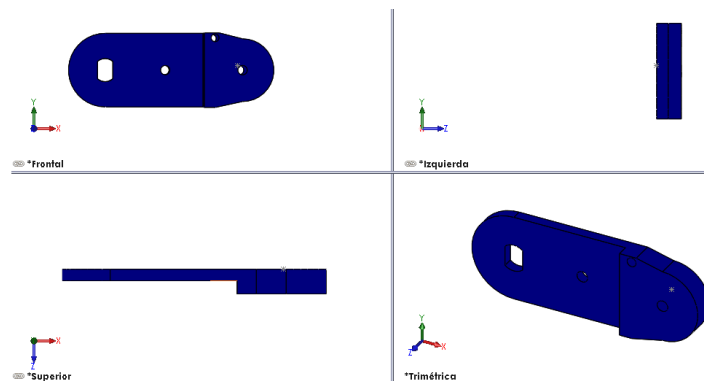


Figura 4.11: diseño CAD Falange Proximal.

4.5.3. Pieza 3 - Barra 6

Esta barra es de los componentes más importantes del mecanismo ya que, es la que transmite la velocidad, posición y fuerza al siguiente mecanismo de 4 barras.

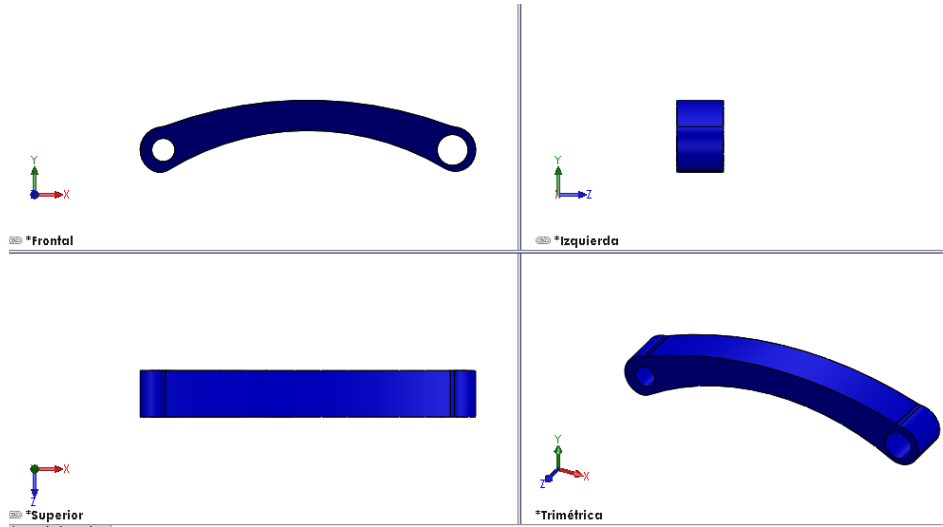


Figura 4.12: diseño CAD Falange Proximal.

4.5.4. Pieza 4 - Articulación Interfalángica Proximal

Se encarga de distribuir la fuerza y velocidades hacia la falange proximal. Es la articulación que más esta expuesta a esfuerzos, por este motivo debe ser compacta y maciza [49].

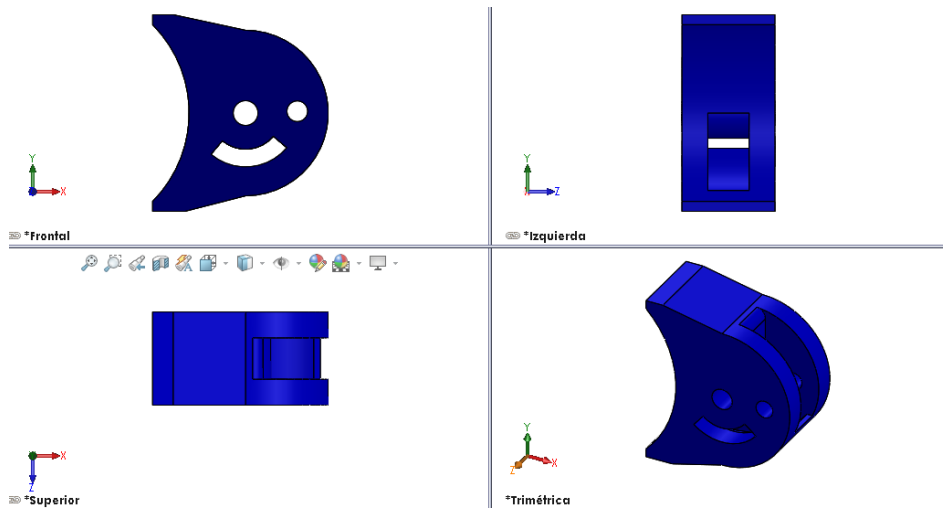


Figura 4.13: diseño CAD Articulación Interfalángica Proximal.

4.5.5. Pieza 5 - Falange Medial

La falange medial une la falange proximal con la falange distal y contiene el segundo mecanismo de 4 barras.

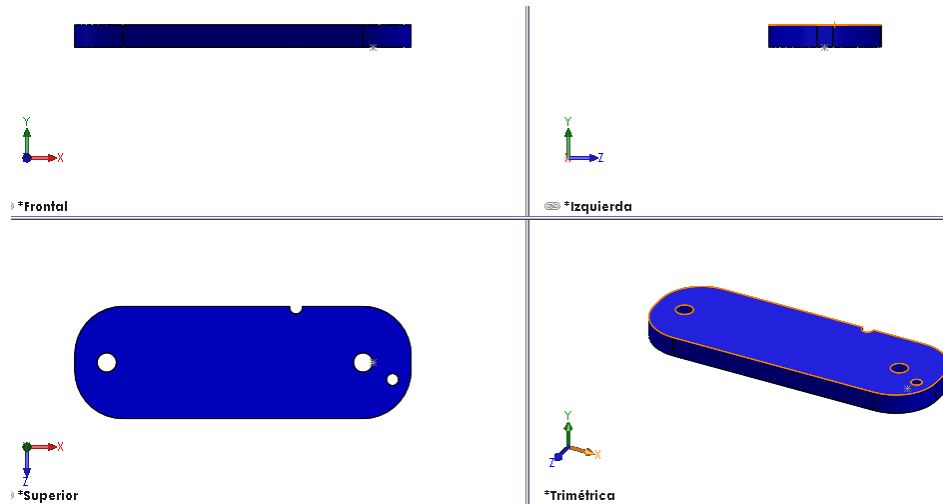


Figura 4.14: diseño CAD Falange Medial.

4.5.6. Pieza 6 - Barra 8

Esta barra transmite la fuerza y posición a la falange distal, esta se mueve a la par con la falange proximal.

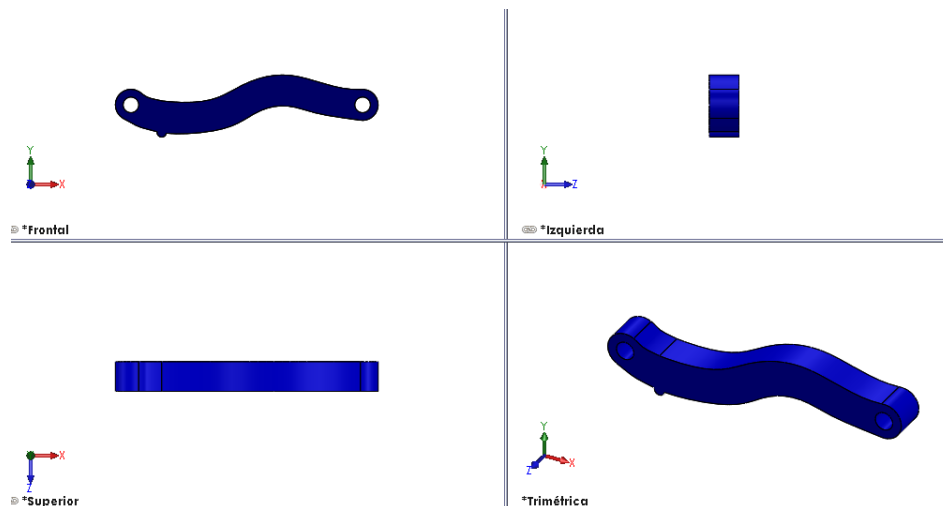


Figura 4.15: diseño CAD Barra 8

4.5.7. Pieza 7 - Falange Distal

Esta falange sea la que estará en primer contacto con los objetos, y hará el agarre de precisión.

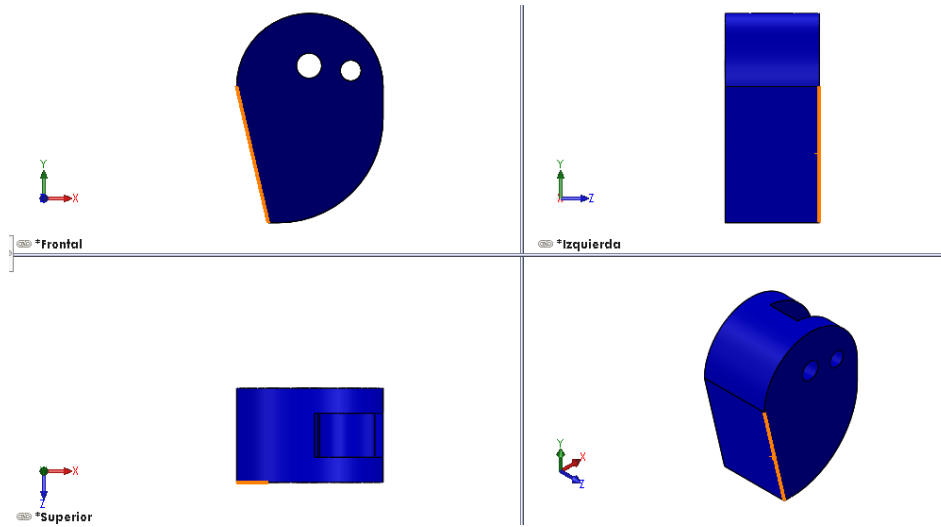


Figura 4.16: diseño CAD Falange Distal.

4.5.8. Pieza 8 - Barra 3

En la figura se puede observar la barra 3 donde es paralela para garantizar estabilidad en el movimiento y dividir el esfuerzo al que estará sometida por los pares generador por el resto de la articulación. Este eslabón es conocido como eslabón binario ya que, solo posee dos nodos[50].

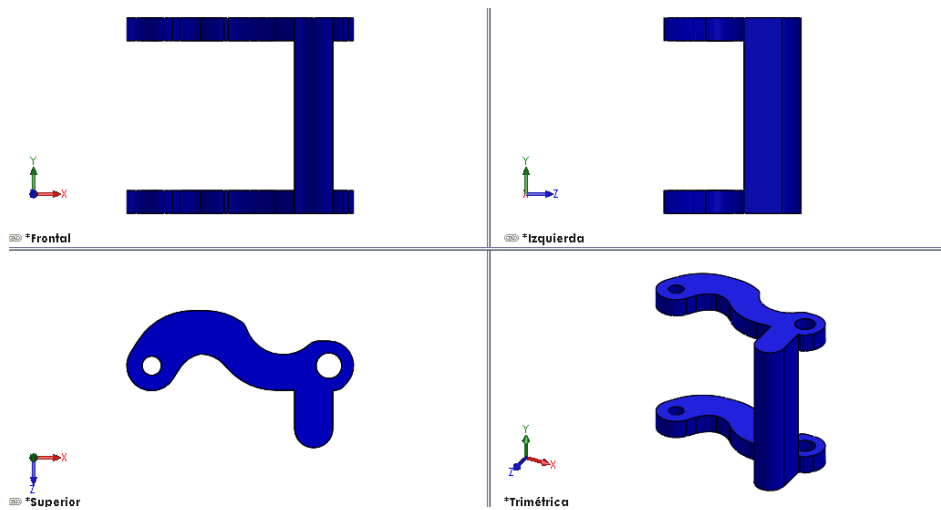


Figura 4.17: diseño CAD Falange Distal.

4.5.9. Pieza 9 - Barra 2

La barra 2 esta conformada por un eslabón ternario el cual completa el primer eslabón junto con la articulación del metacarpo, y entrega la velocidad a el siguiente mecanismo de 4 barras [51].

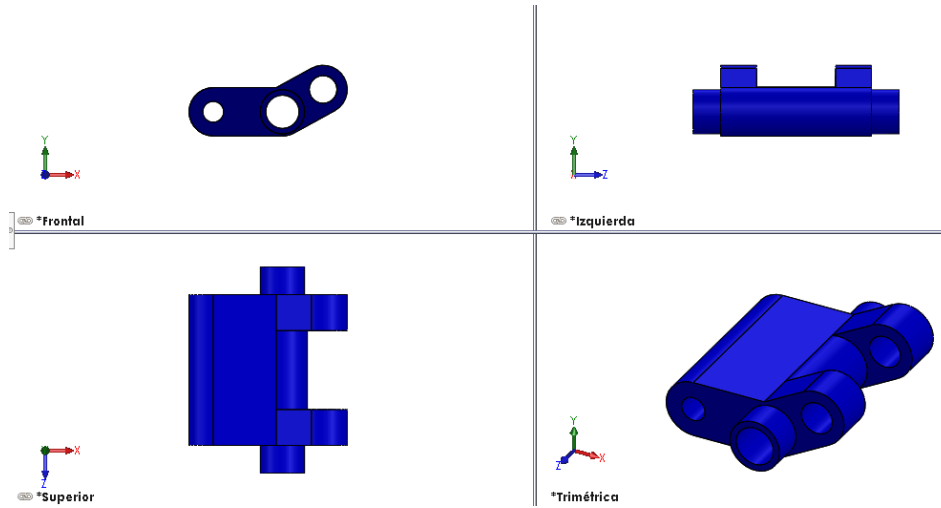


Figura 4.18: diseño CAD Eslabon Ternario.

4.5.10. Simulación de Trayectoria

En la figura 4.19 se puede observar la curva que traza la falange distal en su punto de contacto de color negro, la cual se asemeja a la curva de referencia descrita por un dedo índice[8]. Como los otros 2 dedos son iguales en dimensiones, material y su mecanismo es el mismo se puede tomar la simulación individual para cada uno de ellos.

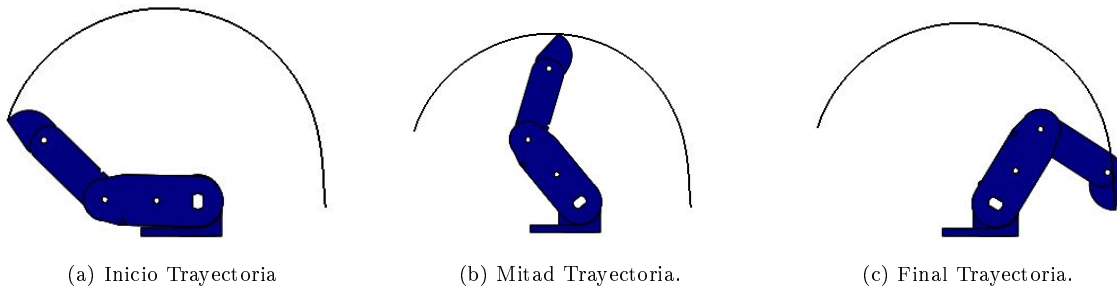


Figura 4.19: Trayectoria descrita por el dedo.

La velocidad angular del motor se puede observar en la figura 4.20, en la figura se puede observar el punto en la trayectoria donde alcanza su velocidad máxima de $36 \frac{deg}{s}$, para completar el recorrido en 5 segundos.

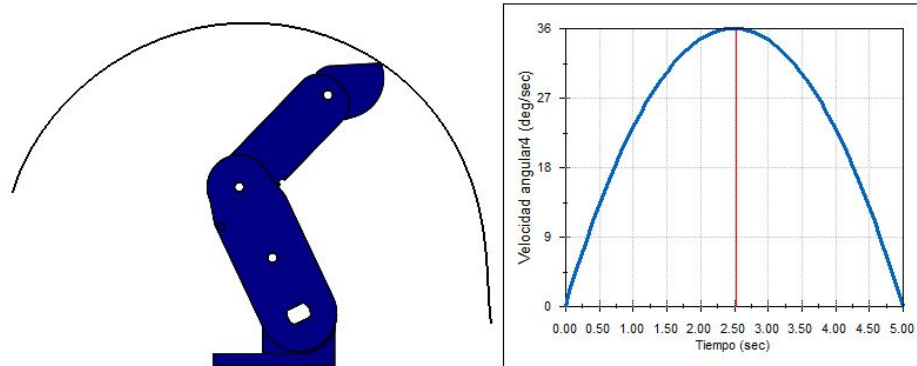


Figura 4.20: Velocidad falange Proximal.

En la figura 4.21 se observar en el eje y el máximo torque ejercido por el motor el cual es en el arranque del movimiento ya que, necesita romper la inercia del mecanismo.

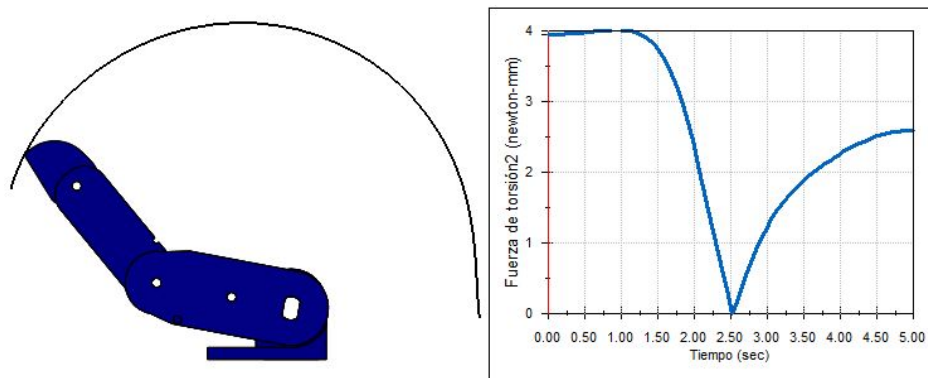


Figura 4.21: Torque ejercido por el Motor.

$$4N - mm = 0,4N - cm \quad (4.49)$$

ya que, la mayoría de los motores en su ficha técnica entregan el torque en $N - cm$ se realizó esta conversión la cual se puede ver en la ecuación 4.49.

4.5.11. Simulación velocidades de cada falange.

Como se observó anteriormente la velocidad angular a lo largo de los mecanismos varían según el ángulo y posición de los eslabones. En la figura 4.22 se puede observar la velocidad angular de la falange distal a lo largo de la trayectoria.

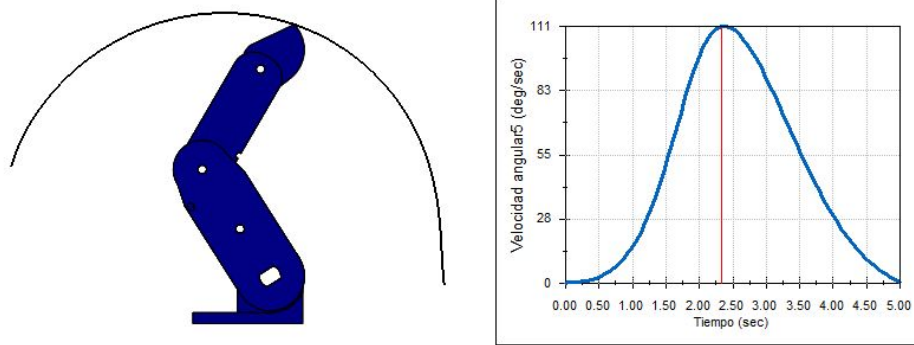


Figura 4.22: Velocidad Falange Distal.

