

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

*Trabajo de titulación previo  
a la obtención del título  
de Ingeniero Mecánico*

**PROYECTO TÉCNICO:**

**“PROPUESTA DE DISEÑO DE UN EXOESQUELETO MECÁNICO  
PARA FINES DIDÁCTICOS”**

**AUTORES**

Gilson Damian Correa Sarabia  
Bryan Paúl García Romero

**TUTOR**

Ing. Nelson Jara Cobos, PhD.

CUENCA - ECUADOR

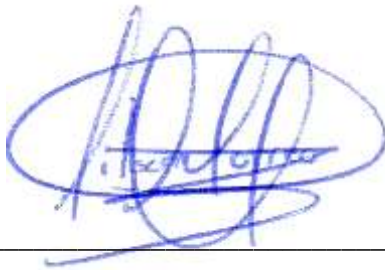
2020

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Gilson Damian Correa Sarabia con documento de identificación N° 0302501283 y Bryan Paúl García Romero con documento de identificación N° 1900653617 manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“PROPUESTA DE DISEÑO DE UN EXOESQUELETO MECÁNICO PARA FINES DIDÁCTICOS”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecánico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado por la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos el derecho moral de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, enero del 2020



Gilson Damian Correa Sarabia

C.I.: 0302501283



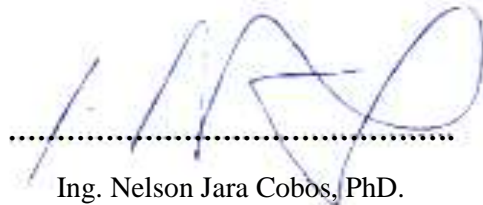
Bryan Paúl García Romero

C.I.: 1900653617

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación **“PROPUESTA DE DISEÑO DE UN EXOESQUELETO MECÁNICO PARA FINES DIDÁCTICOS”**, realizado por Gilson Damián Correa Sarabia y Bryan Paúl García Romero, obteniendo el *Proyecto Técnico* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, enero del 2020

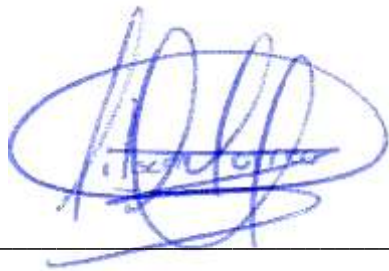


Ing. Nelson Jara Cobos, PhD.  
C.I: 0102679644

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Gilson Damián Correa Sarabia con documento de identificación N° 0302501283 y Bryan Paúl García Romero con documento de identificación N° 1900653617, autores del trabajo de titulación **“PROPUESTA DE DISEÑO DE UN EXOESQUELETO MECÁNICO PARA FINES DIDÁCTICOS”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, enero del 2020



Gilson Damián Correa Sarabia

C.I.: 0302501283



Bryan Paúl García Romero

C.I.: 1900653617

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecido con Dios por todas las oportunidades que se me presentaron en la vida y darme los mejores maestros del mundo mis padres.

*Bryan*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por haberme permitido culminar esta meta, a mis padres y hermanos que me apoyaron siempre a seguir con mis sueños. A mi tutor Ingeniero Nelson Jara. PhD, por su tiempo, paciencia y tener confianza en nosotros sobre el trabajo que realizamos, de igual manera agradezco a todos mis profesores de la universidad, por compartir sus conocimientos y experiencias laborales. Agradezco a mis amigos y compañeros de universidad, ya que en este trayecto de estudio hemos compartido experiencias y logros, de igual manera a mi compañero de tesis Bryan García, por su compromiso y dedicación, con lo cual hemos logrado culminar el trabajo de titulación. De la misma manera agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana por formarme académicamente.

*Gilson*

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado a todas las personas quienes me apoyaron en toda mi formación académica, en especial a mis padres por ser pilar fundamental para alcanzar cada logro en mi vida, a mis hermanos por darme el apoyo y la fuerza de seguir adelante.

A mi esposa e hijo por ser parte de este logro.

***Bryan***

## **DEDICATORIA**

Primero dedicó este logro a Dios por darme salud, sabiduría, fortaleza y darme las fuerzas necesarias para alcanzar un objetivo planteado hace algunos años atrás. A mis padres Juan Correa y Ana Sarabia, quienes formaron mi carácter, sembraron buenos valores, me protegieron y me han permitido alcanzar mis metas. Y en especial a mis hermanos Edison Correa, Henry Correa, Daysi Correa y Christian Correa, por ser el pilar que me sostuvo en todo este proceso de estudio, los que me motivaron a seguir adelante y a no retroceder ante las adversidades que se presentaban. Y también mi primo Maycol Campoverde quien me apoyo a culminar mi proceso de estudio.

*Gilson*



## ÍNDICE GENERAL

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....	I
CERTIFICACIÓN .....	II
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
AGRADECIMIENTOS .....	V
DEDICATORIA .....	VI
DEDICATORIA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XV
RESUMEN .....	XVII
ABSTRACT .....	XVIII
1. Tema .....	1
2. Introducción .....	1
3. Planteamiento del problema .....	1
3.1 Antecedentes .....	1
3.2 Importancia y Alcance .....	2
3.3 Problema General .....	2
4. Objetivos .....	3
4.1 Objetivo General .....	3
4.2 Objetivos Específicos .....	3
5. Conceptualizar un modelo de exoesqueleto que sea movido por un ser humano .....	3
5.1 Introducción .....	3
5.2 Partes de un exoesqueleto mecánico .....	4
5.2.1 Extremidades superiores del exoesqueleto mecánico .....	4
5.2.2 Tronco de exoesqueleto mecánico .....	8
5.2.3 Cabeza de exoesqueleto mecánico .....	9
5.2.4 Extremidades inferiores del exoesqueleto mecánico .....	9
5.3 Modelos de la empresa SKELETOMICS .....	12

a.	Producto 1: Skeletonics unidad 01 .....	12
b.	Producto 2: Skeletonics Remake .....	16
c.	Producto 3: Skeletonics Practice .....	18
d.	Producto 4: Alive Skeletonics .....	19
e.	Producto 5: Arrive Skeletonics.....	24
5.4	Exoesqueleto mecánico para conceptualizar - Selección de la mejor alternativa .....	25
5.4.1	Análisis comparativo de cada uno de los modelos existentes para un estudio previo ..	25
5.4.2	Análisis comparativo de cada extremidad .....	28
6	Analizar la cinemática y dinámica del mecanismo a desarrollar.....	32
6.1	Biomecánica del cuerpo humano .....	33
6.1.1	Biomecánica de las extremidades inferiores .....	34
6.1.2	Biomecánica de la extremidad superior .....	37
6.1.3	Biomecánica mano .....	39
6.1.4	Biomecánica de la cabeza .....	41
6.2	Medidas del exoesqueleto.....	43
6.2.1	Medidas antropométrías del cuerpo humano .....	43
6.2.2	Medidas de las extremidades inferiores.....	45
6.2.3	Medidas de la cadera.....	45
6.2.4	Medidas de las extremidades superiores .....	46
6.2.5	Medidas de la mano .....	46
6.2.6	Medidas del tronco.....	47
6.2.7	Medidas de la cabeza .....	48
6.3	Selección del material de la estructura.....	48
6.4	Método cinemático .....	49
6.4.1	Descripción del movimiento .....	49
6.4.2	Cinemática Directa .....	51
6.5	Análisis cinemático en ADAMS.....	53
6.6	Análisis cinemático de las extremidades inferiores .....	54
6.6.1	Modelo Denavit – Hartenberg de extremidad inferior .....	54
6.6.2	Trayectoria de la marcha en los diferentes tiempos.....	56
6.6.3	Análisis de extremidades inferiores en ADAMS.....	57
6.6.4	Analisis cinemático de la cadera del exoesqueleto mecánico .....	61
6.6.5	Trayectoria de la cadera .....	61

6.6.6	Análisis cinemático de la cadera en ADAMS .....	62
6.7	Análisis cinemático de extremidad superior .....	63
6.7.1	Modelo Denavit – Hartenberg de extremidad superior .....	63
6.7.2	Trayectorias de brazo .....	67
6.7.3	Simulación en ADAMS de brazo.....	67
6.7.4	Simulación de antebrazo .....	70
6.8	Análisis cinemático de los dedos del exoesqueleto.....	72
6.8.1	Modelo Denavit – Hartenberg de mano .....	72
6.8.2	Trayectoria de dedos .....	78
6.8.3	Simulación del dedo .....	78
6.9	Análisis cinemático de la cabeza .....	80
6.10	Dinámica del mecanismo a desarrollar .....	81
6.10.1	Extremidades inferiores.....	81
6.10.2	Extremidades superiores .....	83
6.10.3	Mano .....	85
7.	Diseño del exoesqueleto COGA.....	86
7.1	Dimensionamiento de tornillos .....	86
a)	Esfuerzo constante directo .....	86
b)	Esfuerzo cortante por torsión.....	87
7.2	Dimensionamiento de perfiles .....	87
a)	Diagrama de fuerza cortante y momento flector .....	87
b)	Cálculo de columnas mediante carga crítica de Euler .....	88
c)	Elección de los perfiles a usar .....	88
7.3	Dimensionamiento de accesorios de extremidad superior .....	88
7.4	Dimensionamiento de accesorios en extremidad inferior .....	90
7.4.1	Adquisición de zancos industriales .....	92
7.5	Dimensionamiento de accesorios de mano .....	93
7.6	Dimensionamiento de accesorios de cabeza .....	94
7.7	Columna de exoesqueleto.....	95
7.8	Exoesqueleto COGA .....	96
8	Planos y detalles del exoesqueleto.....	96
9	Conclusiones y Recomendaciones.....	100
9.1	Conclusiones .....	100

9.2	Recomendaciones .....	100
10	Bibliografía .....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Partes del cuerpo humano. Fuente: [1]. .....	4
Figura 2.	Extremidades superiores del cuerpo humano. Fuente: [2]. .....	4
Figura 3.	Extremidad superior de la unidad 01. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics]. .....	5
Figura 4.	Mano humana y de exoesqueleto. Fuente: [3]. .....	5
Figura 5.	Mano antropomórfica de exoesqueleto mecánico. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].....	6
Figura 6.	Huesos de los dedos. Fuente:[5]. .....	7
Figura 7.	(a) Movimiento lateral de los dedos, (b) Flexión del dedo. Fuente: [3]. .....	7
Figura 8.	Tórax de exoesqueleto mecánico. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics]. .....	8
Figura 9.	Columna de exoesqueleto mecánico. Fuente: [7]. .....	8
Figura 10.	Extremidades inferiores cuerpo humano. Fuente: [8]. .....	9
Figura 11.	Extremidades inferiores del exoesqueleto mecánico. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].	9
Figura 12.	Eslabones y uniones presentes en las extremidades inferiores. Fuente: [9]. .....	10
Figura 13.	Cadera del cuerpo humano. Fuente: [10]. .....	10
Figura 14.	Anatomía ósea y muscular del cuerpo humano. Fuente: [11]. .....	11
Figura 15.	Fémur del exoesqueleto con su anclaje anterior y posterior. Fuente [8]. .....	11
Figura 16.	(a) Exoesqueleto dividido en sus partes principales, (b) Exoesqueleto tripulado por manipulador humano; Skeletonics unidad 01. Fuente: [13]. .....	12
Figura 17.	Brazo de exoesqueleto unidad 1. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics]. .....	13
Figura 18.	Antebrazo de exoesqueleto mecánico. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics]. .....	13
Figura 19.	Sujeción de brazo y antebrazo de exoesqueleto mecánico. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics]. .....	14
Figura 20.	Dedos presentes en la mano de la unidad 01. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics]. .....	14
Figura 21.	Control de dedos por argolla. Fuente: [14]. .....	15
Figura 22.	Extremidades inferiores de la unidad 01. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics]. .....	15
Figura 23.	Estructura de aluminio para la cadera del exoesqueleto mecánico. Fuente: [16]. .....	15
Figura 24.	Skeletonics Remake. Fuente: [7]. .....	16
Figura 25.	Partes principales de zancos. Fuente: [17], [18]. .....	17
Figura 26.	Skeletonics Practice. Fuente: [7]. .....	18
Figura 27 .	Mecanismo de unificación de la extremidad superior y extremidad inferior en el modelo Skeletonics Practice. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics]. .....	19
Figura 28.	Partes que conforman la cabeza del modelo Skeletonics Practice. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics]. .....	19
Figura 29.	Alive Skeletonics. Fuente: [7]. .....	20
Figura 30.	Partes mejoradas para el exoesqueleto Alive Skeletonics. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics]. .....	20
Figura 31.	Partes mejoradas en la extremidad superior exoesqueleto Alive Skeletonics. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics]. .....	21

Figura 32. Descripción de los mecanismos para la articulación de los elementos mecánicos presentes en la mano del exoesqueleto Alive Skeletonics. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].....	21
Figura 33. Eslabones que forman el dedo de la mano. Fuente: [4]. .....	22
Figura 34. Control de dedos por gatillo. Fuente: [4].....	22
Figura 35. Muñeca de exoesqueleto mecánico. Fuente: [4].....	23
Figura 36. Exoesqueleto con cabeza. Fuente: [7]. .....	23
Figura 37. Mecanismo de movimiento de cabeza de exoesqueleto. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics]. .....	23
Figura 38. Arrive Skeletonics. Fuente:[6].....	24
Figura 39. Partes de la mano correspondiente al exoesqueleto Arrive Skeletonics. Fuente: [19].....	24
Figura 40. Mando de manos de exoesqueleto Arrive. Fuente: [20]. .....	25
Figura 41. Extremidades inferiores de exoesqueleto Arrive. Fuente: [19]. .....	25
Figura 42 Skeletonics Alive. Fuente: [7].....	32
Figura 43. Movimientos presentes en los planos correspondientes al cuerpo humano. Fuente: [22].	33
Figura 44. Ciclo de marcha. Fuente: [23].....	34
Figura 45. Articulación de la cadera en la marcha. Fuente: [24]. .....	34
Figura 46. Articulación de la rodilla en la marcha humana. Fuente: [24]. .....	35
Figura 47. Segmentos cuerpo humano en función de la altura. Fuente: [26].....	43
Figura 48. Longitudes establecidas por dimensionamiento. Fuente: [Autores]. .....	44
Figura 49. Bosquejo dimensional del exoesqueleto mecánico. Fuente: [Autores]. .....	44
Figura 50. Medidas de las extremidades inferiores. Fuente: [Autores]. .....	45
Figura 51. Medidas de la cadera del exoesqueleto mecánico. Fuente: [Autores]. .....	45
Figura 52. (a) Medidas del brazo; (b) Medidas del ante brazo. Fuente: [Autores]. .....	46
Figura 53. Dedos del exoesqueleto Alive. Fuente: [Autores].....	46
Figura 54. Medidas de los eslabones de los dedos. Fuente: [Autores].....	47
Figura 55. Medidas de la palma. Fuente: [Autores]. .....	47
Figura 56. (a) Medidas del tórax; (b) Medidas de la columna. Fuente: [Autores]. .....	48
Figura 57. Medidas de la estructura de la cabeza del exoesqueleto. Fuente: [Autores]. .....	48
Figura 58. Selección de Aluminio de la Empresa CEDAL. Fuente: [27].....	49
Figura 59. Sistemas coordenados para referencias de los elementos. Fuente: [25].....	50
Figura 60. Conjunto simplificado; vectores y rotaciones del miembro inferior, donde, $q$ es el valor del ángulo entre dos articulaciones y $x, y, z$ son los ejes coordenados de cada articulación. Fuente: [23].	50
Figura 61. Ubicación de los sistemas coordenados, longitudes y articulaciones presentes en el diseño previo al análisis cinemático. Fuente: [Autores]. .....	54
Figura 62. Parámetros establecidos para la matriz del algoritmo de Denavit - Hartenberg. Fuente: [Autores]. .....	54
Figura 63 . Valores correspondientes al diseño del exoesqueleto a desarrollar. Fuente: [Autores].....	55
Figura 64. Trayectoria de la marcha. Fuente: [Autores]. .....	57
Figura 65. Tiempo de la posición de la marcha. Fuente: [Autores]. .....	57
Figura 66. Extremidades inferiores. Fuente: [Autores].....	58
Figura 67. Trayectorias biomecánicas de la cadera para validar el modelo cinemático directo. Fuente: [Autores]. .....	59
Figura 68. Velocidad y aceleración angular de la flexión de la cadera. Fuente: [Autores].....	59

Figura 69. Trayectorias biomecánicas de la rodilla para validar el modelo cinemático directo. Fuente: [Autores].	60
Figura 70. Velocidad y aceleración angular de la flexión de la rodilla. Fuente: [Autores].	60
Figura 71. Cadera de exoesqueleto mecánico. Fuente: [Autores].	61
Figura 72. Trayectoria de cadera en movimiento de rotación. Fuente: [Autores].	61
Figura 73. (a) Rotación externa de cadera; (b) Rotación interna de cadera. Fuente: [Autores].	62
Figura 74. Velocidad y aceleración angular de la cadera. Fuente: [Autores].	62
Figura 75. Ubicación de los sistemas coordenados, longitudes y articulaciones presentes en el diseño previo al análisis cinemático considerando el funcionamiento de cada eslabón presente en la cadena cinemática. Fuente: [Autores].	63
Figura 76. (a) Movimiento de flexo extensión; (b) Movimiento de abducción y aducción. Fuente: [Autores].	67
Figura 77. Brazo y antebrazo del exoesqueleto mecánico. Fuente: [Autores].	68
Figura 78. (a) brazo a 90°; (b) brazo 0°; (c) brazo a 155°. Fuente: [Autores].	68
Figura 79. Velocidad y aceleración angular del movimiento aducción y abducción del brazo. Fuente: [Autores].	69
Figura 80. Flexión del brazo a 90°. Fuente: [Autores].	69
Figura 81. Velocidad y aceleración angular del movimiento de flexión y extensión del brazo. Fuente: [Autores].	70
Figura 82. (a) antebrazo (a) 75°; (b) antebrazo (b) 0°; (c) antebrazo (c) 75°. Fuente: [Autores].	70
Figura 83. Velocidad angular del antebrazo. Fuente: [Autores].	71
Figura 84. Aceleración angular del antebrazo. Fuente: [Autores].	71
Figura 85. Esquema y diseño de la mano del exoesqueleto. Fuente: [Autores].	72
Figura 86. Sistema de coordenadas en cada articulación presente en los dedos del exoesqueleto. Fuente: [Autores].	72
Figura 87. Sistema de coordenadas ubicadas en el pulgar de la mano del exoesqueleto. Fuente: [Autores].	73
Figura 88. Trayectoria de dedos. Fuente: [Autores].	78
Figura 89. (a) dedo a 0°; (b) dedo a -90°. Fuente: [Autores].	78
Figura 90. Simulación de dedos en Adams View. Fuente: [Autores].	79
Figura 91. Trayectoria de movimiento de flexo extensión de dedo. Fuente: [Autores].	79
Figura 92. Velocidad angular de dodo. Fuente: [Autores].	80
Figura 93. Aceleración angular de dedo. Fuente: [Autores].	80
Figura 94. (a) Flexo extensión; (b) Inclinación lateral; (c) Rotación. Fuente: [Autores].	80
Figura 95. Junta de la cadera. Fuente. Fuente: [Autores].	81
Figura 96. Fuerza en las juntas de la cadera. Fuente: [Autores].	82
Figura 97. Torque de las juntas de la cadera. Fuente: [Autores].	82
Figura 98. Fuerza y torque de la unión del muslo con la cadera en movimiento de marcha. Fuente: [Autores].	82
Figura 99. Fuerza y torque en la rodilla en movimiento de marcha. Fuente: [Autores].	83
Figura 100. Fuerza y torque en el tobillo. Fuente: [Autores].	83
Figura 101. Junta de los diferentes eslabones del brazo. Fuente: [Autores].	83

Figura 102. Fuerza y torque en movimiento de abducción y aducción del hombro. Fuente: [Autores].	83
Figura 103. Fuerza en movimiento de flexión y extensión de brazo. Fuente: [Autores].	84
Figura 104. Torque en movimiento de flexión y extensión de brazo. Fuente: [Autores].	84
Figura 105. Junta de los diferentes eslabones del ante brazo. Fuente: [Autores].	84
Figura 106. Fuerza en movimiento de flexión y extensión del ante brazo. Fuente: [Autores].	85
Figura 107. Torque en movimiento de flexión y extensión del ante brazo. Fuente: [Autores].	85
Figura 108. Fuerza en movimiento de flexo extensión de dedo. Fuente: [Autores].	85
Figura 109. Torque en movimiento de flexo extensión de dedo. Fuente: [Autores].	86
Figura 110. Tornillo de fijación ISO 7379: [35]	86
Figura 111. Perfiles de aluminio de la empresa CEDAL. Fuente: [27].	88
Figura 112. Extremidad superior de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].	90
Figura 113. Cadera y muslo de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].	92
Figura 114. Muelle de tracción muelle Ay B - alambre de piano. Fuente: [35].	93
Figura 115. Mano de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].	94
Figura 116. Rotula de bola. Fuente:[36].	94
Figura 117. Cabeza de exoesqueleto mecánico COGA. Fuente: [Autores].	95
Figura 118. (a) Vista frontal de tronco de exoesqueleto COGA; (b) Vista posterior de tronco de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].	95
Figura 119. Exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].	96
Figura 120. Conjunto de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].	97
Figura 121. Subconjunto de extremidades inferiores de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].	97
Figura 122. Subconjunto de tronco de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].	98
Figura 123.. Subconjunto de extremidades superiores de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].	98
Figura 124.. Subconjunto de mano de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].	99
Figura 125. Subconjunto de cabeza de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].	99

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de funcionamiento del fémur en cada región. Fuente: [Autores] .....	11
Tabla 2. Elementos y descripción que conforma la región de la cadera. Fuente: [Autores] .....	16
Tabla 3 . Descripción de las partes y material de los zancos. Fuente: [Autores] .....	17
Tabla 4. Valores establecidos de acuerdo con la movilidad de cada exoesqueleto. Fuente: [Autores].	26
Tabla 5. Valores establecidos de acuerdo con el tiempo de funcionamiento de cada exoesqueleto. Fuente: [Autores]. .....	26
Tabla 6. Valores establecidos de acuerdo con la apariencia humanoide de cada exoesqueleto. Fuente: [Autores]. .....	27
Tabla 7. Valores establecidos de acuerdo con la complejidad de diseño. Fuente: [Autores]. .....	27
Tabla 8. Resultados de las ponderaciones establecidas para cada modelo. Fuente: [Autores]. .....	28
Tabla 9. Valores de movilidad de extremidades superiores. Fuente: [Autores]. .....	28
Tabla 10. Valores establecidos de acuerdo con la complejidad de extremidades superiores. Fuente: [Autores]. .....	28
Tabla 11. Valores establecidos de acuerdo con la apariencia humanoide de extremidades superiores. Fuente: [Autores]. .....	29
Tabla 12. Resultados de las ponderaciones de extremidades superiores. Fuente: [Autores]. .....	29
Tabla 13: Valores de movilidad de mano. Fuente: [Autores]. .....	30
Tabla 14. Valores establecidos de acuerdo con la complejidad de mano. Fuente: [Autores]. .....	30
Tabla 15. Valores establecidos de acuerdo con la apariencia humanoide de mano. Fuente: [Autores]. .....	30
Tabla 16. Resultados de ponderaciones de manos. Fuente: [Autores]. .....	31
Tabla 17. Resumen de resultados de ponderaciones. Fuente: [Autores]. .....	31
Tabla 18. Descripción de movimientos y ángulos permitidos en la cadera para la marcha humana. Fuente: [Autores]. .....	35
Tabla 19. Descripción de movimientos que permite la rodilla para la marcha humana. Fuente: [Autores]. .....	36
Tabla 20. Descripción de movimientos y ángulos presentes en el hombro. Fuente: [Autores]. .....	37
Tabla 21. Descripción de movimientos y ángulos presentes en el codo. Fuente: [Autores]. .....	38
Tabla 22. Descripción de movimientos de la muñeca y ángulos presentes en la biomecánica de esta articulación. Fuente: [Autores]. .....	39
Tabla 23.. Descripción de movimientos y ángulos de la mano presentes para cada articulación. Fuente: [Autores]. .....	39
Tabla 24. Descripción de movimientos y ángulos presentes en la cabeza. Fuente: [Autores]. .....	42
Tabla 25. Parámetros establecidos para la matriz del algoritmo de Denavit - Hartenberg. Fuente: [Autores]. .....	63
Tabla 26. Valores correspondientes al diseño del exoesqueleto a desarrollar. Fuente: [Autores]. .....	64



Tabla 27. Parámetros establecidos para el planteamiento del algoritmo de Denavit - Hartenberg. Fuente: [Autores].	73
Tabla 28. Medidas en base a diseño de movilidad para el pulgar y dedos presentes en el exoesqueleto. Fuente: [Autores].	73
Tabla 29. Dimensionamiento de tornillo por cortante en extremidades superiores. Fuente: [Autores].	89
Tabla 30. Dimensionamiento de tornillo por torsión en extremidades superiores. Fuente: [Autores].	89
Tabla 31. Dimensionamiento de tornillo por cortante en extremidades inferiores. Fuente: [Autores].	91
Tabla 32. Dimensionamiento de tornillo por torsión en extremidades inferiores. Fuente: [Autores].	91
Tabla 33. Adquisición de zancos industriales. Fuente: [Autores].	92
Tabla 34. Especificaciones técnicas de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].	96

## RESUMEN

Este proyecto se enfoca en la realización de un proceso de transferencia y desagregación tecnológica para el diseño y la posterior construcción de un exoesqueleto mecánico, la complejidad que presentan este tipo de mecanismos y sobretodo la gran variedad de modelos, alternativas de funcionamiento y costos, hace necesario que se establezcan estos procesos de investigación para diseñar un exoesqueleto con fines educativos, en este sentido y con la finalidad de encontrar la mejor alternativa se realizó una serie de investigaciones en donde se pudo determinar las características mecánicas, físicas y tecnológicas de las diferentes partes que constituyen un exoesqueleto, además de conocer el funcionamiento de cinco modelos de exoesqueletos de la empresa SKELETONICS, conjuntamente se estudió la biomecánica y medidas antropométricas del cuerpo humano, logrando definir los grados de libertad y las diferentes medidas de los eslabones mecánicos, una vez obtenido estos datos se desarrolló el análisis cinemático y una serie de simulaciones desarrolladas principalmente mediante el software ADAMS View, también este software permite obtener resultados de la dinámica como fuerza y torques en las diferentes juntas, estos datos nos sirven para dimensionar pernos, tornillos, remaches y muelles. Una vez con toda la información se procedió con el diseño de un modelo propio que se ajusta a los requerimientos establecidos por las autoridades de la Universidad Politécnica Salesiana, para ello ha sido fundamental el uso del software Autodesk Inventor, finalmente se presenta planos de las diferentes partes del exoesqueleto diseñado.

Con la implementación de este proyecto se podrá apoyar a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica en el estudio de la cinemática y dinámica de diferentes mecanismos, por lo que este equipo podría ser uno de los que integren un laboratorio para el desarrollo de prácticas en la asignatura de Teoría de Mecanismos.

**Palabras Clave:** Exoesqueleto mecánico, biomecánica, humanoide, cinemática, dinámica, mecanismos.

## **ABSTRACT**

This project focuses on the realization of a process of technological transfer and disaggregation for the design and subsequent construction of a mechanical exoskeleton, the complexity of this type of mechanism and, above all, the great variety of models, operating alternatives and costs, makes it necessary that these research processes be established to design an exoskeleton for educational purposes, in this sense and in order to find the best alternative, a series of investigations were carried out where the mechanical, physical and technological characteristics of the different parts could be determined that constitute an exoskeleton, in addition to knowing the operation of five models of exoskeletons of the company SKELETONICS, jointly studied the biomechanics and anthropometric measurements of the human body, managing to define the degrees of freedom and the different measures of the mechanical links, once obtained this data is developed the kinematic analysis and a series of simulations developed mainly through the ADAMS View software, this software also allows to obtain results of the dynamics such as force and torques in the different joints, these data help us to size bolts, screws, rivets and springs. Once with all the information, we proceeded with the design of our own model that conforms to the requirements established by the authorities of the Politécnica Salesiana University, for this the use of Autodesk Inventor software has been fundamental, finally plans of the different parts of the designed exoskeleton.

With the implementation of this project, students of the Mechanical Engineering career can be supported in the study of the kinematics and dynamics of different mechanisms, so this team could be one of those that integrate a laboratory for the development of practices in the subject of Mechanism Theory.

**Keywords:** Mechanical exoskeleton, Biomechanics, humanoid, kinematics, dynamics, mechanisms.

## **1. Tema**

Elaborar una propuesta de diseño de un exoesqueleto mecánico para fines didácticos.

## **2. Introducción**

Con los avances tecnológicos los humanos han buscado la manera de satisfacer sus necesidades y también buscan la manera en extender sus habilidades. Los exoesqueletos se han introducido poco a poco en el ámbito comercial actualmente como entretenimiento hacia el público, sin embargo, la presencia de los exoesqueletos se ha presentado en el siglo anterior en el campo: militar, medicinal e industrial.

La empresa SKELETONICS situada en Japón, se dedica a crear exoesqueletos totalmente mecánicos con fines recreativos y de entretenimiento, esta compañía se estableció en el 2013 por miembros de la Universidad Nacional de Tecnología de Okinawa, en la actualidad la empresa cuenta con cinco unidades

El presente proyecto, tiene la finalidad de realizar el diseño de un exoesqueleto mecánico que sea movido por las diferentes extremidades de una persona, el cual estará construido con materiales accesibles en el Ecuador, este desarrollo servirá a los estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana en especial a los de la carrera de Ingeniería Mecánica, se tendrán un diseño base en el cual los estudiantes podrán seguir desarrollando, investigando e innovando el modelo que se presentara.

## **3. Planteamiento del problema**

### **3.1 Antecedentes**

En Japón la empresa SKELETONICS fábrica exoesqueletos mecánicos que son exhibidos al público en eventos, teniendo gran acogida por el diseño que presenta, esta empresa cada vez está innovando sus modelos, realizando mejoras en las juntas y articulaciones. La carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, cuenta con laboratorios especializados de termo fluidos, mecanizado, instrumentación y control, materiales, ensayos destructivos y no destructivos, los estudiantes pueden realizar prácticas de las diferentes materias, teniendo mayores conocimientos ya que relacionan la práctica con lo teórico, pero ha visto la necesidad de fortalecer los conocimientos de los estudiantes en el diseño y simulación de mecanismos, en la actualidad se tiene la materia de diseño mecánico en donde se analiza la cinemática y dinámica de mecanismo, pero no se cuenta con un espacio en donde se puede realizar prácticas o la utilización de un software especializado.

### **3.2 Importancia y Alcance**

En el presente proyecto se pretende desarrollar procesos de transferencia y desagregación tecnológica de partes y piezas que componen un exoesqueleto mecánico, el cual es utilizado para fines médicos, industriales, en el movimiento de pesos, de defensa y seguridad de las personas; este sistema posee diferentes tipos de mecanismos que requieren procesos de fabricación diversos y materiales distintos, lo que requerirán una serie de conocimientos en las áreas de diseño, fabricación, materiales, CAD-CAM y simulación que llevarían a fortalecer el aprendizaje de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica.

Un exoesqueleto representa un sistema mecánico de alguna manera todavía desconocido para los profesionales de la Ingeniería Mecánica en el Ecuador y una gran oportunidad de establecer protocolos de diseño, análisis, transferencia y desagregación tecnológica.

### **3.3 Problema General**

Para el desarrollo e investigación de nuevas tecnologías, el diseño mecánico, la ciencia de los materiales y la simulación asistida por ordenador son áreas fundamentales para el desarrollo en el campo industrial, militar, de la medicina y el social. En el Ecuador actualmente los avances tecnológicos se ven limitados por la disminución del presupuesto del estado para fines educativos en escuelas, colegios y sobre todo universidades, lo que ha frenado la investigación y la innovación, que son ejes principales para el desarrollo de un país. Han sido más bien las industrias las que han presentado en los últimos años avances tecnológicos que benefician su producción, automatizando sus procesos, mejorando la calidad de sus productos y disminuyendo los costos, lo que los ha llevado a competir y abrir nuevos mercados.

En este sentido la demanda de profesionales que estén capacitados para enfrentar los nuevos retos que presentan algunas de las industrias en el Ecuador recaen en las universidades, impulsándolas a mejorar sus procesos y quehacer educativo en general, lo que significa el mejoramiento del perfil profesional de los docentes y la adquisición de laboratorios que posibiliten el fortalecimiento de dichos conocimientos.

Específicamente la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca ha venido formando ingenieros desde hace más de 20 años y en el transcurso de los últimos 8 se ha preocupado en implementar una serie de laboratorios en las áreas de la fabricación y mecanizado, de termo fluidos, de materiales, instrumentación y control y laboratorios de ensayos destructivos y no destructivos, sin embargo para solventar procesos de automatización se requieren conocimientos sólidos de mecanismos, diseño y control, lo

que hace necesario incursionar en el estudio de la cinemática y dinámica de máquinas y mecanismos como una de las áreas del conocimiento que no cuenta con equipos de laboratorio en la UPS.

Estudiar grados de libertad, movilidad, trayectorias, velocidades, aceleraciones y cargas a la que se sujeta un mecanismo, permite al estudiante generar una mínima experiencia para trasladar estos conocimientos a la aplicación para la solución de problemas industriales. Los laboratorios en esta área en especial son muy limitados y se dedican a estudiar con mucha profundidad la fricción y sus efectos en el desgaste y la sanidad de las máquinas y mecanismos. Es por eso que se requiere contar con un mecanismo tipo exoesqueleto mecánico que permita el estudio de trayectorias, posiciones, grados de libertad, velocidades, aceleraciones, fuerzas en los nodos y sistemas de movilidad como cables, resortes y más elementos mecánicos y además posibilite el desarrollo de procesos de transferencia y desagregación tecnológica.

## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivo General**

Elaborar una propuesta de diseño de un exoesqueleto mecánico para fines didácticos.

### **4.2 Objetivos Específicos**

- Conceptualizar un modelo de exoesqueleto que sea movido por un ser humano.
- Analizar la cinemática y dinámica del mecanismo a desarrollar.
- Elaborar planos constructivos para un exoesqueleto mecánico.

## **5. Conceptualizar un modelo de exoesqueleto que sea movido por un ser humano**

### **5.1 Introducción**

La palabra Skeletonics nace a partir de una fusión entre las palabras “Skeleton” y “Mechanics”, los exoesqueletos han sido utilizados en el campo militar, industrial, medicina y se han introducido de poco a poco en el ámbito comercial como entretenimiento hacia el público. La finalidad es ampliar los movimientos de una persona mediante el uso de mecanismos del enlace que sigan los movimientos de los brazos, manos, piernas y cabeza del cuerpo humano, permitiendo realizar movimientos dinámicos que no pueden ser realizados por el cuerpo de una persona. En la actualidad la compañía skeletonics se dedica a crear exoesqueletos con fines recreativos, esta compañía se estableció en el año 2013 por miembros de la Universidad Nacional de Tecnología de Okinawa, en la actualidad la empresa presenta 5 unidades.

## 5.2 Partes de un exoesqueleto mecánico

Los modelos de exoesqueletos mecánicos tratan de asimilar la forma del cuerpo humano, logrando imitar algunos huesos y formando estructuras en la que pueda abordar una persona, con la finalidad de tener mayor velocidad, fuerza y movilidad. En la figura 1 se presenta las partes del cuerpo de una persona, esto nos servirá para identificar cada parte del exoesqueleto.

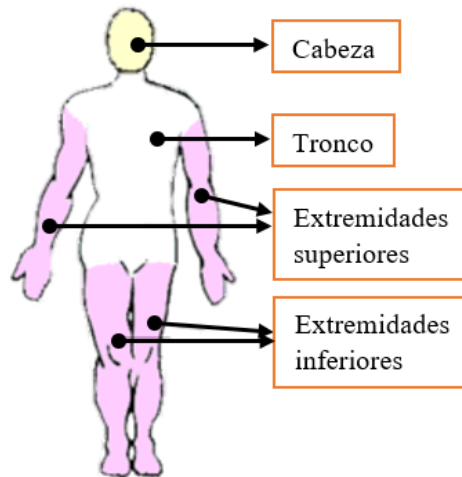


Figura 1. Partes del cuerpo humano. Fuente: [1].

### 5.2.1 Extremidades superiores del exoesqueleto mecánico

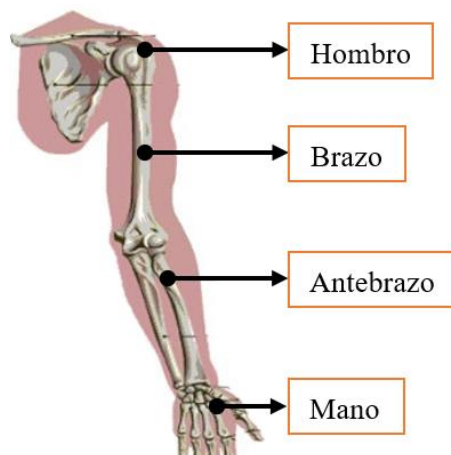


Figura 2. Extremidades superiores del cuerpo humano. Fuente: [2].

En la figura 2 se puede observar que la extremidad superior de una persona está conformada por: hombro, brazo, antebrazo y mano. El exoesqueleto mecánico trata de simular el funcionamiento de esta extremidad con diferentes mecanismos.

### 5.2.1.1 Brazo de exosqueleto mecánico

En el campo industrial tratan de diseñar brazos de robots que tengan mayor movilidad para que puedan desempeñar trabajos encomendados, pero los brazos de los exoesqueletos mecánicos tratan de asimilar la apariencia y la funcionalidad del brazo de una persona con eslabones y articulaciones mecánicas. En la figura 3 se puede observar el brazo del exoesqueleto mecánico que es controlado por los brazos de una persona.

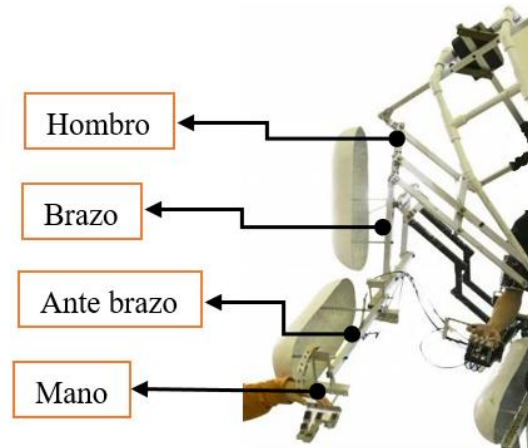


Figura 3. Extremidad superior de la unidad 01. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

### 5.2.1.2 Mano del exoesqueleto mecánico



Figura 4. Mano humana y de exoesqueleto. Fuente: [3].

La mano humana es una de las herramientas más maravillosas y más difícil de imitar, tomar un objeto y manipularlo es una actividad que nos parece muy natural y simple, ya que los humanos realizamos sin esfuerzo alguno. Pero tratar de implementar una mano robótica que cumpla las mismas funciones que una mano humana no es una tarea fácil, los investigadores buscan realizar una mano robótica que sea funcional y estéticamente parecida a la mano humana como se observa en la figura 4. Se han desarrollado varias propuestas de diseños mecánicos y electrónicos para la implementación y construcción de manos robóticas, su complejidad está relacionada con el tipo de tareas a realizar [3].



Las manos robóticas se dividen en tres grupos que dependen de la cantidad de dedos y su configuración, a continuación, se presenta de manera general:

1. **Manos robóticas antropomórficas:** Poseen cuatro dedos y un pulgar, su configuración es similar a la mano humana [4].
2. **Manos robóticas semiantropomórficas:** Son a las que les falta uno o varios dedos, su configuración es similar a la mano humana. Esta configuración de mano robótica nace por la razón que el dedo meñique no tiene gran utilidad para la manipulación de objetos, es casi innecesario. Por lo cual las manos robóticas lo realizan con solo tres dedos manipuladores más el dedo pulgar, también hay manos robóticas con tres dedos en total y son compensados con capacidad de movilidad [3].
3. **Manos robóticas no-antropomórficas:** Su configuración no es igual a la mano humana, independientemente del número de dedos [4].

En la actualidad para realizar el control de movimientos de una mano robótica se realiza mediante actuadores neumáticos, hidráulicos, cuerpo humano y eléctrico [4].

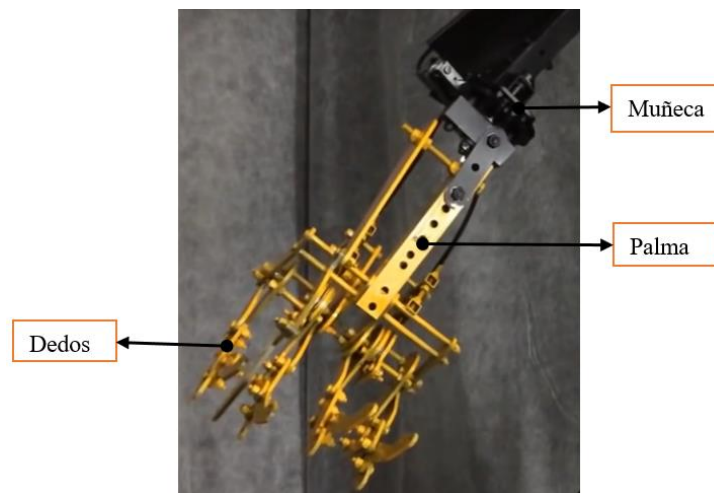


Figura 5. Mano antropomórfica de exoesqueleto mecánico. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

Los primeros exoesqueletos mecánicos tenían manos semiantropomórficas (4 dedos), permitiendo movilidad en los 3 dedos y manteniendo fijo el dedo pulgar, pero con la innovación han desarrollado manos antropomórficas con mayor movilidad, como se puede observar en la figura 5, es importante conocer e identificar los huesos de los dedos ya que los eslabones intentan asemejarse en su totalidad a estos, en la figura 6 se puede observar los huesos de los dedos.

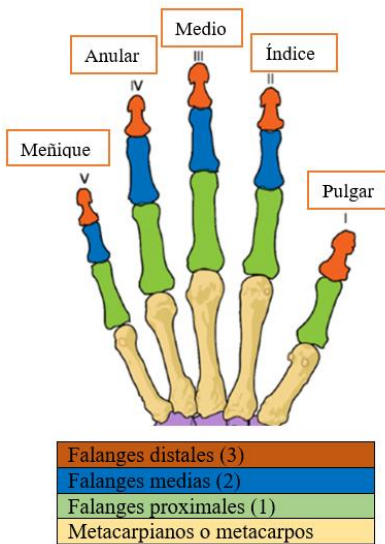


Figura 6. Huesos de los dedos. Fuente:[5].

