



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAL**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO, ANÁLISIS Y SIMULACIÓN EN SOFTWARE DE
EXOESQUELETO PARA LEVANTAMIENTO DE 50 Kg**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

HARRY RICARDO ARIAS REALPE

DIRECTOR: ING. DANIEL MIDEROS PhD.

Quito, septiembre 2016

© Universidad Tecnológica Equinoccial. 2016
Reservados todos los derechos de reproducción

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1711705879
APELLIDO Y NOMBRES:	Arias Realpe Harry Ricardo
DIRECCIÓN:	Guangüiltagua N37-280 y C. Arosemena
EMAIL:	harcort@gmail.com
TELÉFONO FIJO:	224-4638
TELÉFONO MOVIL:	0998-016-912

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Diseño, análisis y simulación en software de exoesqueleto para levantamiento de 50 Kg
AUTOR O AUTORES:	Harry Ricardo Arias Realpe
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	28 de septiembre de 2016
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	Ing. Daniel Mideros PhD
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
RESUMEN:	<p>El diseño del HEXO está basado en los movimientos requeridos por una persona para caminar y para realizar levantar objetos pesados. Contempla los Grados de Libertad (GDL) que intervienen en estas tareas, por lo que se limita a un GDL en cada articulación. Para generar la fuerza requerida en el levantamiento y traslado del usuario, se incluyen motores servo lineales en este diseño, debido a la prestación de la fuerza nominal requerida en cada acción, y ubicados de tal forma que no interfieran en los movimientos a realizar. Se usan servos rotacionales en un primer diseño, pero demostraron ser no convenientes debido al bajo torque que generan y su sobredimensionado tamaño que aumentarían el peso de HEXO y afectaría al desenvolvimiento esperado.</p> <p>Se presenta el análisis mecánico de carga de las piezas principales, aquellas que soportarán todo el peso, tanto de su propia estructura como el de la carga a levantar. Dicho análisis se lo realiza en la posición más crítica que presentará. Se muestra también el centro de masa para un análisis de estabilidad en las posiciones más críticas que se presentan en la traslación del HEXO. El análisis se realiza en cada elemento de la estructura principal, mostrando el esfuerzo, deformación y</p>

	desplazamientos generados por las fuerzas actuantes. Dichas fuerzas son calculadas contemplando el ángulo de la posición crítica. Para el control del HEXO Se presenta el diagrama de flujo a seguir para la activación de los motores servo lineales en cada una de las extremidades, tanto al caminar como en el levantamiento de pesos, incluyendo los condicionantes y posiciones finales a completar.
PALABRAS CLAVES:	Hexo, análisis, servo motor, esfuerzo mecánico.
ABSTRACT:	<p>The design of the exoskeleton HEXO is based on movements required by a person to walk and to lift heavy weight objects. This design contemplates just one required Degrees of Freedom (DOF) in each joint to complete these tasks.</p> <p>The design includes servo linear actuators to generate the translation of user and lifting required forces, because their nominal rate force is convenient in each action, and were located to work without interfere with the normal performance of other limbs. Rotational servo actuators offered in the market were analyzed and included in a very first design, but they demonstrated to be non-convenient because their low generated torque and their overwhelming size that would increase the HEXO's weight and interfere the desirable performance.</p> <p>Within de mechanical system design is included the charge analysis in main parts, those that would support all the structure and heavy object weight. This analysis is made into the most critical performed position. It also shows mass center for a stability analysis in the HEXO's walking most critical positions. Control design of the HEXO is shown in a flow chart to follow by linear servo actuator activation in each limb, into walking and lifting tasks, it includes the conditional and final position to reach.</p>
KEYWORDS	Hexo, analysis, servo motor, mechanical stress

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f: _____

ARIAS REALPE HARRY RICARDO

CI. 1711705879

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **HARRY RICARDO ARIAS REALPE**, CI 171170587-9, autor del proyecto titulado: **“Diseño, análisis y simulación en software de exoesqueleto para levantamiento de 50 Kg”** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN MECATRÓNICA** en la Universidad Tecnológica Equinoccial.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad Tecnológica Equinoccial a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, 28 de septiembre de 2016

f: _____


HARRY RICARDO ARIAS REALPE

CI. 1711705879

DECLARACIÓN

Yo **HARRY RICARDO ARIAS REALPE**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Tecnológica Equinoccial puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



Harry Ricardo Arias Realpe

C.I. 1711705879

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título "**Diseño, análisis y simulación en software de exoesqueleto para levantamiento de 50 Kg**", que, para aspirar al título de **Ingeniero en Mecatrónica** fue desarrollado por **Harry Ricardo Arias Realpe**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 18 y 25.



Daniel Mideros

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I. 1713177325

DEDICATORIA

Dios es quién me bendice y me guía, gracias por ser tú en mí, en mi familia, y en cada meta que nos proponemos. Sea siempre tu voluntad en mí.

“..... de todo lo que pueda inventar y construir, de todo lo que pueda crear y alcanzar, tu siempre serás lo más grande y perfecto que pude hacer, mi pequeño Capitán Telescopio”. A mi hijo Luciano.

En mi vida tú, hasta que la muerte nos separe, eres lo más importante en este logro. Mi dedicatoria con el verdadero amor y fe, con el que empezamos juntos esta travesía.

Sin tus enseñanzas madre mía, no llegaría lejos. Te dedico este nuevo logro con cada gota de esfuerzo y perseverancia que dediqué en este trabajo, mismos que supiste inculcarme desde pequeño.

AGRADECIMIENTO

En el camino a cada meta a alcanzar, siempre hay un grupo de personas que son parte importante en esta travesía. Cada una de ellas, con sus particulares características, está siempre dando lo mejor para ser parte del éxito. A cada compañero de aula, a cada amigo incondicional, a cada familiar, a cada profesor, doy un merecido agradecimiento y un reconocimiento por creer en mí y alentarme a culminar esta travesía.

A mi pequeña familia, quien fue mi impulso a iniciar esta carrera, mi motivación para perseverar hasta el final, y mi sustento en el camino para no decaer.

A mi madre, quien puso toda su fe y confianza desde un principio, y que nunca dejó de apoyarme.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 BIOMECATRÓNICA Y BIOINSPIRACIÓN	4
2.2 BIOMECÁNICA HUMANA	5
2.3 EXOESQUELETOS	7
2.3.1 EXOESQUELETOS EXISTENTES	8
2.3.1.1 HAL-5 (Moreno et al. 2005)	8
2.3.1.2 WOTAS	9
2.3.1.3 BLEEX	11
2.3.2 EXOESQUELETOS PARA LEVANTAMIENTO DE CARGAS	13
2.3.2.1 Body extender (BE)	13
2.3.2.2 Power-Assist suit	14
2.3.2.3 Exoesqueleto para pruebas industriales	16
2.4 DAÑOS POTENCIALES POR LEVANTAMIENTOS EXCESIVOS	17
2.5 LEGISLACIÓN EN ECUADOR	19
3. DISEÑO DE EXOESQUELETO	
3.1 METODOLOGÍA	21
3.2 PLANIFICACIÓN	22
3.2.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	22
3.2.2 RESTRICCIONES DE DISEÑO	23
3.3 DESARROLLO CONCEPTUAL Y DIAGRAMA GENERAL	24
3.4 DESARROLLO A NIVEL DE SISTEMA Y DIAGRAMA ESPECÍFICO	25
3.4.1 VERIFICACIÓN	26
3.4.2 VALIDACIÓN	27
3.5 DISEÑO DETALLADO	28
3.5.1 SISTEMA MECÁNICO	28
3.5.1.1 Antebrazos	28
3.5.1.2 Brazos	32
3.5.1.3 Sección A - Espalda	34
3.5.1.4 Sección B - Espalda	35
3.5.1.5 Sección C – Espalda	36
3.5.1.6 Ensamble espalda	38

3.5.1.7 Muslo	39
3.5.1.8 Canilla	42
3.5.1.9 Pie	45
3.5.1.10 Elemento de soporte	48
3.5.1.11 Ensamblaje del Hexo	57
3.5.2 SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL	59
3.5.2.1 Selección de servo motores lineales	59
3.5.2.2 Selección de servo motores rotacionales	62
3.5.2.3 Pulsadores	65
3.5.2.4 Encoders lineales	65
3.5.2.5 Selección de PLC y módulos adicionales	67
3.5.2.6 Conexiones y algoritmos	70
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	
4.1 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN EL ANTEBRAZO	80
4.1.1 CENTRO DE MASA DEL ANTEBRAZO	80
4.1.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL ANTEBRAZO	81
4.1.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN ANTEBRAZO	82
4.1.3.1 Análisis de esfuerzos	82
4.2 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN EL BRAZO	86
4.2.1 CENTRO DE MASA DEL BRAZO	87
4.2.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL BRAZO	87
4.2.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN BRAZO	89
4.2.3.1 Análisis de esfuerzos	89
4.3 ANÁLISIS FUERZAS DEL SERVO MOTOR LINEAL DEL ANTEBRAZO	93
4.3.1 CENTRO DE MASA DEL SERVO MOTOR LINEAL	93
4.3.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL SERVO MOTOR DEL ANTEBRAZO	94
4.4 ANÁLISIS FUERZAS DEL SERVO MOTOR LINEAL DEL BRAZO	95
4.4.1 CENTRO DE MASA DEL SERVO MOTOR LINEAL	96
4.4.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL SERVO MOTOR DEL BRAZO	96
4.5 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN SECCIÓN “A” - ESPALDA	98
4.5.1 CENTRO DE MASA DE LA SECCIÓN “A” - ESPALDA	98
4.5.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE SECCIÓN “A” - ESPALDA	99
4.5.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN SECCIÓN “A” – ESPALDA	101
4.5.3.1 Análisis de esfuerzos	101
4.6 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN SECCIÓN “B” – ESPALDA	105

4.6.1	CENTRO DE MASA DE LA SECCIÓN “B” - ESPALDA	106
4.6.2	FUERZAS ACTUANTES SOBRE SECCIÓN “B” - ESPALDA	106
4.6.3	ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN SECCIÓN “B” – ESPALDA	107
4.6.3.1	Análisis de esfuerzos	107
4.7	ANÁLISIS Y RESULTADOS EN SECCIÓN “C” – ESPALDA	112
4.7.1	CENTRO DE MASA DE LA SECCIÓN “C” - ESPALDA	113
4.7.2	FUERZAS ACTUANTES SOBRE SECCIÓN “C” - ESPALDA	114
4.7.3	ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN SECCIÓN “C” – ESPALDA	117
4.7.3.1	Análisis de esfuerzos	117
4.8	ANÁLISIS Y RESULTADOS EN MUSLO	121
4.8.1	CENTRO DE MASA DEL MUSLO	121
4.8.2	FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL MUSLO	122
4.8.3	ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN EL MUSLO	123
4.8.3.1	Análisis de esfuerzos	124
4.9	ANÁLISIS FUERZAS DEL SERVO MOTOR LINEAL DE CANILLA	127
4.9.1	CENTRO DE MASA DEL SERVO MOTOR LINEAL	128
4.9.2	FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL SERVO MOTOR DE CANILLA	128
4.10	ANÁLISIS Y RESULTADOS EN CANILLA	130
4.10.1	CENTRO DE MASA DE LA CANILLA	131
4.10.2	FUERZAS ACTUANTES SOBRE LA CANILLA	132
4.10.3	ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN LA CANILLA	134
4.10.3.1	Análisis de esfuerzos	134
4.11	ANÁLISIS Y RESULTADOS EN PIE	138
4.11.1	CENTRO DE MASA DEL PIE	138
4.11.2	FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL PIE	139
4.11.3	ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN EL PIE	141
4.11.3.1	Análisis de esfuerzos	141
4.12	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL HEXO	145
4.13	ANÁLISIS DE RESULTADOS	147
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1	CONCLUSIONES	150
5.2	RECOMENDACIONES	151
	BIBLIOGRAFÍA	153

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Planos del Cuerpo	6
Figura 2. Etapas del proyecto	21
Figura 3. Diagrama General del Sistema	24
Figura 4. Estructura básica de un sistema mecatrónico.	25
Figura 5. Diagrama General del Sistema	25
Figura 6. Estructura principal de antebrazos	29
Figura 7. Esquema de rodamientos de bolas de una sola hilera	30
Figura 8. Protección de mano	31
Figura 9. Protección de antebrazo	31
Figura 10. Antebrazo derecho ensamblado	31
Figura 11. Estructura principal de brazos	32
Figura 12. Protección de brazo	33
Figura 13. Brazo derecho ensamblado	33
Figura 14. Estructura de la Sección A – Espalda	34
Figura 15. Medidas de la estructura de la Sección B - Espalda	35
Figura 16. Estructura de la Sección B - Espalda	36
Figura 17. Estructura de la Sección C - Espalda	37
Figura 18. Espalda ensamblada	39
Figura 19. Estructura principal de muslos	40
Figura 20. Protección de muslo	41
Figura 21. Muslo derecho ensamblado	41
Figura 22. Estructura principal de canilla	43
Figura 23. Protección de canilla	44
Figura 24. Canilla derecha ensamblada	44
Figura 25. Estructura principal del pie	46
Figura 26. Protección del pie	47
Figura 27. Pie derecho ensamblado	47
Figura 28. Resorte helicoidal de compresión del elemento de soporte	54
Figura 29. Cuerpo del elemento de soporte	54
Figura 30. Vástago del elemento de soporte	55
Figura 31. Tapa del elemento de soporte	55
Figura 32. Tope elástico del elemento de soporte	56
Figura 33. Ensamble del elemento de soporte con elementos de canilla y pie	57
Figura 34. Vista lateral y superior del Hexo	58
Figura 35. Vista frontal y posterior del Hexo	58
Figura 36. Vista Isométrica del Hexo	58
Figura 37. Servo coil Mitsubishi P7C-72P-ASS0	60
Figura 38. Servo magnet Mitsubishi S70-480-ASS0	60

Figura 39. Acople para el Servo coil Mitsubishi P7C-72P-ASS0	61
Figura 40. Acople para el Servo magnet Mitsubishi S70-480-ASS0	61
Figura 41. Servo motor lineal en posiciones límites	62
Figura 42. Momento de carga de servo motor rotacional TM-RFM 012E20	63
Figura 43. Servo motor rotacional TM-RFM 012E20	64
Figura 44. Pulsador B1-M1CE-7	64
Figura 45. Encoder lineal RL 40M AT 050B 05 N	66
Figura 46. Línea codificada de acero inoxidable	65
Figura 47. Módulo Q06UDHCPU	67
Figura 48. Módulo Q64PN	68
Figura 49. Módulo Q172DSCPU	68
Figura 50. Módulo QH42P	69
Figura 51. Módulo MR-J4W2-44B	70
Figura 52. Diagrama funcional del Hexo	71
Figura 53. Ubicación del PLC en el Hexo	74
Figura 54. Posiciones de las piernas en traslación del Hexo	74
Figura 55. Diagrama de flujo para un paso derecho	75
Figura 56. Posiciones de las piernas en levantamiento del Hexo	76
Figura 57. Diagrama de flujo para agachado y levantamiento	76
Figura 58. Posiciones del brazo en el Hexo	77
Figura 59. Diagrama de flujo para flexión y extensión de ambos brazos	77
Figura 60. Posiciones del antebrazo en el Hexo	78
Figura 61. Diagrama de flujo para flexión y extensión de ambos antebrazos	78
Figura 62. Posición crítica del Hexo	79
Figura 63. Centro de masa del ensamblaje del antebrazo	81
Figura 64. Diagrama del cuerpo libre del antebrazo	81
Figura 65. Fuerzas aplicadas en estructura de antebrazo.	83
Figura 66. Mallado de antebrazo para análisis	84
Figura 67. Esfuerzos de Von Mises vista superior de antebrazo	84
Figura 68. Esfuerzos de Von Mises vista inferior de antebrazo	85
Figura 69. Desplazamientos de la estructura de antebrazo	85
Figura 70. Deformaciones de la estructura de antebrazo	86
Figura 71. Factor de seguridad en estructura de antebrazo	86
Figura 72. Centro de masa del ensamblaje del brazo	87
Figura 73. Diagrama del cuerpo libre del brazo	88
Figura 74. Fuerzas aplicadas en estructura de brazo	90
Figura 75. Mallado de brazo para análisis	90
Figura 76. Esfuerzos de Von Mises en estructura de brazo	91
Figura 77. Esfuerzos y fuerzas aplicadas en estructura de brazo	91
Figura 78. Desplazamientos de la estructura de brazo	92

Figura 79. Deformaciones de la estructura de antebrazo	92
Figura 80. Factor de seguridad en estructura de antebrazo	93
Figura 81. Centro de masa del servo motor lineal del antebrazo	94
Figura 82. Diagrama del cuerpo libre del servo motor lineal del antebrazo	94
Figura 83. Centro de masa del servo motor lineal del brazo	96
Figura 84. Diagrama del cuerpo libre del servo motor lineal del brazo	97
Figura 85. Centro de masa del ensamblaje de sección A de la espalda	99
Figura 86. Diagrama del cuerpo libre de sección "A" - espalda	100
Figura 87. Fuerzas aplicadas en sección A de espalda	102
Figura 88. Mallado de sección A de la espalda para análisis	102
Figura 89. Esfuerzos de Von Mises en sección A de espalda	103
Figura 90. Esfuerzos y fuerzas aplicadas en sección A de espalda	103
Figura 91. Desplazamientos de la sección A de espalda	104
Figura 92. Deformaciones de la sección A de espalda	104
Figura 93. Factor de seguridad en sección A de espalda	105
Figura 94. Centro de masa del ensamblaje de sección B - espalda	106
Figura 95. Diagrama del cuerpo libre de sección "B" - espalda	106
Figura 96. Fuerzas aplicadas en sección B de espalda	108
Figura 97. Mallado de sección B de la espalda para análisis	108
Figura 98. Esfuerzos de Von Mises en sección B de espalda	109
Figura 99. Esfuerzos y fuerzas aplicadas en sección B de espalda	109
Figura 100. Desplazamientos de la sección B de espalda - Vista posterior	110
Figura 101. Desplazamientos de la sección B de espalda - Vista anterior	110
Figura 102. Deformaciones de la sección B de espalda	111
Figura 103. Factor de seguridad en sección B de espalda	111
Figura 104. Centro de masa del ensamblaje de sección C - espalda	113
Figura 105. Diagrama del cuerpo libre de sección "C" - espalda	114
Figura 106. Distancias entre líneas de acción de fuerzas y centro de servo motor rotacional	116
Figura 107. Fuerzas aplicadas en sección C de espalda	118
Figura 108. Mallado de sección C de la espalda para análisis	118
Figura 109. Esfuerzos de Von Mises en sección C de espalda	119
Figura 110. Desplazamientos de la sección C de espalda - Vista posterior	119
Figura 111. Deformaciones de la sección C de espalda	120
Figura 112. Factor de seguridad en sección C de espalda	120
Figura 113. Centro de masa del muslo	122
Figura 114. Diagrama del cuerpo libre del muslo	123
Figura 115. Fuerzas aplicadas en el muslo	124

Figura 116. Mallado del muslo para análisis	125
Figura 117. Esfuerzos de Von Mises en el muslo	125
Figura 118. Desplazamientos del muslo	126
Figura 119. Deformaciones del muslo	126
Figura 120. Factor de seguridad en el muslo	127
Figura 121. Centro de masa del servo motor lineal de la canilla	128
Figura 122. Diagrama del cuerpo libre del servo motor lineal de la canilla	129
Figura 123. Centro de masa de la canilla	131
Figura 124. Diagrama del cuerpo libre de la canilla	132
Figura 125. Fuerzas aplicadas en la canilla	135
Figura 126. Mallado de la canilla para análisis	135
Figura 127. Esfuerzos de Von Mises en la canilla	136
Figura 128. Desplazamientos de la canilla	136
Figura 129. Deformaciones de la canilla	137
Figura 130. Factor de seguridad en la canilla	137
Figura 131. Centro de masa del pie	139
Figura 132. Diagrama del cuerpo libre del pie	140
Figura 133. Fuerzas aplicadas en el pie	142
Figura 134. Mallado del pie para análisis	143
Figura 135. Esfuerzos de Von Mises en el pie	143
Figura 136. Desplazamientos del pie	144
Figura 137. Deformaciones del pie	144
Figura 138. Factor de seguridad en el pie	145
Figura 139. Vista inferior del centro de masa dentro de superficie de apoyo	146
Figura 140. Visualización del centro de masa del Hexo erguido	146
Figura 141. Visualización del centro de masa del Hexo agachado	144
Figura 142. Visualización del centro de masa del Hexo dando un paso	147

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO 1. Planos de elementos mecánicos	157
ANEXO 2. Tablas y figuras para el cálculo de resortes	173
ANEXO 3. Características técnicas de los servo actuadores	175

RESUMEN

El diseño del exoesqueleto HEXO está basado en los movimientos requeridos por una persona para caminar y para realizar el levantamiento de objetos pesados. Contempla los Grados de Libertad (GDL) que intervienen en estas tareas, por lo que se limita a un GDL en cada articulación. Para generar la fuerza requerida en el levantamiento y traslado del usuario, se incluyen motores servo lineales en este diseño, debido a la prestación de la fuerza nominal requerida en cada acción, y ubicados de tal forma que no interfieran en los movimientos a realizar. Los motores servo rotacionales existentes en el mercado fueron analizados e incluidos en un primer diseño, pero demostraron ser no convenientes debido al bajo torque que generan y su sobredimensionado tamaño que aumentarían el peso de HEXO y afectaría al desenvolvimiento esperado.

En el diseño del sistema mecánico se presenta el análisis de carga de las piezas principales, aquellas que soportarán todo el peso, tanto de su propia estructura como el de la carga a levantar. Dicho análisis se lo realiza en la posición más crítica que presentará. Se muestra también el centro de masa para un análisis de estabilidad en las posiciones más críticas que se presentan en la traslación del HEXO. El análisis se realiza en cada una de los elementos de la estructura principal, mostrando el esfuerzo, deformación y desplazamientos generados por las fuerzas actuantes sobre cada cuerpo. Dichas fuerzas son calculadas contemplando el ángulo de posicionamiento de la posición crítica.

Para el control del HEXO Se presenta el diagrama de flujo a seguir para la activación de los motores servo lineales en cada una de las extremidades, tanto al caminar como en el levantamiento de pesos, incluyendo los condicionantes y posiciones finales a completar.

ABSTRACT

The design of the exoskeleton HEXO is based on movements required by a person to walk and to lift heavy weight objects. This design contemplates just one required Degrees of Freedom (DOF) in each joint to complete these tasks.

The design includes servo linear actuators to generate the translation of user and lifting required forces, because their nominal rate force is convenient in each action, and were located to work without interfere with the normal performance of other limbs. Rotational servo actuators offered in the market were analyzed and included in a very first design, but they demonstrated to be non-convenient because their low generated torque and their overwhelming size that would increase the HEXO's weight and interfere the desirable performance.

Within the mechanical system design is included the charge analysis in main parts, those that would support all the structure and heavy object weight. This analysis is made into the most critical performed position. It also shows mass center for a stability analysis in the HEXO's walking most critical positions.

Control design of the HEXO is shown in a flow chart to follow by linear servo actuator activation in each limb, into walking and lifting tasks, it includes the conditional and final position to reach.

1. INTRODUCCIÓN

Desde un inicio el ser humano, a través de la ciencia ha buscado desarrollar tecnología que permita mejorar o complementar funciones y capacidades propias del hombre, o que reemplacen a una persona en la ejecución de ciertas acciones repetitivas o peligrosas. Bajo este contexto, la creación de robots permite obtener mecanismos que ejecuten tareas con alta precisión y de forma continua, sobre todo en el campo industrial. Sin embargo, la relación entre el humano y el robot está enmarcada en programas embebidos para tareas específicas, generalmente dentro de escenarios de operación a distancia.

Actualmente el campo de la robótica también se ha enfocado en la búsqueda de mecanismos orientados a la operación del usuario. Es por esta razón que se despliega el estudio y análisis de robots que puedan ser utilizados directamente por el hombre para potenciar movimientos, reemplazar extremidades, complementar o sustituir funciones y capacidades de movimiento básicas del ser humano.

Como capacidad de movimiento básica del ser humano está el levantamiento de peso que, por características fisiológicas propias, se ve limitada por daños físicos que la persona puede sufrir, tanto en espalda como en extremidades, al mover objetos que sobrepasan la capacidad de carga de la persona. Aunque depende de la contextura y talla, no existe un único límite de carga para levantar; sin embargo, de acuerdo a lo sugerido por organismos de seguridad laboral, un peso entre 20 a 25 Kg resulta difícil de cargar para la gran mayoría de personas (Sanders, 2004).

En lo laboral, la gran mayoría de trabajos demandan continuamente esfuerzos físicos que pueden perjudicar seriamente a la salud y, aunque la seguridad industrial es exigida, los trabajadores suelen arriesgarse a realizar levantamientos innecesarios que dañan su espalda o extremidades. Las afecciones al sistema musculoesquelético, debido al continuo levantamiento de peso, es uno de los principales problemas de salud relacionado con el

trabajo (Sanders, 2004). Además, varias de las tareas industriales demandan la utilización de montacargas para levantamiento, transporte y colocación de equipos, elementos de maquinarias, motores, materiales, etc., que no pesan siquiera el 5% de la capacidad de trabajo de dicho vehículo y se consideraría innecesaria su utilización, pues representa un desperdicio de recursos y se lo asignaría a tareas de mayor importancia. En algunas situaciones, el ingreso del montacargas a ciertos sectores de una fábrica se suele ver limitado por el espacio del lugar, por lo que se ven en la obligación de detener procesos o mover maquinaria para que este pueda acceder a la carga que se requiere.

Debido a estas situaciones, quienes deben realizar el levantamiento aplican directamente su propia fuerza sobre el objeto, e incluso en posiciones ergonómicamente desfavorables para soportar o elevar la carga, ya sea por el espacio insuficiente, por desniveles en la superficie de apoyo o por cercanía a fuentes de calor, lo que dificulta su manipulación.

El diseño de un exoesqueleto para levantar cargas de hasta 50 Kg optimiza el tiempo de ejecución de este tipo de tareas, ya que no ocupan mucho espacio, ayudan a ejecutar funciones sin entorpecer otros procesos y sin poner en riesgo la salud de quienes lo operan, disminuyendo el riesgo de sufrir lesiones en la espalda, dolores dorsolumbares, o trastornos acumulativos debido al deterioro del sistema musculoesquelético. Además, el contacto indirecto del operador del exoesqueleto con la carga disminuye los riesgos de sufrir traumatismos, cortes, fracturas o quemaduras debido a accidentes provocados por la desestabilización de la carga o un mal agarre de la misma.

El mismo operador puede levantar cosas varias veces en una misma jornada sin estar expuesto a tanto riesgo laboral, favoreciendo a la agilización y facilitando el cumplimiento de ciertas tareas, tanto en el ámbito industrial como en el ámbito militar y doméstico.

Por estos motivos, para el presente trabajo se plantea como objetivo general el diseñar, analizar y simular en software un exoesqueleto para levantar un peso máximo de 50 Kg.

Para alcanzar el objetivo general mencionado, los objetivos específicos a alcanzar son los siguientes:

- Determinar la cinemática del movimiento y levantamiento de peso existente en una persona.
- Diseñar un mecanismo que permita ejecutar los grados de libertad más importantes en el movimiento y levantamiento de peso.
- Diseñar el sistema electrónico que permita el movimiento y control en las partes mecánicas diseñadas.
- Analizar componentes mecánicos mediante simulación del exoesqueleto.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 BIOMECATRÓNICA Y BIOINSPIRACIÓN

El mejoramiento, en todos los aspectos, de las funciones de los seres vivos puede ser entendido como un avance en la búsqueda principal de la maximización de ciertas funciones objetivo. Por esta razón el diseño de elementos robóticos, enfocados al mejoramiento biológico de los seres vivos, trae beneficios dentro de aspectos relevantes como la detección de señales, actuación ante estos impulsos y control de estos sistemas.

En los años 70's se establece el concepto de "Mecatrónica" como la disciplina de estudio, análisis, diseño e implementación de sistemas que encierran varias áreas de la ingeniería como son la mecánica, la electrónica y el control, enfocados a obtener componentes o subsistemas autómatas (Pons, 2005).

Los seres vivos presentan sistemas biológicos perfectamente funcionales, los cuales son estudiados para buscar mecanismos que trabajen analógicamente. La Biomecatrónica utiliza como referencia estos sistemas integrados de los seres vivos para el diseño de componentes que puedan suplantar, complementar o maximizar las funciones del aparato musculoesquelético con un complejo sistema nervioso que, por varias razones pueden deteriorarse o perderse (Darío *et al.* 2005). Esto encasilla a la Biomecatrónica como una extensión de la Mecatrónica aplicada a los seres vivos.

De acuerdo a esta analogía, los sistemas Biomecatrónicos los integran mecanismos, controles embebidos e interacción humano-máquina (HMI), sensores, actuadores y fuentes de energía, basados en funciones biológicas para entender de mejor manera el comportamiento biológico mediante la utilización de modelos artificiales.

Para el diseño de estos sistemas Biomecatrónicos, se debe enfocar como primer paso la “Bioinspiración” para tener una clara idea del modelo biológico y posteriormente explicar la función biológica mediante modelos ingenieriles (Forner-Cordero *et al.* 2008).

De acuerdo a la explicación anterior, la Biomecatrónica incluye intrínsecamente a la Bioinspiración en el desarrollo de sistemas mecatrónicos que estarán en estrecha relación con los sistemas biológicos ya que dependen de una interacción cognitiva y física entre máquina y usuario. Finalmente, la Biomecatrónica adoptará procedimientos de diseño y optimización biológicamente inspirados para el desarrollo de componentes y sistemas mecatrónicos (Pons, 2005).

2.2 BIOMECÁNICA HUMANA

La biomecánica es la aplicación de técnicas y métodos de las ciencias mecánicas para el entendimiento del comportamiento físico de los sistemas biológicos. De esta manera, el cuerpo humano puede ser modelado como un mecanismo de segmentos rígidos para determinar alcance, velocidad, fuerza, conservación de momento angular, conservación de momento lineal y la conservación de masa y energía (Forner-Cordero, 2008).

Cada una de las articulaciones del cuerpo humano permite ejecutar movimientos en los tres planos espaciales; la facultad de moverse en una u otra dirección está determinada por los Grados de Libertad (GDL). En el cuerpo humano, si a los huesos se los considera como segmentos rígidos, se puede hacer una descripción del movimiento a realizar utilizando los mismos métodos que se aplican en el análisis cinemático para mecanismos.

Teniendo en cuenta una postura erguida, con la mirada al frente y los pies juntos como la postura inicial de una persona, se identifican los tres planos

anatómicos que definen los ejes perpendiculares en los que ocurre el movimiento. Estos planos son los siguientes (Pons, 2008):

1. Plano frontal o coronal, que divide al cuerpo en su parte anterior y posterior.
2. Plano transversal, que divide al cuerpo en su parte superior e inferior.
3. Plano sagital o lateral, que divide al cuerpo en su parte derecha e izquierda.

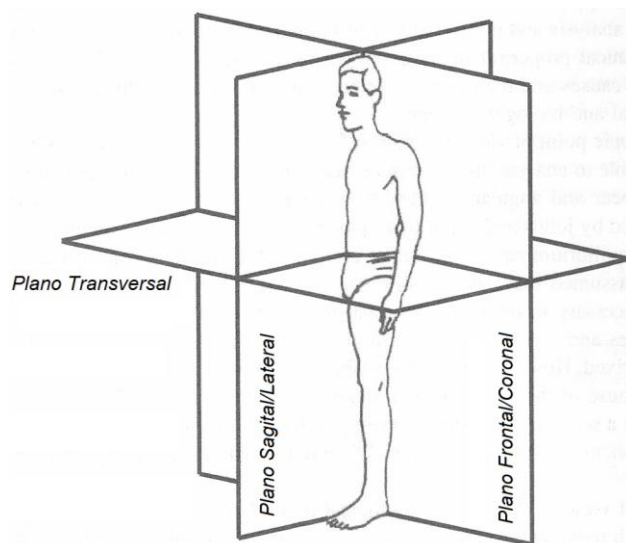


Figura 1. Planos del Cuerpo
(Pons, 2008)

Cada tipo de movimiento generado en las extremidades se define dependiendo el plano en donde ocurra y desde la posición inicial (Forner-Cordero, 2008).

Los movimientos ejecutados en el plano sagital se denominan *flexión* y *extensión*. La flexión se refiere a todo movimiento que reduce el ángulo entre huesos, o entre partes del cuerpo, que ocurre desde el frente hacia atrás y no de lado a lado. La extensión se refiere a todo movimiento que incrementa el ángulo entre los huesos de la extremidad en la parte de la articulación.

Cuando los movimientos ejecutados se presentan en el plano coronal, se los denomina *abducción* y *aducción*. La abducción es un movimiento que aleja del plano medio del cuerpo. La aducción es el movimiento que acerca a una extremidad en el plano sagital.

Cuando existen movimientos rotacionales de las extremidades, se las denomina *supinación* y *pronación*. La supinación ocurre generalmente en el antebrazo, cuando se gira la mano hasta posicionar la palma hacia arriba. La supinación es la rotación inversa, que gira la mano hasta posicionarla boca abajo (Forner-Cordero, 2008).

Estos movimientos de las extremidades son los que una persona aplica para el movimiento de las partes de su cuerpo, sea para realizar acciones de traslación, giros, inclinaciones y aperturas. Estos movimientos generados por la musculatura, tienen su punto de giro en las articulaciones respectivas.

Existen otras descripciones de movimientos presentes en el cuerpo humano, pero básicamente son combinaciones secuenciadas de las mostradas anteriormente, en las cuales la flexión, abducción, extensión y aducción se ejecutan en el mismo instante con referencia a varios ejes.

2.3 EXOESQUELETOS

El ser humano ha desarrollado tecnología que permite la operación en paralelo de mecanismos o dispositivos externos para potenciar ciertos aspectos funcionales o estructurales del sistema musculo-esquelético. Estos dispositivos son conocidos como “Órtesis”, y permiten la complementación o asistencia en funciones humanas naturales.

Los exoesqueletos se los describe entonces como robots órtesis que permiten al usuario potenciar fuerza, alcance, velocidad, etc. Se caracterizan

además porque la interface física humano-robot (*pHRI*) se basa fundamentalmente en la aplicación de fuerzas internas directamente del usuario al dispositivo.

En la actualidad se diseñan exoesqueletos cuya cadena cinemática se aplica solamente a extremidades superiores, solamente a extremidades inferiores, o se aplica al cuerpo completo.

2.3.1 EXOESQUELETOS EXISTENTES

El entusiasmo del ser humano por la creación de robots, marca este siglo como el más importante y significativo en alcanzar los autómatas que tanto se ha soñado en crear. Poco a poco se ha desarrollado la tecnología que ha permitido la innovación en sistemas humanoides que, hasta hace pocos años, solamente se los imaginaba y presentaba en historietas o películas. Actualmente, los logros en el campo de la robótica están apareciendo y dejando abiertas las puertas a la investigación, innovación y creación para mejorar las propuestas sobre lo que existe en el presente.

2.3.1.1 HAL-5 (Moreno et al. 2005)

Este mecanismo de asistencia para extremidades (Hybrid Assistive Limb - HAL) fue concebido en la Universidad de Tsukuba (Japón) y desarrollado en la actualidad por la empresa japonesa Cyberdyne. Su objetivo inicial era el de servir como un dispositivo de asistencia a las extremidades inferiores del operario, facilitando la fuerza y movimiento de sus dos articulaciones principales ubicadas en la rodilla (rótula) y en la cadera (cabeza del fémur).

Este dispositivo consiste en una estructura con actuadores en las rodillas y en la cadera, los cuales serán activados al ser detectada una señal mioeléctrica por dos sensores ubicados en la piel del operador, cerca de los

músculos principales de flexión y extensión. Cada uno de estos sensores está compuesto por 2 electrodos que estarán conectados a un amplificador de señal. Esta señal amplificada servirá para calcular el torque a generar de acuerdo al torque generado por el músculo, el cual será reproducido por el HAL en los actuadores de acuerdo a la siguiente relación:

$$\tau_{\mu} = \alpha_{\mu} \cdot \hat{\mu} \quad [2.1]$$

Donde:

τ_{μ} : torque a generar en actuador

α_{μ} : parámetro de ganancia

$\hat{\mu}$: torque generado por el músculo

Actualmente Cyberdyne se encuentra produciendo la quinta versión de este exoesqueleto, nombrado HAL-5, y que es comercializado para la asistencia de personas con dificultades en el movimiento de las extremidades inferiores, también utilizado en tareas de transporte de cargas medianas y como soporte no médico para potenciar movimiento y fuerza en las piernas del usuario.

2.3.1.2 WOTAS

Los temblores corporales son síntomas asociados a diferentes tipos de condiciones neurológicas anormales, lesiones cerebrales, intoxicaciones etílicas o enfermedades degenerativas, como es el caso de la enfermedad de Parkinson. Estos temblores son definidos como actividades oscilatorias rítmicas de las partes del cuerpo (Roncón *et al.* 2009) que afectan directamente a la realización de actividades normales, impactando en la calidad de vidas de quienes los padecen.

Los tratamientos actuales para controlar estos temblores involuntarios están basados en la administración de drogas y, en algunos casos, en cirugías. El

problema que se presenta es que las drogas pueden inducir a un efecto contrario en algunos pacientes, acentuando sus temblores involuntarios o simplemente pueden ser contra indicadas. En el caso de cirugía (Talamotomías), esta se asocia a riesgos de hemorragias y, potencialmente, a manifestaciones psiquiátricas que pueden inducir al suicidio de quienes se las realizan como se ha determinado últimamente con un rango del 4.3% (Burkhart *et al.* 2004).

Como alternativa para reducir esta condición física, se ha desarrollado una Órtesis para asistencia y supresión de temblores (Wearable Orthosis for Tremor Assessment and Suppression – WOTAS) (Roncón *et al.* 2009). Este exoesqueleto fue diseñado para generar métodos mecánicos contra la reducción de los temblores corporales. La principal característica de esta Órtesis es que sigue la estructura cinética de la extremidad superior después del hombro, priorizando la funcionalidad de la articulación del codo y de la muñeca. Permite 3 grados de libertad (3 GDL) como son la flexión-extensión del codo, la pronación-supinación del antebrazo y la flexión-extensión de la muñeca. Cabe indicar que este exoesqueleto restringe los movimientos de aducción-abducción y la pronación-supinación de la muñeca.