En la figura 4.23 se puede observar que la velocidad de la falange medial se mueve a una velocidad angular menor en comparación a la velocidad a la que se mueve la falange distal, debido al mecanismo ya que, la distancia de eslabones que transmite el movimiento a la falange distal tiene una reducción de velocidad menor a el mecanismo que le trasmite el movimiento a la falange medial

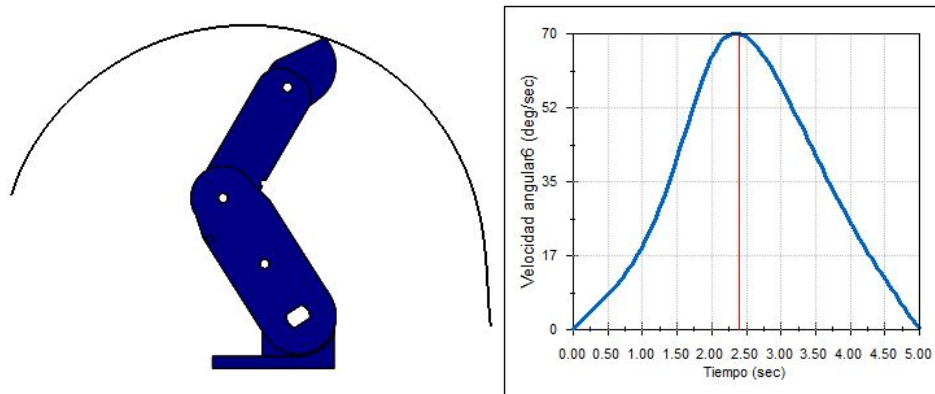
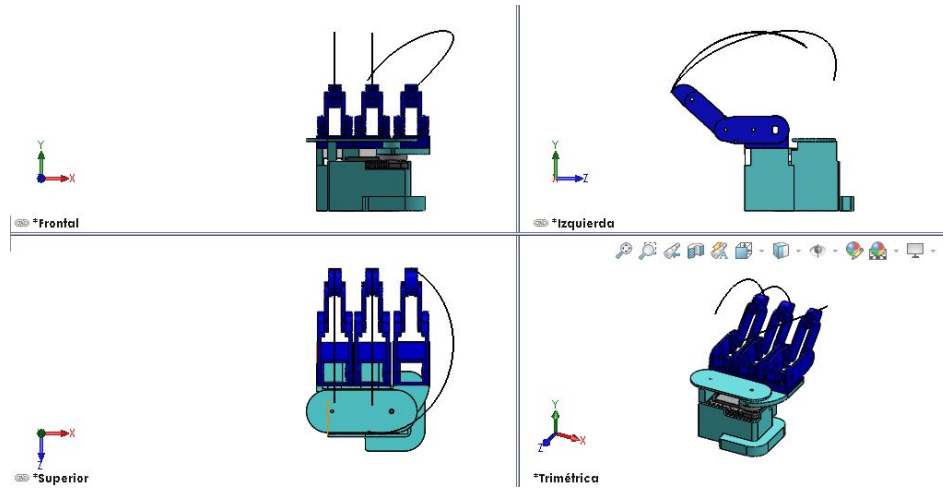


Figura 4.23: Velocidad Falange medial.

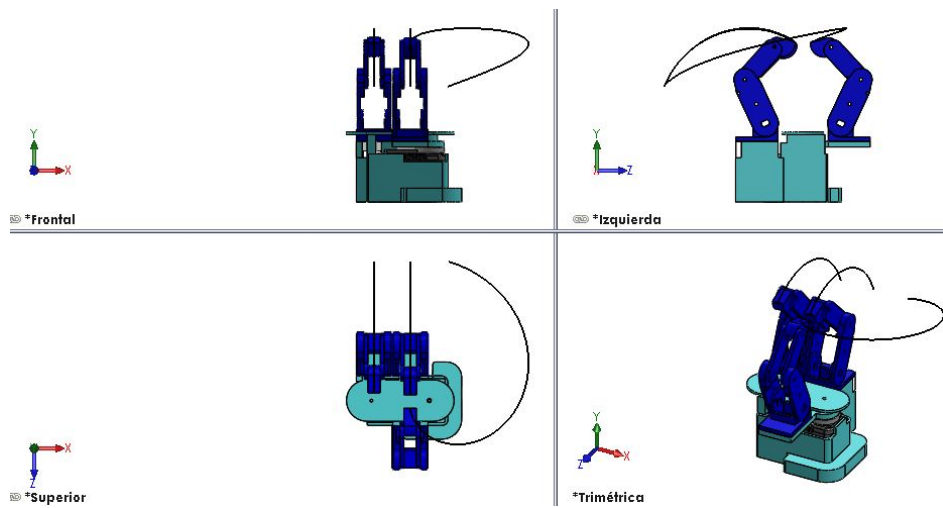
Como se observó en la figura 4.20 donde la velocidad de esta falange es la misma velocidad del motor de entrada. Se puede observar que el mecanismo se comporta como un multiplicador de velocidad, la cual tendremos de punto de partida para la selección del motor y el cálculo de la trayectoria mediante la cinemática inversa [52].

4.5.12. Simulación trayectoria ensamble.

En la figura 4.24 se muestra la manera en la que se ensamblan los dedos y una de las posibles trayectorias que este puede hacer como lo es el agarre de precisión, realizando la completa oposición de un dedo a otro.



(a) Inicio de Trayecto



(b) Fin de Trayecto.

Figura 4.24: Trayectoria Ensamble.

Se puede observar que se tiene un 4 motor el cual hará el movimiento de oposición y movimiento de potencia, del cual deben ser tenidas en cuentas sus características mecánicas como velocidad y torque adecuados para que el mecanismo funcione. Para la selección de este motor se tiene en cuenta la figura 4.25 donde se observa que el torque máximo es de $0,00108N - cm$. Su mayor punto de fuerza lo realiza al inicio del movimiento debido a que debe vencer la inercia para empezar a moverse.

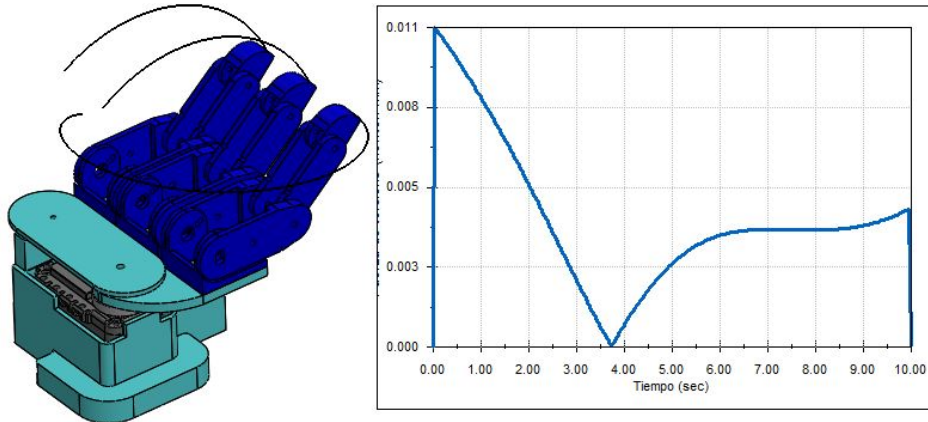


Figura 4.25: Fuerza del motor que realiza el movimiento de oposición.

4.5.13. Selección de Actuadores

Para la selección de los Motores se tuvo en cuenta el torque máximo que necesita ejercer a lo largo de la trayectoria, para el movimiento de los mecanismo de 4 barras acoplados se utilizara un servo motor el cual posee un lazo de re alimentación de posición con el cual podemos asegurar el ángulo de entrada al mecanismo. El servomotor posee una caja de reducción con piñones metálicos lo que eleva el torque que puede generar. en la tabla 4.3 se pueden observar sus características mecánicas y electrónicas.

Característica	Valor
Voltaje de Operación	4,8V a 6V
Velocidad de Operación	0,1s/60° (4,8V) - 0,08s/60° (6V)
Torque	1,8KgF.cm (4,8V) - 2,2KgF.cm (6v)

Tabla 4.3: Características motor TowerPro MG90S.

El motor de la base el cual realizará el movimiento de oposición de agarre y agarres de potencia será un servomotor Dynamixel el cual posee un control de posición con encoder más preciso que el motor anterior. En la tabla 4.4 se pueden observar las características principales para el mecanismo.

Característica	Valor
Voltaje de Operación	7V a 10V
Velocidad de Operación	0,269s/60° (4,8V) - 0,196s/60° (6V)
Torque	12KgF.cm (4,8V) - 16,5KgF.cm (6v)

Tabla 4.4: Características motor Dynamixel Ax-12A.

Capítulo 5

Modelado Biomecánico

En este capítulo se abarcarán los cálculos necesarios para generar la trayectoria física, las diferentes posiciones que puede tener el mecanismo. También se abarcarán la comparación de los modelos dinámicos entre el mecanismo y una mano humana, con el fin de asemejar la velocidad de los movimientos a los de una mano humana. Para la solución de estos aspectos se deben abarcar temas como cinemática directa, cinemática inversa, generación de trayectorias, modelo dinámico y como parte final una interfaz gráfica con la cual se genere la interacción con el mecanismo.

5.1. Cinemática

La cinemática estudia el movimiento de los cuerpos sin tener en cuenta las fuerzas o momentos que causan el movimiento [53]. La cinemática del robot se refiere al estudio analítico del movimiento de un robot manipulador. Es fundamental formular correctamente los modelos cinemáticos del mecanismo para analizar el comportamiento de los manipuladores. Existen principalmente dos espacios diferentes utilizados en el modelado cinemático de manipuladores, a saber, espacio cartesiano y espacio cuaternario. La transformación entre dos sistemas de coordenadas cartesianas se puede descomponer en una rotación y una traslación [54].

5.1.1. Cinemática Directa

Un manipulador está compuesto de enlaces en serie que están fijados entre sí por juntas revoluciones o prismáticas. El cálculo de posición y la orientación del efector final en términos de las variables conjuntas se denomina cinemática directa [26].

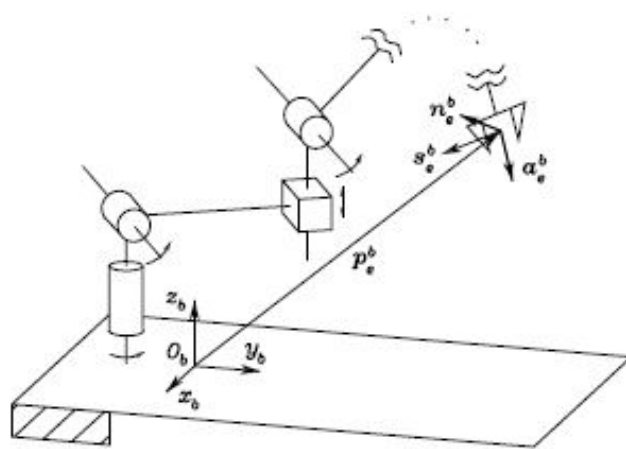


Figura 5.1: Descripción de la posición y orientación del marco del efector final [26].

En la figura 5.1 se puede observar la posición de un cuerpo respecto a su marco de referencia el cual se describe por el vector de posición del origen y los vectores unitarios del marco unido al cuerpo[55]. Por lo tanto, con respecto a un marco de referencia O_b, x_b, y_b, z_b , la función cinemática directa se expresa mediante la matriz de transformación homogénea 5.1.

$$T_e^b(q) = \begin{bmatrix} n_e^b(q) & s_e^b(q) & a_e^b(q) & p_e^b(q) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Donde q is el vector de variables de juntas ($n \times 1$), n_e, s_e y a_e son los vectores unitarios de un marco fijo al efector final, y p_c es el vector de posición desde el origen hasta el origen del marco de referencia. n_e, s_e, a_e y p_c son funciones de q . La primera forma de calcular la cinemática directa se ofrece mediante un análisis geométrico de la estructura del manipulador dado.

Una cadena cinemática abierta constituida por $n + 1$ *Links* conectados por n juntas, donde el *Link* 0 es convencionalmente atado a tierra o la referencia a cero.

5.1.2. Convención Denavit-Hartenberg

La forma más difundida para definir un modelo de robot se llaman parámetros DH (Denavit-Hartenberg). Esta convención estandariza los marcos de coordenadas de los *Links* de un manipulador o una cadena cinemática [27]. Los robots que poseen *Links* en serie que comprende un conjunto de cuerpos, cada articulación tiene un grado de libertad, ya sea rotacional o traslación. Tener en cuenta que la suposición no implica una pérdida real de generalidad, ya que, las articulaciones como una articulación esférica (dos grados de libertad) o una muñeca esférica (tres grados de libertad) siempre pueden considerarse como una sucesión de grados únicos. Juntas de libertad con eslabones de longitud cero. Para un manipulador con n articulaciones numeradas de 1a n , hay $n + 1$ enlaces, numerados de 0 a n . El enlace 0 es la base del manipulador, generalmente fijo, y el enlace n lleva el efector final [56].

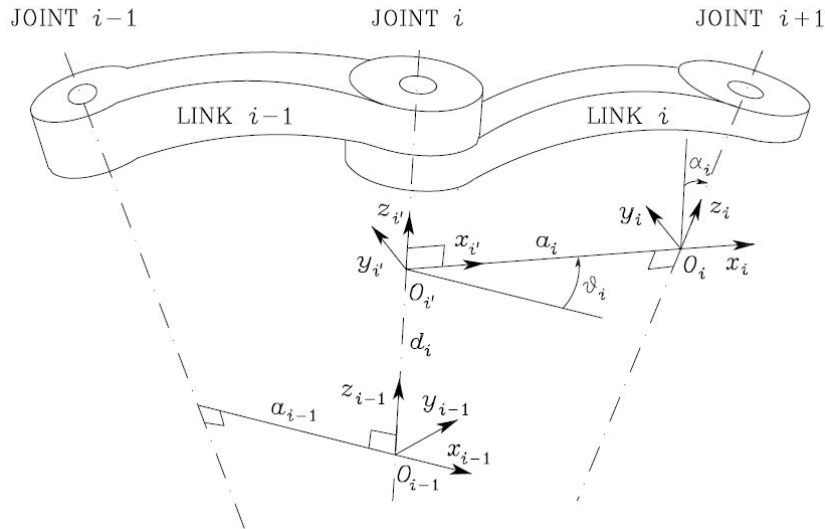


Figura 5.2: Denavit-Hartenberg Parámetros cinemáticos [27].

El principal objetivo es determinar los marcos de referencia de los *Links* y calcular las transformaciones de coordenadas entre ellos.

La transformación que describe la posición y orientación de un marco n con respecto al marco 0 se tiene por:

$$T_n^0(q) = A_1^0(q_1)A_2^1(q_2) \dots A_n^{n-1}(q_n) \quad (5.2)$$

Para calcular la ecuación de la cinemática directa para un manipulador de cadena abierta de acuerdo con la expresión recursiva en 5.2, se debe obtener un marco general para definir la posición relativa y la orientación de dos enlaces consecutivos; El problema es que para determinar dos cuadros adjuntos a los dos enlaces y calcular las transformaciones de coordenadas entre ellos. Los marcos de referencia pueden ser arbitrarios, pero es conveniente establecer algunas reglas.

- Elegir el Eje z_i a lo largo del eje de la junta $i + 1$.
- Localizar el origen O_i en la intersección del eje z_i con la normal común a los ejes z_{i-1} y z_i
- Elegir el eje x_i a lo largo de la normal común a los ejes z_{i-1} y z_i en la dirección de la junta i a la junta $i + 1$
- Elegir el eje y_i según la regla de la mano derecha.

Una vez establecidos los marcos, se puede determinar la posición y orientación del marco i con respecto al marco $i - 1$ mediante los siguientes parámetros:

- a_i Distancia entre O_i y $O_{i'}$ (Constante)
- d_i Coordenada de $O_{i'}$ a lo largo de z_{i-1}
- α_i Ángulo entre los ejes z_{i-1} y z_i alrededor de x_i , positivo en sentido horario (constante)
- θ_i Ángulo entre los ejes x_{i-1} y x_i alrededor de z_{i-1} , positivo en sentido anti horario (Juntura i rotacional)

Dos de los cuatro parámetros (a_i y α_i) son siempre constantes y dependen de la geometría de los eslabones y conexión entre las juntas consecutivas. Los otros dos parámetros, son variables pero dependen del tipo de junta que conecta *Link* $i - 1$ a el *Link* i . En particular:

- Si la junta i es de revolución la variable es θ_i
- Si la junta i es prismática la variable es d_i

Con estos puntos es posible expresar la transformación de coordenadas entre el marco i y el marco $i - 1$

- Elegir un marco alineado con $i - 1$
- Trasladar el marco d_i a lo largo del eje z_{i-1} y rotar θ_i alrededor de z_{i-1} , alinea el marco actual con i' .

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

- Trasladar el marco alineado con i' a_i a lo largo de x_i y rotar α_i alrededor de x_i' alinea el marco actual con el marco i .

$$A_i^{i'} = \begin{bmatrix} 1 & -s\theta_i & 0 & a_i \\ 0 & c\alpha_i & -c\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

La transformación de coordenadas resultante, por multiplicación de las transformaciones individuales.

$$A_i^{i-1}(q_i) = A_i^{i-1} A_i^{i'} \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i c\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Observe que la matriz de transformación del marco i al marco $i - 1$ es una función solo de la variable conjunta q_i , es decir, θ_i para una junta revolucionaria o d_i para una junta prismática.

Con lo anterior se procede a realizar la cinemática inversa del dedo índice tratándolo como manipulador *RRR*. Dos de los tres dedos poseen 3 grados de libertad y el otro faltante posee 4 ya que, realiza el movimiento de oposición. ya que, conocemos los ángulos que ejecuta cada falange mediante el mecanismo sub actuado y tratando la falange distal como nuestro efector final ya que, será el que estará en contacto directo con los objetos. El dedo se puede aproximar a la forma de un Manipulador planar de 3 eslabones[28], como el que se muestra en la figura 5.3.

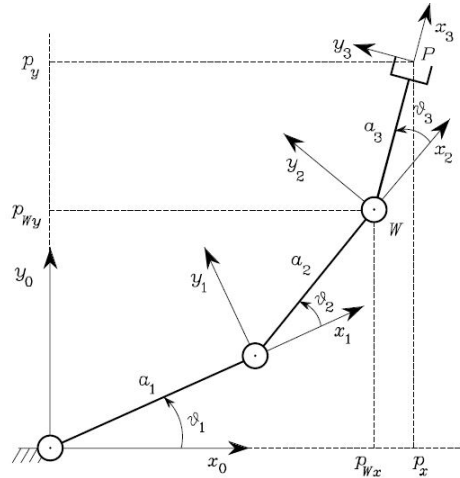


Figura 5.3: Manipulador planar de tres eslabones [28].

Basándose en ese diagrama de eslabones se elabora el cuadro D-H con los parámetros pertinentes. Los parámetros o funciones de los ángulos, se hallan solucionando la ecuación de freudenstein, el cuadrado de los ángulos, es debido a que en un mecanismo de cuatro barras siempre hay un ángulo contrario el cual conforma el espejo del mecanismo.

Tabla 5.1: Parámetros D-H Dedo índice.

Link	a_i [mm]	α_i	d_i	θ_i
1	35	0	0	θ_1
2	32	0	0	$[0,0039\theta_1^2 - 1,158\theta_1 + 24]^\circ$
3	13	0	0	$[0,004\theta_1^2 - 1,504\theta_1 + 18]^\circ$

Con los parámetros definidos D-H se realiza el cálculo de la matriz final de transformación la cual nos permitirá saber la posición final de la falange distal. Para esto se utilizaran la ecuación 5.2 y 5.5. Se comenzara con $A_1^0(q_1)$ sabiendo que es la transformación del eslabón 1 en este caso la falange proximal respecto a la articulación o base del mecanismo.

$$A_1^0(q_1) = \begin{bmatrix} \text{Cos}\theta & -\text{Sen}\theta_1 & \text{Sen}\theta_1 & 35\text{Cos}\theta_1 \\ \text{Sen}\theta & \text{Cos}\theta_1 & 0 & 35\text{Sen}\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Para el siguiente eslabón se debe recordar según la tabla 5.1 el valor de θ_2 para el *Link 2* en este caso la falange Medial es $0,0039\theta_1^2 - 1,158\theta_1 + 165,64$ con el cual se puede reemplazar en la ecuación (64).

$$A_2^1(q_2) = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & s\theta_2 & 32c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 32s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Se realiza el procedimiento de la ecuación 5.7 para calcular la matriz de transformación de la falange distal conociendo que $\theta_3 = 0,004\theta_1^2 - 1,504\theta_1 + 184,47$. Recordar que nuestro efector final es la yema

de la falange distal.

$$A_3^2(q_3) = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & s\theta_3 & 13c\theta_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 13s\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Se realiza la post multiplicación de las ecuaciones 5.6, 5.7 y 5.8 para calcular la matriz de transformación homogénea completa.

$$T_3^0(q) = \begin{bmatrix} m_x & h_x & j_x & p_x \\ m_y & h_y & j_y & p_y \\ m_z & h_z & j_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$C_1 = \text{Cos}\theta_1$$

$$C_2 = \text{Cos}\theta_2$$

$$C_3 = \text{Cos}\theta_3$$

$$S_1 = \text{Sen}\theta_1$$

$$S_2 = \text{Sen}\theta_2$$

$$S_3 = \text{Sen}\theta_3$$

$$fp = 35$$

$$fm = 32$$

$$fd = 13$$

$$m_x = C_3(C_1 \cdot C_2 - S_1 \cdot S_2) - S_3(C_1 \cdot S_2 + S_1 \cdot S_2) \quad (5.10)$$

$$m_y = C_3(C_2 \cdot S_1 + S_1 \cdot S_2) \quad (5.11)$$

$$m_z = 0 \quad (5.12)$$

$$h_x = S_3(C_1 \cdot C_2 - S_1 \cdot S_2) - S_3(C_1 \cdot S_2 + S_1 \cdot S_2) \quad (5.13)$$

$$h_y = -S_3(C_2 \cdot S_1 + S_1 \cdot S_2) \quad (5.14)$$

$$h_z = 0 \quad (5.15)$$

$$j_x = 0 \quad (5.16)$$

$$j_y = 0 \quad (5.17)$$

$$j_z = 1 \quad (5.18)$$

$$p_x = C_1 \cdot fp - fd \cdot S_3(-CC_1 \cdot S_2 + S_1 \cdot S_2) + C_1 \cdot C_2 \cdot fm - fm \cdot S_1 \cdot S_2 + C_3 \cdot fd \cdot (C_1 \cdot C_2 - S_1 \cdot S_2) \quad (5.19)$$

$$p_y = fp \cdot S_1 \cdot C_3 \cdot fd \cdot (C_2 \cdot S_1 + S_1 \cdot S_2) + C_2 \cdot fm \cdot S_1 + fm \cdot S_1 \cdot S_2 \quad (5.20)$$

$$p_z = 0 \quad (5.21)$$

Con la matriz de transformación se puede observar en la figura 5.4 el desplazamiento que puede realizar el mecanismo gracias a las matrices halladas anteriormente, se puede realizar una simulación mediante MATLAB® representando las falanges mediante eslabones sólidos.