Las manos robóticas requieren un trabajo en donde su capacidad de operación sea flexionar todos los dedos y la movilidad del pulgar, las soluciones presentan ciertos grados de dificultad, por lo cual se requieren sistemas de engranajes o actuadores poco comunes y de tamaños muy reducidos.

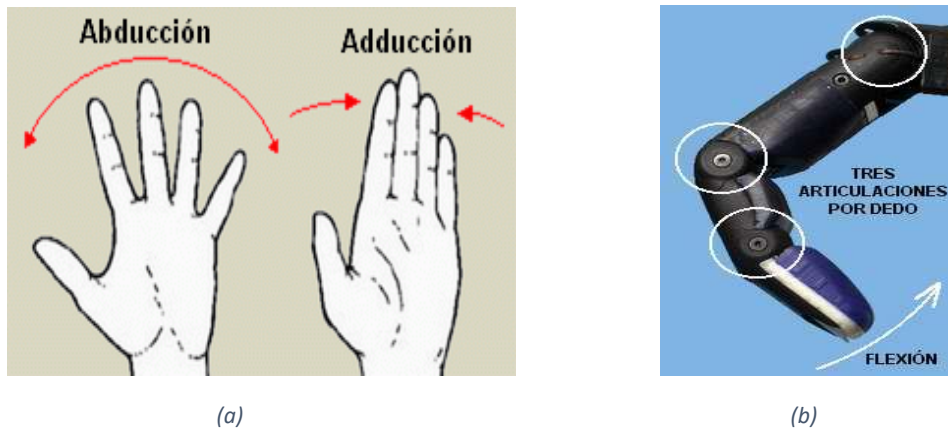


Figura 7. (a) Movimiento lateral de los dedos, (b) Flexión del dedo. Fuente: [3].

En la figura 7 (a) se puede observar el movimiento lateral de los dedos, se conoce con el nombre de abducción al movimiento que permite separarlos y aducción al movimiento que los permite unir todos juntos. En la mano humana este movimiento es limitado, ya que hay una interconexión entre dedos y los dedos se mueven juntos, pero con esfuerzo de voluntad es posible moverlos por separado por unos milímetros a cada lado, es importante el ajuste de cavidad de agarre de la mano, ya que se puede atrapar objetos de mayor tamaño al tenerlos abiertos [3].

En la figura 7 (b) se puede observar la flexión de los dedos, este movimiento es impredecible ya que nos permite la manipulación de objetos, en especial el dedo pulgar es capaz de enfrentarse, uno a uno,

con los otros dedos lo que nos permite realizar tareas con presión en objetos pequeños y delicados [3].

### 5.2.2 Tronco de exoesqueleto mecánico

El tronco es una parte muy importante ya que esta se acopla con las extremidades inferiores, extremidades superiores y la cabeza, él tronco se encuentra dividido en columna vertebral y tórax.



Figura 8. Tórax de exoesqueleto mecánico. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

El tórax se acopla con la columna del exoesqueleto mecánico, se encuentra formado por una estructura de perfiles cuadrados de aluminio como se indica en la figura 8, esta parte no tiene grados de libertad. Pero en la parte frontal cuenta con una estructura que está a la altura de las costillas de la persona, esta parte tiene 1 grado de libertad ya que puede abrirse y cerrarse, actúa como una protección para el piloto.

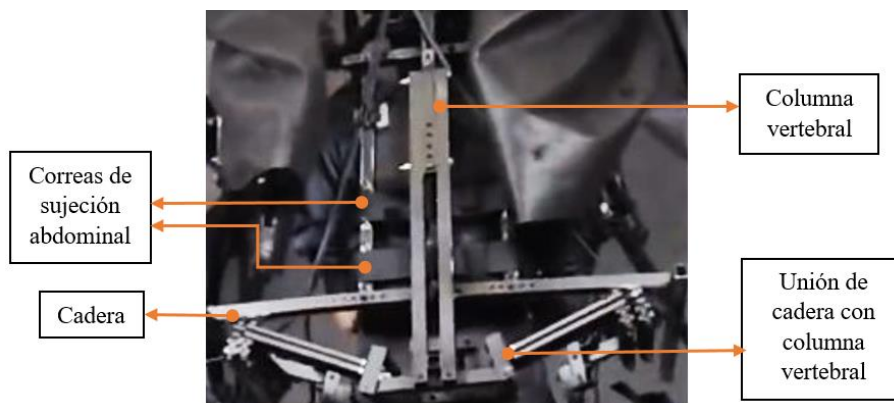


Figura 9. Columna de exoesqueleto mecánico. Fuente: [7].

La columna está acoplada con el tórax y las extremidades inferiores del exoesqueleto mecánico, es una estructura fija que no presenta grados de libertad, soporta el peso de las extremidades superiores y la cabeza, se ajusta mediante correas con el tronco de la persona, como se observa en la figura 9.

### 5.2.3 Cabeza de exoesqueleto mecánico

Los primeros exoesqueletos no tienen cabezas por la dificultad de simular los grados de movimiento del cuello, pero los modelos más recientes han incorporado una cabeza, tratando de asemejar la movilidad, pero no lo estético.

### 5.2.4 Extremidades inferiores del exoesqueleto mecánico

En la figura 10 se puede observar que las extremidades inferiores de una persona están conformadas por cuatro regiones que son: cadera, muslo, pierna, pie.

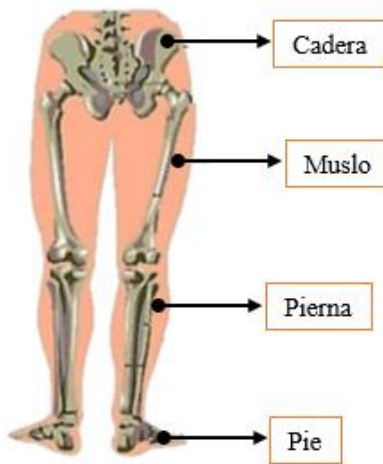


Figura 10. Extremidades inferiores cuerpo humano. Fuente: [8].

El exoesqueleto mecánico trata de replicar cada región en base a su funcionamiento con sistemas mecánicos como se indica en la figura 11, para la cual el aluminio es un material apropiado para estos mecanismos debido a su resistencia, ligereza y maquinabilidad.

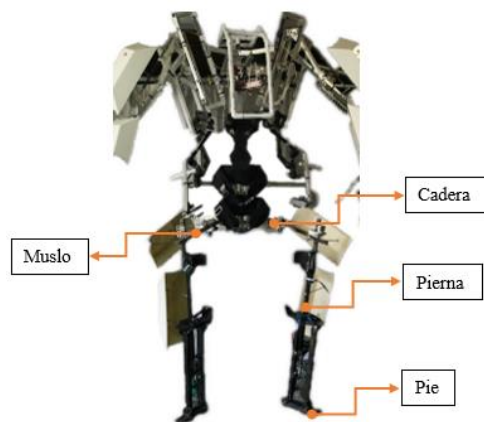


Figura 11. Extremidades inferiores del exoesqueleto mecánico. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

Es importante establecer los centros de gravedad de cada región para lograr una estabilización en todo el cuerpo mecánico como se indica en la figura 12, los elementos mecánicos están acoplados con la finalidad de proporcionar la dinámica y cinemática que el cuerpo humano presenta ante la marcha ya que las extremidades inferiores son las encargadas de soportar y trasladar la carga que por naturaleza el cuerpo ejerce mientras esta en movimiento.

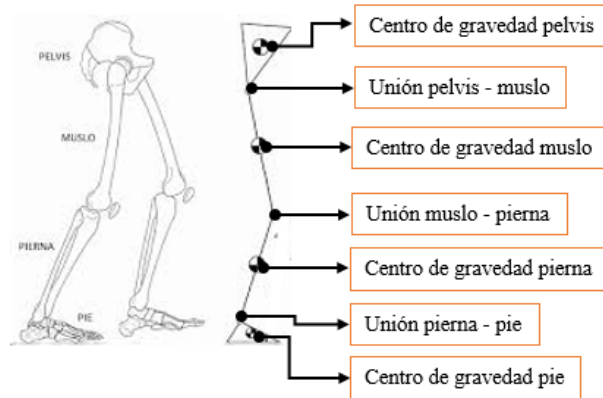


Figura 12. Eslabones y uniones presentes en las extremidades inferiores. Fuente: [9].

El análisis estructural de cada unión como de los elementos implementados en el exoesqueleto es indispensable para lograr el funcionamiento de cada región marcada en la figura 12.

#### 5.2.4.1 Cadera

En la figura 13 presenta la cadera en el cuerpo humano que sirve como orientación en todas las direcciones del espacio, actuando en los tres ejes coordenados y posee tres grados de libertad. Sin embargo, en la cadera del exoesqueleto presenta algunas limitaciones respecto a la del cuerpo humano debido a la complejidad de su estructura ósea, para sustituir esta región el exoesqueleto emplea una estructura de aluminio con perfiles cuadrados, asegurando la funcionalidad y transmisión de movimiento hacia las piernas.



Figura 13. Cadera del cuerpo humano. Fuente: [10].

### 5.2.4.2 Muslo

El hueso del muslo es el fémur, el más largo y fuerte del cuerpo humano. Presenta ciertas particularidades en sus extremos en la parte superior una cabeza redonda que se incrusta en la cavidad del coxis y en la parte inferior dos cóndilos que permite la articulación en forma de bisagra de la rodilla, transmitiendo el movimiento hacia las piernas como se muestra en la figura 14, sus restricciones son cortas sobre la marcha por sus condiciones naturales.



Figura 14. Anatomía ósea y muscular del cuerpo humano. Fuente: [11].

Eslabones y perfiles sustituyen esta región en los exoesqueletos con la finalidad de lograr replicar el movimiento del fémur en el cuerpo humano, sin embargo, existen limitaciones para estos mecanismos. En la figura 15, se puede observar el fémur del exoesqueleto anclado en su parte superior a la cadera y en la parte inferior hacia la pierna.

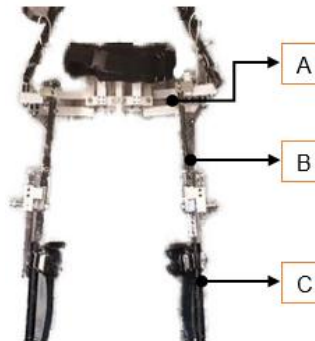


Figura 15. Fémur del exoesqueleto con su anclaje anterior y posterior. Fuente [8].

Tabla 1. Descripción de funcionamiento del fémur en cada región. Fuente: [Autores]

Designación	Nombre	Descripción
A	Cadera	Parte central y anclaje de extremidad superior e inferior.
B	Muslo	Perfil cuadrado de aluminio con acoples de giro en sus extremos.
C	Pierna	Conformado por zancos.



Las rodillas son sustituidas por mecanismos de 1 grado de libertad en el exoesqueleto para permitir el movimiento hacia adelante y atrás a la pierna permitiendo caminar a la estructura metálica.

#### 5.2.4.3 Piernas

Las piernas están formadas por dos huesos: la tibia y el peroné, en la figura 15 podemos observar la distribución y aplicación de esta región en el exoesqueleto, es un eslabón autorregulable que se articula con el muslo para formar la rodilla.

#### 5.2.4.4 Pie

Está compuesto por uno o más segmentos o huesos, sin embargo, el exoesqueleto no toma todos estos segmentos en su región debido a que no es necesario replicarlos en su funcionamiento, los zancos industriales incluyen en su diseño un pie con plantillas de goma para evitar deslizamientos como se indica en la figura 15 [12], los zancos son los que van a soportar el peso de toda la estructura del peso del exoesqueleto y de la persona.

### 5.3 Modelos de la empresa SKELETOMICS

#### a. Producto 1: Skeletonics unidad 01

Es la primera unidad producida por la compañía SKELETOMICS Inc. en el año 2010, tiene un tamaño de 2,6 m y un peso de 40 kg, este modelo es primitivo a los actuales con una gran diferencia en su construcción presentando la parte inferior y superior por separado como se indica en la Figura 16 (a), por lo que no tiene columna vertebral y principalmente no tiene cabeza.

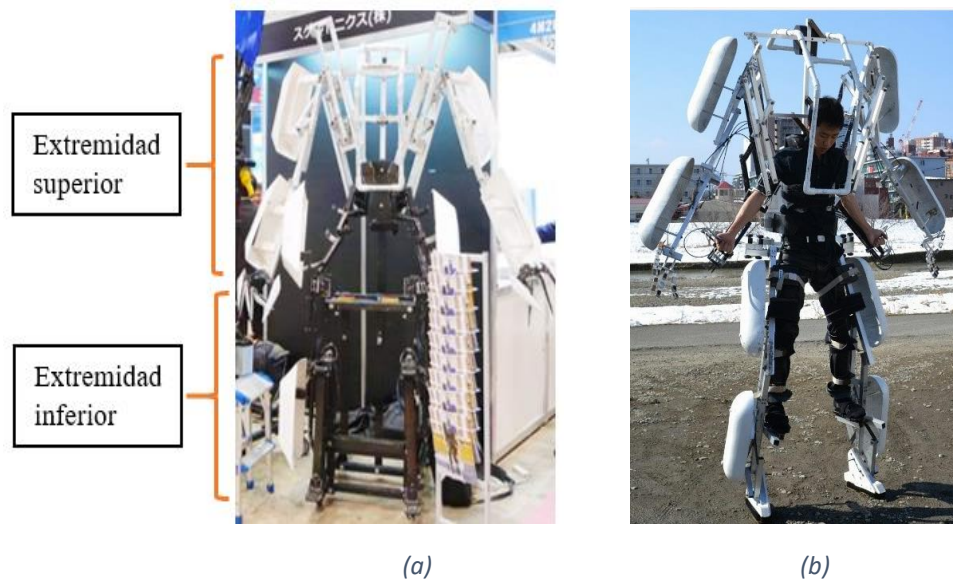


Figura 16. (a) Exoesqueleto dividido en sus partes principales, (b) Exoesqueleto tripulado por manipulador humano; Skeletonics unidad 01. Fuente: [13].

Este diseño permite movilidad en los brazos, antebrazos, manos (dedos), muslos y piernas, también puede realizar movimientos de rotación en la cintura, al no tener una columna que restrinja el movimiento, como se pueden observar en las figuras 16 (b), esto ocasiona que todo el peso del exoesqueleto soporte la columna de la persona, reduciendo tiempo de pilotaje.

En la figura 17 se puede observar el brazo del exoesqueleto mecánico, está formado por una estructura de tubos cuadrados de aluminio, la cual mediante extensiones de aluminio se conectan a una sujeción de correa colocada en el brazo de la persona, el movimiento que realice el brazo de la persona se transmite al mecanismo, sin embargo, es un modelo que tiene limitaciones en su movilidad. Presenta movimientos de abducción, aducción, rotación interna y externa en el hombro.

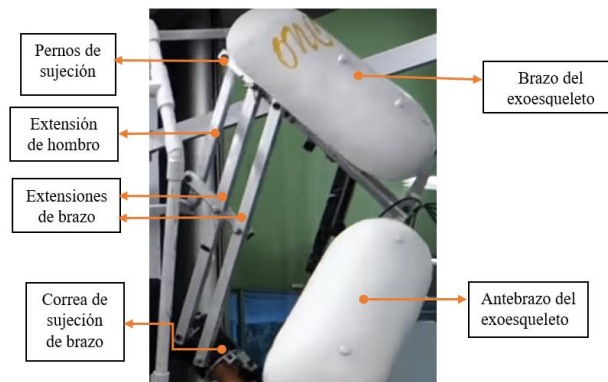


Figura 17. Brazo de exoesqueleto unidad 1. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

El antebrazo está acoplado a la mano y al brazo del exoesqueleto mecánico como se puede observar en la figura 18, está se encuentra formado por una estructura de tubos cuadrados de aluminio, de igual manera tiene extensiones de perfiles que conectan al antebrazo de la persona permitiendo realizar movimientos de flexo extensión.

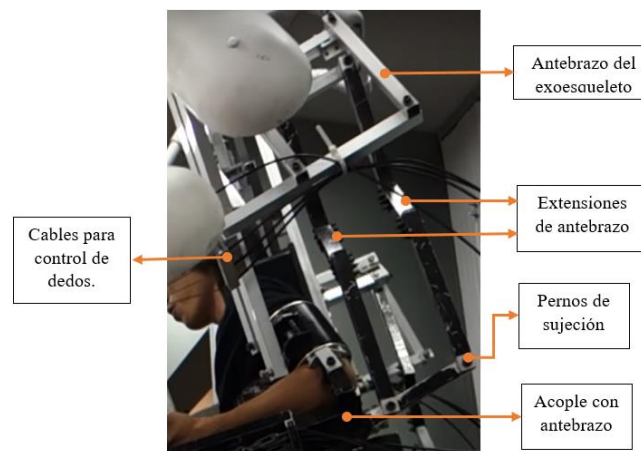


Figura 18. Antebrazo de exoesqueleto mecánico. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].



Las extensiones superiores del exoesqueleto se conectan mediante correas al brazo y antebrazo de la persona como se observa en la figura 19, las extensiones transmiten el movimiento generado por el de la persona hacía el mecanismo.

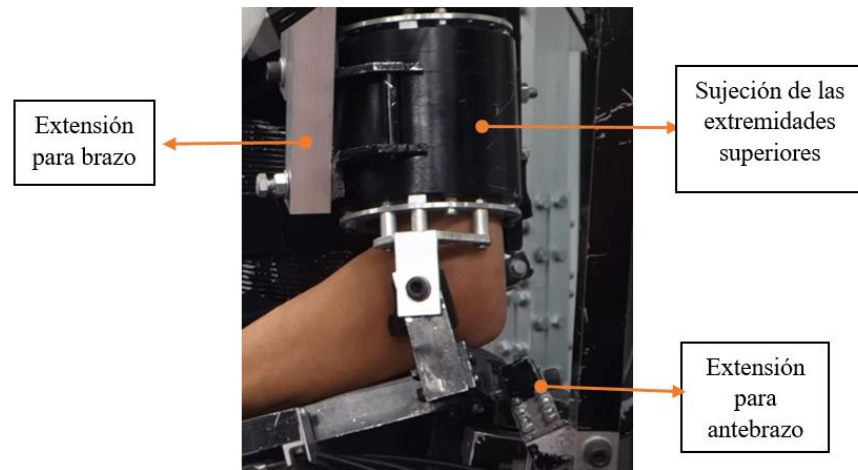


Figura 19. Sujeción de brazo y antebrazo de exoesqueleto mecánico. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

La mano de este modelo está formada por cuatro dedos, correspondientes a tres dedos y un pulgar los cuales serán controladas por tensión de alambre, permitiendo realizar movimientos de flexo extensión como se puede observar en la figura 20.

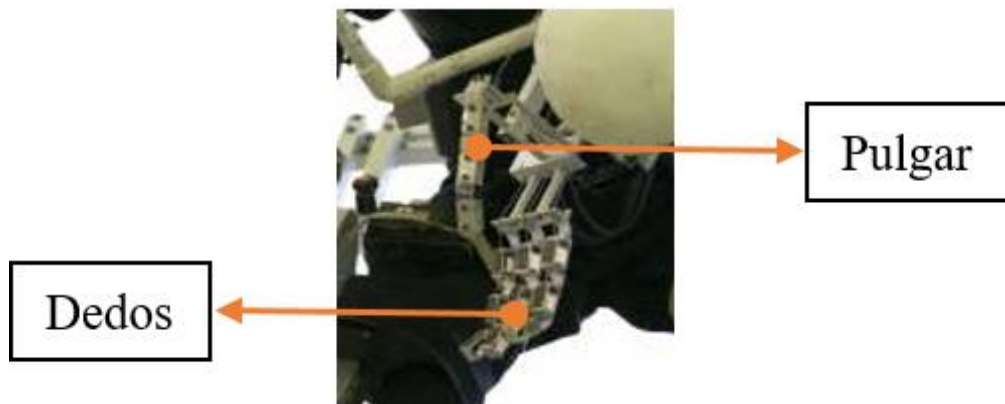


Figura 20. Dedos presentes en la mano de la unidad 01. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

Los dedos del exoesqueleto mecánico se controlan a través de cables que actúan en forma de tendones, este sistema se utiliza para controlar frenos de una bicicleta. En la figura 21, se muestra un control de dedos mediante argolla o seguro, en el cual se tiene de jalar las argollas para contraer los dedos.

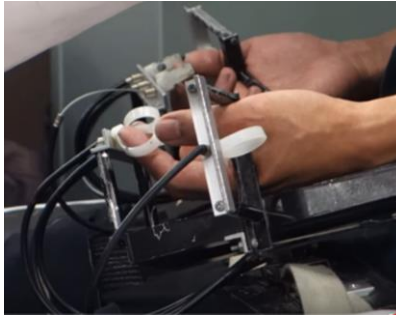


Figura 21. Control de dedos por argolla. Fuente: [14].

En la figura 22 se puede observar las partes de las cuales está formada la extremidad inferior, estos zancos soportan una carga de 70-95 kg, también permite que el exoesqueleto se mueva más rápido.

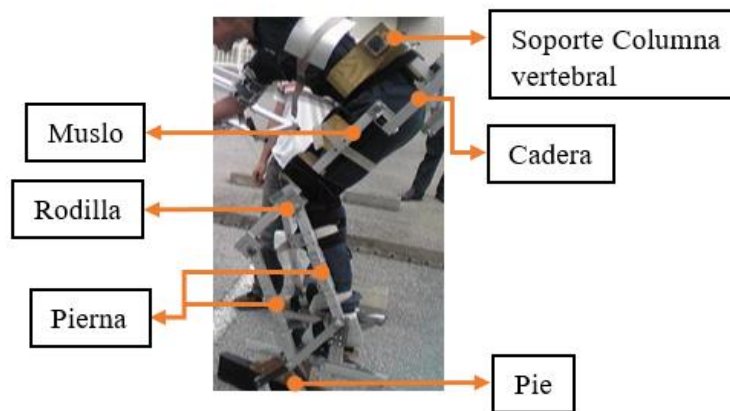


Figura 22. Extremidades inferiores de la unidad 01. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

La cadera mecánica está conectada a la columna vertebral del exoesqueleto que une la extremidad inferior con la superior, es importante mantener el centro de masa en este mecanismo para mantener la estabilidad en todo el exoesqueleto, en la figura 22 se puede observar la cadera del exoesqueleto de la unidad 1[15].

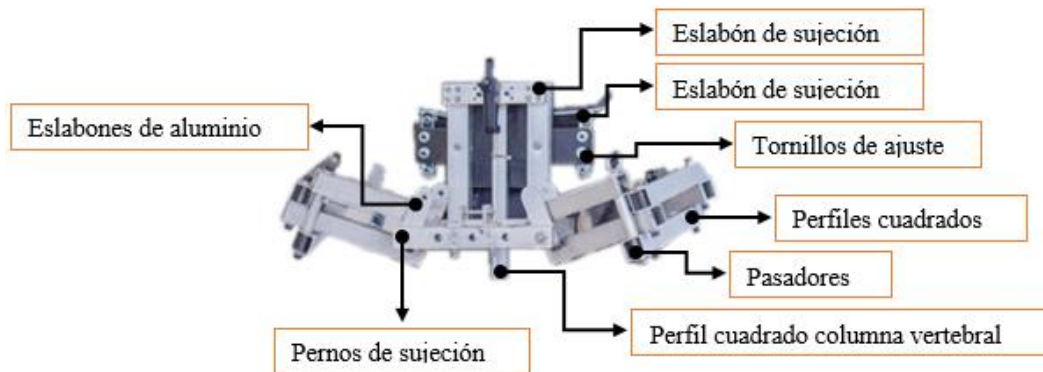


Figura 23. Estructura de aluminio para la cadera del exoesqueleto mecánico. Fuente: [16].

Tabla 2. Elementos y descripción que conforma la región de la cadera. Fuente: [Autores]

Designación	Nombre	Descripción
A	Eslabón de sujeción	Calibración de los marcos de la cadera, material de aluminio.
B	Eslabón de sujeción	Mecanismo para la sujeción del espaldar y varillas de refuerzo abdominal.
C	Tornillo de ajuste	Da rigidez al espaldar del usuario quien opera el exoesqueleto.
D	Perfiles cuadrados	Estructura de la cadera mecánica, material aluminio.
E	Pasadores	Da rotación angular a los perfiles.
F	Perfil cuadrado columna vertebral	Se extiende del coxis o cadera hasta la cabeza del exoesqueleto mecánico.
G	Pernos de sujeción	Ajustan los elementos para mantenerlos fijos de acuerdo con su funcionalidad.
H	Eslabones	Dan soporte a la base de la cadera mecánica

#### b. Producto 2: Skeletonics Remake

Es la segunda unidad producida por la compañía SKELETONICS Inc. construido en él año 2011, tiene un tamaño de 2.6 m y un peso de 40 kg. Presenta variantes con respecto al modelo en sus extremidades inferiores como se muestra en la Figura 24, manteniendo el diseño de sus extremidades superiores a su antecesor.



Figura 24. Skeletonics Remake. Fuente: [7].

Para este modelo se ha enfocado en la mejora de las extremidades inferiores logrando así una mejora en lo estético, reduciendo el peso de la estructura y lo más importante bajando el costo, en la figura 26 se puede observar la mejora presentada con respecto al modelo anterior.

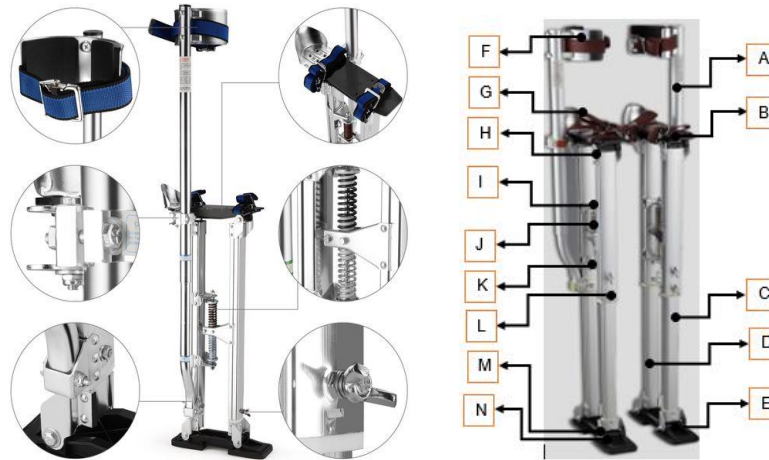


Figura 25. Partes principales de zancos. Fuente: [17], [18].

Tabla 3 . Descripción de las partes y material de los zancos. Fuente: [Autores]

Designación	Nombre	Descripción
A	Soportes laterales piernas	Estructura de perfil circular que permite estabilización de toda la estructura.
B	Soporte pie	Se usa generalmente una plantilla en forma de zapato.
C	Telescopio punta	Estructura de perfil cuadrada, soporta mayores cargas, es posible regular la altura de cada una de ellas.
D	Telescopio talon	Estructura de perfil cuadrada, soporta mayores cargas, es posible regular la altura de cada una de ellas.
E	Soporte planta de pie	Recubrimiento de goma para optimizar la tracción en diferentes superficies.
F	Kit correra pierna	Se emplea para la sujeción de las extremidades, correa velcro.
G	Kit correra pie	Se emplea para la sujeción de las extremidades, correa velcro.
H	Acoples de sujeción	Cada elemento se acopla y se fija en sitios correspondientes a su mejor funcionamiento sin importar su perfil.
I	Tuerca de apriete hexagonal	Tuerca de precisión para mantener los elementos en su lugar.

J	Muelles	Encargados de soportar el peso de toda la estructura.
K	Eje de resorte	Elemento de alineación para los muelles implementados en la estructura.
L	Tuerca de ajuste (Mariposa)	Permite un rapido ajuste de los mismos.
M, N	Perno y tuerca de fijación, hexagonal	Usados para cada acople establecido en la estructura de los zancos.

### c. Producto 3: Skeletonics Practice

Es la tercera unidad producida por la compañía SKELETONICS Inc, construido en él año 2014, tiene un tamaño de 2,8 m y con un peso de 35 kg, es el primer modelo que salió a la venta, ya que su diseño mejoró mucho con respecto a su antecesor, el cuerpo superior e inferior están conectados por una columna vertebral como se observa en la figura 26, reduciendo la carga sobre el piloto y el tiempo de abordaje. Este modelo conserva el diseño de las extremidades superiores como las extremidades inferiores de los modelos antes presentados, sin embargo, se presenta otra característica de diseño muy importante para la comparativa con el ser humano, incorpora una cabeza robótica.



Figura 26. Skeletonics Practice. Fuente: [7].

En la búsqueda de un modelo unificado se propone el anclaje de ambas extremidades mediante una columna vertebral como se puede observar en la figura 27, sin embargo, este modelo presenta limitaciones en su accionar reduciendo el ángulo de funcionamiento sobre la cintura ya que no presentara movimiento circular en la misma, pero reduce el peso sobre la columna de la persona.

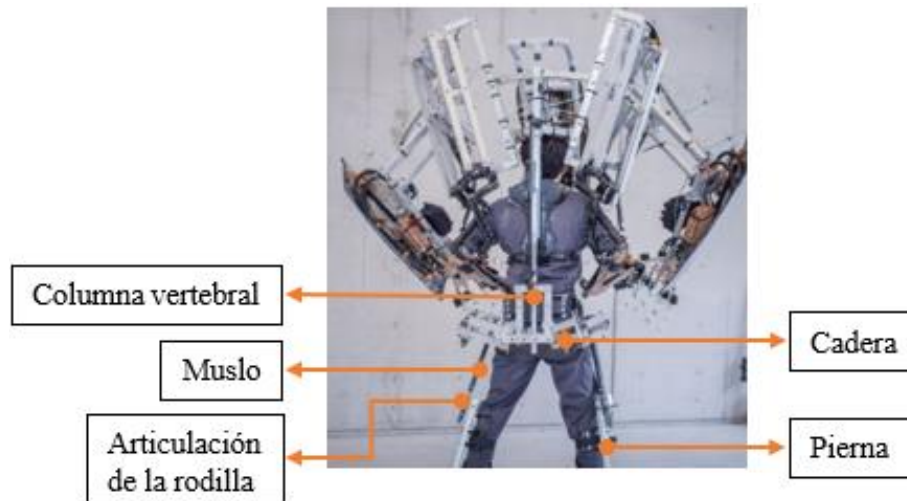


Figura 27 . Mecanismo de unificación de la extremidad superior y extremidad inferior en el modelo Skeletonics Practice. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

El deseo de la comparativa máquina – humano, este modelo adquiere a sus mejoras una cabeza robótica el cual adquiere una presentación humanoide, sin embargo, este modelo aun presenta limitaciones en este accesorio ya que no presenta funcionamiento alguno como se observa en la figura 28, si no que tan solo es una mejora en la estética de los exoesqueletos, adquiriendo prestaciones mucho más importantes que sus antecesores.

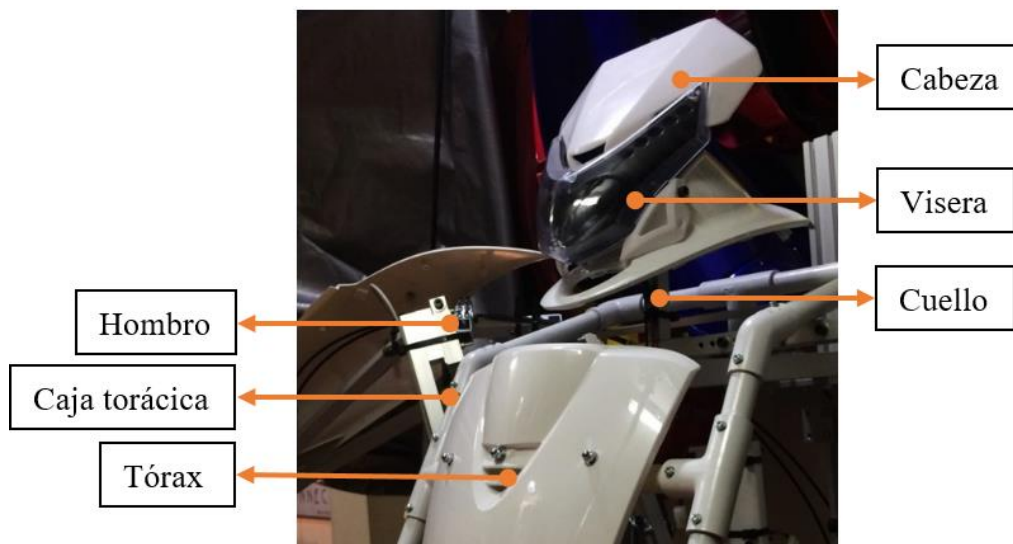


Figura 28. Partes que conforman la cabeza del modelo Skeletonics Practice. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

#### d. Producto 4: Alive Skeletonics

Es la cuarta unidad producida por la compañía SKELETONICS Inc, construido en el año 2014, tiene un tamaño de 2,8 m y un peso de 40 kg, salió 6 meses después del Skeletonics Practice mejorando las extremidades superiores, este modelo trata de replicar los huesos de la mano de una persona



consiguiendo tener 5 dedos, palma y muñeca como se indica en la figura 29. Los brazo y antebrazo cambian su estructura por otra más eficiente, incorporando mejoras importantes en la cadera del exoesqueleto mecánico en comparación con la del modelo anterior, sin embargo, mantiene la extremidad inferior de los modelos antes mencionados.



Figura 29. Alive Skeletonics. Fuente: [7].

En base a lo desarrollado anteriormente este modelo presenta progresos para su parte dorsal el cual la cadera como columna vertebral presentan mejoras considerables agregando una jaula de alivio para el usuario aumentando así el tiempo de operación para este exoesqueleto como se puede observar en la figura 30.

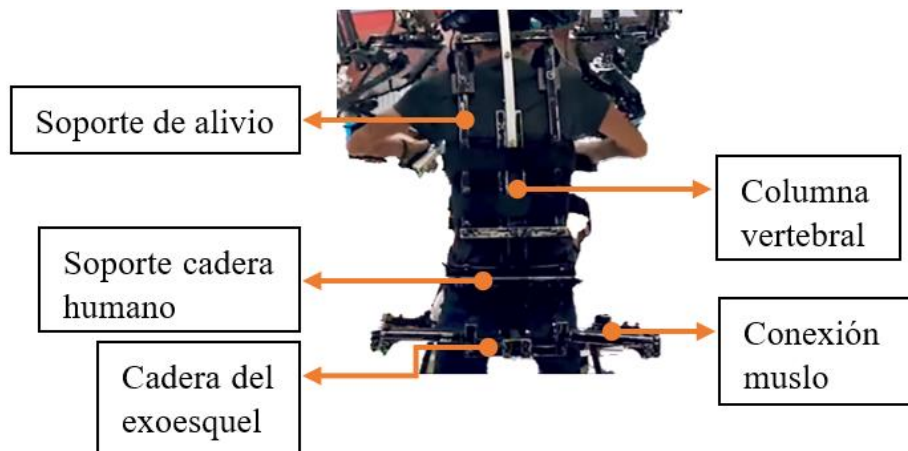


Figura 30. Partes mejoradas para el exoesqueleto Alive Skeletonics. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

Las extremidades superiores también presentan mejoras en su estructura con respecto a su antecesor, ya que permite mayor movilidad como se observa en la figura 31, se puede observar que dichas mejoras reducen el peso considerablemente y dando un mejor funcionamiento a esta extremidad.

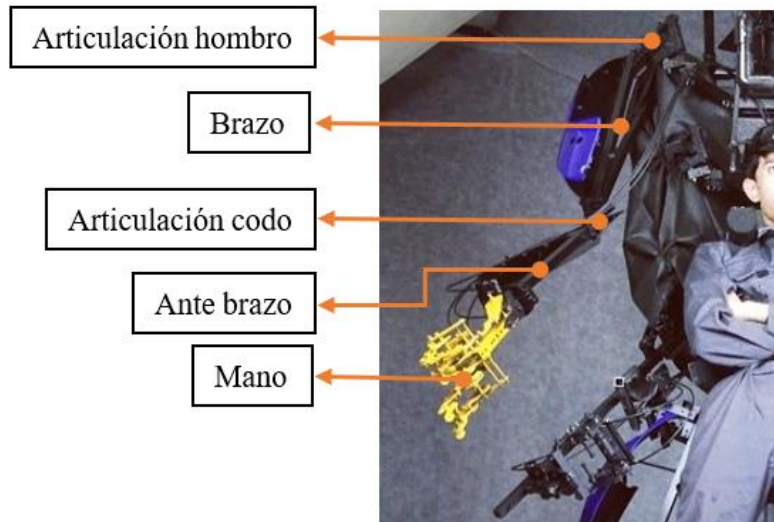


Figura 31. Partes mejoradas en la extremidad superior exoesqueleto Alive Skeletonics. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

En este modelo la articulación de sus dedos es una de sus mejoras como se puede observar en la figura 32, con respecto a todos los modelos presentados anteriormente mediante la tensión de cables, esta tensión será establecida por el usuario desde el mecanismo de control.

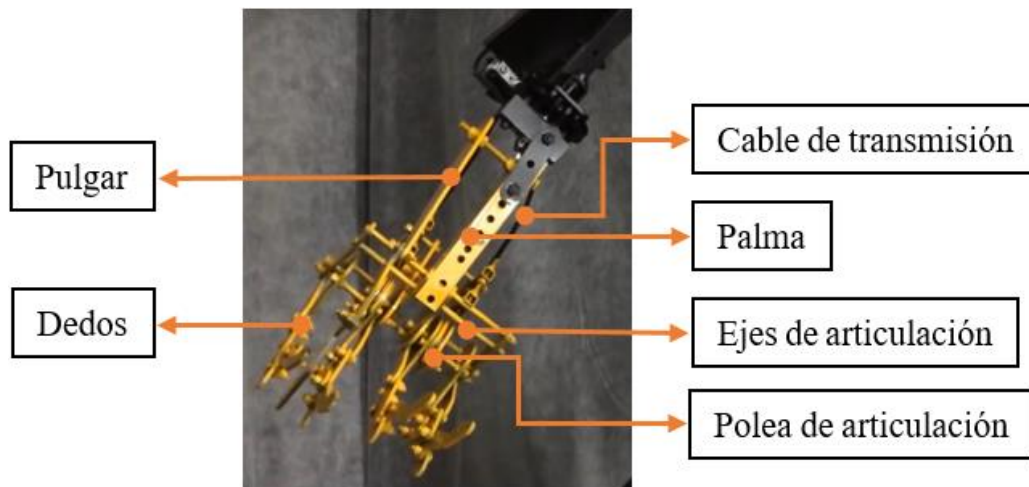


Figura 32. Descripción de los mecanismos para la articulación de los elementos mecánicos presentes en la mano del exoesqueleto Alive Skeletonics. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

Los primeros exoesqueletos mecánicos no tenían palma, los dedos estaban unidos directamente con el antebrazo, este modelo tiene palma que se acopla con los dedos y la muñeca, el modelo analizado tiene una palma rectangular que permanece en una posición fija, no presenta grados de libertad.



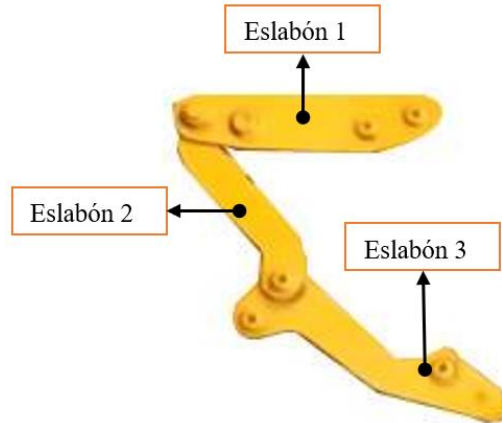


Figura 33. Eslabones que forman el dedo de la mano. Fuente: [4].

En el exoesqueleto mecánico no permite realizar movimiento lateral de los dedos, pero si puede realizar movimientos de flexo extensión. Los dedos metacarpianos (eslabón 1) son dos eslabones en paralelo que unen los dedos con la palma, estos permanecen fijos, no tienen grados de libertad. La falange proximal (eslabón 2) tiene dos eslabones en paralelo unidos al eslabón 1 y del otro extremo está unido con la falange distal y medio (eslabón 3), estos forman un solo eslabón como se indica en la figura 34.

Todas las falanges del dedo se mueven al mismo tiempo, presentan un grado de libertad, pero el control es realizado cada dos dedos por lo cual se tendría 2 grados de libertad en todos los dedos, ya que el dedo pulgar permanece fijo.



Figura 34. Control de dedos por gatillo. Fuente: [4].

En la figura 34 se observa el control de los dedos mediante gatillo, este sistema permite contraer dos dedos en cada gatillo y mantiene fijo al dedo pulgar, también este sistema permite controlar el giro de la muñeca mediante cable y polea.

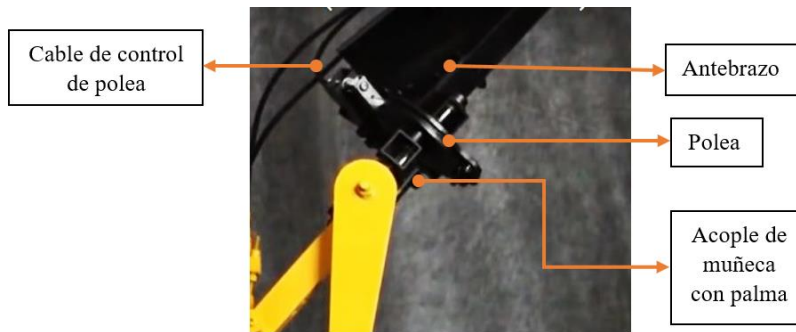


Figura 35. Muñeca de exoesqueleto mecánico. Fuente: [4].

La articulación de la muñeca de una persona tiene 2 GLD, esto significa que se requiere una junta universal que pueda soportar esfuerzos que se realizan con la mano (más el peso de ella) [3]. En el exoesqueleto mecánico la muñeca está acoplado a la mano y al antebrazo, su función es hacer girar a la mano mediante un acople de polea con alambre permitiendo girar hasta 90°, el movimiento de los dedos y la muñeca se lo realiza desde el mismo control, esto se puede observar en la figura 35.



Figura 36. Exoesqueleto con cabeza. Fuente: [7].