La estructura del WOTAS está constituida principalmente por tres componentes que son: (1) Órtesis que incluye los sensores y actuadores, (2) una unidad de control que se encarga de la ejecución de los algoritmos programados en tiempo real para reducir los temblores corporales y (3) un computador remoto, encargado de establecer una interface entre el WOTAS y la persona a cargo de la terapia (doctor, terapeuta, etc.).

El sistema WOTAS funciona en tres modos de operación (Pons, 2008):

- 1.- Monitoreo. Permite las mediciones y caracterización de los temblores corporales cualitativa y cuantitativamente. No presenta un control sobre los movimientos involuntarios en la extremidad.

2.- Intervención Pasiva. Funciona como un sistema que puede atenuar mecánicamente los movimientos involuntarios. Básicamente funciona simulando la aplicación de viscosidad o inercia a la extremidad superior (Roncón, *et al.* 2009) para la disipación de las vibraciones causadas por los temblores corporales y mejorando los movimientos voluntarios del usuario.

3.- Intervención Activa. Capaz de generar fuerzas opuestas a los movimientos involuntarios de acuerdo a la estimación en tiempo real de las fuerzas generadas involuntariamente, logrando una compensación y supresión efectiva de los temblores.

Cabe desatacar que el control del WOTAS fue implementado en un ambiente de tiempo real de MATLAB®, y la interacción activa se realiza a través de un dispositivo estándar de adquisición de datos.

De acuerdo a los experimentos realizados con el WOTAS, los resultados indicaron que la supresión de temblores funcionando en intervención activa es mucho mejor que la obtenida cuando funciona en intervención pasiva. Además, los experimentos dejan en claro que el grado de reducción de los temblores dependerá de la intensidad de los temblores. Y para finalizar, los potenciales usuarios expresaron, como requerimiento adicional, de que el exoesqueleto pueda ser utilizado por debajo de la ropa para no ser víctimas de exclusión social al ser vistos utilizando estos dispositivos (Roncón *et al.*, 2009).

2.3.1.3 BLEEX

En el año 2000, en la DARPA (Defense Advanced Research Project Agency), se da inicio al proyecto BLEEX, el cual consiste en un exoesqueleto que permite al usuario cargar pesos considerables apoyados en una estructura ubicada en la espalda. La característica principal de este dispositivo es la potenciación de la capacidad de carga del piloto durante un

tiempo mayor al que soportaría una persona aumentando significativamente su efectividad física (Kazerooni, 2010). Fue diseñado para que el usuario pueda agacharse, balancearse de un lado a otro, girar la cadera y las piernas, subir y descender pendientes; además de ser un dispositivo de peso ligero que puede ser transportado como mochila una vez que su carga se haya terminado.

La interacción entre el usuario y el exoesqueleto es en un nivel físico (pHMi – Physical Human Machine Interaction). No posee controles de joystick, botones o teclados para manejarlo, simplemente se mueve a la par con el usuario con un mínimo de fuerza entre ambos. Esto se debe a un controlador bastante elaborado que receptará las mediciones realizadas únicamente por el sistema del exoesqueleto para estimar el movimiento a realizar y potenciarlo (Kazerooni, 2005).

Aunque fue diseñado para que energéticamente este exoesqueleto sea autónomo, el diseño de la fuente de poder híbrida y el sistema de actuadores fue el que recibió mayor atención en su desarrollo para que el exoesqueleto pueda ser utilizado durante largos periodos de tiempo, entregando potencia hidráulica para el movimiento y potencia eléctrica para el computador del exoesqueleto.

En la actualidad se encuentran realizando investigaciones para el desarrollo componentes miniaturizados sin que el exoesqueleto pierda su capacidad física, y se busca conseguir fuentes de poder más pequeñas y más poderosas, además de mejorar los controladores y en general todo el sistema de interacción.

2.3.2 EXOESQUELETOS PARA LEVANTAMIENTO DE CARGAS

El diseño de exoesqueletos que faciliten tareas de levantamiento, está muy limitado y no es muy común el desarrollo de este tipo de sistemas. Los diseños encontrados pretenden potenciar capacidades humanas, pero no hay muchos que intenten sobre potenciar ciertas características; esto se debe a la cantidad y características de los actuadores que se requieren para poder alcanzar estos objetivos, principalmente por sus prestaciones que van muy de la mano con el tamaño de estos, y con el consumo de energía.

2.3.2.1 Body extender (BE)

Uno de los mayores avances en el campo de los exoesqueletos es el realizado por PERCRO Laboratory de la Scuola Superiore Sant'Anna, el cual ha desarrollado un dispositivo que permite el levantamiento de 50 Kg en cada mano.

Este sistema está compuesto por cuatro extremidades con cinemática antropomórfica, las cuales presentan un total de 22 grados de libertad (Marcheschi, 2011).

Aunque no es autónomo respecto a la fuente de poder, ya que este se conecta a una fuente externa, y su extremo peso puede provocar desbalance mientras se mueve, por lo que necesita ser soportado por un arnés para que este se mantenga en pie al ejecutar sus tareas, su increíble capacidad para levantar, girar, mover y transportar pesos fácilmente, se estima su aplicación para la manipulación de materiales militares en espacios cerrados, en la utilización en operaciones de rescate de víctimas de desastres y en el manejo de productos de tamaño considerable dentro de la industria.

2.3.2.2 Power-Assist suit

Desde 1991 se propuso la idea de realizar un traje que potencie la fuerza del usuario equipado con actuadores neumáticos para la ejecución de las funciones de extensión y flexión en extremidades, aunque no podía sostenerse solo, se evolucionaba en su diseño para mejorar ciertas necesidades del proyecto. En el año 2002 se logra desarrollar un traje que no necesita ser soportado para la asistencia de fuerza en actividades que requieren esfuerzo físico.

Este traje se caracteriza por que puede funcionar durante 20 minutos continuamente debido a su batería portable de Ni-Cd que genera 12V. Está compuesto por un cuerpo compacto que permite ser manipulado con facilidad, a pesar de que su sistema neumático están expuestas, un microcomputador para el sistema embebido, y sensores rotatorios planos (Ishii, Yamamoto, Hyodo, 2005). Este traje fue concebido con la idea de ayudar a las enfermeras en los hospitales de Japón a levantar y transportar pacientes de un lugar a otro, es inevitable que se lo utilice para el transporte de pacientes en una situación de urgencia a otra unidad.

Dentro del diseño de este exoesqueleto se destacan cuatro aspectos importantes:

1. Se pretende un traje bastante seguro y siempre disponible para su uso en una emergencia. El sistema de esclavo – maestro se encuentra en dentro de la misma unidad. Además, está diseñado de tal manera que si el traje se quedara sin energía, las válvulas y sistemas neumáticos bloqueen el aire que se encuentra en los diferentes actuadores para que la función de sostenimiento se mantenga.
2. Para seguridad de los pacientes se diseña de tal manera el traje para que no hayan partes mecánicas en la parte delantera del traje. Todo el sistema

de actuadores y neumático se encuentran en la parte posterior de la espalda y de las extremidades, para mantener el contacto directo del pecho y los brazos de la enfermera con el paciente para mantener empatía.

3. La gran mayoría de juntas del exoesqueleto están compuestas por actuadores rotatorios neumáticos, los cuales están cubiertos por juntas de caucho que le restan dureza al contacto de estas partes con el usuario y el paciente.

4. La utilización de sensores de dureza del músculo permite realizar movimientos suaves de los brazos, de las muñecas y piernas del traje. Además, el torque requerido en las juntas de los elementos mecánicos para mantener la posición, son obtenidas de los mecanismos del cuerpo estático, y de los ángulos de las articulaciones para el soporte de peso.

Básicamente el sistema mecánico está compuesto por hombros, brazos, una columna de soporte, cintura para giros y piernas, y en cada articulación se encuentra un sensor de ángulo de posición. Se encuentran actuadores neumáticos cubiertos de caucho en las juntas de las rodillas, del codo y de la cintura que consisten en pequeñas bombas de aire que funcionan con DC, específicamente con dos baterías de 12 V de Ni-Cd ubicadas cada una en la estructura del exoesqueleto a la altura del fémur. Esta hecho en aluminio para reducir su peso.

Su sistema electrónico está compuesto por sensores musculares que se ubican en los antebrazos, muslos y espalda que detectan la fuerza aplicada y generan la potencia requerida en las juntas, considerando el ángulo de posición y estimando el peso de la persona a ser asistida y el peso del usuario. El torque requerido en cada junta es independientemente calculado usando un modelo dinámico. Solamente el 50% de este valor calculado se usará como referencia para el torque de asistencia, y será compensado con un $\pm 20\%$ de acuerdo con los datos obtenidos de los sensores de dureza del músculo. Con este valor final el micro controlador

embebido calcula el troque a ser generado por los actuadores neumáticos y una señal de PWM es enviada a las pequeñas bombas de aire reguladas por una electroválvula neumática, cada bomba trabaja con 6V y 1A, brindando una presión de salida de 88 kPa y una potencia de 1.6 W . La presión interna dentro de los actuadores poseen un control PID (Pons, 2008).

2.3.2.3 Exoesqueleto para pruebas industriales

En el año 2014 Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering (DSME) decide desarrollar un prototipo de exoesqueleto para poder potenciar la fuerza de los trabajadores en el ámbito industrial (Ackerman, 2014). El diseño implica una estructura que pesa alrededor de 28 kilogramos que se mantiene en pie sin ningún tipo de soporte. Se caracteriza por que sus actuadores son eléctrico e hidráulicos, lo que implica una mayor generación de fuerza. Posee una batería que dura tres horas y permite el levantamiento de hasta 50 kg de peso.

El sistema mecánico está constituido por piernas con actuadores que se encuentran en las rodillas. El sistema de bomba hidráulica y la fuente de poder se encuentran en la parte inferior de la espalda para que no interfiera con el movimiento de los brazos. El levantamiento se da gracias a una estructura que es soportada desde la espalda hacia la parte superior de los hombros y, mediante un sistema de arnés se engancha la carga a levantar para que, mediante el esfuerzo generado en las piernas, esta carga sea levantada y guiada solamente por las manos. En las extremidades superiores no hay ningún tipo de estructura ni actuadores, por lo que la fuerza se concentra solamente en las articulaciones de las rodillas y la cadera.

Este exoesqueleto está diseñado para transportar cargas que pueden alcanzar hasta 100 kg de peso; sin embargo, estas pruebas se llevan a cabo y no se ha publicado aún resultados contundentes respecto a esta

necesidad. El transporte se lo realiza a muy baja velocidad, por lo que la DSME está trabajando dentro de este proyecto para hacer el exoesqueleto más rápido y de mayor capacidad (Ackerman, 2014).

2.4 DAÑOS POTENCIALES POR LEVANTAMIENTOS EXCESIVOS

El máximo peso que una persona puede cargar depende mucho de su contextura. Aunque para algunas personas 25 Kg es algo muy sencillo, para otros representa un factor de riesgo que afectará su salud, y no se puede establecer un límite de carga, salvo por los establecidos por la legislación de cada país.

Es en la industria en donde se puede constatar mayor cantidad de afecciones por levantamientos, generándose trastornos acumulativos debidos al progresivo deterioro del sistema musculo esquelético por manipulación de pesos de forma continua. Además, los trabajadores se ven expuestos también a sufrir traumatismos agudos, fracturas por accidentes o cortes. Cabe recalcar que los efectos acumulativos son provocados por varios factores, siendo el exceso de carga el de mayor contribución a la generación de estos daños (Sanders, 2004).

El riesgo de daños a la salud aumenta cuando la carga es demasiado pesada, o el exceso de confianza conlleva a cargar pesos sin ayuda de otra persona. Además, las dimensiones de la carga también pueden afectar ya que se hace difícil su manipulación y, ergonómicamente, se adopte una postura perjudicial para lograr levantarla. Por otro lado, si la ubicación de la carga limita el acceso a esta, y esto obliga a extender los brazos o inclinar el tronco para alcanzarla, la fuerza aplicada para su levantamiento va a ser mayor y concentrada en las articulaciones de forma que pueden ser deterioradas más rápido.

Los trastornos acumulativos más comunes son los que conllevan a Desórdenes Músculo Esqueléticos (Musculoskeletal Disorder – MSD), los cuales aparecen por fuerza aplicada excesiva que causa daño en las fibras musculares o en las articulaciones. Estos daños se producen por las fuerzas internas, que se refiere a la tensión generada dentro del músculo, tendones y ligamentos que resisten o mueven cargas pesadas externas (Sanders, 2004). El riesgo que existe por estos trastornos acumulativos es que puede acarrear una discapacidad y la necesidad de abandonar la actividad laboral.

Los trastornos musculoesqueléticos acumulativos por exceso de carga afectan a la espalda, hombros, cuello, y extremidades superiores e inferiores. Específicamente se presentan lesiones en los discos intervertebrales en la zona lumbar por presión de los músculos sobre las vértebras, lesiones en las extremidades inferiores por trastornos acumulativos como la Osteoartritis de la cadera y de las articulaciones de la rodilla, Síndrome del Túnel Carpiano en la mano y muñeca, el cual se origina por compresión del nervio mediano en el túnel carpiano de la muñeca y Síndrome de Raynaud que es un fenómeno vascular. En los brazos y codos se pueden presentar Epicondilitis y Epitrocleititis (los tendones laterales del codo producen dolor a lo largo del brazo, y afección de la cara media del codo), Síndrome del Túnel Radial producido por presión sobre el nervio radial. En los hombros y cuello se pueden presentar Tendinitis del manguito rotador, formado por 4 tendones que se unen en la articulación del hombro, Síndrome de la Salida Costoclavicular por compresión en los nervios y vasos sanguíneos entre el cuello y el hombro, y Síndrome Cervical por tensión que se produce por tensiones repetidas del músculo elevador de la escápula y del grupo de fibras musculares del trapecio en la zona del cuello (Discapnet, 2008).

Otras afecciones de tipo inflamatorio que se pueden presentar son Tendinitis, Bursitis, Sinovitis, Artritis y Condritis. También se pueden presentar lesiones de tipo traumáticas como los Desgarros que son rupturas

parciales o completas de un tejido, Luxaciones que son pérdidas de la relación articular, Esguinces que son rupturas de los ligamentos articulares, y Fracturas (Ellegast *et al.* 2016).

2.5 LEGISLACIÓN EN ECUADOR

Como se dijo anteriormente, depende de la persona y su contextura, y no se puede establecer como máximos permitidos un único valor. En Ecuador se aplica el Decreto No. 2393, el cual es el “Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo” para establecer límites a la carga que puede realizar una persona para disminuir o eliminar los riesgos que conlleva el exceso de carga por parte de una persona.

De acuerdo al Título IV, Capítulo V, art. 128, sobre manipulación de materiales, el peso máximo a levantar por una persona es el siguiente:

Varones hasta 16 años	35 libras
Mujeres hasta 18 años	20 libras
Varones de 16 a 18 años	50 libras
Mujeres de 18 a 21 años	25 libras
Mujeres de 21 años o más	50 libras
Varones de más de 18 años	Hasta 175 libras.

Además, deja en claro que no se permite que un trabajador transporte pesos que puedan comprometer su salud o seguridad, y deben llevar puestas las prendas de protección personal apropiadas para realizar los levantamientos.

El diseño de un exoesqueleto que permita levantar 50 kg de peso, asegura que los trabajadores puedan realizar tareas de exigencia física sin que se vean expuestos a sufrir algún tipo de lesión, ya que esto garantiza que el esfuerzo máximo generado por cada usuario no sobre exigirá a su

capacidad física. Prolongando su salud y disminuyendo notablemente los trastornos acumulativos que esta tarea puede implicar. Además, el levantamiento de carga permite que esta tarea sea realizada por una sola persona, disminuyendo las probabilidades de que se lesionen más trabajadores.

3. DISEÑO DE EXOESQUELETO

3.1 METODOLOGÍA

Para el diseño del exoesqueleto se plantea una metodología basada en técnicas concurrentes aplicadas en el diseño de robots propuesta por Méndez en 2003, la cual permite volver desde cualquier etapa de diseño para corregir, depurar y mejorar el producto final. Aunque esta metodología es aplicada hasta la etapa de Escalado de la producción, la cual se aplica para efectos de manufactura, en el presente trabajo solamente se tendrá en cuenta hasta la etapa de pruebas y refinamiento. Las etapas de la metodología se muestran en la Figura 2.



Figura 2. Etapas del proyecto
(Méndez, 2003)

En la etapa de Planificación, se establecen los requerimientos que el modelo del exoesqueleto necesita para su diseño y, además, se identifican las restricciones de acuerdo al criterio del diseñador (Navas, 2011).

En la etapa de Desarrollo conceptual se identifica la función general, la cual debe cumplir con los requerimientos establecidos en la etapa de planificación, para lo cual se realizara una verificación para asegurar su cumplimiento.

Las subfunciones principales como conceptos básicos del dispositivo, las cuales pueden ser mecánicas, eléctricas y estructurales a nivel de subsistemas, serán establecidas en el Diseño a nivel de sistema, para lo cual se busca definir la interrelación entre todos los subsistemas donde diferentes efectos físicos pueden causar interferencias entre los módulos o subsistemas definidos (Navas, 2011). Esta etapa de diseño contempla

someter a una verificación y a una validación los subsistemas presentados, y dar soluciones a las interacciones incidentales detectadas.

Para la etapa de Diseño detallado, se tiene en cuenta que ciertas subfunciones demandan mayor atención en su descomposición y análisis para que el exoesqueleto cumpla con los requerimientos planteados. A estos subsistemas se los llevará a una simulación de prueba para lograr alcanzar su desarrollo satisfactorio. En esta etapa también se presenta un listado con los elementos a ensamblar para la obtención del dispositivo, y las partes mecánicas, en conjunto con subensamblajes virtuales, se realizarán en SolidWorks.

La etapa de prueba y refinamiento consiste en la realización de simulaciones en ambientes virtuales, donde se analizará el comportamiento de las partes y ensamblajes cuando son sometidos a ciertas condiciones físicas o de trabajo. De acuerdo a los resultados obtenidos, se procede a un refinamiento requerido en donde se observe la necesidad de mejoramiento.

3.2 PLANIFICACIÓN

Dentro de la planificación se especifican los requerimientos y las restricciones a tener en cuenta en el diseño del exoesqueleto.

3.2.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

Se identifican los requerimientos en distintos grupos:

Funciones:

- Movimiento hacia delante.
- Flexión en extremidades inferiores (rodillas, tobillos y cadera).
- Flexión en extremidades superiores (codos y hombros).

- Levantamiento de carga hasta 50 Kg.

Materiales:

- Resistente a impactos (tenacidad).
- Resistencia a la corrosión.
- Resistencia al corte.
- Dureza.
- Maquinabilidad.

Diseño:

- Ergonómico.
- Movilidad restringida (En los ángulos de desplazamiento).
- Actuadores lineales y rotacionales.
- Alta fuerza.

Energía:

- Tiempo de funcionamiento extendido.

Control:

- Programación de PLC.
- Pulsadores para inicio de movimiento.
- Movimientos continuos hasta fin de sub-programa.

Seguridad:

- Estabilidad.
- Elementos de sujeción para el usuario.

3.2.2 RESTRICCIONES DE DISEÑO

- Limitación en los GDL para evitar desestabilidad

- Movimiento hacia adelante. No se desplaza lateralmente
- Cargas no mayores a 50 Kg
- Baja velocidad de ejecución y traslación para favorecer al equilibrio.
- Solamente para cargas sólidas con CG en el centro del elemento.

3.3 DESARROLLO CONCEPTUAL Y DIAGRAMA GENERAL

Básicamente el funcionamiento del exoesqueleto como sistema obtendrá en su salida flexión en las articulaciones que sean diseñadas para ello, y levantamiento de una carga, a partir de una fuerza de entrada aplicada por el usuario en la entrada. El diagrama del sistema exoesqueleto se muestra en la Figura 3.

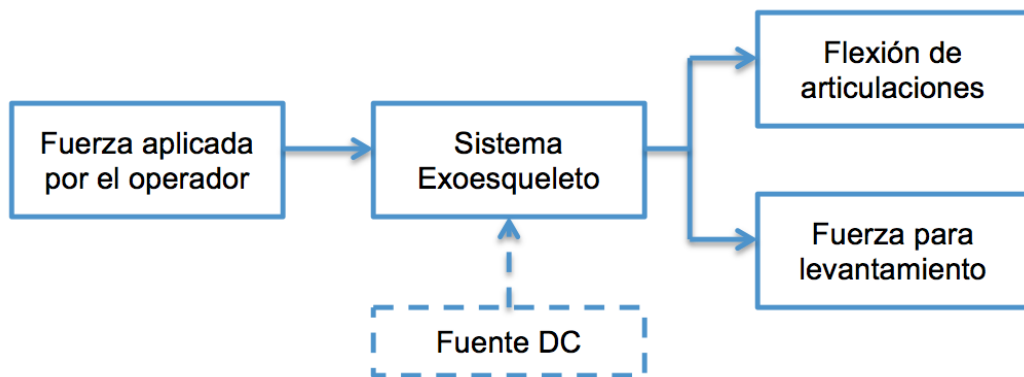


Figura 3. Diagrama General del Sistema

Como recurso, para el funcionamiento de este sistema, se requiere una fuente de poder que alimente a los subsistemas mecánico, electrónico y sensorial del exoesqueleto.

La flexión coordinada de las articulaciones específicas, generarán el movimiento de las extremidades, permitiendo que el exoesqueleto pueda avanzar hacia adelante y hacia atrás, tal como se especifica en los requerimientos.

3.4 DESARROLLO A NIVEL DE SISTEMA Y DIAGRAMA ESPECÍFICO

En esta etapa se hace una propuesta basada en la estructura básica de un sistema mecatrónico, en donde se incluyen actuadores, sistema básico, sensores, sistema de procesamiento de información, ambiente y usuario, interrelacionados para cualquier diseño (Verein Deutscher Ingenieure, 2004). La estructura básica de un sistema mecatrónico se muestra en la Figura 4.

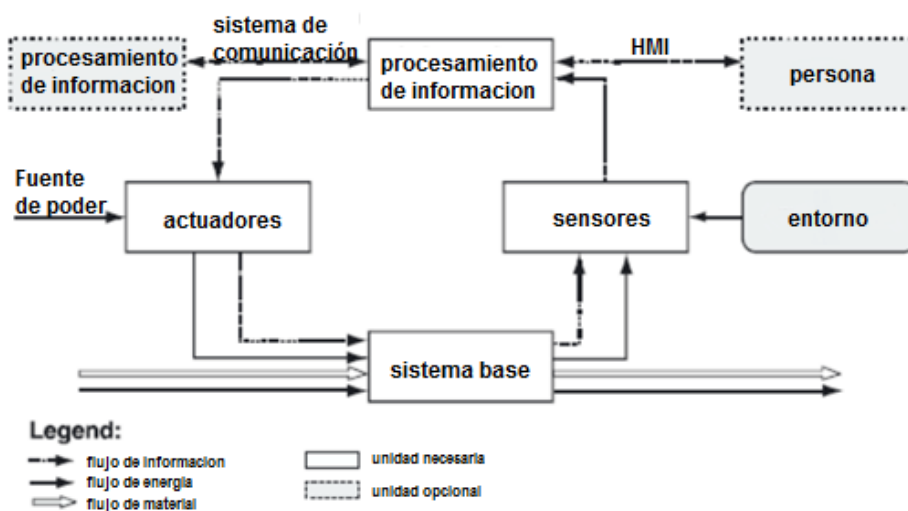


Figura 4. Estructura básica de un sistema mecatrónico
(Verein Deutscher Ingenieure, 2004)

Aplicado al presente diseño, y teniendo en cuenta el diagrama general, se presenta la interrelación de los subsistemas en la Figura 5.

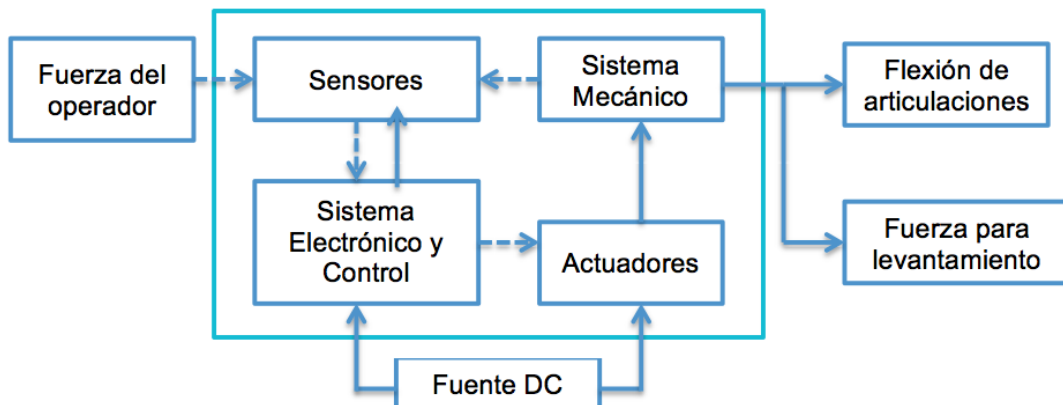


Figura 5. Diagrama General del Sistema

La entrada del sistema que está definida como variable es la fuerza aplicada por el operador.

El sistema básico propuesto en la estructura de la Verein Deutscher Ingenieure (2004), corresponde en este diseño al subsistema mecánico en donde se incluye la estructura de soporte, las extremidades, las articulaciones y dispositivos de soporte.

El procesamiento de la información se realizará en el controlador seleccionado. Al ser un sistema mecatrónico, los sensores y actuadores estarán interrelacionados a través de este controlador.

El grupo de sensores serán de tipo pulsador, los cuales estarán ubicados en posiciones de mayor incidencia del usuario para la activación del sistema de forma más sencilla y fácil de implementar.

Los actuadores a implementar principalmente en las articulaciones, deben guardar dos características principales como son su tamaño y el torque máximo a entregar.

3.4.1 VERIFICACIÓN

La fuerza generada por el usuario presiona el pulsador, ubicado de manera que la extremidad haga contacto de forma rápida, que se encargará de enviar la señal al PLC. De acuerdo a lo programado en el controlador, este envía una señal de activación al actuador para indicar su posicionamiento lineal, lo que genera la fuerza necesaria para que el sistema mecánico entre en acción y realice la flexión requerida en la articulación y provoque el movimiento. Para generar la caminata, se envía dos señales sincronizadas, una para los servos lineales y otra para los motores rotacionales, para que se genere el movimiento hacia delante de piernas del exosqueleto.

Para el levantamiento, el sistema mecánico será sensado para que, mediante un encoder lineal, reciba la señal de activación y aumente la corriente en la bobina del servo y en los rotacionales de los muslos, de esta manera se obtendrá mayor fuerza y torque. Es importante recordar que parte de los requerimientos del sistema es que, si existe una sobre carga en el levantamiento, el sistema indicará una desactivación y pondrá al sistema en paro por razones de seguridad.

3.4.2 VALIDACIÓN

Para la validación del sistema, se realizará el diseño electrónico que encierra los sensores y controlador. Se llevará a una simulación para comprobar el comportamiento y señales enviadas desde este sistema, de acuerdo a la señal de entrada (la generada por los sensores).

La validación del sistema mecánico se llevará a simulación por partes diseñadas; es decir, una vez que se tenga el diagrama de una extremidad, de la estructura de soporte y de la cadera, se observará el comportamiento y la dinámica de estas partes. Al aplicar los actuadores se verificará el movimiento de traslación y flexión en cada articulación del exoesqueleto. Se contempla realizar una simulación global de la parte mecánica, una vez ensambladas las partes.

Dentro del diseño se debe realizar la interrelación entre los sistemas principales, el sistema mecánico y el electrónico. Es fundamental verificar el comportamiento de los actuadores según la carga que se desea levantar, incluyendo un factor de seguridad para garantizar la seguridad en el momento de realizar la operación.

3.5 DISEÑO DETALLADO

Para el diseño detallado se separa en dos partes a desarrollar. El sistema mecánico presenta el diseño y ensamblaje mecánico del exoesqueleto, incluido la especificación de materiales y justificación de los mismos. En el sistema electrónico se presenta el diagrama de flujo a cumplirse en la ejecución de cada uno de los actuadores justificando también su ejecución.

3.5.1 SISTEMA MECÁNICO

Los grados de libertad de movimiento en las extremidades que una persona realiza se redujeron a los requeridos para realizar un levantamiento vertical. Por esta razón, las funciones de extensión y flexión son las seleccionadas en el diseño de piezas y selección de motores servo lineales.

3.5.1.1 Antebrazos

Inspirado en el funcionamiento de un montacargas, los antebrazos son diseñados con extensiones de 25 cm a partir de los puños. Sobre la placa principal se montan protecciones para el usuario para la parte que estará en contacto con la estructura y para la mano, la cual será utilizada también para implementar el sistema de pulsadores (switches ON/OFF) que accionaran los actuadores que generen el movimiento de extensión y flexión en la articulación del codo. Para evitar trabamientos del motor lineal, se diseña un alojamiento para rodamientos; en este caso, se decide utilizar los rodamientos FAG 6008 (Catálogo WL 41 520/3 SB, 2000).

La estructura principal se diseña en una aleación de Aluminio 6061 T6, obteniendo una pieza de menor peso y alta resistencia a la aplicación de fuerzas y momentos de torsión. Las características físicas de este elemento, y de acuerdo al material seleccionado son las siguientes:

Masa = 1,61 Kg

Volumen = 596433, 38 mm³

En la parte inferior, como parte de la estructura, se incluye un tope del mismo material cuya función es limitar el giro del antebrazo, de tal manera que, en caso de existir alguna falla en el sistema electrónico y de control, no sobrepase la posición máxima de desplazamiento (0°) y cause daño en la articulación del codo del operador.

La estructura a implementar como extremidad izquierda y extremidad derecha se muestra en la Figura 6. Para ambos lados se diferencia una simetría opuesta, pero que guarda exactamente las mismas características.

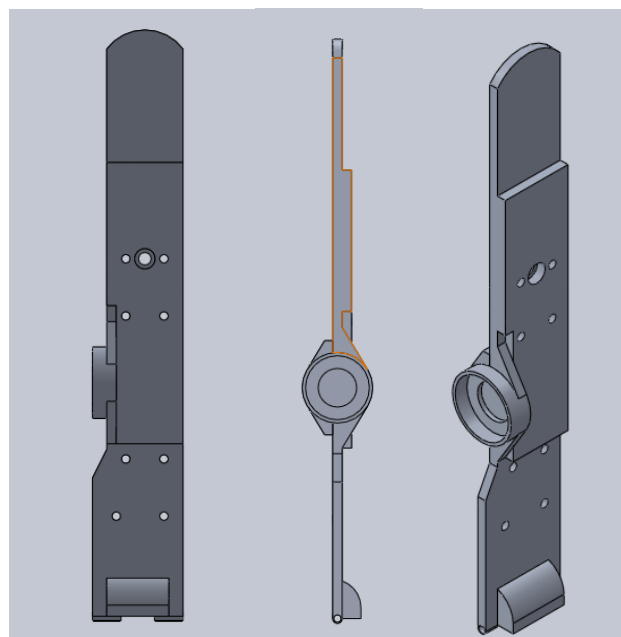


Figura 6. Estructura principal de antebrazos

El cojinete es diseñado para albergar un rodamiento 6008, por motivos de diseño se utiliza el catálogo de rodamientos de FAG. Este rodamiento es de una sola hilera de bolas (Figura 7) y no presenta tapas de protección a los lados, lo que permite lubricar y limpiar de forma más sencilla y directa.

Sus dimensiones son las siguientes:

$d = 40 \text{ mm}$

$D = 68 \text{ mm}$

$B = 15 \text{ mm}$

$R_s = 1 \text{ mm}$

$H = 59,1 \text{ mm}$

$J = 49,3 \text{ mm}$

Peso = 0,194 Kg

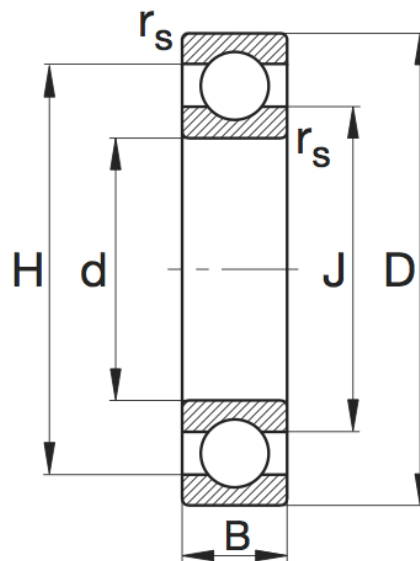


Figura 7. Esquema de rodamientos de bolas de una sola hilera
(Catálogo FAG WL 41 520/3 SB, 2000)

Las protecciones han sido diseñadas en Tecno polímero (Nylon de alto peso molecular) con una resistencia a la tensión aceptable (77 MPa). Este material puede ser maquinado para obtener la forma que se desee. La protección de la mano incluirá el pulsador que acciona el primer servo motor lineal. Se presenta la visualización de esta pieza en la Figura 8.

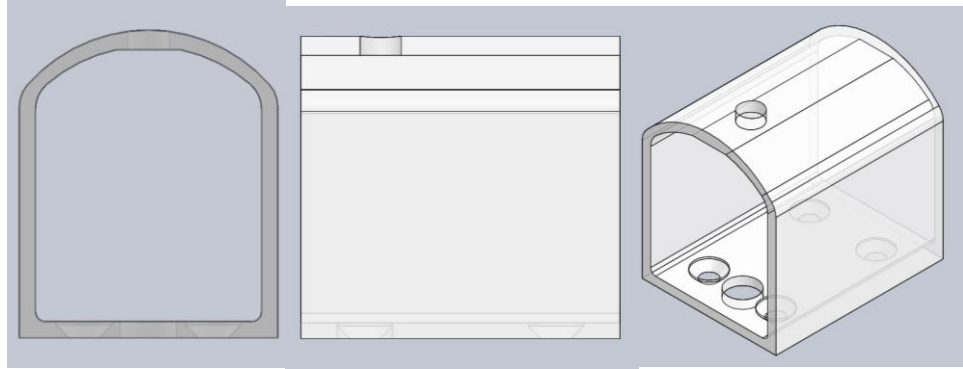


Figura 8. Protección de mano

Adicionalmente se diseña una protección para que el antebrazo del usuario no entre en contacto con la estructura principal, ya que en esa parte se encuentra el ensamble de esta parte del Hexo con el servo motor (Figura 9).

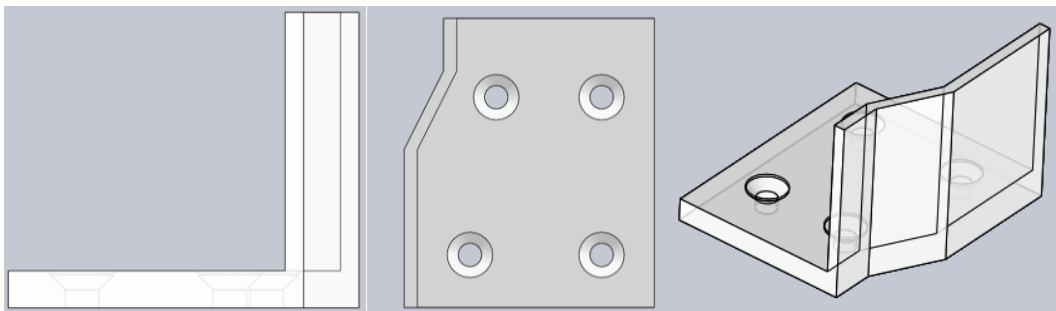


Figura 9. Protección de antebrazo

El ensamble de estos tres elementos se muestra en la Figura 10.

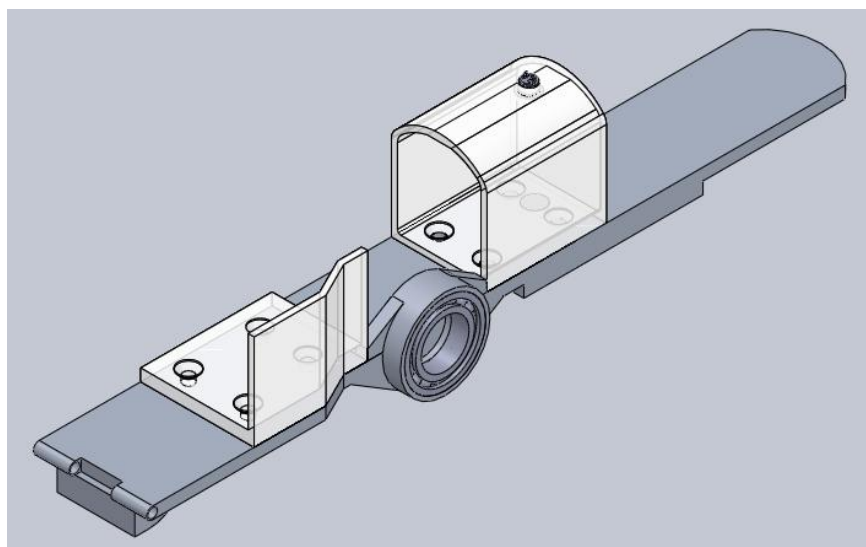


Figura 10. Antebrazo derecho ensamblado

3.5.1.2 Brazos

El otro elemento que constituye ambas extremidades superiores es el brazo. Para el diseño del mismo se considera una única pieza de Aluminio 6061 T6 en la cual se soportará el peso del brazo del usuario y también ejercerá la función de soporte del antebrazo. En el caso del brazo, se diseña una única protección para el usuario sobre la cual se montan los pulsadores ON/OFF que ejecutan la extensión y flexión. Se incluye el alojamiento del rodamiento en la parte inferior de la estructura para que la movilidad no sea interrumpida por otro elemento del Hexo, evitando colisiones entre partes.

Este elemento se diseña para que sus características físicas sean lo más reducidas posibles, obteniéndose los siguientes valores:

Masa = 1,4 Kg

Volumen = 520853,47 mm³

Al igual que en el antebrazo, se incluye un tope de seguridad del mismo material, el cual está ubicado de tal manera que coincide exactamente con el tope de seguridad del antebrazo; así, ambos topes coincidirán cuando la extensión de total (0°) evitando daños en el usuario. Tanto el tope del antebrazo, como el del brazo son de las mismas características y medidas.