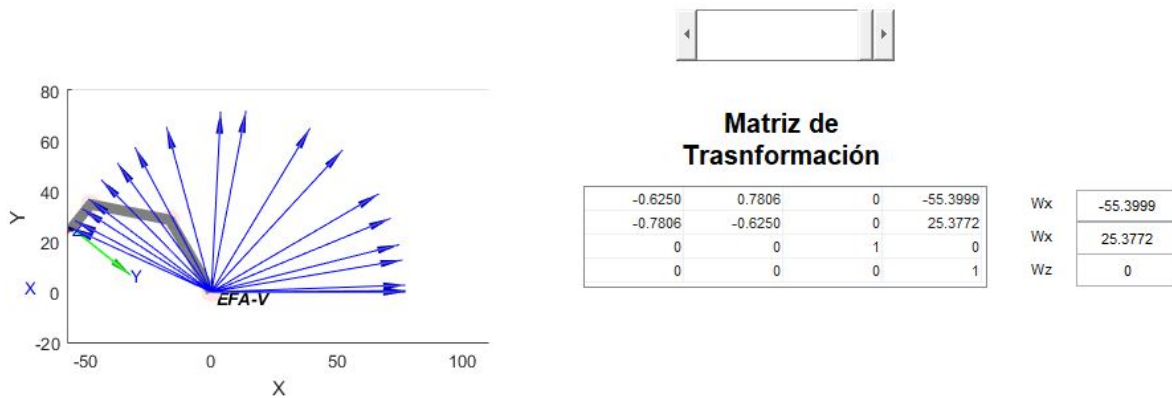


Figura 5.4: Cinemática Directa.

Se puede observar la matriz de transformación final hallada y las posiciones del punto final con la cual aplicando la cinemática Inversa deben dar los ángulos de entrada de la cinemática directa.

5.1.3. Cinemática Inversa

La cinemática directa establece la relación entre las variables de junta y la posición y orientación del efector final. La cinemática inversa consiste en determinar las correspondientes variables de junta dadas por la orientación y posición del efector final[57].

5.1.3.1. Solución de un Manipulador Planar de Tres Eslabones.

Considere el manipulador de la figura 5.3, cuya cinemática directa se proporciono en (66). Se desea encontrar las variables de junta de θ_1 correspondiente a una posición y orientación del efector final dentro de sus coordenadas de trabajo.

Como ya se señaló, es conveniente especificar la posición y la orientación en términos de un número mínimo de parámetros: las dos coordenadas p_x , p_y el ángulo ϕ con el eje x_o , en este caso.

Se puede referir la ecuación de cinemática directa en la forma 5.22.

$$x_e = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ \phi \end{bmatrix} = k(q) = \begin{bmatrix} fpc1 + fmc_{12} + fdc_{123} \\ fps_1 + fms_{12} + fds_{123} \\ \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

De la ecuación 5.22 se tiene que ϕ es la relación de orientación del mecanismo. Teniendo en cuenta que los valores de a_i son los mismos que se declararon en la convención de D-H anteriormente. Los resultados de las coordenadas p_x y p_y fueron obtenidas en 5.19 y 5.20, se realiza la simplificación de coordenadas las cuales nos resultan en la siguientes igualdades:

$$pw_x = fpC_1 + fmC_{12} + fdC_{123} \quad (5.23)$$

y

$$pw_y = fpS_1 + fmS_{12} + fdS_{123} \quad (5.24)$$

Las cuales describen la posición del punto W de la figura 5.3, el cual depende solo de los ángulos de los mecanismos de 4 barras ya desarrollados anteriormente. Para la solución de la orientación se utiliza en método geométrico y utilizando ley de cosenos entre la falange proximal y la falange medial se tiene un triángulo entre O y W . En la figura se pueden observar las posiciones admisibles de un manipulador RRR planar.

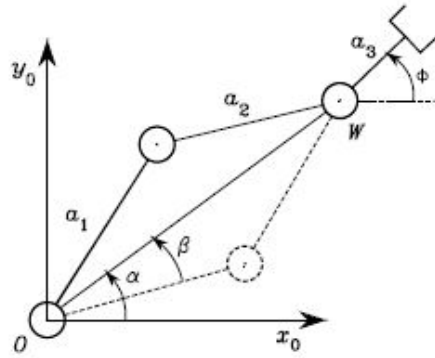


Figura 5.5: Manipulador planar de tres eslabones .

$$Pw_x^2 + Pw_y^2 = fp^2 + fm^2 - 2fpfm\cos(\pi - \theta_2) \quad (5.25)$$

Las dos configuraciones admisibles del triángulo mostrado en la figura 5.5 se observa que $\cos(\pi - \theta_2) = -\cos\theta_2$ [52]. De esto se tiene que:

$$C_2 = \frac{Pw_x^2 + Pw_y^2 - fp^2 - fm^2}{2fpfm} \quad (5.26)$$

Para que la ecuación 5.26 se cumpla tiene que darse la condición $\sqrt{Pw_x^2 + Pw_y^2} \leq fp + fm$. Esta condición no se cumple cuando el punto dado está fuera del espacio de trabajo del manipulador o mecanismo [58]. Partiendo de la condición anterior se asume la siguiente solución para el sistema:

$$\theta_2 = \pm \cos^{-1}(c_2); \quad (5.27)$$

Existen dos soluciones para el sistema las cuales se llaman codo arriba y codo abajo [52], las cuales se obtienen para $\theta_2 \in (-\pi, 0)$ para codo abajo y la postura codo arriba se obtiene con $\theta_2 \in (0, \pi)$. Para encontrar θ_1 consideramos los ángulos α y β en la figura 5.5. Se debe tener en cuenta que para la determinación de α depende del signo de Pw_x y Pw_y ; Entonces, es necesario calcular α como:

$$\alpha = \text{Atan2}(Pw_y, Pw_x) \quad (5.28)$$

Aplicando nuevamente el teorema del coseno se tiene lo siguiente:

$$fp^2 = fp^2 + \left(\sqrt{Pw_x^2 + Pw_y^2}\right)^2 - 2fp\sqrt{Pw_x^2 + Pw_y^2}\text{Cos}(\beta) \quad (5.29)$$

De la ecuación se procede a despejar β :

$$\beta = \text{Cos}^{-1} \left(\frac{Lpp^2 - Lmp^2 + Pw_x^2 + Px_y^2}{2Lpp\sqrt{Pw_x^2 + Px_y^2}} \right) \quad (5.30)$$

$$\theta_1 = \alpha \pm \beta \quad (5.31)$$

5.2. Espacio de Trabajo

Un aspecto importante en el desarrollo de un manipulador es conocer su espacio de trabajo con el fin de evitar singularidades a la hora de generar un movimiento, a continuación, se describirá el jacobiano para el dedo, con el cual se calcularán las singularidades y el espacio de trabajo de cada dedo. Es necesario recordar la expresión del jacobiano para el tipo de junta como se observara en la figura 5.32.

$$\begin{bmatrix} J_{Pi} \\ J_{Oi} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{array}{c} \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (p_e - p_{e-1} - p_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \end{array} \right\} \quad (5.32)$$

Para este caso el Jacobiano esta dado por:

$$J(q) = \begin{bmatrix} z_0 \times (p_3 - p_0) & z_1 \times (p_3 - p_1) & z_2 \times (p_3 - p_2) \\ z_0 & z_1 & z_2 \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

El vector de posición para los diversos *Links*, recordando el valor de cada vector 5.1:

$$p_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

$$p_1 = \begin{bmatrix} 35C_1 \\ 35S_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

$$p_2 = \begin{bmatrix} 35C_1 + 32C_{12} \\ 35S_1 + 32S_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

$$p_3 = \begin{bmatrix} 35C_1 + 32C_{12} + 13C_{123} \\ 35S_1 + 32S_{12} + 13S_{123} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

Ahora se calcula el valor de los vectores unitarios de los ejes de las articulaciones revolucionarias:

$$z_0 = z_1 = z_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

$$J = \begin{bmatrix} -35S_1 - 32S_{12} - 13S_{123} & -32S_{12} - 13S_{123} & -13S_{123} \\ 35C_1 + 32C_{12} + 13C_{123} & 32C_{12} + 13C_{123} & 13C_{123} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

De 5.39 son necesarias las tres primeras filas de la matriz con las cuales se realizara las operaciones respectivas, con las cuales se determinan las singularidades del sistema o mecanismo. Al tener las singularidades del sistema tenemos los ángulos y puntos los cuales el dedo no puede llegar.

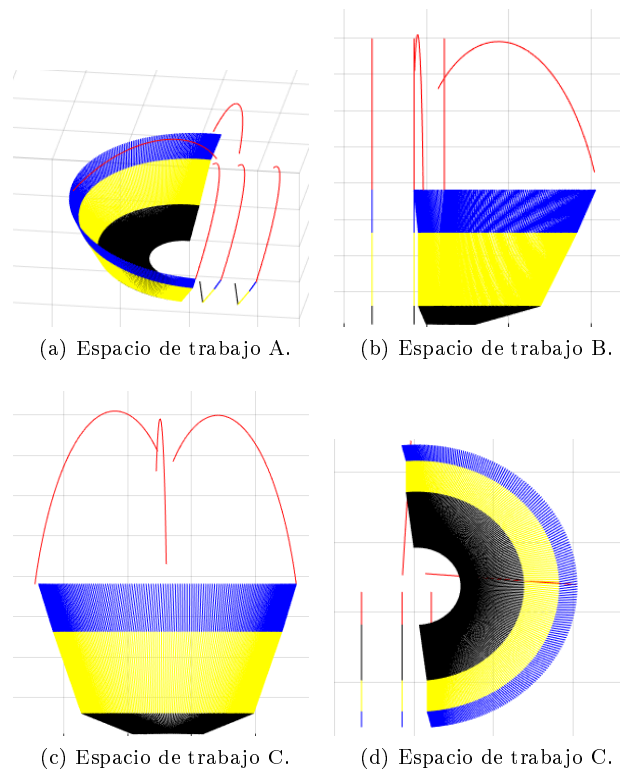


Figura 5.6: Espacio Trabajo efector final.

En la figura 5.6 se pueden observar diferentes colores donde el Negro representa la capacidad externa de la falange proximal, el color amarillo representa el exterior de la falange medial y el color azul representa el exterior de la falange distal. Las líneas rojas son el máximo alcance que puede poseer el efector final donde puede ejercer fuerza o presión sobre objetos que estén dentro del campo de trabajo y puede manipular con precisión objetos que se encuentren dentro de las trayectorias rojas.

Capítulo 6

Implementación

Con los cálculos de mecanismos, la cinemática directa e inversa y el modelo dinámico se procede a realizar la implementación del mecanismo. Es importante tener en cuenta las relaciones entre los ángulos de entrada de cada falange para proporcionar de manera adecuada el movimiento sub actuado de estos. Como primer paso se realiza el prototipo de las piezas mostradas en el capítulo 4 en ABS el cual tiene unas propiedades mecánicas ideales para la construcción prototipo y pruebas del mecanismo. Para la entrada de potencia y velocidad al sistema se implementa un mecanismo piñón corona de relación 1:1 para no afectar en nada al sistema de 4 barras y que sea este el que proporcione la transmisión y multiplicación de potencia a cada articulación del mecanismo.

6.1. Prototipado Rápido

Para el prototipado y creación de la mayoría de las piezas del mecanismo, como las barras, las falanges y las bases de los motores. El ABS el cual es el nombre dado a una familia de termo plásticos. Se le llama plástico de ingeniería, debido a que es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes. Los materiales de ABS tienen importantes propiedades en ingeniería, como buena resistencia mecánica y al impacto combinado con facilidad para el procesado.

6.2. Control de Posición

Para asegurar que la junta se mueva de forma correcta y llegue a la posición que deseamos se monta un lazo cerrado sobre el actuador físico, que en nuestro caso es un ServoMotor Tower Pro 90MG. Este motor internamente tiene un lazo de control de posición el cual viene representado en el cuadro llamado *Subsystem* el cual se encuentra dentro de los bloques comprendidos en el sistema de la figura 6.8. El controlador interno del Servo Motor está distribuido como se muestra en la figura.6.1, donde se puede observar la referencia de posición (señal de control exterior) la cual viene en forma de PWM a 50Hz el cual pasa por un convertor de voltaje el cual es un circuito electrónicos que convierten una tensión continua en otro nivel de tensión continuá y genera una salida regulada. Este tipo de convertor es de tipo reductor el cual puede controlar el componente continuo de la señal de referencia con una señal de pulsos. Después de pasar por el convertor la señal de PWM se compara con la señal de referencia del motor el cual está siendo sensado por un potenciómetro el cual esta acoplado a una caja reductora. En el diagrama representado como un amplificador esta el lazo de control del sistema del cual la salida pasa por una etapa de potencia el cual puede ser un *push-pull* para generar la inversión de giro y proporcionar la corriente para efectuar el torque solicitado al motor. Este lazo de control es tenido en cuenta en el modela miento en SimuLink®.

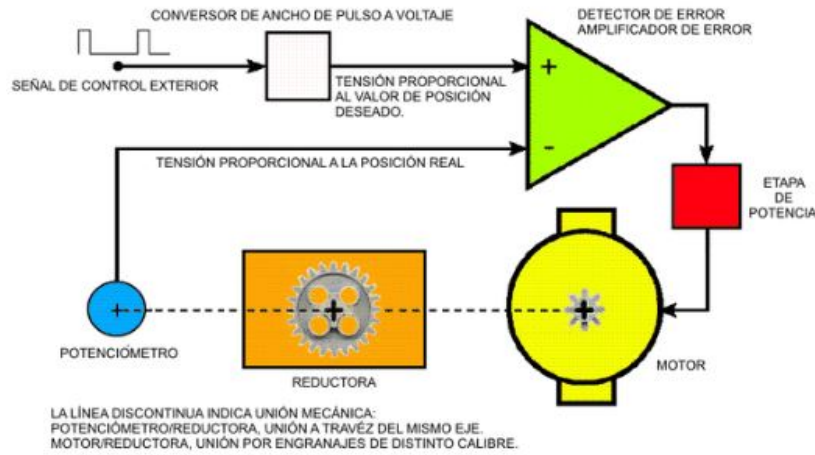


Figura 6.1: Esquema de bloques de un Servomotor de Posición.

En la figura se observa el control por espacio de estados, el cual ingresa los 3 estados requeridos por el *JointActuator2*.

6.2.1. Modelado del Motor

La velocidad angular del eje de carga con respecto a el voltaje de entrada del motor puede ser descrito mediante la siguiente función de transferencia de primer orden:

$$\frac{\Omega(s)}{Vm(s)} = \frac{K}{(\tau s + 1)} \quad (6.1)$$

donde $\Omega(s)$ es la transformada de Laplace de la velocidad del eje de carga $\omega(t)$, $Vm(s)$ es la transformada de Laplace del voltaje de entrada $v_m(t)$, K es la ganancia de estado estacionario, τ es la constante de tiempo y s es el operador de Laplace.

El esquemático del circuito de un motor DC controlado por armadura se encuentra en la figura 6.11, en donde R_m es la resistencia del motor L_m es la inductancia y K es la constante de la fuerza contra electro motriz.

El voltaje $e_b(t)$ generado por la fuerza contra-electromotriz depende de la velocidad del eje del motor ω_m y de la constante de la fuerza contra electro-motriz K . Esta fuerza se opone al flujo de corriente. El voltaje producido por la fuerza contra-electromotriz está dado por:

$$e_b(t) = K\omega_m(t) \quad (6.2)$$

Usando la ley de Kirchoff de voltaje, se tiene la siguiente ecuación:

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - L_m \frac{dI_m(t)}{dt} - K \frac{d\theta}{dt} = 0 \quad (6.3)$$

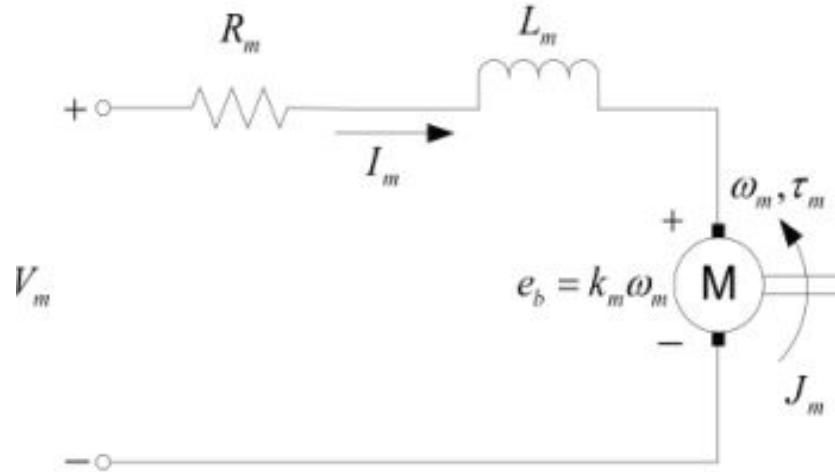


Figura 6.2: Diagrama Motor DC.

Despejando $V_m(t)$ de 6.3 se tiene lo siguiente:

$$V_m(t) = R_m I_m(t) + L_m \frac{dI_m(t)}{dt} + K \frac{d\theta}{dt} \quad (6.4)$$

La ecuación 6.4 es la ecuación del circuito eléctrico del Motor.