En la figura 36 se observa al exoesqueleto Arrive tiene la capacidad de replicar los movimientos de la cabeza de una persona, tiene en su estructura perfiles cuadrados de aluminio que está enlazado a una rótula para facilitar el giro como se observa en la figura 37. El campo de visión del exoesqueleto es transmitido por cámaras a los ojos de la persona.

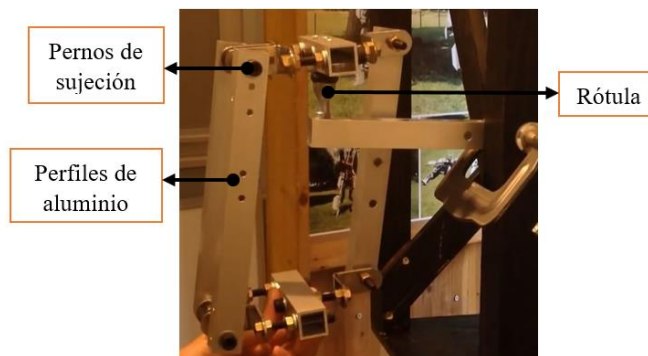


Figura 37. Mecanismo de movimiento de cabeza de exoesqueleto. Fuente:[ Web Empresa Eskeletonics].

#### e. Producto 5: Arrive Skeletonics

Es la quinta y la última unidad producida por la compañía SKELETONICS Inc. hasta el año 2019, cuenta con un tamaño de 2,8 m y un peso de 40 kg, este modelo se presentó en el año 2017 con un costo de 10.000.000 JPY (aproximadamente USD 93.000), la principal diferencia con su antecesor es las manos, ya que cada dedo tiene un servomotor que permite movilidad en cada dedo y la estructura es mucho más parecido a la mano humana, como se observa en la figura 38.



Figura 38. Arrive Skeletonics. Fuente:[6].

El exoesqueleto Arrive tiene mejoras en sus manos con respecto a sus antecesores, ya que el movimiento de flexo extensión de los dedos lo realiza mediante servomotores, además incorpora una placa que asimila la palma de una persona, se puede observar en la figura 39.



Figura 39. Partes de la mano correspondiente al exoesqueleto Arrive Skeletonics. Fuente: [19].

El mando del movimiento de flexo extensión de los dedos cambia, ya que se lo realiza mediante botones para activar los servidores, reduciendo el tamaño de la estructura, se puede observar en la figura 40.

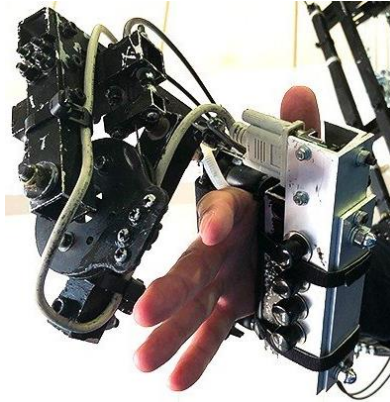


Figura 40. Mando de manos de exoesqueleto Arrive. Fuente: [20].

Las extremidades inferiores también tienen un cambio, ya que es el primer exoesqueleto en donde el muslo se une con la pierna formando una rodilla, se puede observar en la figura 41 que la longitud del muslo se puede ajustar.



Figura 41. Extremidades inferiores de exoesqueleto Arrive. Fuente: [19].

#### 5.4 Exoesqueleto mecánico para conceptualizar - Selección de la mejor alternativa

De acuerdo con las características de las diferentes alternativas se considera las ventajas y desventajas de los modelos de exoesqueletos mecánicos, a continuación, se procede a realizar una ponderación de los mismo, con el objetivo de obtener resultados globales suficientemente significativos, con el fin de obtener mejores resultados se analizará por separado las extremidades inferiores, extremidades superiores, manos, tronco y cabeza del exoesqueleto. Los criterios para evaluar son: movilidad, complejidad, ergonomía, similitud, construcción y costos.

##### 5.4.1 Análisis comparativo de cada uno de los modelos existentes para un estudio previo

Para los 5 modelos de exoesqueletos de la compañía SKELETONICS se procede a realizar ponderaciones con los criterios de movilidad, tiempo de funcionamiento, apariencia humanoide y complejidad con la finalidad de encontrar la mejor alternativa para nuestro diseño.

En el diseño de máquinas y mecanismos la gran preocupación es asegurarse que una vez fabricado cumpla los movimientos establecidos teóricamente. Los diferentes modelos de exoesqueletos presentan diferentes grados de libertad, por lo cual se busca un modelo que sea más funcional y tenga mayor movilidad. En la tabla 4 se define si la movilidad es buena, muy buena y excelente.

*Tabla 4. Valores establecidos de acuerdo con la movilidad de cada exoesqueleto. Fuente: [Autores].*

Criterio de ponderación: Movilidad de acuerdo con los grados de libertad		
	Grados de libertad	Puntuación
Buena	1 – 30	1
Muy buena	31 – 45	3
Excelente	46 o más	5

El tiempo de funcionamiento determinado para cada modelo está establecido de acuerdo con las mejoras que presenta cada exoesqueleto reduciendo significativamente el peso de estos y mejorando enormemente las articulaciones de funcionamiento permitiendo al usuario un manejo más cómodo como ergonómico, en la tabla 5, se especifica si el tiempo de funcionamiento es bajo, medio y alto, los tiempos para cada exoesqueleto está disponible en la página oficial de SKELETONICS.

*Tabla 5. Valores establecidos de acuerdo con el tiempo de funcionamiento de cada exoesqueleto. Fuente: [Autores].*

Criterio de ponderación: Tiempo de funcionamiento		
	Tiempo de funcionamiento [min]	Puntuación
Bajo	0 – 5	1
Bueno	6 – 30	3
Alto	31 o más	5

Para la comparativa establecida en la tabla 6, se considera al exoesqueleto que contenga la apariencia de un ser humano es decir una característica general: cabeza, tronco, extremidades superiores y extremidades inferiores. Ya que cada modelo presenta avances a los modelos anteriores, para este estudio es necesario establecer un diseño próximo a la del ser humano, con el paso de los años cada modelo ha sido modificado para establecer una similitud a la del cuerpo humano el cual también será un argumento para esta evaluación.

Tabla 6. Valores establecidos de acuerdo con la apariencia humanoide de cada exoesqueleto. Fuente: [Autores].

Criterio de ponderación: Apariencia humanoide de exoesqueleto		
	Apariencia	Puntuación
Bajo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extremidades: inferior y superior</li> <li>• Tronco: tórax</li> </ul>	1
Bueno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extremidades: inferior y superior</li> <li>• Tronco: tórax, columna</li> <li>• Mano</li> </ul>	3
Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extremidades: inferiores y superiores</li> <li>• Tronco: tórax, columna</li> <li>• Mano: 5 dedos</li> <li>• Cabeza</li> </ul>	5

En cada modelo presentado por la empresa SKELETONICS tiene un avance específico, de acuerdo con el anterior, es decir, se presenta un avance en la movilidad en las diferentes extremidades, siendo estructuras más complejas de diseñar, también resulta complicado hacer una desagregación tecnológica si no existe mucha información de los diferentes mecanismos, por lo cual después de haber realizado un estudio de los 5 modelos se procede a dar el grado de dificultad de los diferentes modelos, en la tabla 7 se establece el puntaje siendo 5 al de menor dificultad, 3 al de dificultad media y 1 al de mayor dificultad.

Tabla 7. Valores establecidos de acuerdo con la complejidad de diseño. Fuente: [Autores].

Criterio de ponderación: De acuerdo con la complejidad de diseño	
	Puntuación
Bajo	5
Medio	3
Alto	1

En la tabla 8 se muestra los resultados de las ponderaciones correspondientes a cada criterio presentando anteriormente, los modelos con la mayor puntuación ayudaran a nuestro estudio y diseño posterior.

Tabla 8. Resultados de las ponderaciones establecidas para cada modelo. Fuente: [Autores].

Sumatoria de los criterios de ponderación													
Tipo de Exoesqueleto	Movilidad			Tiempo de funcionamiento			Apariencia humanoide			Complejidad de diseño			Total
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	
Unidad 01	1			1			1			5			8
Remake	1			1			1			5			8
Practice		3			3			3		5			14
Alive			5			5			5		3		18
Arrive			5			5			5			1	16

El exoesqueleto que ha tenido mayor puntuación con los criterios establecidos es el modelo Alive, este será nuestro modelo base para el diseño, pero a continuación se procederá a realizar ponderaciones de las diferentes partes de cada exoesqueleto con la finalidad de obtener mejoras en nuestro diseño.

## 5.4.2 Análisis comparativo de cada extremidad

### a) Extremidades superiores

Tabla 9. Valores de movilidad de extremidades superiores. Fuente: [Autores].

Criterio de ponderación: Movilidad de acuerdo con los grados de libertad		
	Grados de libertad	Puntuación
Buena	2	1
Muy buena	4	3
Excelente	5	5

Tabla 10. Valores establecidos de acuerdo con la complejidad de extremidades superiores. Fuente: [Autores].

Criterio de ponderación: Complejidad de diseño	
	Puntuación
Bajo	5

Medio	3
Alto	1

Tabla 11. Valores establecidos de acuerdo con la apariencia humanoide de extremidades superiores. Fuente: [Autores].

Criterio de ponderación: Apariencia humanoide de exoesqueleto		
	Apariencia	Puntuación
Bajo	-Eslabones: brazo, antebrazo. -Articulaciones: Codo	1
Bueno	-Eslabones: brazo, antebrazo. -Articulaciones: Codo, hombro	3
Alto	-Eslabones: brazo, antebrazo. -Articulaciones: Codo, hombro muñeca.	5

Tabla 12. Resultados de las ponderaciones de extremidades superiores. Fuente: [Autores].

Ponderación de Extremidades Superiores				
Modelo	Movilidad	Complejidad	Apariencia	Total
Unidad 01	1	5	1	7
Remake	1	5	1	7
Practice	3	3	3	9
Alive	5	1	5	11
Arrive	5	1	5	11

Las extremidades superiores del exoesqueleto Alive y Arrive son las mismas por esta razón se obtiene resultados iguales, se mantendrá el diseño del exoesqueleto Alive.

#### b) Extremidades inferiores

Si se realiza las ponderaciones de las extremidades inferiores se tendrá los mismos resultados ya que todas las estructuras tienen la misma movilidad, grado de dificultad y apariencia, por lo cual se procederá a elegir las extremidades inferiores del exoesqueleto Arrive ya que tiene mejor diseño y estructura, estos criterios no se pueden evaluar, es a criterio personal.



c) **Manos del exoesqueleto**

Tabla 13: Valores de movilidad de mano. Fuente: [Autores].

Criterio de ponderación: Movilidad de acuerdo con los grados de libertad		
	Grados de libertad	Puntuación
Buena	2	1
Muy buena	3	3
Excelente	5	5

Tabla 14. Valores establecidos de acuerdo con la complejidad de mano. Fuente: [Autores].

Criterio de ponderación: De acuerdo con la complejidad de diseño	
	Puntuación
Bajo	5
Medio	3
Alto	1

Tabla 15. Valores establecidos de acuerdo con la apariencia humanoide de mano. Fuente: [Autores].

Criterio de ponderación: Apariencia humanoide de exoesqueleto		
	Apariencia	Puntuación
Bajo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falanges: Distal, medios, proximal</li> <li>• # dedos: 4</li> </ul>	1
Bueno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falanges: Distal, medios, proximal, metacarpiano</li> <li>• # dedos: 5</li> <li>• Articulaciones</li> </ul>	3
Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falanges: Distal, medios, proximal, metacarpiano</li> <li>• # dedos: 5</li> <li>• Articulaciones</li> <li>• Palma</li> </ul>	5

Tabla 16. Resultados de ponderaciones de manos. Fuente: [Autores].

Ponderación de manos				
Modelo	Movilidad	Complejidad	Apariencia	Total
Unidad 01	1	5	1	9
Remake	1	5	1	9
Practice	1	5	1	9
Alive	3	3	5	11
Arrive	5	1	5	11

La mano del exoesqueleto Arrive esta accionada mediante servomotores y lo que se busca es un diseño netamente mecánico, así que se elige la mano del exoesqueleto Alive.

#### d) Cabeza del exoesqueleto

Los tres últimos exoesqueletos mecánicos de la compañía SKELETONICS son los que tienen cabeza, pero el modelo Active tiene una cabeza sin movilidad, por lo cual se decide realizar la cabeza del modelo Alive y Arrive ya que esta cabeza de los dos es la misma, no tiene ninguna modificación.

#### e) Tronco del exoesqueleto

La columna es una estructura fija, que no presenta grados de libertad, es importante que el exoesqueleto tenga columna, ya que soportaría parte de carga y con eso se logra tener mayor tiempo de funcionamiento del exoesqueleto. Los tres últimos modelos de exoesqueletos son los que tienen columna, la estructura del tronco es la misma para los tres, por lo cual se decide mantener el tronco del exoesqueleto Alive.

Tabla 17. Resumen de resultados de ponderaciones. Fuente: [Autores].

Resumen de resultados ponderación	
Partes	Exoesqueleto
Extremidades inferiores	Arrive
Extremidades superiores	Alive

Manos	Alive
Tronco	Alive
Cabeza	Alive

---

De acuerdo con la ponderación obtenida se ha seleccionado que las extremidades superiores, manos, tronco y cabeza serán del exoesqueleto Alive, teniendo la mayor parte del diseño, las extremidades inferiores del modelo Arrive.



Figura 42 Skeletonics Alive. Fuente: [7].

En la figura 2 se observa el exoesqueleto Alive que tiene la mayor parte del diseño, mismo que será utilizado para desarrollar un proceso de análisis y síntesis que permita generar el conocimiento necesario a fin de poder establecer un diseño adaptado a la realidad ecuatoriana, es decir se emprenderá un proceso de desagregación tecnológica.

## **6 Analizar la cinemática y dinámica del mecanismo a desarrollar**

Para desarrollar la cinemática y la dinámica es necesario conceptualizar y desarrollar temas de la biomecánica del cuerpo humano, medidas del exoesqueleto, método cinemático y software de simulación a utilizar, una vez revisado todos estos temas se procesará a realizar la cinemática del exoesqueleto.

## 6.1 Biomecánica del cuerpo humano

La biomecánica es el estudio de la aplicación de las leyes de la mecánica a la estructura y el movimiento de los seres vivos. Es una disciplina que se encarga del estudio del cuerpo, como si este se tratara simplemente de un sistema mecánico: todas las partes del cuerpo se comparan con estructuras mecánicas y se estudian como tales. Se pueden determinar las siguientes analogías [21]:

- Huesos: palancas, elementos estructurales.
- Masa muscular: volúmenes y masas.
- Articulaciones: cojinetes y superficies articuladas.
- Tejidos de recubrimiento de las articulaciones: lubricantes.
- Músculos: motores, muelles.
- Nervios: mecanismos de control y retroalimentación.
- Órganos: suministro de energía.
- Tendones: cuerdas.
- Tejidos: muelles.
- Cavidades corporales: globos.

El objetivo principal de la biomecánica es estudiar la forma en que el organismo ejerce fuerza para generar movimiento. Esta disciplina se basa fundamentalmente en la anatomía, las matemáticas y la física. Las disciplinas afines son la antropometría, la fisiología del trabajo y la cinemática [21].

El movimiento del cuerpo humano se realiza en tres planos: el plano transversal, que divide al cuerpo en dos mitades, inferior o caudal y superior o craneal; el plano coronal, que divide al cuerpo en dos mitades, trasera o dorsal y delantera o ventral; y el plano sagital, que divide al cuerpo en dos mitades, izquierda y derecha, cada uno de estos planos se observa en la figura 43.

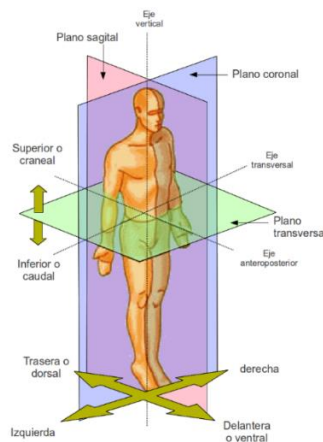


Figura 43. Movimientos presentes en los planos correspondientes al cuerpo humano. Fuente: [22].

Los movimientos corporales básicos se definen en relación con dichos ejes y planos los cuales serán presentados a continuación:

## 6.1.1 Biomecánica de las extremidades inferiores

### 6.1.1.1 Biomecánica de la marcha

#### a) Cicló de marcha

El ciclo de marcha comprende el movimiento entre el contacto del talón de un pie hasta realizar el nuevo contacto del talón de ese mismo pie y está compuesto por dos pasos (derecho e izquierdo), en el ciclo completo de marcha cada pierna pasa por una fase de apoyo, durante este tiempo el pie tiene un contacto total o parcial con el suelo, seguida por una fase de oscilación, en el cual el pie se encuentra en el aire. En la figura 44 se puede observar el ciclo de marcha, en el cual la fase de apoyo corresponde al 60% y la fase oscilación corresponde al 40%.

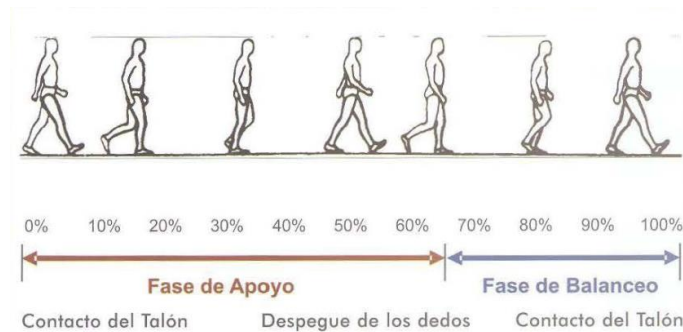


Figura 44. Ciclo de marcha. Fuente: [23].

#### b) Biomecánica de la cadera en la marcha

La cadera es una articulación formada por una bola y una cavidad permitiendo realizar movimientos triaxiales triaxial, en la figura 45 se puede observar los ángulos que forma la cadera en el ciclo de marcha, la posición de inicio es cuando el talón está en contacto con el suelo, en donde la cadera forma un ángulo de 30°.

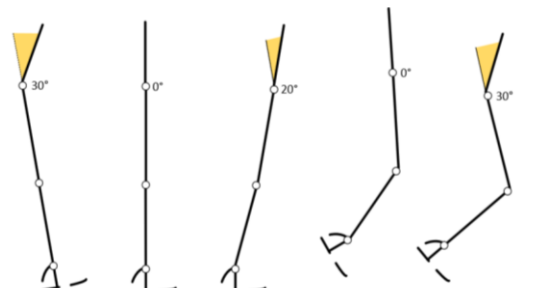


Figura 2.2: Articulación de la cadera en la marcha humana.  
Fuente: Autores.

Figura 45. Articulación de la cadera en la marcha. Fuente: [24].

### c) Biomecánica de la rodilla en la marcha

La rodilla es la articulación más grande y compleja del esqueleto humano, es una estructura biarticulada y soporta todo el peso del cuerpo en posición de pie, la rodilla realiza un movimiento simultaneo en tres planos, pero el movimiento en el plano sagital es grande que representa todo el movimiento. En la figura 46 se puede observar los ángulos que se forman la rodilla en la marcha.

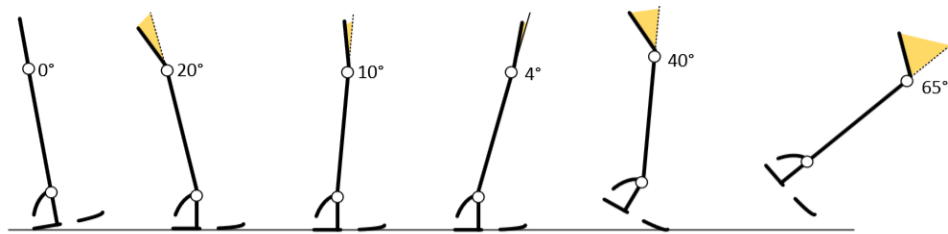


Figura 2.3: Articulación de la rodilla en la marcha humana.  
Fuente: Autores.

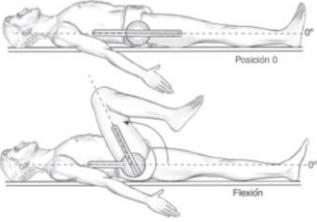
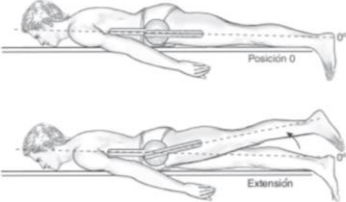
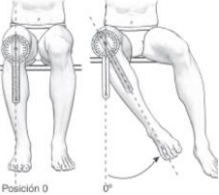
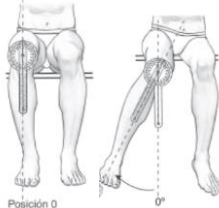
Figura 46. Articulación de la rodilla en la marcha humana. Fuente: [24].

#### 6.1.1.2 Biomecánica de la cadera

La cadera presenta ángulos respecto a los movimientos a realizar con 3 GdL, los cuales realizan funciones específicas como se puede observar en la tabla 18.

Tabla 18. Descripción de movimientos y ángulos permitidos en la cadera para la marcha humana. Fuente: [Autores].

Movimiento	Descripción	Rangos de movimientos	Ilustración
Abducción	Se realiza la abducción de la cadera cuando se mantiene ambas espinas ilíacas anterosuperiores al mismo nivel.	<ul style="list-style-type: none"> <li>0 - 90°</li> </ul>	
Aducción	Se realiza la aducción de la cadera que se examina cuando se lleva la otra cadera a la abducción, manteniendo ambas espinas ilíacas anterosuperiores al mismo nivel.	<ul style="list-style-type: none"> <li>0 - 30°</li> </ul>	

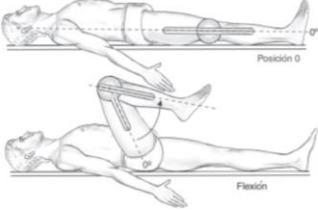
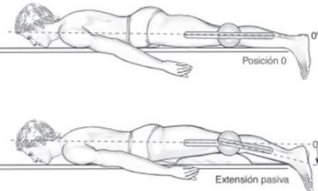
<i>Flexión</i>	Se efectúa la flexión de la cadera con la rodilla en máxima flexión para relajar los isquiosurales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0°-90°</li> <li>• 0°-120°</li> <li>• 0°-140°</li> </ul>	
<i>Extensión</i>	Se practica la extensión de la cadera con la rodilla en extensión.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0°- 30°</li> </ul>	
<i>Rotación externa</i>	Se efectúa la rotación externa de la cadera llevando la pierna y el pie hacia adentro.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0° - 60°</li> </ul>	
<i>Rotación interna</i>	Se efectúa la rotación interna de la cadera llevando la pierna y el pie hacia fuera.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0° - 30°</li> </ul>	

### 6.1.1.3 Biomecánica de la rodilla

La rodilla es una de las articulaciones más importantes en la extremidad inferior, debido a su accionar es posible la marcha humana y sin embargo presenta 1 GdL como se observa en la tabla 19.

Tabla 19. Descripción de movimientos que permite la rodilla para la marcha humana. Fuente: [Autores].

<i>Movimiento</i>	<i>Descripción</i>	<i>Rangos de movimientos</i>	<i>Ilustración</i>
-------------------	--------------------	------------------------------	--------------------

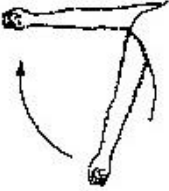

<i>Flexión</i>	Se procede a efectuar la flexión de la rodilla con la cadera en flexión máxima para relajar el cuádriceps.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0° – 150°</li> <li>• 0° – 135°</li> </ul>	
<i>Extensión</i>	No es posible la extensión activa de la rodilla, ya que su valor normal es 0, por esa razón se evalúa la extensión pasiva.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extensión activa: 0°</li> <li>• Extensión pasiva: 0 – 10°</li> </ul>	

## 6.1.2 Biomecánica de la extremidad superior

### 6.1.2.1 Biomecánica del hombro

El hombro presenta 3 GdL sin tomar en cuenta la movilidad de la cintura escapular, por lo tanto para este caso se consideraría 1 GdL con los movimientos de flexión – extensión [25], como se puede observar en la tabla 20.

Tabla 20. Descripción de movimientos y ángulos presentes en el hombro. Fuente: [Autores].

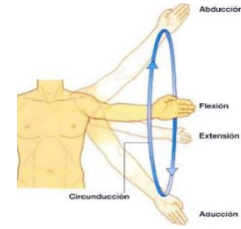
<i>Movimiento</i>	<i>Descripción</i>	<i>Rangos de movimientos</i>	<i>Ilustración</i>
<i>Abducción o alejamiento</i>	Movimiento articular que desplaza el segmento corporal alejándolo del plano medial sagital del cuerpo (separa del cuerpo).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abducción: 180°</li> <li>• Extensión: 45°</li> <li>• Abducción horizontal: 45°</li> </ul>	 <p data-bbox="1149 1434 1268 1461"><b>abducción</b></p>
<i>Aducción o acercamiento</i>	Movimiento articular que desplaza el segmento corporal acercándolo al plano medial sagital del cuerpo (acercándolo al cuerpo).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aducción: 30°</li> <li>• Flexión: 180°</li> </ul>	 <p data-bbox="1157 1707 1268 1728"><b>aducción</b></p>



*Circunducción*

Asociación de movimientos simples y como consecuencia de la una sucesión de movimientos flexión – extensión y abducción – aducción.

- Rotación externa: 90°
- Rotación interna: 70°



**6.1.2.2 Biomecánica del codo**

El codo presenta 2 GdL correspondientes a los movimientos de flexión – extensión además de los movimientos de pronación – supinación [25], como se puede observar en la tabla 21.



*Tabla 21. Descripción de movimientos y ángulos presentes en el codo. Fuente: [Autores].*

<i>Movimiento</i>	<i>Descripción</i>	<i>Rangos de movimientos</i>	<i>Ilustración</i>
<i>Flexión</i>	Movimiento articular que desplaza el segmento corporal hacia atrás del plano coronal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexión: 0-145°</li> <li>• 0- 170°</li> </ul>	
<i>Extensión</i>	Movimiento articular que desplace el segmento corporal hacia delante del plano coronal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extensión: 145-0°</li> <li>• 170-0</li> </ul>	
<i>Supinación</i>	Movimiento del antebrazo alrededor de su eje longitudinal de manera que la palma quede orientada hacia adelante.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotación externa: 0° - 90°</li> </ul>	
<i>Pronación</i>	Movimiento del antebrazo alrededor de su eje longitudinal de manera que la palma quede orientada hacia atrás.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotación interna: 0° - 90°</li> </ul>	

### 6.1.2.3 Biomecánica muñeca

La muñeca presenta 2 GdL correspondientes a los movimientos de flexión – extensión [25], como se puede observar en la tabla 22.

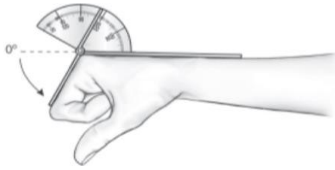
Tabla 22. Descripción de movimientos de la muñeca y ángulos presentes en la biomecánica de esta articulación. Fuente: [Autores].

Movimiento	Descripción	Rangos de movimientos	Ilustración
<i>Flexión</i>	Movimiento articular que desplaza el segmento corporal hacia abajo en dirección del eje transversal (inferior o caudal).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flexión: 90°</li> </ul>	 <p>Flexión</p>
<i>Extensión</i>	Movimiento articular que desplaza el segmento corporal hacia arriba en dirección del eje transversal (superior o craneal).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Extensión: 70°</li> </ul>	 <p>Extensión</p>

### 6.1.3 Biomecánica mano

En los movimientos de la mano se presentan diferentes movimientos aplicados a cada articulación presentes en los dedos, los cuales realizan funciones específicas como se puede observar en la tabla 23.

Tabla 23.. Descripción de movimientos y ángulos de la mano presentes para cada articulación. Fuente: [Autores].

Movimiento	Descripción	Rangos de movimientos	Ilustración
<i>Flexión de metacarpofalángicas</i>	Movimiento de flexión de la articulación metacarpofalángica. Flexión metacarpofalángica del dedo índice a partir de la posición 0.	90°	

<i>Extensión de metacarpofalángicas</i>	Movimiento de extensión de la articulación metacarpofalángica. Extensión metacarpofalángica del dedo índice a partir de la posición 0.	20° - 30°	
<i>Flexión interfalángicas proximales</i>	Flexión de la articulación interfalángicas proximales del dedo índice a partir de la posición 0.	120°	
<i>Flexión interfalángicas distales</i>	Flexión interfalángicas distal del dedo índice a partir de la posición 0.	80°	
<i>Abducción de los dedos</i>	Para los dedos de la mano, la línea media corresponde a la línea media del tercer dedo. Cuando los dedos se acercan a este eje, se denominan aducción y cuando se alejan abducción.	20° - 25°	
<i>Aducción de los dedos</i>		20° - 25°	
<i>Flexión de metacarpofalángica del pulgar</i>	Flexión metacarpofalángica del dedo pulgar a partir de la posición 0.	60° - 70°	

<i>Flexión interfalángica del pulgar</i>	Se efectúa la flexión interfalángica del pulgar. Flexión del pulgar a partir de la posición 0.	90°	
<i>Extensión de metacarpofalángica del pulgar</i>	Se efectúa la flexión interfalángica del pulgar. Extensión del pulgar a partir de la posición 0.	60° - 70°	
<i>Extensión interfalángica del pulgar</i>	Se efectúa la extensión interfalángica del pulgar. Extensión del pulgar a partir de la posición 0.	90°	
<i>Abducción del pulgar</i>	Abducción – aducción del pulgar a partir de la posición 0.	40° - 50°	
<i>Aducción del pulgar</i>		40° - 50°	

**6.1.4 Biomecánica de la cabeza**

La cabeza en su accionar presenta 3 GdL, en la tabla 3 se muestran los movimientos y ángulos correspondientes.

Tabla 24. Descripción de movimientos y ángulos presentes en la cabeza. Fuente: [Autores].

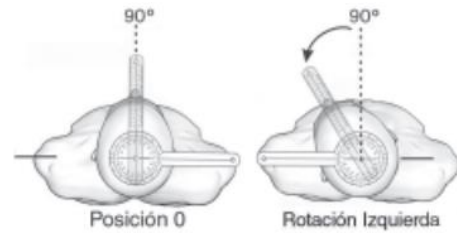
Movimiento	Descripción	Rangos de movimientos	Ilustración
<i>Flexión</i>	Movimiento articular que genera el segmento corporal sobre el plano medial sagital del cuerpo (acercándolo al cuerpo).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 – 35°/45°</li> <li>• 0 – 45°</li> </ul>	
<i>Extensión</i>	Movimiento articular que genera el segmento corporal sobre el plano medial sagital del cuerpo (alejándolo del cuerpo).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 – 35°/45°</li> <li>• 0 – 45°</li> </ul>	
<i>Inclinación lateral derecha</i>	Movimiento articular que genera el segmento corporal sobre el plano medial coronal del cuerpo (acercándolo al hombro derecho).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 – 45°</li> </ul>	
<i>Inclinación lateral izquierda</i>	Movimiento articular que genera el segmento corporal sobre el plano medial coronal del cuerpo (acercándolo al hombro izquierdo).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 – 45°</li> </ul>	
<i>Rotación derecha</i>	Movimiento articular que genera el segmento corporal sobre los planos medial coronal y plano sagital del cuerpo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 – 60°/80°</li> </ul>	

(acercandolo al hombro derecho).

Movimiento articular que genera el segmento corporal sobre los planos medial coronal y plano sagital del cuerpo (acercandolo al hombro izquierdo).

*Rotación izquierda*

- 0 – 60°/80°



## 6.2 Medidas del exoesqueleto

### 6.2.1 Medidas antropométrías del cuerpo humano

Para determinar las dimensiones del exoesqueleto mecánico nos basamos en un método de medición antropométrico en función de la altura, propuesto por (Drillis y Contini,1966), en la figura 34 se puede observar las relaciones que nos permiten dimensionar las partes del cuerpo humano en función de la altura.

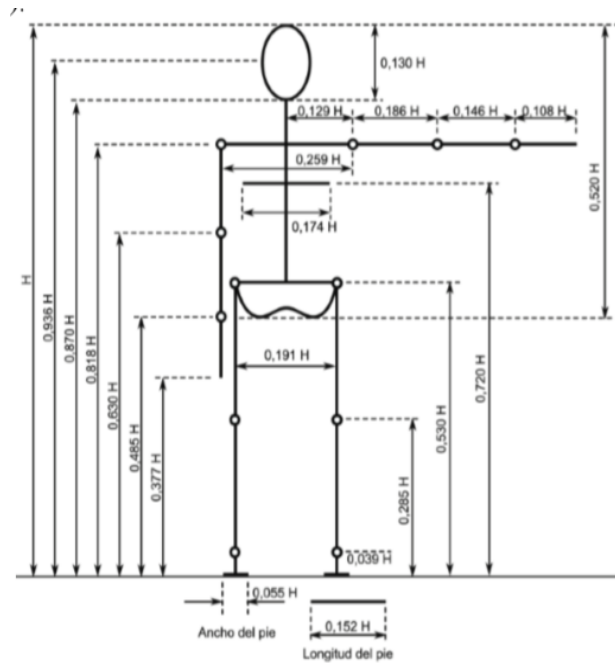


Figura 47. Segmentos cuerpo humano en función de la altura. Fuente: [26].

Los 3 modelos más recientes de exoesqueletos mecánicos tienen una altura de 2.80 m, por lo cual se fija esta altura para nuestro diseño, de acuerdo con las relaciones antropométricas presentadas en la figura 47, se determina las longitudes de cada extremidad del exoesqueleto, estas medidas se presentan en la tabla 48.

Figura 48. Longitudes establecidas por dimensionamiento. Fuente: [Autores].

Parte	Material	Medidas – Longitud [cm]
Cabeza	Aluminio	36
Cuello	Aluminio	14
Hombro	Aluminio	36.12
Brazo	Aluminio	52
Antebrazo	Aluminio	41
Mano	Aluminio	30.24
Columna	Aluminio	80.64
Cadera	Aluminio	45
Muslo	Aluminio	47
Pierna	Aluminio	101.4
Pie	Aluminio	30

Existen partes del exoesqueleto mecánico que se deben ajustar a las medidas del cuerpo humano, estas partes son: pie, muslo, cadera y brazo. Por lo cual estas medidas sean tomando de una persona masculino con una estatura de 167 cm, que es una altura promedio en la ciudad de Cuenca. En la figura 49 se tiene un bosquejo en inventor de las medidas reales que debe tener el exoesqueleto mecánico.

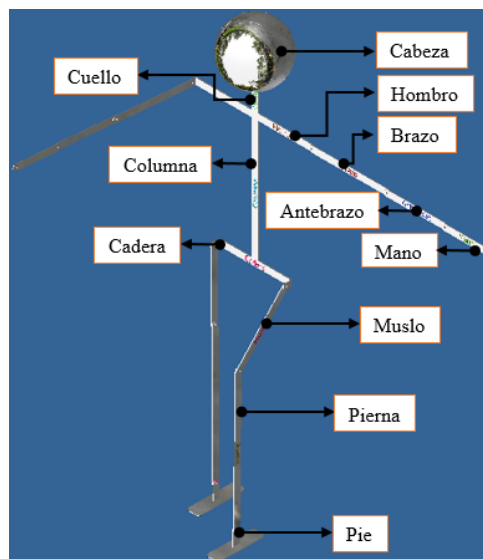


Figura 49. Bosquejo dimensional del exoesqueleto mecánico. Fuente: [Autores].

Para determinar las medidas de cada eslabón de la estructura, se procede a insertar imágenes de las diferentes partes del exoesqueleto en el software AutoCAD, fijando a escala con respecto a las medidas antropométricas de la tabla 48. En el capítulo 2 se procederá a realizar un análisis cinemático para garantizar el correcto funcionamiento de la estructura con estas medidas.

### 6.2.2 Medidas de las extremidades inferiores

Las extremidades inferiores del exoesqueleto están formadas por tres eslabones que conforman el muslo, pierna y pie, se utiliza las medidas antropométricas de la 50.

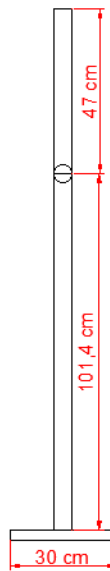


Figura 50. Medidas de las extremidades inferiores. Fuente: [Autores].

### 6.2.3 Medidas de la cadera

Se fija la medida de la cadera de la persona, que es de 47 cm como referencia en AutoCAD, con la finalidad de hallar distancias y ángulos de la estructura. Todas las medidas están en cm.

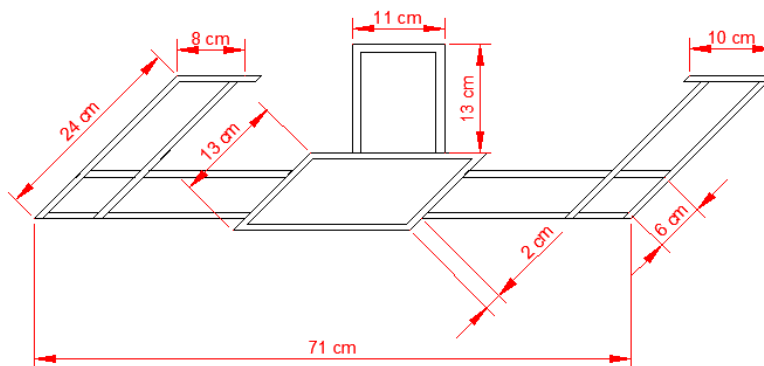


Figura 51. Medidas de la cadera del exoesqueleto mecánico. Fuente: [Autores].



#### 6.2.4 Medidas de las extremidades superiores

Para determinar las medidas del brazo y antebrazo del exoesqueleto utilizamos el software AutoCAD, se toma como referencia la medida antropométrica de la tabla 48, para determinar distancias y ángulos de las estructuras. Todas las medidas están en cm.

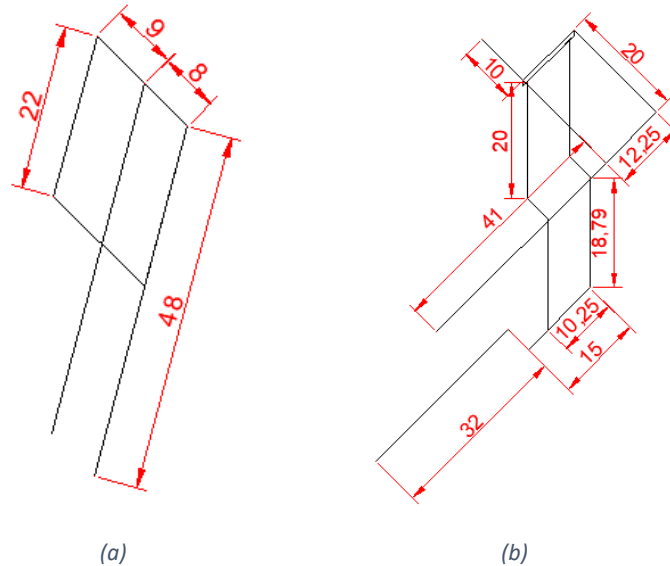


Figura 52. (a) Medidas del brazo; (b) Medidas del antebrazo. Fuente: [Autores].

#### 6.2.5 Medidas de la mano

Se fija la medida antropométrica de la mano de la tabla 48 como referencia en AutoCAD, con el fin de hallar la geometría de los diferentes eslabones que forman los dedos. Las medidas de los 5 dedos serán del mismo tamaño, ya que, si se quiere asemejar al tamaño proporcional de una persona, se tendría 30 eslabones diferentes.

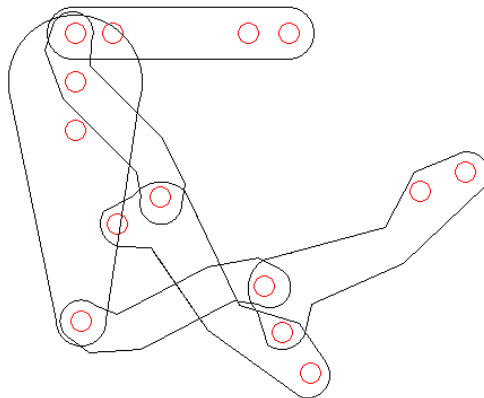


Figura 53. Dedos del exoesqueleto Alive. Fuente: [Autores].

En la figura 54 se observan las posiciones de los dedos del exoesqueleto Alive, está formado por 5 eslabones que ayudan a realizar el movimiento de extensión y flexión.

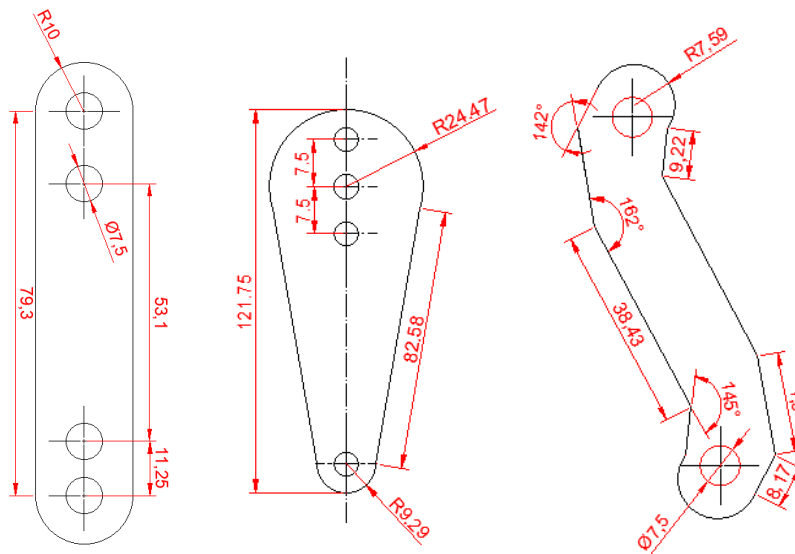


Figura 54. Medidas de los eslabones de los dedos. Fuente: [Autores].

En la figura 55 se presenta las medidas de los 3 eslabones que forman los dedos del exoesqueleto, todas las medidas están en mm.

En la figura 56 se presenta las medidas de la palma del exoesqueleto Alive, la función de esta estructura es de sostener a los dedos.