La estructura del brazo es simétrica para el lado derecho y para el lado izquierdo, guardando las mismas características constructivas en ambas extremidades. La estructura del brazo se muestra en la Figura 11.

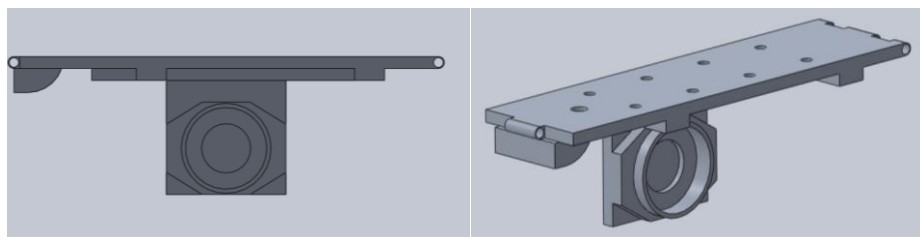


Figura 11. Estructura principal de brazos

Para permitir la flexión y extensión del brazo se utiliza también el rodamiento FAG 6008, descrito anteriormente en el diseño del antebrazo.

La protección del brazo del usuario también es de Tecno polímero (Nylon de alto peso molecular). Se considera en el diseño la posición máxima del antebrazo en una flexión. Esto justifica el diseño redondeado de la parte delantera (Figura 12).

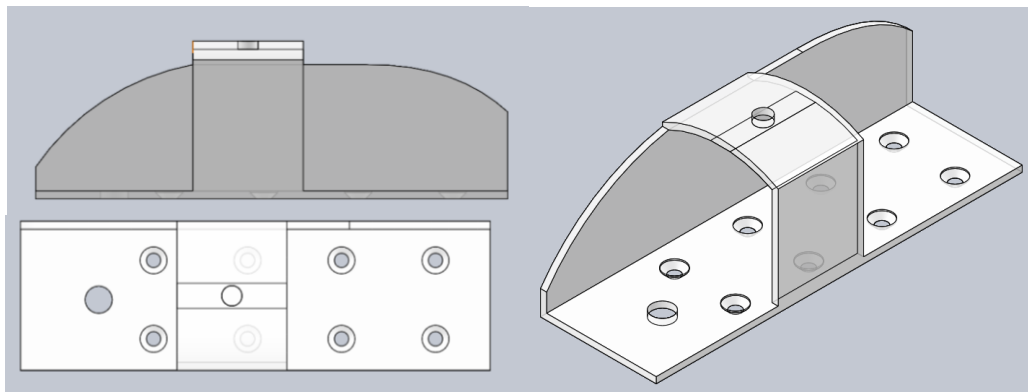


Figura 12. Protección de brazo

El ensamblaje de ambas piezas del brazo se muestra en la Figura 13.

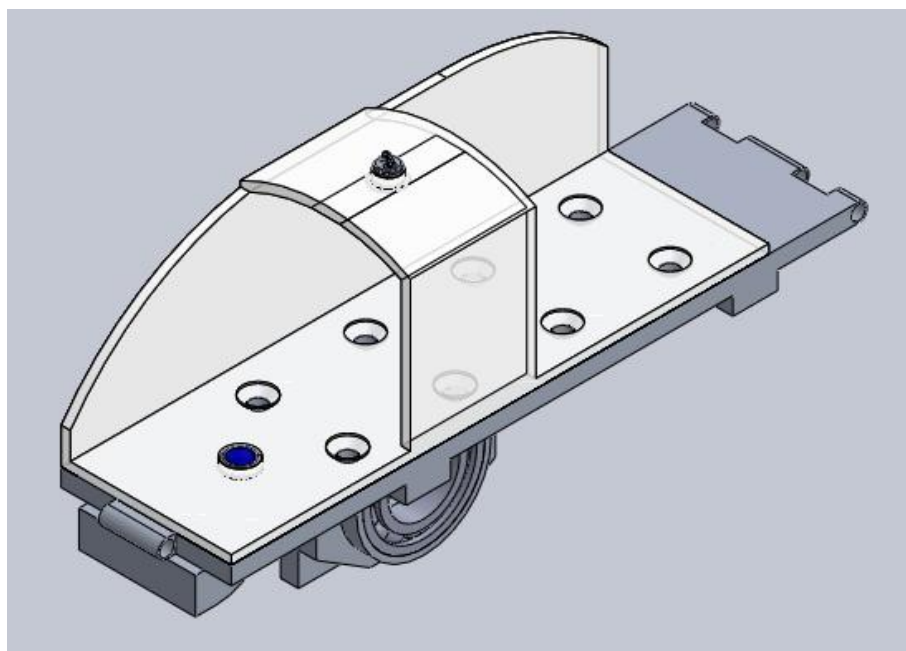


Figura 13. Brazo derecho ensamblado

3.5.1.3 Sección A - Espalda

Este elemento soporta cargas generadas en las extremidades superiores. Es de constitución robusta y diseño flexible para su acoplamiento, ya que requiere libre desplazamiento de los actuadores lineales y del recorrido del brazo. Se soporta en la sección B de la espalda de forma lineal vertical. Se diseña en Aluminio 6061 T6 y no incluyen protecciones para el usuario.

Las características físicas de este elemento son las siguientes:

Masa = 6.0 Kg

Volumen = 3300442, 98 mm³

En la parte posterior, debajo de la articulación del brazo, se incluyen topes para limitar el desplazamiento hacia atrás y conseguir la máxima posición sin colisiones entre estructuras. Tiene un ángulo de 6.92° respecto a la vertical.

Ambos lados guardan las mismas características simétricas y se caracteriza por ser el elemento de mayor tamaño del Hexo (Figura 14).

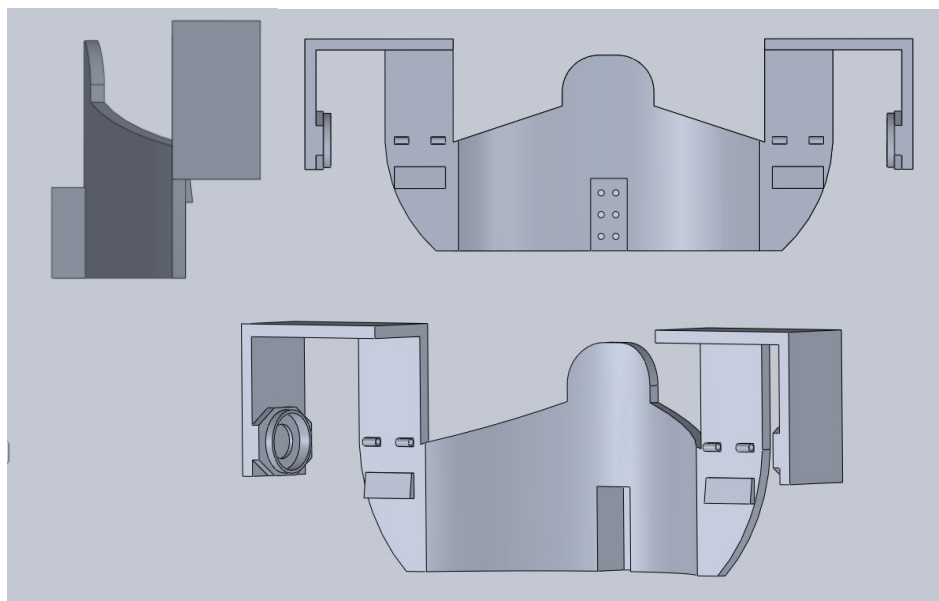


Figura 14. Estructura de la Sección A – Espalda

Ambos lados, en la parte interior lateral correspondiente a los hombros del Hexo, poseen un alojamiento donde se incluyen rodamientos FAG 6008 para la libre rotación de los servo motores líneas que actúan sobre los antebrazos. Los elementos del brazo se acoplan mediante un pasador a la parte trasera de la sección A de la espalda para guiar la extensión y flexión de este elemento respecto al servo motor lineal que genera su movimiento.

3.5.1.4 Sección B - Espalda

Se caracteriza principalmente por la ergonomía que presta al usuario en la parte lumbar. Esta característica, aparte de contribuir a la buena postura, permite distribuir el centro de masa de todo el Hexo dentro del área de apoyo mejorando la estabilidad. Las dimensiones asignadas son tomadas en cuenta para una persona de 80 Kg y 1,80 m de alto. En la Figura 15 se puede identificar las medidas que corresponden para la parte dorsal de la espalda, con 210 mm de largo, y la curvatura en donde empieza la zona lumbar con 40 mm hacia adentro a lo largo de 100 mm. Este elemento se acopla introduciéndose 100 mm en la cavidad de igual dimensión tanto en la sección A como en la C.

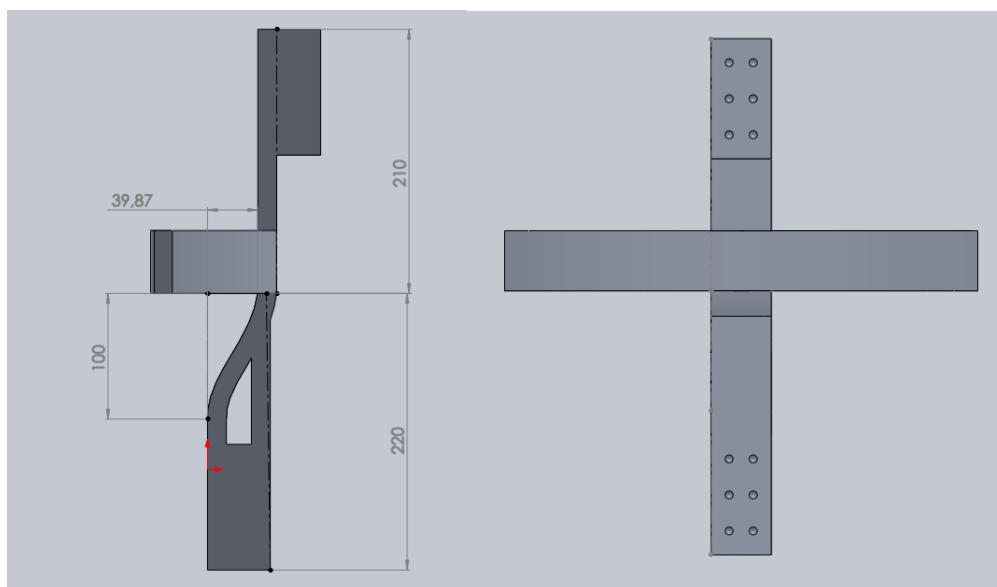


Figura 15. Medidas de la estructura de la Sección B - Espalda

Sus características físicas básicas son las siguientes:

Masa = 2.0 Kg

Volumen = 1016291, 66 mm³

Se diseña un elemento de seguridad que mantiene al usuario dentro de esta estructura. No se incluyen protecciones debido a que no presión por parte de este elemento sobre el usuario. Esta estructura se muestra en la figura 16.

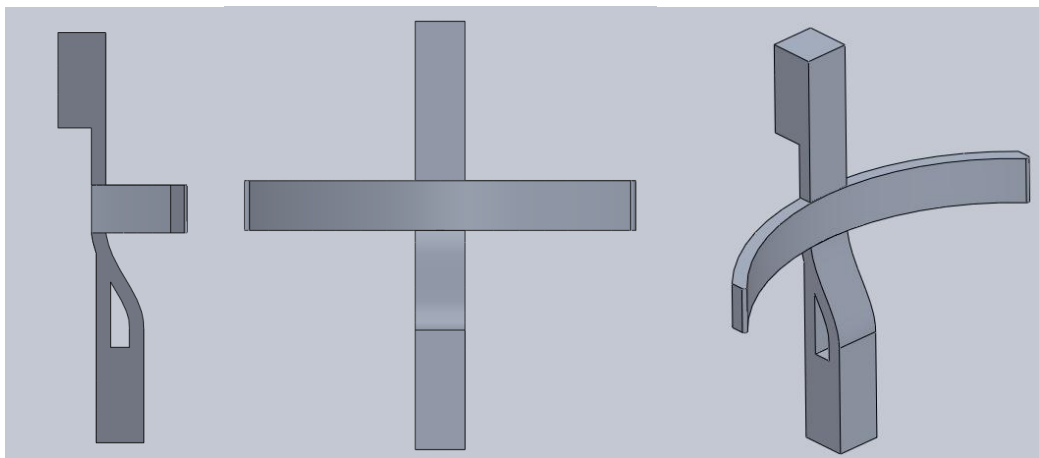


Figura 16. Estructura de la Sección B - Espalda

Para el ajuste y rigidez del conjunto se incluyen 6 perforaciones, de $\theta = 6.60$ mm cada una, en la parte superior e inferior para la inclusión de pernos de sujeción. Debido a esta rigidez requerida se aumenta la robustez en las partes de este elemento que se van a acoplar.

3.5.1.5 Sección C – Espalda

Este elemento se caracteriza por ser el eslabón entre las extremidades superiores e inferiores. Aquí es donde se concentra el apoyo y soporte de los servo motores lineales de las canillas y de los brazos; además, es donde se soporta la acción vertical del peso de la parte superior y del peso de todo el sistema de control. La cantidad de peso a soportar exige que sea el

elemento más robusto de todos, aunque en dimensiones es menor comparado con la sección A de la espalda, en volumen es mayor y, por lo tanto, el más pesado de todo el Hexo.

Los actuadores lineales se acoplan en la parte trasera de este elemento, de esta manera se evita que existan colisiones con las otras partes de la estructura y evita entrar en contacto con el usuario cuando se están realizando los movimientos de traslación y de carga.

Presenta una curvatura, complementada por una apertura en la parte central baja, lo que permite manipular de forma cómoda la estructura sin que se presenten golpes ni remordimientos para el usuario. Ergonómicamente esta estructura se acopla a la curvatura natural de la parte pélvica, sin que esta ejerza algún tipo de presión sobre quien la utiliza. Esta estructura se muestra en la Figura 17.

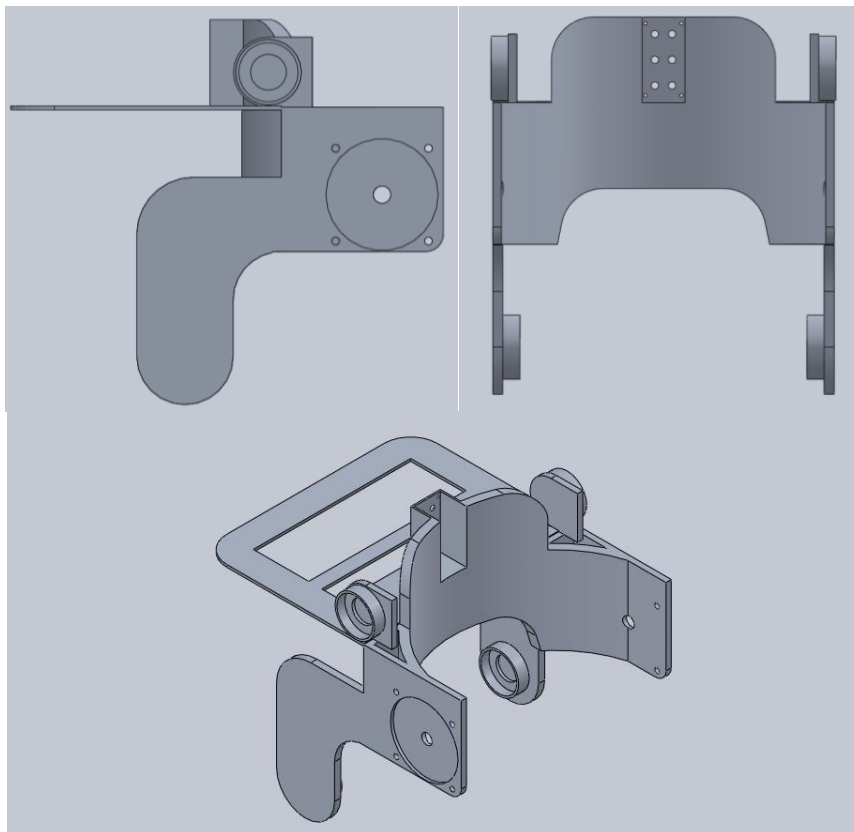


Figura 17. Estructura de la Sección C - Espalda

El acoplamiento de esta sección C de la espalda con los otros elementos es con pernos; por lo tanto, también presenta perforaciones de $\theta = 6.60$ mm cada una, con un total de 6 perforaciones para el correcto ajuste y rigidez del conjunto.

En esta estructura se incluyen las cavidades para la implementación de rodamientos FAG 6008 en el acoplamiento de los servo motores lineales. Se caracteriza, además, porque esta estructura soportará los servo motores rotaciones que ayudarán en el movimiento de los elementos correspondientes a los muslos del Hexo. En la parte trasera se diseña una bandeja en donde se asientan todos los elementos de control electrónico y los amplificadores de todos los actuadores. De acuerdo a las dimensiones que estos elementos presentan, se asignan medidas para que entren todos los módulos; además, se trata de eliminar la mayor cantidad de masa posible para que todos los módulos de control se ubiquen correctamente, y para que el peso adicional sea el menor posible.

Sus características físicas básicas son las siguientes:

Masa = 8.0 Kg

Volumen = 3273128, 32 mm³

No presenta elementos de protección de Nylon ya que esta estructura no soporta directamente el peso del usuario, solamente se encarga de mantenerlo en posición y de soportar el peso de la parte superior.

3.5.1.6 Ensamble espalda

Acoplando los tres elementos presentados anteriormente se obtiene toda la estructura que corresponde a la espalda del Hexo. El diseño permite mantener una postura recta tanto en carga como en traslación y mantiene al usuario dentro de la estructura, evitando que este tenga que ejercer fuerza

alguna sobre este elemento. El ensamble de la espalda se muestra en la Figura 18.

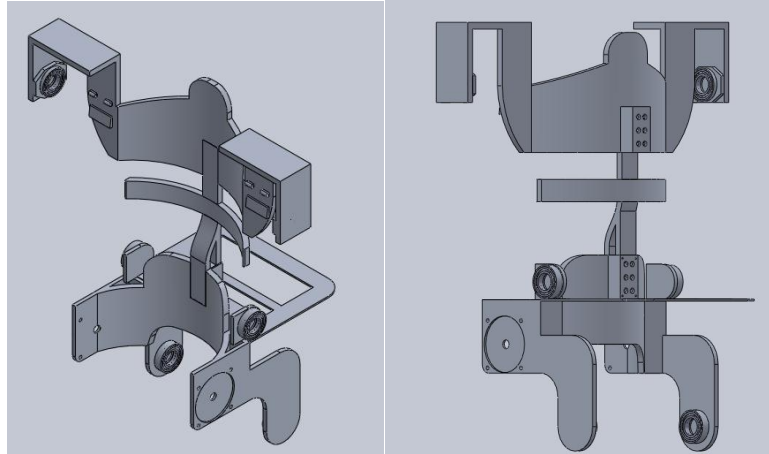


Figura 18. Espalda ensamblada

3.5.1.7 Muslo

Es el primer elemento de las extremidades inferiores, el cual se ensambla directamente al servo motor rotacional y da soporte a la estructura, evitando momentos de rotación que saquen al Hexo de estabilidad. Se caracteriza porque guarda la forma de la pierna, ya que la parte posterior de este elemento presenta una ligera inclinación hacia adentro de 2.72° , manteniéndose en contacto con la parte posterior del muslo del usuario.

Aunque es una pieza larga, debido a las características naturales del muslo, no presenta mayor cantidad de masa, ya que el soporte que realiza es solamente en los extremos y no es diseñado para acoplarse a un servo motor lineal. Se caracteriza por cubrir dos planos, permitiendo resguardar la posición de la pierna y no se salga de la estructura. Las características físicas básicas de este elemento son:

Masa = 1,5 Kg

Volumen = 713911,72 mm³

Al igual que los otros elementos de las extremidades superiores, el lado izquierdo y el lado derecho son simétricos, por lo que el diseño es relativamente igual para ambos lados. La estructura principal del elemento del muslo se muestra en la Figura 19.

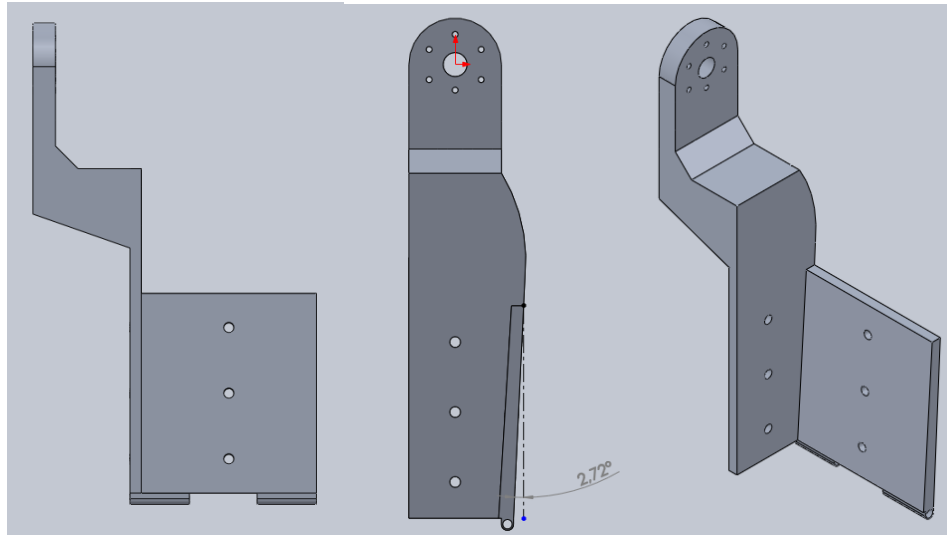


Figura 19. Estructura principal de muslos

El ensamblaje con el servo motor rotacional se lo hace con 6 perforaciones de $\theta = 5$ mm, ubicados de forma que encaje con las perforaciones roscadas propias del rotor del servomotor. Además, la estructura principal del muslo consta de 6 perforaciones de $\theta = 9$ mm, 3 en el plano lateral y 3 en el plano frontal, por las cuales pasan los pernos para sujeción de la protección de Tecno polímero (Nylon de alto peso molecular).

La parte baja de este elemento se articula con la canilla utilizando pasadores que sujetan la bisagra entre ambos elementos.

Esta protección consta de una perforación para la aplicación de los pulsadores que permitirán el accionamiento de los distintos servo motores tanto para agacharse y cargar, como para la traslación de todo el Hexo. La protección se muestra en la Figura 20.

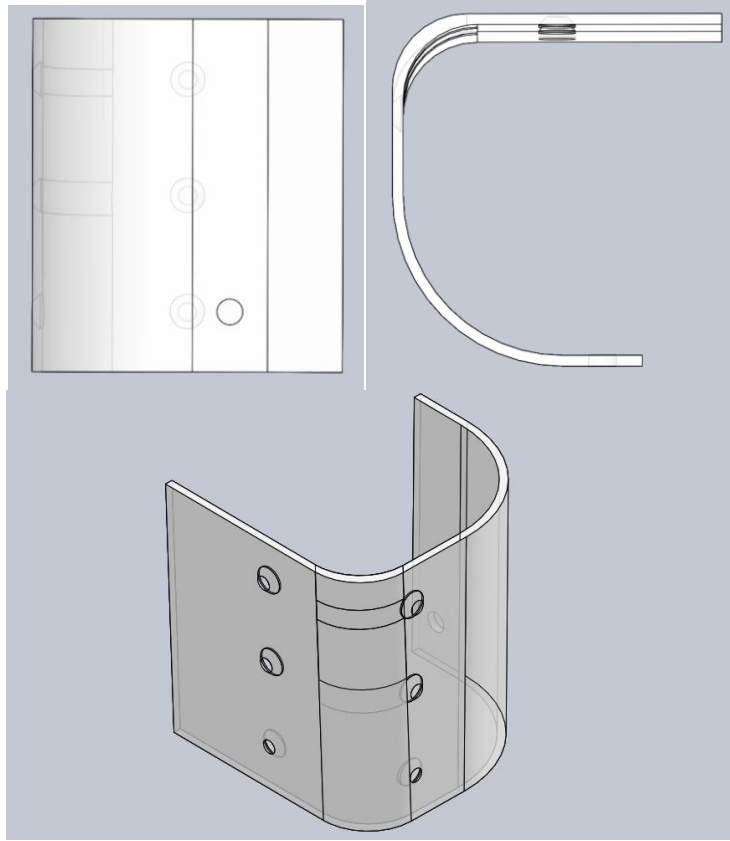


Figura 20. Protección de muslo

El ensamble del muslo se muestra en la Figura 21.

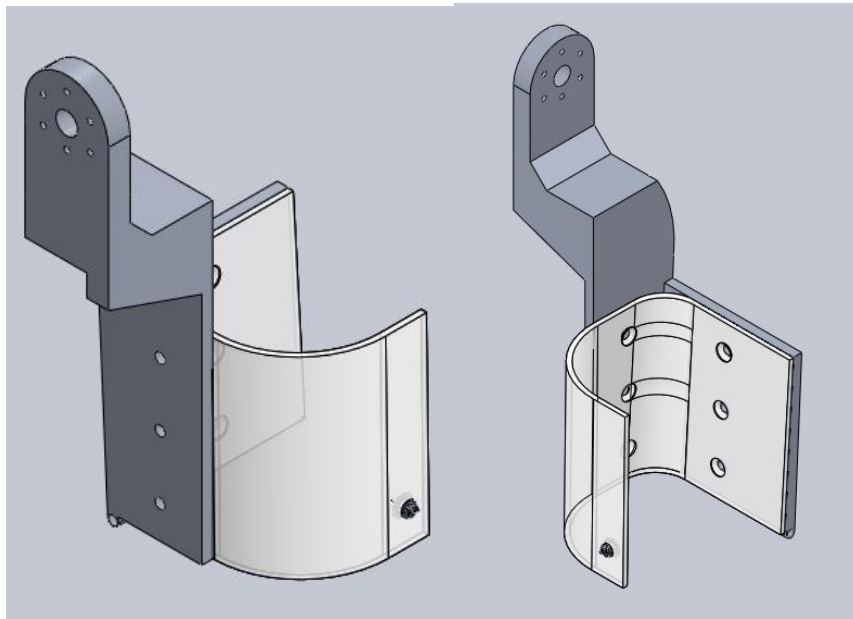


Figura 21. Muslo derecho ensamblado

3.5.1.8 Canilla

Este elemento se caracteriza por la anchura requerida en su diseño para permitir que la pantorrilla del usuario se desplace en esta pieza cuando realiza las acciones de levantamiento y de traslación. En la traslación del Hexo se levantan las piernas para dar el paso, lo que deja a la parte del cuerpo flotante y, al ser asentada nuevamente, esta se soportara otra vez en la estructura; de igual manera, al agacharse para realizar la acción de levantamiento, la canilla del usuario se desplazará una pequeña distancia a lo largo de este elemento. Por esta razón el diseño demanda que no haya recubrimientos, permitiendo estos libres desplazamientos.

En esta pieza se acoplan otros elementos, como pines de acople y cavidades para rodamientos, para reforzar el soporte requerido tanto para la estabilidad como para el levantamiento. Su acoplamiento con el siguiente elemento del Hexo, el pie, está debidamente distribuido en dos puntos de apoyo para distribuir toda la fuerza del peso del Hexo en una mayor área, así se alivian esfuerzos innecesarios aplicados en puntos reducidos. Presenta un espacio en la parte del talón para evitar contactos perjudiciales para el usuario al momento de agacharse para realizar el levantamiento. Estos elementos también guardan simetría entre la extremidad inferior del lado izquierdo y del lado derecho.

La estructura principal presenta las siguientes características físicas básicas:

Masa = 2,5 Kg

Volumen = 1066725,10 mm³

Se acopla directamente a la parte inferior del muslo mediante un pasador, y con el servo motor lineal mediante un rodamiento FAG 6008 alojado en una cavidad ubicada en la parte posterior del elemento para evitar que el actuador colisiones con alguna parte del Hexo cuando este se desplace

tanto en levantamiento como en traslación. En la Figura 22 se muestra la estructura principal de la canilla.

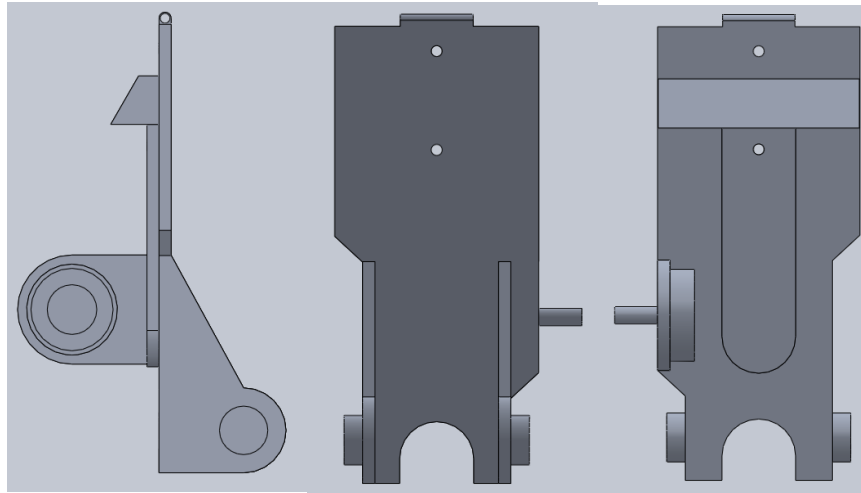


Figura 22. Estructura principal de canilla

En la parte posterior presenta un tope de seguridad, el cual resguarda la rotación máxima de esta pieza y evita que tope contra la parte posterior del muslo para que no siga recorriendo y dañe la rodilla del usuario. Se diseña con una inclinación de 30° para que permita alcanzar la posición crítica cuando el Hexo se agacha. Este tope adicional se ubica a lo largo de todo el elemento para reforzar su función con mayor superficie de contacto.

El elemento de la canilla incluye una protección de Tecno polímero (Nylon de alto peso molecular), la cual se ubica en la parte interna de la estructura y sujeta a esta por pernos avellanados para que no afecten al usuario. El diseño de esta protección, al igual que la estructura de la canilla, presenta esta característica flotante que permite desplazarse junto a la pantorrilla del usuario, de esta manera protege sin que interfiera en el desplazamiento de esta parte del cuerpo. Su parte inferior presenta una ligera curvatura siguiendo la forma de la pantorrilla 45 mm hacia delante a lo largo de 90 mm de altura. Alcanza media altura para no causar daño impactando en el talón del usuario al momento de agacharse en la acción de levantamiento. La protección también tiene un elemento lateral que mantiene la canilla del

usuario dentro de la estructura y, al ser amplia, evita la presión sobre este miembro inferior y permite el libre desplazamiento en un solo eje (Figura 23).

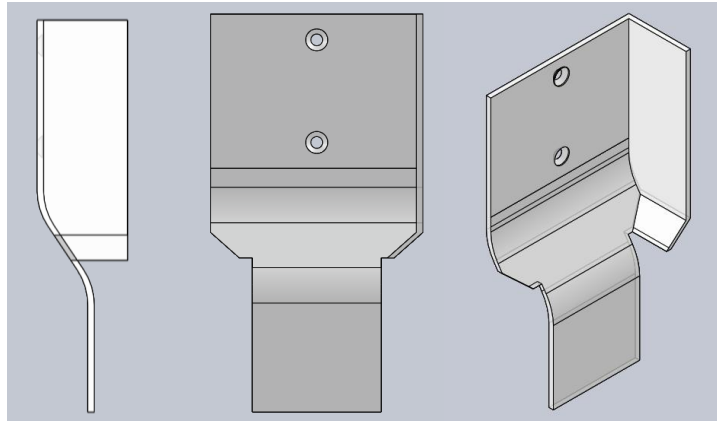


Figura 23. Protección de canilla

Se sujeta a la estructura de la canilla a través de dos perforaciones en la parte superior de $\theta = 9.3 \text{ mm}$, ubicadas a la mitad de la superficie que está en contacto con la pantorrilla del usuario.

La parte inferior de esta protección es más delgada que la parte superior debido a que debe encajar en la sección donde están los acoples de toda la canilla del Hexo con el pie. El ensamble de todo este elemento de la extremidad inferior se muestra en la Figura 24.

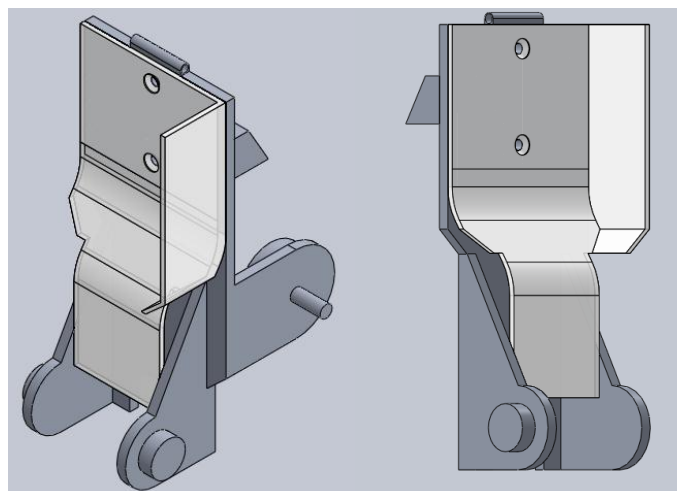


Figura 24. Canilla derecha ensamblada

3.5.1.9 Pie

Al ser el elemento de apoyo entre el Hexo y la el piso, se caracteriza por ser diseñada con dimensiones que permitan cubrir de mejor manera la superficie de contacto. Ambos pies exceden en ancho y largo al pie humano, dejando un espacio entre ambos de 123.24 mm en la parte de mayor separación, y una distancia de 13.24 mm en la sección de ensamble de los elementos de soporte.

Esta característica permite una alta estabilidad del Hexo, ya que su centro de masa se encuentra dentro de la superficie efectiva en cualquiera de las posiciones que se encuentra, tanto en acciones de traslación como en acciones de carga.

Para soportar las cargas en las acciones de traslación, este elemento tiene un diseño de soporte en la parte interna, en la cual se apoya la parte inferior del elemento de la canilla, complementando el soporte existente en las cavidades donde encajan las secciones laterales de ensamblaje presentes en los lados de la canilla, las cuales son el principal apoyo en cualquiera de las posiciones en dentro de las acciones de carga y traslación.

Fuera de la superficie de resguardo del pie, en la parte interna, se implementa una sujeción para el elemento de soporte en la cual se ensamblan ambas piezas a través de un pasador. El alto en el que se encuentran los orificios para el pasador permite girar libremente al elemento de soporte cuando este cambia de posición al mover la pierna en acciones de traslación.

Las partes laterales de la estructura se apoyan a lo largo de la planta del elemento, de tal manera que la fuerza generada por el apoyo del Hexo se distribuye a lo largo de todo el apoyo contra el piso.

Esta estructura también es diseñada en Aluminio 6061 T6 (Figura 25). El elemento presenta las siguientes características físicas básicas:

Masa = 3,0 Kg

Volumen = 1132579,65 mm³

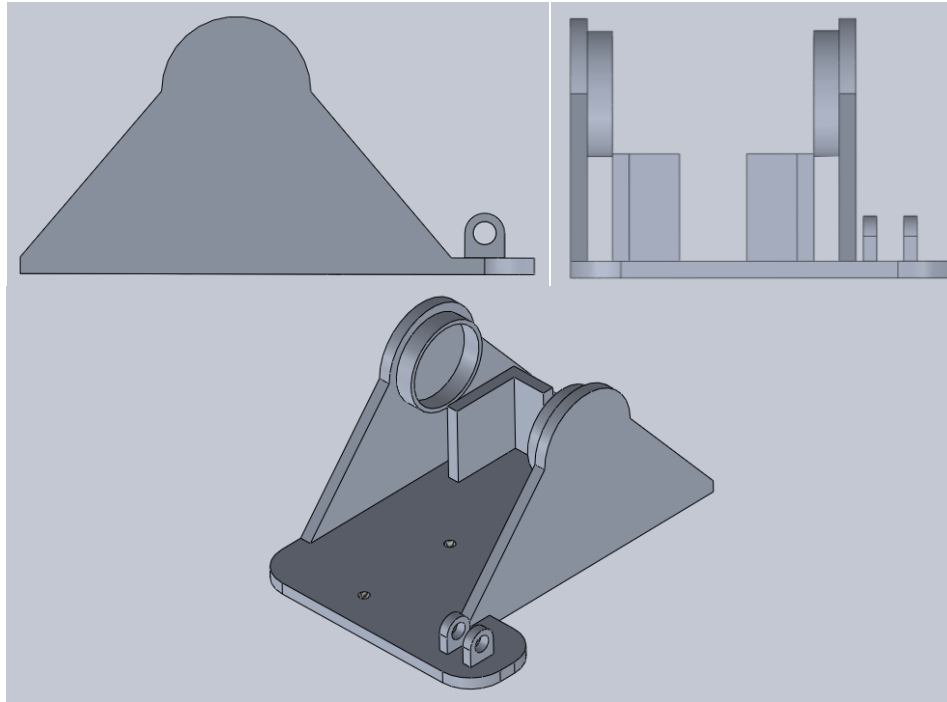


Figura 25. Estructura principal del pie

Dentro de la estructura del pie, se incluye una protección de Tecno polímero (Nylon de alto peso molecular) en el cual encaja el pie del usuario. Esta protección recubre en su totalidad la parte del talón, ya que en las acciones de carga el elemento de la canilla podría entrar en contacto con el usuario; además, mantiene totalmente firme y no permite desplazamientos del pie del usuario, asegurando la estabilidad de este (Figura 26).

En la parte de adelante, la protección presenta un arco en el cual encaja el empeine del usuario; las funciones de este arco son las de asegurar la posición del pie dentro del elemento cuando el usuario levante la extremidad inferior, y la de sujetar el pulsador en la parte superior de este arco, que se

activa cuando el empeine se levanta como acción normal del pie humano cuando este da un paso.