A continuación se pasa al dominio de Laplace 6.4 y se despeja la corriente de esta:

$$I = \frac{V(s) - \theta(s)}{R + L(s)} \quad (6.5)$$

A continuación se procede con el Circuito Mecánico:

$$\tau(t) = K_t I \quad (6.6)$$

$$\tau(t) = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + \beta \frac{d\theta}{dt} \quad (6.7)$$

$$K_t I = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + \beta \frac{d\theta}{dt} \quad (6.8)$$

Pasando al dominio de Laplace se tiene que:

$$K_t I = J s^2 \theta + \beta s \theta \quad (6.9)$$

$$K_t \left(\frac{V(s) - K_f \theta s}{R + L s} \right) = s^2 J \theta + \beta s \theta \quad (6.10)$$

$$V(s) K_t - K_t K_f \theta s = (s^2 J \theta + \beta s \theta) (R + L s) \quad (6.11)$$

$$V(s) K_t - (s^2 J \theta + \beta s \theta) (R + L s) + K_f K_t \theta s \quad (6.12)$$

$$V(s) K_t = \theta (s^2 J + \beta s) (R + L s) + K_f K_t s \quad (6.13)$$

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{(s^2 J + sB)(R + Ls) + K_f K_t s} \quad (6.14)$$

Con la función de transferencia se procede a calcular las matrices de estado las cuales dan lo siguiente:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-b}{J} & \frac{K}{J} \\ 0 & \frac{-K}{L} & \frac{-K}{L} \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (6.17)$$

$$K_f K_t = 0,17$$

$$K = 0,5730$$

$$J = 21890,7 \times 10^{-6}$$

$$L = 5,43 \times 10^{-3}$$

Se realiza un control por espacio de estados mediante Akkerman con el fin de obtener la simulación más cercana a la realidad tratando de igualar el comportamiento del Servomotor adquirido. Se diseña con un tiempo de establecimiento de 2 segundos con un ξ igual a 1 con el fin de no tener oscilación sobre la referencia, con estos parámetros de diseño se calcula el polinomio característico de nuestro sistema el cual esta descrito por la siguiente ecuación:

$$\text{PolinomioDeseado} = (s^2 + 2s\xi W_n + W_n^2) \times (10\xi W_n + s)^2 \quad (6.18)$$

Con la ecuación 6.18, se calculan las raíces del polinomio ya que, se utilizara la función Acker de MATLAB® la cual necesita como parámetros de entrada la matriz A , B y el vector de las raíces del polinomio característico. Esta función nos entrega los siguientes parámetros donde $K(1 : 3)$ son las constantes de la matriz K y la ultima posición es la constante de integración del espacio de estados.

$$K = [45,9679 \quad 1,3359 \quad 0,3896 \quad -315,2293] \quad (6.19)$$

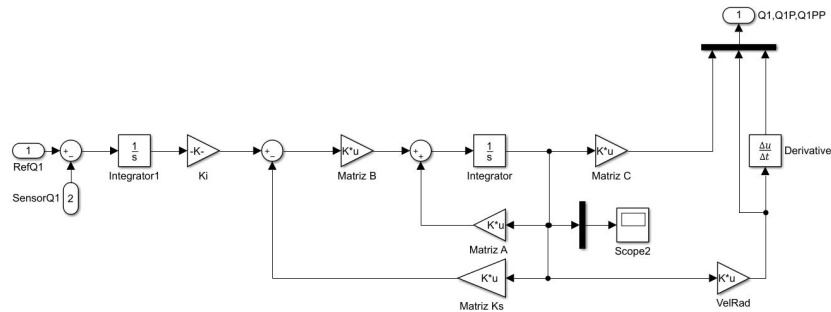


Figura 6.3: Esquema de bloques de un Servomotor de Posición.

De la ecuación 6.19 recordar que $K(1,3)$ es la constante de integración K_i . A continuación se mostrara la manera como reaccionan los estados ante una referencia de posición diferente.

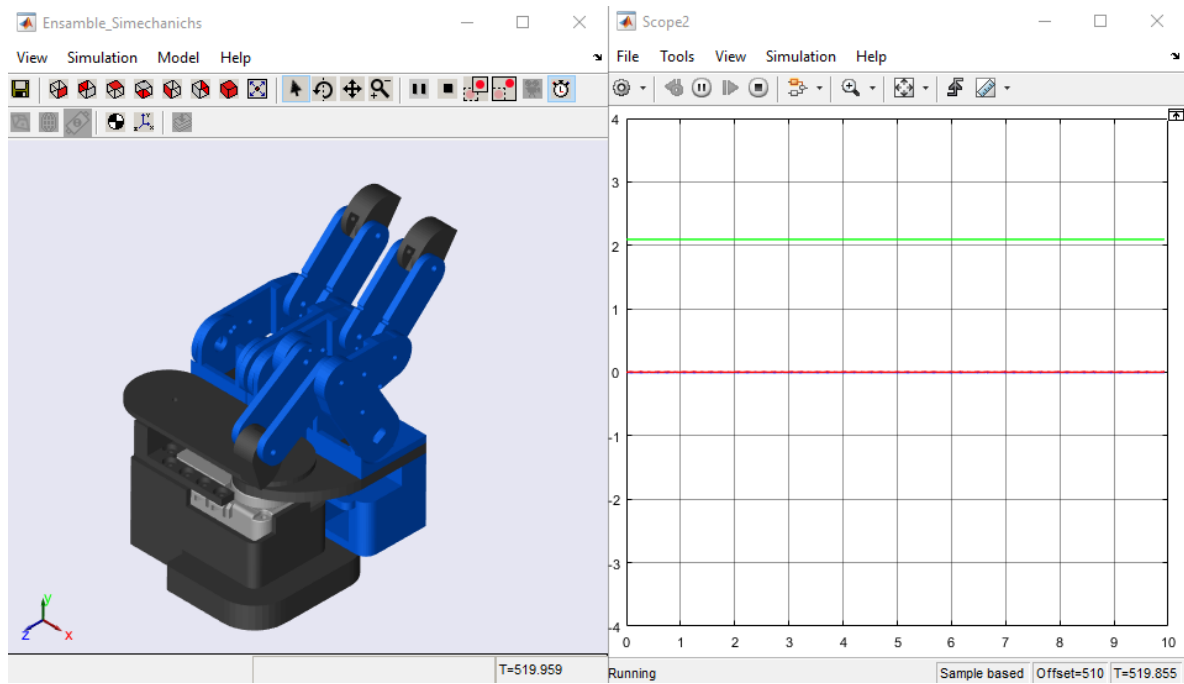


Figura 6.4: Posición cerrada.

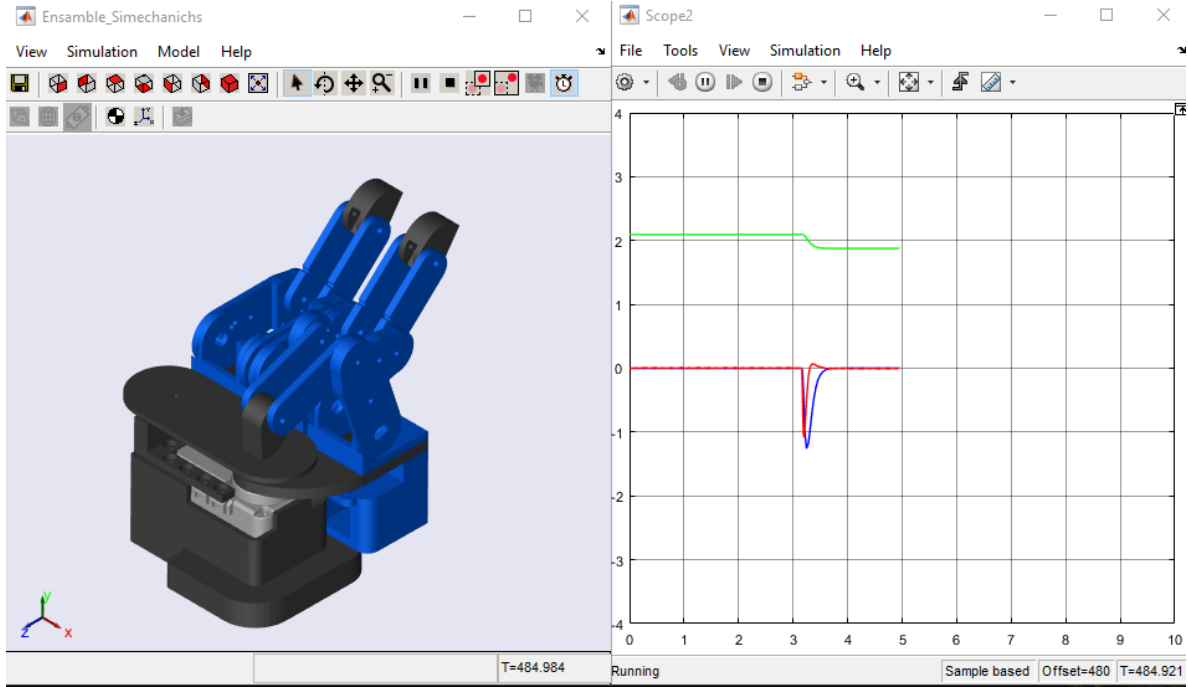


Figura 6.5: Segunda Posición

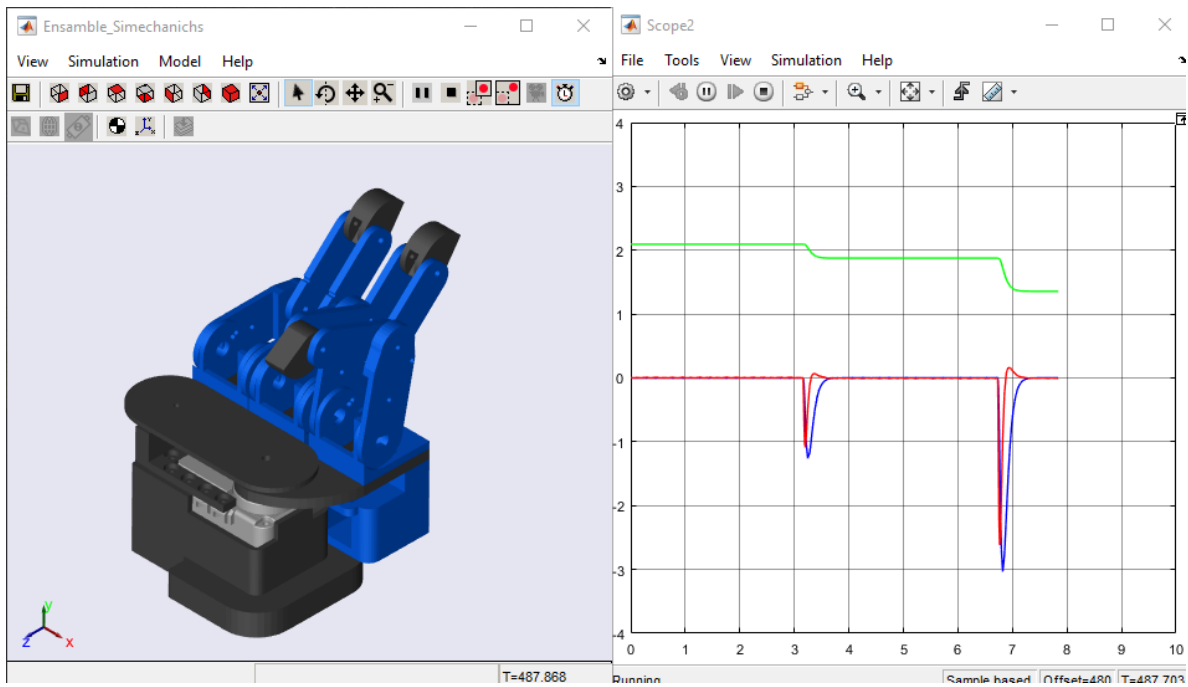


Figura 6.6: Tercera Posición

6.3. Interfaz Gráfica

Para el desarrollo de la interfaz gráfica se tuvo en cuenta la cinemática directa e inversa la cual se calculó en el capítulo anterior. Esta el cual proporciona un entorno de simulación multi cuerpo para sistemas mecánicos 3D, como robots, suspensiones de vehículos, equipo de construcción y trenes de aterrizaje de aviones. ya que, previamente se realizó el modelo CAD en SolidWorks®, se deben exportar las piezas y el ensamble mediante *SimScape Multybody First Generation*.

Simscape Multibody permite generar una animación en 3D se deben tener en cuenta el tipo de junta, su rotación y orientación para poder ser configurada de forma correcta. ya que, las articulaciones de nuestro robot son de revolución se debe configurar la junta de revolución de este y colocar un lazo de control con el cual se pueda ajustar la posición deseada de los eslabones. Esta animación estará conectada con un GUI de MATLAB®. En la figura 6.7, se muestra la interfaz con la cual se podrá interactuar con el mecanismo. Se realiza el Modo Manual el cual esta conformado por la cinemática directa ya calculada donde da un ángulo de entrada y se puede observar el movimiento del mecanismo, por otro lado, el Modo Automático se realiza la cinemática inversa donde se ingresa el agarre deseado y el tamaño del objeto para simular el agarre. Se integran dos botones para realizar la conexión y des conexión de la comunicación serial. Esta esta compuesta de 4 *Sliders*, 2 para el dedo uno el cual contara con el grado de rotación de la base sobre su eje *y* y el otro para su ángulo de entrada en la primera articulación lo mismo para el Dedo 2 y Dedo 3.

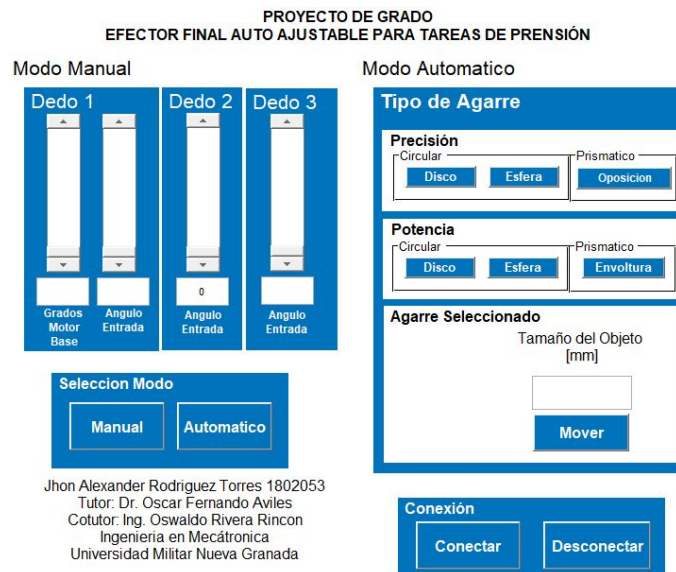


Figura 6.7: Interfaz Grafica.

El mecanismo se podrá ver en una ventana creada por SimuLink® donde está toda la arquitectura del modelo 3D. En la figura 6.8 se muestra la visualización 3D con la cual se puede estimar la posición real del mecanismo en dado caso que no se esté en plena visualización del mecanismo.

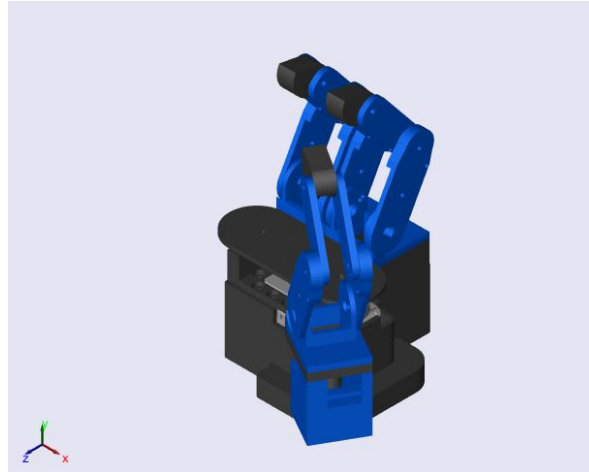


Figura 6.8: Visualización 3D.

En la figura se muestra la composición por bloques para la generación de la animación 3D del mecanismo.

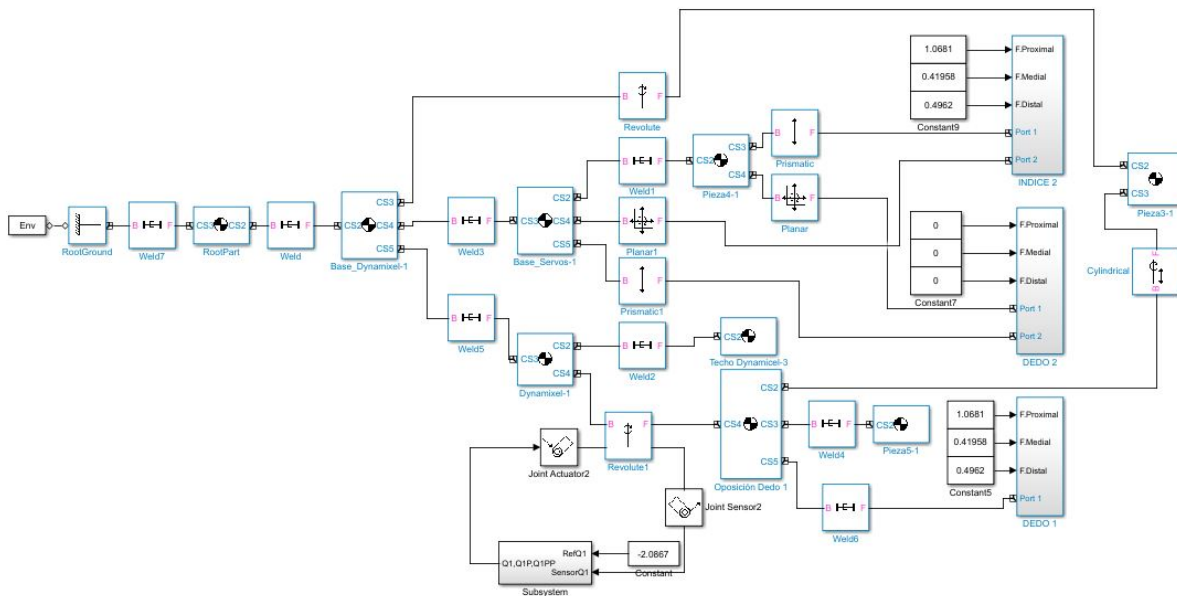


Figura 6.9: Visualización 3D.

Se puede apreciar cada componente necesario para la elaboración de la animación del mecanismo, donde se puede observar cada pieza como el Motor con su bloque específico llamado Dynamixel el cual realiza el movimiento de rotación alrededor del eje y y el cual permite el movimiento de $0^\circ - 180^\circ$ donde se realiza un lazo de re alimentación para asegurar la posición de la articulación o de la junta. Se debe tener en cuenta que *Joint Actuator2* debe recibir 3 estados como se muestra en la figura 6.10. El *Joint Sensor2* debe tener las mismas unidades para que pueda re alimentar la posición de forma correcta.

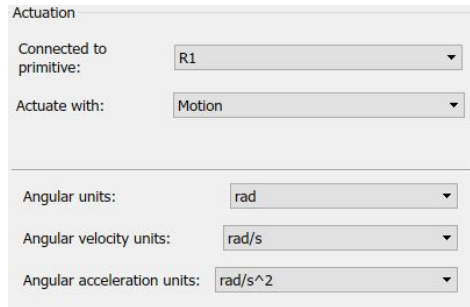


Figura 6.10: Parámetros Actuador.

6.4. Sistema Eléctrico y de Potencia

Para realizar el movimiento de cada dedo como se informo anteriormente es necesario entregar una referencia de posición en la que se asocia la entrada en ángulo en grados el cual tiene asignado un ciclo útil de PWM definido como se muestra en la figura 6.11.

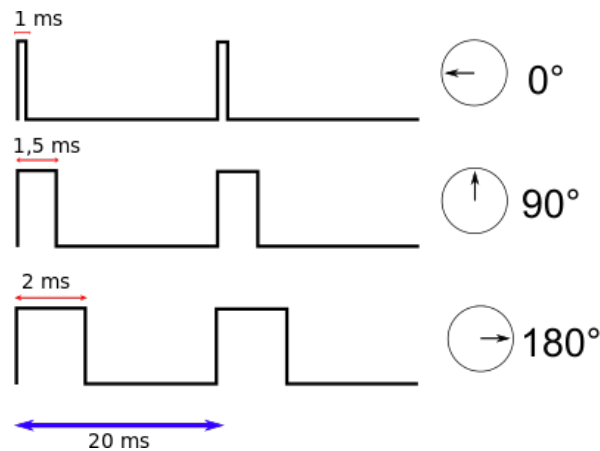


Figura 6.11: Relación Ciclo Util-ángulo.

Para realizar la señal de PWM se utiliza una tarjeta Arduino UNO las cuales se deben tener en cuenta las características principales para el mecanismo.

1. Puertos Seriales TX y RX los cuales son conectados a sus correspondientes pines FTDI USB-a-TTL Serial chip.
2. Salidas PWM (6) a $50Hz$ cada una.
3. Interrupciones externas e internas para realizar la comunicación.

6.4.1. Comunicación

Para que el mecanismo reciba los datos provenientes de la interfaz gráfica, se realiza mediante comunicación serial con un modulo Bluetooth HC06.

Capítulo 7

Resultados

7.1. Ensamble del Efecto Final y Pruebas.

Se realizó el montaje y mecanizado de los ejes que soportaran el mecanismo, dichos ejes están hechos en aluminio y roscados con una tierra de $1/16NF$, a continuación se muestra el ensamble inicial del primer dedo.