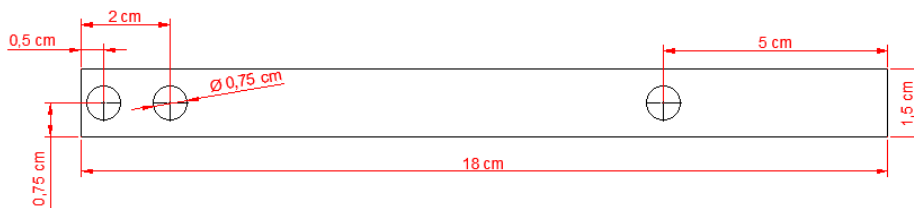


Figura 55. Medidas de la palma. Fuente: [Autores].

### 6.2.6 Medidas del tronco

El tronco del exoesqueleto está formado por dos partes que corresponden a la columna y al tórax, se ocupa la media antropométrica de la Columba de la tabla 48 como referencia, para dimensionar los eslabones del tronco, se puede observar en las figuras 57 y 48.

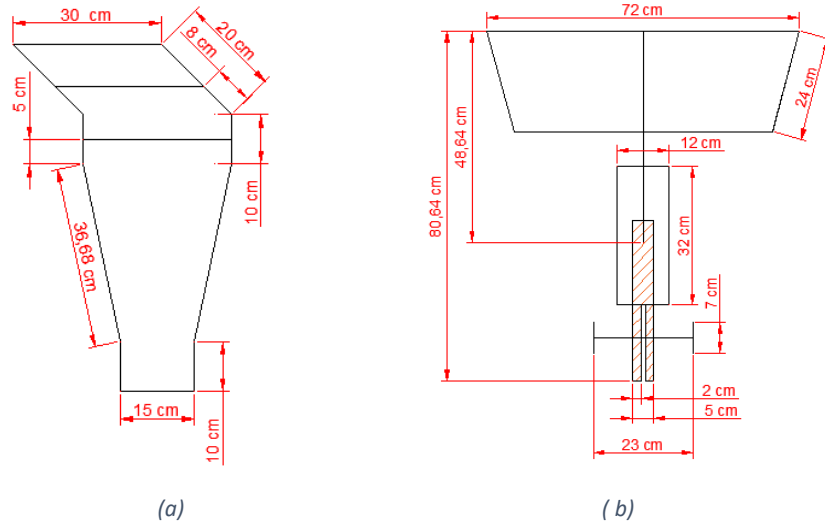


Figura 56. (a) Medidas del tórax; (b) Medidas de la columna. Fuente: [Autores].

### 6.2.7 Medidas de la cabeza

Se toma como referencia el ancho de la cabeza de la persona para dimensionar los eslabones restantes en AutoCAD, se utilizó la medida antropométrica del cuello de la tabla 48, esta estructura permitirá la movilidad de la cabeza del exoesqueleto.

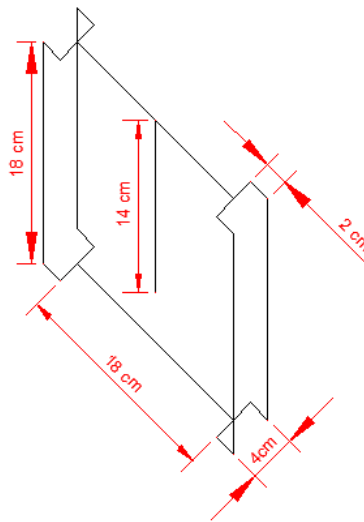


Figura 57. Medidas de la estructura de la cabeza del exoesqueleto. Fuente: [Autores].

### 6.3 Selección del material de la estructura

Los exoesqueletos de la empresa skeletalics desde el primer modelo hasta el más reciente ocupan aluminio para la estructura, también en trabajos sobre diseños de exoesqueletos para rehabilitación

realizan ponderaciones entre diferentes materiales con criterios de alta resistencia, menor densidad, bajo costo y fácil de mecanizar, siendo electo el aluminio por cumplir con los criterios establecidos.

En el Ecuador la empresa CEDAL (Corporación Ecuatoriana de Aluminio S.A) ofrece aluminios de la serie 6000, se puede observar en la tabla 60.

Aleación A.A.	Espesor pulgadas	Dureza (HWB) mín.	Webster B normal	Resist. a Fluencia (Kg /mm <sup>2</sup> )		Rest. a tensión (Kg /mm <sup>2</sup> )		Elongación (% en 5 cm)	
				mínimo	normal	mínimo	normal		
6063-T1	Todos	4	6	5.6	8.5	11.2	16	14	
	T4	<0.5"	5	7	6.2	8.8	12.9	16.7	14
	T5% (1)	<0.5" o más	4	6	6	8.5	12.5	16.1	14
	T5	<0.5"	8	10	11.2	16.2	15.5	19.7	8
	T6	<0.5" o más	7	9	10.7	14.4	14.8	18.6	8
	<0.5"	10	13	17.6	21.4	21.1	23.6	8	
	<0.5" o más	9	12	17.6	19.3	21	22.5	8	
6061-T1	Todos	8	11	11	14.1	18	24	15	
	T1	Todos	8	11	11.2	14.8	18.3	24.5	14
	T5	Todos	12	14	20.9	26	24.5	30	8
	T6	Todos	14	16	24.5	28.1	26.5	31.6	9
6005-T1	Todos	8	9	8.2	13	16.3	23	15	
	T4	Todos	9	10	10.5	14	17.5	24	15
	T5	Todos	10	12	24	27.5	26	29.5	8
	T6	Todos	14	14	24.5	28.5	26.5	30	8
6351-T1	Todos	9	10	9.5	16	18.3	20	16	
	T4	Todos	9	11	13.3	16.5	22.4	25	16
	T5	Todos	12	14	24.5	30	26.5	31.7	10
	T6	Todos	15	16	26	30.2	29.6	34.4	10

Figura 58. Selección de Aluminio de la Empresa CEDAL. Fuente: [27].

El aluminio 6061 es más resistencia que los otros aluminios, es utilizado especialmente para aplicaciones estructurales, teniendo una densidad de  $2,70 \text{ g/cm}^3$ .

## 6.4 Método cinemático

La cinemática es la parte de la física que estudia el movimiento de los cuerpos sin tomar en cuenta las fuerzas que lo producen, esta estudia la posición, velocidad y aceleración del sistema [28].

Para el diseño de nuestro exoesqueleto es fundamental el estudio cinemático en cuanto al conocimiento de cada una de sus articulaciones presentes en el mismo y así tener las limitaciones que este tendrá debido a su funcionamiento y principalmente para su construcción considerando que estará conformado por elementos completamente mecánicos.

### 6.4.1 Descripción del movimiento

Una partícula se encuentra en movimiento (o reposo) de acuerdo con un punto de referencia, que generalmente es el punto de origen en un sistema de coordenadas como se observa en la figura 61, [25].

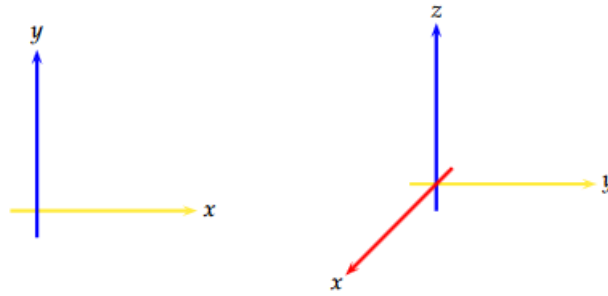


Figura 59. Sistemas coordenados para referencias de los elementos. Fuente: [25].

Para dar solución a un modelo cinemático es fundamental el planteamiento de relaciones geométricas entre los elementos existentes en el sistema, por lo cual, es necesario la ubicación de un sistema de coordenadas principal para poder establecer relaciones con el resto de elementos que conforman la cadena cinemática [29].

Para comprender cinemáticamente el funcionamiento del cuerpo humano, se emplea un modelo simplificado equivalente a una parte de la extremidad inferior (pierna de una persona), por la cual se puede aplicar el modelo cinemático directo con la finalidad de determinar la posición y orientación del extremo final del robot (efector final), en base a un sistema de coordenadas que se emplea como referencia (coordenadas de cada uno de las articulaciones), sin importar si estas son prismáticas o rotacionales [30]

Al llevar una de las piernas a un conjunto simplificado de elementos (eslabones), donde las variables del sistema se reducen a longitudes y ángulos, se puede obtener la configuración del exoesqueleto para alcanzar una posición y orientación determinadas como se muestra en la figura 62. Sin embargo, aunque el miembro inferior y el exoesqueleto compartan las características dinámicas, estos no poseen el mismo análisis cinemático final [23].

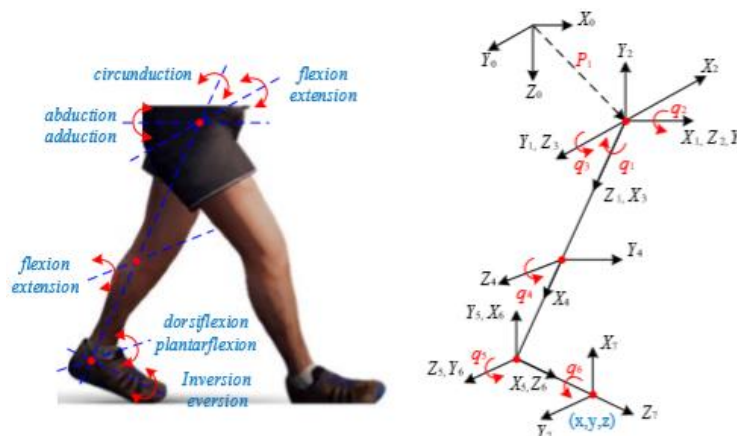


Figura 60. Conjunto simplificado; vectores y rotaciones del miembro inferior, donde,  $q$  es el valor del ángulo entre dos articulaciones y  $x, y, z$  son los ejes coordenados de cada articulación. Fuente: [23].

## **6.4.2 Cinemática Directa**

La cinemática directa se basa en la utilización fundamental del álgebra vectorial como matricial para presentar y describir la posición de un mecanismo en el espacio tridimensional con relación a un sistema de referencia fijo [31].

Ya que un robot puede ser considerado como una cadena cinemática constituida por elementos rígidos y eslabones unidos entre sí por medio de articulaciones, se puede establecer un sistema de referencia fijo, situado en la base del robot (origen) y así poder describir la posición y localización de cada uno de los elementos con respecto a dicho sistema de referencias [24].

La aplicación de la cinemática directa en el desarrollo y análisis del exoesqueleto mecánico presenta como solución a nuestro problema cinemático, cuál sería la posición y orientación que adoptaría el extremo del robot cuando cada una de las variables que fijan la posición y orientación de sus articulaciones toma valores determinados [31], que serán dados por diseño a cada elemento presentes en los mecanismos a desarrollar para el funcionamiento de nuestro exoesqueleto manteniendo así la emulación de la biomecánica humana.

Dado que son las variables articulares las que pueden ser leídas el modelo cinemático directo será utilizado entre otros fines, para presentar al usuario información relativa a la localización de cada extremo del robot [31].

De esta forma, el problema cinemático directo se reduce a la búsqueda de una matriz homogénea de transformación  $T$ , la cual, relacione posición y orientación del extremo del robot respecto al sistema coordinado de referencia fijo, situado en la base de este [31].

Para la obtención del modelo cinemático directo puede ser tomado mediante dos puntos de vista denominados métodos geométricos y métodos basados en cambios de sistemas de referencia. Los métodos geométricos se emplean para casos simples, su aplicación queda limitada a robots con pocos grados de libertad. Los métodos basados en cambio de sistemas de referencia permiten de una manera sistemática la obtención del modelo cinemático directo del robot para  $n$  grados de libertad, por este motivo son frecuentemente utilizados, en particular los que usan las matrices de transformación homogénea [31]. Para lo cual se plantea el algoritmo de Denavit – Hartenberg.

### **6.4.2.1 Modelo Denavit – Hartenberg.**

En 1995 Denavit y Hartenberg propusieron un método sistemático matricial con la finalidad de representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática con respecto a un sistema de referencia fijo. Este método utiliza una matriz de transformación homogénea, reduciendo el

problema cinemático directo a encontrar una matriz de transformación homogénea 4 x 4, relacionando la localización espacial del extremo del robot con respecto al sistema de coordenadas de su origen [31]. La representación de Denavit - Hartenberg (D - H) establece que seleccionando de forma adecuada los sistemas de coordenadas asociados a cada eslabón, es posible pasar de forma continua de uno al siguiente mediante 4 transformaciones básicas, las cuales dependen fuertemente de las características geométricas de los eslabones.

Dando lugar a transformaciones básicas que consisten en una sucesión de rotación y traslación que permitan relacionar el sistema de referencia del elemento i con el sistema del elemento i-1.

- Rotación alrededor del eje  $Z_{i-1}$  un ángulo  $\theta_i$
- Traslación a lo largo de  $Z_{i-1}$  una distancia  $d_i$ , vector  $d_i$  (0, 0,  $d_i$ )
- Traslación a lo largo de  $x_i$  una distancia  $a_i$ , vector  $a_i$  (0, 0,  $a_i$ )
- Rotación alrededor del eje vector  $x_i$ , un ángulo  $\alpha_i$

Dado que el producto de matrices no es conmutativo [26]:

$$A_{i-1}^i = T(Z, \theta_i) T(0, 0, d_i) T(0, 0, a_i) T(X, \alpha_i) \quad (1)$$

Desarrollando la expresión matricial:

$$A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde:  $\theta_i$ ,  $a_i$ ,  $d_i$ ,  $\alpha_i$ , son los parámetros D – H del eslabón i, basta con identificarlos para obtener matrices A y relacionar así todos y cada uno de los elementos del robot.

$$A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \cos \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & -\cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para la consideración de las matrices establecidas por Denavit – Hartenberg, es importante considerar los siguientes puntos para determinar la posición de los eslabones con respecto al origen:

1. Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón de la cadena) y acabando con N (último eslabón móvil). Se numerará como eslabón “0” a la base fija del robot.
2. Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al 1er grado de libertad) y acabando en N.

3. Localizar el eje de cada articulación. Si esta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
4. Para  $i$  de  $0$  a  $n-1$ , situar el eje  $Z_i$  sobre el eje de la articulación  $i+1$ .
5. Situar el origen del sistema de la base  $\{S_0\}$  en cualquier punto de  $Z_0$ . Los ejes  $X_0, Y_0$  se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con  $Z_0$ .
6. Para  $i$  de  $1$  a  $n-1$ , situar el sistema  $\{S_i\}$  (solidario al sistema  $i$ ) en la intersección del eje  $Z_i$  con la línea normal común a  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$ . Si ambos ejes se cortasen se situaría  $\{S_i\}$  en el punto de corte. Si fuesen paralelos  $\{S_i\}$  se situarían en la articulación  $i+1$ .
7. Situar  $X_i$  en la línea normal común a  $Z_{i-1}, Z_i$ .
8. Situar  $Y_i$  de modo que forme un sistema dextrógiro con  $X_i, Z_i$ .
9. Situar el sistema  $\{S_n\}$  en el extremo del robot de modo que  $Z_0$  coincida con la dirección de  $Z_{n-1}$  y  $X_n$  sea normal a  $X_{n-1}$  y  $Z_n$ .
10. Obtener  $\theta_i$  como el ángulo que hay que girar en torno a  $Z_{i-1}$  para que  $X_{i-1}$  y  $X_i$  queden paralelos.
11. Obtener  $d_i$  como la distancia, medida a lo largo de  $Z_{i-1}$  que habría que desplazar  $\{S_{i-1}\}$  para que  $X_i$  y  $X_{i-1}$  quedasen alineados.
12. Obtener  $a_i$  como la distancia medida a lo largo de  $X_i$  (que ahora coincidirá con  $X_{i-1}$ ) que habría que desplazar el nuevo  $\{S_{i-1}\}$  para que su origen coincidiese con  $\{S_i\}$ .
13. Obtener  $\alpha_i$  como el ángulo que habría que girar en torno a  $X_i$  (que ahora coincidirá con  $X_{i-1}$ ) para que el nuevo  $\{S_{i-1}\}$  coincidiese totalmente con  $\{S_i\}$ .
14. Obtener las matrices de transformación  $A_{i-1}^i$  definidas.
15. Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot  $T = {}^0A_1, {}^1A_2, \dots, {}^{n-1}A_n$
16. La matriz  $T$  define la orientación (submatriz de la rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las  $n$  coordenadas articulares.

## 6.5 Análisis cinemático en ADAMS

Adams es un software que permite realizar resolver simultáneamente las ecuaciones de la cinemática, la estática y la cuasiestática. Para simular cada parte del exoesqueleto se utiliza funciones por pasos, indicara cuando y como realizar el movimiento, la función en Adams tiene la siguiente estructura:  $\text{step}(\text{time}, x_0, h_0, x_1, h_1)$ , en donde  $x_0$  y  $x_1$  representa el tiempo de inicio y final,  $h_0$  y  $h_1$  representa el ángulo de movimiento.



## 6.6 Análisis cinemático de las extremidades inferiores

### 6.6.1 Modelo Denavit – Hartenberg de extremidad inferior

Se ubican los sistemas de coordenadas debidamente estudiados bajo el criterio del algoritmo de Denavit – Hartenberg como se muestra en la figura 63.

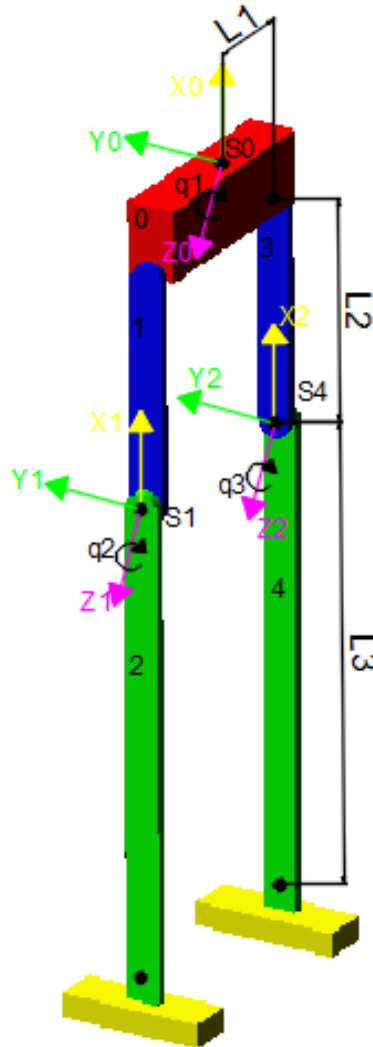


Figura 61. Ubicación de los sistemas coordenados, longitudes y articulaciones presentes en el diseño previo al análisis cinemático. Fuente: [Autores].

Figura 62. Parámetros establecidos para la matriz del algoritmo de Denavit - Hartenberg. Fuente: [Autores].

Articulación	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$-(q_1 + \frac{\pi}{2})$	$-L_1$	$-L_2$	0
2	$q_2$	0	$-L_3$	0
3	$-(q_3 + \frac{\pi}{2})$	$L_1$	$-L_2$	0

Figura 63 . Valores correspondientes al diseño del exoesqueleto a desarrollar. Fuente: [Autores].

Articulación	$\theta_i$	L1	L2	L3
1	90°	22.5	47	101.4
2	90°	-	-	-
3	90°	-	-	-

A partir de la tabla 64, se obtiene las diferentes matrices homogéneas para los eslabones presentes en la cadena cinemática en función de la ecuación matricial (3), se plantea las matrices para cada articulación (4), (5). Teniendo en cuenta que es un sistema simétrico se procederá con el análisis del lado derecho por consecuencia el movimiento se replicará en su lado izquierdo.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{2} + q_1) & -\cos(0) * \sin(\frac{\pi}{2} + q_1) & \cos(0) * \sin(\frac{\pi}{2} + q_1) & -L_2 * \cos(\frac{\pi}{2} + q_1) \\ \sin(\frac{\pi}{2} + q_1) & -\cos(0) * \cos(\frac{\pi}{2} + q_1) & -\sin(0) * \cos(\frac{\pi}{2} + q_1) & -L_2 * \cos(\frac{\pi}{2} + q_1) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\cos(0) * \sin(q_2) & \cos(0) * \sin(q_2) & -L_3 * \cos(q_2) \\ \sin(q_2) & -\cos(0) * \cos(q_2) & -\sin(0) * \cos(q_2) & -L_3 * \cos(q_2) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Reemplazando los valores de diseño de la tabla 55, a las matrices (4) y (5), se obtiene las siguientes matrices:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{2} + 90) & -\cos(0) * \sin(\frac{\pi}{2} + 90) & 1 * \sin(\frac{\pi}{2} + q_1) & -47 * \cos(\frac{\pi}{2} + 90) \\ \sin(\frac{\pi}{2} + 90) & -\cos(0) * \cos(\frac{\pi}{2} + 90) & 0 & -47 * \cos(\frac{\pi}{2} + 90) \\ 0 & 0 & \cos(0) & 22.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos(0) * \sin(90) & \cos(0) * \sin(90) & -101.4 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos(0) * \cos(90) & -\sin(0) * \cos(q_2) & -101.4 * \cos(90) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

La matriz de transformación se obtiene mediante la relación del extremo de las cadenas cinemáticas con respecto al origen (sistema de coordenadas) para la cual se procede a realizar la siguiente operación (8), dicha operación se desarrolla mediante el uso de Matlab.

$$T_{derecha} = {}^0 A_1 * {}^1 A_2 \quad (8)$$

Se plante la matriz de transformación de acuerdo con las matrices de las articulaciones presentes en la cadena cinemática (6) y (7), se presenta a continuación la siguiente matriz a desarrollar (9).

$$T_{derecha} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} + 90\right) & -\cos(0) * \sin\left(\frac{\pi}{2} + 90\right) & 1 * \sin\left(\frac{\pi}{2} + q_1\right) & -47 * \cos\left(\frac{\pi}{2} + 90\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} + 90\right) & -\cos(0) * \cos\left(\frac{\pi}{2} + 90\right) & 0 & -47 * \cos\left(\frac{\pi}{2} + 90\right) \\ 0 & 0 & \cos(0) & 22.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$* \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos(0) * \sin(90) & \cos(0) * \sin(90) & -101.4 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos(0) * \cos(90) & -\sin(0) * \cos(q_2) & -101.4 * \cos(90) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{derecha} = \begin{bmatrix} 0.8012 & 1.0000 & -1.2473 & -81.2369 \\ 1.0000 & 0.8012 & -0.4006 & -101.4000 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

La matriz  $T_{derecha}$  (10), muestra como resultados la posición y orientación de la cadena cinemática de acuerdo con el sistema de coordenadas del extremo libre tomando como referencia al sistema de coordenadas principal, por simetría y funcionalidad de las cadenas cinemáticas la matriz de transformación  $T_{izquierda}$  presentará los mismos desplazamientos y posición que la matriz de transformación  $T_{derecha}$ .

De acuerdo con la operación de relación entre las articulaciones (8), se presentarán movimientos en x, y, z además de movimientos angulares con respecto al origen del sistema coordenado  $\Theta$ .

### 6.6.2 Trayectoria de la marcha en los diferentes tiempos.

El periodo de la marcha representa el 100%, en donde la fase de contacto del pie con el suelo denominada fase de apoyo, representa el 60% y el 40% corresponde a la fase de oscilación. Con los datos de las posiciones de la cadera y la rodilla presentados en la figura 45 y 46 del capítulo 1 se obtiene la información necesaria para dibujar en AutoCAD las trayectorias, con la finalidad de tener mayor entendimiento de las posiciones de la marcha, se puede observar en la figura 66.

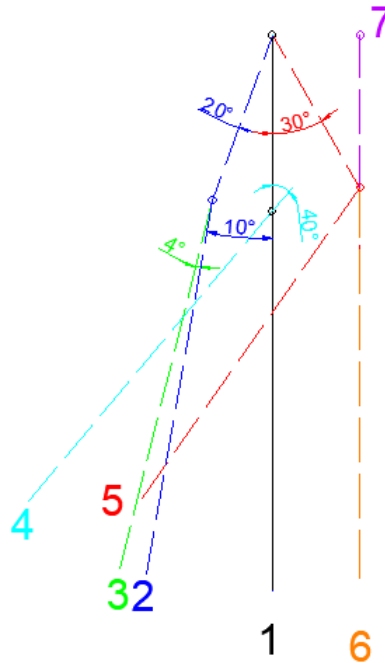


Figura 64. Trayectoria de la marcha. Fuente: [Autores].

En videos observados sobre la marcha de un exoesqueleto se determinó que el tiempo al realizar un paso es de 2.24s, en dónde se procede a distribuir los tiempos de cada posición según los porcentajes de la figura 44. Estos tiempos nos servirán para simular la marcha en Adams View.

Figura 65. Tiempo de la posición de la marcha. Fuente: [Autores].

Tiempo de la posición de la marcha	
Posición	Tiempo [s]
1	0.4
1 hasta 2	0.59
2 hasta 3	0.35
3 hasta 4	0.2
4 hasta 5	0.3
5 hasta 6	0.2
6 hasta 7	0.2

### 6.6.3 Análisis de extremidades inferiores en ADAMS

El diseño de las extremidades inferiores se realizará en el programa de Adams View, está formado por dos barras con dos grados de libertad, se dibuja con las medidas propuesta.

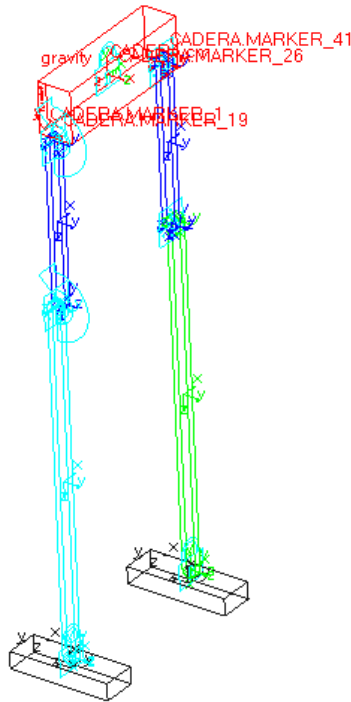


Figura 66. Extremidades inferiores. Fuente: [Autores].

Para la programación en Adams View de las extremidades inferiores se necesitan de datos de la posición de cada eslabón en un determinado tiempo, se inicia en posición de apoyo, continuando con las posiciones de oscilación.

**Programación de la cadera:** STEP (time,0,0d,0.2,0d) + STEP (time,0.2,0d,0.4,0d) + STEP (time,0.4,0d,0.99,20d) + STEP (time,0.99,0d,1.34,0d) +STEP (time,1.34,0d,1.54,-20d) + STEP (time,1.54,0d,1.55,0d) + STEP (time,1.55,0d,1.84,-30d) + STEP (time,1.84,0d,1.85,0d) + STEP (time,1.85,0d,2.04,0d) + STEP (time,2.04,0d,2.24,30d)

**Programación de la rodilla:** step (time,0,0d,0.2,0d) + step (time,0.2,0d,0.4,0d) + step (time,0.4,0d,1,10d) + step(time,1,0d,1.1,0d) + step (time,1.1,0d,1.34,-6d) + step (time,1.34,0d,1.35,0d) + step(time,1.35,0d,1.54,36d) + step (time,1.54,0d,1.55,0d) + step (time,1.55,0d,1.84,20d) + step(time,1.84,0d,1.85,0d) + step (time,1.85,0d,2.04,-60d) + step (time,2.04,0d,2.05,0d) + step (time,2.05,0d,2.25,0d)

#### a) Trayectoria biomecánica de la cadera

La suavidad de la marcha humana, el desplazamiento natural y la compensación del centro de gravedad en el movimiento sincronizado del cuerpo humano depende directamente de las trayectorias

de las articulaciones de cadera, rodilla y tobillo del miembro inferior en el plano sagital. (Neumann, D., 2013).

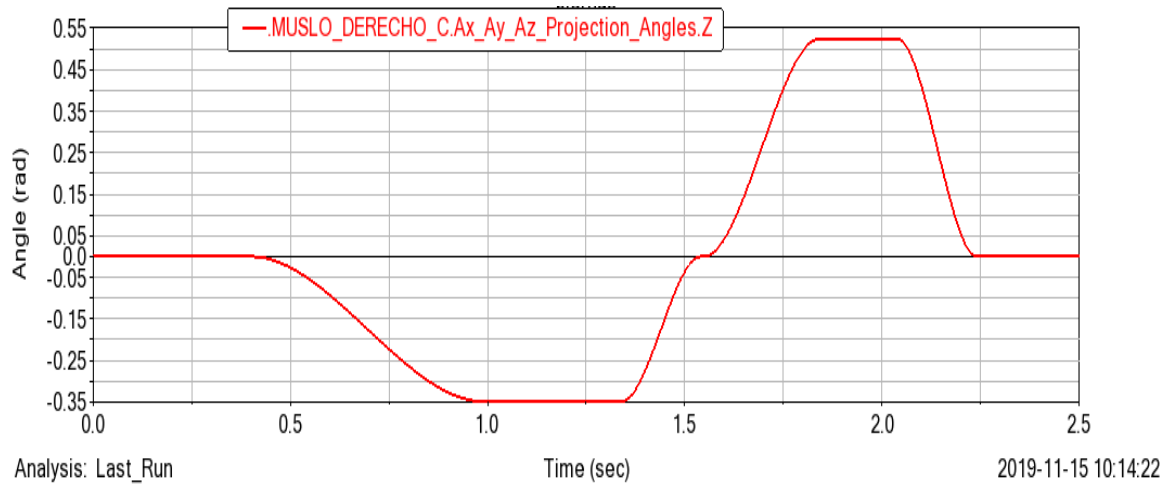


Figura 67. Trayectorias biomecánicas de la cadera para validar el modelo cinemático directo. Fuente: [Autores].

Proyección de los ángulos de la cadera se realizó en el plano z, se puede observar en la figura 69 que la trayectoria es similar a las obtenidas por Neumann, D. A. (2013), garantizando la compensación del centro de gravedad, la trayectoria cambia en el punto de inicio ya que en nuestra simulación se consideró el punto de inicio cuando la cadera está a 0°.

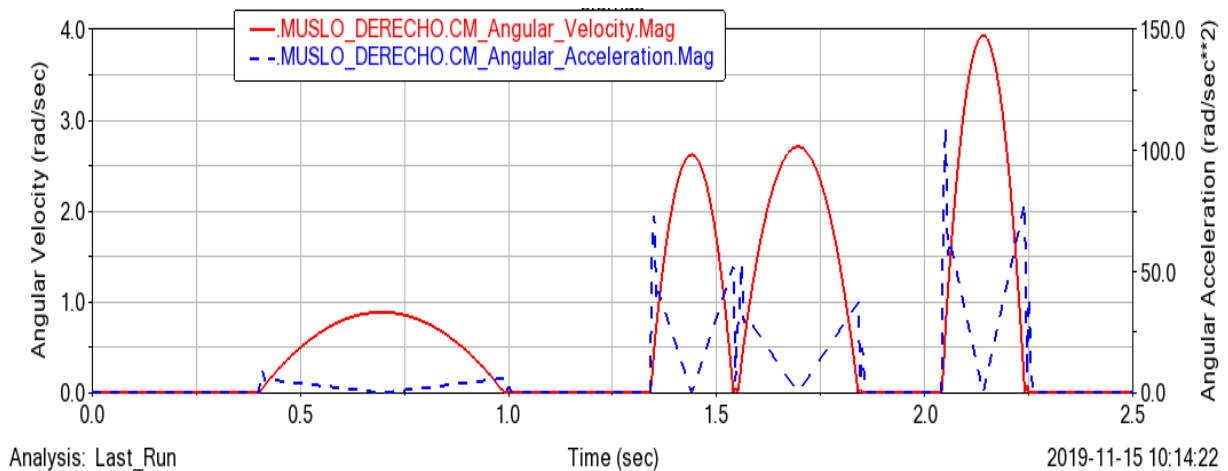


Figura 68. Velocidad y aceleración angular de la flexión de la cadera. Fuente: [Autores].

En la figura 70 se puede observar la velocidad y aceleración angular del movimiento de la cadera, teniendo valores mínimos cuando está en posición de reposo y teniendo valores máximos cuando realiza un movimiento de 30°.

## b) Trayectorias biomecánicas de la rodilla

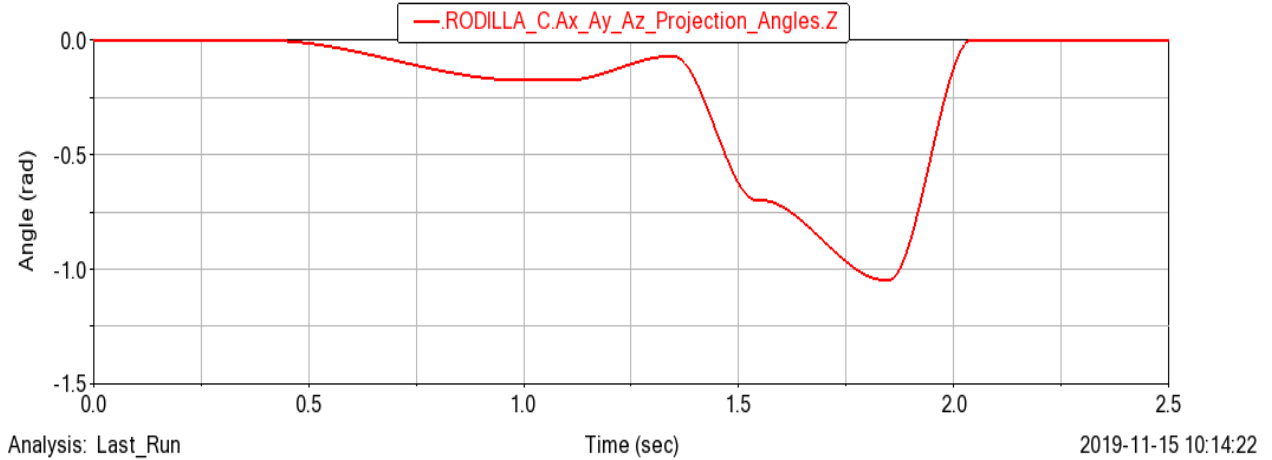


Figura 69. Trayectorias biomecánicas de la rodilla para validar el modelo cinemático directo. Fuente: [Autores].

Proyección de los ángulos de la rodilla se realizó en el plano z, se puede observar en la figura 71 que la trayectoria es similar a las obtenidas por Neumann, D. A. (2013), garantizando la compensación del centro de gravedad, la trayectoria cambia en el punto de inicio ya que en nuestra simulación se consideró el punto de inicio cuando la rodilla está a  $0^\circ$ .

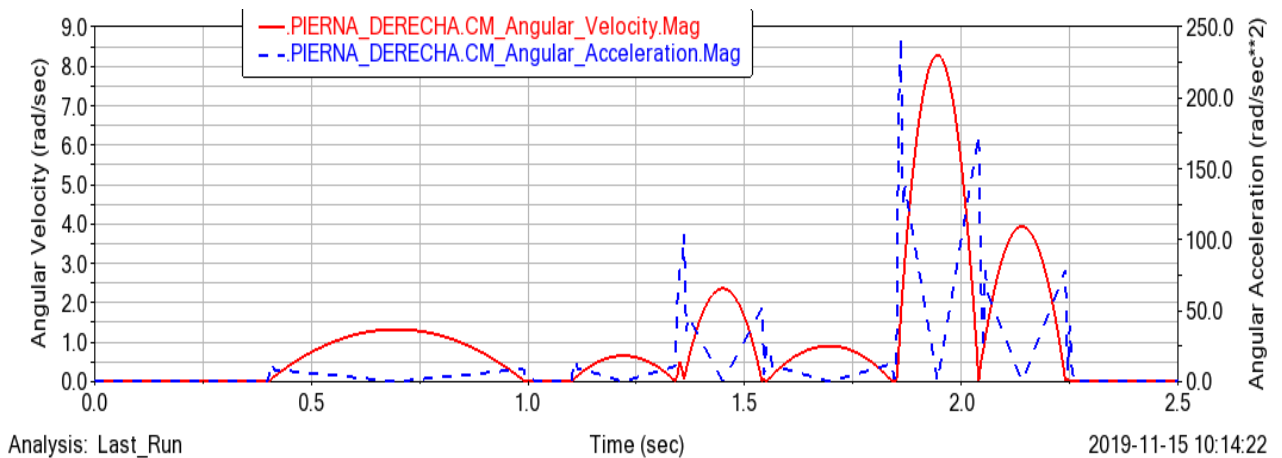


Figura 70. Velocidad y aceleración angular de la flexión de la rodilla. Fuente: [Autores].

En la figura 72 se puede observar la velocidad y aceleración angular del movimiento de la rodilla, teniendo valores mínimos cuando está en posición de reposo y teniendo valor máximo cuando realiza un movimiento de  $60^\circ$ .

### 6.6.4 Analisis cinematico de la cadera del exoesqueleto mecánico

La cadera es la articulación proximal al miembro inferior, su función principal es orientar a todo el miembro inferior en toda las direcciones del espacio, en la figura 73 se puede observar la cadera del exoesqueleto mecánico la cual presenta dos grados de libertad, que son los movimiento de : flexo extensión y rotación.

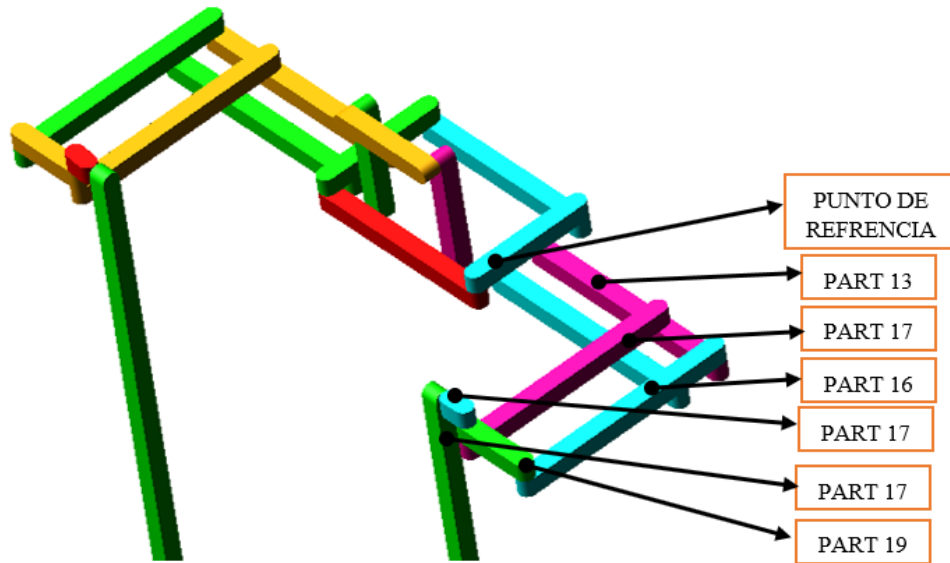


Figura 71. Cadera de exoesqueleto mecánico. Fuente: [Autores].

### 6.6.5 Trayectoria de la cadera en movimiento de rotación

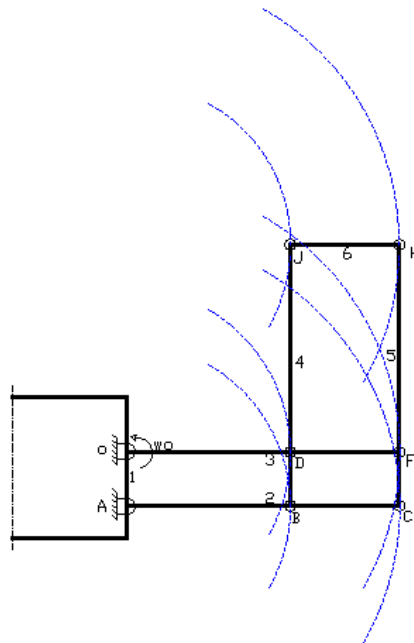


Figura 72. Trayectoria de cadera en movimiento de rotación. Fuente: [Autores].



## 6.6.6 Análisis cinemático de la cadera en ADAMS

### a) Movimiento de rotación externa de cadera

El grado máximo de amplitud del movimiento de rotación externa de la cadera es de  $60^\circ$ , en la figura 74 se puede observar que la estructura si permite realizar este movimiento.

El movimiento de rotación interna de cadera de una persona es de  $30^\circ$ , la estructura permite realizar este movimiento, se puede observar en la figura 75.

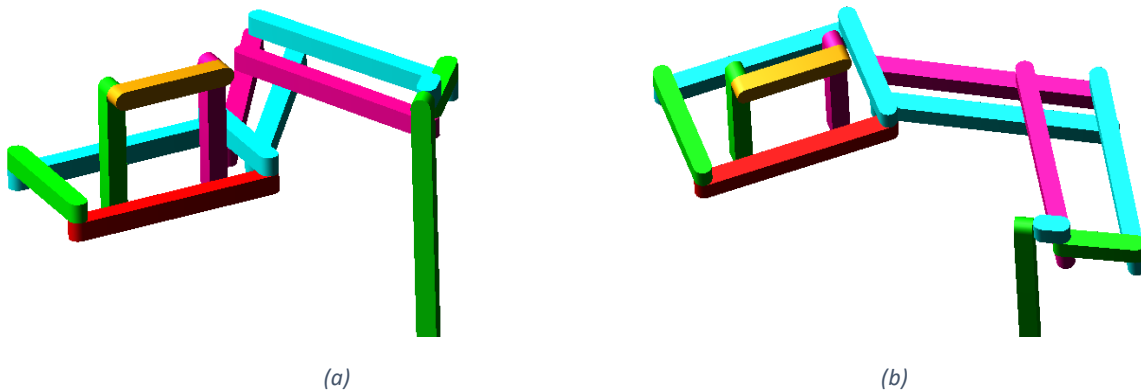


Figura 73. (a) Rotación externa de cadera; (b) Rotación interna de cadera. Fuente: [Autores].

Programación de movimiento: `step(time,0,0d,0.36,60d) + step(time,0.36,0d,0.37,0d) + step(time,0.37,0d,0.91,-90d)`

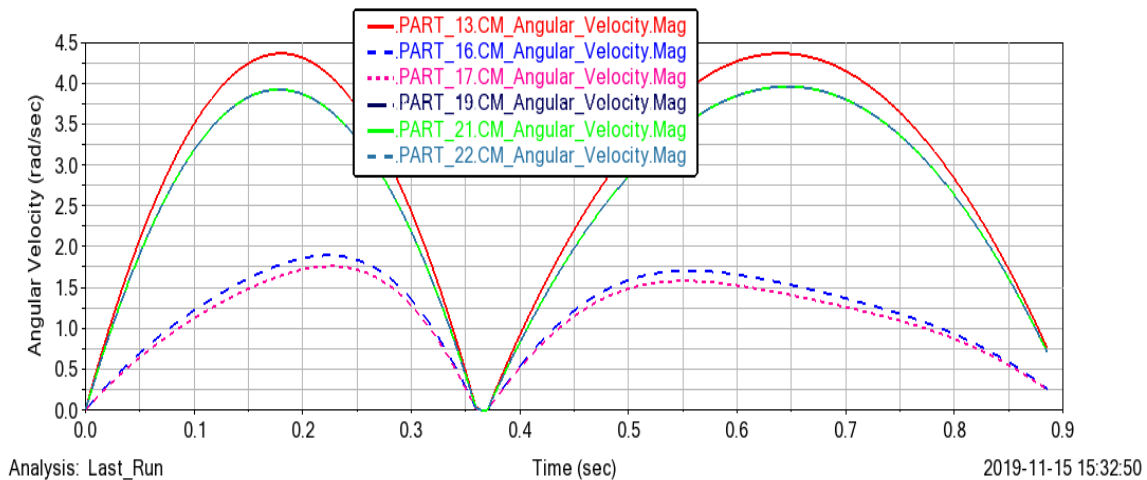


Figura 74. Velocidad y aceleración angular de la cadera. Fuente: [Autores].