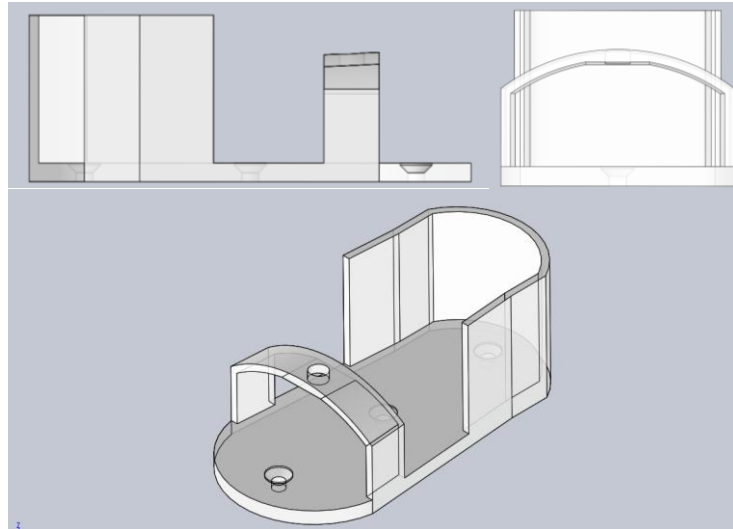


Figura 26. Protección del pie

La sujeción de la protección a la estructura se hace mediante tres agujeros de $\theta = 9 \text{ mm}$, ubicadas en forma lineal a la mitad de la superficie de apoyo.

La posición del arco permite que el pie entre sin ajuste y que tenga contacto con el pulsador solamente cuando es levantado ligeramente. Se diseñan con un espesor de 6.43 mm para que el pulsador encaje y quede expuesta solamente la superficie de contacto para que el resto del dispositivo no sea golpeado ni estorbe al desenvolvimiento. El ensamble del elemento del pie y la protección se presenta en la Figura 27.

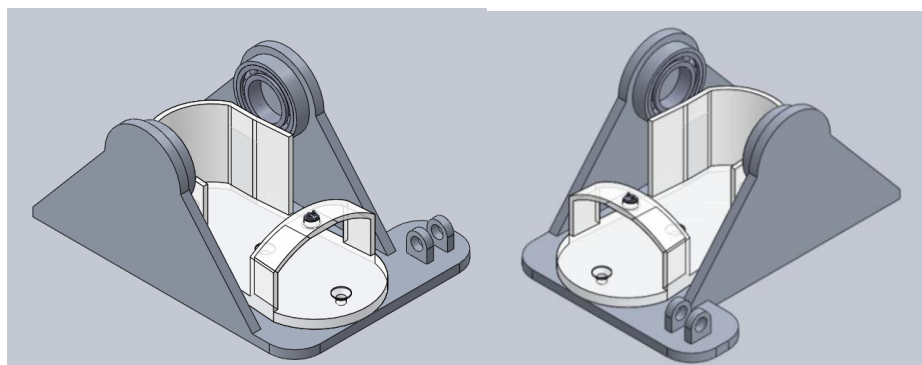


Figura 27. Pie derecho ensamblado

3.5.1.10 Elemento de soporte

Debido a la debilidad que se presenta en el ensamble entre el elemento de la canilla y el elemento del pie, se diseña un refuerzo que permita soportar el peso de la estructura del Hexo cuando este se agacha en las acciones de levantamiento y que, al contener un elemento de resorte, aplique una fuerza complementaria para el levantamiento del Hexo, debido a la energía potencial que en este se conserva.

El material en que se diseña todo el elemento es de Acero AISI 1020. La selección de este material permite dar mayor seguridad debido a su resistencia a la fluencia S_y de 496 MPa, mayor a la del Aluminio 6061 T6 cuyo valor es de 276 MPa, características necesarias para soportar las cargas a las que se encuentra sometido.

Este elemento se sujeta en un pasador incluido en el diseño del elemento de la canilla en el lado que está hacia dentro de la estructura del Hexo, y en el elemento del pie se soporta sobre una extensión de la planta, en la cual se lo sujeta con un pin pasador, el cual también se encuentra en el lado que queda hacia la parte interna del Hexo.

El diseño de este elemento contempla la distancia que debe recorrer el vástago, de tal manera que alcance la distancia crítica al agacharse, sin que este elemento se constituya como una resistencia al movimiento hasta alcanzar dicha posición.

El componente principal a determinar dentro de todo este elemento de soporte es el resorte a implementarse, ya que debe guardar las características físicas que permitan el normal desenvolvimiento del elemento tal como se desea. De la Tabla A1 (Anexo 2) se selecciona alambre ASTM A231 al Cromo-Vanadio, cuyo valor del módulo de elasticidad en cortante G es de 77,2 GPa.

Para iniciar el diseño se determina la constante del resorte k con los valores obtenidos en el cálculo de las fuerzas en la canilla (ecuación 3.1) (Mott, 2006):

$$Fa = k \cdot x \quad [3.1]$$

$$k = Fa/x$$

$$k = (759.21)/(0.055)$$

$$k = 13803.82 \frac{N}{m}$$

Donde:

k : constante del resorte (N/m)

Fa : fuerza máxima a la que se somete el resorte (N)

x : desplazamiento del resorte (m)

Se determina un valor tentativo para el Diámetro externo D_E y el diámetro medio D_m . Los valores propuestos guardan relación con el diseño previo del cuerpo del elemento de soporte, y son una estimación para iniciar los cálculos respectivos. Los valores son:

$$D_E = 0.027 \text{ m}$$

$$D_m = 0.024 \text{ m}$$

Se especifica un esfuerzo inicial de diseño de acuerdo a la Figura A1 (Anexo 2) para alambre ASTM A231. Se selecciona la curva de *Servicio promedio* ya que el resorte se somete a aplicaciones con rapidez moderada y hasta un millón de ciclos (Mott, 2006). El valor de este esfuerzo nominal es:

$$\tau_d = 765 \text{ MPa}$$

Donde:

τ_d : esfuerzo cortante máximo en la superficie interior (MPa)

Se obtiene un valor tentativo del diámetro del alambre D_w de acuerdo a la ecuación 3.2 (Mott, 2006):

$$D_w = D_E - D_m \quad [3.2]$$

$$D_w = 0.027 - 0.024$$

$$D_w = 0.003 \text{ m}$$

Donde:

D_w : diámetro del alambre (m)

Con este valor se obtiene el índice del resorte C (ecuación 3.3) (Mott, 2006):

$$C = \frac{D_m}{D_w} \quad [3.3]$$

$$C = \frac{0.024}{0.003}$$

$$C = 8$$

Donde:

C : índice del resorte

Con este valor del índice del resorte, se determina el supuesto valor del Factor Wahl K para alambre redondo, de acuerdo a la Figura A2 (Anexo 2); se observa que $K = 1.19$. Con este valor, y el del índice del resorte C , calculamos el diámetro tentativo del alambre (ecuación 3.4) (Mott, 2006):

$$D_w = \left[\frac{8.K.F_o.D_m}{\pi.\tau_d} \right]^{1/3} \quad [3.4]$$

$$D_w = \left[\frac{8.(1,19).(759,21).(0,024)}{\pi.(765.e^6)} \right]^{1/3}$$

$$D_w = 4.16e^{-3} \text{ m}$$

Obtenemos el valor tentativo del diámetro del alambre D_w , el cual se aproxima a uno de los valores estándar de alambres existentes mostrados en la Tabla A2 (Anexo 2). Se selecciona el valor comercial mayor más cercano al valor calculado; en este caso se selecciona el alambre de calibre 7 US, cuyo diámetro es $D_w = 4.5$ mm. Nuevamente llevamos este valor a la Figura A1 (Anexo 2) para determinar el esfuerzo de diseño, que en este caso corresponde a un valor aproximado de:

$$\tau_d = 988 \text{ MPa}$$

Nuevamente calculamos los valores del índice del resorte C , y del factor Wahl K (ecuación 3.5) (Mott, 2006) con el nuevo valor asignado al diámetro del alambre D_w :

$$C = \frac{D_m}{D_w}$$

$$C = \frac{0.024}{0.0045}$$

$$C = 5.33$$

$$K = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad [3.5]$$

$$K = \frac{4 \cdot (5.33) - 1}{4 \cdot (5.33) - 4} + \frac{0.615}{5.33}$$

$$K = 1.288$$

Con estos valores se calcula el esfuerzo real esperado generado por fuerza máxima a la que se somete el resorte F_a . (ecuación 3.6) (Mott, 2006):

$$\tau_o = \frac{8 \cdot K \cdot F_a \cdot D_m}{\pi \cdot D_w^3} \quad [3.6]$$

$$\tau_o = \frac{8 \cdot (1.288) \cdot (759.21) \cdot (0.024)}{\pi \cdot (0.0045)^3}$$

$$\tau_o = 655830481 = 655.83 \text{ MPa}$$

Comparando este valor con el esfuerzo de diseño, se observa que el resorte es seguro ya que el esfuerzo máximo esperado es mayor al esfuerzo real.

Para calcular el número de espiras que tiene el resorte, utilizamos la constante del resorte k , el módulo de elasticidad en cortante G , el diámetro real del alambre D_w , y el índice del resorte C (ecuación 3.7) (Mott, 2006):

$$Na = \frac{G \cdot D_w}{8 \cdot k \cdot C^3} \quad [3.7]$$
$$Na = \frac{(77,2 \cdot e^9) \cdot (0,0045)}{8 \cdot (13803,82) \cdot (5,33)^3}$$
$$Na = 20,77$$

Donde:

Na : número de espiras del resorte.

Con el número de espiras Na determinamos el largo del resorte comprimido L_s mediante la ecuación 3.8 (Mott, 2006):

$$L_s = D_w \cdot (Na + 2) \quad [3.8]$$
$$L_s = (0,0045) \cdot (20,77 + 2)$$
$$L_s = 0,102 \text{ m}$$

Se determinan los valores reales del diámetro externo D_E y del diámetro interno D_I del resorte (ecuación 3.9) (ecuación 3.10) (Mott, 2006).

$$D_E = D_m + D_w \quad [3.9]$$
$$D_E = 0,024 + 0,0045$$
$$D_E = 0,0285 \text{ m}$$

$$D_I = D_m - D_w \quad [3.10]$$
$$D_I = 0,02 - 0,0045$$
$$D_I = 0,0195 \text{ m}$$

Para determinar el largo de la cavidad donde se aloja el resorte, utilizamos el largo del resorte comprimido y aumentamos el desplazamiento al que se somete el resorte cuando aplicamos la fuerza de operación. El largo del resorte en estado libre L_f se determina con la ecuación 3.11 (Mott, 2006):

$$L_f = L_s + x \quad [3.11]$$

$$L_f = 0.102 + 0.055$$

$$L_f = 0.157 \text{ m}$$

Para finalizar el diseño del resorte helicoidal de compresión, determinamos el paso entre espiras p , relacionando el largo del resorte en estado libre L_f , el diámetro del alambre D_w , y el número de espiras N_a . Al ser un resorte con extremos planos se aplica la siguiente ecuación 3.12 (Mott, 2006):

$$L_f = p \cdot N_a + D_w \quad [3.12]$$

$$0.157 = p \cdot (20,77) + 0,0045$$

$$p = 0.0073 \text{ m}$$

De acuerdo a los cálculos realizados, el resorte helicoidal de compresión presenta las siguientes características:

Resorte en estado libre	=	157 mm
Resorte comprimido	=	102 mm
Número de espiras	=	20,77
Paso entre espiras	=	7,3 mm
Diámetro del alambre	=	4,5 mm
Diámetro externo	=	28,5 mm

El resorte helicoidal de compresión se muestra en la Figura 28.

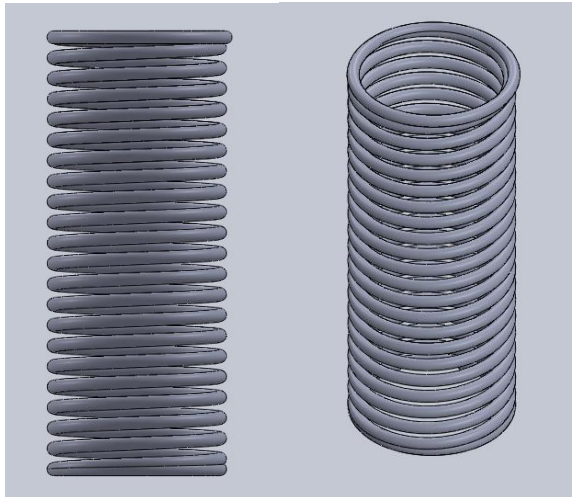


Figura 28. Resorte helicoidal de compresión del elemento de soporte

Se diseña un cuerpo en el cual se aloja el resorte y donde se desplaza el vástago que lo empuja. Su largo se determina de acuerdo al largo del resorte diseñado, el cual es de 157 mm. En este componente se incluye el sujetador que se ensambla en el elemento del pie, y un relieve en la parte interna que ayuda al posicionamiento del resorte. En la Figura 29 se muestra el cuerpo del elemento de soporte, se presenta como transparencia para observar el interior. El material con el que está fabricado es de Aluminio 6061 T6.

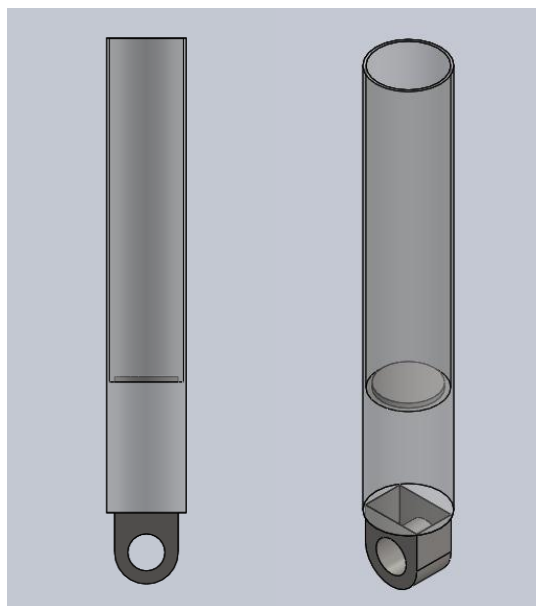


Figura 29. Cuerpo del elemento de soporte

El vástago que se desplaza en la parte interna del cuerpo incluye el sujetador que se ensambla en el elemento de la canilla a través del pasador. Su estructura sólida transmite la fuerza ejercida por el elemento de la canilla hacia el resorte, el cual es empujado por la base de este vástago y cuyo diámetro cubre todo el diámetro externo del resorte. Este elemento también es de Aluminio 6061 T6.

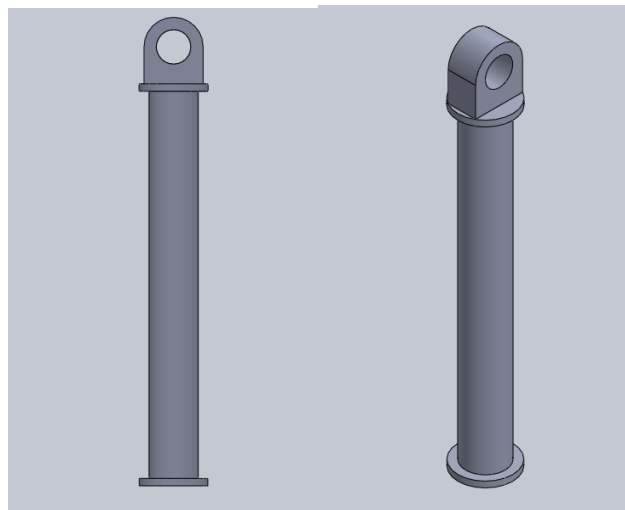


Figura 30. Vástago del elemento de soporte

El vástago encaja dentro de la cavidad del cuerpo. Para que el vástago se mantenga en dentro de este componente, se diseña una tapa roscada con perforación de diámetro igual al vástago, que permite el libre desplazamiento hasta que la base entre en contacto con la tapa, de esta manera se asegura la totalidad de este elemento sin riesgo de que se desarme (Figura 31).

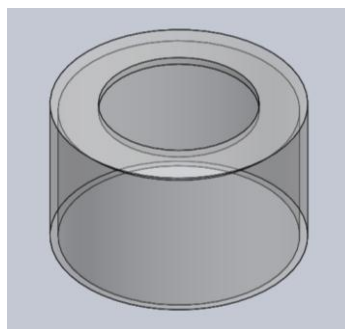


Figura 31. Tapa del elemento de soporte

Al existir colisión entre el vástago y la tapa, se incluye un tope elástico que permita amortiguar el impacto entre estos dos elementos. Tienen el diámetro ligeramente mayor al del vástago para permitir su libre desplazamiento sin que exista ajuste entre estos elementos. Este componente se lo utiliza como resguardo para prevenir daños entre ambos elementos de acero cuando hagan contacto (Figura 32).

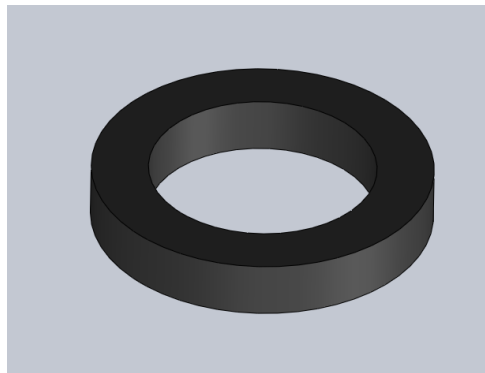


Figura 32. Tope elástico del elemento de soporte

Todo el elemento de soporte, ensamblando los componentes, permite un desplazamiento de las extremidades inferiores del Hexo hacia abajo cuando realiza acciones de levantamiento, almacenando energía potencial para restitución del resorte que apoya las acciones de levantamiento.

En la Figura 33, se presenta este elemento de soporte en su estado libre cuando la posición del Hexo es erguida y no ejerce ninguna fuerza sobre el resorte, y en estado comprimido cuando la posición del Hexo está en acciones de carga y ejerce la fuerza máxima sobre el resorte helicoidal.

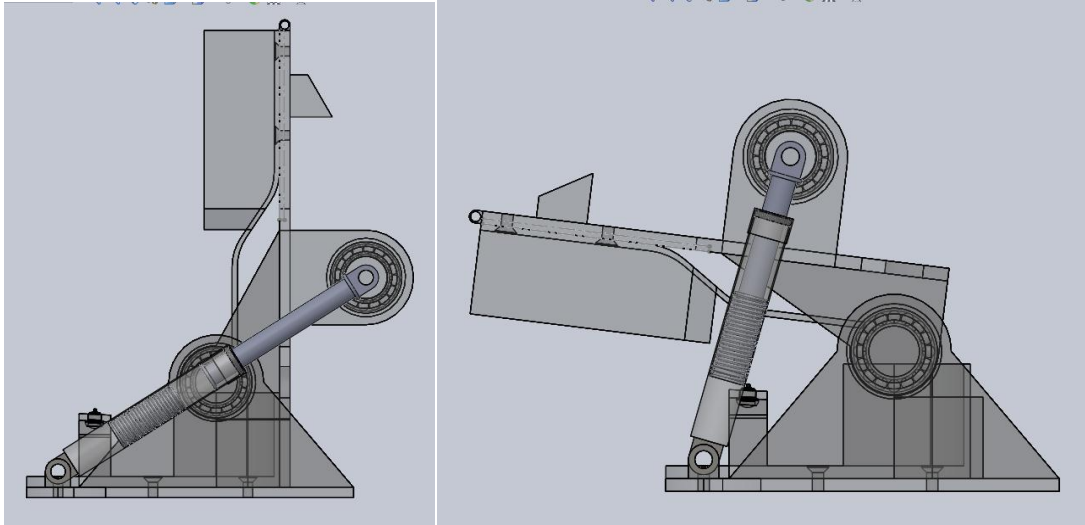


Figura 33. Ensamble del elemento de soporte con elementos de canilla y pie

3.5.1.11 Ensamblaje del Hexo

El ensamblaje de todos los elementos mecánicos de diseño, permiten obtener una estructura de exoesqueleto que no presenta colisiones entre sus partes cuando este realiza algún tipo de movimiento. Todos los elementos se sujetan a las partes correspondientes mediante el uso de pasadores entre las secciones de las extremidades, y mediante cavidades con rodamientos FAG 6008 en los elementos que deben rotar, como es el caso de los servo motores y las extremidades.

Los elementos de protección, y las secciones del elemento de la espalda, se sujetan mediante la utilización de pernos, los cuales varían las medias dependiendo de su tamaño. Esos pernos son de tipo avellanado para que no queden salientes que puedan provocar daño sobre el usuario o sobre los otros elementos del Hexo.

Se aprecia la vista lateral y superior del Hexo en la Figura 34, la vista frontal y posterior en la Figura 35, y una vista isométrica del Hexo en la Figura 36.

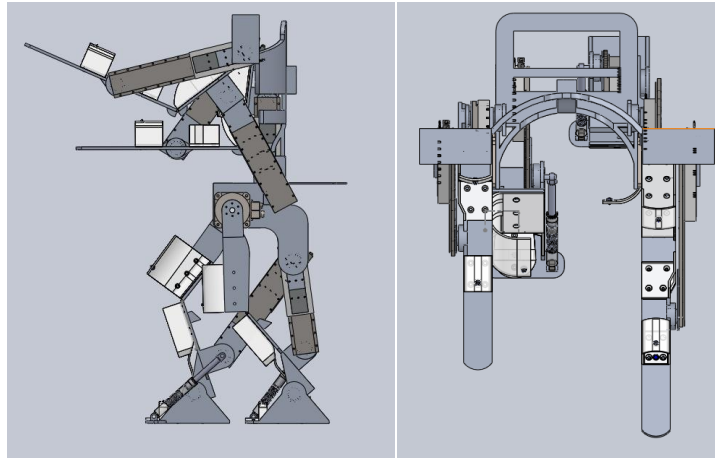


Figura 34. Vista lateral y superior del Hexo

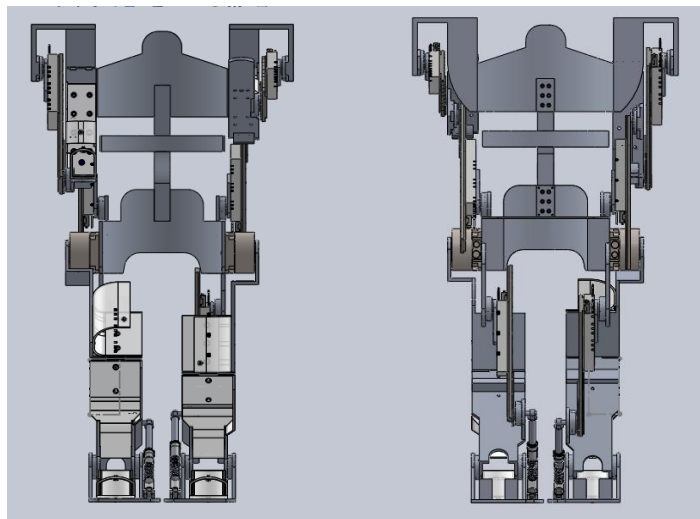


Figura 35. Vista frontal y posterior del Hexo

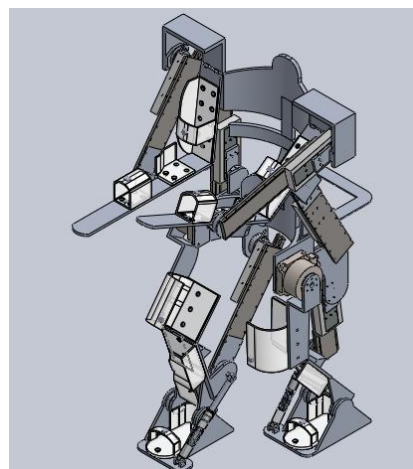


Figura 36. Vista Isométrica del Hexo

3.5.2 SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

El sistema electrónico utiliza pulsadores que quedan expuestos al usuario para ser activados con los movimientos normales requeridos para realizar acciones de levantamiento y para realizar acciones de traslación. La señal enviada por estos pulsadores se transmite directamente a la entrada de los PLC, los cuales enviarán una señal a los respectivos amplificadores para la activación de los actuadores, teniendo como condicionantes las posiciones en las que se encuentran cada una de las extremidades. Estos condicionantes aseguran el movimiento correspondiente a la acción que se desea realizar.

Mediante la aplicación de encoders lineales, el sistema determina la posición de cada actuador tanto dar inicio como para finalizar el programa correspondiente al respectivo movimiento.

3.5.2.1 Selección de servo motores lineales

Los actuadores implementados se seleccionan de acuerdo a la fuerza requerida para el movimiento de las extremidades. El ensamble de estos elementos permite su libre funcionamiento sin que existan colisiones con las partes más cercanas de la estructura del Hexo.

De acuerdo a los cálculos realizados, la fuerza máxima requerida para el levantamiento de 50 Kg se presenta en la sección C de la espalda, con una magnitud total de 1425,51 N y un ángulo de acción de 5°.

El servo motor lineal está constituido por dos partes, el magneto (Servo magnet) y la bobina (Servo Coil). Entre estos dos elementos se mantienen unidos mediante la fuerza de atracción magnética generada en el Servo magnet. Para la implementación en el Hexo, se seleccionan el Servo Coil Mitsubishi P7C-72P-ASS0 y el Servo magnet Mitsubishi S70-480-ASS0,

cuya función será generar una fuerza lineal sobre el elemento para que, mediante torque mecánico, este realice las acciones de extensión y flexión requeridas para el levantamiento y la traslación.

El Servo coil se desplaza sobre la riel del Servo magnet. Posee dos conectores que permiten su energización, y el envío y recepción de señales. En la Figura 37 se muestra el Servo coil, y en la Figura 38 se muestra el Servo magnet.

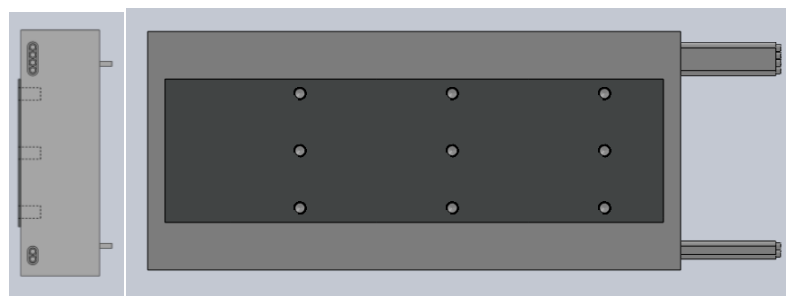


Figura 37. Servo coil Mitsubishi P7C-72P-ASS0

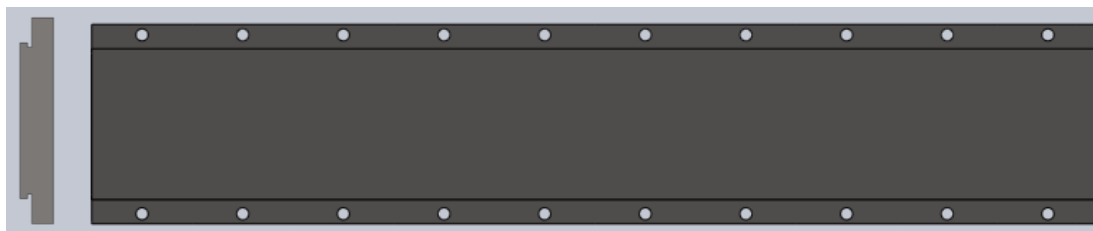


Figura 38. Servo magnet Mitsubishi S70-480-ASS0

Ambos elementos son de la serie LM-H3, las especificaciones más importantes son las siguientes:

Fuerza continua de operación	=	720 N
Fuerza máxima de operación	=	1800 N
Fuerza de atracción magnética	=	6600 N
Corriente de operación	=	10.2 A
Corriente máxima de operación	=	28.6 A

En el Anexo 3 se presenta la hoja de características técnicas del servo motor lineal seleccionado.

Para que estos elementos se puedan ensamblar y articular las extremidades del Hexo, se diseña dos elementos mecánicos que se acoplan mediante pernos a cada una de las partes del Servo motor lineal. Estos elementos mecánicos tienen un diámetro de $\theta = 40$ mm, lo que asegura un ajuste de estos elementos con los rodamientos FAG 6008. Cada uno de estos elementos para ensamblaje son diseñados en Aluminio 6061 T6, y presentan perforaciones de $\theta = 4.8$ mm para la sujeción contra cada elemento del Servo motor lineal. En la Figura 39 se muestra el acople para el Servo coil, y en la Figura 40 se muestra el acople para el Servo magnet.

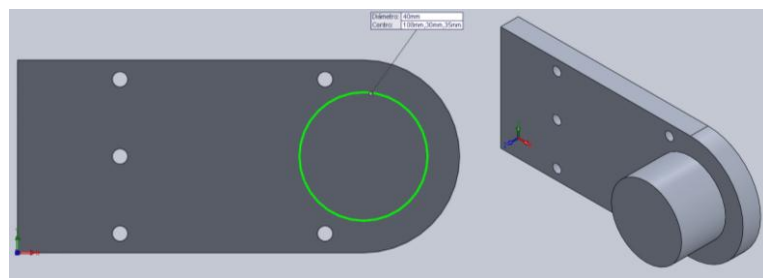


Figura 39. Acople para el Servo coil Mitsubishi P7C-72P-ASS0

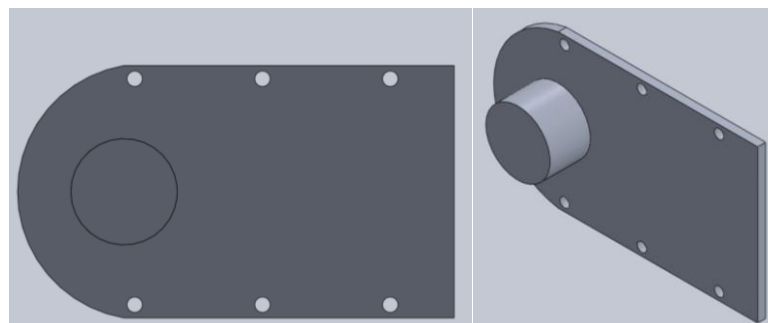


Figura 40. Acople para el Servo magnet Mitsubishi S70-480-ASS0

El Servo motor lineal, ensamblado con los acoples para su sujeción, presenta una distancia mínima entre ambos puntos de ensamblaje de 180 mm y una distancia máxima entre puntos de ensamblaje de 451 mm. Estos límites de distancia entre puntos son considerados para el posicionamiento

de las cavidades que albergan los rodamientos en los elementos del Hexo. Las posiciones extremas del servo motor lineal se muestran en la Figura 41.

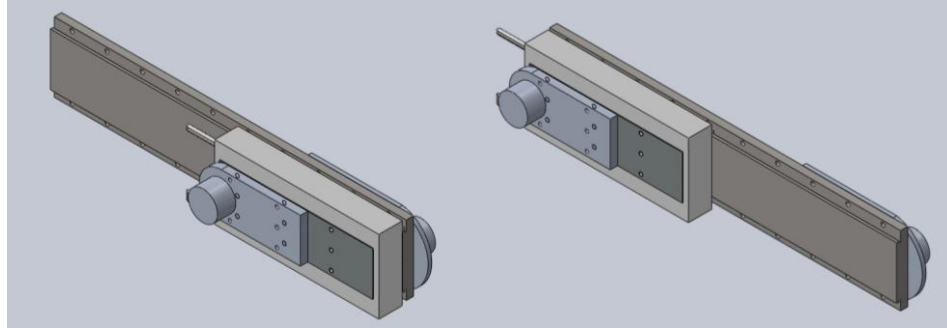


Figura 41. Servo motor lineal en posiciones límites

3.5.2.2 Selección de servo motores rotacionales

El elemento del muslo incluye un servo motor rotacional que complementa el giro requerido para el movimiento completo. De acuerdo a los cálculos obtenidos, se requiere un momento de 19.42 N.m para mantener la sección C estable al realizar acciones de levantamiento de peso.

El motor seleccionado es de la serie TM-RFM 012E20 de la marca Mitsubishi, el cual presenta como características principales:

Diámetro externo del motor	=	180 mm
Torque continuo de operación	=	12 N.m
Torque máximo de operación	=	36 N.m
Corriente de operación	=	3.8 A
Corriente máxima de operación	=	12 A

Se sujeta a la sección C de la espalda mediante 4 perforaciones que se presentan en las esquinas del actuador, cada una de $\theta = 9$ mm. Esto permite que el servo motor rotacional se fije a la estructura directamente en su superficie de contacto.

Al estar ubicado en forma vertical, el servo motor rotacional soporta la carga de la extremidad inferior en su eje transversal. Este actuador soporta momentos de carga de 70 N.m. La estructura de esta parte del Hexo tiene una masa de 16.8 Kg, incluidos el actuador lineal y el elemento de soporte diseñado. Cuando el Hexo está realizando las acciones de traslación, todo el peso de la extremidad inferior queda soportada por el servo motor rotacional.

Para determinar el peso máximo a soportar del servo motor rotacional, de acuerdo al valor de momento de carga (Figura 42), se establece la ecuación 3.13 (Servo Amplifiers & Motors Melservo –J4, 2016):

$$M_o = F.(L + A) \quad [3.13]$$

$$F = \frac{M_o}{L + A}$$

$$F = \frac{70}{0 + 0.0202}$$

$$F = 3465.35 \text{ N}$$

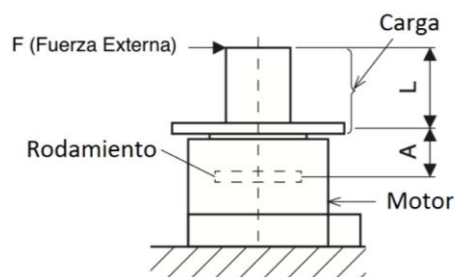
Donde:

M_o : momento de la carga

F : fuerza externa

L : largo de la carga

A : distancia desde la superficie de contacto y el rodamiento



$$\text{Carga Axial} = \text{Masa de la Carga}$$

$$\text{Momento de Carga} = F.(L+A)$$

Figura 42. Momento de carga de servo motor rotacional TM-RFM 012E20
(Servo amplifier & motors Melservo-J4, 2016)

Para determinar el momento de carga que genera la extremidad inferior sobre el servo motor rotacional TM-RFM 012E20, determinamos la fuerza del peso generada por la masa de los elementos.

$$We = m \cdot g \quad [3.14]$$

$$We = 16.8 \times 9.8$$

$$We = 164.64 \text{ N}$$

Donde:

We : peso de la extremidad inferior

El peso de la extremidad es mucho menor que la fuerza externa que genera un momento de carga soportar el servo motor rotacional. De acuerdo a los valores se especifica un factor de seguridad de 21.04, lo que asegura el funcionamiento sin trabamientos del actuador.

El servo motor rotacional TM-RFM 012E20, se muestra en la Figura 43.

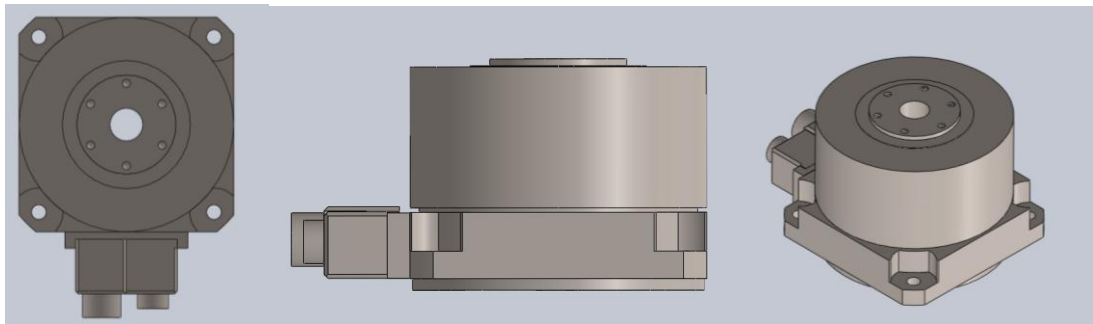


Figura 43. Servo motor rotacional TM-RFM 012E20

Este servo motor rotacional incluye su propio encoder para el posicionamiento del actuador.

3.5.2.3 Pulsadores

Los pulsadores seleccionados para su implementación son B1-M1CE-7 de Multicomp. Sus características técnicas son (Multicomp, 2016):

Corriente máxima/Voltaje	=	100mA 24 V dc
Fuerza de operación	=	2 N a 5 N
Tiempo de accionamiento	=	10 ms
Vida mecánica	=	1.000.000 ciclos
Temperatura de soldadura	=	300°C por 3 segundos

Estos elementos se ubican en las protecciones del antebrazo a la altura de las manos, en las protecciones de los brazos, en las protecciones de los muslos y en las protecciones de los pies. Se emperran atravesando la estructura de Nylon, dejando expuesto el pulsador en 2 mm, asegurando que su accionamiento se ejecute cuando el usuario levanta su extremidad. Este pulsador se muestra en la Figura 44.

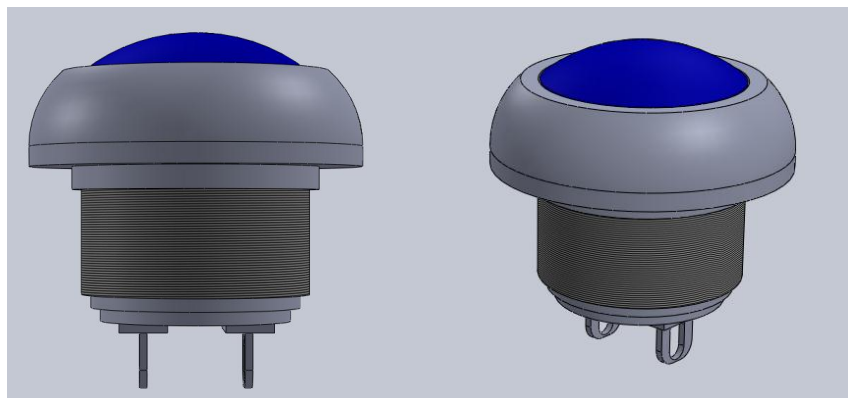


Figura 44. Pulsador B1-M1CE-7

3.5.2.4 Encoders lineales

Para el correcto posicionamiento de los servo motores lineales se utilizan encoders lineales que permiten una lectura de pulsos de una línea

codificada. Estos elementos son sujetos al Servo coil del actuador, a una distancia de 3 mm de la base del Servo magnet. Los encoders lineales seleccionados son de la serie RL 40M AT 050B 05 N de Renishaw (Figura 45), cuyas características técnicas son (Renishaw, 2016):

Exactitud	=	$\pm 5 \mu\text{m/m}$
Voltaje de operación	=	$5\text{V} \pm 10\%$
Corriente de operación	=	250 mA
Escala	=	RTL-A-S
Coefficiente de expansión	=	$10.1 \pm 0.2 \mu\text{m/m}/^\circ\text{C}$

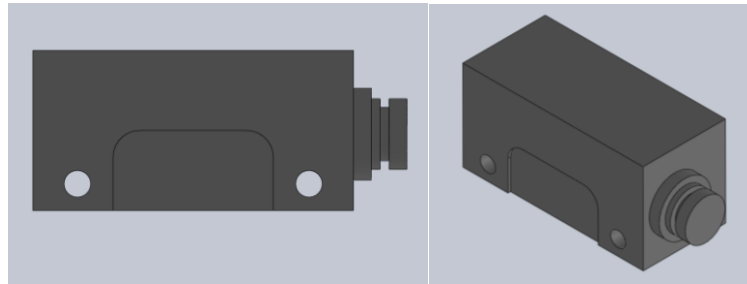


Figura 45. Encoder lineal RL 40M AT 050B 05 N

La línea codificada es de acero inoxidable con autoadhesivo para su instalación, y tiene una afinación de $30 \mu\text{m}$ de periodo nominal que permite sensar con mayor afinidad el posicionamiento de cada servo motor lineal. Se muestra esta línea codificada en la Figura 46.