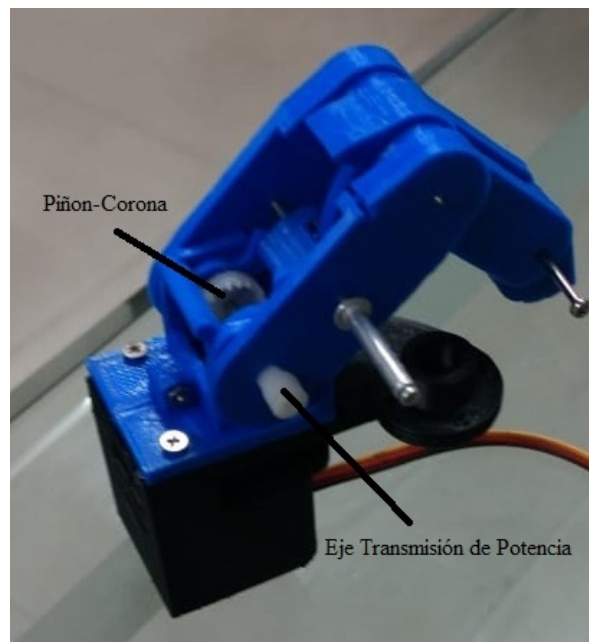


Figura 7.1: Ensamble Físico Dedo 1.

Como se puede observar en la figura 4.9, el mecanismo está siendo sostenido por la transmisión y el mecanismo piñón - corona los cuales están acoplados al servomotor que está en la base negra.

En la figura 7.2, se puede observar cada dedo siendo sostenido con el mecanismo piñón - corona el cual funciona de forma correcta, este mecanismo se diseñó con relación de transmisión 1:1 para no alterar los resultados de ángulos de entrada contra salida.



Figura 7.2: Ensamble Completo.

Se mueven los dedos mediante la cinemática directa para comprobar su movimiento como se puede observar en la figura 5.4, donde se realiza el cambio de ángulos de los dedos para comprobar el funcionamiento de los actuadores.

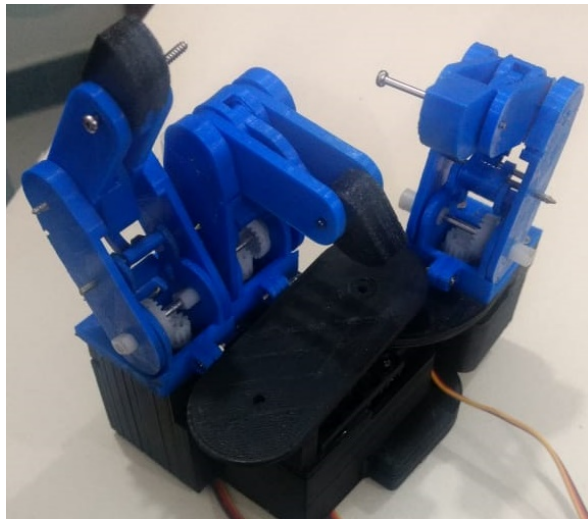


Figura 7.3: Cinemática Directa Implementación.

7.2. Comparación trayectoria descrita por el dedo Humano y el Efecto final

En el capítulo 2 se observó en la figura 2.17, la cual describe la trayectoria por un dedo índice humano el cual compararemos con la trayectoria descrita en el capítulo 5 en la figura 5.4. En la figura 7.4 se puede observar la semejanza entre la trayectoria del dedo humano (trayectoria Azul) y el mecanismo (Trayectoria Roja).

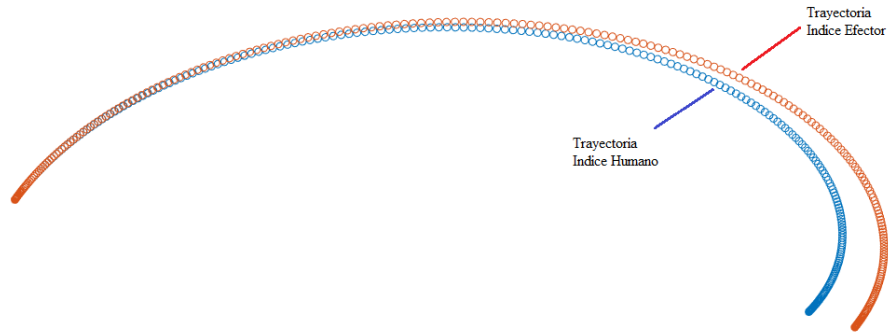


Figura 7.4: Comparación de Trayectorias.

La diferencia entre las dos trayectorias se da principalmente por que el índice Humano y el índice del efector final tienen longitudes de falanges similares, pero no iguales lo que implica unos ángulos de movimiento diferentes lo que provoca esa desviación en la trayectoria.

7.3. Ángulos de Entrada vs Ángulos de Salida.

Para evaluar el comportamiento del mecanismo y el control de posición del mecanismo de cada dedo se compara el ángulo dado por la interfaz gráfica y se mide el ángulo generado por el mecanismo. En la tabla se pueden observar los diferentes valores enviados y ejercidos para una mejor evaluación. La medida del ángulo de salida se mide respecto a la horizontal del efector final mediante un goniómetro.

Tabla 7.1: ángulos Articulación Metacarpiana Mecanismo Físico

Dedo 1		Dedo 2		Dedo 3	
A. Entrada	A. Salida	A. Entrada	A. Salida	A. Entrada	A. Salida
34.5	33	14.4	15.7	27	24
40.8	42	24	25.5	35	32
57.6	55	42	44	44	39
66	62	55.2	52	65	64
80.4	84	79.2	79	80	80
90	93	90	91	90	90

Con los valores anteriores se calcula el error cuadrático medio para cada articulación el cual tiene los siguientes resultados:

1. Para el dedo 1 el error cuadrático medio da 2.8.
2. Para el dedo 2 el error cuadrático medio da 1.8.
3. Para el dedo 3 el error cuadrático medio da 1.02

Ahora para el ángulo de entrada de la articulación metacarpiana se midel valor del ángulo de la falange proximal.

Tabla 7.2: ángulos Falange Proximal Mecanismo Fisico

Dedo 1		Dedo 2		Dedo 3	
A. Entrada	A. Salida	A. Entrada	A. Salida	A. Entrada	A. Salida
25	26	25	25.5	25	25
50	52	54	56	52	54
57.6	60	42	44	42	44
65	67	65	66	60	62
90	95	90	93	90	96
100	105	100	103	100	112

Para el cálculo de los ángulos de la tabla 7.2, se cálculo mediante un ángulo de entrada en la articulación metacarpiana el cual fue calculado en la tabla 5.1, el error cuadrático medio:

1. El error cuadrático medio 3.2°.
2. El error cuadrático medio 2.13°.
3. El error cuadrático medio 5,65°.

7.4. Taxonomía descrita por el Mecanismo Simulación.

A continuación se observaran la taxonomía descrita en el capítulo 2 en la figura 2.15. A continuación se simularan los movimientos descritos en la taxonomía enumerados como se observan en la figura.

7.4.1. Agarres de Fuerza Prensil

La geometría envolvente coloca los dedos al rededor del objeto. Este tipo de agarre también es conocido como agarre prismático.

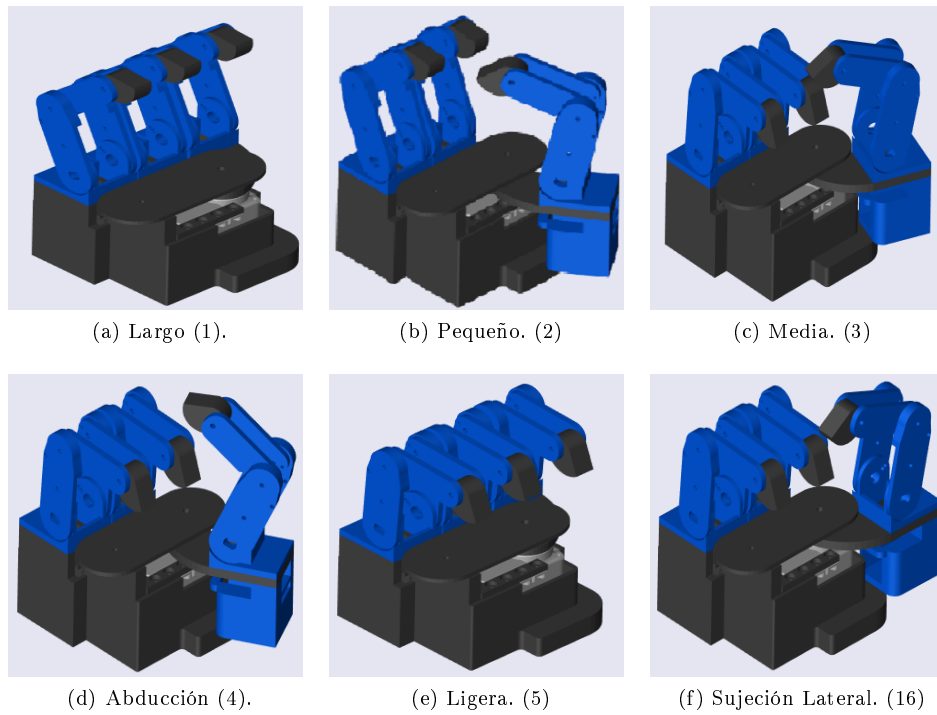


Figura 7.5: Taxonomía de Agarres Envoltura con Fuerza

También se observan los agarres envolventes de geometrías circulares.

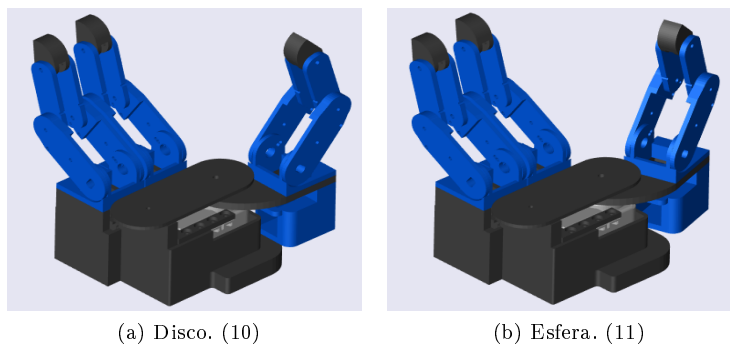


Figura 7.6: Taxonomía de Agarres Envoltura Circular

El agarre circular es de los mejores movimiento que ejerce la mano gracias a la longitud de sus dedos y su disposición de movimientos.

7.4.2. Agarre de Fuerza no Prensil

Existen objetos que por su dimensión o su fragilidad, como un plato no tiene forma de ser manipulado por las anteriores ya vistas, lo que se hace es un Empuje de plataforma largo.

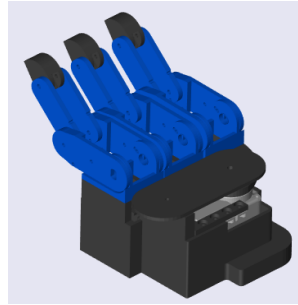


Figura 7.7: Empuje de plataforma. (15)

7.4.3. Agarre de Precisión Circular

Para estos agarres varía el tamaño y tipo de diámetro del objeto, donde el pulgar debe estar correctamente ubicado para realizar el agarre.

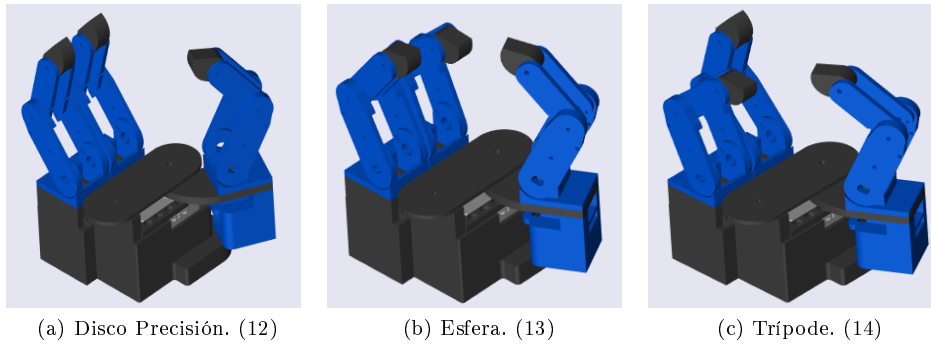


Figura 7.8: Agarre de Precisión Circular

7.4.4. Agarre de Precisión Prismático

Este tipo de agarre involucra el pulgar y los otros 4 dedos, pero se colocara el pulgar en cierta posición para que tenga la capacidad de reponer la fuerza restante por el otro dedo para lograr realizar el agarre.

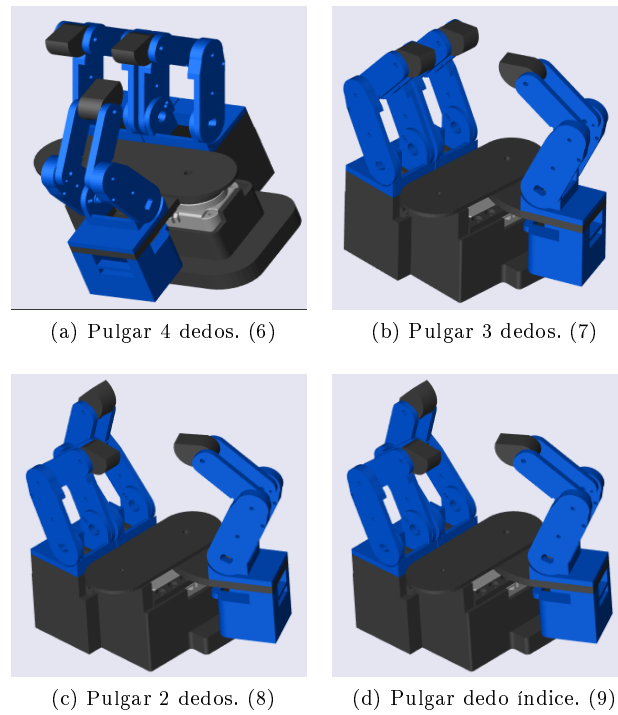


Figura 7.9: Agarre de Precisión Prismático

7.5. Taxonomía descrita por el Mecanismo Implementación.

Para esta sección se realizaron los agarres más comunes para evaluar la capacidad del mecanismo de realizar estos agarres.

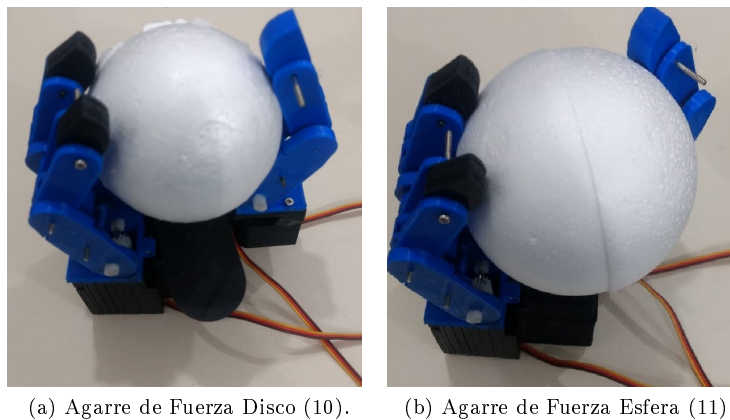


Figura 7.10: Agarre de Fuerza Prensil Circular.

En la figura 7.10, se observa los dos tipos de agarres circulares con un objeto de 7cm de Diámetro.

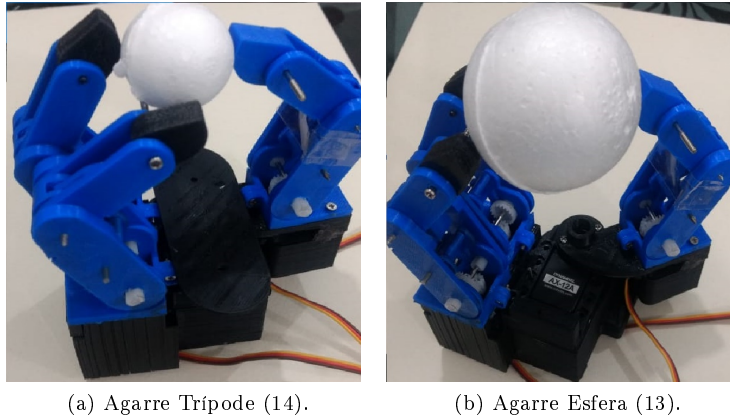


Figura 7.11: Agarre de Precisión Circular.

En la figura 7.11, se puede ver la manera en la que manipula por dos objetos de dimensiones diferentes por este tipo de agarre.

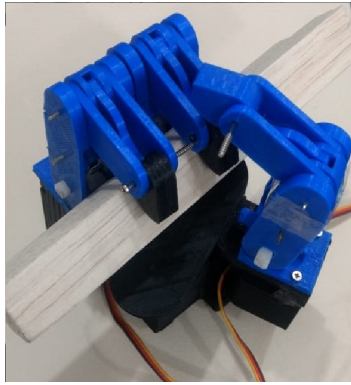


Figura 7.12: Agarre de Fuerza Prismatico

7.6. Agarre Máximo

El efector final diseñado puede tener una elongación de agarre de 13cm sin perder su condición de prensión. En la figura podemos observar la posición y elongación de los dedos para realizar el agarre más grande.

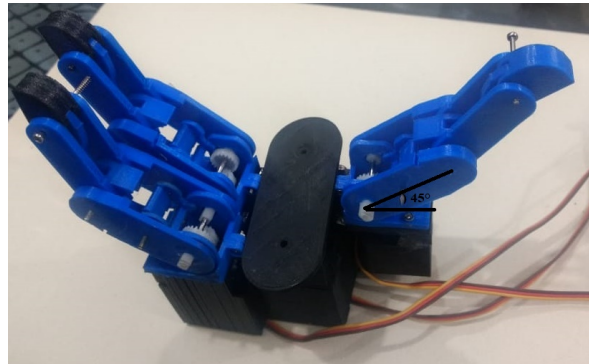


Figura 7.13: Agarre de Fuerza Prismatico

El valor del ángulo de la articulación metacarpiana es de aproximadamente 45° el cual fue medido sobre el mecanismo.

7.7. Ajustes Finales

Con las pruebas realizadas de cada agarre o cada posición del mecanismo se pulen los ejes de cada eslabón del mecanismo, con el fin de evitar colisiones entre cada dedo. En las figuras

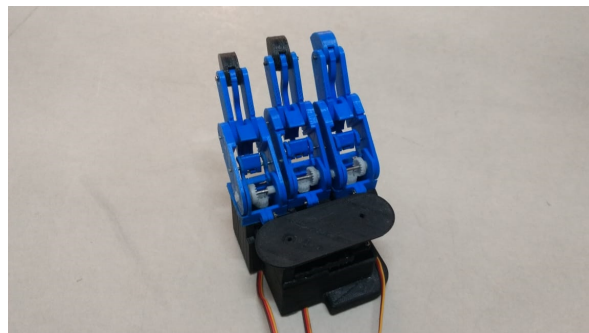


Figura 7.14: Mano Extendida.

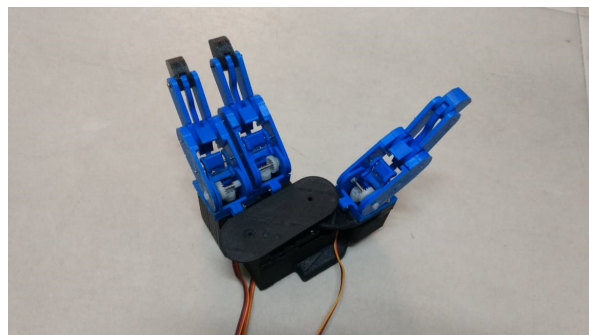


Figura 7.15: Movimiento Pulgar.

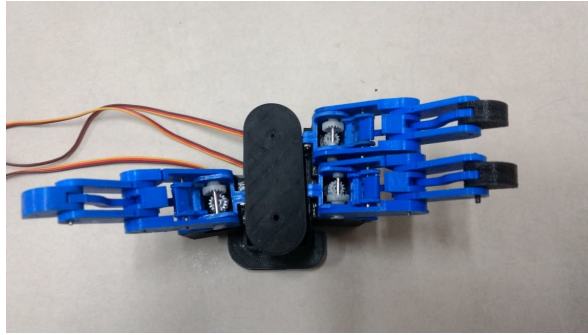


Figura 7.16: Oposición Pulgar.

Capítulo 8

Conclusiones

En este trabajo de tesis se plantearon los métodos para desarrollar y construir el prototipo de un efector final con 3 dedos antropomórficos el cual emula la mano humana en lo referente a tareas de prensión. La mayoría de los retos en el desarrollo del prototipo se presentaron en la obtención del mecanismo de cuatro barras debido a que debe cumplir con los movimientos semejantes a los de un dedo humano. Para realizar este paso es necesario tener presente los movimientos que una mano humana puede hacer, es ahí donde la taxonomía de Cutcosky brinda una guía para comprender este aspecto tan relevante a la hora de realizar cualquier tipo de prensión. Al desarrollar el cálculo correcto del mecanismo se realiza el respectivo modelo cinemático para obtener la velocidad y posición de cada eslabón que conforman cada dedo.