La estructura del exoesqueleto mecánico cumple con la función de la cadera de flexionar  $90^\circ$  y extender  $-20^\circ$ , pero no permite realizar movimiento de abducción y aducción, por esta razón presenta

2 grados de libertad, se puede combinar movimiento de rotación con flexo extensión para obtener un movimiento similar al de abducción y aducción.

## 6.7 Análisis cinemático de extremidad superior

### 6.7.1 Modelo Denavit – Hartenberg de extremidad superior

En base al algoritmo de Denavit – Hartenberg, se establece el sistema de coordenadas para cada eslabón, tal como se puede observar en la figura 78.

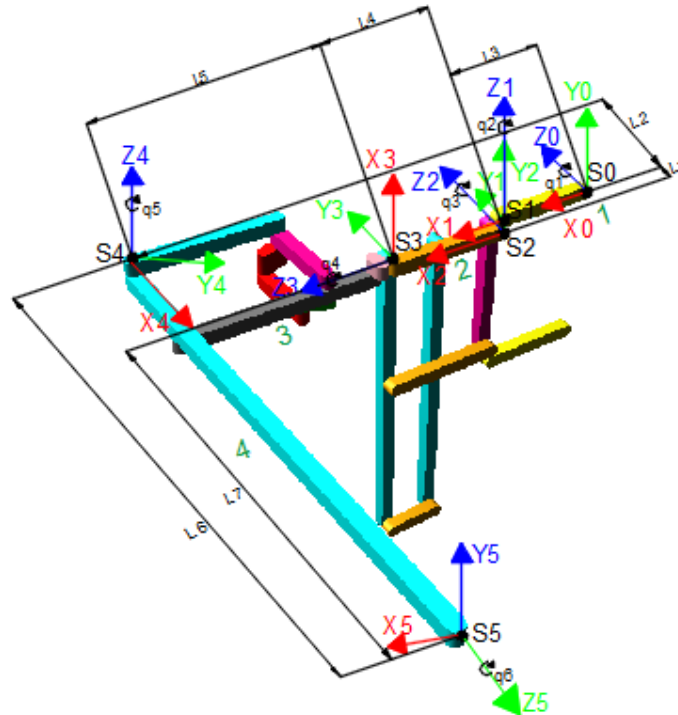


Figura 75. Ubicación de los sistemas coordenados, longitudes y articulaciones presentes en el diseño previo al análisis cinemático considerando el funcionamiento de cada eslabón presente en la cadena cinemática. Fuente: [Autores].

Tabla 25. Parámetros establecidos para la matriz del algoritmo de Denavit - Hartenberg. Fuente: [Autores].

Articulación	Movimiento	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	Estabilización del hombro al sistema	$q_1$	$L_3$	0	0
2	Rotación interna y externa de hombro	$q_2$	0	$L_4$	$\frac{\pi}{2}$
3	Abducción – aducción del hombro	$q_3$	$L_1$	$L_4$	0
4	Flexión- extensión del antebrazo	$q_4$	0	$L_5$	0
5	Flexión- extensión del codo	$q_5$	$L_2$	$L_6$	0
6	Rotación mano	$q_6$	$L_7$	$L_6$	0

Tabla 26. Valores correspondientes al diseño del exoesqueleto a desarrollar. Fuente: [Autores].

Articulación	$\theta_i$	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
1	0°							
2	90°							
3	155°							
4	90°	2	12.25	36.12	17	35	41	28.75
5	150°							
6	90°							

A partir de la tabla 25, se obtiene las diferentes matrices homogéneas para cada eslabón presente en las extremidades superiores, sin embargo, existe un movimiento extra para el funcionamiento del sistema cinemático correspondientes a la del ser humano, la abducción y aducción para dichos movimientos se aplica el mismo modelo de Denavit – Hartenberg, a continuación se plantea la matriz de acuerdo a la ecuación matricial (3), generando matrices para cada articulación (11), (12), (13), (14), (15) y (16). Teniendo en cuenta que es un sistema simétrico se procederá con el análisis del lado derecho por consecuencia el movimiento se replicará en su lado izquierdo.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\cos(0) * \sin(q_1) & \cos(0) * \sin(q_1) & 0 * \cos(q_1) \\ \sin(q_1) & -\cos(0) * \cos(q_1) & -\sin(0) * \cos(q_1) & 0 * \cos(q_1) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & L3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\cos(\pi/2) * \sin(q_2) & \cos(\pi/2) * \sin(q_2) & L_4 * \cos(q_2) \\ \sin(q_2) & -\cos(\pi/2) * \cos(q_2) & -\sin(\pi/2) * \cos(q_2) & L_4 * \sin(q_2) \\ 0 & \sin(\pi/2) & \cos(\pi/2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_3) & -\cos(0) * \sin(q_3) & \cos(0) * \sin(q_3) & L_4 * \cos(q_3) \\ \sin(q_3) & -\cos(0) * \cos(q_3) & -\sin(0) * \cos(q_3) & L_4 * \sin(q_3) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_4) & -\cos(0) * \sin(q_4) & \cos(0) * \sin(q_4) & L_5 * \cos(q_4) \\ \sin(q_4) & -\cos(0) * \cos(q_4) & -\sin(0) * \cos(q_4) & L_5 * \sin(q_4) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} \cos(q_5) & -\cos(0) * \sin(q_5) & \cos(0) * \sin(q_5) & L_6 * \cos(q_5) \\ \sin(q_5) & -\cos(0) * \cos(q_5) & -\sin(0) * \cos(q_5) & L_6 * \sin(q_5) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & L2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} \cos(q_6) & -\cos(0) * \sin(q_6) & \cos(0) * \sin(q_6) & L_6 * \cos(q_6) \\ \sin(q_6) & -\cos(0) * \cos(q_6) & -\sin(0) * \cos(q_6) & L_6 * \sin(q_6) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & L7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Reemplazando los valores de diseño tabla 26, a las matrices (11), (12), (13), (14), (15) y (16), se obtiene las siguientes matrices:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(0) & -\cos(0) * \sin(0) & \cos(0) * \sin(0) & 0 * \cos(0) \\ \sin(0) & -\cos(0) * \cos(0) & -\sin(0) * \cos(0) & 0 * \cos(0) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 36.12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos(\pi/2) * \sin(90) & \cos(\pi/2) * \sin(90) & 17 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos(\pi/2) * \cos(90) & -\sin(\pi/2) * \cos(90) & 17 * \sin(90) \\ 0 & \sin(\pi/2) & \cos(\pi/2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(155) & -\cos(0) * \sin(155) & \cos(0) * \sin(155) & 17 * \cos(155) \\ \sin(155) & -\cos(0) * \cos(155) & -\sin(0) * \cos(155) & 17 * \sin(155) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos(180) & -\cos(0) * \sin(180) & \cos(0) * \sin(180) & 35 * \cos(180) \\ \sin(180) & -\cos(0) * \cos(180) & -\sin(0) * \cos(180) & 35 * \sin(180) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} \cos(150) & -\cos(0) * \sin(150) & \cos(0) * \sin(150) & 41 * \cos(150) \\ \sin(150) & -\cos(0) * \cos(150) & -\sin(0) * \cos(150) & 41 * \sin(150) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 12.25 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos(0) * \sin(90) & \cos(0) * \sin(90) & 41 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos(0) * \cos(90) & -\sin(0) * \cos(90) & 41 * \sin(90) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 28.75 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

La matriz de transformación se obtiene mediante la relación del extremo de las cadenas cinemáticas con respecto al origen (sistema de coordenadas) para la cual se procede a realizar la siguiente operación (2.16), dicha operación se desarrolla mediante el uso de Matlab.

$$T_{derecha} = {}^0A_1 * {}^1A_2 * {}^2A_3 * {}^3A_4 * {}^4A_5 * {}^5A_6 \quad (23)$$

Se plante la matriz de transformación de acuerdo con las matrices de las articulaciones presentes en la cadena cinemática (17), (18), (19), (20), (21) y (22), se presenta a continuación la siguiente matriz a desarrollar (24).

$$T_{derecha} = \begin{bmatrix} \cos(0) & -\cos(0) * \sin(0) & \cos(0) * \sin(0) & 0 * \cos(0) \\ \sin(0) & -\cos(0) * \cos(0) & -\sin(0) * \cos(0) & 0 * \cos(0) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 36.12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 17 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 17 * \cos(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos(155) & -\cos(0) * \sin(155) & \cos(0) * \sin(155) & 17 * \cos(155) \\ \sin(155) & -\cos(0) * \cos(155) & -\sin(0) * \cos(155) & 17 * \sin(155) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos(180) & -\cos(0) * \sin(180) & \cos(0) * \sin(180) & 35 * \cos(180) \\ \sin(180) & -\cos(0) * \cos(180) & -\sin(0) * \cos(180) & 35 * \sin(180) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos(150) & -\cos(0) * \sin(150) & \cos(0) * \sin(150) & 41 * \cos(150) \\ \sin(150) & -\cos(0) * \cos(150) & -\sin(0) * \cos(150) & 41 * \sin(150) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 12.25 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos(0) * \sin(90) & \cos(0) * \sin(90) & 41 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos(0) * \cos(90) & -\sin(0) * \cos(90) & 41 * \sin(90) \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 28.75 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$T_{derecha} = \begin{bmatrix} 0.0776 & -0.0751 & 0.2379 & 5.6476 \\ 0.1549 & -0.1498 & 0.0266 & -1.6139 \\ 0.1675 & -0.1733 & 0.9486 & 24.2630 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

La matriz  $T_{derecha}$  (25), muestra como resultados la posición y orientación de la cadena cinemática para la extremidad superior de acuerdo con el sistema de coordenadas del extremo libre tomando

como referencia al sistema de coordenadas principal, este resultado será compartido para la matriz  $T_{izquierda}$  debido a la simetría existente en estas cadenas cinemáticas.

Para lo cual la matriz de transformación T, permite resolver completamente la cinemática directa en robots manipuladores, ya que dando valores concretos a cada uno de los grados de libertad del robot, obtenemos la posición y orientación [31].

### 6.7.2 Trayectorias de brazo

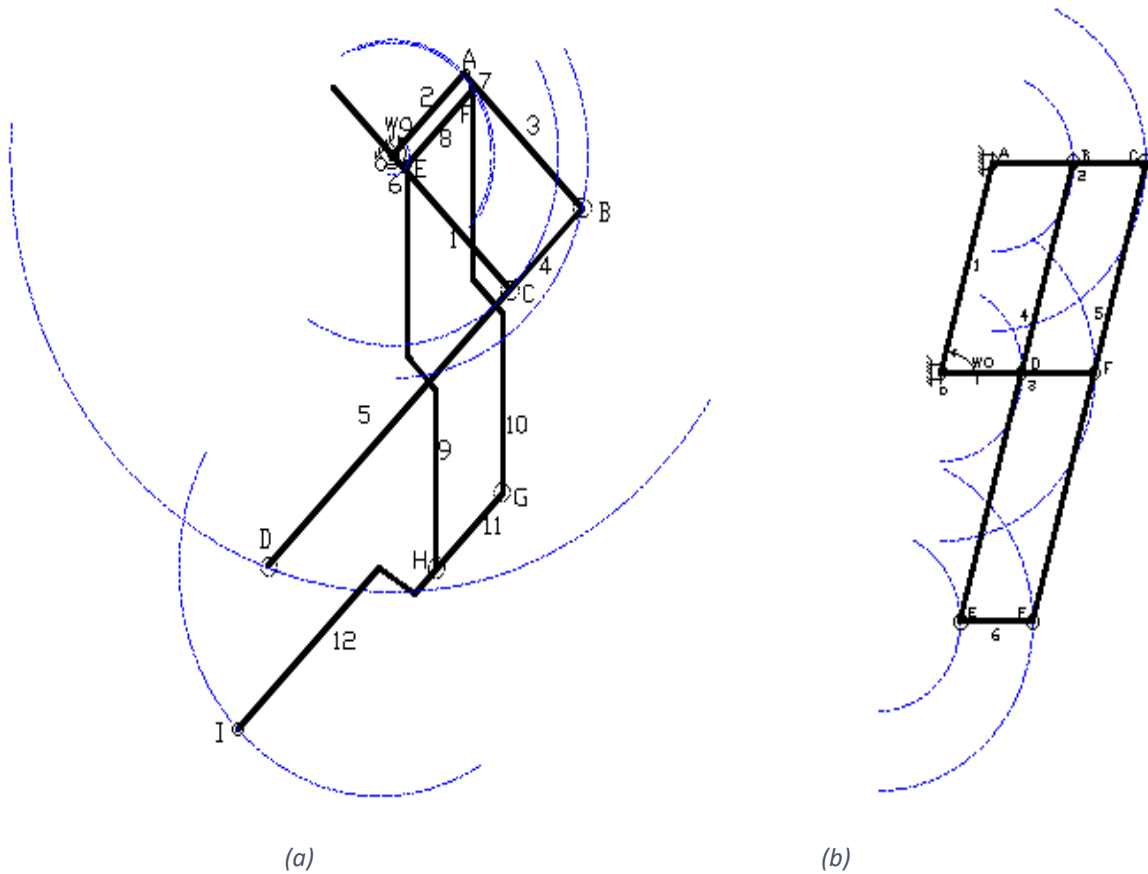


Figura 76. (a) Movimiento de flexo extensión; (b) Movimiento de abducción y aducción. Fuente: [Autores].

### 6.7.3 Simulación en ADAMS de brazo

El diseño del brazo y antebrazo del exoesqueleto mecánico se realizará en el programa de Adams View con las medidas propuestas de la unidad 1, con la finalidad de obtener la movilidad del mecanismo y así mismo su velocidad y aceleración angular. La estructura se puede observar en la figura 79.

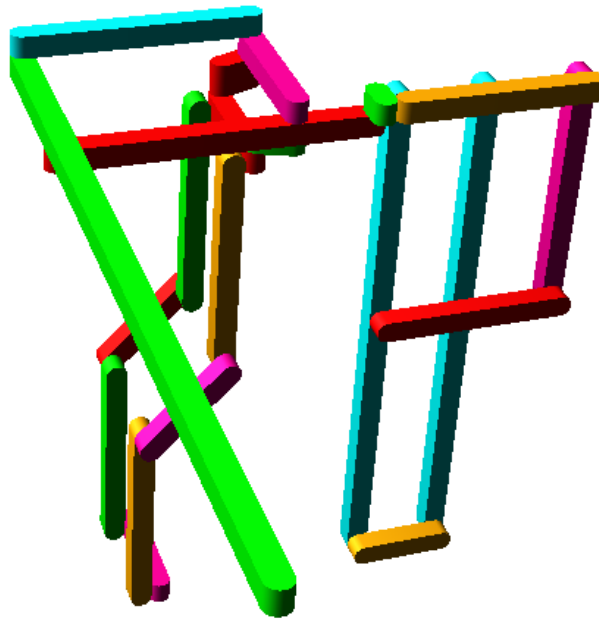


Figura 77. Brazo y antebrazo del exoesqueleto mecánico. Fuente: [Autores].

Para realizar el análisis de la movilidad se procede a realizar por separado el brazo y antebrazo, ya que se puede tener mayores detalles y visión de los resultados.

**a) Análisis cinemático del movimiento de aducción y abducción del brazo**

El brazo del exoesqueleto está formado por 6 barras y una sujeción al brazo de la persona, teniendo 2 grados de libertad en el hombro. En la figura 80 (a) se puede observar el brazo a  $90^\circ$ .

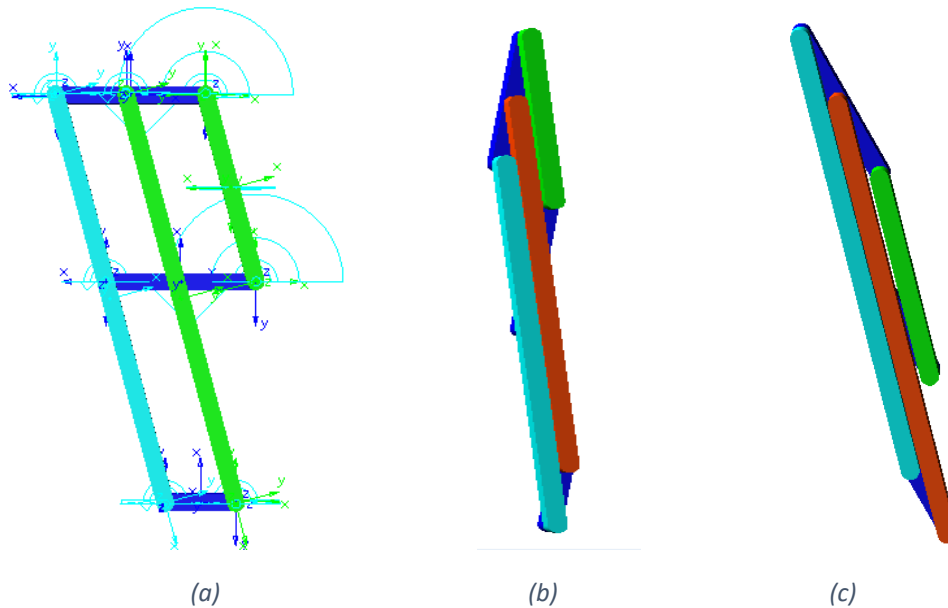


Figura 78. (a) brazo a  $90^\circ$ ; (b) brazo  $0^\circ$ ; (c) brazo a  $155^\circ$ . Fuente: [Autores]

En videos observados sobre el movimiento del brazo del exoesqueleto, se determinó que el tiempo es 0.46s en realizar el movimiento de aducción, realizando desde 90° a 0° como se observa en la figura 80 (b).

El hombro de una persona permite realizar un movimiento abducción de 0° a 180° y de aducción de 180° a -30°, pero la estructura permite realizar un movimiento de abducción y aducción máximo de 0° a 150° y viceversa, en un tiempo de 1.96s respectivamente como se puede observar en la figura 80 (c).

**Programación:** STEP (time,0,0d,0.46,-90d) +STEP (time,0.46,0d,0.47,0d) + STEP (time,0.47,0d,1.96,150d)

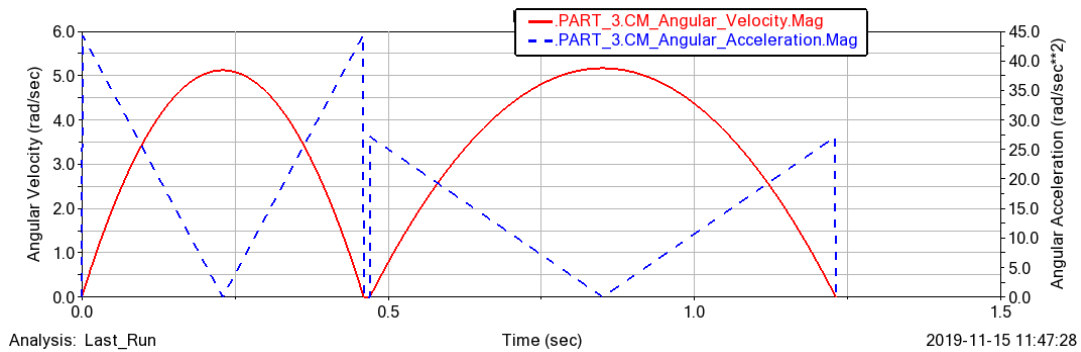


Figura 79. Velocidad y aceleración angular del movimiento aducción y abducción del brazo. Fuente: [Autores]

En la figura 81 se muestra la velocidad y aceleración angular de la barra horizontal que forma el brazo del exoesqueleto se puede observar que en el tiempo transcurrido hasta 0.46s, se realiza un movimiento de 90° a 0° y en el tiempo de 0.46s hasta 1.33s realiza un movimiento de 0° a 150°.

**b) Análisis cinemático de movimiento de rotación interna y externa del brazo**

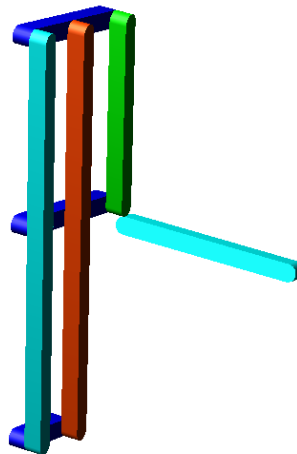


Figura 80. Flexión del brazo a 90°. Fuente: [Autores].



La estructura del brazo del exoesqueleto cumple la función de rotación interna y externa del brazo de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , como se puede observar en la figura 82.

El brazo de una persona tiene 3 grados de libertad, pero en la estructura mecánica del exoesqueleto tiene 2 grados de libertad, ya que no cumple la función flexo extensión.

**Programación:** step (time,0,0d,0.66, -90d)

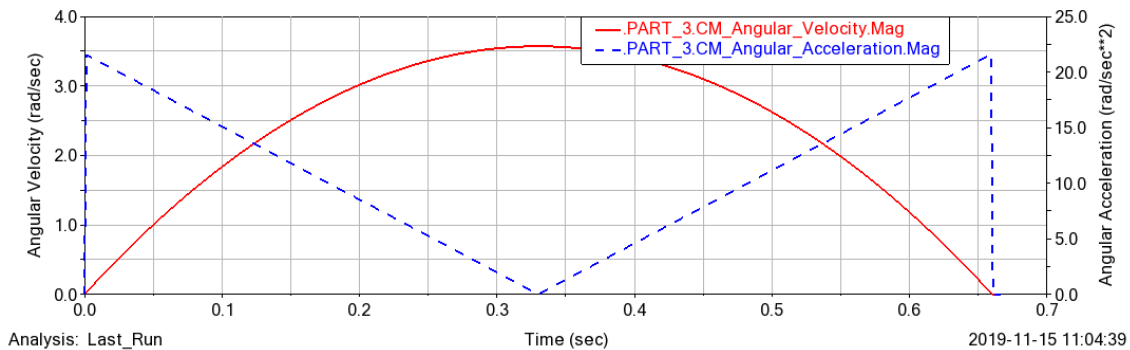


Figura 81. Velocidad y aceleración angular del movimiento de flexión y extensión del brazo. Fuente: [Autores].

En videos observados se determinó que el rotación interna y externa del brazo del exoesqueleto es de 0.66s cada movimiento en la figura 83 se puede observar la velocidad y aceleración angular del brazo del exoesqueleto.

#### 6.7.4 Simulación de antebrazo

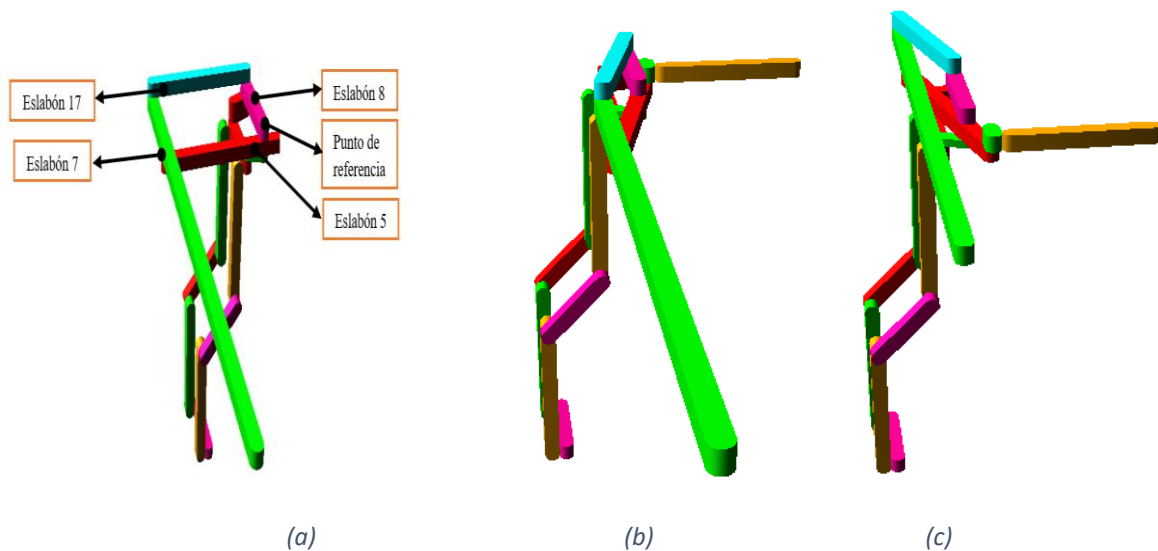


Figura 82. (a) antebrazo (a)  $75^\circ$ ; (b) antebrazo (b)  $0^\circ$ ; (c) antebrazo (c)  $75^\circ$ . Fuente: [Autores].

La estructura del antebrazo permite realizar un movimiento de  $0^\circ$  hasta  $180^\circ$ , pero el codo de una persona permite una movilidad de  $0^\circ$  a  $150^\circ$  por lo cual se trabajara con las limitaciones de movimiento de la persona, en la figura 84 (a) se puede observar el antebrazo de la persona  $75^\circ$  que es la posición intermedia, en la figura 84 (b) se tiene la extensión del antebrazo realizando un movimiento de  $75^\circ$  a  $0^\circ$  en un tiempo de 0.45s, en la figura 84 (c) se puede observar en la flexión del antebrazo que va desde  $0^\circ$  a  $150^\circ$  en un tiempo de 0.9s.

**Programación:** STEP (time,0,0d,0.45,75d) + STEP (time,0.45,0d,0.46,0d) + STEP (time,0.46,0d,1.35,-150d).

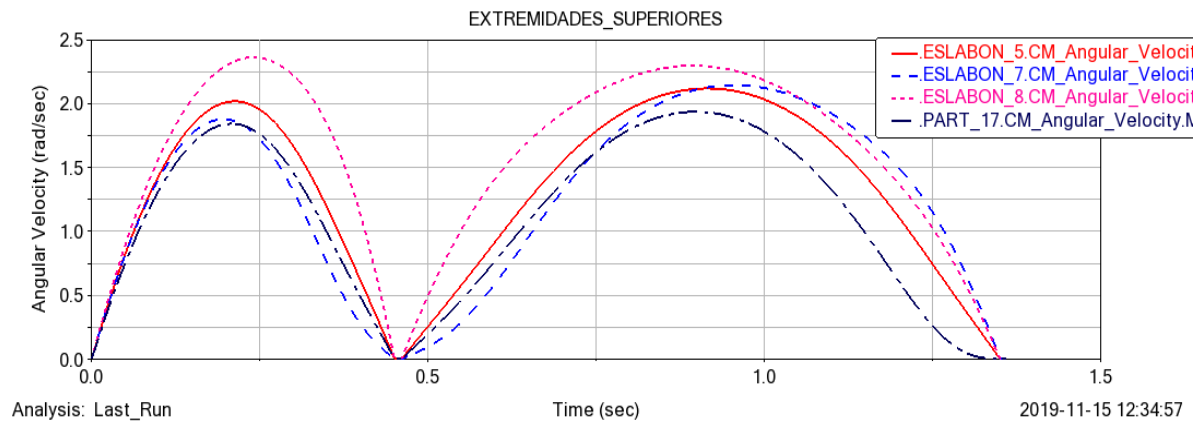


Figura 83. Velocidad angular del antebrazo. Fuente: [Autores]

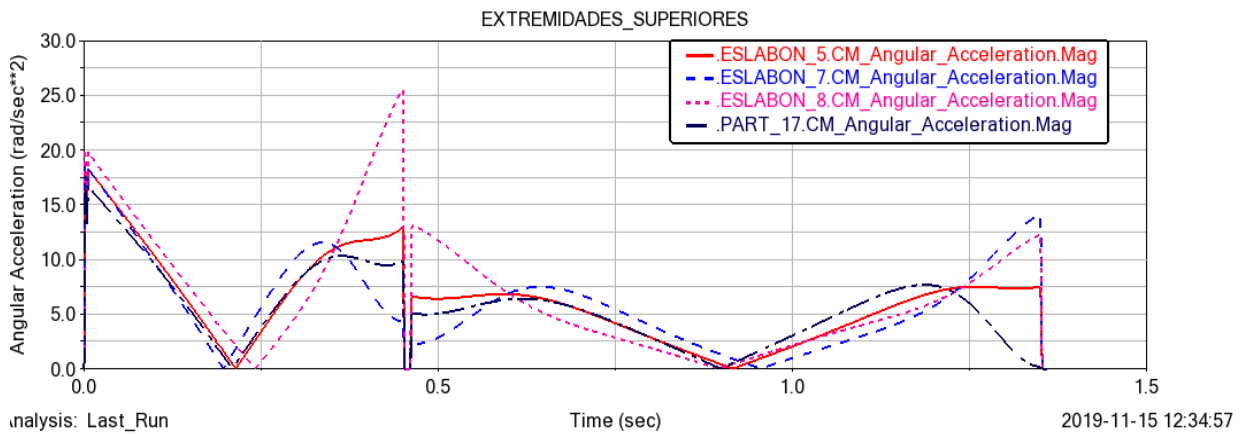


Figura 84. Aceleración angular del antebrazo. Fuente: [Autores].

En la figura 85 y 86 se muestra la velocidad y la aceleración angular respectivamente del antebrazo del exoesqueleto, se puede observar que al iniciar el movimiento la velocidad empieza a aumentar hasta un punto medio y cuando empieza a aproximarse al punto final empieza a disminuir, mientras que la aceleración al iniciar el movimiento tiene un valor alto y al llegar al punto medio disminuye, ya que la velocidad llega a su punto más alto.

## 6.8 Análisis cinemático de los dedos del exoesqueleto

Para el mecanismo mostrado en la figura 87, se emplea diferentes eslabones con la finalidad de emular el funcionamiento de los dedos de la persona hacia el exoesqueleto, para el análisis cinemático se aplica el método de Denavit – Hartenberg como se ha visto anteriormente para las anteriores cadenas cinemáticas.



Figura 85. Esquema y diseño de la mano del exoesqueleto. Fuente: [Autores].

### 6.8.1 Modelo Denavit – Hartenberg de mano

En base al diseño propuesto anteriormente, se procede con la ubicación de los sistemas coordenados como se observa en la figura 88, con la finalidad de obtener un análisis completo de estos eslabones ya que es importante para nuestro estudio una emulación precisa del mecanismo respecto a la del ser humano.

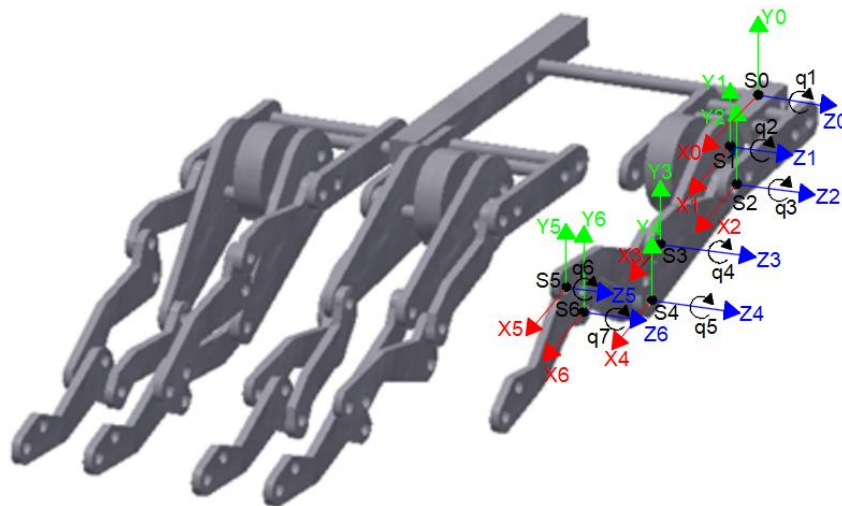


Figura 86. Sistema de coordenadas en cada articulación presente en los dedos del exoesqueleto. Fuente: [Autores].

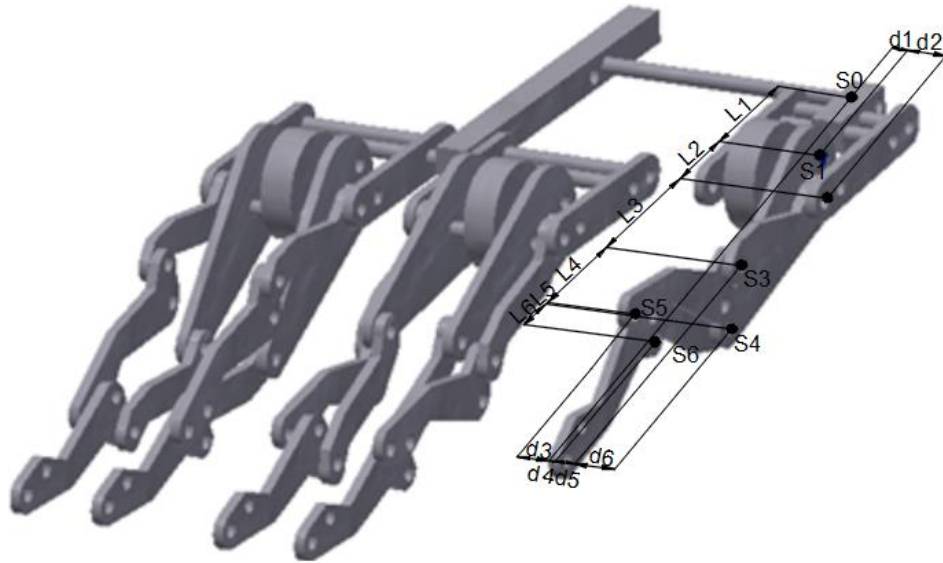


Figura 87. Sistema de coordenadas ubicadas en el pulgar de la mano del exoesqueleto. Fuente: [Autores].

Tabla 27. Parámetros establecidos para el planteamiento del algoritmo de Denavit - Hartenberg. Fuente: [Autores].

Articulación	Movimiento	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	Rotación	$q_1$	$d_1$	$L_1$	$\pi/2$
2	Rotación	$q_2$	$d_1$	$L_2$	$\pi/2$
3	Rotación	$q_3$	$d_1 + d_2$	$L_3$	$\pi/2$
4	Rotación	$q_4$	$d_5$	$L_4$	$\pi/2$
5	Rotación	$q_5$	$d_4 + d_5 + d_6$	$L_6$	$\pi/2$
6	Rotación	$q_6$	$d_3$	$L_5$	$\pi/2$
7	Rotación	$q_7$	$d_4$	$L_6$	$\pi/2$

Tabla 28. Medidas en base a diseño de movilidad para el pulgar y dedos presentes en el exoesqueleto. Fuente: [Autores].

Articulación	$\theta_i$	L1	L2	L3	L4	L5	L6
1	$90^\circ$						
2	$90^\circ$	6.46	1.40	6.44	8.94	1.82	3.22
3	$90^\circ$						
4	$90^\circ$	d1	d2	d3	d4	d5	d6
5	$90^\circ$	1.54	1.9	1.43	1.3	1.5	2.43
6	$90^\circ$						

A partir de la tabla 28, se obtiene las diferentes matrices homogéneas para los eslabones presentes en la mano del exoesqueleto a partir de la ecuación matricial (3), se plantea las matrices para cada articulación (26), (27), (28), (29), (30), (31) y (32). El sistema cinemático se replica para cada eslabón que conforman los dedos de la mano del exoesqueleto.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_1) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_1) & L_1 * \cos(q_1) \\ \sin(q_1) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_1) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_1) & L_1 * \sin(q_1) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & d1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_2) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_2) & L_2 * \cos(q_2) \\ \sin(q_2) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_2) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_2) & L_2 * \sin(q_2) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & d1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_3) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_3) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_3) & L_3 * \cos(q_3) \\ \sin(q_3) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_3) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_3) & L_3 * \sin(q_3) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & d1 + d2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_4) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_4) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_4) & L_4 * \cos(q_4) \\ \sin(q_4) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_4) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_4) & L_4 * \sin(q_4) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & d5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} \cos(q_5) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_5) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_5) & L_6 * \cos(q_5) \\ \sin(q_5) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_5) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_5) & L_6 * \sin(q_5) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & d4 + d5 + d6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} \cos(q_6) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_6) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_6) & L_5 * \cos(q_6) \\ \sin(q_6) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_6) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_6) & L_5 * \sin(q_6) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & d3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$${}^6A_7 = \begin{bmatrix} \cos(q_7) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_7) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(q_7) & L_6 * \cos(q_7) \\ \sin(q_7) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_7) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(q_7) & L_6 * \sin(q_7) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & d4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Reemplazando los valores de diseño de la tabla 29, a las matrices (26), (27), (28), (29), (30), (31) y (32), se obtiene las siguientes matrices:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 6.46 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 6.46 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 1.54 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 1.40 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 1.40 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 1.54 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 6.44 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 6.44 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 3.44 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 8.94 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 8.94 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 3.22 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 3.22 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 5.23 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 1.82 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 1.82 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 1.43 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$${}^6A_7 = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 3.22 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 3.22 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 1.3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

La matriz de transformación se obtiene mediante la relación de los extremos de las cadenas cinemáticas con respecto al origen, para adquirir dicha matriz se procede a realizar la siguiente operación (2.46), dicha operación se desarrolla mediante el uso de Matlab.

$$T_{derecha} = {}^0A_1 * {}^1A_2 * {}^2A_3 * {}^3A_4 * {}^4A_5 * {}^5A_6 * {}^6A_7 \quad (40)$$

Se plantea la matriz de transformación de acuerdo con las matrices de las articulaciones presentes en la cadena cinemática para cada eslabón (33), (34), (35), (36), (37), (38) y (39) se presenta a continuación la siguiente matriz a desarrollar (41).

$$T_{derecha} = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 6.46 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 6.46 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 1.54 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ * \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 1.40 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 1.40 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 1.54 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 6.44 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 6.44 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 3.44 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
& * \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 8.94 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 8.94 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 1.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
& * \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 3.22 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 3.22 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 5.23 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
& * \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 1.82 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 1.82 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 1.43 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
& * \begin{bmatrix} \cos(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \sin(90) & 3.22 * \cos(90) \\ \sin(90) & -\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) * \cos(90) & 3.22 * \sin(90) \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 1.3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{41}$$

$$T_{dedo} = \begin{bmatrix} -0.0036 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0117 \\ 0.1398 & 0.0000 & 0.0403 & 0.4503 \\ -0.1326 & 0.0900 & 0.0000 & -0.3100 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{42}$$

La matriz  $T_{dedo}$  (42), muestra como resultados la posición y orientación de la cadena cinemática de acuerdo con el sistema de coordenadas del extremo libre tomando como referencia al sistema de coordenadas principal.

De acuerdo con la operación de relación entre las articulaciones (2.48), se presentarán movimientos en x, y, z además de movimientos angulares con respecto al origen del sistema coordenado  $\Theta$ .



## 6.8.2 Trayectoria de dedos

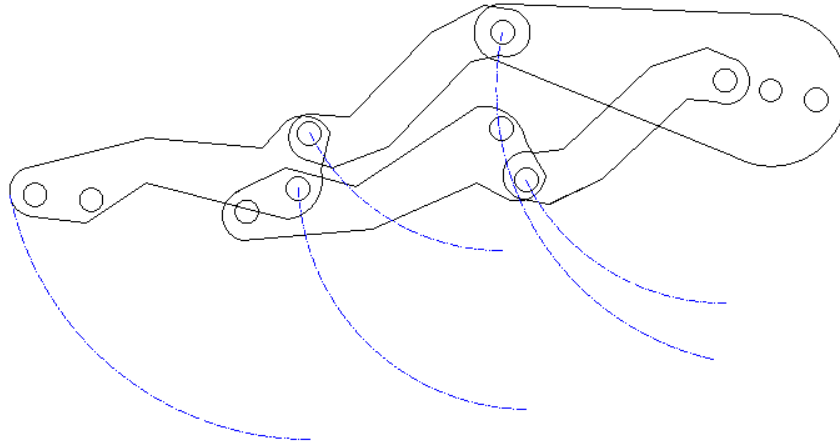
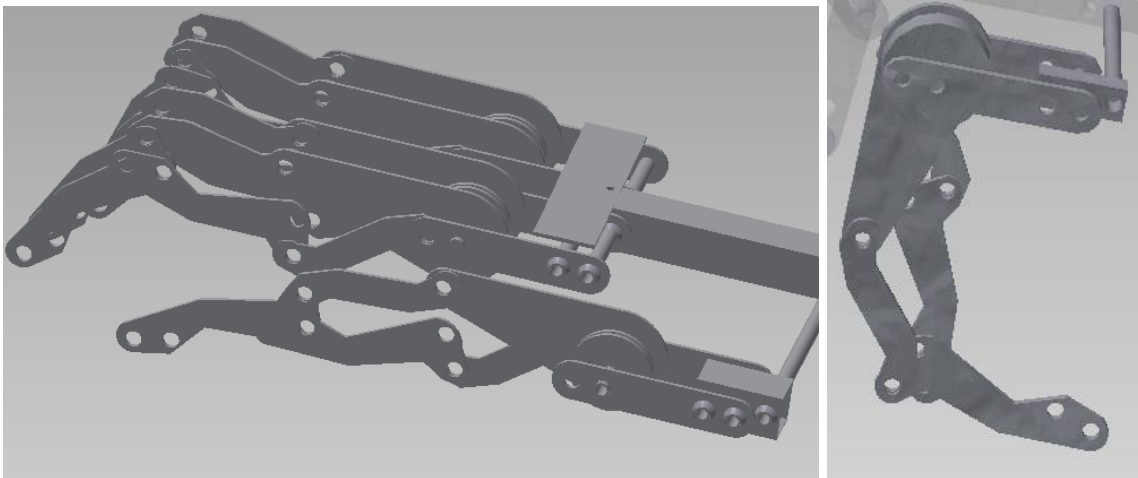


Figura 88. Trayectoria de dedos. Fuente: [Autores].