Figura 46. Línea codificada de acero inoxidable
(Renishaw, 2016)

3.5.2.5 Selección de PLC y módulos adicionales

El sistema electrónico contiene líneas de comando para los actuadores que generan movimiento. La programación de este permite ejecutar cada acción, tanto en levantamiento como en traslación hasta alcanzar el final de carrera. Se seleccionan módulos Mitsubishi a implementar en el Hexo. Los módulos seleccionados permiten usar la red para controladores de sistemas servo (Servo System Controller Network – SSCNET III/H).

El CPU seleccionado es el Q06UDHCPU de Q Series (Figura 47). Es un módulo universal de memoria de 60k step, con una velocidad de ejecución de 9.5 ns por instrucción (System Q, 2004).

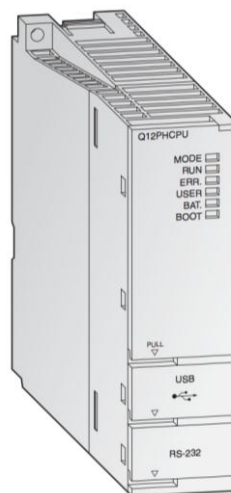


Figura 47. Módulo Q06UDHCPU
(System Q, 2004)

Se selecciona el módulo Q64PN para energizar el sistema (Figura 48). Se caracteriza por trabajar con una corriente de 8.3 A 5 V en dc, y tiene una protección de sobre carga de corriente cuando supera los 9.9 A 5 V en dc. La protección por sobre carga de voltaje es de 5.5 – 6.5 V (System Q, 2004).

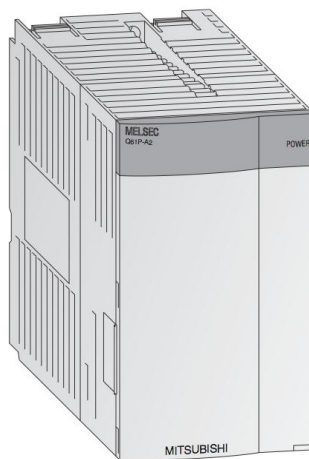


Figura 48. Módulo Q64PN
(System Q, 2004)

El controlador de movimiento es el Q172DSCPU (Figura 49). Este módulo permite aplicar la comunicación vía SSCNET III/H con los módulos de amplificación, operando por separado el control proveniente del PLC, permitiendo que los programas cargados del CPU sean distribuidas, mejorando el control de movimiento avanzado, y afinando el posicionamiento de cada servo coil de los actuadores lineales. Permite controlar hasta 8 ejes de movimiento y trabaja con el lenguaje de programación Motion SFC. Tiene la capacidad de ejecutar hasta 256 programas a la vez entre 0.88 ms hasta 14.2 ms. Eléctricamente presenta un consumo de corriente de 1.14 A 5 V dc (System Q, 2004).

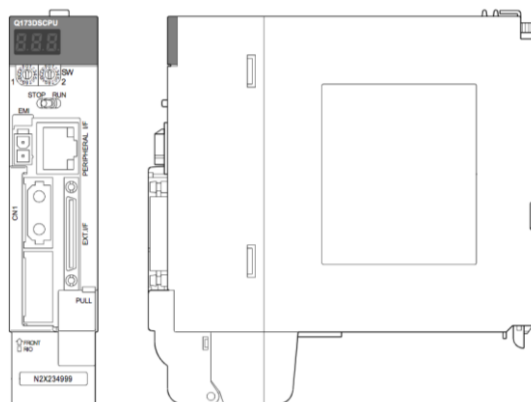


Figura 49. Módulo Q172DSCPU
(System Q, 2004)

De acuerdo al número de entradas y salidas requeridas, se selecciona el módulo QH42P (Figura 50), con voltaje nominal de 24 V dc y un rango de voltaje de operación de 20.4 – 28.8 V. La corriente nominal en cada punto de entrada y de salida es de 4 mA, con un tiempo de respuesta de apagado a encendido de 1 a 70 ms, dependiendo de los parámetros establecidos en el CPU. Con un total de 32 puntos de entrada y 32 puntos de salida, permite la conexión de 8 sensores de posicionamiento lineal (System Q, 2004).



Figura 50. Módulo QH42P
(System Q, 2004)

Se seleccionan los amplificadores MR-J4W2-44B para los servo motores (Figura 51). Estos permiten la conexión de dos servos a la vez en el mismo módulo, permitiendo el ahorro de espacio y energía al utilizarlo. De acuerdo a la cantidad de actuadores que se implementan, se requieren de 4 amplificadores para el total de 8 actuadores. Estos módulos permiten la conexión directa del encoder de cada uno de los servo motores. Se caracteriza porque tienen un voltaje nominal de 3 fases de 170 V ac y una corriente nominal de 2.8 A por salida hacia cada actuador. La comunicación entre actuadores se la realiza a través de la red SSCNET III/H (Servo Amplifiers & Motors Melservo-J4, 2016).

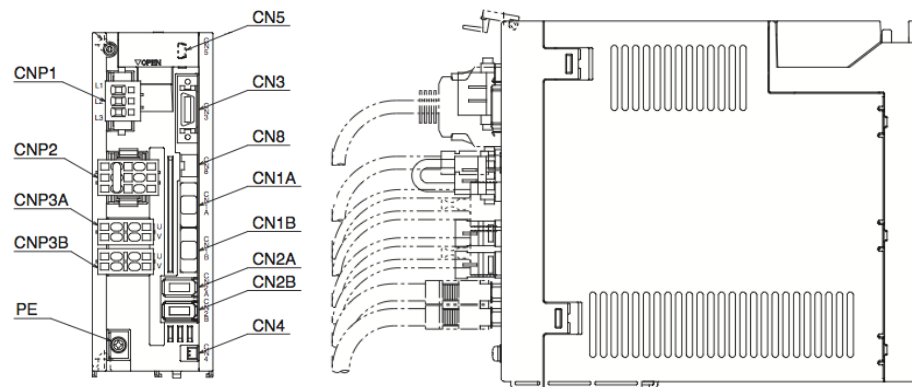


Figura 51. Módulo MR-J4W2-44B
(Servo amplifiers & motors Melservo-J4, 2016)

3.5.2.6 Conexiones y algoritmos

Todos los módulos se interconectan utilizando cableado blindado para las entradas, y cables ópticos para la comunicación SSCNET III/H entre amplificadores. Dentro del diseño mecánico se incluye una bandeja en la parte posterior de la sección C de la espalda, que permite la ubicación de todos los módulos interconectados sin estorbar el desenvolvimiento del resto de elementos mecánicos.

El sistema interconectado presenta los pulsadores directamente conectados a las entradas y salidas del módulo QH42P, estos pulsadores cerraran el circuito y envían una señal hacia una de las entradas del PLC, accionando la bobina que ejecute las líneas de comando para mover determinada extremidad. Los servo motores necesitan recibir una señal eléctrica amplificada para su funcionamiento proveniente de los módulos MR-J4W2-44B. Cada uno de los módulos de amplificación se encargan de comandar a dos pares de servos y se conectan en las salidas denominadas CNP3A y CNP3B. Para el Hexo se los pareja de acuerdo a la extremidad que mueven cada uno de los actuadores; es decir, un amplificador comanda dos servos de los antebrazos, el otro amplificador comanda los dos servos de los brazos, otro servo comanda los servos rotacionales de los muslos, y el cuarto servo comanda los servo lineales ensamblados en las canillas.

Los encoders se conectan directamente a las entradas CN2A y CN2B del amplificador para determinar el posicionamiento de cada uno de los servos y finalizar la ejecución de las líneas de comando respectivas.

Los amplificadores entre sí se conectan a través de un cable óptico con la red SSCNET III/H, siendo el módulo master el controlador de movimiento Q172UDHCPU, en el cual se determina cual es el amplificador a comandar determinados servos. En la Figura 52 se muestra el diagrama funcional del Hexo.

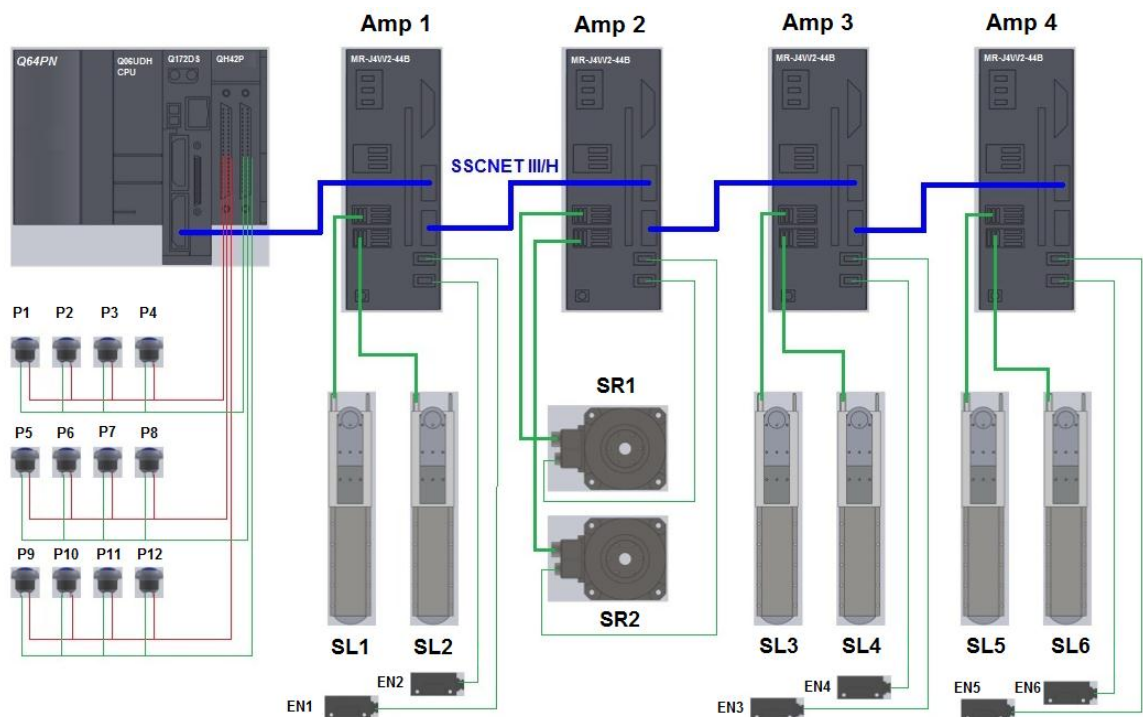


Figura 52. Diagrama funcional del Hexo

La programación de las líneas de comando del PLC de todo este sistema, se la realiza con el software GX Works 2™ de propiedad de Mitsubishi.

Al oprimir solamente el pulsador P1, ubicado en la protección del pie derecho, se envía una señal al PLC que indica el inicio del algoritmo que le permita dar el paso derecho hacia delante. De igual manera, al presionar solamente el pulsador P2 (ubicado en el pie izquierdo), se da inicio al

algoritmo para dar un paso con el pie izquierdo. Esta señal entra al módulo de QH42P para su respectiva recepción en el PLC. El sub programa de ejecución se envía al amplificador Amp1 y al Amp2 conectados entre si, a través del cable de comunicación con protocolo SSCNET III/H, y ambos conectados al controlador de movimiento Q172UDHCPU. El amplificador envía la señal amplificada al actuador lineal SL1 y al actuador rotacional SR1 (cuando se presiona el pulsador P1), o al actuador lineal SL2 y al actuador rotacional SR2 (cuando se presiona el pulsador P2). Dependiendo de las posiciones de las extremidades, se ejecuta el algoritmo respectivo. Cada posición se determina a través del encoder lineal EN1 (en el lado izquierdo trabaja el encoder EN2), de acuerdo al conteo de pulsos registrado en la ejecución anterior. Los actuadores rotacionales, al ser Direct Drive, integran su propio encoder. Hasta terminar la secuencia en ejecución, el resto de pulsadores, ubicados en las extremidades inferiores, quedan bloqueados.

Al presionar simultáneamente el pulsador P3 y el pulsador P4, ambas señales entran al PLC a través del módulo de entrada. La señal de ejecución se envía a los amplificadores Amp1 y Amp2, los cuales envían simultáneamente las instrucciones de ejecución a los actuadores lineales SL1 y SL2, y a los actuadores rotacionales SR1 y SR2. Los servo motores mueven al Hexo hasta que queda agachado (final de carrear), y los otros pulsadores de las extremidades inferiores se bloquean. Dependiendo de la posición del Hexo, determinada a través de los encoders en los cuatro actuadores, el sub programa a ejecutar es de levantamiento o de agachado del Hexo; para ambos casos se deben presionar ambos pulsadores.

Las extremidades superiores se pueden mover independientemente de la posición. El pulsador P5, ubicado en la parte superior de la protección de la mano derecha, envía la señal al módulo de entrada del PLC, el cual comanda al amplificador Amp 3 para la ejecución del sub programa del movimiento del actuador lineal SL3 que extiende el antebrazo. El sub

programa se ejecuta mientras el pulsador P5 se mantiene presionado, y se finaliza al alcanzar la posición máxima establecida para el actuador lineal SL3, la cual se identifica mediante el conteo de pulsos del encoder lineal EN3. Al presionar el pulsador P6, ubicado en la parte inferior de la protección de la mano derecha, se ejecuta el sub programa del movimiento del actuador lineal SL3 que flexiona el antebrazo; de igual manera, el sub programa se ejecuta mientras se mantiene presionado el pulsador P6 y finaliza al alcanzar la posición mínima. Para la extensión y flexión del antebrazo izquierdo, se ejecuta el mismo algoritmo al presionar los pulsadores P7 y P8, ubicados en la parte superior e inferior de la protección de la mano izquierda, respectivamente, y su posición se establece a través del encoder EN4.

La extensión del brazo derecho se ejecuta al presionar el pulsador P9, ubicado en la parte superior de la protección. La señal se envía al PLC, el cual comanda el Amp 4 para la ejecución del sub programa de extensión del brazo derecho mediante el actuador lineal SL5. La ejecución del sub programa continua mientras el pulsador P6 se encuentra presionado, y finaliza al llegar a la posición máxima. El posicionamiento del servo motor lineal SL5 se determina a través del encoder EN5. Para la ejecución del sub programa de flexión del brazo derecho, se presiona el pulsador P10 que envía una señal al PLC para la ejecución del sub programa de la extensión del brazo derecho a través del Amp 4, el cual se ejecuta mientras el pulsador P6 se mantiene presionado, y termina al alcanzar la posición mínima.

Las acciones de extensión y flexión del brazo izquierdo se ejecutan al presionar los pulsadores P11 y P12, ubicados en la parte superior e inferior de la protección del brazo izquierdo, respectivamente. El sub programa se ejecuta mientras cualquiera de los pulsadores se mantiene presionado, y termina al alcanzar la posición máxima o mínima. El actuador lineal SL6 mueve el brazo izquierdo, y se determina su posición a través del encoder EN6.

El algoritmo a cumplir debe tener restricciones de movimiento para asegurar el correcto posicionamiento de las extremidades del Hexo, y garantizar la seguridad del usuario; es así que se establecen condicionantes para realizar movimientos, y se establecen finales de carrera con bloqueo de otras instrucciones, para que no existan simultaneidades de movimiento con otras partes y pongan en peligro la estabilidad del Hexo.

Todo el sistema electrónico ensamblado se ubica en la bandeja diseñada en la sección C de la espalda (Figura 53), ubicada en la parte posterior. En esta posición el cableado permite recorrer distancias mínimas entre los conectores de los módulos y los conectores de los servo motores.

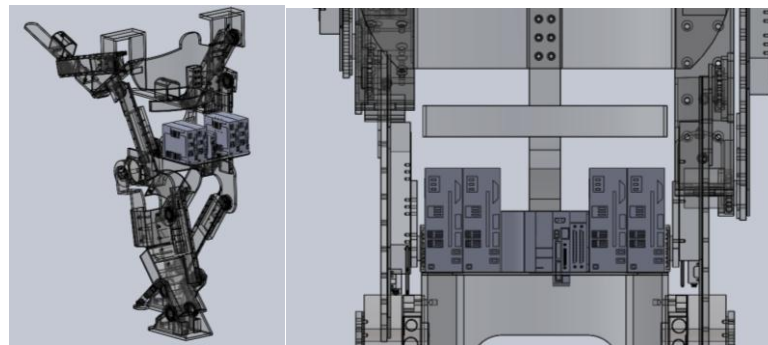


Figura 53. Ubicación del PLC en el Hexo

A cada una de las posiciones a alcanzar del Hexo, tanto en traslación como en levantamiento, se le asigna una denominación. Para realizar el algoritmo de traslación, se determinan las posiciones mostradas en la Figura 54.

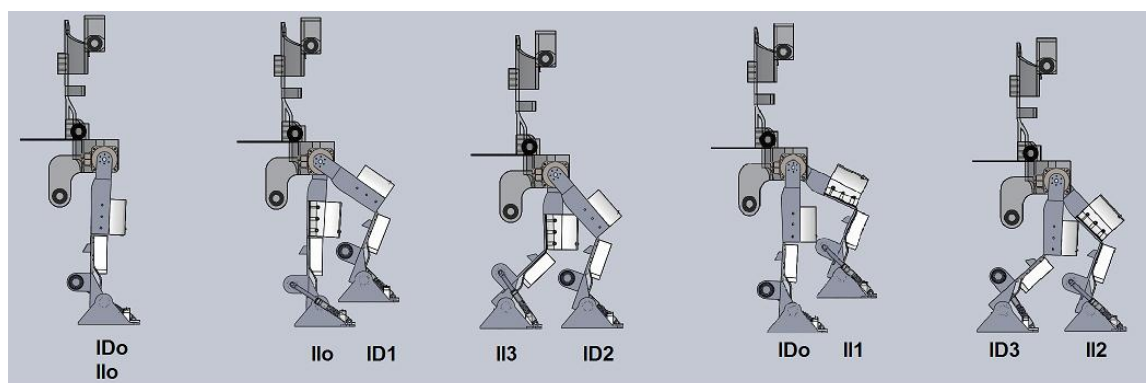


Figura 54. Posiciones de las piernas en traslación del Hexo

Para la ejecución de un paso con la pierna derecha, se establece el diagrama de flujo de la Figura 55. Este diagrama de flujo también se aplica cuando la traslación inicia con la pierna izquierda.

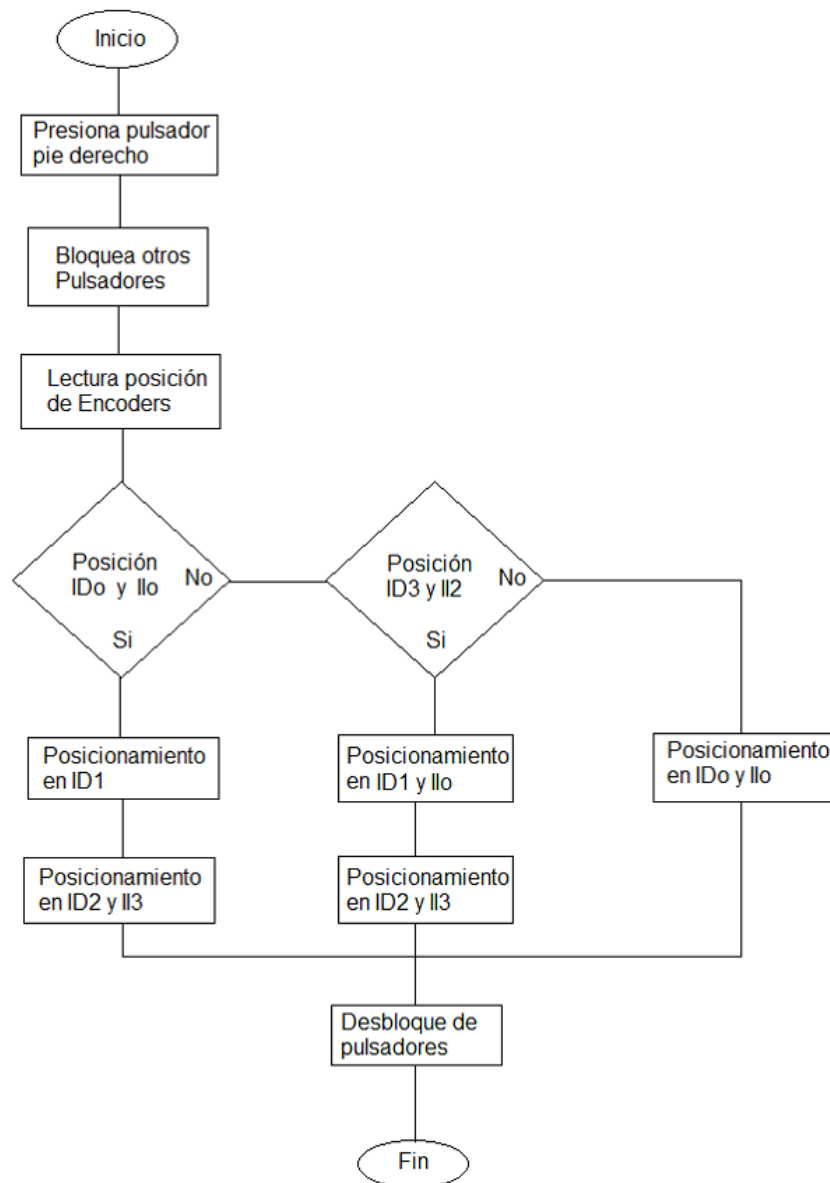


Figura 55. Diagrama de flujo para un paso derecho

La secuencia a seguir para que el Hexo se agache en acciones de levantamiento, se muestran en la Figura 56.

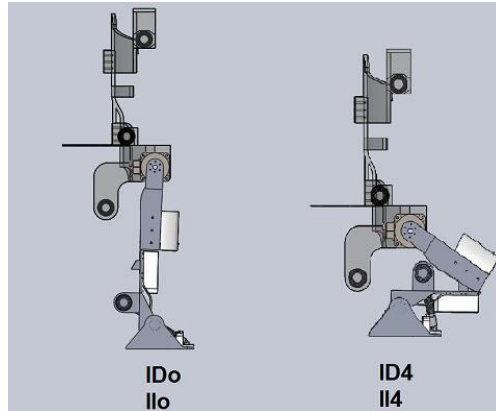


Figura 56. Posiciones de las piernas en levantamiento del Hexo

El algoritmo diseñado permite aplicarse a acciones de agachado y de levantamiento de la estructura del Hexo se muestra en la Figura 57.

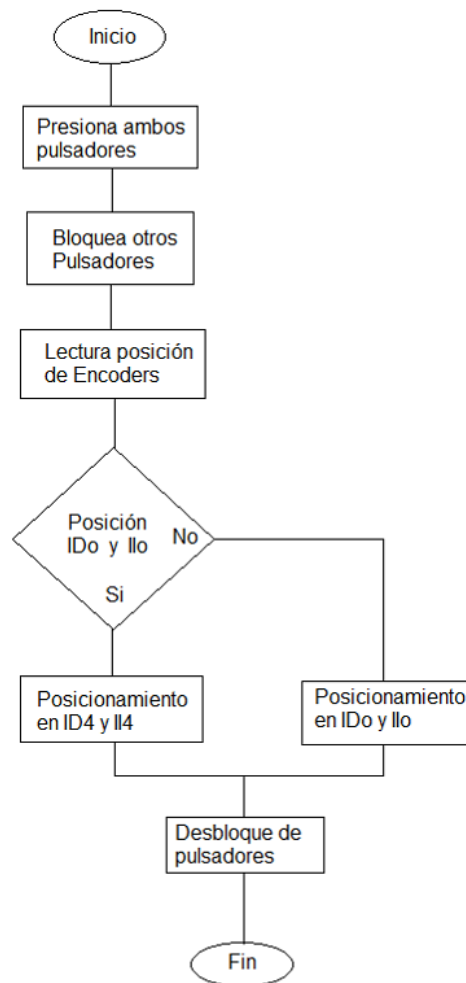


Figura 57. Diagrama de flujo para agachado y levantamiento

El condicionamiento para el movimiento continuo del brazo, hasta alcanzar la posición máxima, está determinado para el pulsador, el cual debe estar constantemente presionado para que se ejecute el levantamiento de la extremidad. Las posiciones del brazo se muestran en la Figura 58.

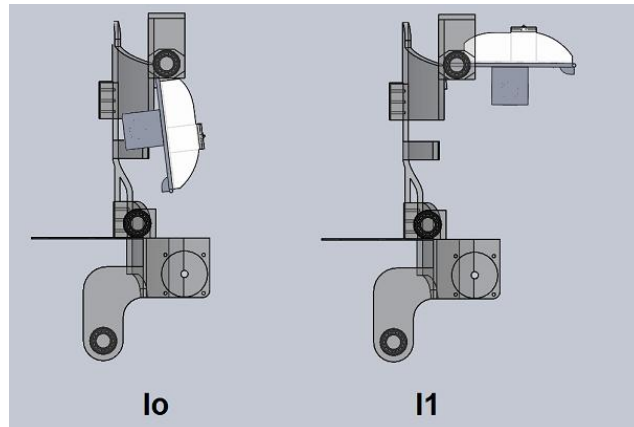


Figura 58. Posiciones del brazo en el Hexo

La ejecución del movimiento en ambos brazos, es independiente entre ellos. No se establecen bloqueos de los otros pulsadores, por lo que no implica riesgos de inestabilidad cuando se ejecutan estos movimientos. El algoritmo, tanto de extensión como de flexión del brazo, es igual en ambos brazos (Figura 59).

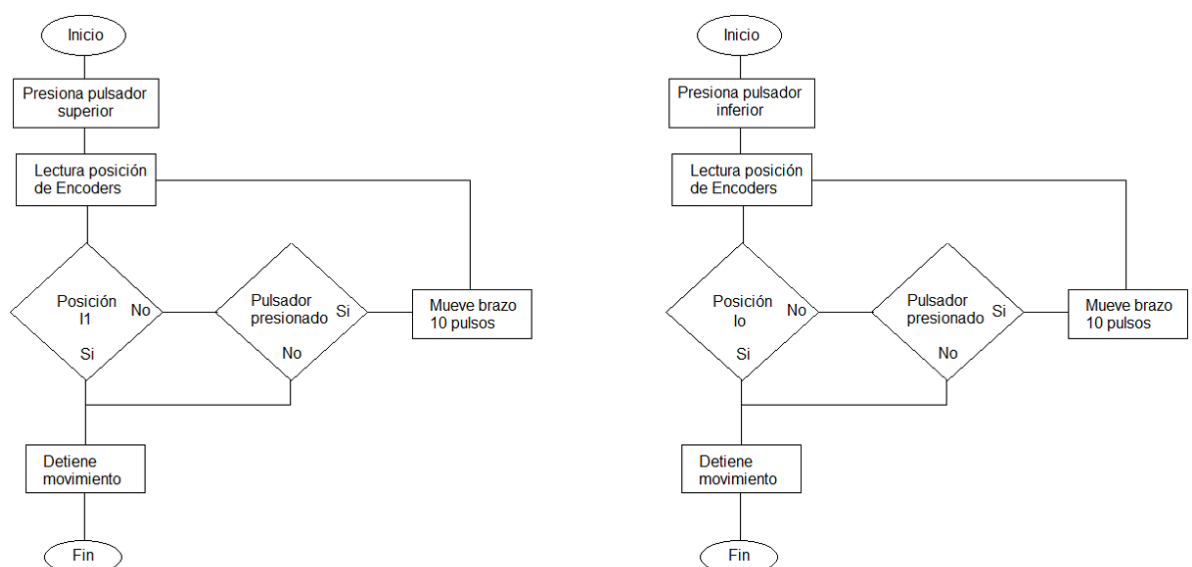


Figura 59. Diagrama de flujo para flexión y extensión de ambos brazos

Los pulsadores ubicados en la protección de la mano tienen que estar continuamente presionados para que se ejecute la extensión o la flexión de antebrazo. En la Figura 60 se muestra las posiciones máxima y mínima a alcanzar por este elemento.

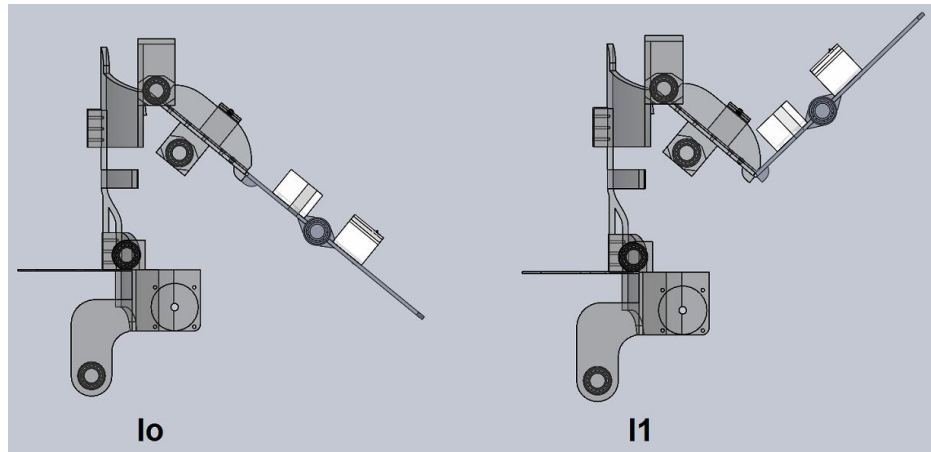


Figura 60. Posiciones del antebrazo en el Hexo

El algoritmo a ejecutar es el mismo utilizado en el movimiento del brazo del Hexo (Figura 61).

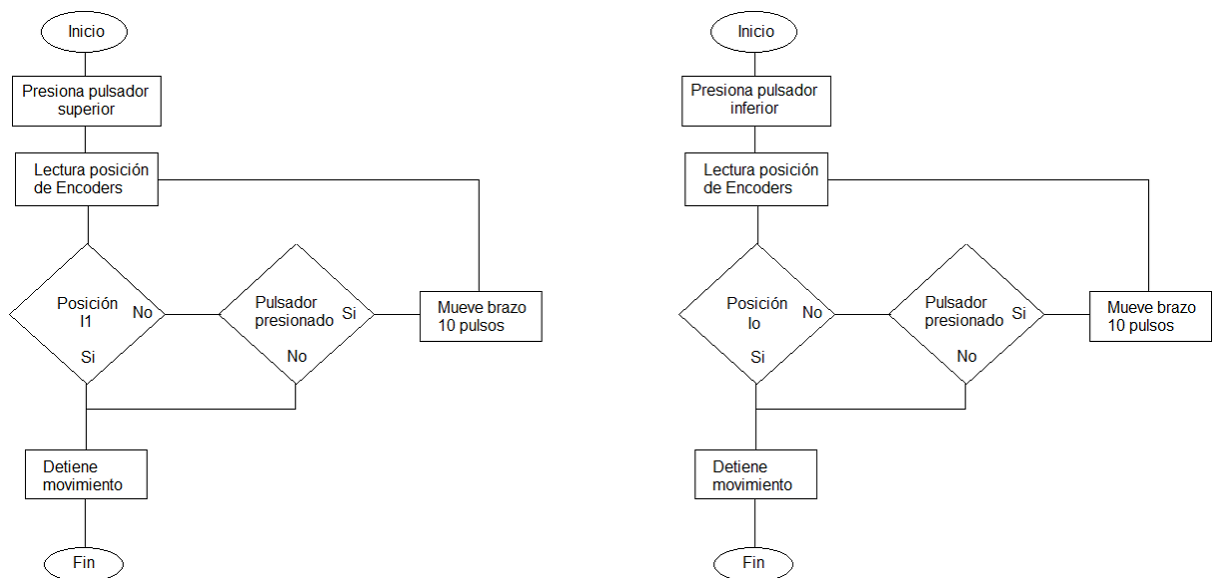


Figura 61. Diagrama de flujo para flexión y extensión de ambos antebrazos

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Utilizando las herramientas de análisis del software SolidWorks™, se somete a cada uno de los elementos de la estructura a las diferentes cargas (fuerzas) que actúan sobre este. Las cargas a aplicarse son calculadas de acuerdo a la posición más crítica a la que el Hexo será sometido, incluyendo un peso a cargar ubicado en el extremo del antebrazo.

Se consideran también el peso del elemento en sí, el peso de la parte del cuerpo del usuario apoyada en esta estructura (El peso de cada una de las partes se calcula de acuerdo al porcentaje de masa que corresponde a una masa corporal del usuario de 80 Kg) y la carga resultante del peso de los servo motores lineales en caso de ser significativa.

Los resultados obtenidos, mediante la aplicación de la herramienta SimulationXpress™, son mostradas de forma gráfica con un esquema de colores que indica las variaciones de esfuerzos en el elemento y los desplazamientos que se presentarán debido a todas las cargas. Además, se muestra la deformación que se espera presente el elemento.

Se considera las posiciones más críticas del Hexo las utilizadas para el levantamiento de la carga, con los brazos extendidos y las piernas recogidas, tal como se indica en la Figura 62.

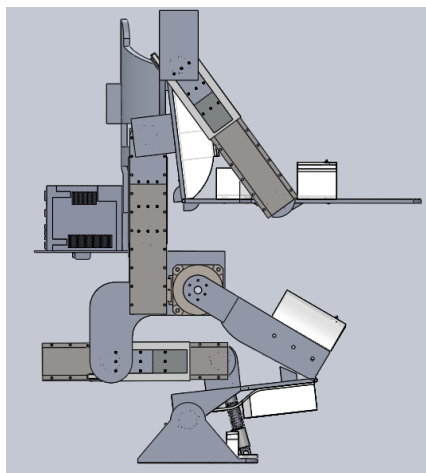


Figura 62. Posición crítica del Hexo

4.1 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN EL ANTEBRAZO

Se realiza un análisis de todas las fuerzas participantes, las cuales generarán un efecto de esfuerzo y flexión sobre el elemento. Para este análisis se selecciona el lado derecho del Hexo, ya que los resultados, por simetría presentarán los mismos valores.

Se considera un peso de 25 Kg sobre el extremo del antebrazo asumiendo una distribución equilibrada del peso total de 50 Kg entre ambas extremidades.

Para el análisis se presentan los siguientes pesos a actuar:

$W_{ab} =$	Peso de la estructura del antebrazo =	1.2 Kg
$W_{bh} =$	Peso del antebrazo del usuario =	1.84 Kg
$W_{carga} =$	Peso de la carga =	25 Kg

4.1.1 CENTRO DE MASA DEL ANTEBRAZO

Para el centro de masa donde actúan las fuerzas de los pesos se determina de acuerdo al análisis realizado en SolidWorks™. El centro de masa de la estructura del antebrazo se muestra en la Figura 63.

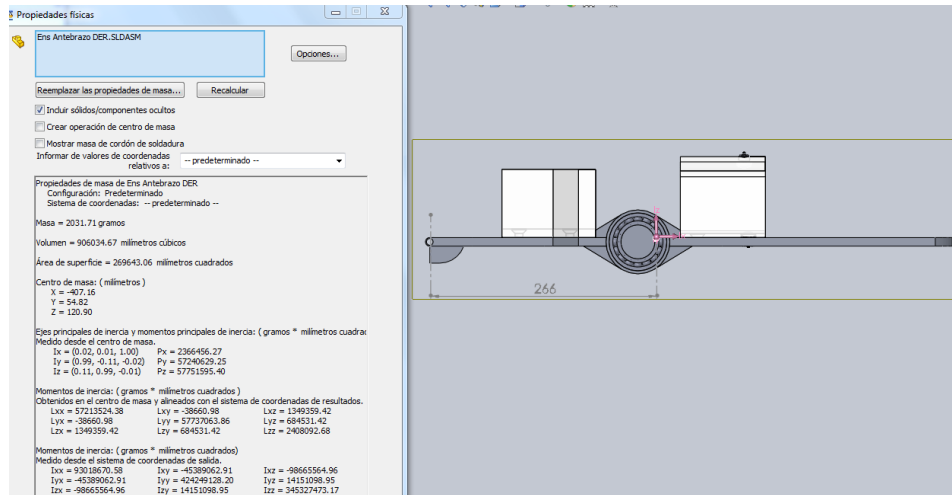


Figura 63. Centro de masa del ensamblaje del antebrazo

4.1.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL ANTEBRAZO

De acuerdo al diagrama del cuerpo libre que se muestra en la Figura 64, y considerando las distancias a las que se ubica cada uno de los centros de masa, se determinan las fuerzas actuantes:

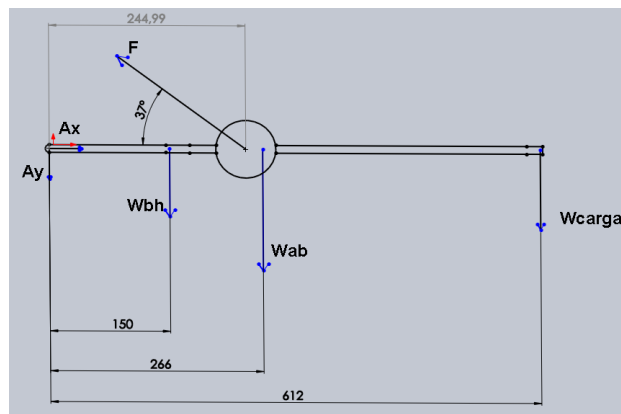


Figura 64. Diagrama del cuerpo libre del antebrazo

$$\sum F_x = 0 \quad [4.1]$$

$$-F \cdot \cos(37) + A_x = 0$$

$$A_x = F \cdot \cos(37)$$

$$\sum F_y = 0 \quad [4.2]$$

$$-A_y + F \cdot \sin(37) = W_{ab} + W_{bh} + W_{carga}$$

$$-Ay + F.Sen(37) = (9.8)(25 + 1.2 + 1.84)$$

$$-Ay = 274.79 - F.Sen(37)$$

$$\sum M \curvearrowright = 0 \quad [4.3]$$

$$-Wbh(0.15) - Wab(0.266) - Wcarga(.612) + F.Sen(37)(.245) = 0$$

$$(9.8) \times [(25 \times 0.612) + (1.2 \times 0.266) + (1.84 \times 0.15)] - F.Sen(37) \times 0.245$$

$$= 0$$

$$155.77 = F.Sen(37) \times 0.245$$

$$F = 681.14 \text{ N}$$

$$Ay = 135.13 \text{ N} \downarrow$$

$$Ax = 543.98 \text{ N} \rightarrow$$

Siendo F la fuerza del motor servo lineal que actúa sobre el antebrazo para mantener a este elemento en esa posición.