Para la selección del mecanismo que realizaría el movimiento deseado, se estudiaron diferentes tipos de mecanismos de transmisión con el fin de escoger el más viable para esta aplicación, donde el peso, tamaño y vida útil de este fueron más relevantes ya que, esto genera un crecimiento en el torque necesario por el actuador inicial del movimiento.

Otro hecho importante para lograr la mayoría de los agarres descritos en la taxonomía es adicionar un grado de libertad extra en el primer dedo con el fin de realizar las tareas del dedo pulgar como la oposición de este respecto a los demás dedos de la mano humana, el grado extra adicional le permite al primer dedo tener una rotación de 180° .

Se halla el torque necesario para realizar la trayectoria de cada dedo, con el fin de seleccionar el actuador que cumpla con esta tarea. Se realizó la simulación de movimiento del mecanismo mediante Solid Works con la cual se obtiene el máximo torque ejercido en la articulación metacarpo falángica el cual se da en el inicio de la trayectoria ya que, debe vencer la inercial del mecanismo (Sección 4.5.12. – 4.5.13).

El prototipo es desarrollado en ABS, debido a que es resistente, ligero, económico y moldeable para realizar las articulaciones más pequeñas y de cortes precisos. Para mejorar la capacidad y rendimiento del prototipo las barras y articulaciones internas de este tendrán un mejor rendimiento en un material más resistente como aluminio ya que, también es liviano para este tipo de aplicación.

El mecanismo de transmisión de piñón corona se mostró estable a la hora de las pruebas del prototipo. Este mecanismo no mostró deslizamientos en ningún movimiento y logro mantener el mecanismo firme en todas las posiciones de la trayectoria. Para mejorar el trabajo de la transmisión es necesario acoplarla de forma precisa para el óptimo trabajo de este.

El cálculo de la cinemática del efector final permite conocer la manera en la cual se pueda mover el efector final y su espacio operacional.

La trayectoria generada por el efector final respecto a la trayectoria generada por un dedo humano no fueron del todo iguales ya que, las bases de las longitudes del efector final son semejantes respecto a las longitudes del dedo humano descrito en la trayectoria, pero no iguales. Se pudo observar que los

movimientos iniciales de los dos dedos son muy aproximados, pero a medida que este avanza el error en la trayectoria aumenta. Esto causa que el radio de agarre del efector final sea menor a el radio de trabajo de un dedo humano.

Para la validación del mecanismo se calculó el error cuadrático medio con el fin de evaluar el comportamiento del control de posición generado por el servo motor. Para esto se envió un valor de ángulo de entrada y se midió un valor de ángulo de salida, ósea el ángulo real que la articulación generaba. Los errores de cada dedo eran máximos de 5 grados, esto debido a juegos en el mecanismo y tolerancias de fricción de este, sin embargo, el control de posición genero el movimiento con una respuesta sobre amortiguada como se calculó aproximadamente. Para calcular la eficiencia del controlador se toma el error de posición mayor el cual nos da un error del 3.4 % (sección 7.3.). Este porcentaje de error esta entre los límites de error calculados por la manera de calcular la frecuencia natural del sistema. La eficiencia del control de posición que posee el servomotor es del 96.6 % lo cual es muy aceptable para un prototipo.

Se emularon los diferentes tipos de agarres ya descritos anteriormente en donde se observa que en los agarres de disco, esfera, abducción y trípode se comporta de la manera más eficiente que los otros agarres. Con la simulación se realizan físicamente este tipo de agarres y mostrar la capacidad frente a estos del efector final.

Este trabajo requiere el uso de las diferentes sinergias contenidas entre la Ingeniería en Mecatrónica como lo son la mecánica a la hora de realizar el cálculo y obtención del mecanismo sub actuado de los dedos, la robótica con el fin de realizar los respectivos movimientos cinemáticos de este tipo de robot y la teoría de Control básica para generar con menor error los diferentes tipos de prensión.

Bibliografía

- [1] M. Habib and J. Davim, *Engineering Creative Design in Robotics and Mechatronics*. Advances in mechatronics and mechanical engineering (AMME) book series, Engineering Science Reference, 2013.
- [2] G. T. Jose, “Diseno y simulacion de una mano mecanica para ser utilizada como un efector final robotico,” Master’s thesis, Universidad de Carabobo, 2010.
- [3] A. Kapandji and M. Lacomba, *Fisiologia Articular / Articular Physiology: Dibujos comentados de mecanica humana. Tronco y Raquis / Commented drawings of mechanical human. Trunk and Spine*. Fisiología Articular, Editorial Médica Panamericana S.A., 2011.
- [4] “Barret hand webpage, <http://www.barretttechnology.com>.”
- [5] D. H. S. Calderon, “Consideraciones anatomicas en el diseno de una mano artificial,” *Ieee Journal*, 2016.
- [6] R. S. G. Pizarro de la Hoz Vladimir, “Diseno e implementacion de mecanismo de presion para mano robot antropomorfica,” *Repositorio Universidad Militar Nueva Granada*, 2012.
- [7] D. A. Hurtado, “Gripper multifuncional para extraccion de granadas,” *Colciencias*, 2010.
- [8] N. P. A. Aviles Oscar F, Simanca Pedro L, “Diseno y construccion de un dedo para grippers roboticos,” *Congreso,puccp*, 2013.
- [9] G. V. F. Lotti, P. Tiezzi, “Development of ub hand 3: Early results,” *Ieee Journal*, 2005.
- [10] C.-H. Xiong, W.-R. Chen, and B.-Y. Sun, “Design and implementation of an anthropomorphic hand for replicating human grasping functions,” *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, 2016.
- [11] M. Ariyanto and R. Ismail, “A low cost anthropomorphic prosthetic hand using dc micro metal gear motor,” in *Int. Conf. on Information Tech, Computer, and Electrical Engineering ICITACEE*, 2016.
- [12] B. Sun, C. Xiong, W. Chen, and Q. Zhang, “A novel design method of anthropomorphic prothetic hands for reproducing human hand grasping,” *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2014.
- [13] A. Voegeli, *Lecciones basicas de biomecanica del aparato locomotor*. Springer, 2014.
- [14] C. Cael, *Anatomia Funcional*. Medica, 2013.
- [15] J. L. Banks, “Design and control of an anthropomorphic robotic finger with multi-point tactile sensation,” *Massachusetts institute of technology*, 2005.

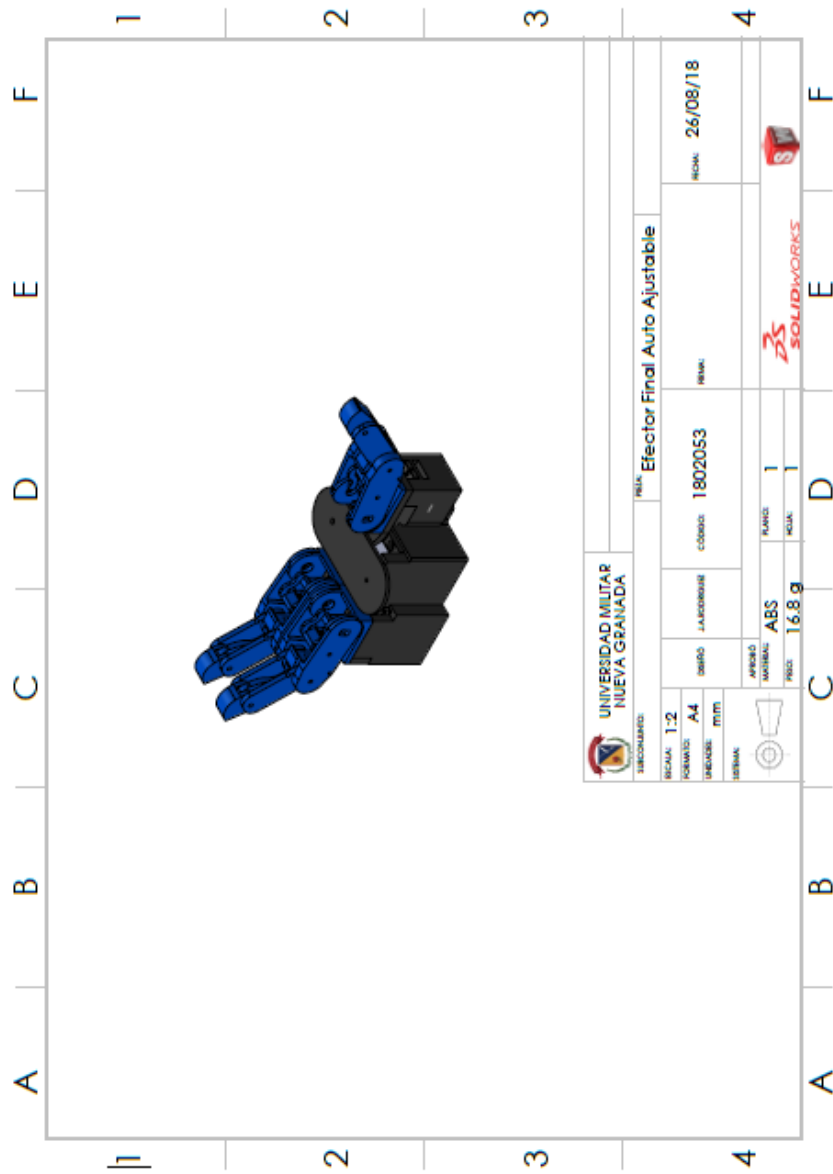
- [16] S. Hppenfeld, *Exploracion Fisica de la Columna Vertebral y las Extremidades*,. El Manual Moderno, 1985.
- [17] A. G. G. Javier Mrtinez, Roque J. Saltaren, "Diseno mecatronico de un dedo antropomorfico. parte i: mecanica.," *RsearchGate*, 2014.
- [18] J. Napier, *The prensible movements of the human hand*. J. Bone Joint Surg, 1956.
- [19] M. R. Cutkosky, "On grasp choise, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks," *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, 1989.
- [20] A. H. Zaidy, M. Rehan, A. Quadir, and M. Parvez, "Dynamic model of anthropomorphic robotics finger mechanisms," *International Journal of Modern Engineering Research*, 2013.
- [21] E. A. P. Florres, "Analisis cinematico y diseno de un mecanismo de cuatro barras para falange proximal de dedo antropomorfico.," *Ciencia e Ingenieria Neogranadina*, 2010.
- [22] J. E. Shigley and J. J. U. Jr., *Teoria de Maquinas y Mecanismos*. McGraw-Hill Book Co., U. S. A, 1988.
- [23] H. P. L.Li-Ren, "Ntu hand: A new design of dexterous hands," *Transactions of the ASME*, 1998.
- [24] INTERMEC, *Transmision de potencia POLEAS EN "V*
.
- [25] U. de CantabrÃa, "Sintesis dimensional de mecanismos. generacion de funciones," *Departamento de Ing Estructural y Mecanica*, 2013.
- [26] P. Srisuk, A. Sento, and Y. Kitjaidure, "Inverse kinematics solution using neural networks from fordward kinematics equations," *Institute of Technology Ladkrabang*, 2010.
- [27] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Wesley Publishing, 1989.
- [28] Y. Zhang, X. Li, H. Zhu, and N. Tan, "Join angle drift remedy of three-link planar robot arm performing different types of end effector trajectories," *School of Information Science and Technology*, 2009.
- [29] J. P. C. Paulo Flores, "Introduccion al estudio de mecanismos," *Universidade do Minho*, 2016.
- [30] C. L. Geert de Cubber, Haris Balta, "Teodor: A semi-autonomous search and rescue and demining robot," *Scientific*, 2014.
- [31] S. Tzafestas, *Introduction to Mobile Robot Control*. Elsevier insights, Elsevier Science, 2013.
- [32] "Medios tecnicos de las unidades antiexplosivos antiterrorista de la policia nacional," 2018.
- [33] K. Li and M. Meng, "Multilevel part-based model for object manipulation," *IEEE*, 2013.
- [34] P. K. Parida, "Kinematic analysis of multi-fingered, anthropomorphic robotic hands," *NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ROURKELA, INDIA*, 2013.
- [35] P. A. Coronado, "Calculo de agarres con el robot manfred," *Universidad Carlos III de Madrid*, 2015.
- [36] C. A. Q. Burgos, "Diseno y construccion de una protesis robotica de mano funcional adaptada a varios agarres," Master's thesis, Universidad del Cauca, 2010.

- [37] P. Craig L Taylor, "The anatomy and mechanics of the human hand," *Artificial Limbs*, 2010.
- [38] J. K. Salisbury, "Robot hands and the mechanics of manipulation," *MIT Press Cambridge*, 1985.
- [39] Y. M. Zhe Xu, Vikash Kumar and E. Todorov, "Design of and anthropomorphic robotic finger system with biomimetic artificial joint," *IEEE*, 2007.
- [40] D. I. M. T. Piovan, *Mecanismos de Barras: Analisis de Casos. Mecanismos de cuatro barras Analisis Algebraico Vectorial de Posicion, Velocidad y Aceleracion*. UTN-FRBB Catedra: Elementos de Maquinas, 2014.
- [41] A. T. V. Sanchez, *CHARACTERIZACION CINEMATICA E IMPLEMETACION DE UNA MANO ROBOTICA MULTI ARTICULADA*. PhD thesis, Instituto Politecnico Nacional, Mexico., 2007.
- [42] J. M. R. Martinez, "Las diferentes formas del criterio de kutzbach-grubler.," *IPN*, 2010.
- [43] R. S. Hartenberg and J. Denavit, *Kinematic Synthesis of Linkages*. New York, 1964.
- [44] J. L. Banks, "Design and control of an anthropomorphic robotic finger with multi-point tactile sensation," tech. rep., Massachusetts institute of technology, 2001.
- [45] T. G. R. Company, *Heavy Duty V-Belt Drive Design Manual.*, 1999.
- [46] R. Crowder, "Local actuation of multijointed robotic finger," *University of Southampton, UK*, 1999.
- [47] M. G. B. Torres and H. I. M. Castillo, "Analisis, simulacion y evaluacion biomecanica de un mecanismo para una mano robotica," Master's thesis, Universidad Autonoma de San Luis Potosi, 2016.
- [48] R. A. Seway and J. John W. Jewett, *FISICA para ciencias e ingenieria*. CENGAGE Learning, 2008.
- [49] H. A. S. Ramirez and E. M. V. Amador, "Arthrodesis en articulaciones interfalangicas distales con tornillos de herbert," *Universidad Nacional de Colombia*, 2010.
- [50] R. L. Norton, *DiseÑ±odemaquinaria. McGrawHill*, 2009.
- [51] J. T. Alvite and C. C. Sisamon, "Diseno debrazo mecanico eficiente mediante optimizacion multiobjetivo," Master's thesis, Universidad carlos III de madrid, 2015.
- [52] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics Modelling, planning and Control*. Springer, 2006.
- [53] S. Kucuk and Z. Bingul, "Robot kinematics: Forward and inverse kinematics," *Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control*, 2011.
- [54] R. S. Harterbeng and J. Denavit, *Kinematic Synthesis of Linkages*. Departmen of Mechanical Engineering and Astronautical Sciences, 1964.
- [55] J. W. Lee, G. T. Park, J. S. Shin, and J. W. Woo, "Industrial robot calibration method using denavit-hatenberg parameters," in *17th International Conference on Control, Automation and Systems ICCAS*, 2017.
- [56] D. Li, H. Wang, and B. You, "Path planning research and simulation of planar 3r redundant robot," *Harbin University of Science and Technology*, 2009.

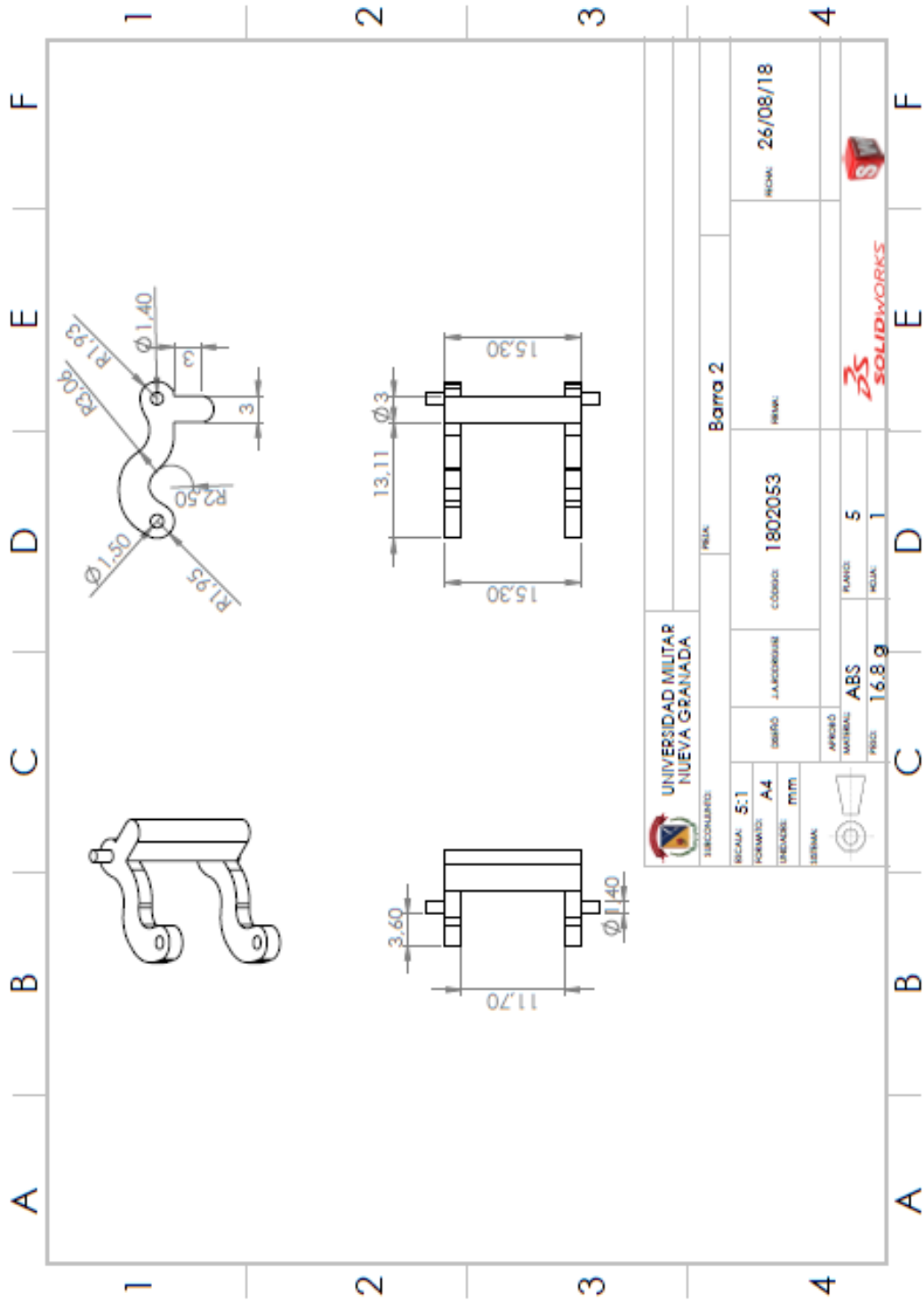
- [57] J. H. Park and J. H. B. Y. D. S. S. W. Park, "Framework of grasping planning for multi fingered robot hands," in *8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence URAI*, 2011.
- [58] D. Hui and S. Jung, "Geometrica analysis of inverse kinematics solutions and fuzzy control of humanoid robot arm under kinematics constrains," in *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2007.