## 6.8.3 Simulación del dedo

Por la complejidad de la cadena cinemática de los dedos, primero se decidió simular los movimientos en Autodesk Inventor, como se puede observar en la figura 91, ya que los eslabones deben tener ciertos ángulos uno con respecto del otro.



(a)

(b)

Figura 89. (a) dedo a 0°; (b) dedo a -90°. Fuente: [Autores].

Una vez obtenido la posición y la orientación de los eslabones se procede a simular en Adams View, como se puede observar en la figura 92.

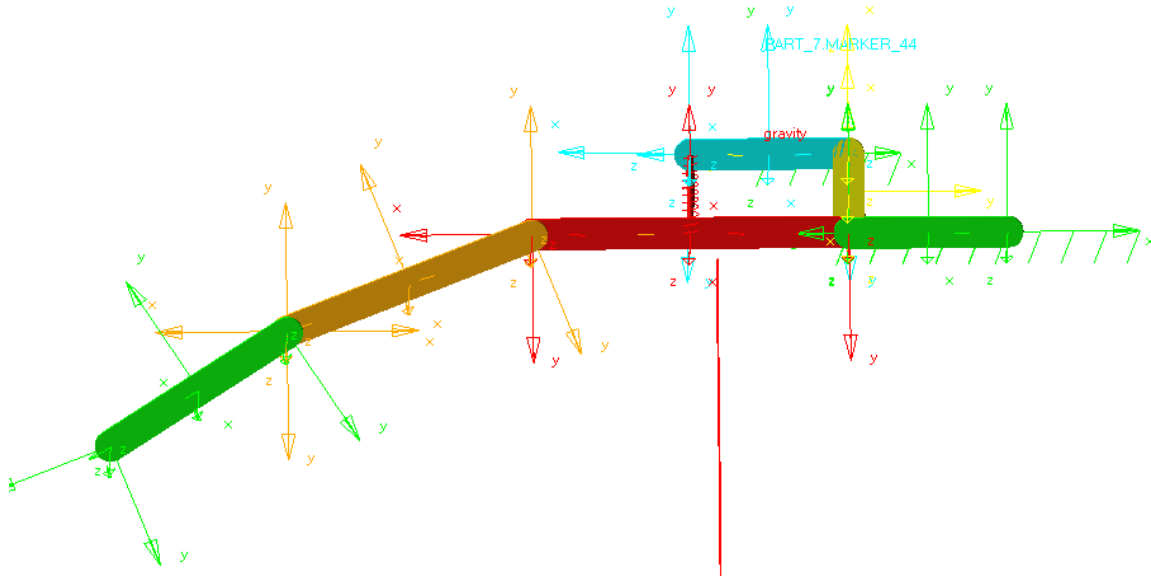


Figura 90. Simulación de dedos en Adams View. Fuente: [Autores].

Programación:

Eslabón 1:  $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 0, 0, 69, -45\text{d}) + \text{step}(\text{time}, 0, 69, 0, 0, 0, 7, 0\text{d}) + \text{step}(\text{time}, 0, 7, 0, 0, 1, 38, -45\text{d})$

Eslabón 2:  $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 0, 0, 69, -9.87\text{d}) + \text{step}(\text{time}, 0, 69, 0, 0, 0, 7, 0\text{d}) + \text{step}(\text{time}, 0, 7, 0, 0, 1, 38, -5.73\text{d})$

Eslabón 3:  $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 0, 0, 69, 13.04\text{d}) + \text{step}(\text{time}, 0, 69, 0, 0, 0, 7, 0\text{d}) + \text{step}(\text{time}, 0, 7, 0, 0, 1, 38, 10.72\text{d})$

### a) Análisis de movimientos de flexo extensión del dedo

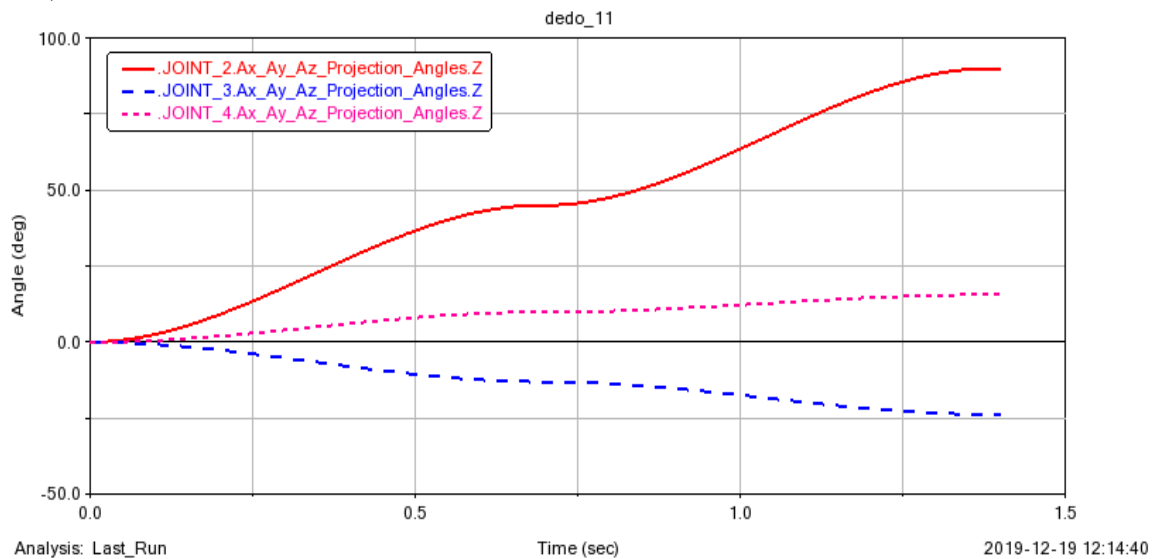


Figura 91. Trayectoria de movimiento de flexo extensión de dedo. Fuente: [Autores].

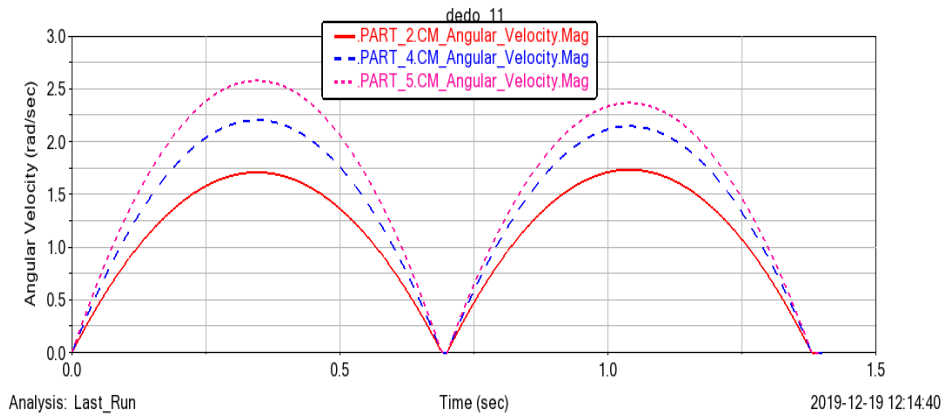


Figura 92. Velocidad angular de dedo. Fuente: [Autores].

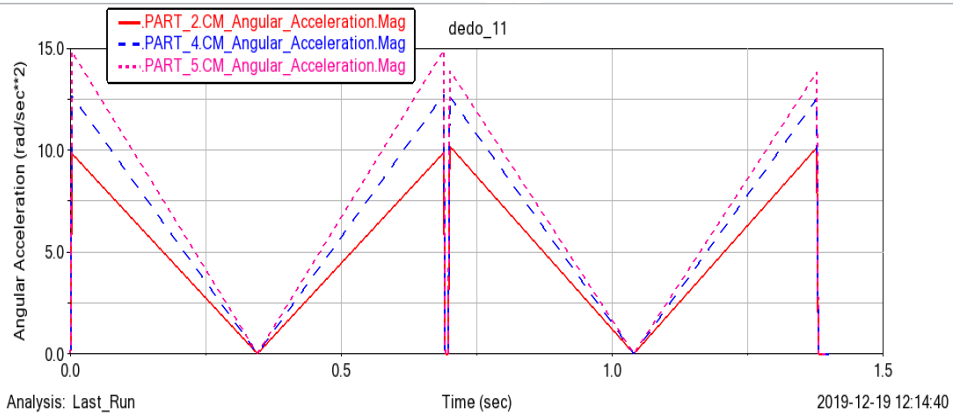


Figura 93. Aceleración angular de dedo. Fuente: [Autores].

## 6.9 Análisis cinemático de la cabeza

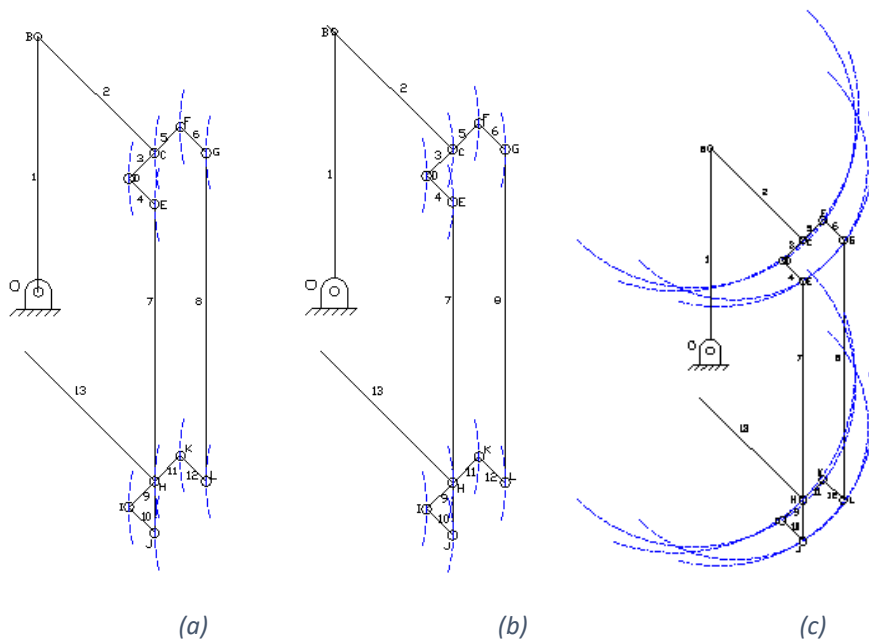


Figura 94. (a) Flexo extensión; (b) Inclinación lateral; (c) Rotación. Fuente: [Autores].

## 6.10 Dinámica del mecanismo a desarrollar

Hasta el momento no se ha considerado las fuerzas que causa u origina el movimiento en los diferentes mecanismos, la dinámica estudia las relaciones de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo y el movimiento que en él se origina. La obtención del modelo dinámico se basa fundamentalmente en el equilibrio de fuerzas planteado en la segunda ley de Newton, además de su equivalente en rotación, llamada ley de Euler. Pero en robots con varios grados de libertad el modelo de Newton se hace demasiado complicado, por este motivo, se utiliza la formulación Lagrangiana, que facilita la formulación de modelo complejos.

MSC Adams permite realizar análisis de movimiento y dinámica, es uno de los softwares más utilizados por ingenieros de todo el mundo, es una herramienta que nos permite estudiar la dinámica de piezas móviles, también permite analizar como las cargas y las fuerzas se distribuyen en los sistemas mecánicos. Para realizar el análisis dinámico del exoesqueleto se determinará el torque y la fuerza sobre cada junta [32].

### 6.10.1 Extremidades inferiores

La cadera tiene muchas juntas en donde existe torque y fuerza en los elementos, por esta razón se procede a identificar a cada una, como se observa en la figura 97.

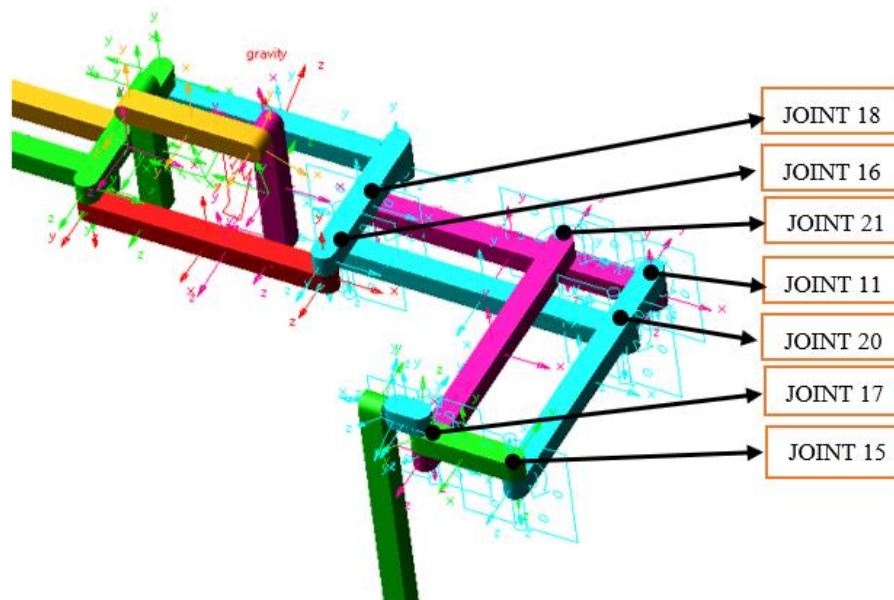


Figura 95. Junta de la cadera. Fuente: [Autores].

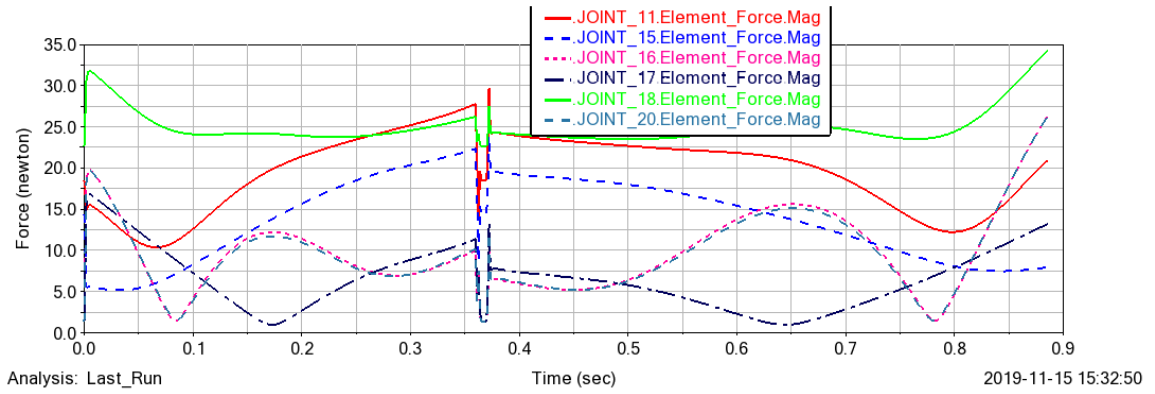


Figura 96. Fuerza en las juntas de la cadera. Fuente: [Autores].

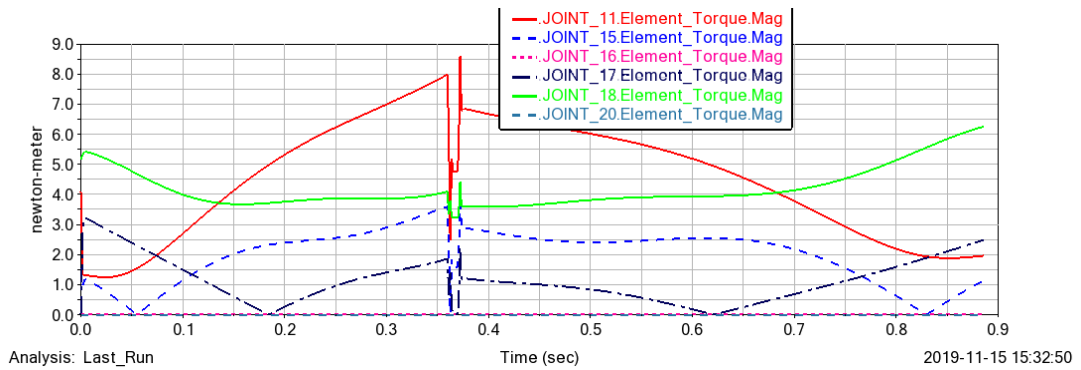


Figura 97. Torque de las juntas de la cadera. Fuente: [Autores].

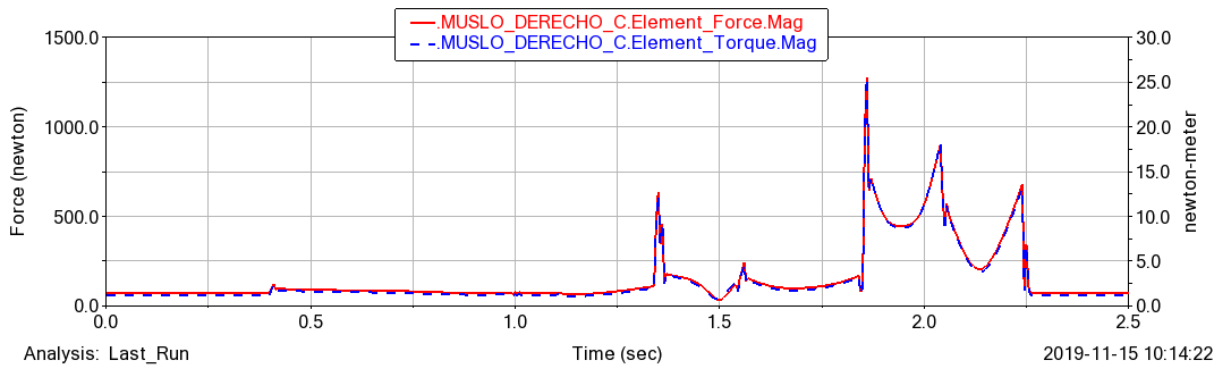


Figura 98. Fuerza y torque de la unión del muslo con la cadera en movimiento de marcha. Fuente: [Autores].

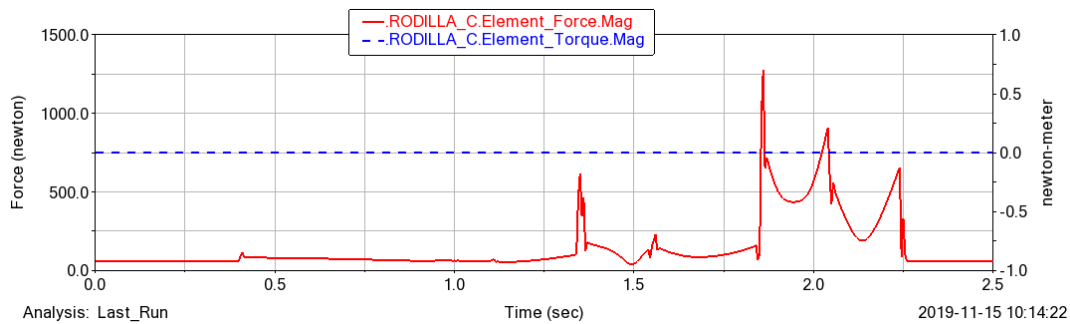


Figura 99. Fuerza y torque en la rodilla en movimiento de marcha. Fuente: [Autores].

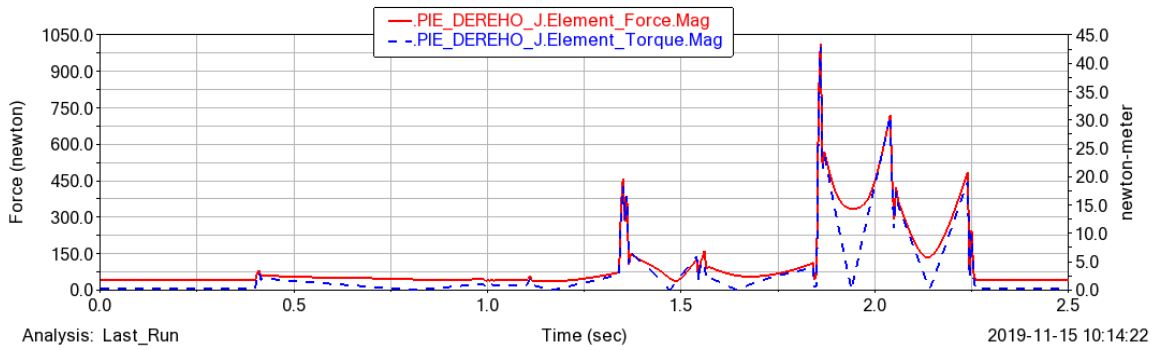


Figura 100. Fuerza y torque en el tobillo. Fuente: [Autores].

### 6.10.2 Extremidades superiores

En la figura 103 se presenta los eslabones del brazo con sus respectivas juntas, en donde se procederá a determinar la fuerza y el troque en cada junta.

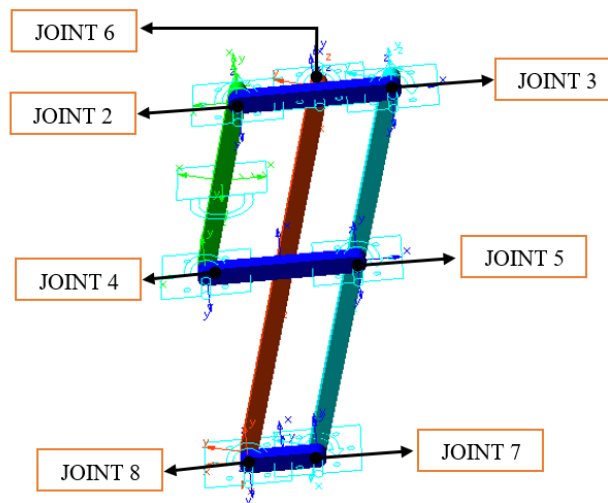


Figura 101. Junta de los diferentes eslabones del brazo. Fuente: [Autores].

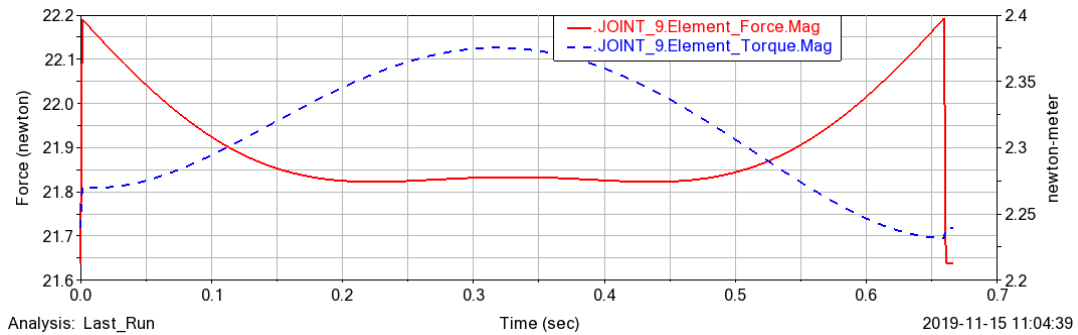


Figura 102. Fuerza y torque en movimiento de abducción y aducción del hombro. Fuente: [Autores].

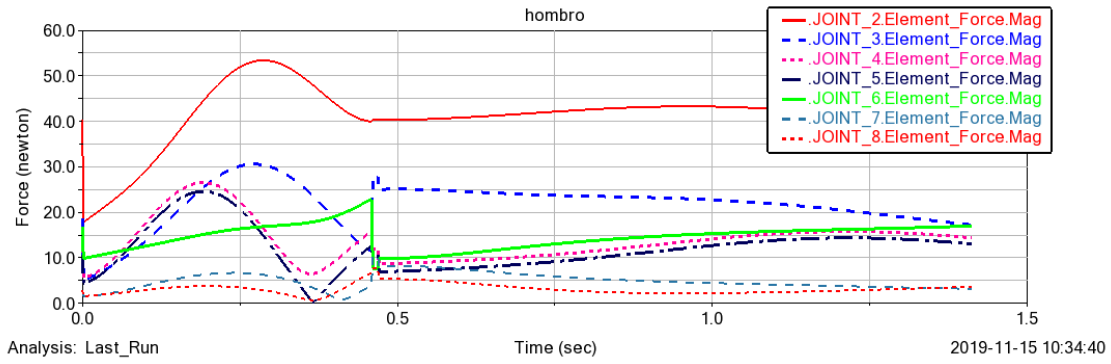


Figura 103. Fuerza en movimiento de flexión y extensión de brazo. Fuente: [Autores].

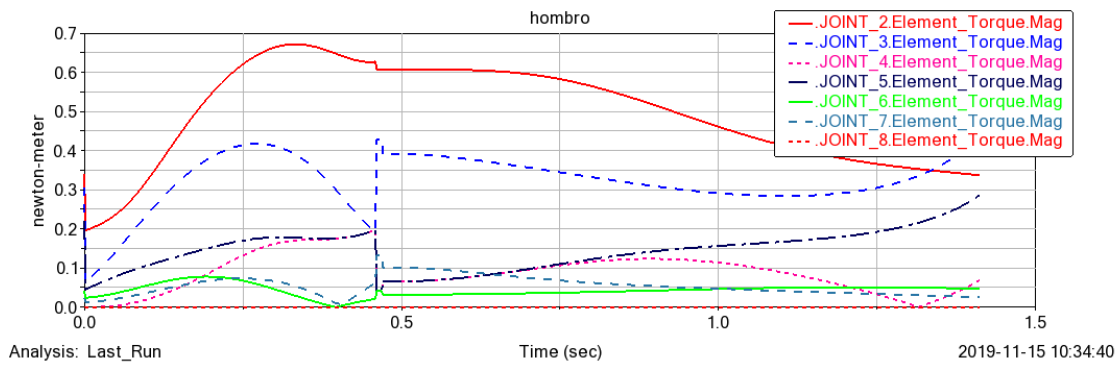


Figura 104. Torque en movimiento de flexión y extensión de brazo. Fuente: [Autores].

En la figura 107 se presenta los eslabones del antebrazo con sus respectivas juntas, en donde se procederá a determinar la fuerza y el troque en cada junta.

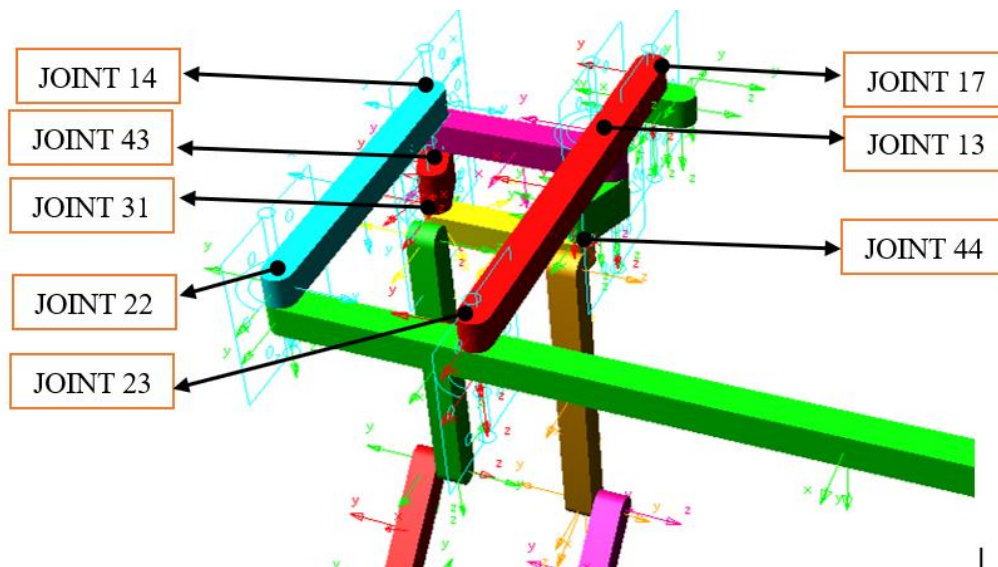


Figura 105. Junta de los diferentes eslabones del ante brazo. Fuente: [Autores].

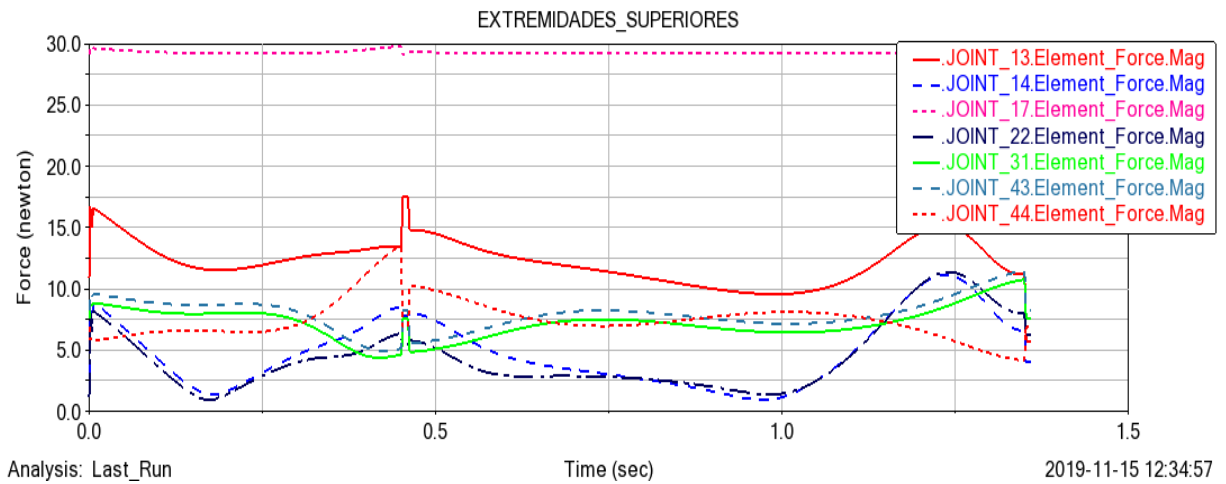


Figura 106. Fuerza en movimiento de flexión y extensión del ante brazo. Fuente: [Autores].

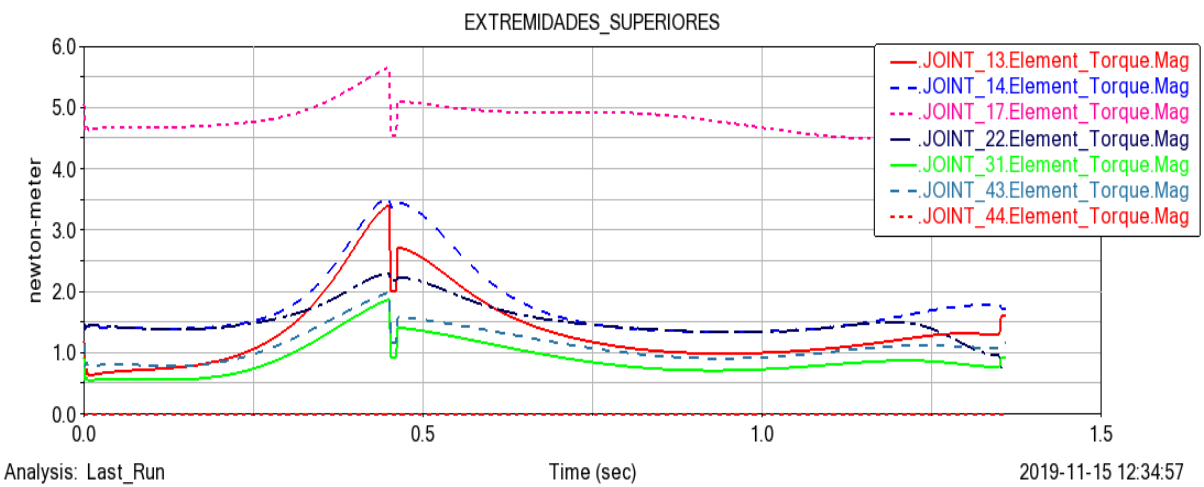


Figura 107. Torque en movimiento de flexión y extensión del ante brazo. Fuente: [Autores].

### 6.10.3 Mano

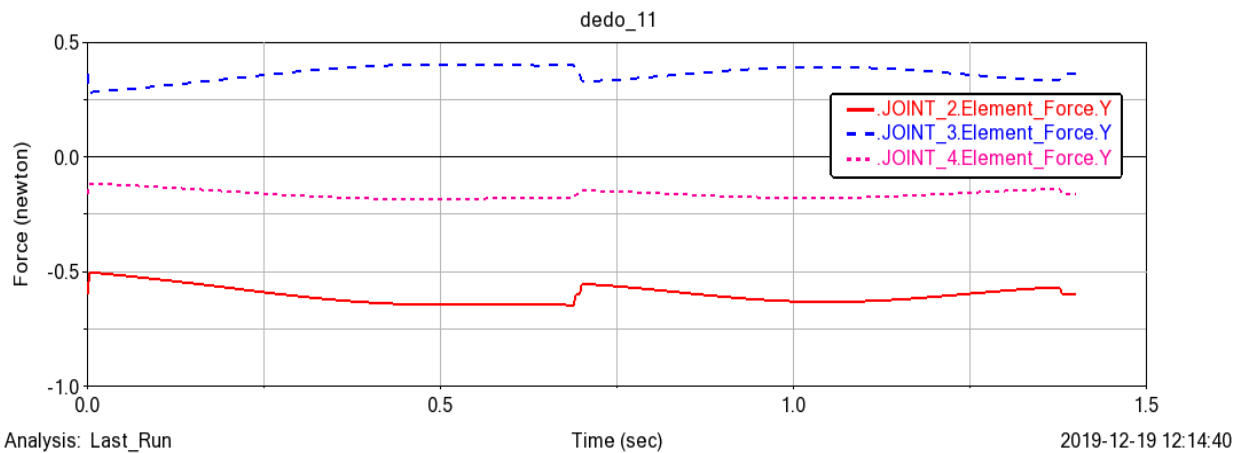


Figura 108. Fuerza en movimiento de flexo extensión de dedo. Fuente: [Autores].



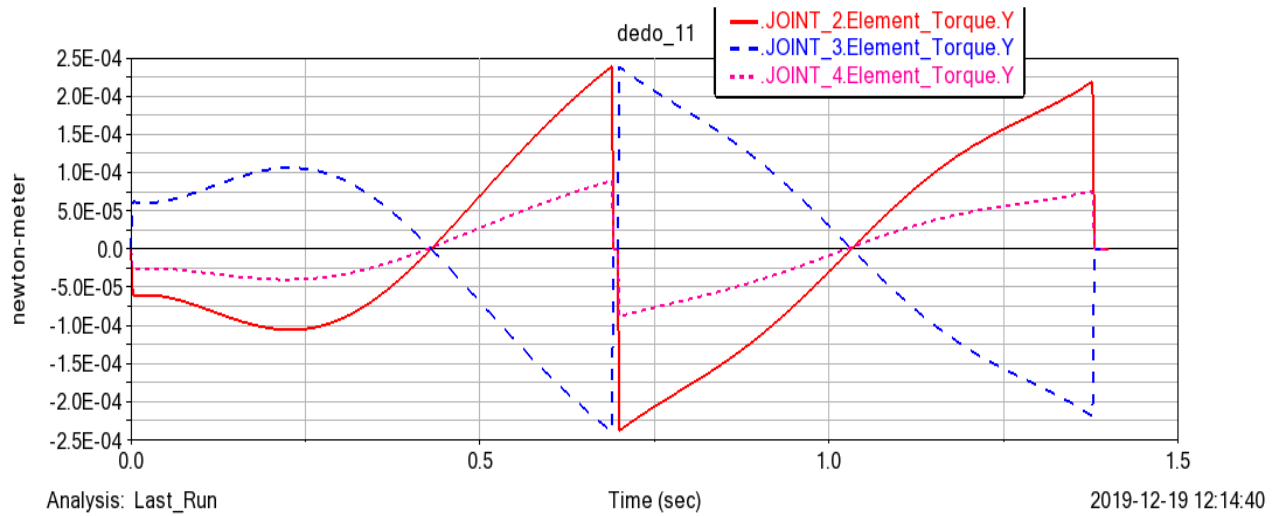


Figura 109. Torque en movimiento de flexo extensión de dedo. Fuente: [Autores].

## 7. Diseño del exoesqueleto COGA

### 7.1 Dimensionamiento de tornillos

Utilizaremos tornillos de fijación ISO 7379 ya que permite movilidad y fijación en los eslabones, con los datos obtenidos de fuerza y torque en cada junta se procederá a dimensionar los tornillos a utilizar.



Figura 110. Tornillo de fijación ISO 7379: [35]

#### a) Esfuerzo constante directo

El esfuerzo cortante o de cizalla a diferencia del normal, es producido por fuerzas que actúan paralelamente a la sección transversal del elemento.

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{S_{sy}}{n} \quad (43)$$

$$S_y = 0.5S_{sy} \quad (44)$$

$$\frac{4.V}{\pi.d^2} = \frac{S_{sy}}{n} \quad (43)$$

$$d = \left( \frac{V.n}{\pi.S_{sy}} \right)^{0.5} \quad (44)$$

$S_{sy}$  = Resistencia a la fluencia en corte (N/mm<sup>2</sup>).

$n$  = Factor de seguridad.

$V$  = Fuerza cortante (N).

$d$  = Diámetro del pasador (mm).

#### b) Esfuerzo cortante por torsión

$$d = 2 \left( \frac{2.T}{\pi.S_y} \right)^{1/3} \quad (45)$$

$S_y$  = Resistencia a la fluencia (N/mm<sup>2</sup>).

$T$  = Torque (N.m).

$d$  = Diámetro del pasador (mm).

A continuación, se procede a dimensionar los tornillos de acuerdo con las ecuaciones 44 y 45.

## 7.2 Dimensionamiento de perfiles

#### a) Diagrama de fuerza cortante y momento flector

Se analiza los perfiles que están sometidos a mayor carga de flexión, como el perfil fijo para el movimiento de hombros y perfil base de cadera. Los perfiles deberán ser de menores dimensiones posibles para reducir el peso en las diferentes partes.

$$\sigma_m = \frac{M_{max}}{S} \quad (46)$$

**b) Cálculo de columnas mediante carga crítica de Euler**


Para dimensionar los perfiles de la columna, se analiza mediante la carga crítica de Euler.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{min}}{L_e^2} \quad (47)$$

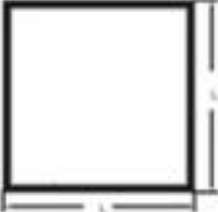
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \frac{1}{12} \cdot b^4}{L_e^2} \quad (48)$$

$$b = \sqrt[4]{\frac{12 \cdot P_{cr} \cdot L_e^2}{\pi^2 \cdot E}} \quad (49)$$

**c) Elección de los perfiles a usar**



**Tubos cuadrados**



Referencia	Lado		Espesor mm	Peso kg/m
	Milímetros	Pulgadas		
1014	44.45	1 3/4	1.90	0.875
1015	50.80	2	2.00	1.058
1286	25.40	1	1.80	0.461
1386	38.10	1 1/2	1.80	0.708
1466	22.20	7/8	1.00	0.231
1583	38.10	1 1/2	1.20	0.480
1714	25.40	1	1.30	0.340
1852	50.80	2	1.40	0.750
1854	31.75	1 1/4	1.10	0.366
1855*	25.40	1	1.30	0.412
1902	101.60	4	3.20	3.395
1903	101.60	4	2.30	2.457
1906	76.20	3	2.00	1.590
1981	17.00	2/3	1.00	0.162
2036	25.40	1	1.10	0.290
2439	19.00	3/4	1.10	0.214
2856	19.00	3/4	1.00	0.195

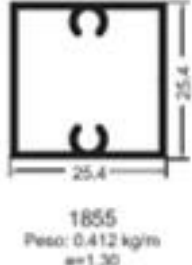


Figura 111. Perfiles de aluminio de la empresa CEDAL. Fuente: [27]

**7.3 Dimensionamiento de accesorios de extremidad superior**

Con la fórmula 44 y 45 se procede a dimensionar los tonillos de las extremidades superiores.

Tabla 29. Dimensionamiento de tornillo por cortante en extremidades superiores. Fuente: [Autores].

<b>Dimensionamiento de tornillo por cortante en brazo</b>					
[Material: Acero inoxidable 12.9]; [F.S: (n=2)]					
Junta	F (N)	V (N)	Ssy (N/mm <sup>2</sup> )	d (mm)	Tornillo
JOINT 2	54	27	600	0,34	ISO 7379-4-M4
JOINT 3	31	15,5	600	0,26	ISO 7379-4-M4
JOINT 4	26	13	600	0,23	ISO 7379-4-M4
JOINT 5	24	12	600	0,23	ISO 7379-4-M4
JOINT 6	23	11,5	600	0,22	ISO 7379-4-M4
JOINT 7	9	4,5	600	0,14	ISO 7379-4-M4
JOINT 8	9	4,5	600	0,14	ISO 7379-4-M4

<b>Dimensionamiento de tornillo por cortante en antebrazo</b>					
Junta	F (N)	V (N)	Ssy (N/mm <sup>2</sup> )	d (mm)	Tornillo
JOINT 13	17,5	8,75	600	0,19	ISO 7379-4-M4
JOINT 14	11,5	5,75	600	0,16	ISO 7379-4-M4
JOINT 17	30	15	600	0,25	ISO 7379-4-M4
JOINT 22	11,5	5,75	600	0,16	ISO 7379-4-M4
JOINT 31	11,7	5,85	600	0,16	ISO 7379-4-M4
JOINT 43	12,6	6,3	600	0,16	ISO 7379-4-M4
JOINT 44	13	6,5	600	0,17	ISO 7379-4-M4

Tabla 30. Dimensionamiento de tornillo por torsión en extremidades superiores. Fuente: [Autores].