4.1.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN ANTEBRAZO

Utilizando estas fuerzas obtenidas en los cálculos anteriores se realizan los análisis en SimulationXpress™ para obtener el comportamiento de la deformación, esfuerzo y desplazamientos a los que se somete el antebrazo.

4.1.3.1 Análisis de esfuerzos

Propiedades del Aluminio 6061-T6:

Volumen: 0.000586292 m^3

Densidad: 2700 kg/m^3

Peso: 11.76 N

Límite elástico: $2.75e^8 \text{ N/m}^2$

Límite de tracción: $3.1e^8 \text{ N/m}^2$

Fuerzas aplicadas (Figura 65):

Wab	=	11.76	N
Wbh	=	18.032	N
Wcarga	=	245.00	N
F	=	681.14	N

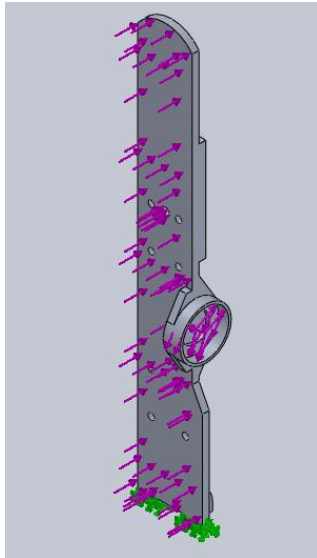


Figura 65. Fuerzas aplicadas en estructura de antebrazo

Información de malla (Figura 66):

Número total de nodos:	124902
Número total de elementos:	80720



Figura 66. Mallado de antebrazo para análisis

Resultados de esfuerzos de Von Mises (Figura 67 y Figura 68):

Esfuerzo Mínimo: 3.93981 N/m² en nodo 888

Esfuerzo Máximo: 138526 N/m² en nodo 106056

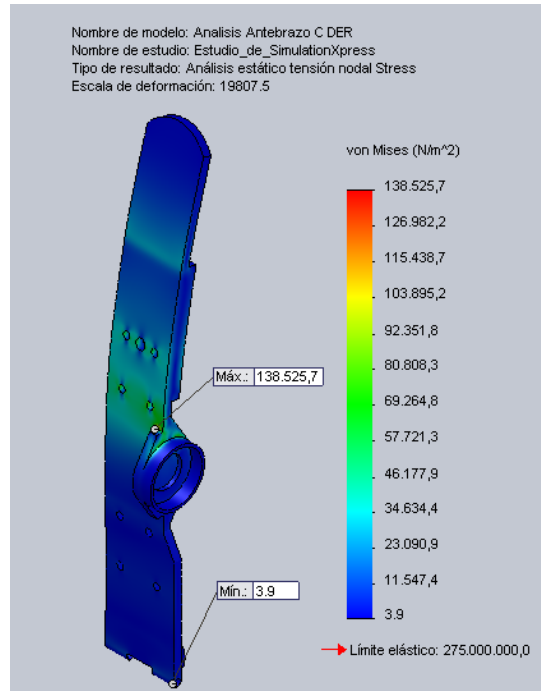


Figura 67. Esfuerzos de Von Mises vista superior de antebrazo

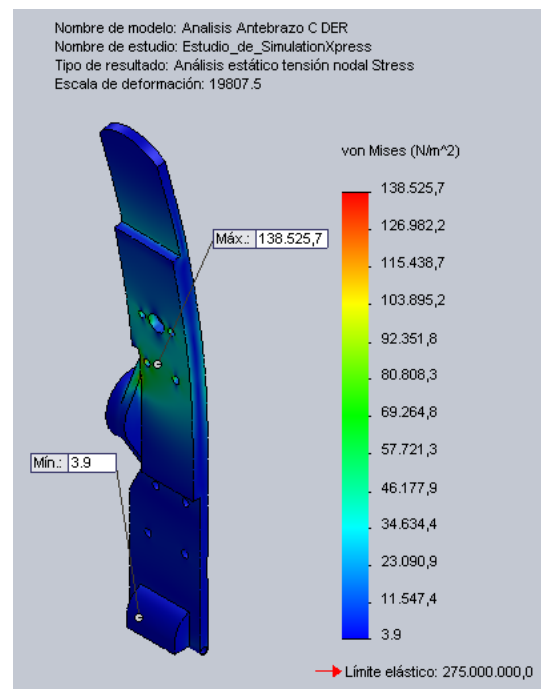


Figura 68. Esfuerzos de Von Mises vista inferior de antebrazo

Resultados de desplazamientos (Figura 69):

Desplazamiento mínimo: 0 mm en nodo 98

Desplazamiento máximo: 0.00313248 mm en nodo 102103

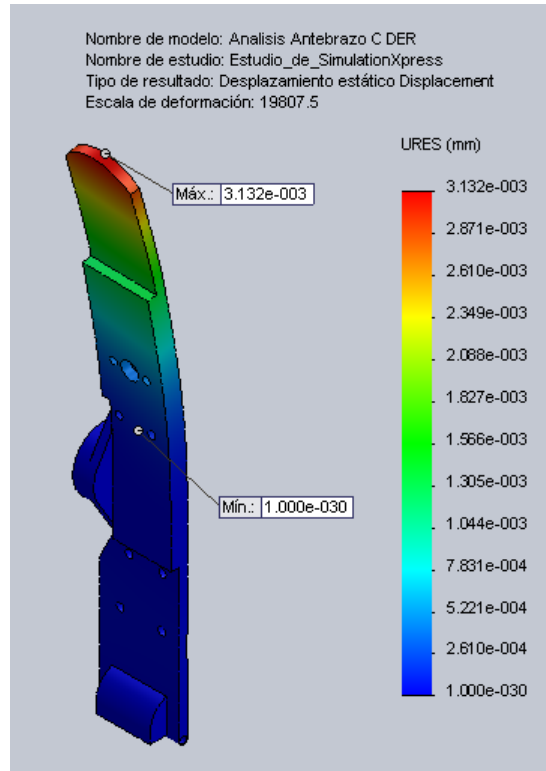


Figura 69. Desplazamientos de la estructura de antebrazo

Deformaciones (Figura 70):

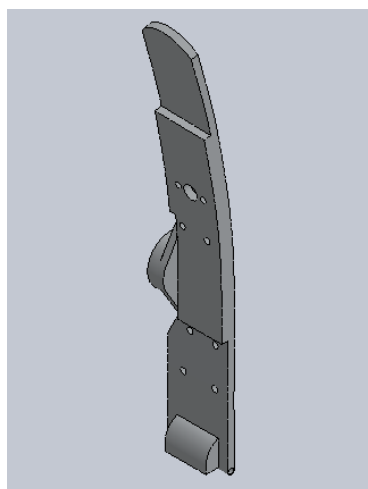


Figura 70. Deformaciones de la estructura de antebrazo

Factor de seguridad (Figura 71):

Mínimo factor: 1985.19 en nodo 106056

Máximo factor: $6.98004e^7$ en nodo 888

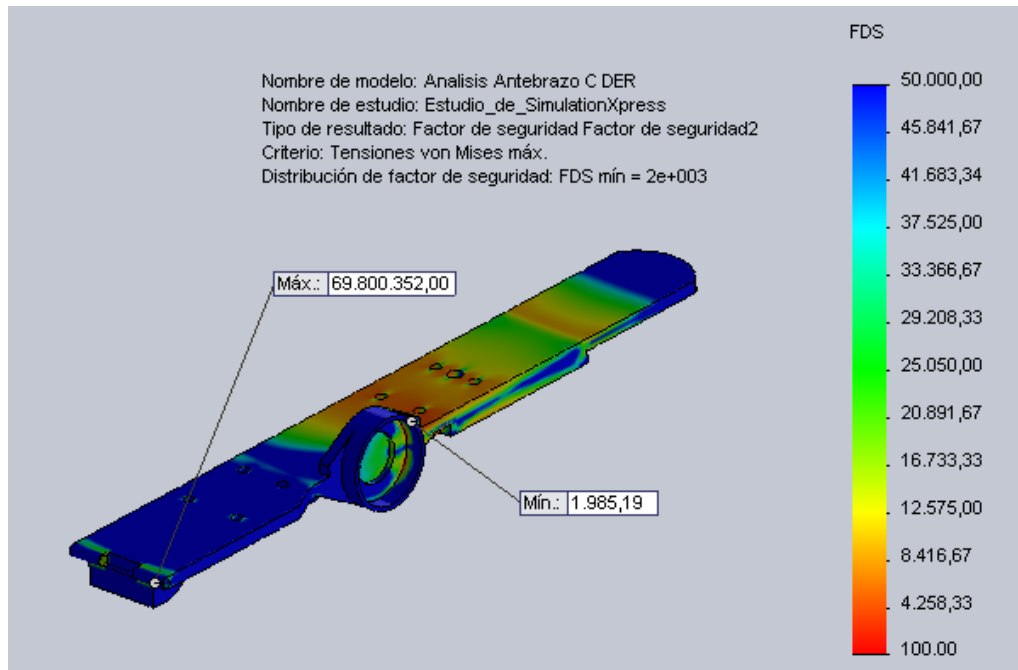


Figura 71. Factor de seguridad en estructura de antebrazo

4.2 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN EL BRAZO

Tomando los valores de fuerzas obtenidos en la articulación del antebrazo con el brazo, se determinan las fuerzas actuantes que generarán flexión sobre el elemento y el esfuerzo resultante. Nuevamente se hace el análisis sobre el lado derecho del Hexo.

Para el análisis se presentan los siguientes pesos a actuar:

Wbr = Peso de la estructura del brazo = 1.50 Kg

Wbrh = Peso del brazo del usuario = 2.16 Kg

4.2.1 CENTRO DE MASA DEL BRAZO

El centro de masa donde actúan las fuerzas de los pesos se determina con el software SolidWorks™. El centro de masa de la estructura del brazo se muestra en la Figura 72.

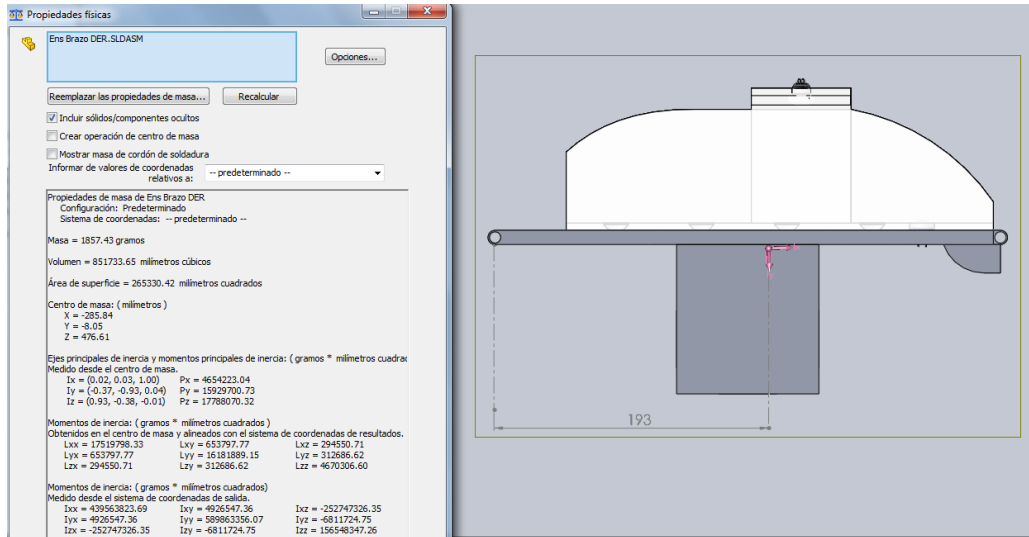


Figura 72. Centro de masa del ensamblaje del brazo

4.2.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL BRAZO

Para el análisis de este elemento se tienen en cuenta un ángulo de posicionamiento de 33° , ángulo resultante de la posición crítica de toda la extremidad superior derecha. Debido a esta posición, el ángulo de incidencia del servo motor lineal sobre este elemento será de $18,7^\circ$ respecto a la vertical. En el diagrama del cuerpo libre (Figura 73), se observan las fuerzas que actúan sobre el brazo y las distancias a las que inciden. Las fuerzas Ay' y Ax' se obtuvieron en los cálculos de fuerzas realizado para el antebrazo.

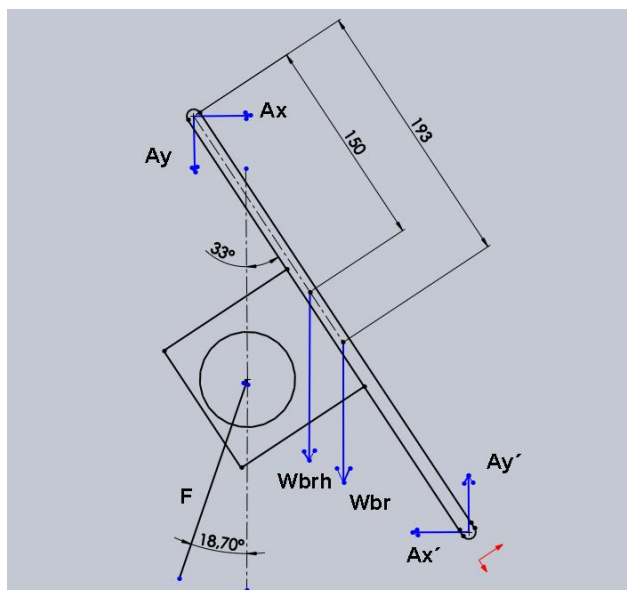


Figura 73. Diagrama del cuerpo libre del brazo

$$\sum F_x = 0 \quad [4.4]$$

$$-Ax' + Ax + F \cdot \text{Sen} (18.7) = 0$$

$$-543.98 + Ax + F \cdot \text{Sen} (18.7) = 0$$

$$Ax = 543.98 - F \cdot \text{Sen} (18.7)$$

$$\sum F_y = 0 \quad [4.5]$$

$$Ay' - Wbrh - Wbr + Fy - Ay = 0$$

$$135.13 - (9.8)(2.16 + 1.5) + F \cdot \text{Cos} (18.7) - Ay = 0$$

$$F \cdot \text{Cos} (18.7) - Ay = -99.262$$

$$Ay = 99.262 + F \cdot \text{Cos} (18.7)$$

$$\sum M \cup += 0 \quad [4.6]$$

$$-Wbh(0.193 \times \text{Cos} (57)) - Wbrh(0.15 \times \text{Cos} (57)) + Ay'(0.355 \times \text{Cos} (57))$$

$$- Ax'(0.355 \times \text{Sen} (57)) + (0.178 \times \text{Cos} (57))(F \cdot \text{Cos} (18.7))$$

$$+ (0.178 \times \text{Sen} (57))(F \cdot \text{Sen} (18.7)) = 0$$

$$\begin{aligned}
& -(9.8 \times 1.5)(0.193 \times \text{Cos}(57)) - (9.8 \times 2.16)(0.15 \times \text{Cos}(57)) \\
& + (135.13)(0.355 \times \text{Cos}(57)) - (543.98)(0.355 \times \text{Sen}(57)) \\
& + (0.178 \times \text{Cos}(57))(F \cdot \text{Cos}(18.7)) \\
& + (0.178 \times \text{Sen}(57))(F \cdot \text{Sen}(18.7)) = 0
\end{aligned}$$

$$-3.27 - 135.83 + 0.0918.F + 0.0478.F = 0$$

$$F = 696.42 \text{ N}$$

$$A_y = 758.92 \text{ N} \downarrow$$

$$A_x = 320.69 \text{ N} \rightarrow$$

A_y y A_x son ejercidas por el soporte de la espalda. Estos valores se utilizarán para el cálculo de las fuerzas que actúan sobre la elemento A de la espalda.

4.2.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN BRAZO

Los análisis se realizan con el diseño inicial de la pieza, lo que implica que las fuerzas incidentes se muestran oblicuas; sin embargo, los planos de acción guardan la inclinación a la interacción existente debido a la posición del brazo que se está analizando.

4.2.3.1 Análisis de esfuerzos

Propiedades del Aluminio 6061-T6:

Volumen:	0.000520853 m^3
Densidad:	2700 kg/m^3
Peso:	14.7 N
Límite elástico:	$2.75e^8 \text{ N/m}^2$
Límite de tracción:	$3.1e^8 \text{ N/m}^2$

Fuerzas aplicadas (Figura 74):

W_{brh}	=	21.16	N
W_{bh}	=	14.70	N
$A_{y'}$	=	135.13	N
$A_{x'}$	=	543.98	N
F	=	696.42	N

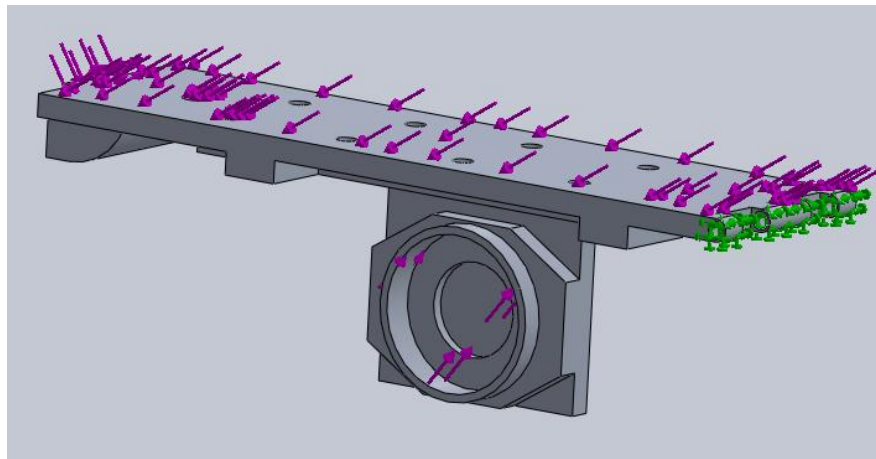


Figura 74. Fuerzas aplicadas en estructura de brazo

Información de malla (Figura 75):

Número total de nodos:	105389
Número total de elementos:	67411

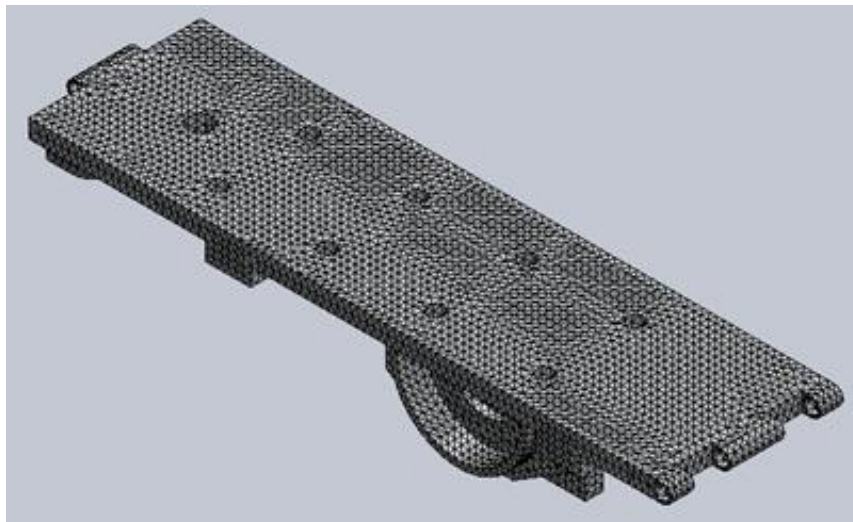


Figura 75. Mallado de brazo para análisis

Resultados de esfuerzos de Von Mises (Figura 76 y Figura 77):

Esfuerzo Mínimo: 3707.79 N/m² en nodo 61721

Esfuerzo Máximo: 1.17533e⁸ N/m² en nodo 99271

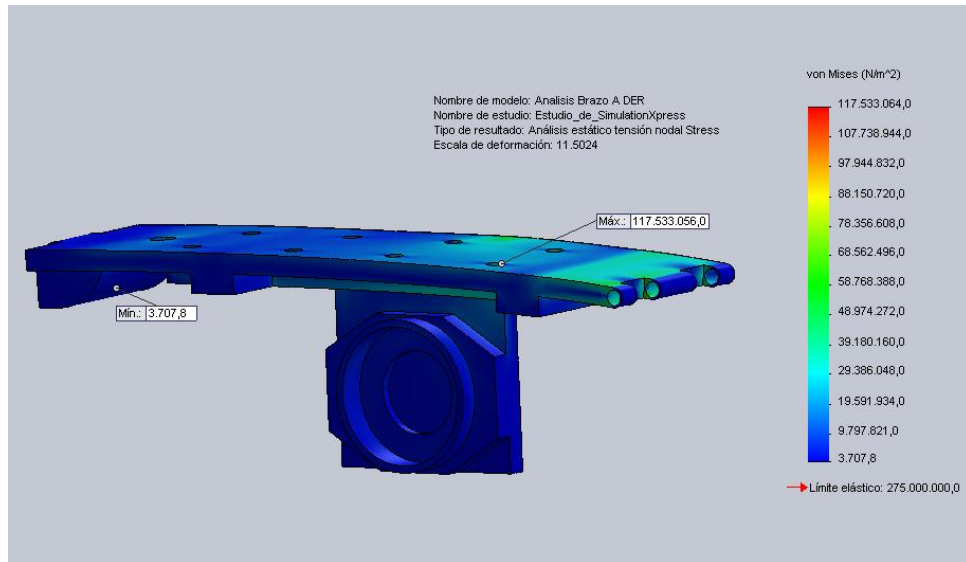


Figura 76. Esfuerzos de Von Mises en estructura de brazo

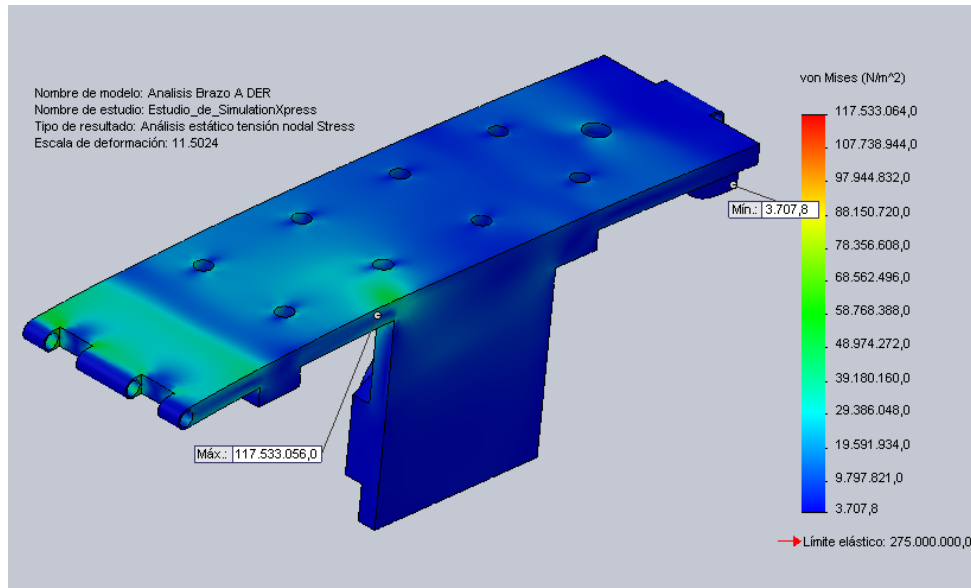


Figura 77. Esfuerzos y fuerzas aplicadas en estructura de brazo

Resultados de desplazamientos (Figura 78):

Desplazamiento mínimo: 0 mm en nodo 309

Desplazamiento máximo: 3.17329 mm en nodo 57

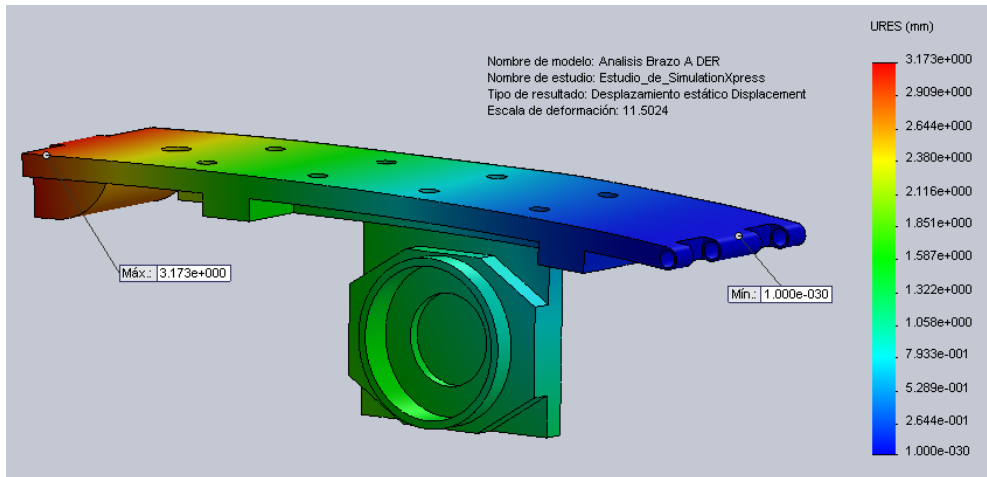


Figura 78. Desplazamientos de la estructura de brazo

Deformaciones (Figura 79):

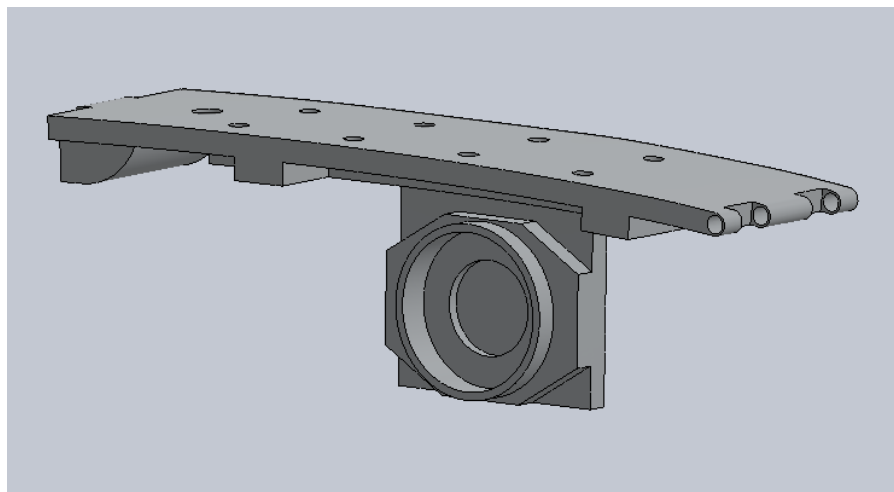


Figura 79. Deformaciones de la estructura de antebrazo

Factor de seguridad (Figura 80):

Mínimo factor: 2.33977 en nodo 99271

Máximo factor: 74168.2 en nodo 61721

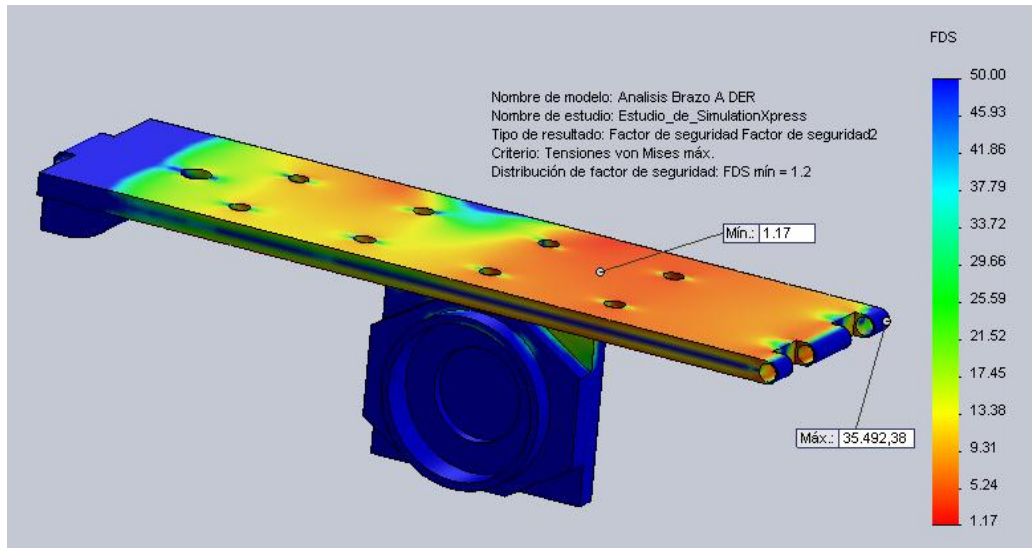


Figura 80. Factor de seguridad en estructura de antebrazo

4.3 ANÁLISIS FUERZAS DEL SERVO MOTOR LINEAL DEL ANTEBRAZO

Se analiza las fuerzas actuantes sobre este servo motor lineal para obtener las resultantes que actuarán sobre una parte de la estructura de la espalda. Estas serán las fuerzas que el servo tendrá que ejercer para conseguir movilidad en el elemento del antebrazo. Se continúa el análisis con los elementos pertenecientes al lado derecho.

El peso a actuar en este análisis es del mismo del servo motor lineal:

$$W_s = \text{Peso del servo motor} = 9.0 \text{ Kg}$$

4.3.1 CENTRO DE MASA DEL SERVO MOTOR LINEAL

Dependiendo de la posición del Servo Coil sobre el Servo Magnet, el centro de masa puede variar; sin embargo, también se hace este análisis de fuerzas en la posición más crítica del Hexo. El centro de masa se muestra en la Figura 81.

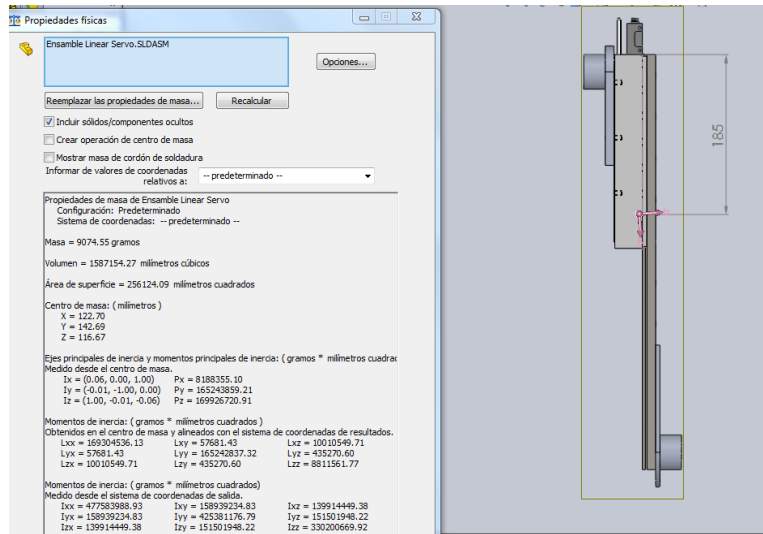


Figura 81. Centro de masa del servo motor lineal del antebrazo

4.3.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL SERVO MOTOR DEL ANTEBRAZO

El ángulo de posicionamiento del servo motor lineal es de 54° . En el diagrama del cuerpo libre de la Figura 82, se observan las fuerzas que actúan sobre el servo motor lineal y las distancias a las que inciden. Las fuerzas resultantes que actúan en los extremos, F_y y F_x , son las obtenidas en el análisis de fuerzas del antebrazo, y las fuerzas F_y' y F_x' son las fuerzas ejercidas por la estructura de la espalda.

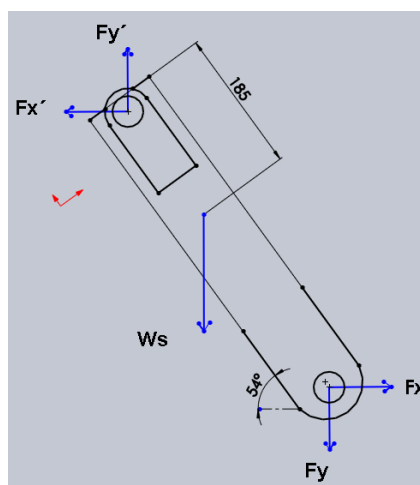


Figura 82. Diagrama del cuerpo libre del servo motor lineal del antebrazo

$$\sum Fx = 0 \quad [4.7]$$

$$-Fx' + Fx = 0$$

$$-Fx' + F \cdot \cos(36) = 0$$

$$Fx' = 681.14 \times \cos(36)$$

$$Fx' = 551.05 \text{ N}$$

$$\sum Fy = 0 \quad [4.8]$$

$$Fy' - Ws - Fy = 0$$

$$Fy' - (9.8)(9) - F \cdot \sin(36) = 0$$

$$Fy' = 88.2 + 681.14 \times \sin(36)$$

$$Fy' = 488.56 \text{ N}$$

$$Fy' = 488.56 \text{ N } \uparrow$$

$$Fx' = 551.05 \text{ N } \leftarrow$$

Ambas fuerzas son a las que el servo motor está sometido en el punto de articulación con la parte de los hombros de la estructura de la espalda.

4.4 ANÁLISIS FUERZAS DEL SERVO MOTOR LINEAL DEL BRAZO

A diferencia del servo motor lineal anterior, este se encuentra en un posicionamiento de 85° y el Servo Coil está en otra posición sobre el Servo Magnet, por lo que su centro de masa se ubicará en otra posición.

El peso a actuar en este análisis es del mismo servo motor lineal:

$$Ws = \text{Peso del servo motor} = 9.0 \text{ Kg}$$

4.4.1 CENTRO DE MASA DEL SERVO MOTOR LINEAL

El Servo Coil está ligeramente desplazado hacia el centro del Servo Magnet, lo que implica un desplazamiento del centro de masa en 2.8 cm aproximadamente. El centro de masa del servo motor se muestra en la Figura 83.

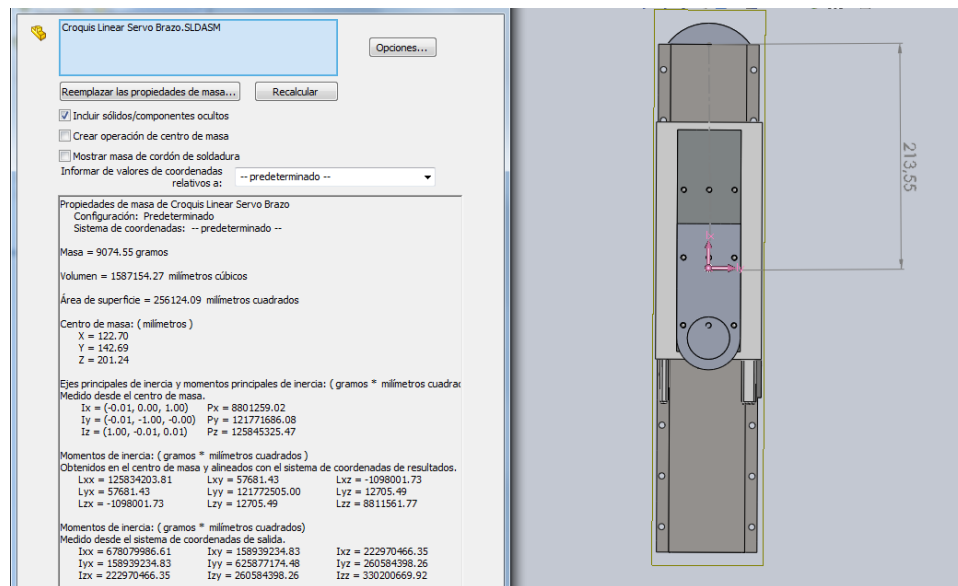


Figura 83. Centro de masa del servo motor lineal del brazo

4.4.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL SERVO MOTOR DEL BRAZO

Las fuerzas F_y y F_x que actúan sobre el servo motor lineal son aplicadas en la articulación del brazo, fuerzas que fueron determinadas anteriormente. Las fuerzas F_y' y F_x' son las fuerzas que interactúan entre el Servo Magnet y la articulación situada en la cadera, que es el tercer elemento ensamblado como parte de la espalda. El servo motor lineal está posicionado a 85° de la horizontal. El diagrama del cuerpo libre se muestra en la Figura 84.

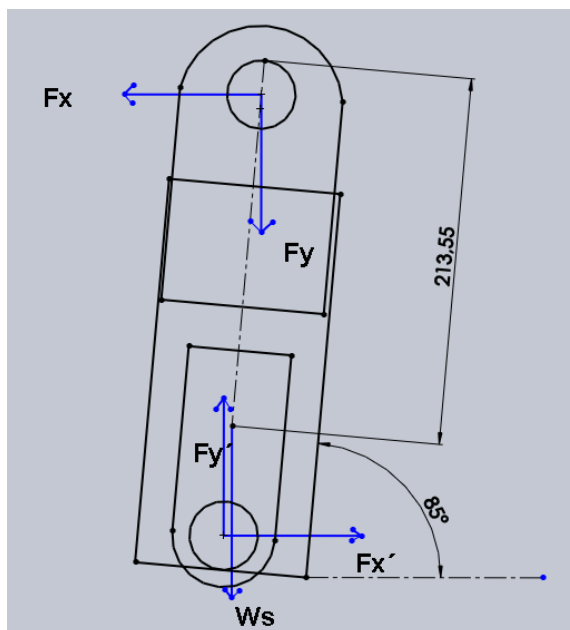


Figura 84. Diagrama del cuerpo libre del servo motor lineal del brazo

$$\sum Fx = 0 \quad [4.9]$$

$$Fx' - Fx = 0$$

$$Fx' - F \cdot \cos(85) = 0$$

$$Fx' = 696.42 \times \cos(85)$$

$$Fx' = 60.69 \text{ N}$$

$$\sum Fy = 0 \quad [4.10]$$

$$Fy' - Ws - Fy = 0$$

$$Fy' - (9.8)(9) - F \cdot \sin(85) = 0$$

$$Fy' = 88.2 + 696.42 \times \sin(85)$$

$$Fy' = 731.97 \text{ N}$$

$$Fy' = 731.97 \text{ N} \quad \uparrow$$

$$Fx' = 60.69 \text{ N} \quad \rightarrow$$

Estas fuerzas, considerando la simetría del Hexo, actúan también sobre el lado izquierdo de este elemento de la espalda.