Apéndice A

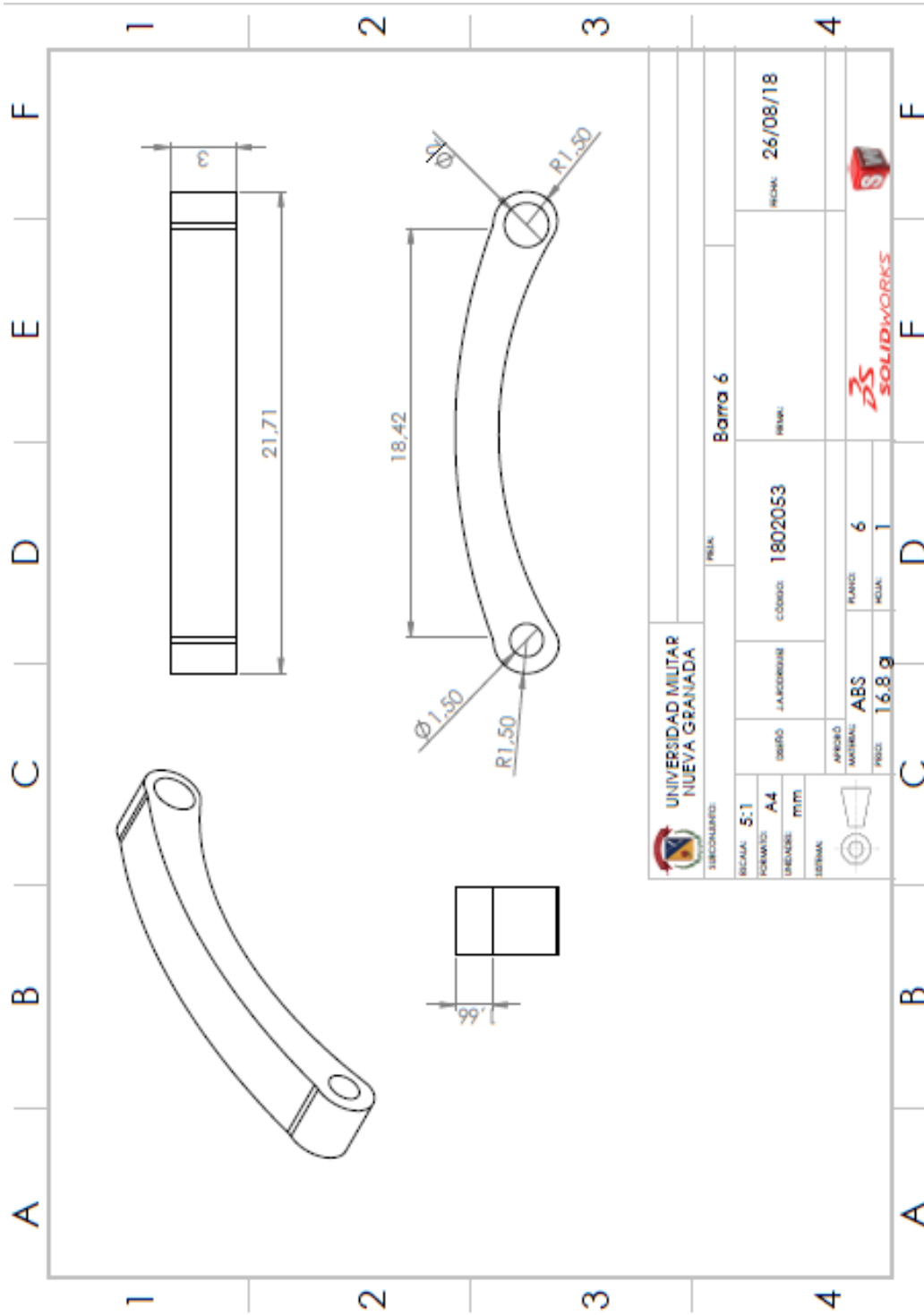
Planos Piezas

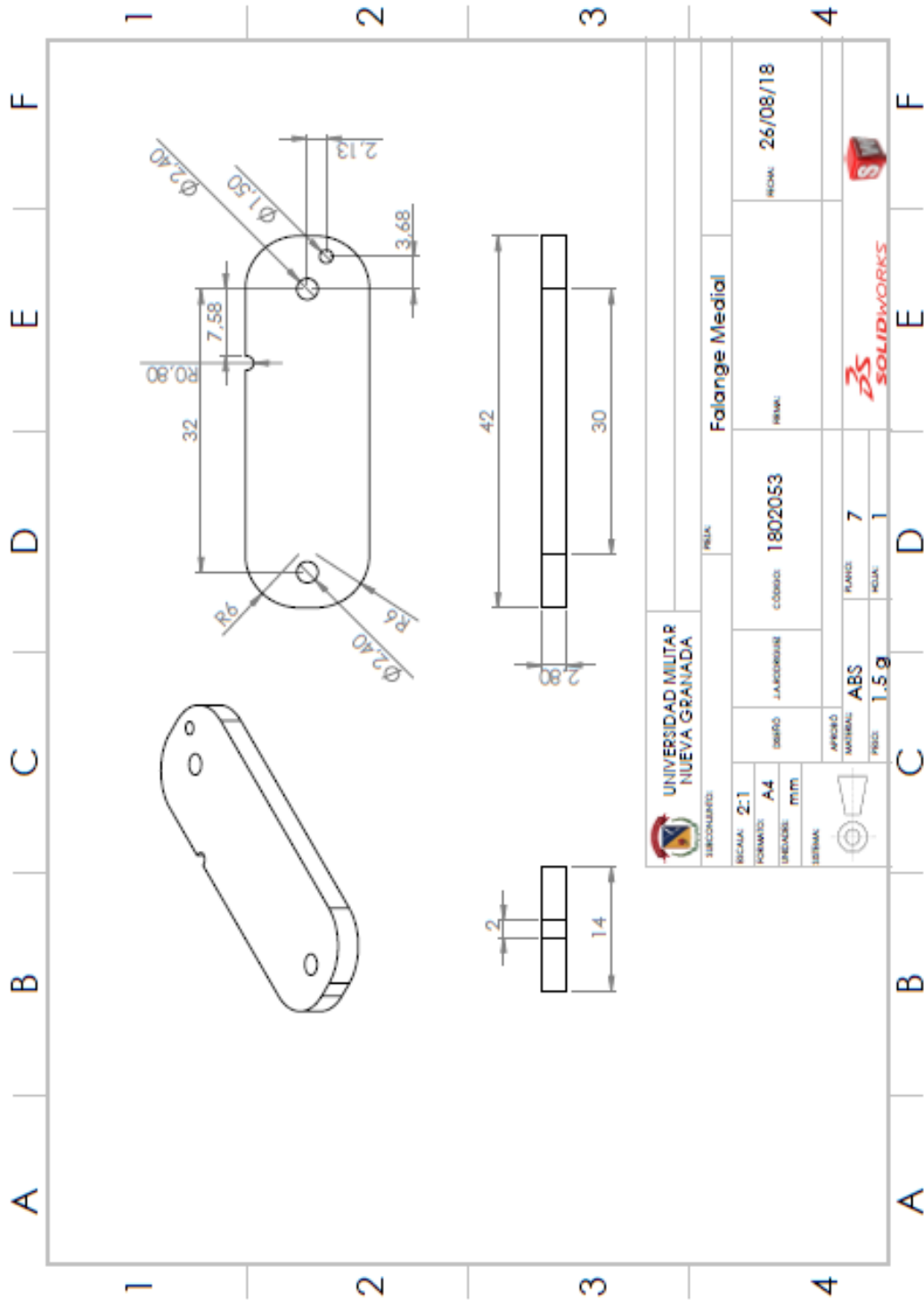


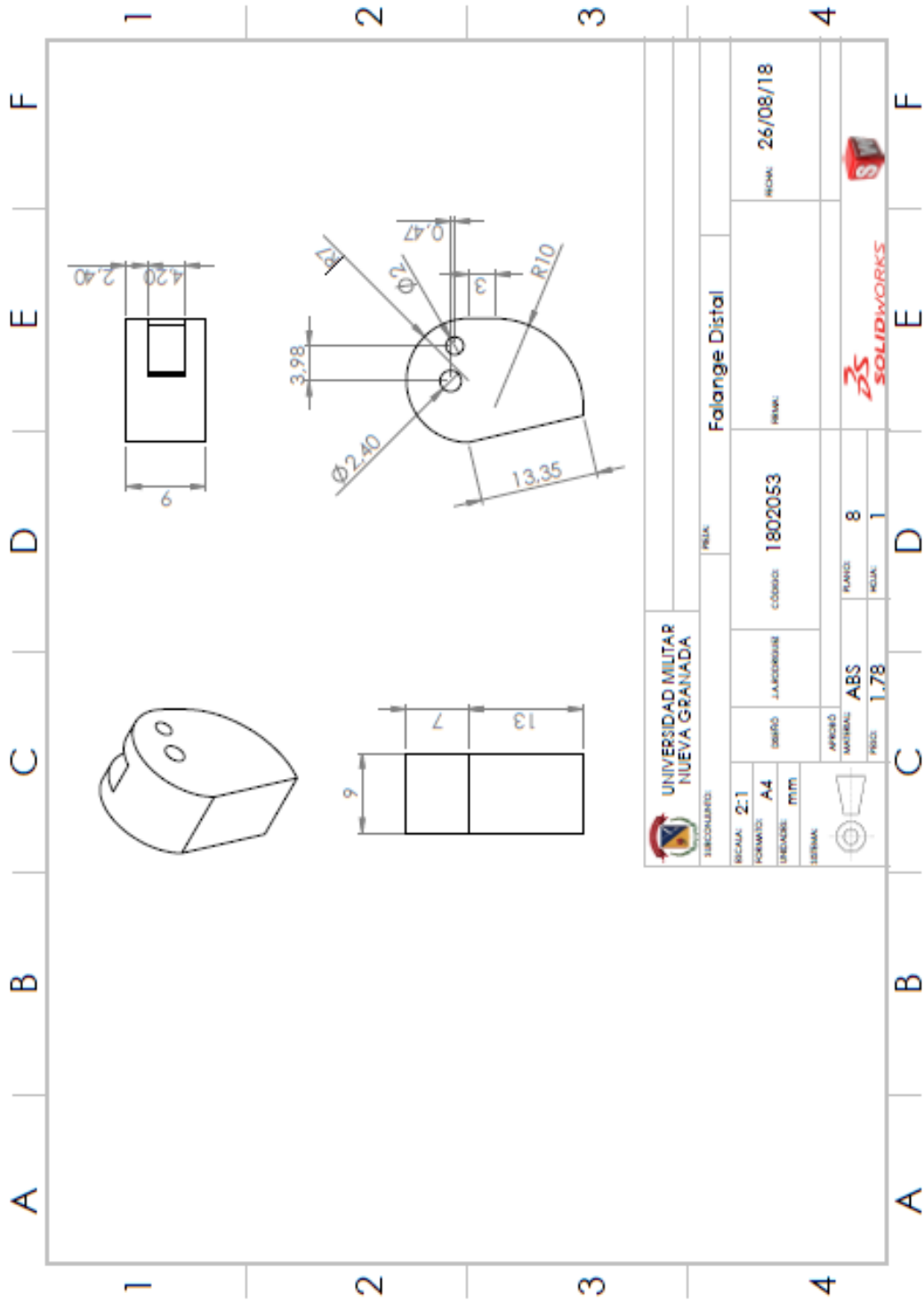


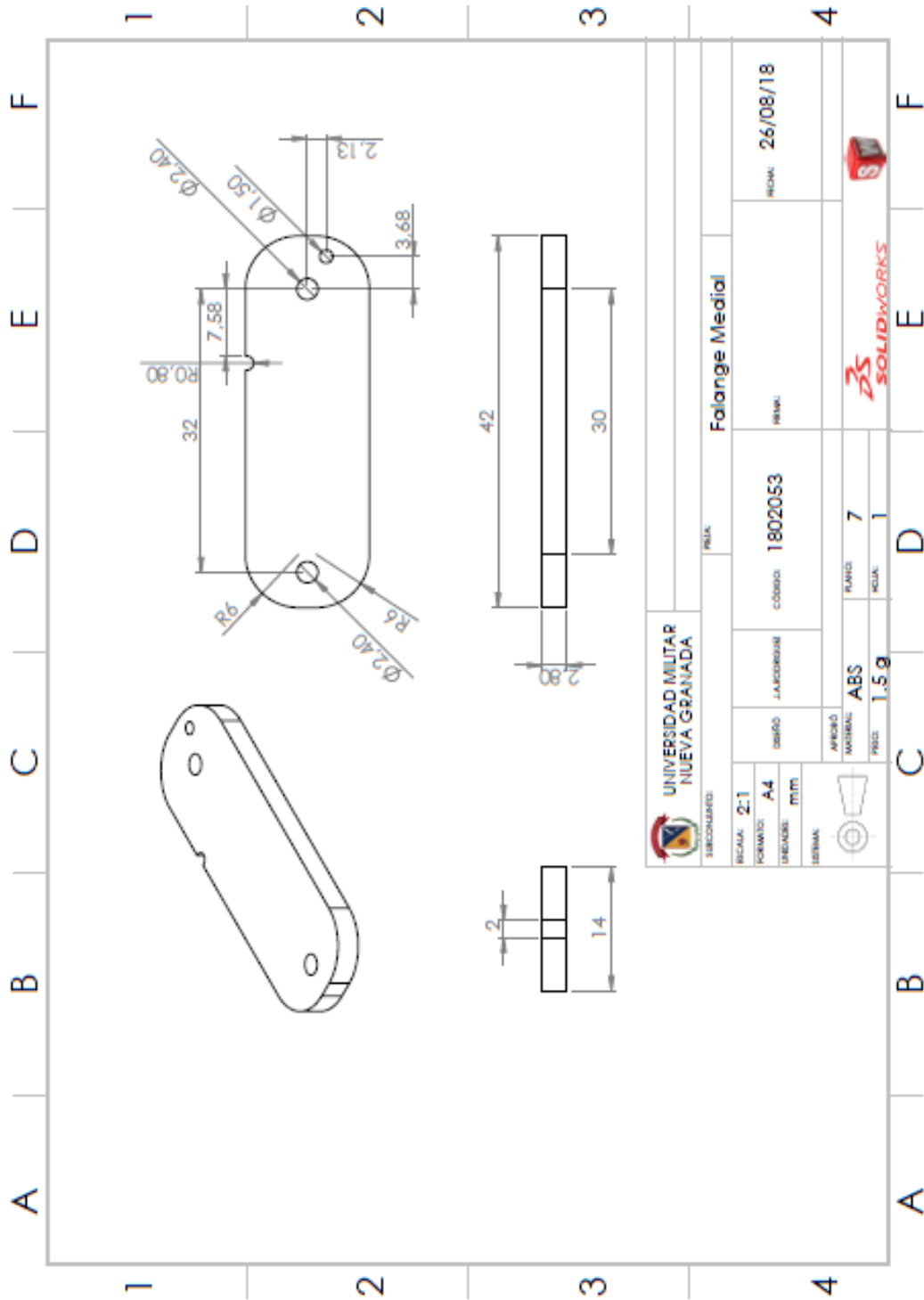


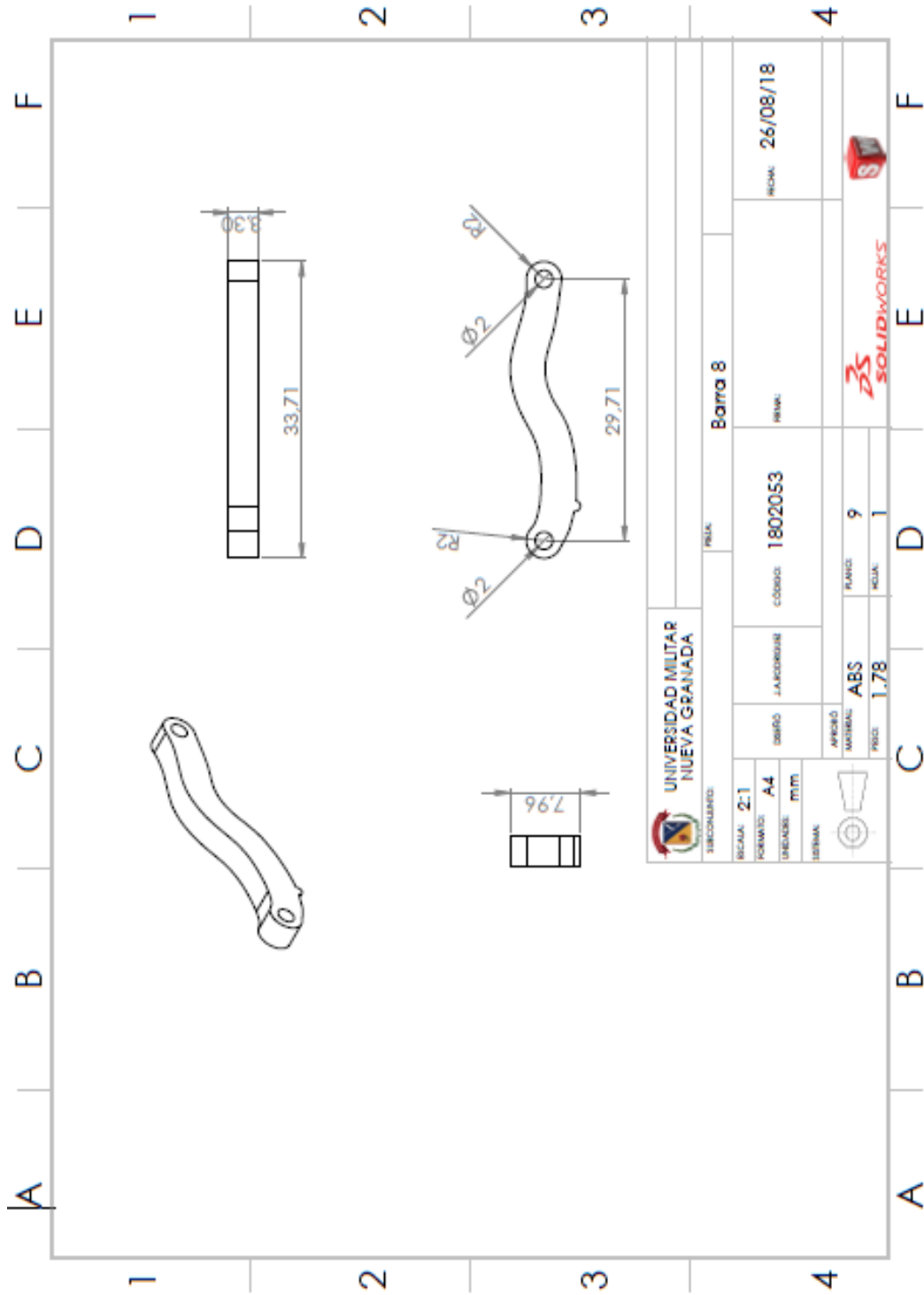
SOLIDWORKS

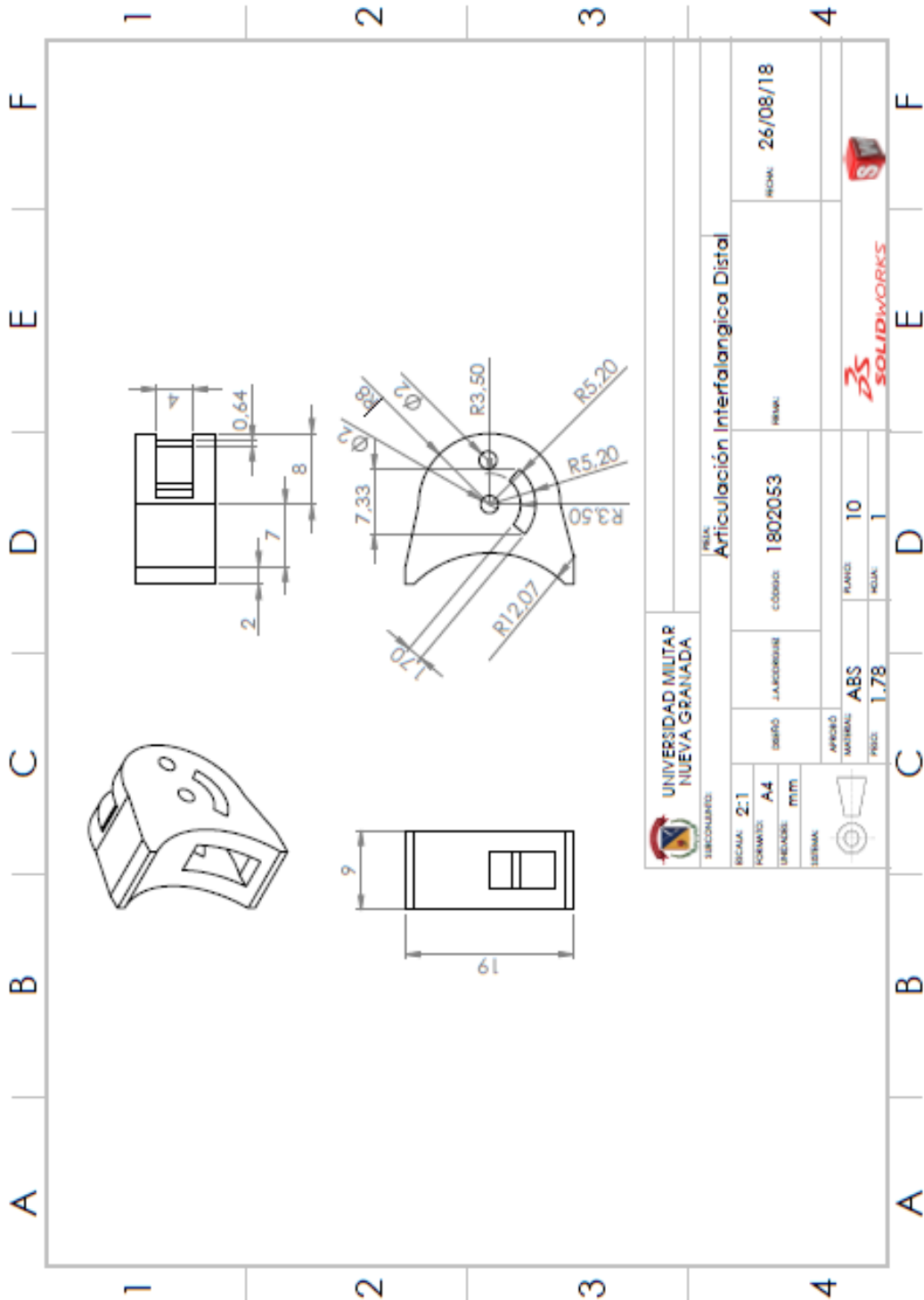


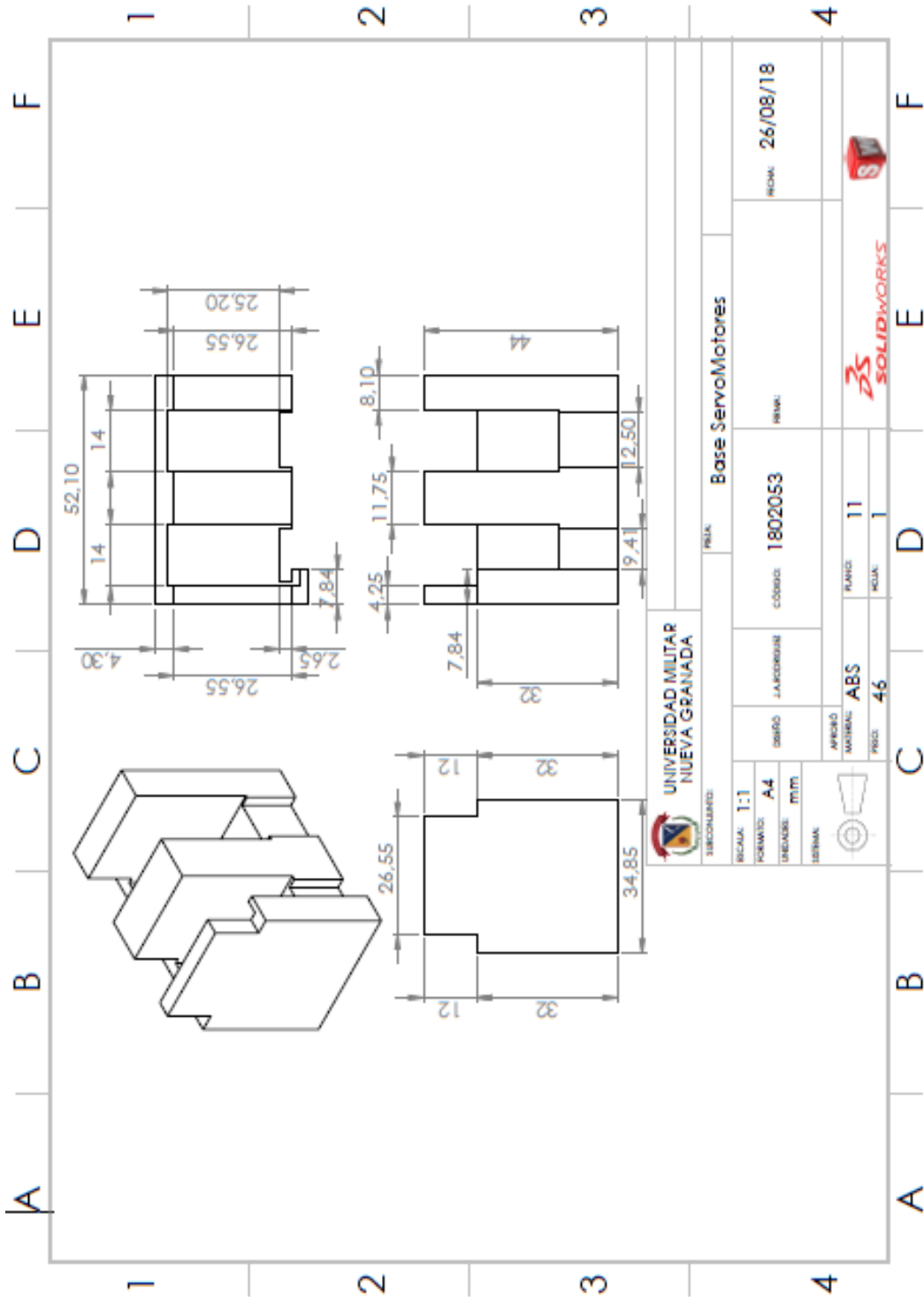


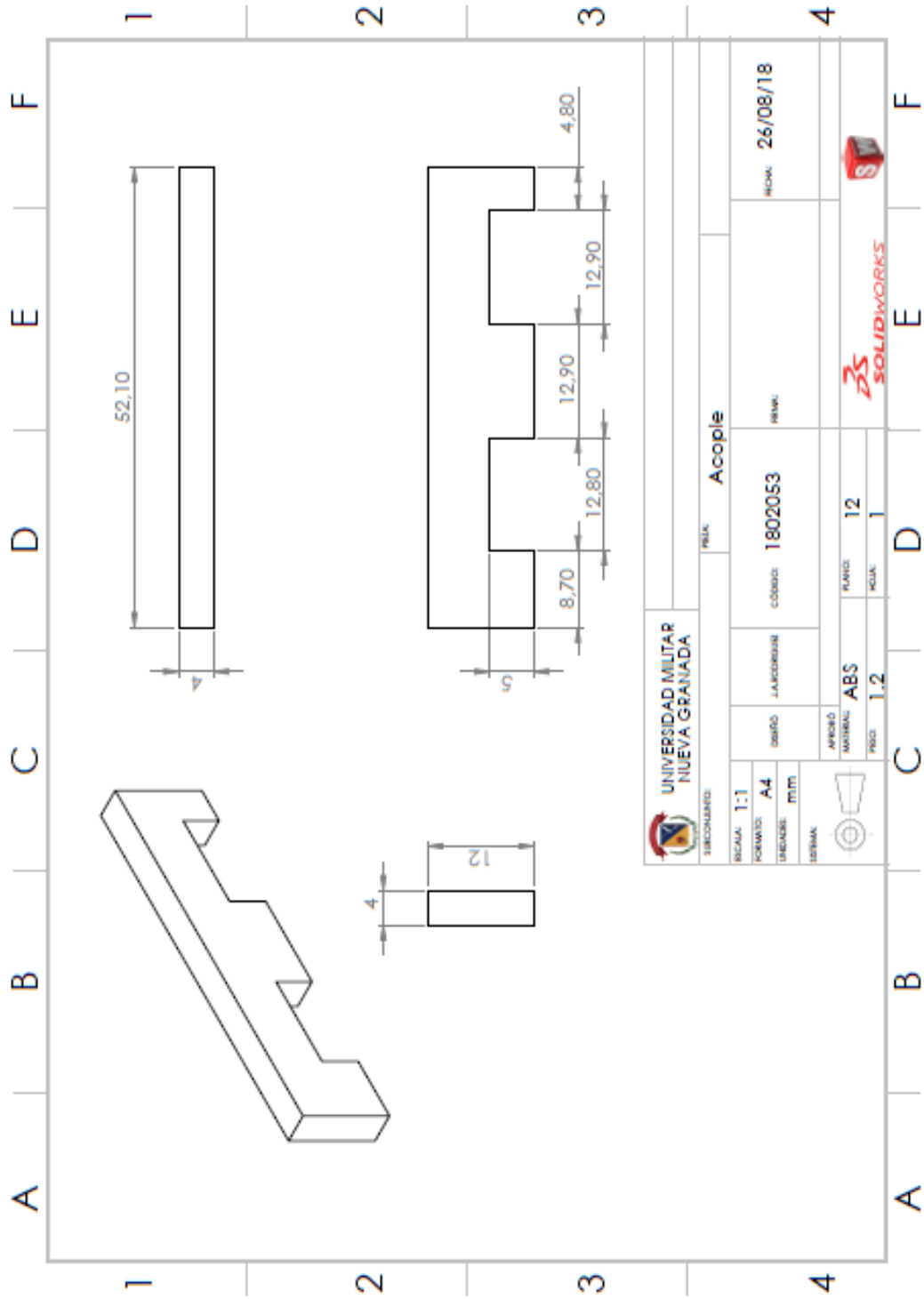