<b>Dimensionamiento de tornillos por torsión en brazo</b>			
[Material: Acero inoxidable 12.9]			
Junta	T (N.mm)	d (mm)	Tornillo
JOINT 2	600	1,37	ISO 7379-8-M4
JOINT 3	420	1,21	ISO 7379-8-M4
JOINT 4	190	0,93	ISO 7379-8-M4
JOINT 5	290	1,07	ISO 7379-8-M4
JOINT 6	200	0,95	ISO 7379-8-M4
JOINT 7	190	0,93	ISO 7379-8-M4
JOINT 8	670	1,42	ISO 7379-8-M4

<b>Dimensionamiento de tornillo por torsión en antebrazo</b>			
Junta	T (N.mm)	d (mm)	Tornillo
JOINT 13	2950	2,321942838	ISO 7379-8-M6
JOINT 14	3000	2,334987734	ISO 7379-8-M6
JOINT 17	5600	2,875015526	ISO 7379-8-M6
JOINT 22	2300	2,137076805	ISO 7379-8-M6
JOINT 31	1900	2,005220114	ISO 7379-8-M4

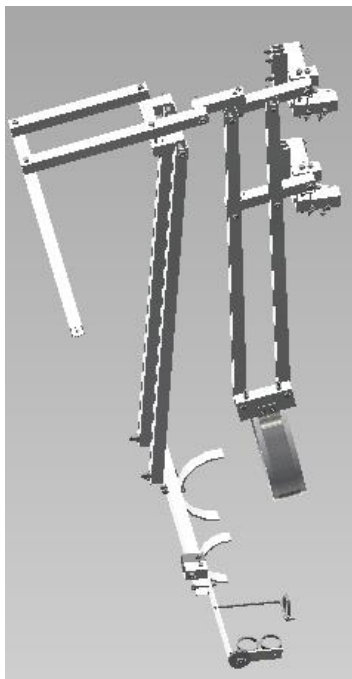
En el dimensionamiento de los tornillos de las extremidades superiores, se obtuvo valores más altos en los cálculos de carga cortante por torsión, por lo tanto, utilizaremos estos datos y consideramos un factor de seguridad 2, los tornillos de fijación ISO 7379 están en el anexo 10 en donde se elegirá la longitud dependiendo las dimensiones de los perfiles a unir.

Las extremidades superiores del exoesqueleto COGA tiene 3 GDL que son:

- Rotación externa – interna:  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .
- Aducción y abducción:  $0^\circ$  a  $155^\circ$ .
- Flexo extensión:  $0^\circ$  a  $155^\circ$ .

Y la estructura del antebrazo tiene 1 GDL, permitiendo realizar movimiento de flexo extensión de  $0^\circ$  a  $155^\circ$ .

En la figura 113 se puede observar la extremidad superior del exoesqueleto, en las extensiones del antebrazo, se encuentra situado el sistema de control de los dedos del exoesqueleto que es realizado mediante tensión de cable.



*Figura 112. Extremidad superior de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].*

#### **7.4 Dimensionamiento de accesorios en extremidad inferior**

Con la fórmula 44 y 45 se procede a dimensionar los tonillos de las extremidades superiores.

Tabla 31. Dimensionamiento de tornillo por cortante en extremidades inferiores. Fuente: [Autores].

<b>Dimensionamiento de pasador por cortante de cadera</b>					
Junta	F (N)	V (N)	Ssy (N/mm2)	d (mm)	Tornillo
JOINT 11	29,5	14,75	600	0,25	ISO 7379-4-M4
JOINT 15	22,5	11,25	600	0,22	ISO 7379-4-M4
JOINT 16	24	12	600	0,23	ISO 7379-4-M4
JOINT 17	17,5	8,75	600	0,19	ISO 7379-4-M4
JOINT 18	35	17,5	600	0,27	ISO 7379-4-M4
JOINT 20	24	12	600	0,23	ISO 7379-4-M4
<b>Dimensionamiento de pasador por cortante de unión de muslo con cadera</b>					
Junta	F (N)	V (N)	Ssy (N/mm2)	d (mm)	Tornillo
Pierna - cadera	1255	627,5	600	1,63	ISO 7379-4-M4
<b>Dimensionamiento de pasador por cortante de rodilla</b>					
Junta	F (N)	V (N)	Ssy (N/mm2)	d (mm)	Tornillo
Rodilla	1252	626	600	1,63	ISO 7379-4-M4

Tabla 32. Dimensionamiento de tornillo por torsión en extremidades inferiores. Fuente: [Autores].

<b>Dimensionamiento de pasador por torsión en cadera</b>			
Junta	T (N.mm)	d (mm)	Tornillo
JOINT 11	8550	3,310545467	ISO 7379-8-M6
JOINT 15	3500	2,458103698	ISO 7379-8-M6
JOINT 16	0	0	
JOINT 17	3250	2,39812586	ISO 7379-8-M6
JOINT 18	6400	3,005874494	ISO 7379-8-M6
JOINT 20	0	0	
<b>Dimensionamiento de pasador por torsión en cadera</b>			
Junta	T (N.mm)	d (mm)	Tornillo
JOINT 11	26000	4,79625172	ISO 7379-8-M6
<b>Dimensionamiento de pasador por torsión en rodilla</b>			
Junta	T (N.mm)	d (mm)	Tornillo
JOINT 11	760	1,477458812	ISO 7379-8-M4

En el dimensionamiento de los tornillos de las extremidades inferiores, se obtuvo valores más altos en los cálculos de carga cortante por torsión, por lo tanto, utilizaremos estos datos y consideramos un factor de seguridad 2.

La cadera del exoesqueleto COGA presenta 3 GDL que se indica a continuación:

- Movimiento de flexo extensión: 0° a 90°.
- Movimiento de aducción y abducción: 0° a -45° y 0° a 90° respectivamente.
- Movimiento de rotación interna y externa: 0° a -30° y 0° a 60° respectivamente.

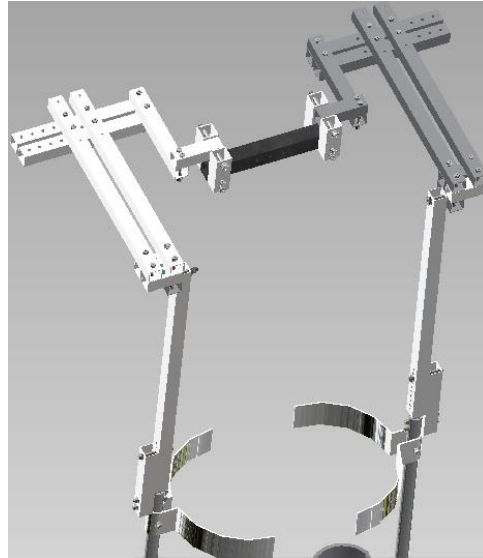


Figura 113. Cadera y muslo de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].


#### 7.4.1 Adquisición de zancos industriales

La universidad Técnica de Ambato en el año 2019 diseño y construyo zancos industriales que soportan una carga de 88 kg.m con un presupuesto de \$520,80, pero en el mercado existen zancos comerciales que soportan mayor carga y con menores costos, por lo cual se decide comprar los zancos, hay mucha variedad de modelos en eBay que ofrecen en un tiempo de entrega de 10 días.

Tabla 33. Adquisición de zancos industriales. Fuente: [Autores].

Adquisición de zancos				
Producto	Empresa	Lugar	Contacto	Precio
Zancos Marca Dura Stilts, 45- 77cm Alto		Pichincha Quito	Mauricio Toapanta Celular: 0992569124 Correo: <a href="mailto:ventastodoec@hotmail.com">ventastodoec@hotmail.com</a> Página de publicación: [33]	\$425 Envío gratis a todo el país



Aluminio durable negro 18" - 30" Drywall Zancos		E.E.U.U	Celular: +1 240-442-2943	Subtotal: \$136.79
	The Discount Duos	12439 Garrett Highway 21550 Oakland (Maryland)	Página de publicación: [34]	Envío: \$76.53
				Costos de importación: \$104.40
				Total: \$317.72

Los zancos comerciales tienen un peso de 6.5 kg.m y soporta una carga máxima de 104.3 kg.m, el mecanismo permite regular una altura de 45.72 cm hasta 76.2 cm.

### 7.5 Dimensionamiento de accesorios de mano

Con las simulaciones realizadas determinamos que el resorte debe tener una longitud máxima con carga de 32 mm y debe soportar el peso de 0.022kg, resultando electo un muelle de tracción de alambre de piano E00940100620M, se puede observar en anexos

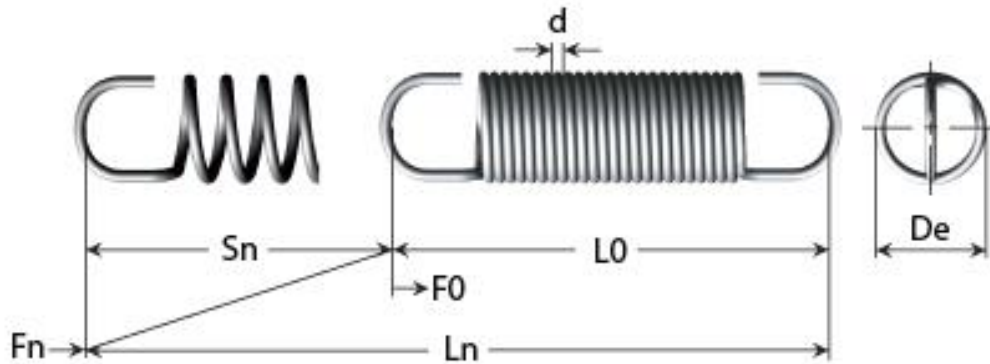


Figura 114. Muelle de tracción muelle Ay B - alambre de piano. Fuente: [35]

La mano del exoesqueleto COGA tiene 3 GDL, al estirar el alambre se contraerá de dedos de forma simultánea, el dedo pulgar se mueve de forma individual, el ángulo de movimiento es de 0° a 90°, si se varían los ángulos de movimiento el dedo tendrá otras trayectorias y en procesos de repetición los eslabones no seguirán las trayectorias deseadas. De igual manera el movimiento de la muñeca es realizado mediante conexión de polea con alambre presentando 1 GDL.



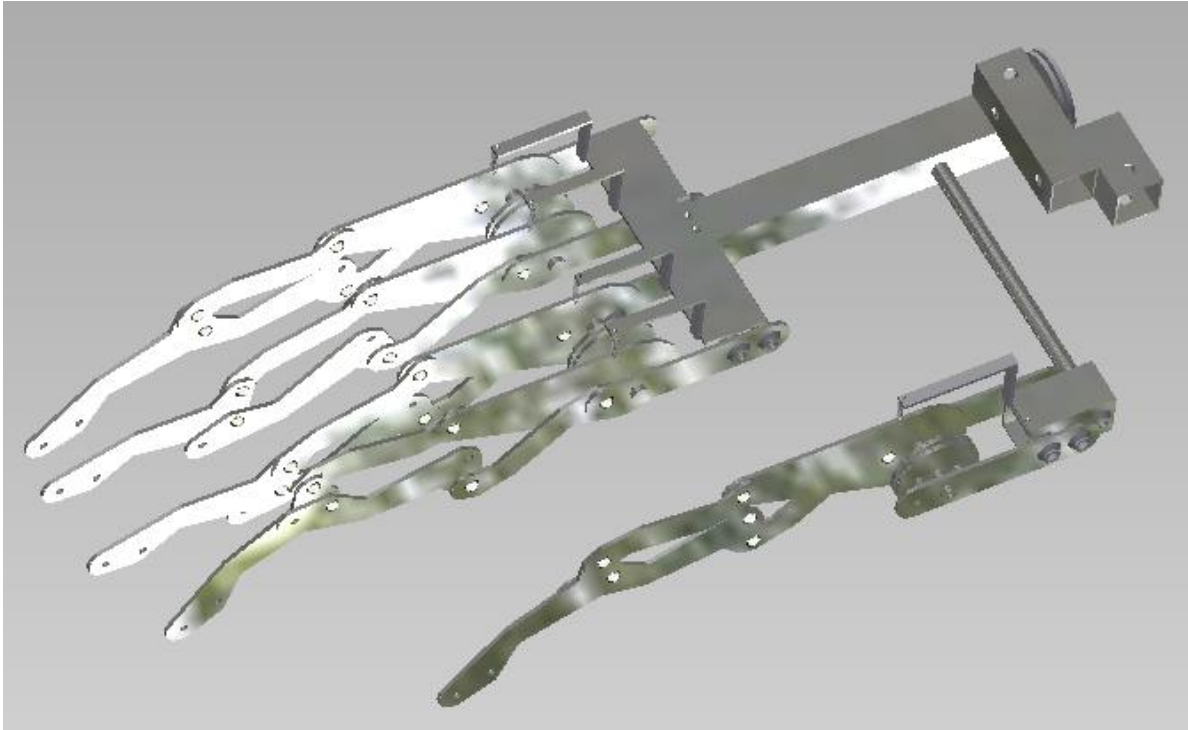


Figura 115. Mano de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].

## 7.6 Dimensionamiento de accesorios de cabeza

La cabeza tiene 3 GDL, para lo cual debe colocar una rotula de bola, en la figura 118 se puede observar la rótula KG60, que permite rotar hasta 30° de inclinación, esto restringe los movimientos de flexo extensión, inclinación lateral y rotación a 30°.



Figura 116. Rotula de bola. Fuente:[36].

La rotula de bola actúa como cuello permitiendo la movilidad de la cabeza del exoesqueleto COGA, en la figura 119 se puede observar que la estructura casi en su totalidad es de aluminio ya que se necesita el menor peso posible.

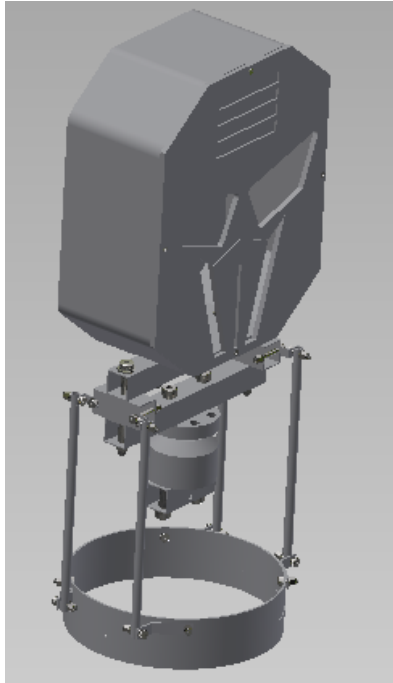
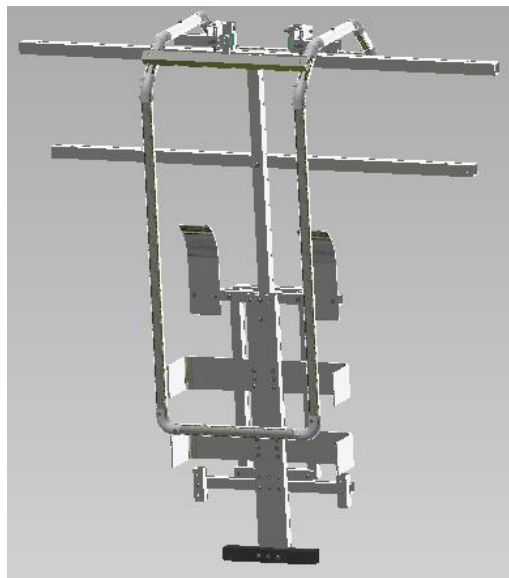


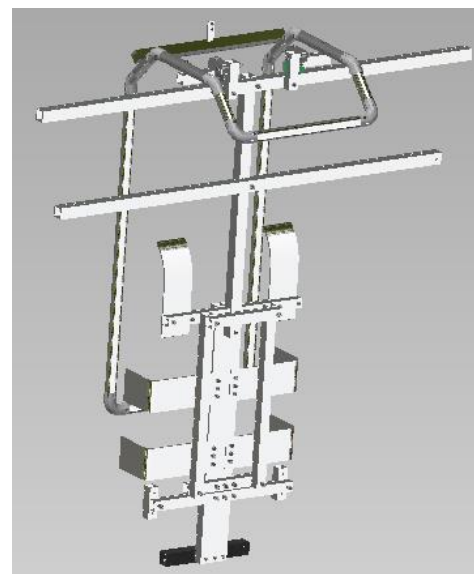
Figura 117. Cabeza de exoesqueleto mecánico COGA. Fuente: [Autores].

### 7.7 Columna de exoesqueleto

En la figura 120 (a) se puede observar la estructura de protección del exoesqueleto GARON, es el único mecanismo del tronco que tiene movimiento y en la figura 120 (b) se puede observar la columna la cual cuenta con una parrilla que sirve de fijación con la columna de la persona.



(a)



(b)

Figura 118. (a) Vista frontal de tronco de exoesqueleto COGA; (b) Vista posterior de tronco de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].

## 7.8 Exoesqueleto COGA

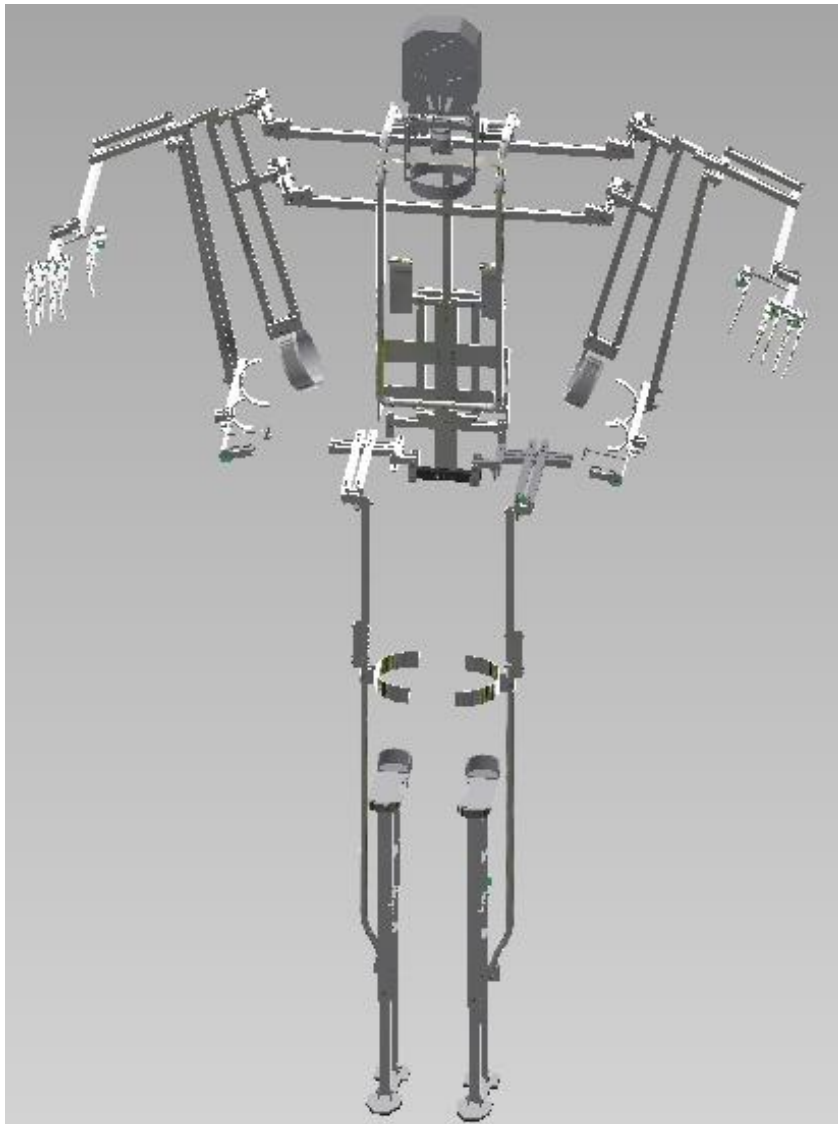


Figura 119. Exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].

Tabla 34. Especificaciones técnicas de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].

Especificaciones técnicas de exoesqueleto COGA	
Altura	$h_{min} = 314 \text{ cm}; h_{max} = 364 \text{ cm}$
Grados de libertad	40

## 8 Planos y detalles del exoesqueleto

En la figura 119 se presenta el conjunto del exoesqueleto COGA, mismo que está conformado por 5 subconjuntos, los cuales se pueden identificar en el anexo 11.

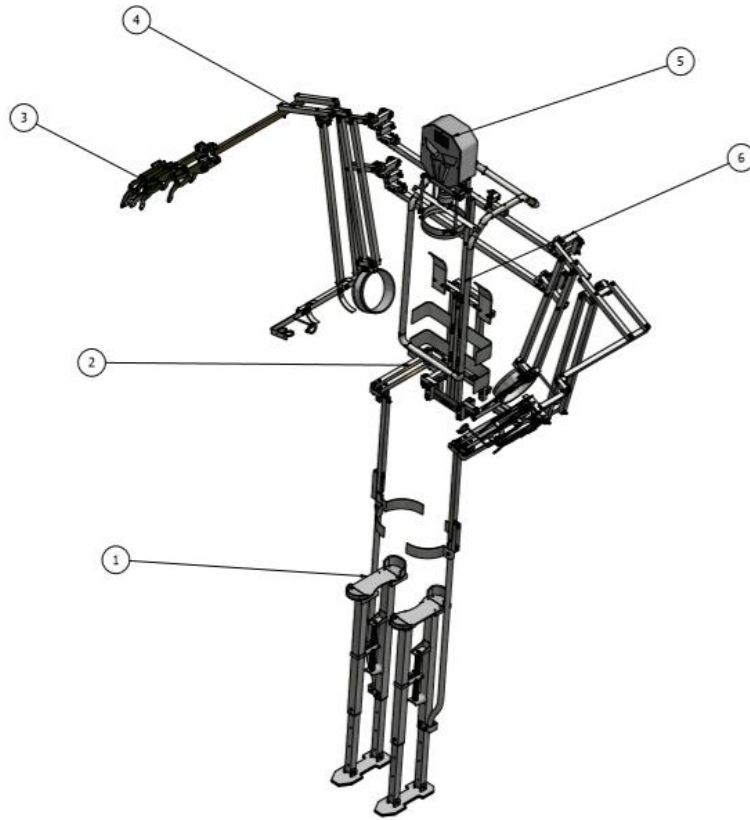


Figura 120. Conjunto de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].

En la figura 120 se presenta el subconjunto de extremidad inferiores del exoesqueleto COGA, mismo que está conformado por 14 particulares, los cuales se pueden identificar en el anexo 11.

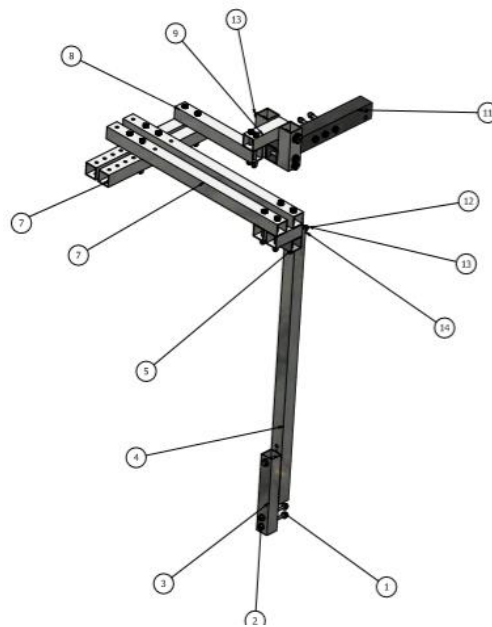


Figura 121. Subconjunto de extremidades inferiores de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].

En la figura 121 se presenta el subconjunto de tronco del exoesqueleto COGA, mismo que está conformado por 28 particulares, los cuales se pueden identificar en el anexo 11.

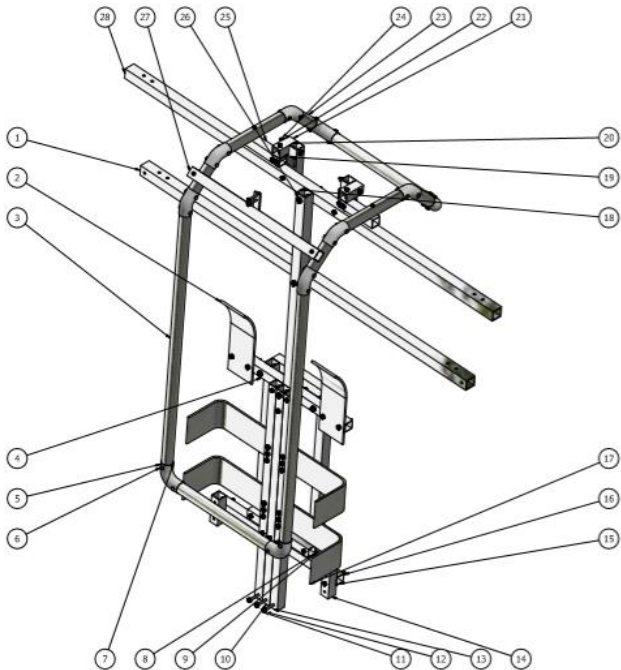


Figura 122. Subconjunto de tronco de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].

En la figura 122 se presenta el subconjunto de extremidad superior del exoesqueleto COGA, mismo que está conformado por 38 particulares, los cuales se pueden identificar en el anexo 11.

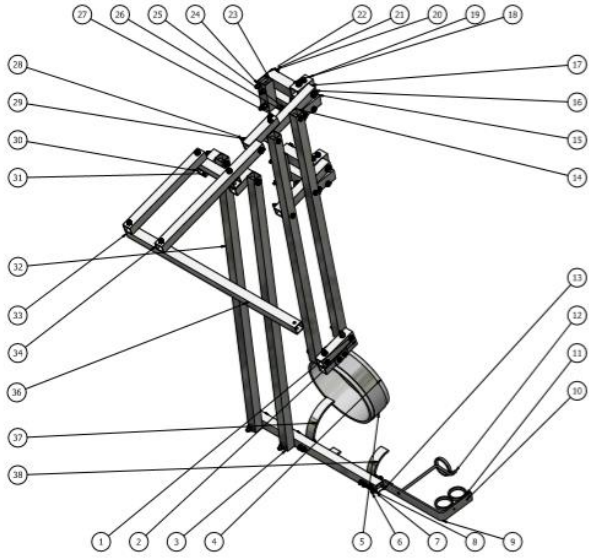


Figura 123.. Subconjunto de extremidades superiores de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].

En la figura 123 se presenta el subconjunto de mano del exoesqueleto COGA, mismo que está conformado por 24 particulares, los cuales se pueden identificar en el anexo 11.

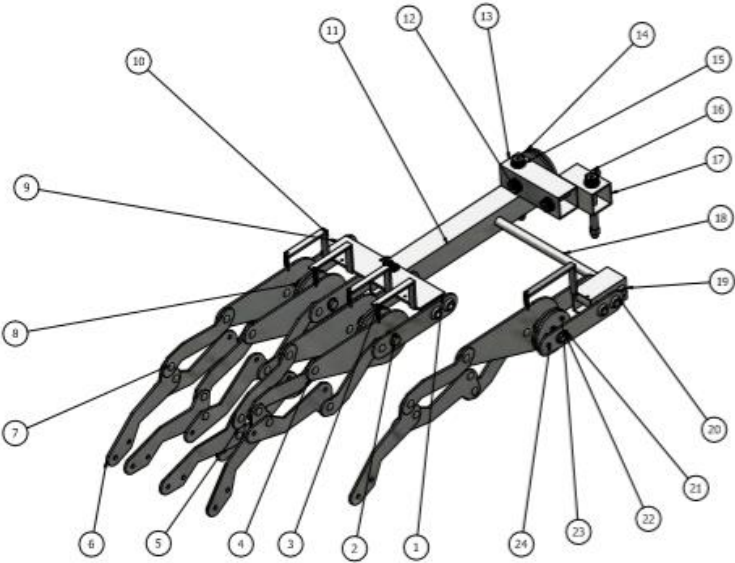


Figura 124.. Subconjunto de mano de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].

En la figura 124 se presenta el subconjunto de cabeza del exoesqueleto COGA, mismo que está conformado por 19 particulares, los cuales se pueden identificar en el anexo 11.

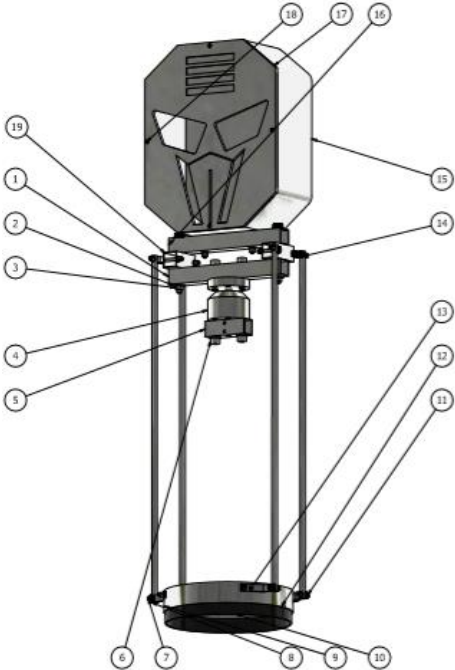


Figura 125. Subconjunto de cabeza de exoesqueleto COGA. Fuente: [Autores].

## **9 Conclusiones y Recomendaciones**

### **9.1 Conclusiones**

Al finalizar el proyecto de titulación, se cumplió con todos los objetivos planteados en el anteproyecto de una manera satisfactoria.

Con el estudio realizado de los diferentes modelos de exoesqueletos mecánicos existentes en el mercado, se realizó una comparativa en base al planteamiento de distintos factores que obedecen a ponderaciones, lo que permitió seleccionar la mejor alternativa.

Con el análisis de la biomecánica humana y los criterios de las medidas antropométricas del cuerpo humano que depende de la estatura de la persona que manipulará el exoesqueleto, se definió los grados de libertad que deben tener los diferentes mecanismos a diseñar y sus dimensiones específicas.

La estructura del exoesqueleto mecánico fue analizada mediante un modelo matemático de la cinemática directa, lo que permitió establecer la movilidad y su funcionamiento.

Mediante la utilización de la herramienta informática MSC Adams, que es parte del software ADAMS View, se determinó las posiciones finales, velocidad y aceleración angular de los eslabones, además de determinar las fuerzas reaccionantes y los torques presentes en las juntas.

Para el diseño del modelo de exoesqueleto propio se consideró todos los parámetros de modelación establecidos en el software a fin de contar con resultados confiables y que estén muy próximos a la realidad.

En vista de que el exoesqueleto diseñado en el presente proyecto es el resultado de la conjunción de distintos modelos existentes en el mercado, resulta único por lo que se le denominó como Exoesqueleto COGA, que significa una identificación de sus autores.

Para asegurar la futura construcción se procedió con la elaboración de todos los planos constructivos del exoesqueleto, los cuales poseen detalles constructivos, materiales, rugosidades, etc.

### **9.2 Recomendaciones**

Se recomienda que, al realizar la construcción del exoesqueleto, es necesario revisar la cinemática establecida en el presente proyecto, para identificar las juntas móviles y fijas.

Se recomienda que, al construir la mano del exoesqueleto, los eslabones se encuentren en la posición y orientación designada en la figura 114, ya que, si los eslabones tienen diferente orientación en un proceso de repetición de movimiento de flexo extensión, los eslabones tomaran otras trayectorias.

Se recomienda para trabajos futuros, revisar la biomecánica del cuerpo humano, ya que esta es la base para incrementar los grados de libertad al exoesqueleto, lo que significa una mayor movilidad.

Antes de utilizar el exoesqueleto, se recomienda revisar el ajuste de todos los mecanismos que conforman el exoesqueleto a fin de evitar accidentes.

Al respecto del presente proyecto no se puede hacer recomendación alguna, por cuanto, es más conveniente establecerlas en el momento en el que se proceda con la implementación, montaje y puesta a punto de todos los equipos.

El Grupo de Investigación y Desarrollo en Simulación, Optimización y Toma de Decisiones GID-STD, asume el reto de Diseñar un Exoesqueleto con fines didácticos a ser utilizado con los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica por lo que se desarrolla el proyecto motivo del presente documento; además se aspira lo antes posible propiciar la construcción del exoesqueleto diseñado.

El Grupo de investigación GID-STD ha realizado algunos trabajos de diseño mecánico y la construcciones de ciertos dispositivos, mismos que han sido realizados a través de proyectos de fin de carrera [44]–[48] previa la obtención del título de Ingeniero Mecánico de la UPS Cuenca, los cuales se recomienda revisarlos en el caso que se esté desarrollando algún proyecto de diseño y construcción.

## 10 Bibliografía

- [1] «Cuerpo humano - Vikidia». [En línea]. Disponible en: [https://es.wikidia.org/wiki/Cuerpo\\_humano](https://es.wikidia.org/wiki/Cuerpo_humano). [Accedido: 16-dic-2019].
- [2] M. Chimborazo, «MIEMBROS SUPERIORES», *Maritza Chimborazo Estrella*, 09-feb-2015. [En línea]. Disponible en: <https://maritzachimborazo.wordpress.com/2015/02/09/miembros-superiores/>. [Accedido: 27-ago-2019].
- [3] «Actuadores - Manos - Robots Argentina». [En línea]. Disponible en: [http://robots-argentina.com.ar/Actuadores\\_manos.htm](http://robots-argentina.com.ar/Actuadores_manos.htm). [Accedido: 27-ago-2019].
- [4] R. Cabas, «Metodología de diseño de manos robóticas basada en los estados de su sistema accionador», p. 229.
- [5] P. B. R. Analia Morales Sandra, Olmos Cynthia Y. Valenzuela, «Aplicaciones de Tic: INSTRUMENTOS MARAVILLOSOS», *Aplicaciones de Tic*, 14-oct-2009. [En línea]. Disponible en: <http://aplicacionesdetic.blogspot.com/2009/10/instrumentos-maravillosos.html>. [Accedido: 27-ago-2019].
- [6] «自ら乗り込み手足のように動かせる巨大外骨格アーマー「スケルトニクス」», *bouncy / バウンシー*, 17-ene-2018. [En línea]. Disponible en: <https://bouncy.news/7684>. [Accedido: 27-ago-2019].
- [7] Gunjap, «[CEATEC JAPAN 2014] Mechanical Suit Skeletonics! Do you feel the Future? Photoreport No.20 Big Size Images, Full Technical data Info! | GUNJAP». [En línea]. Disponible en: <http://www.gunjap.net/site/?p=208688>. [Accedido: 27-ago-2019].



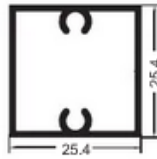
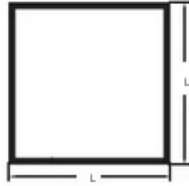
- [8] M. A Sobota, Wolf, Heildeger, Trantum, Jensen, García J. D, Jiménez J, López, «MIEMBRO INFERIOR Las funciones del miembro inferior principalmente son: Locomoción. Soporte de Peso. Mantenimiento del Equilibrio. - ppt video online descargar». [En línea]. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/10604032/>. [Accedido: 22-ago-2019].
- [9] L. E. Contreras, «Biomechanical Analysis Of Human Gait Trough Modelling Techniques», p. 7.
- [10] «Anatomía de huesos de la cadera humana — Ilustración, cuidado de la salud - Stock Photo | #160564464». [En línea]. Disponible en: <https://focusedcollection.com/sp/160564464/stock-photo-human-hip-bones-anatomy.html>. [Accedido: 16-dic-2019].
- [11] «How Running Helps Define Abs», *The Active Times*, 09-ago-2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.theactivetimes.com/run-race/n/how-running-helps-define-abs>. [Accedido: 28-ago-2019].
- [12] «Enciclopedia Salud: Definición de Extremidad inferior : huesos». [En línea]. Disponible en: <https://www.encyclopediasalud.com/definiciones/extremidad-inferior-huesos>. [Accedido: 28-ago-2019].
- [13] «プロダクト | スケルトニクス株式会社 - 外骨格ロボットの開発・製造», スケルトニクス株式会社. [En línea]. Disponible en: <https://skeletonics.com/product/>. [Accedido: 27-ago-2019].
- [14] akihabaranews, *Skeletonics Close-Up HD at Maker Faire Tokyo 2013 - AkihabaraNews.com*. 2013.
- [15] «133536998 Biomecanica de la marcha humana patologica pdf», *StuDocu*. [En línea]. Disponible en: <https://www.studocu.com/en/document/universidad-nacional-autonoma-de-mexico/fisioterapia-neurologica/summaries/133536998-biomecanica-de-la-marcha-humana-patologica-pdf/2868224/view>. [Accedido: 28-ago-2019].
- [16] «OTAKU GANGSTA», *OTAKU GANGSTA*. [En línea]. Disponible en: <https://otakugangsta.com/post/169458926155>. [Accedido: 28-ago-2019].
- [17] «Pinterest», *Pinterest*. [En línea]. Disponible en: <https://www.pinterest.com/pin/864268984722964341/>. [Accedido: 28-ago-2019].
- [18] «Compre 2018 Nuevos Zancos De Aluminio Para Herramientas 24 A 40 Pulgadas De Tablarroca De Pulgadas Ajustables Para Grabar Pintor Pintor Grabar Plata A \$395.26 Del Hero\_zhangpeng | DHgate.Com», *DHgate*. [En línea]. Disponible en: <https://es.dhgate.com/product/2018-new-aluminum-tool-stilts-24-quot-to/432777090.html>. [Accedido: 28-ago-2019].
- [19] «The ultimate exoskeleton “Skeletonics (Sukerutonikusu)” is most comprehensive walking demonstration of the venue of the RoboCup 2017», *GIGAZINE*. [En línea]. Disponible en: [http://gigazine.net/gsc\\_news/en/20170727-skeletonics-arrive-rc2017/](http://gigazine.net/gsc_news/en/20170727-skeletonics-arrive-rc2017/). [Accedido: 16-dic-2019].
- [20] «This Exoskeleton Doesn’t Just Look Cool, It Moves Smoothly», *MobyGeek.com*, 03-dic-2019. [En línea]. Disponible en: <https://mobygeek.com/post-10432>. [Accedido: 16-dic-2019].
- [21] W. T. Singleton, «Definición y campo de actividad», p. 110.
- [22] J. Martínez, «Diseño e implementación de un brazo robot para discapacitados». [En línea]. Disponible en: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/67638/53357626H\\_TFG\\_14675684216276498675101676293971.pdf?sequence=3](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/67638/53357626H_TFG_14675684216276498675101676293971.pdf?sequence=3). [Accedido: 20-nov-2019].
- [23] S. Roberts y S. A. Falkenburg, *Biomechanics: problem solving for functional activity*. St. Louis: Mosby Year Book, 1992.
- [24] C. Arévalo y L. Alfredo, «Propuesta de un modelo mecánico y análisis cinemático de un exoesqueleto de seis grados de libertad para personas con daño en la médula espinal», p. 102.
- [25] Sosa-Méndez, «Diseño de un Prototipo de Exoesqueleto para Rehabilitación del Hombro», *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 2016.

- [26] D. Arellano y J. Y. Mendiola, «Mediciones antropométricas sin contactos a partir de fotografías», p. 5, 2009.
- [27] «Home | Cedal». [En línea]. Disponible en: <http://www.cedal.com.ec/>. [Accedido: 16-dic-2019].
- [28] J. J. Craig, *Robótica*. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación, 2006.
- [29] C. H. G. Valdivia, A. B. Ortega, M. A. O. Salazar, y H. R. A. Rivera, «Modelado y Simulación de un Robot Terapéutico para la Rehabilitación de Miembros Inferiores», *Rev. Ing. Bioméd.*, p. 10.
- [30] J. L. Pons, *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*. John Wiley & Sons, 2008.
- [31] C. Barrera, «Fundamentos de robotica».
- [32] E. Universitat Politècnica de València, «Universitat Politècnica de València», *Ing. Agua*, vol. 18, n.º 1, p. ix, sep. 2014, doi: 10.4995/ia.2014.3293.
- [33] «Zancos Marca Dura Original, 45-77cm Alto - U\$S 425,00». [En línea]. Disponible en: <https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-423477078-zancos-marca-dura-original-45-77cm-alto-JM>. [Accedido: 15-ene-2020].
- [34] «Aluminio durable negro 18" -30" Drywall Zancos», *eBay*. [En línea]. Disponible en: [https://www.ebay.com/itm/Durable-Black-18-30-Drywall-Aluminum-Stilts-/223696207990?\\_ul=EC](https://www.ebay.com/itm/Durable-Black-18-30-Drywall-Aluminum-Stilts-/223696207990?_ul=EC). [Accedido: 15-ene-2020].
- [35] «Cesta». [En línea]. Disponible en: <https://www.muelles-industriales.es/checkout/cart/>. [Accedido: 09-ene-2020].
- [36] «Tecnología de manipulación 3 - ZIMMER GROUP - Catálogo PDF | Documentación técnica | Brochure». [En línea]. Disponible en: <https://pdf.directindustry.es/pdf/zimmer-group/tecnologia-manipulacion-3/14534-886363.html#open>. [Accedido: 08-ene-2020].
- [37] «17\_cedal-tubos-redondos.pdf».
- [38] «Tuberías-y-accesorios-de-PVC-y-PE-BD-uso-agrícola.pdf».
- [39] «US \$0.85 | Bicicleta de carretera MTB bicicleta engranaje fijo bicicleta cambio de línea de cambio Cambio de engranaje Cable de freno Cable interno de núcleo línea de velocidad de acero SCX005-in Freno de bicicleta from Deportes y entretenimiento on AliExpress», *aliexpress.com*. [En línea]. Disponible en: [https://es.aliexpress.com/item/32362389862.html?src=ibdm\\_d03p0558e02r02&sk=&aff\\_platform=&aff\\_trace\\_key=&af=&cv=&cn=&dp=](https://es.aliexpress.com/item/32362389862.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=). [Accedido: 16-dic-2019].
- [40] «ANILLOS SEEGUER MEDIDAS.pdf».
- [41] *eaweb.ec*, «Dismetal - PLANCHAS DE ALUMINIO LISO». [En línea]. Disponible en: <https://dismetal.ec/productos/planchas/aluminio-liso>. [Accedido: 09-ene-2020].
- [42] «Cesta». [En línea]. Disponible en: <https://www.muelles-industriales.es/checkout/cart/>. [Accedido: 09-ene-2020].
- [43] «ISO 7379 Tornillos de fijación | Eles+Ganter». [En línea]. Disponible en: <https://www.eles-ganter.es/es/esp/Elementos-para-maquinaria--Tornillos-de-fijacion--ISO7379?fbclid=IwAR2chtEVzJFo7fHjDyo3mCSIhKABmgSDqRRwLrFSyrswdW-57tFG5kbBIhk>. [Accedido: 07-ene-2020].
- [44] A. A. Márquez Quizhpi, J. P. Ulloa Montero, y N. G. Jara Cobos, «Diseño de un sistema de extracción de polvo y viruta de madera para la carpintería de la Fundación Salesiana " PACES"», B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2018.
- [45] M. Palomeque, I. Valdez, y N. G. Jara, «Diseño de una central hidroeléctrica para abastecer la demanda del consumo eléctrico de plantaciones Malima CIA. LTDA», B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2019.
- [46] C. P. Campoverde Quito, P. I. Pinos Zhingre, y N. G. Jara Cobos, «Diseño e implementación de un sistema autónomo de enfriamiento de agua con control de pH y agentes contaminantes, para el proceso de refrigeración en la sección de la Tubera Doble de la Empresa Continental Tire Andina SA», B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2016.