4.5 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN SECCIÓN “A” - ESPALDA

Este elemento se caracteriza porque en él convergen las fuerzas resultantes de ambos lados. Al tener en cuenta la simetría del diseño, los valores de las fuerzas a analizar son los mismos tanto en la derecha como en la izquierda del Hexo. Además, en este elemento convergen las fuerzas resultantes en el servo motor lineal que da movilidad al antebrazo, y el soporte del elemento del brazo. En la parte del apoyo se obtiene la resultante que será la misma fuerza que actúe sobre la sección B de la espalda.

Este elemento soporta el peso de los elementos de las extremidades superiores, y no soporta ningún peso ejercido por el usuario ya que este solamente le sirve como apoyo de la parte alta de la espalda. El peso considerado para este análisis es:

$W_{ea} = \text{Peso de la estructura de la sección A de la espalda} = 6.0 \text{ Kg}$

4.5.1 CENTRO DE MASA DE LA SECCIÓN “A” - ESPALDA

Este elemento presenta su centro de masa fuera del cuerpo y presenta un distanciamiento en los tres ejes de coordenadas (Figura 85).

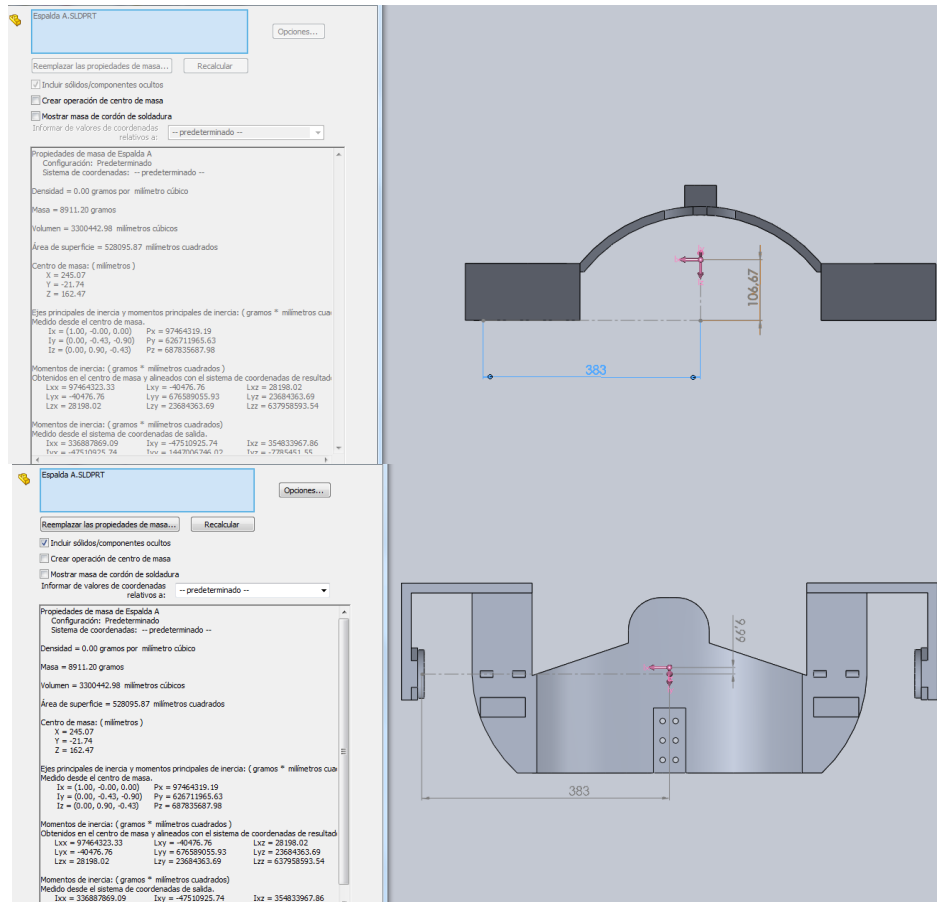


Figura 85. Centro de masa del ensamblaje de sección A de la espalda

4.5.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE SECCIÓN “A” - ESPALDA

En el diagrama del cuerpo libre de la Figura 86, se presentan las fuerzas actuantes sobre un lado del Hexo. Estas fuerzas mostradas en el DCL son las mismas que actúan en el otro lado de la estructura, por lo que el análisis de fuerzas contempla todos los valores para obtener un único resultante en la base de esta parte de la espalda. Se denominan F_y , F_x , A_y , A_x a las fuerzas que actúan en el lado derecho de la estructura, las cuales se muestran en el DCL; y F_{y2} , F_{x2} , A_{y2} , A_{x2} a las fuerzas actuantes sobre el lado izquierdo, que son consideradas en el cálculo de las fuerzas resultantes F_y' y F_x' .

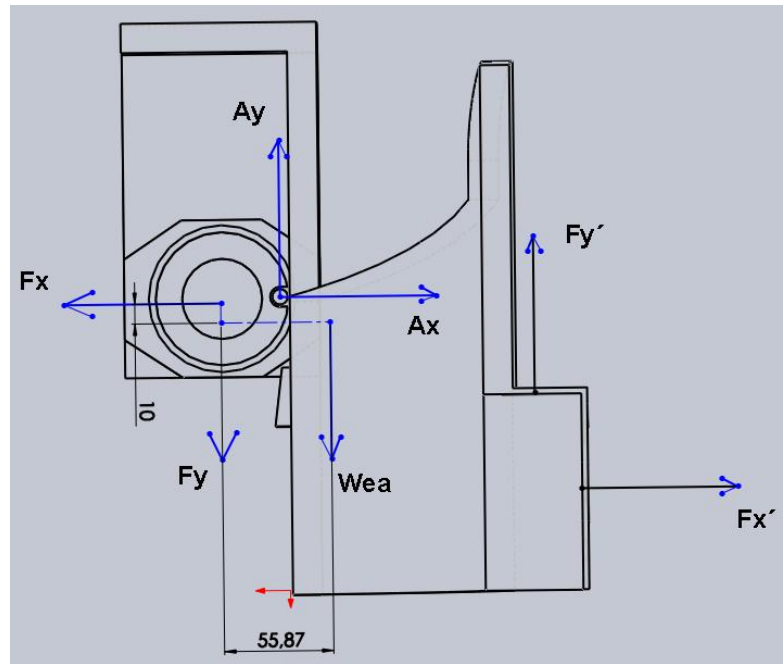


Figura 86. Diagrama del cuerpo libre de sección "A" - espalda

$$\sum Fx = 0 \quad [4.11]$$

$$-Fx + Ax - Fx2 + Ax2 + Fx' = 0$$

$$-551.05 + 320.69 - 551.05 + 320.69 + Fx' = 0$$

$$Fx' = 460.72 \text{ N}$$

$$\sum Fy = 0 \quad [4.12]$$

$$Ay - Fy + Ay2 - Fy2 - Wea + Fy' = 0$$

$$(2) \times (758.92) - (2) \times (488.56) - (9.8)(6) + Fy' = 0$$

$$Fy' = -1517.84 + 977.12 + 58.8$$

$$Fy' = -481.92 \text{ N}$$

$$Fx' = 460.72 \text{ N} \rightarrow$$

$$Fy' = 481.92 \text{ N} \downarrow$$

Tanto Fx' como Fy' son las fuerzas generadas por el soporte de la sección "A" de la espalda. Estas mismas serán las que se aplican en la siguiente sección para su análisis.

4.5.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN SECCIÓN “A” – ESPALDA

Las fuerzas actuantes son aplicadas en forma paralela a los ejes x y y. Los resultados obtenidos son producto de la aplicación de las fuerzas en todos los puntos de acción; es decir, en ambos lados de la estructura se aplicaron las fuerzas relacionadas al movimiento de los antebrazos y de los brazos. El punto donde se ensambla esta sección de la espalda con la siguiente sección se la considera como una sujeción para este análisis. El peso es aplicado en la parte superior de la estructura de forma distribuida.

4.5.3.1 Análisis de esfuerzos

Propiedades del Aluminio 6061-T6:

Volumen:	0.00330044 m^3
Densidad:	2700 kg/m^3
Peso:	58.8 N
Límite elástico:	$2.75e^8 \text{ N/m}^2$
Límite de tracción:	$3.1e^8 \text{ N/m}^2$

Fuerzas aplicadas (Figura 87):

Wea	=	58.80	N
Ay	=	758.92	N
Ay2	=	758.92	N
Ax	=	320.69	N
Ax2	=	320.69	N
Fx	=	551.05	N
Fx2	=	551.05	N
Fy	=	488.56	N
Fy2	=	488.56	N

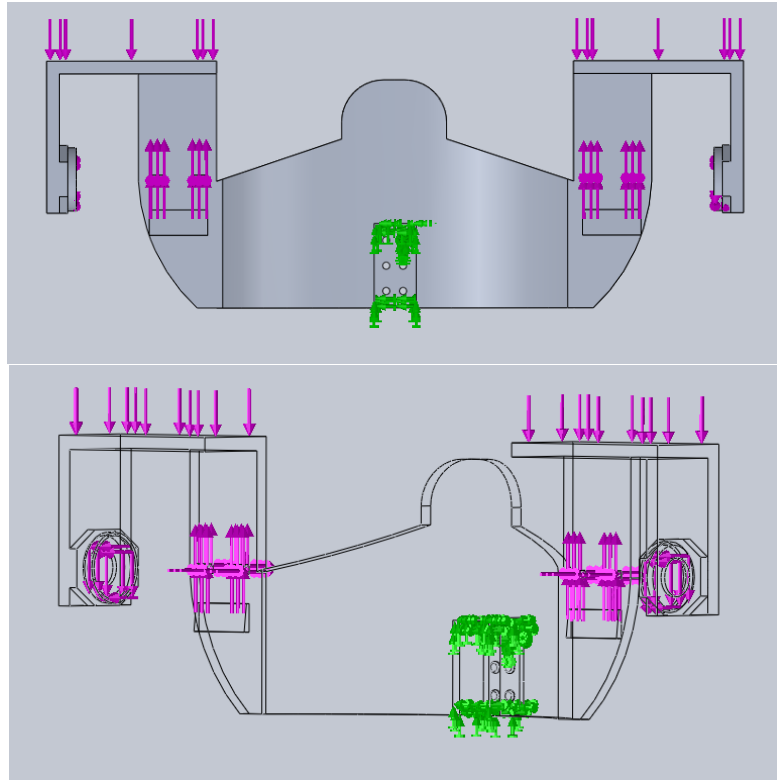


Figura 87. Fuerzas aplicadas en sección A de espalda

Información de malla (Figura 88):

Número total de nodos: 291121

Número total de elementos: 184376

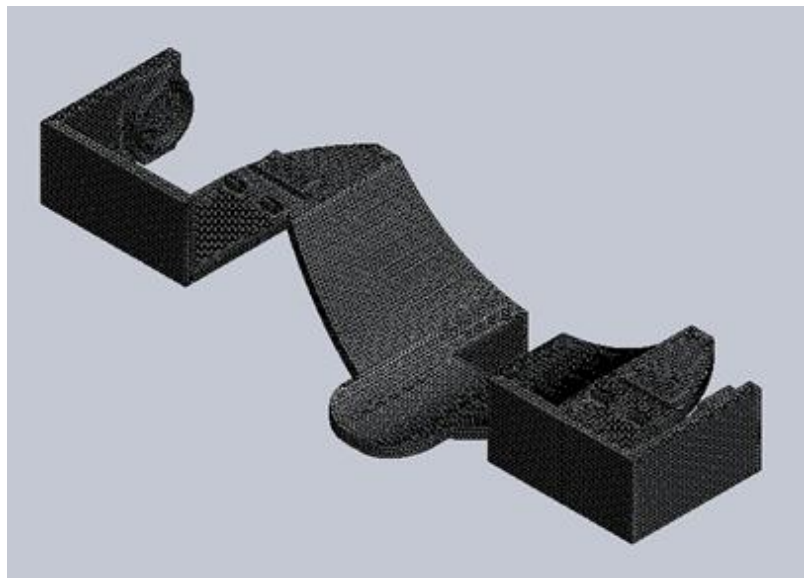


Figura 88. Mallado de sección A de la espalda para análisis

Resultados de esfuerzos de Von Mises (Figura 89 y Figura 90):

Esfuerzo Mínimo: 21.35 N/m² en nodo 21598

Esfuerzo Máximo: 8.74642e⁷ N/m² en nodo 392

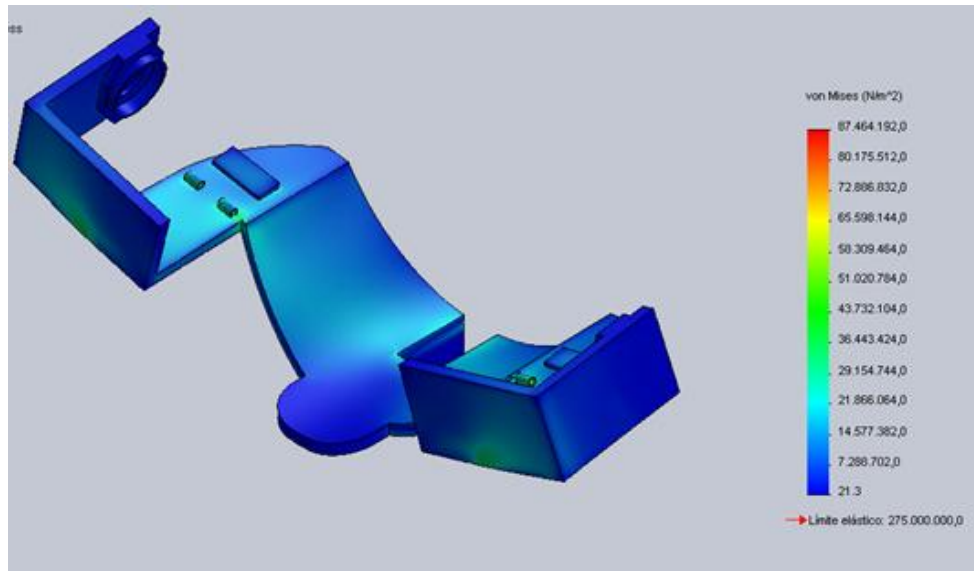


Figura 89. Esfuerzos de Von Mises en sección A de espalda

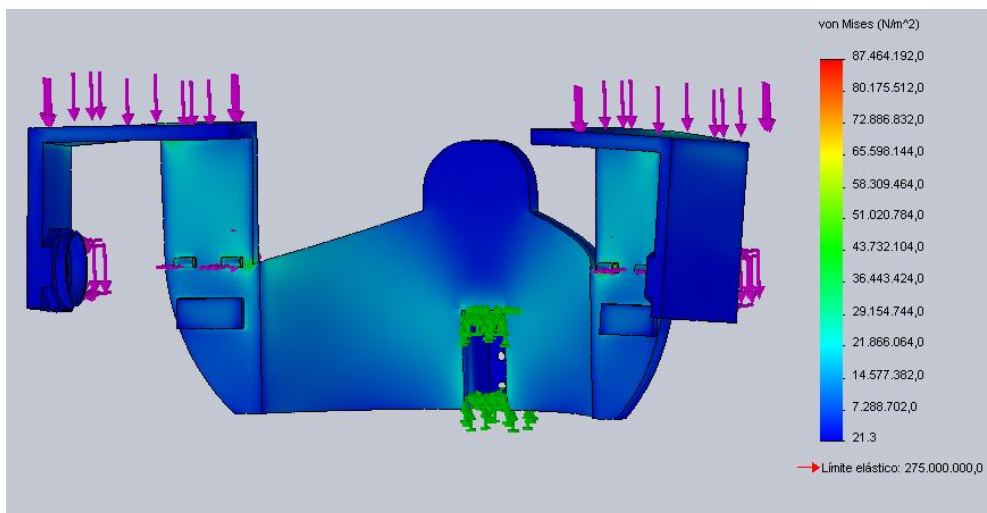


Figura 90. Esfuerzos y fuerzas aplicadas en sección A de espalda

Resultados de desplazamientos (Figura 91):

Desplazamiento mínimo: 0 mm en nodo 15

Desplazamiento máximo: 3.26859 mm en nodo 18501

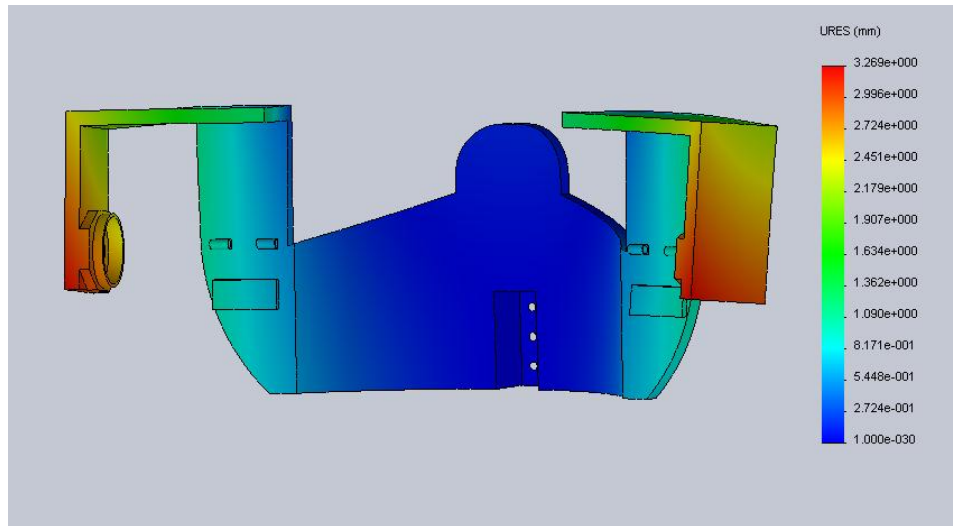


Figura 91. Desplazamientos de la sección A de espalda

Deformaciones (Figura 92):

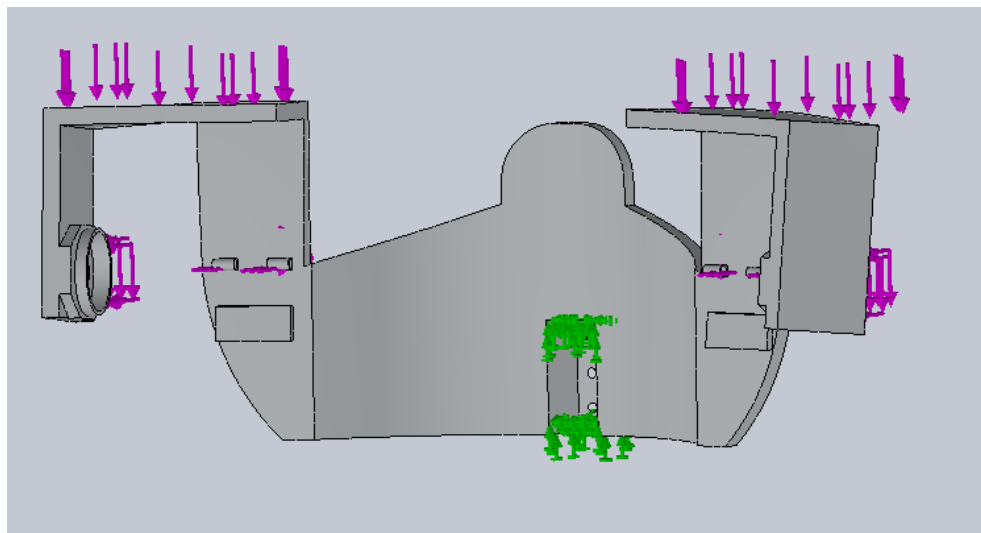


Figura 92. Deformaciones de la sección A de espalda

Factor de seguridad (Figura 93):

Mínimo factor: 3.14414 en nodo 392

Máximo factor: $1.28806e^7$ en nodo 21598

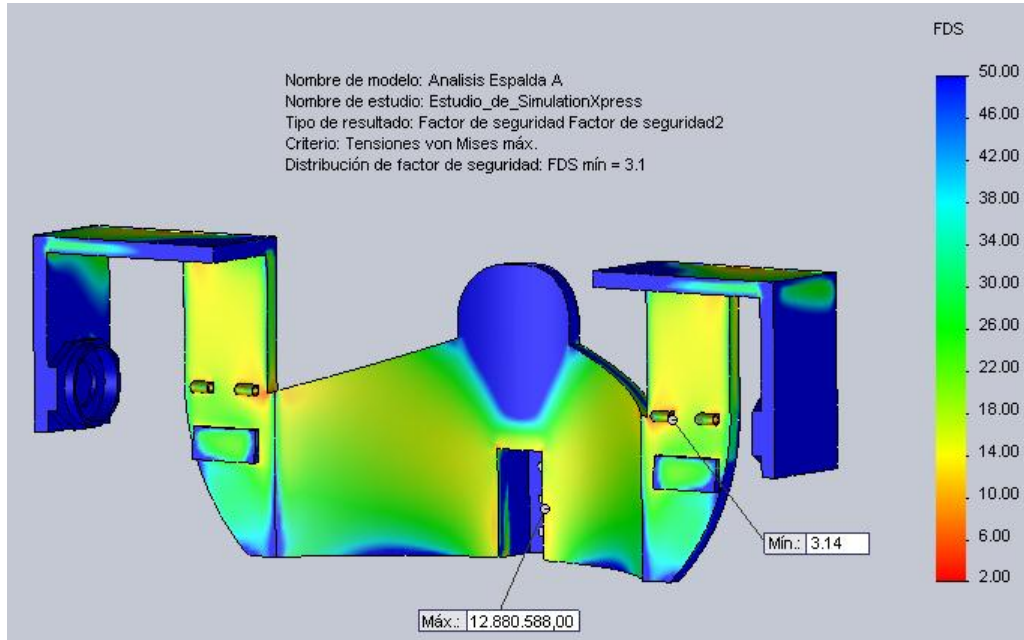


Figura 93. Factor de seguridad en sección A de espalda

4.6 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN SECCIÓN “B” – ESPALDA

Este elemento representa el soporte vertical del Hexo. Las fuerzas actuantes son aplicadas en las zonas de acople con las demás secciones de forma axial. El análisis contempla las cargas generadas en los elementos anteriores y su consecuente acción sobre este elemento. La parte baja se la considera como una sujeción para el análisis y contienen las fuerzas que actuarán sobre el siguiente elemento de la espalda. El peso propio de este elemento se aplica en la zona lumbar del diseño para la incidencia en este análisis.

Web = Peso de la estructura de la sección B de la espalda = 2.0 Kg

4.6.1 CENTRO DE MASA DE LA SECCIÓN “B” - ESPALDA

El centro de masa de este elemento está desplazado ligeramente hacia fuera de la estructura. Se observa la posición de este punto en la Figura 94.

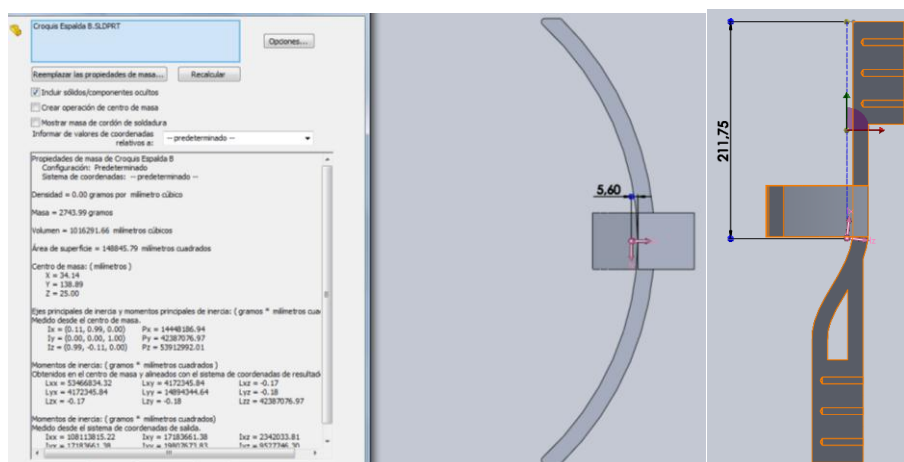


Figura 94. Centro de masa del ensamblaje de sección B - espalda

4.6.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE SECCIÓN “B” - ESPALDA

Al ser un soporte vertical, las fuerzas actuantes se presentan en las secciones donde se acopla este elemento (Figura 95).

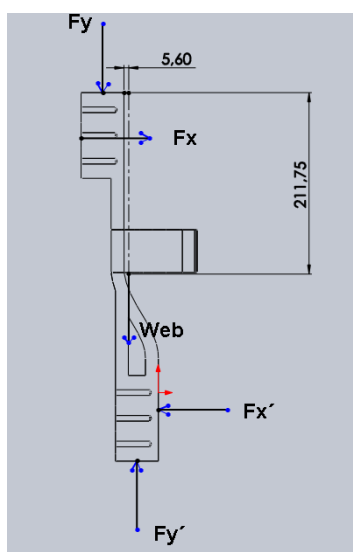


Figura 95. Diagrama del cuerpo libre de sección “B” - espalda

$$\sum Fx = 0 \quad [4.13]$$

$$Fx - Fx' = 0$$

$$460.72 - Fx' = 0$$

$$Fx' = 460.72 \text{ N}$$

$$\sum Fy = 0 \quad [4.14]$$

$$-Fy - Web + Fy' = 0$$

$$-481.92 - (9.8)(2) + Fy' = 0$$

$$Fy' = 1069.84 \text{ N}$$

$$Fx' = 460.72 \text{ N} \leftarrow$$

$$Fy' = 501.52 \text{ N} \uparrow$$

Fx' y Fy' serán las fuerzas que actúen sobre la sección C de la espalda.

4.6.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN SECCIÓN “B” – ESPALDA

Para los análisis se aplican las fuerzas obtenidas en los cálculos anteriores, considerando Fx' y Fy' como fuerzas de sujeción en el soporte. El peso se aplica en la curvatura de la zona lumbar debido a su proximidad al centro de masa del elemento.

4.6.3.1 Análisis de esfuerzos

Propiedades del Aluminio 6061-T6:

Volumen: 0.00101629 m^3

Densidad: 2700 kg/m^3

Peso: 19.6 N

Límite elástico: $2.75e^8 \text{ N/m}^2$

Límite de tracción: $3.1e^8 \text{ N/m}^2$

Fuerzas aplicadas (Figura 96):

Web	=	19.60	N
Fx	=	460.72	N
Fy	=	481.92	N

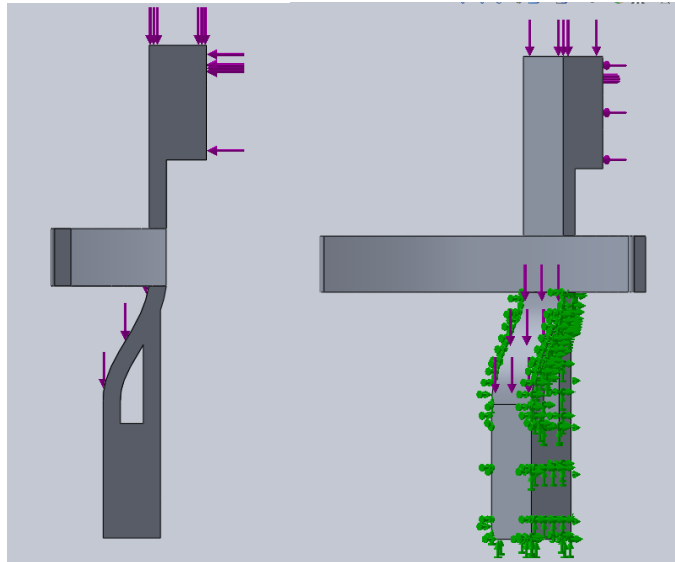


Figura 96. Fuerzas aplicadas en sección B de espalda

Información de malla (Figura 97):

Número total de nodos:	24188
Número total de elementos:	15013

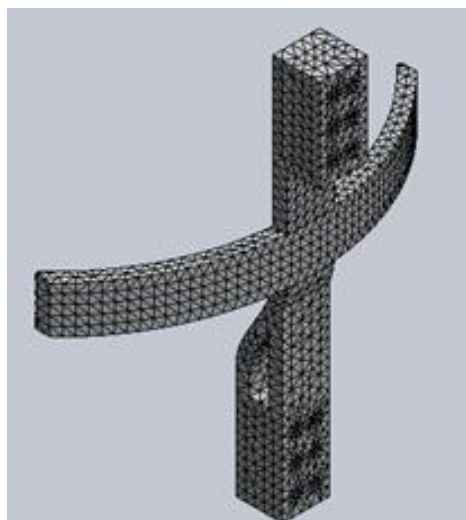


Figura 97. Mallado de sección B de la espalda para análisis

Resultados de esfuerzos de Von Mises (Figura 98 y Figura 99):

Esfuerzo Mínimo: $1.82078 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ en nodo 799

Esfuerzo Máximo: $6.17246 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ en nodo 19054

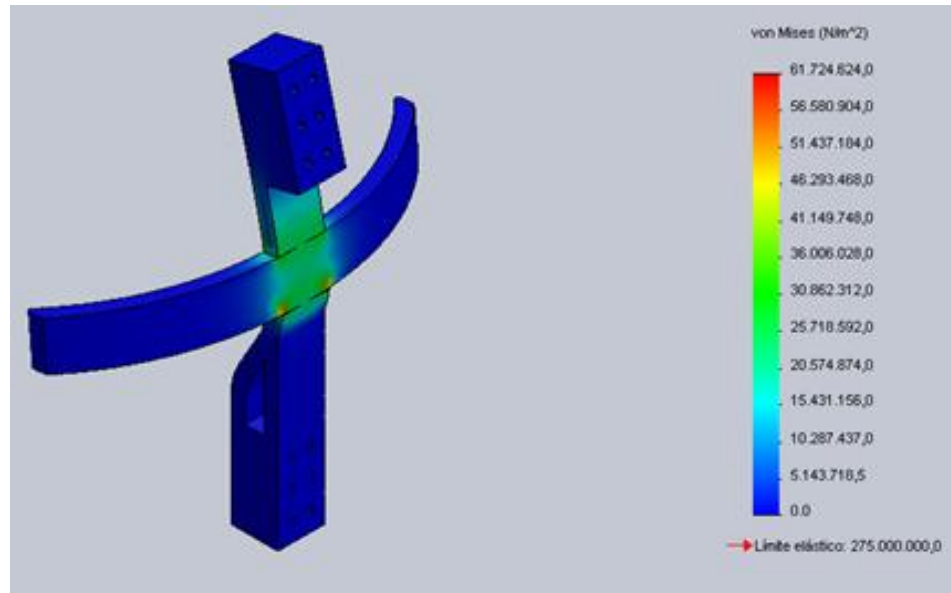


Figura 98. Esfuerzos de Von Mises en sección B de espalda

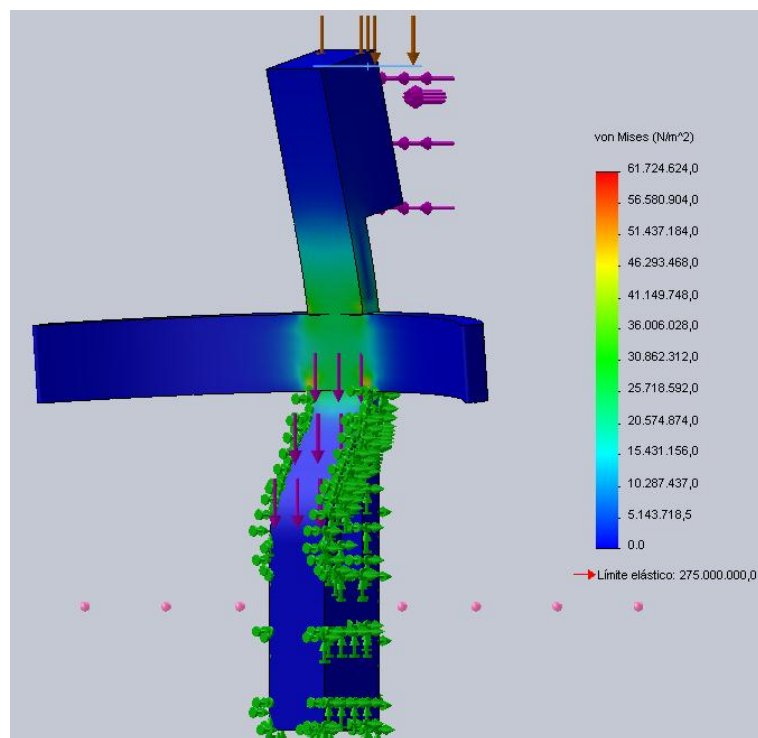


Figura 99. Esfuerzos y fuerzas aplicadas en sección B de espalda

Resultados de desplazamientos (Figura 100 y Figura 101):

Desplazamiento mínimo: 0 mm en nodo 8

Desplazamiento máximo: 0.899231 mm en nodo 1569

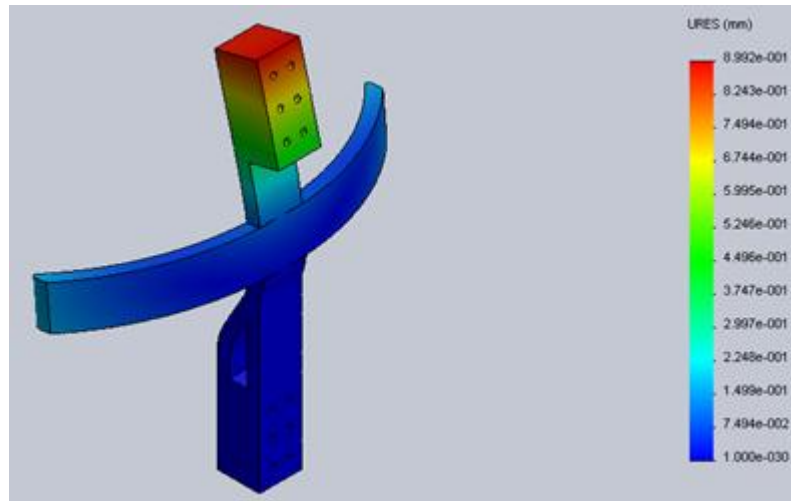


Figura 100. Desplazamientos de la sección B de espalda - Vista posterior

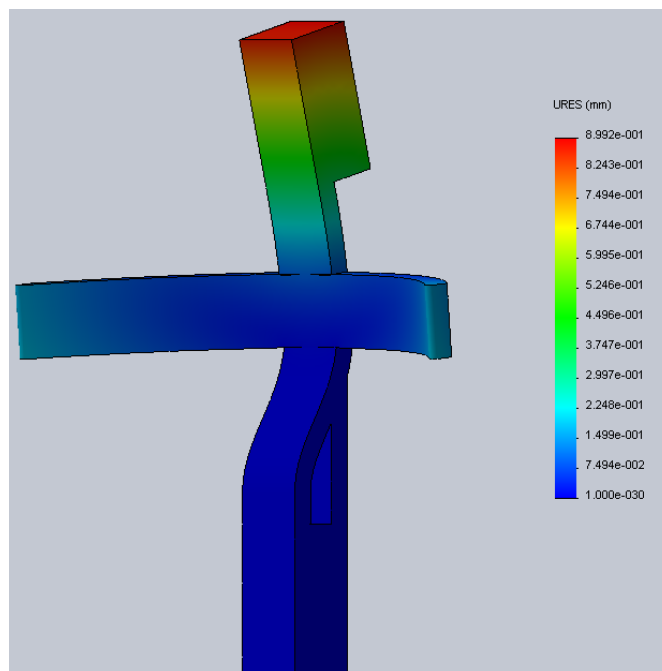


Figura 101. Desplazamientos de la sección B de espalda - Vista anterior

Deformaciones (Figura 102):

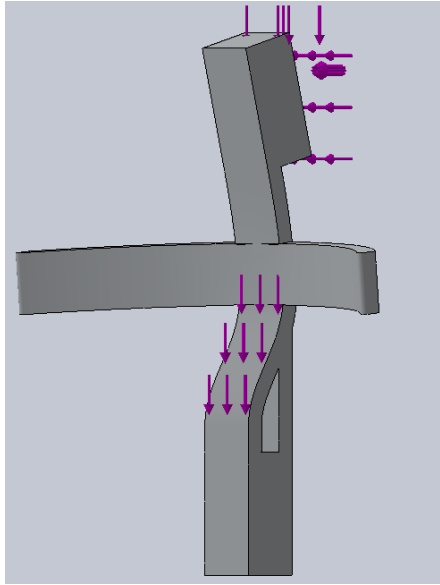


Figura 102. Deformaciones de la sección B de espalda

Factor de seguridad (Figura 103):

Mínimo factor: 4.45527 en nodo 19054

Máximo factor: $1.51034e^{14}$ en nodo 799

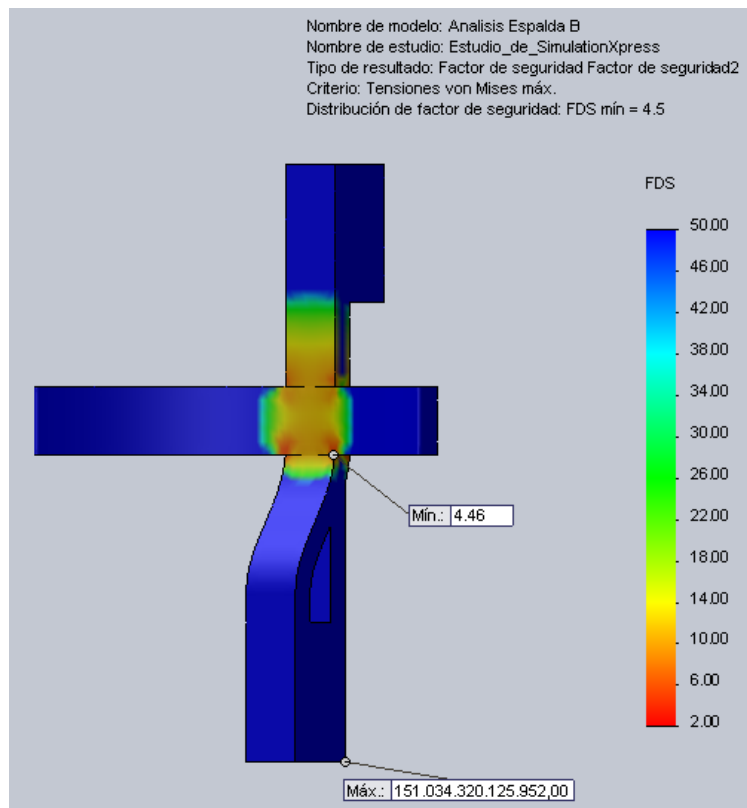


Figura 103. Factor de seguridad en sección B de espalda

4.7 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN SECCIÓN “C” – ESPALDA

Las fuerzas actuantes debido a los servo motores lineales de los brazos y canillas, y los servo motores rotacionales aplicados en los muslos, se presenta en igual magnitud en ambos lados de la estructura; debido a esto, se hace el análisis con las fuerzas actuantes sobre uno de los lados, ya que los resultados serán los mismos tanto a la izquierda como a la derecha del Hexo.