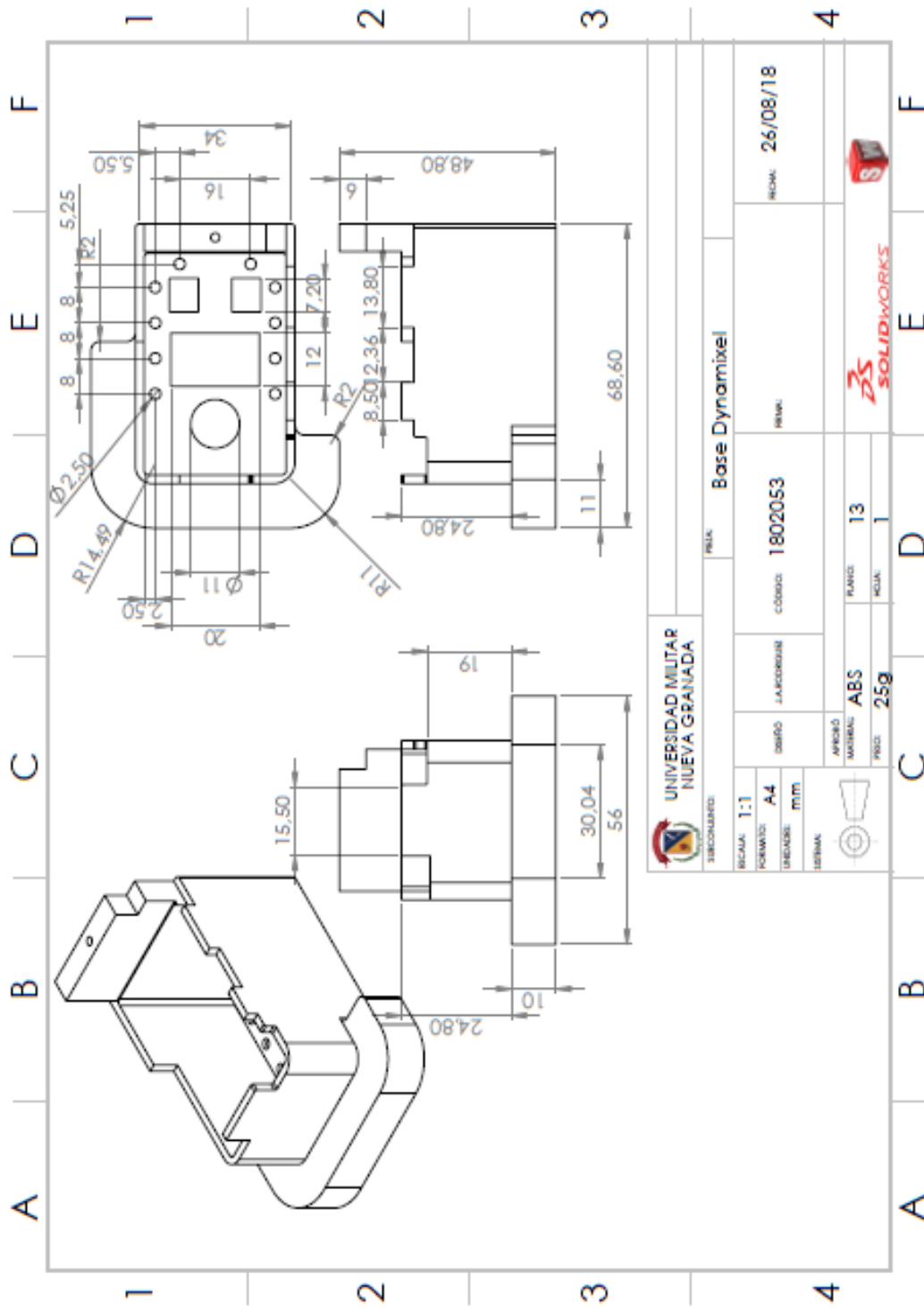


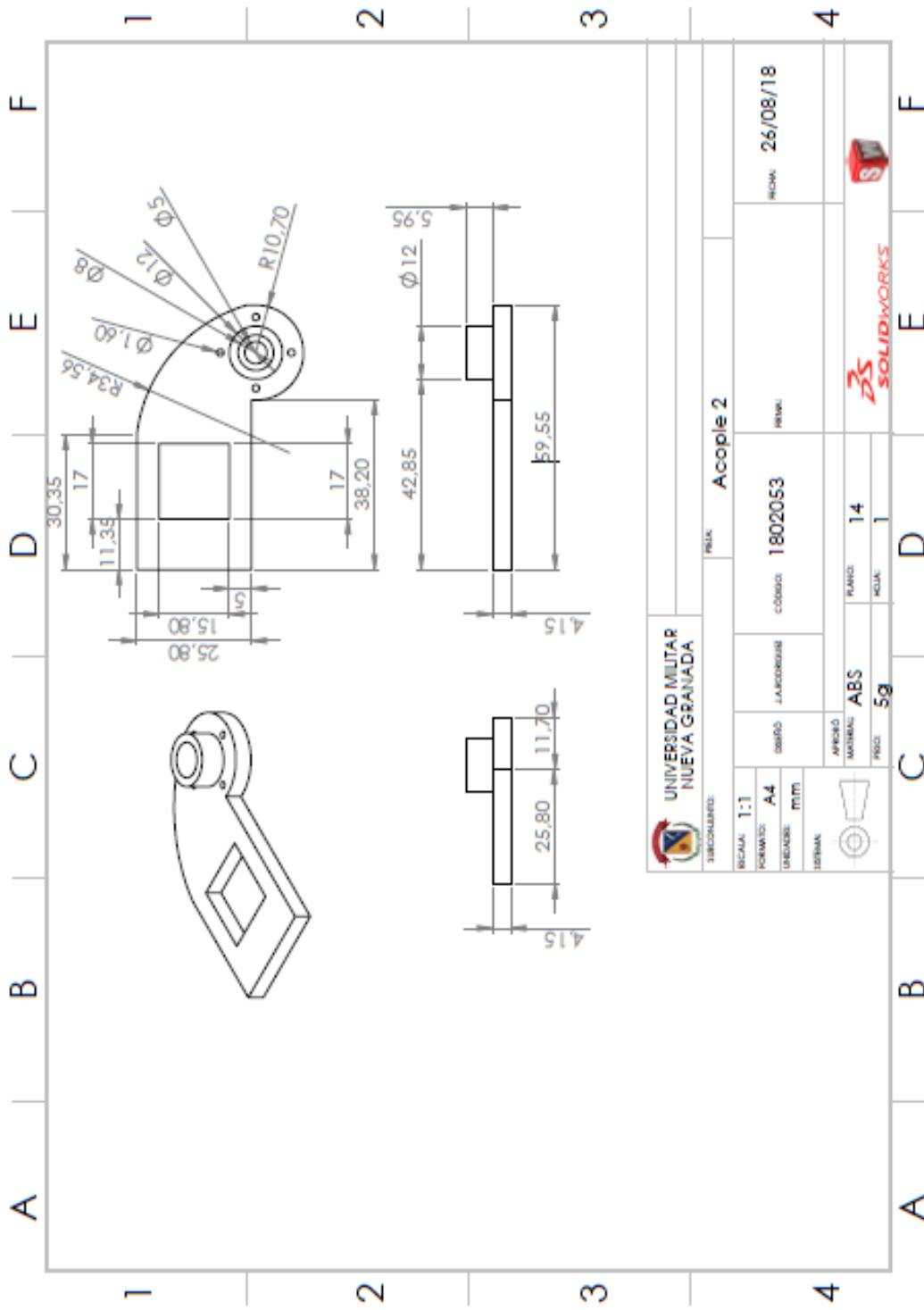


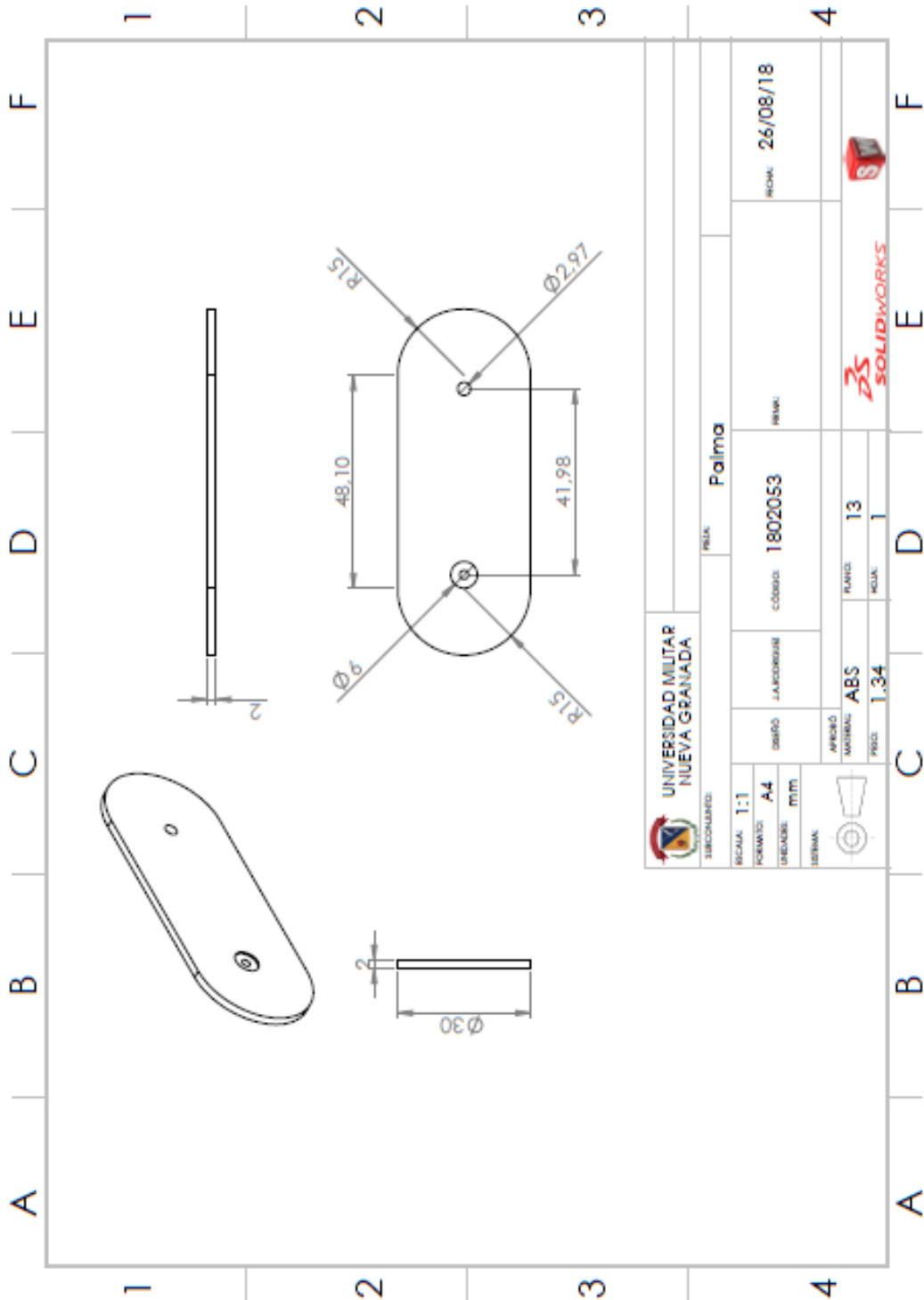












UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA		PALMA		FECHA: 26/08/18	
ESCALA: 1:1	FORMATO: A4	CÓDIGO: 1802053	FECHA:		
UNIDAD: MM	UNIDAD: MM				
APLICADO: ABS	PLANO: 13				
PROD: 1.34	NOVA: 1				