- [47] W. O. Sanmartin Hurtado, J. M. Ramón Benenaula, y N. G. Jara Cobos, «Diseño y construcción de un homogeneizador por inmersión de alto cizallamiento, para la empresa FORMALAB», B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2016.
- [48] F. H. Calderon Neira y N. G. Jara Cobos, «Implementación de un banco de ensayos tipo túnel de viento para la selección de ventiladores de refrigeradores domésticos en la UPS Cuenca», B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2018.

# ANEXOS

**Anexo 1.** Perfiles de aluminio de la empresa Cedal. Fuente: [27].



1855  
Peso: 0.412 kg/m  
e=1.30

Referencia	Lado		Espesor mm	Peso kg/m
	Milímetros	Pulgadas		
1014	44.45	1 3/4	1.90	0.875
1015	50.80	2	2.00	1.058
1286	25.40	1	1.80	0.461
1386	38.10	1 1/2	1.80	0.708
1466	22.20	7/8	1.00	0.231
1583	38.10	1 1/2	1.20	0.480
1714	25.40	1	1.30	0.340
1852	50.80	2	1.40	0.750
1854	31.75	1 1/4	1.10	0.366
1855*	25.40	1	1.30	0.412
1902	101.60	4	3.20	3.395
1903	101.60	4	2.30	2.457
1906	76.20	3	2.00	1.590
1981	17.00	2/3	1.00	0.162
2036	25.40	1	1.10	0.290
2439	19.00	3/4	1.10	0.214
2856	19.00	3/4	1.00	0.195

\* Tubo con tornillero

**Tubos esquineros**

Anexo 2. Tubos de aluminio de la empresa Cedal. Fuente: [37].

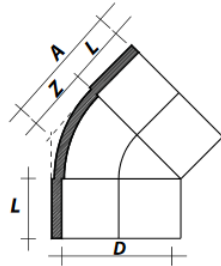


REFERENCIA	Diámetro (D)		Espesor (E) mm	Peso Kg/m
	Milímetros	Pulgadas		
1012	50.80	2	1.27	0.536
1013	76.20	3	1.27	0.810
1136	90.00	3 35/64	6.00	4.291
1148	9.52	3/8	1.14	0.081
1149	7.92	5/16	1.20	0.070
1157	17.90	45/64	1.07	0.153
1158	23.40	59/64	1.24	0.234
1167	101.60	4	1.27	1.085
1168	127.00	5	1.50	1.603
1169	152.40	6	1.65	2.12
1204	25.40	1	2.00	0.380
1254	32.00	1 17/64	2.00	0.511
1482	90.00	3 35/64	4.50	3.720
1600	101.60	4	4.50	3.247
1720	29.50	1 5/32	1.45	0.346
1721	38.35	1 33/64	1.65	0.516
1722	44.20	1 47/64	1.65	0.598
1723	55.80	2 13/64	1.65	0.761
1888	114.30	4 1/2	5.20	4.83

REFERENCIA	Diámetro (D)		Espesor mm	Peso Kg/m
	Milímetros	Pulgadas		
2303	33.40	1 5/16	4.50	1.107
2304	34.35	1 23/64	1.30	0.366
2465	38.10	1 1/2	2.77	0.833
2571	25.40	1	1.40	0.286
3627	50.20	1 31/32	2.10	0.860
3628	40.20	1 37/64	1.60	0.526
3629	24.75	31/32	1.70	0.334
3631	101.60	4	2.30	1.944

**Anexo 3.** Codo de 45° de la empresa Plastigama. Fuente: [38].

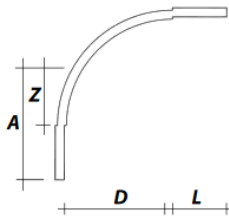
CODO E/C x 45°



CÓD	DIÁMETRO	A (mm)	L (mm)	Z (mm)
924895	20 mm	21	16	5
924986	25 mm	25	19	6
926686	32 mm	30	22	8
924904	40 mm	36	26	10
924908	50 mm	43	31	12
924912	63 mm	52	38	14
924913	75 mm	78	44	34
924917	90 mm	71	51	20
924983	110 mm	85	61	24
924886	125 mm	85	61	24
924888	140 mm	120	86	34
924890	160 mm	120	86	34
924893	200 mm	149	106	43
924897	225 mm	198	106	90

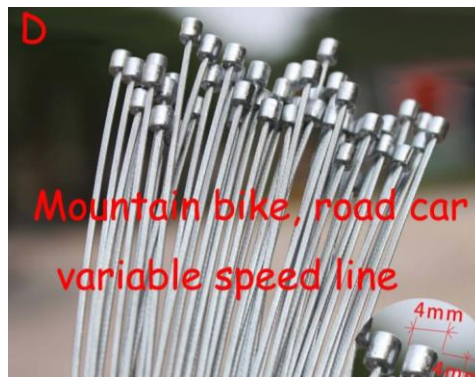
**Anexo 4.** Codo de 90° de la empresa Plastigama. Fuente: [38].

CODO E/C x 90°

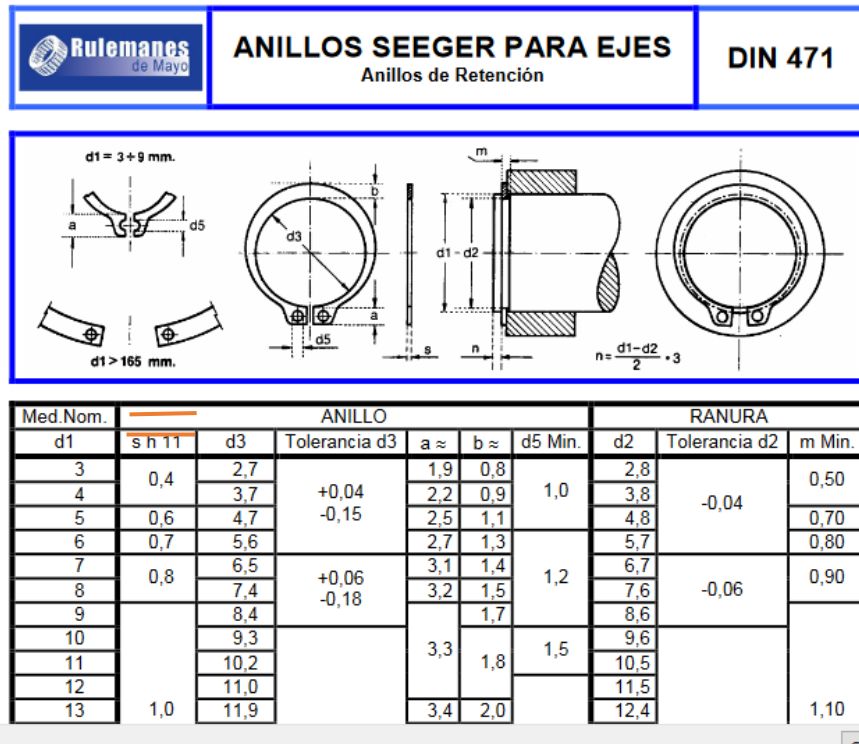


CÓD	DIÁMETRO	A (mm)	L (mm)	Z (mm)
924985	20 mm	27	16	11
924981	25 mm	32	19	14
924903	32 mm	39	22	17
924905	40 mm	47	26	21
924952	50 mm	57	31	26
924921	63 mm	70	38	33
924914	75 mm	85	44	39
924918	90 mm	97	51	46
924979	110 mm	105	58	54
924887	125 mm	117	61	56
924889	140 mm	150	128	56
924891	160 mm	178	180	81
924894	200 mm	207	220	101
924898	225 mm	235	245	115
924899	250 mm	265	281	130

**Anexo 5.** Cables de freno de bicicleta (4\*4\*1,2mm). Fuente:[39].



**Anexo 6.** Anillos seeger para ejes DIN 471. Fuente [40]



**Anexo 7.** Planchas de aluminio liso. Fuente: [41].

ESPESOR	DIMENSIONES		PESO
	ancho	largo	
mm	mm	mm	kg.
0.70	1220	2440	5.61
0.70	1000	2000	3.78
0.90	1220	2440	7.22
0.90	1000	2000	4.86
1.00	1220	2440	8.02
1.00	1000	2000	5.40
1.20	1220	2440	9.62
1.20	1000	2000	6.48
1.50	1220	2440	12.03
1.50	1000	2000	8.10
2.00	1220	2440	16.04
2.00	1000	2000	10.80
2.50	1220	2440	20.05
2.50	1000	2000	13.50
3.00	1220	2440	24.06
3.00	1000	2000	16.20

**Anexo 8.** Muelles de le empresa SODEMANN. Fuente: [42].






















d	De	Lo	Ln	Sn	Fn	F0	R	N° de stock	Esquema técnico	Comparar	Leer más	3D CAD	Stock	Ver precios - Añadir al carrito
Diámetro del alambre (mm)	Diámetro externo (mm)	Longitud sin carga (mm)	Longitud máx. con carga (mm)	Recorrido máximo (mm)	Carga máxima en N en Ln (N)	Fuerza inicial (N)	Constante del muelle (N/mm)							
0,25	2,39	11,18	26,16	14,98	2,67	0,22	0,16	E00940100440M					12	
0,25	2,39	12,70	31,24	18,54	2,67	0,22	0,14	E00940100500M					57	
0,25	2,39	15,75	40,64	24,89	2,67	0,22	0,11	E00940100620M					31	
0,25	2,39	19,05	50,80	31,75	2,67	0,22	0,07	E00940100750M					48	
0,25	2,39	22,35	59,18	36,83	2,67	0,22	0,05	E00940100880M					34	
0,25	2,39	25,40	68,33	42,93	2,67	0,22	0,05	E00940101000M					67	

**Anexo 9.** Rotula de bola. Fuente: [36]

Referencia	Datos técnicos					
	KG40	KG40ST	KG60	KG60ST	KG80	KG80ST
Angulo de giro [°]	30	30	30	30	30	30
Mx [Nm]	18	18	55	55	124	124
Fa [N]	7500	18000	15000	45000	28000	70000
Peso [kg]	0.1	0.3	0.3	0.9	0.8	2.3



**Anexo 10.** Tornillos de fijación ISO 7379. Fuente: [43].

	$d_1 f_9$	$d_2$	$l_1 + 0.25$	$d_3$	$l_2$	$l_3$	A/F			
Description	↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕		
ISO 7379-5-M4-25	5	M 4	25	9	8	4	2.5	7		
ISO 7379-5-M4-30	5	M 4	30	9	8	4	2.5	7		
ISO 7379-5-M4-40	5	M 4	40	9	8	4	2.5	10		
ISO 7379-6-M5-10	6	M 5	10	10	9.5	4.5	3	5		
ISO 7379-6-M5-12	6	M 5	12	10	9.5	4.5	3	6		
ISO 7379-6-M5-16	6	M 5	16	10	9.5	4.5	3	10		
ISO 7379-6-M5-20	6	M 5	20	10	9.5	4.5	3	10		
ISO 7379-6-M5-25	6	M 5	25	10	9.5	4.5	3	11		
ISO 7379-6-M5-30	6	M 5	30	10	9.5	4.5	3	11		

**Anexo 11.** Planos de exoesqueleto COGA.

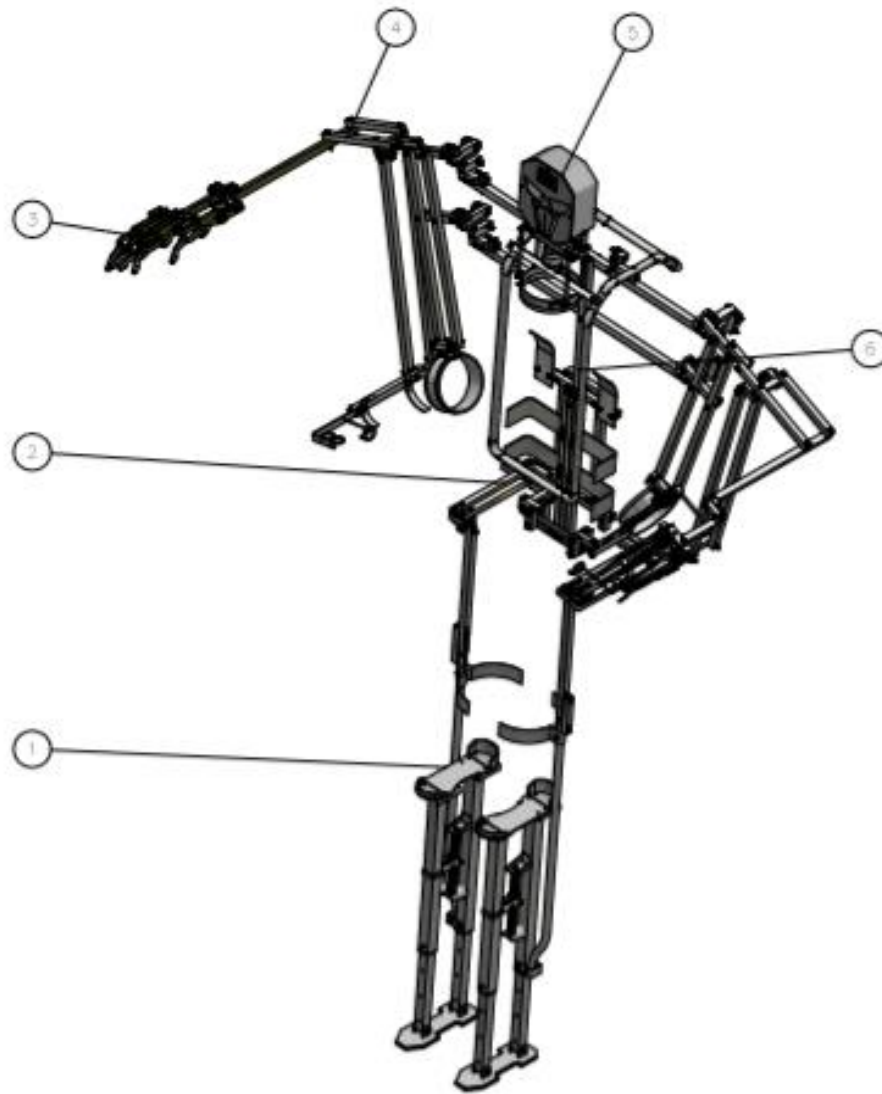
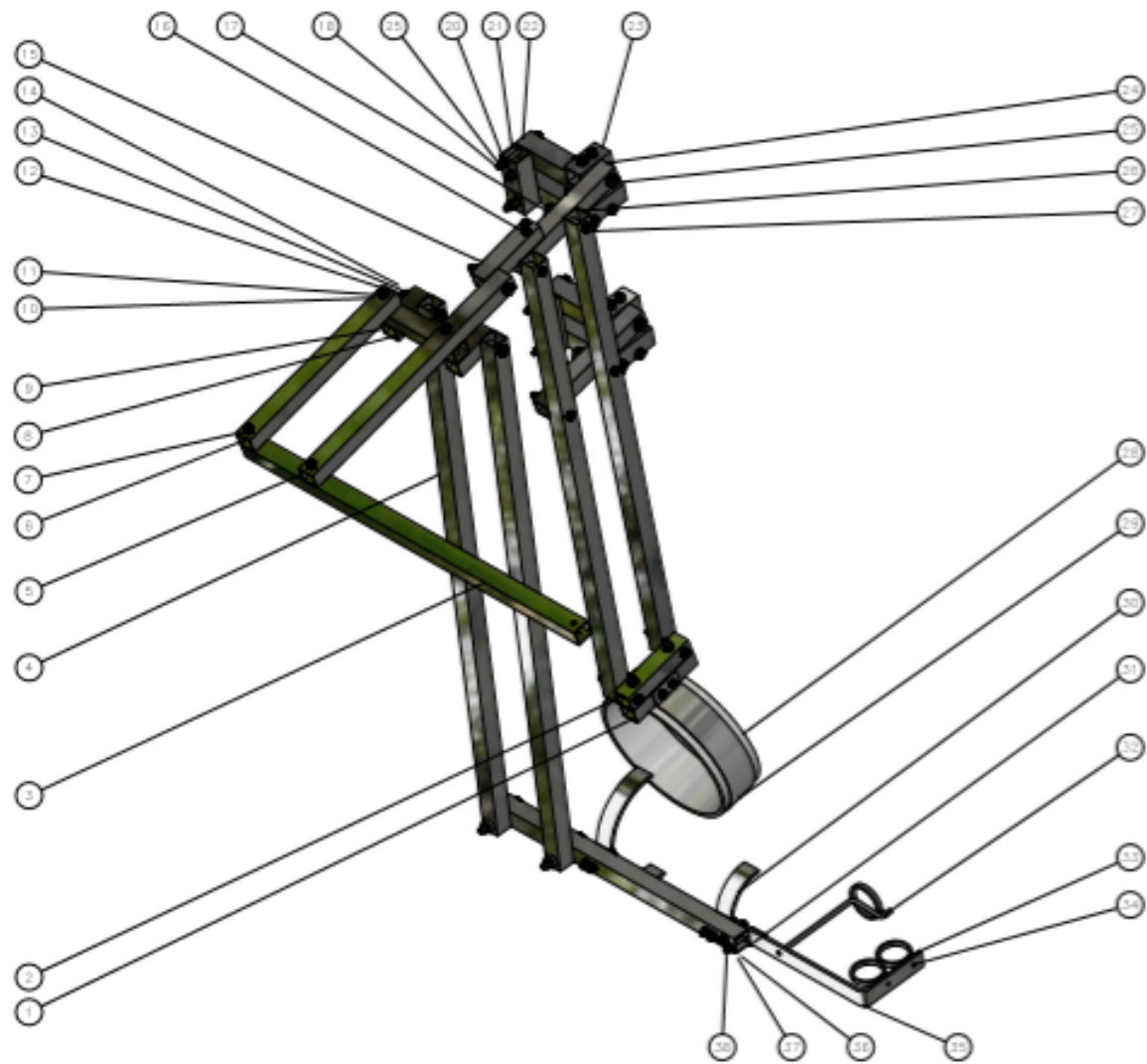


TABLA			
Elementos	Descripción	Cantidad	Material
1	Zonco	2	Aluminio 6061
2	Codero	1	Aluminio 6061
3	Mano	2	Aluminio 6061
4	Extremidades superior	2	Aluminio 6061
5	Cabeza	1	Aluminio 6061
6	Tronco	1	Aluminio 6061


  

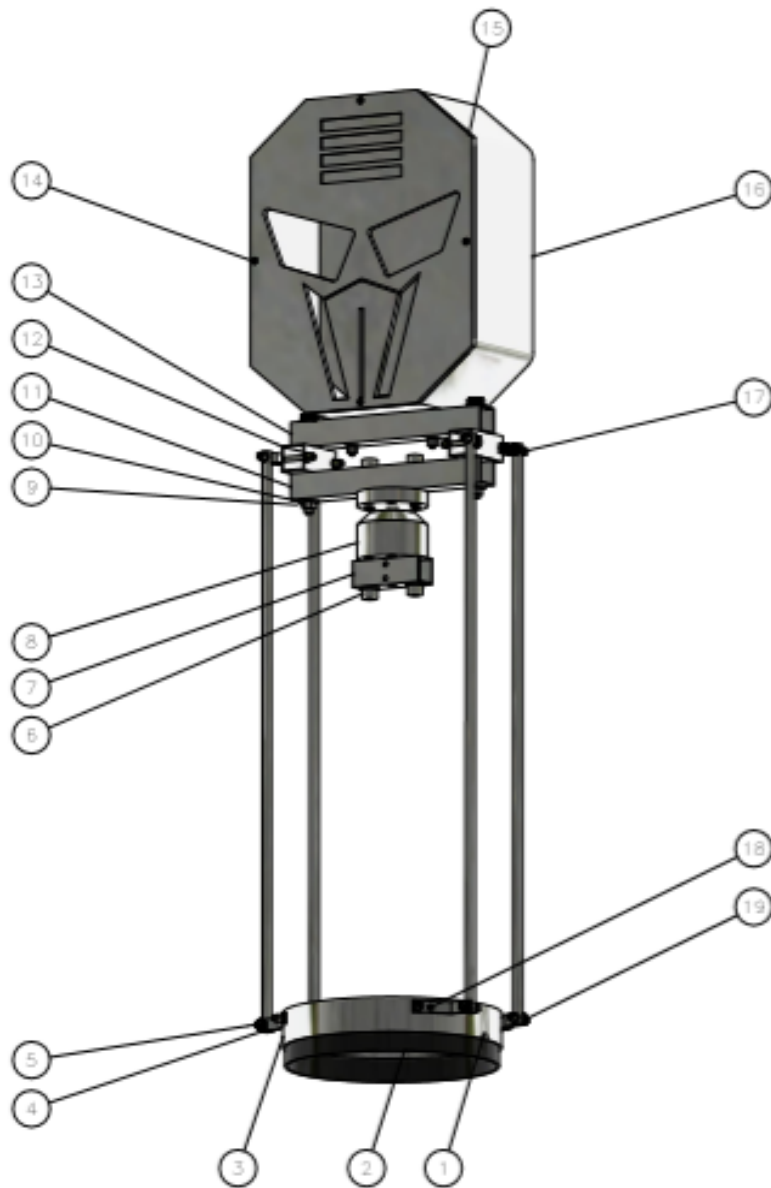
Fecha	Nombre	Firmas	 <b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</b>
Elaborado: 04/01/2020	Autógrafa		
Revisado: 04/01/2020	Por: [Signature]		
Edición: 1.2	Exoesqueleto COGA		INGENIERÍA MECÁNICA
			NÚMERO DE LÁMINA: 1



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CANTIDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Soporte de conexión brazo usuario 2	Perfí (22,2 x 22,2 x 1) mm
2	1	Soporte de conexión brazo usuario 1	Perfí (22,2 x 22,2 x 1) mm
3	2	Barra principal antebrazo	Lamina de aluminio 6061
4	1	Conexión antebrazo usuario	Perfí (22,2 x 22,2 x 1) mm
5	1	Barra de movimiento vertical de hombro	Perfí (22,2 x 22,2 x 1) mm
6	2	Barra posterior exoesqueleto antebrazo	Perfí (22,2 x 22,2 x 1) mm
7	2	PERNO_M6_50mm	ISO 7379
8	1	Barra lateral de brazo exoesqueleto	Perfí (22,2 x 22,2 x 1) mm
9	2	Conexión de movimiento antebrazo	Perfí (22,2 x 22,2 x 1) mm
10	10	ARANDELA_M6	DIN 9021
11	2	PERNO_M6_50 mm	ISO 7379
12	2	PERNO_M6_50 mm	ISO 7379
13	2	TUERCA_M6	DIN 934
14	24	ARANDELA_M6	DIN 9021
15	1	Barra brazo exoesqueleto	Perfí (22,2 x 22,2 x 1) mm
16	2	PERNO_M4_50 mm	DIN 7379
17	2	TUBO_HOMBRO_1	Perfí (22,2 x 22,2 x 1) mm
18	20	PERNO_M6_55 mm	ISO 7379
19	20	TUERCA_M6	DIN 934
20	60	ARANDELA_M6	DIN 9021
21	2	Soporte vertical de movimiento hombro	Perfí (25,4 x 25,4 x 1,6) mm
22	2	Soporte de conexión hombro	Perfí (25,4 x 25,4 x 1,6) mm
23	2	Barra de movimiento horizontal de hombro	Perfí (25,4 x 25,4 x 1,6) mm
24	2	Barra extensión de brazo	Perfí (22,2 x 22,2 x 1) mm
25	4	Barra de movimiento hombro	Perfí (25,4 x 25,4 x 1,6) mm
26	2	Barra de transmisión a brazo usuario 1	Perfí (22,2 x 22,2 x 1) mm
27	10	PERNO_M6_50 mm	ISO 7379
28	1	Soporte brazo usuario	Aluminio 6061
29	1	Soporte de fijación para brazo de usuario	Lamina de aluminio 6061
30	1	Conexión media luna muñeca usuario	Lamina de aluminio 6061
31	2	Control de antebrazo persona	Perfí (22,2 x 22,2 x 1) mm
32	1	Apoyo mano usuario	
33	3	Argolla tensión de dedos	
34	3	Pasador cable de tensión	Cable
35	1	Soporte de apoyo mano usuario	Lamina Aluminio 6061
36	1	ARANDELA_M6	Lamina de aluminio 6061
37	24	TUERCA_M6	DIN 934
38	2	PERNO_M4_30 mm	ISO 7379

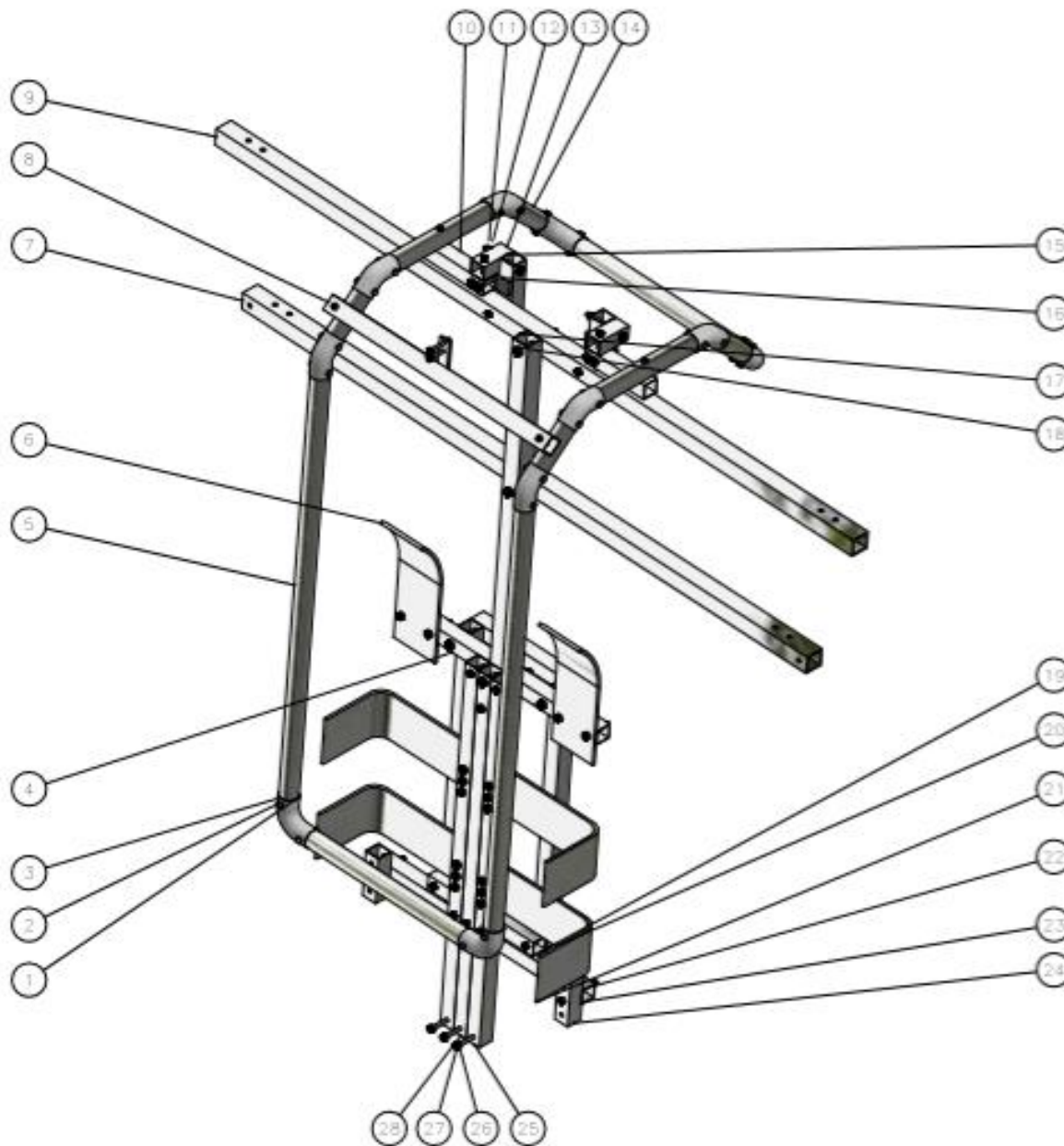
  

Fecha	Nombre	Firma	
Diseño	Elaboró		
Comprobado	Revisó		
1-4	Subconjunto brazo exoesqueleto		INGENIERÍA MECÁNICA
			HOJAS DE UNIDAD: 53




LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	N° DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	Remache	CNS 7339 - 4 x 10
2	1	Conexión cabeza usuario	Placa 4 mm
3	1	Acople cabeza	Placa 4 mm
4	4	Varilla de conexión cabeza usuario	Tubo L=500; D=7,92
5	4	PERNO_M4_12 MM	ISO 7379
6	5	Tornillo de cabeza cilíndrica	DIN 912 - M8 x 35
7	1	Conexión al cuerpo del exoesqueleto	Perfil (22,2 x 22,2 x 1) mm
8	1	Rótula de bola	KC 60
9	5	Tuerca M8	DIN 934 - ISO 4032
10	10	Arandela M8	DIN 125 - A 8,4
11	1	Soporte principal de movimiento cabeza	Perfil (22,2 x 22,2 x 1) mm
12	2	Soporte lateral movimiento cabeza	Perfil (22,2 x 22,2 x 1) mm
13	1	Tubo soporte cabeza	Perfil (22,2 x 22,2 x 1) mm
14	4	Pozidriv Tornillos métricos para maquinaria ISO	AS 1427 - M3 x 16
15	1	Cara exoesqueleto definida	Placa 5 mm
16	1	Contorno de la cabeza exoesqueleto	Placa 4 mm
17	4	Conectores de movimiento bisagra	Placa (15 x 10 x 1) mm
18	4	Conectores de movimiento bisagra 130°	Placa (15 x 10 x 1) mm
19	8	Arandela M4	DIN 125 - A 8,4

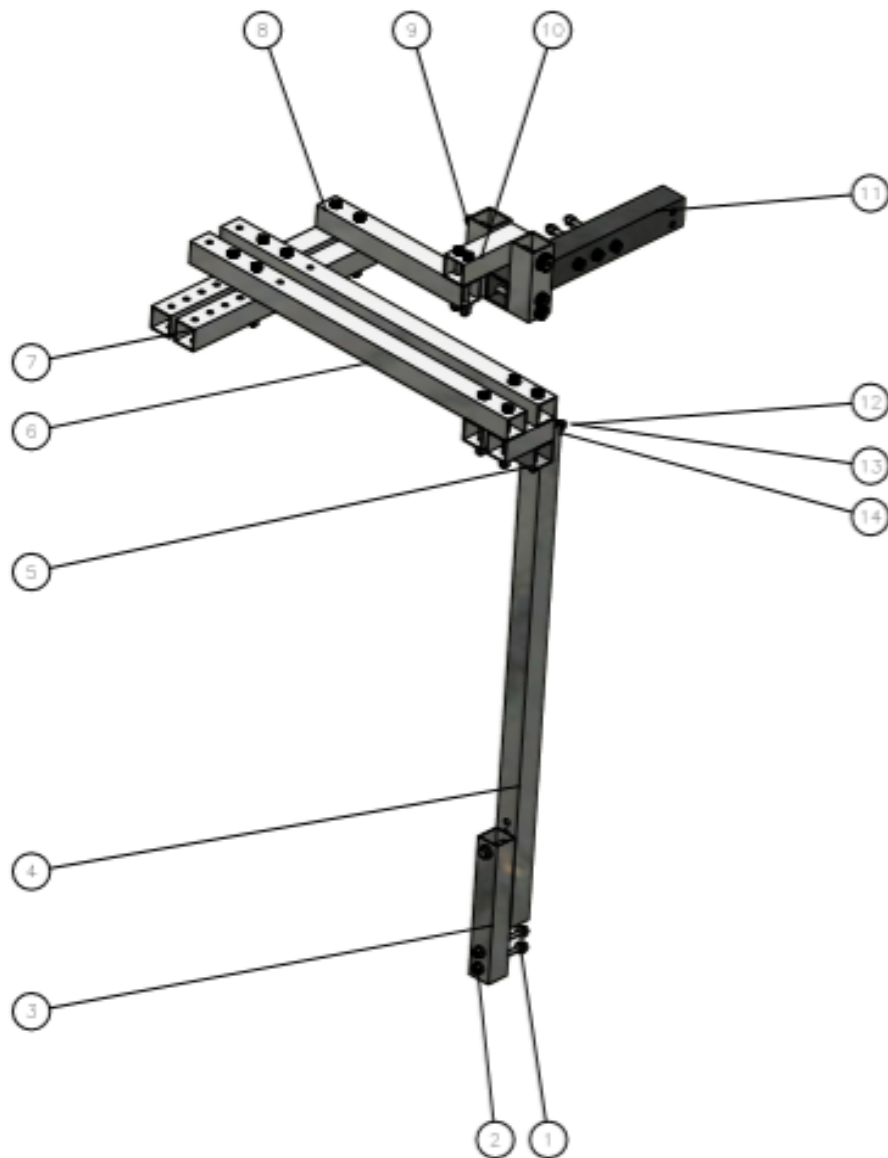
<b>Dibujista</b>	<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	<b>Firmas</b>	<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</b> <small>Escuela de Ingeniería Mecánica</small>
<b>Comprobador</b>	04/01/2020	Autores		
<b>SECCION</b>	06/01/2020	Ing. Nelson Jara		INGENIERÍA MECÁNICA
12	Subconjunto cabeza exoesqueleto			NÚMERO DE LÁMINA: 2



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	40	Tuercas hexagonales	DIN 934
2	40	Tornillos de fijación M4	ISO 7379
3	10	Codo 90°	PVC
4	2	Extensión desde columna hacia apoyo espalda	Perfil (22,2 x 22,2 x 1)mm
5	2	Tubo continuo 4 protector	Tubo de Aluminio
6	2	Apoyo de espalda usuario	Aluminio liso
7	1	Barra conectora del brazo	Perfil (25,4 x 25,4 x 1,8)mm
8	1	Barra de sujeción cabeza esqueleto	Perfil (22,2 x 22,2 x 1)mm
9	1	Barra conectora del hombro	Perfil (25,4 x 25,4 x 1,8)mm
10	2	Barra conectora al protector usuario	Perfil (22,2 x 22,2 x 1)mm
11	6	Tuercas M5	DIN 934
12	160	Arandelas M5	DIN 9021
13	2	Barra transmisora de movimiento protector	Perfil (22,2 x 22,2 x 1)mm
14	12	Tubo continuo 1 protector	Tubo de Aluminio
15	2	Soporte para protector usuario	Perfil (22,2 x 22,2 x 1)mm
16	2	Topes de seguridad protector	Aluminio liso
17	1	Barra columna vertebral central extensión	Perfil (25,4 x 25,4 x 1,8)mm
18	2	Tornillo de fijación M6	ISO 7379
19	2	Verificales de parrilla de carga	Perfil (22,2 x 22,2 x 1)mm
20	2	Laterales de parrilla de carga	Perfil (22,2 x 22,2 x 1)mm
21	4	soportes laterales usuario (castillos)	Aluminio liso
22	80	Tuercas M5	DIN 934
23	1	Barra de refuerzo	Perfil (22,2 x 22,2 x 1)mm
24	2	Barros laterales de refuerzo cortos	Perfil (22,2 x 22,2 x 1)mm
25	2	Columnas vertebrales laterales	Perfil (22,2 x 22,2 x 1)mm
26	160	Arandelas M5	DIN 9021
27	80	Tornillos de fijación M5	ISO 7379
28	1	Barra columna vertebral central	Perfil (25,4 x 25,4 x 1,8)mm


  

Fecha	Nombre	Firmas	 <b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</b>
04/01/2023	Arroyo		
Comprobado	Fecha	Nombre	
12	04/01/2023	Arroyo	
Subconjunto dorso esqueleto			INGENIERÍA MECÁNICA
			NÚMERO DE LÁMINA 14

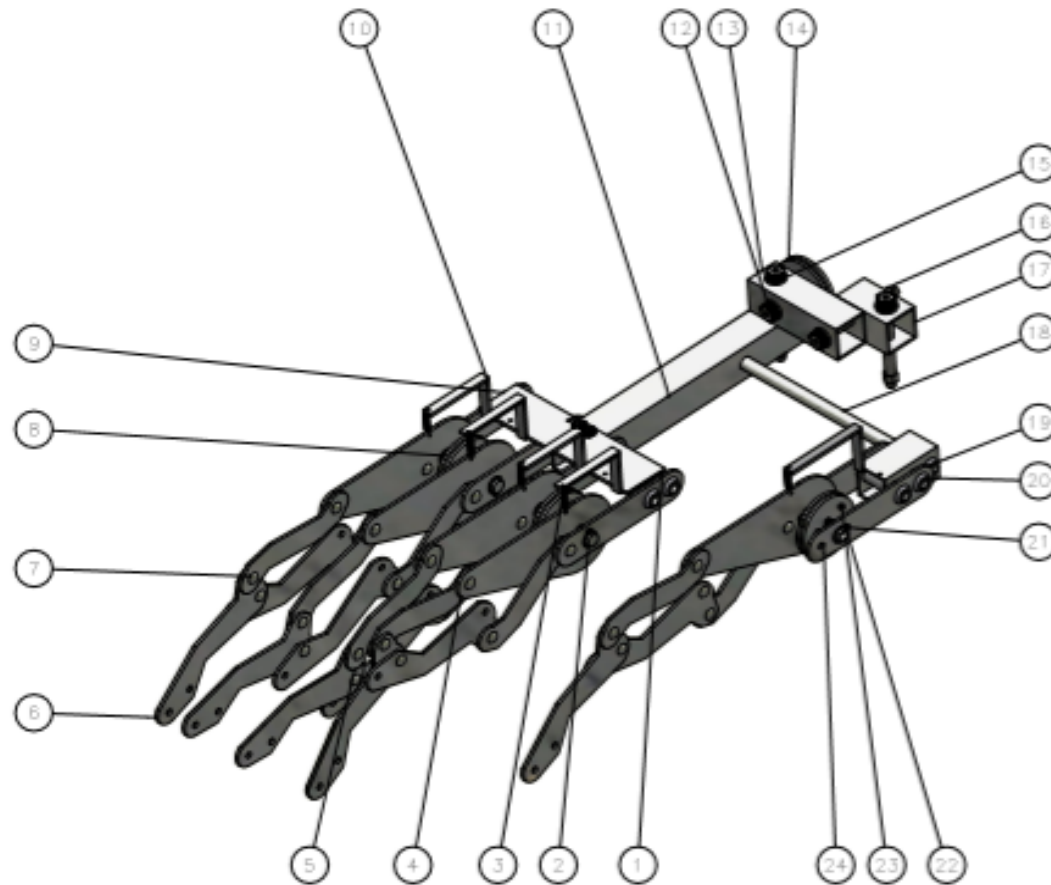



LISTADO DE PIEZAS			
Elemento	CTDAD	N° DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	33	Tornillo de sujeción M4 X 50 mm	ISO 7379
2	33	Tuerca M3	DIN 934 – SIM ISO 4032
3	2	Ajuste pierna – rodilla	Perfil de aluminio (22.2 x 22.2 x1)mm
4	2	Riel ajuste de muslo	Perfil de aluminio (22.2 x 22.2 x1)mm
5	2	Barra de giro pierna – cadera	Perfil de aluminio (22.2 x 22.2 x1)mm
6	4	Barra transversal ajuste de cadera	Perfil de aluminio (22.2 x 22.2 x1)mm
7	4	Barras traseras ajuste de cadera	Perfil de aluminio (22.2 x 22.2 x1)mm
8	2	Barra de conexión a barra de ajuste trasera	Perfil de aluminio (22.2 x 22.2 x1)mm
9	2	Barra de conexión transmisión de movimiento	Perfil de aluminio (22.2 x 22.2 x1)mm
10	4	Barra de movimiento desde cadera	Perfil de aluminio (22.2 x 22.2 x1)mm
11	1	Barra principal de la cadera	Perfil de aluminio (25.5 x 25.4 x1.8)mm
12	2	Tuerca M8	DIN 934 – SIM ISO 4032
13		Tornillo de sujeción M8 X 50 mm	ISO 7379
14		Tuerca M7	DIN 934 – SIM ISO 4032

Fecha	Nombre	Firmas	
Dibujado: 04/01/2023	Autor:		
Comprobado: 04/01/2023	Ing. Nelson Jara		
12	Subconjunto cadera exoesqueleto		INGENIERÍA MECÁNICA
			NÚMERO DE LÁMINA: 75





LISTADO DE PIEZAS			
Elemento	CTDA	N° DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Eje principal de movimiento dedos	Tubo de aluminio (Ø9.52 x 1.14)
2	2	Eje unión polea dedos medios	Tubo de aluminio (Ø7.92 x 1.20)
3	10	Muelle de tracción	Alambre de piano ED09401D0620M
4	6	Falange de unión polea dedo	Aluminio liso
5	20	Falange medio	Aluminio liso
7	20	Falange distal	Aluminio liso
8	60	Remache de aluminio	SS 1440 - KN - 4 x 18 - Al 40 17 x 8_MIR
9	4	Placa superior de sujeción mano exoesqueleto	Aluminio liso
10	2	Soporte de apoyo de muelle	Aluminio liso
11	10	Palma de mano exoesqueleto	Perfil de aluminio (22.2 x 22.2 x 1) mm
12	2	Tornillo M4 X 30 mm	ISO 7379
12	3	Tornillo M6 X 60 mm	
12	1	Tornillo M6 X 30 mm	
13	1	Tubo de fijación muñeco	Perfil de aluminio (22.2 x 22.2 x 1) mm
14	1	Polea de movimiento muñeco	Fundición de aluminio
15	10	Arandelas (D. interior = 6mm, espesor 1.6 mm)	DIN 9021 - SIM ISO 7093
16	4	Tuerca M5	DIN 934 - SIM ISO 4032
16	2	Tuerca M3	
17	1	Conexión con antebrazo	Perfil de aluminio (22.2 x 22.2 x 1) mm
18	1	Tubo de extensión a eje pulgar	Tubo de aluminio (Ø7.92 x 1.20)
19	1	Tubo extensión a eje pulgar	Perfil de aluminio (22.2 x 22.2 x 1) mm
20	2	Eje dedo pulgar	Tubo de aluminio (Ø7.92 x 1.20)
21	30	Anillos seeeger (D= 8)	DIN 471
22	1	Eje pequeño polea pulgar	Tubo de aluminio (Ø7.92 x 1.20)
23	1	Eje pequeño pulgar	Tubo de aluminio (Ø7.92 x 1.20)
24		Falange de soporte dedos	Aluminio liso
Fecha		Nombre	Firmas
Dibujado	04/01/2023	Autores	
Comprobado	04/01/2023	Ing. Nelson Jara	 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
VERSO	12	Subconjunto mano exoesqueleto	
			NÚMERO DE LÁMINA: 31