Se aplican también las fuerzas ejercidas por el peso de todo el sistema electrónico de control, el cual se aplica en el centro de masa de la bandeja diseñada, y por el peso de la misma estructura, la cual será aplicada en la parte superior de este elemento para el análisis en software.

En la parte del elemento donde se ensambla el servo motor rotacional se realiza el cálculo del momento que se debe realizar para que permita la rotación del elemento del muslo, de tal manera que complemente a la aplicación de la fuerza del servo motor lineal sobre la canilla para el levantamiento del Hexo. Este cálculo del momento resultante se presenta en los ejes x y y , en el eje z no se necesitará un momento adicional debido a que entre ambos lados se contrarrestan por simetría, permitiendo que la estabilidad del Hexo se presente solo en los 2 planos principales.

Los pesos que actúan sobre este elemento generan un momento que también afecta al momento resultante, el cual será el mismo para ambos lados de este elemento, por lo que en los cálculos se toma un valor equivalente a la mitad de su magnitud debido a que, por sus características simétricas del diseño, serán fuerzas únicas que actúan en ambos lados del elemento.

Los pesos actuantes sobre esta estructura son los siguientes:

W_{cn} = Peso del sistema de control electrónico = 7.1 Kg
 W_{ec} = Peso de la estructura de la sección C de la espalda = 8.0 Kg

4.7.1 CENTRO DE MASA DE LA SECCIÓN “C” - ESPALDA

El centro de masa se presenta un poco desplazado hacia el espacio interno que encierra este elemento. El centro de masa se muestra en la Figura 104.

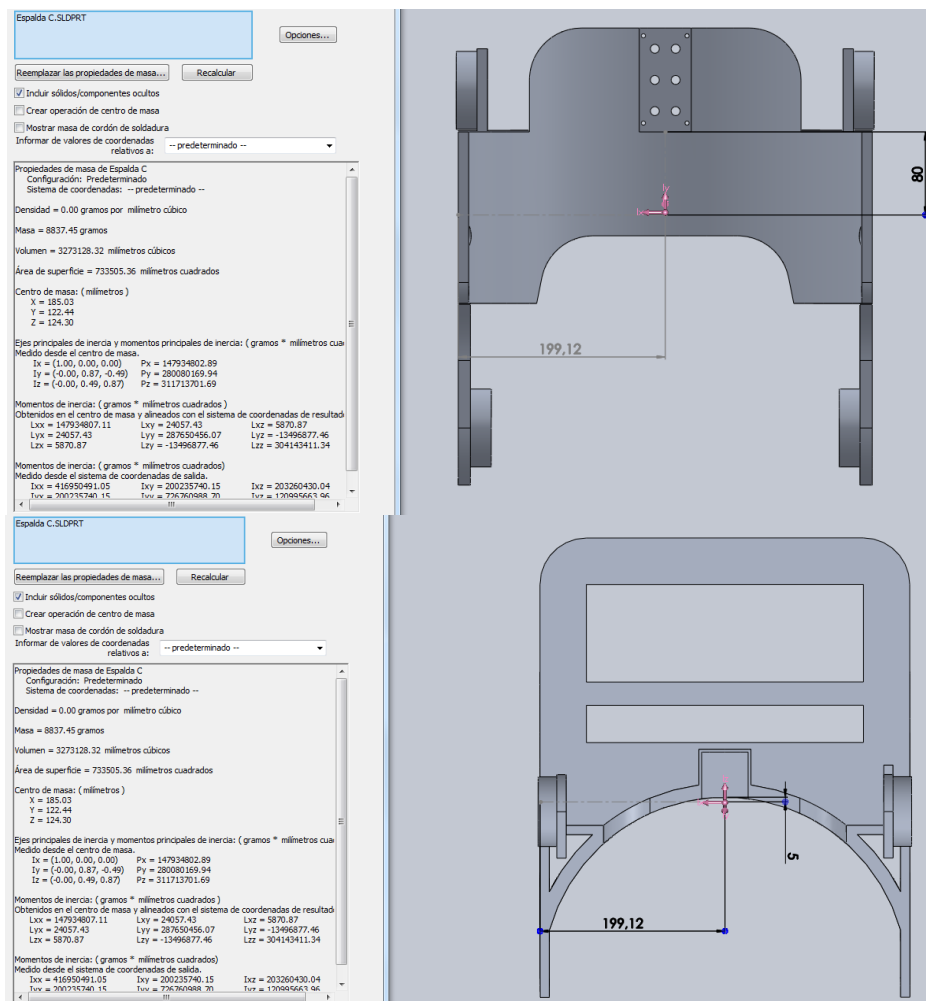


Figura 104. Centro de masa del ensamblaje de sección C - espalda

4.7.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE SECCIÓN "C" - ESPALDA

En la Figura 105, se muestra el DCL de las fuerzas actuantes solamente de un lado de la estructura; sin embargo, los valores obtenidos en los cálculos serán los mismos en ambos lados. Los valores de las fuerzas actuantes F_x y F_y son las ejercidas por la sección B de la espalda, determinadas en cálculos anteriores. Las fuerzas A_1 y A_2 son las resultantes de la acción de los servo motores sobre el elemento, que para el caso del servo motor rotacional se lo considera en el centro de acción del motor; sin embargo, para el análisis de fuerzas se aplicara estas en los espacios de los pernos donde se sujeta este servo motor.

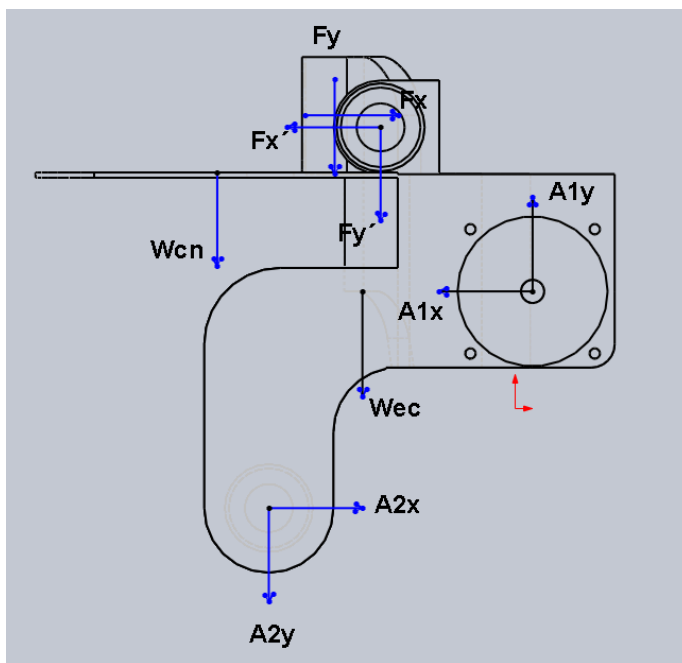


Figura 105. Diagrama del cuerpo libre de sección "C" - espalda

$$\sum F_x = 0 \quad [4.15]$$

$$F_x - A_{1x} + A_{2x} - F_{x'} = 0$$

$$F_x - A_1 \times \cos(30) + A_2 \times \cos(5) - F_{x'} = 0$$

$$460.72 - A_1 \times \cos(30) + A_2 \times \cos(5) - 60.69 = 0$$

$$A_1 \times \cos(30) = 400.03 + A_2 \times \cos(5)$$

$$A_1 = 461.91 + A_2 \times (1.15)$$

$$\sum Fy = 0 \quad [4.16]$$

$$-Wec - Wcn - Fy + A1 \times \text{Sen} (30) + A2 \times \text{Sen} (5) - Fy' = 0$$

$$-(9.8)(8) - (9.8)(7.1) - 501.52 + A1 \times \text{Sen} (30) + A2 \times \text{Sen} (5) - 731.97 = 0$$

$$A1 \times \text{Sen} (30) + A2 \times \text{Sen} (5) = 781.47$$

$$(461.91 + A2 \times (1.15)) \times \text{Sen} (30) + A2 \times \text{Sen} (5) = 781.47$$

$$230.96 + A2 \times (0.57) + A2 \times \text{Sen} (5) = 781.47$$

$$A2 = 837.92 \quad N$$

$$A1 = 1425.52 \quad N$$

Este elemento se caracteriza porque aquí se ensamblan los elementos de las extremidades inferiores. Para que el Hexo se traslade y logre alcanzar la posición crítica al agacharse se necesita que estos elementos de los muslos generen una rotación hacia delante y hacia atrás; en el caso de la posición crítica, tiene que generar una torsión en la articulación del muslo de magnitud igual o mayor a la generada por las fuerzas que actúan sobre la sección C de la espalda. Por esta razón se incluye un servo motor rotacional que ayude al servo motor lineal a realizar la acción de levantamiento; además, este actuador permite que las piernas roten los grados necesarios para poder caminar.

De acuerdo a esto se determina la magnitud del momento M_o requerida en la articulación del muslo y la sección C de la espalda. En la Figura 106, se presenta un diagrama con las distancias perpendiculares entre el punto central de la sección donde estará posicionado el servo motor rotacional, y las líneas de acción de cada una de las fuerzas actuantes sobre este elemento.

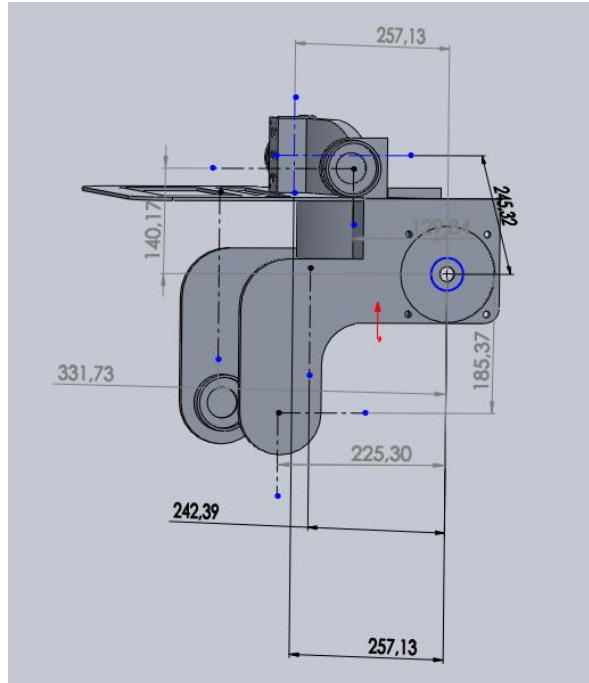


Figura 106. Distancias entre líneas de acción de fuerzas y centro de servo motor rotacional

Para determinar el momento a aplicar en el servo motor rotacional, la dirección de acción de la fuerza A_2 cambia debido a que el servo motor lineal empuja la estructura para realizar el levantamiento. El servo motor rotacional complementa el levantamiento al hacer girar el elemento del muslo en dirección de las manecillas del reloj.

$$\sum M \curvearrowright = 0 \quad [4.17]$$

$$F_y \times (0.257) - F_x \times (0.245) + \frac{W_{cn}}{2} \times (0.331) + F_{y'} \times (0.129) - A_2x \times (0.185) - A_2y \times (0.225) + \frac{W_{ec}}{2} \times (0.242) - M_o = 0$$

$$(501.52)(0.257) - (460.72)(0.245) + \left(\frac{69.58}{2}\right)(0.331) + (731.97)(0.129) - (834.73)(0.185) - (73.03)(0.225) + \left(\frac{78.4}{2}\right)(0.242) - M_o = 0$$

$$131.95 - 151.37 - M_o = 0$$

$$M_o = 19.42 \text{ N.m}$$

4.7.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN SECCIÓN “C” – ESPALDA

La sujeción se la establece en el punto donde los servo motores rotacionales se encuentran acoplados. La fuerza $A1$ se la utiliza para calcular los esfuerzos en el elemento del muslo y su punto de aplicación será el soporte en este análisis.

4.7.3.1 Análisis de esfuerzos

Propiedades del Aluminio 6061-T6:

Volumen:	0.00327313 m^3
Densidad:	2700 kg/m^3
Peso:	78.4 N
Límite elástico:	$2.75e^8 N/m^2$
Límite de tracción:	$3.1e^8 N/m^2$

Fuerzas aplicadas (Figura 107):

W_{ec}	=	78.40	N
W_{cn}	=	69.58	N
F_x	=	460.72	N
F_y	=	501.52	N
F_x'	=	60.69	N
F_y'	=	731.97	N
A_{2x}	=	834.73	N
A_{2y}	=	73.03	N

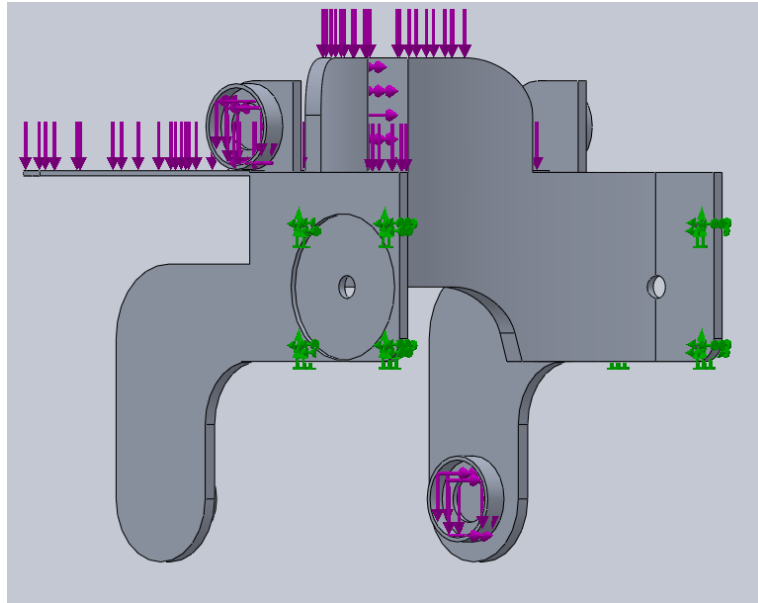


Figura 107. Fuerzas aplicadas en sección C de espalda

Información de malla (Figura 108):

Número total de nodos: 23158

Número total de elementos: 11176

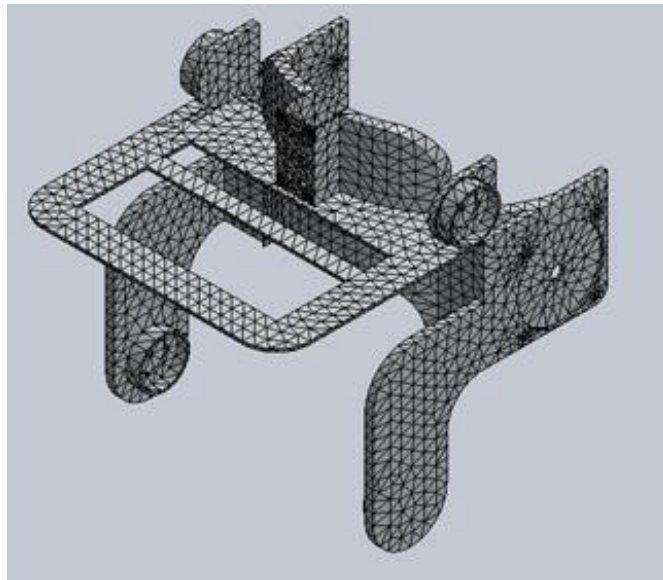


Figura 108. Mallado de sección C de la espalda para análisis

Resultados de esfuerzos de Von Mises (Figura 109):

Esfuerzo Mínimo: 9400.85 N/m² en nodo 6622

Esfuerzo Máximo: 2.997e⁷ N/m² en nodo 14101

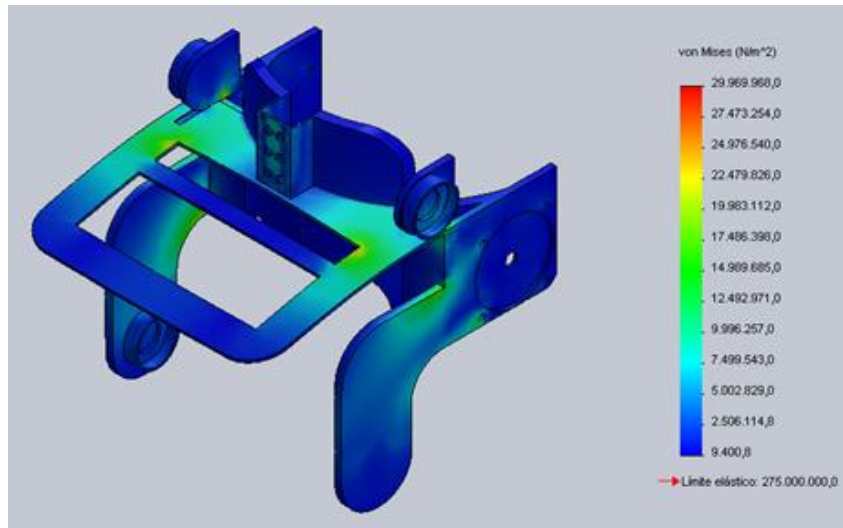


Figura 109. Esfuerzos de Von Mises en sección C de espalda

Resultados de desplazamientos (Figura 110):

Desplazamiento mínimo: 0 mm en nodo 159

Desplazamiento máximo: 2.923 mm en nodo 5161

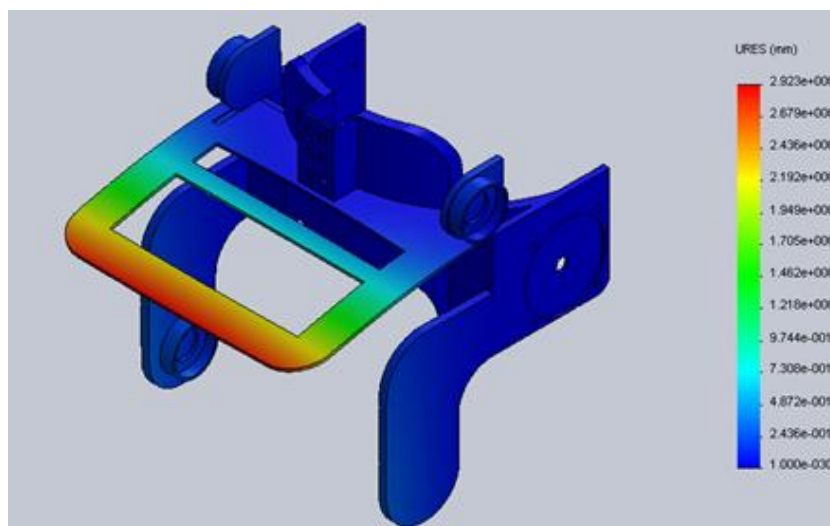


Figura 110. Desplazamientos de la sección C de espalda - Vista posterior

Deformaciones (Figura 111):

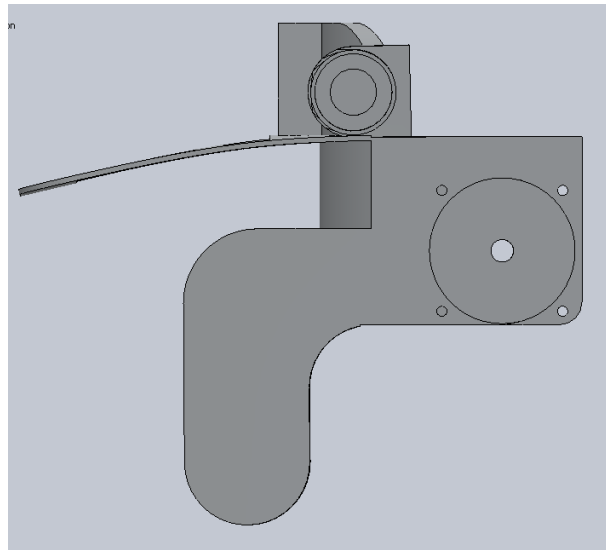


Figura 111. Deformaciones de la sección C de espalda

Factor de seguridad (Figura 112):

Mínimo factor: 9.17585 en nodo 14101

Máximo factor: 29252.7 en nodo 6622

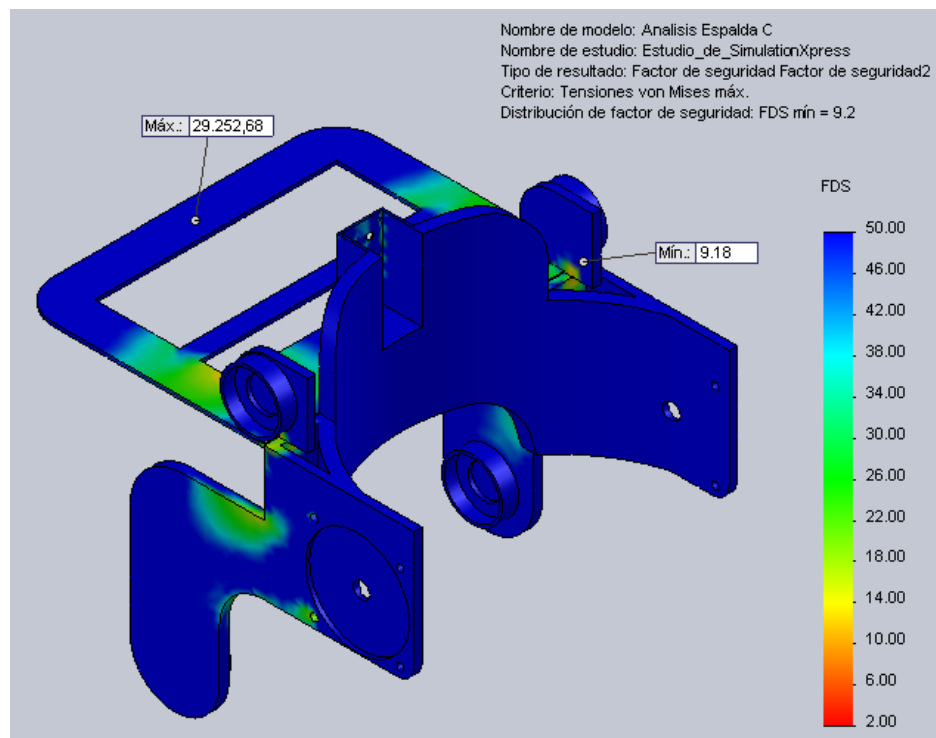


Figura 112. Factor de seguridad en sección C de espalda

4.8 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN MUSLO

En la parte superior de este elemento actúan las fuerzas obtenidas del análisis previo en la sección C de la espalda. El análisis se lo realiza sobre cada una de las perforaciones para los pernos de sujeción entre este elemento y el servo motor rotacional; esas fuerzas se aplican de forma distribuida y en igual valor en la parte interna de cada perforación.

En el análisis se considera el peso del elemento del muslo, aplicado en el centro de masa determinado por el software. Este elemento está diseñado en Aluminio 6061 T6.

Los pesos actuantes sobre esta estructura son los siguientes:

$$W_m = \text{Peso de la estructura del muslo} = 1.5 \text{ Kg}$$

4.8.1 CENTRO DE MASA DEL MUSLO

Se ubica desplazado del centro de la estructura. En este punto se aplica la fuerza del peso propio del elemento. La geometría de esta pieza es la principal razón por la que el centro de masa se ubica fuera de la estructura, aunque la protección de Nylon tiene un volumen considerable, su peso no tiene mayor incidencia en la ubicación del centro de masa. El centro de masa de este elemento se muestra en la Figura 113.

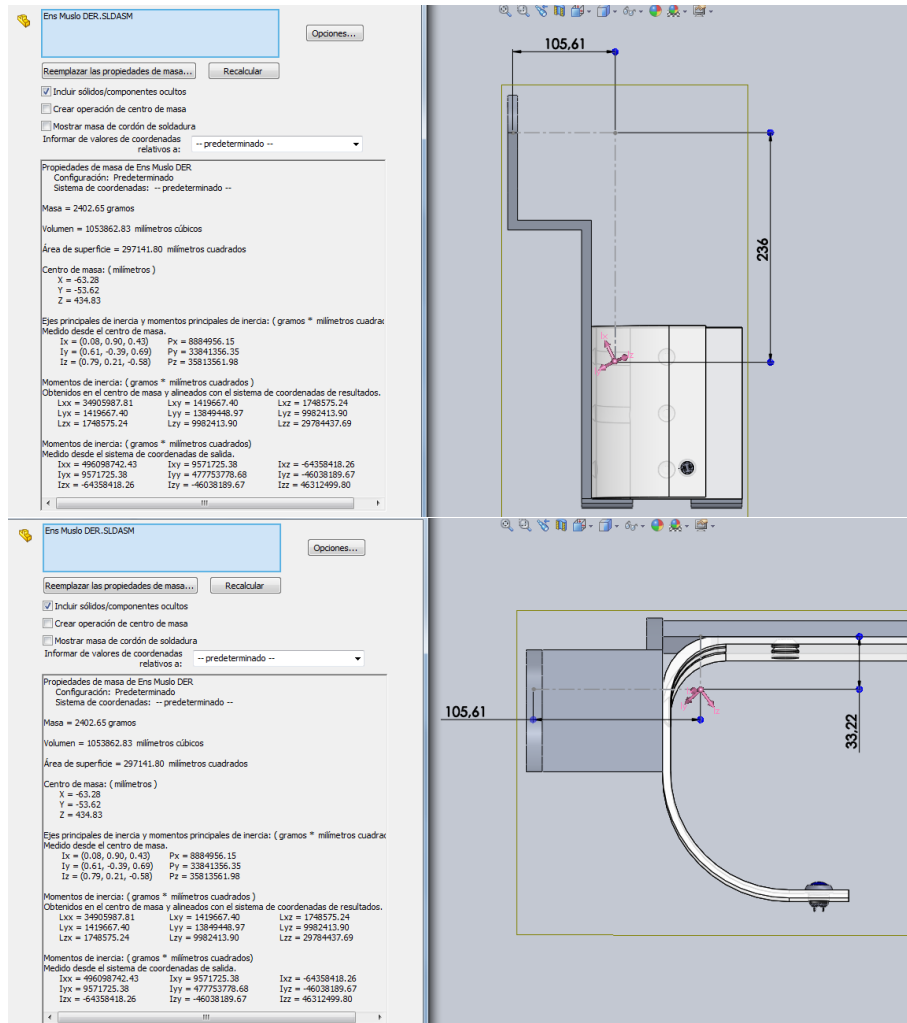


Figura 113. Centro de masa del muslo

4.8.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL MUSLO

Los cálculos realizados para este elemento, que corresponde a la extremidad inferior derecha, son los mismos para el lado izquierdo, sustentado en la simetría de la estructura del Hexo. Las fuerzas A_x y A_y son las reacciones a las fuerzas $A1_x$ y $A1_y$ aplicadas en la sección C de la espalda en el otro lado de sujeción del elemento del muslo. La fuerza del peso de la pieza también es influyente en los resultados obtenidos. El DCL se muestra en la Figura 114.

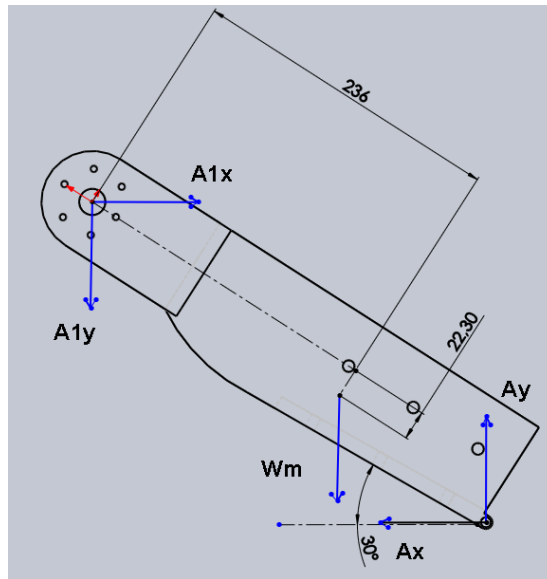


Figura 114. Diagrama del cuerpo libre del muslo

$$\sum F_x = 0 \quad [4.18]$$

$$A1x - Ax = 0$$

$$Ax = A1x$$

$$Ax = 1234.53 \text{ N } \leftarrow$$

$$\sum F_y = 0 \quad [4.19]$$

$$-Wm - A1y + Ay = 0$$

$$Ay = Wm + A1y$$

$$Ay = (9.8)(1.5) + 712.76$$

$$Ay = 727.46 \text{ N } \uparrow$$

Tanto la fuerza Ax como Ay se aplican en toda la parte interna de la bisagra que articula a este elemento con la canilla. Estas fuerzas serán las mismas que actúan en la parte superior del siguiente elemento.

4.8.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN EL MUSLO

Para este análisis se establece el punto de sujeción en donde se aplican las fuerzas de sujeción con la sección C de la espalda.

4.8.3.1 Análisis de esfuerzos

Propiedades del Aluminio 6061-T6:

Volumen:	0.000713912 m^3
Densidad:	2700 kg/m^3
Peso:	14.7 N
Límite elástico:	$2.75e^8 \text{ N/m}^2$
Límite de tracción:	$3.1e^8 \text{ N/m}^2$

Fuerzas aplicadas (Figura 115):

Wm	=	14.7	N
Ax	=	1234.53	N
Ay	=	727.46	N

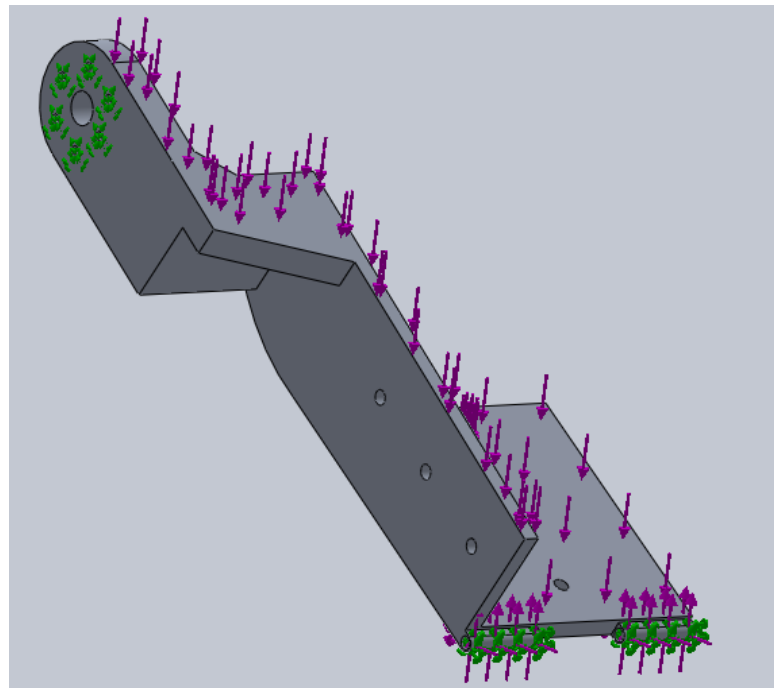


Figura 115. Fuerzas aplicadas en el muslo

Información de malla (Figura 116):

Número total de nodos:	127018
Número total de elementos:	81742



Figura 116. Mallado del muslo para análisis

Resultados de esfuerzos de Von Mises (Figura 117):

Esfuerzo Mínimo: 62.9614 N/m² en nodo 122772

Esfuerzo Máximo: 446671 N/m² en nodo 110932

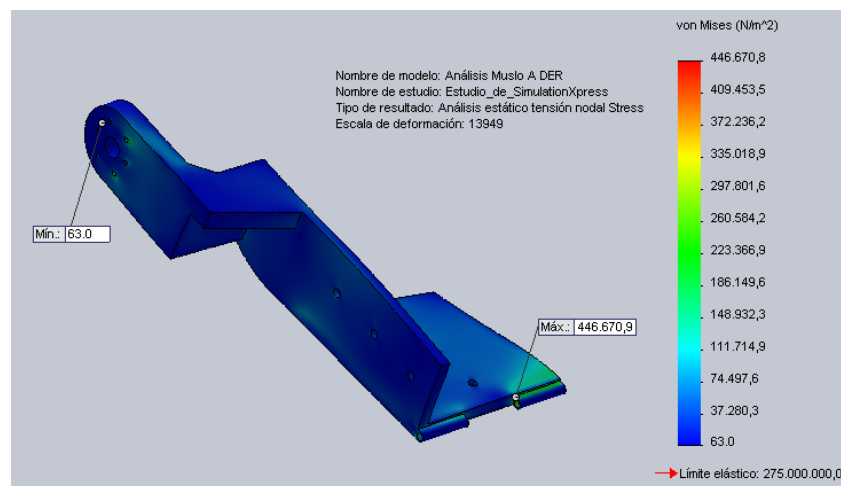


Figura 117. Esfuerzos de Von Mises en el muslo

Resultados de desplazamientos (Figura 118):

Desplazamiento mínimo: 0 mm en nodo 142

Desplazamiento máximo: 0.003054 mm en nodo 5077

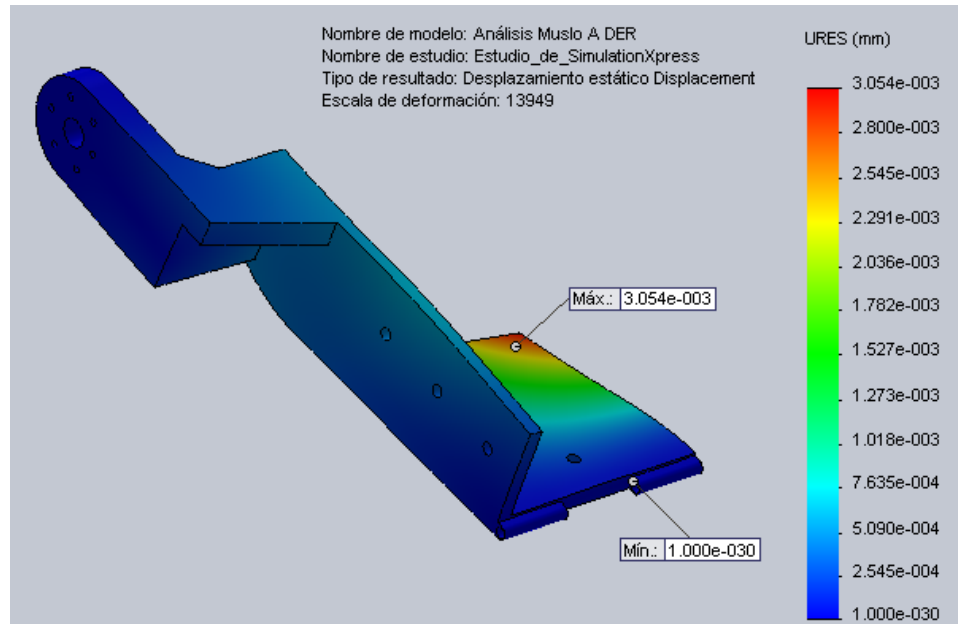


Figura 118. Desplazamientos del muslo

Deformaciones (Figura 119):

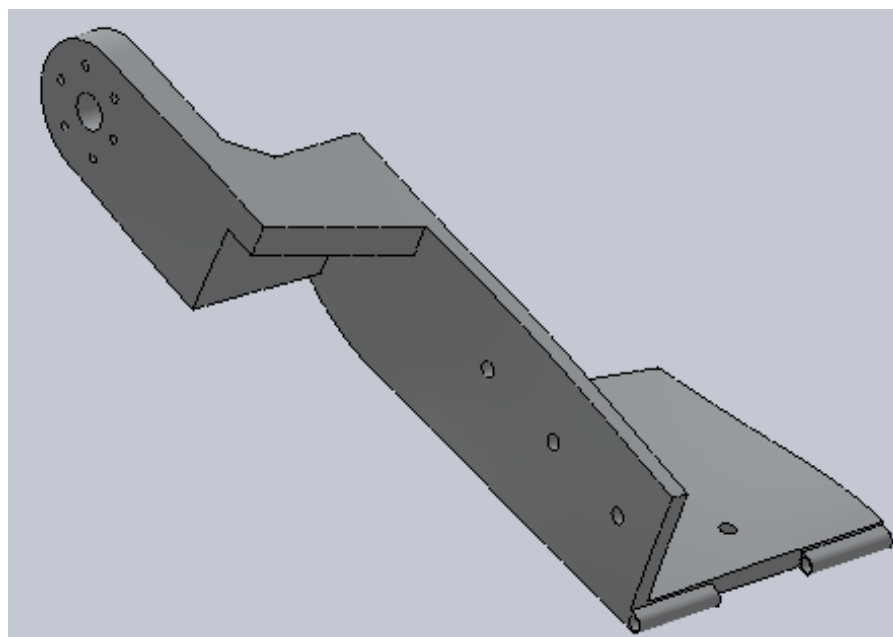


Figura 119. Deformaciones del muslo

Factor de seguridad (Figura 120):

Mínimo factor: 615.66 en nodo 110932

Máximo factor: $4.3677e^6$ en nodo 122772

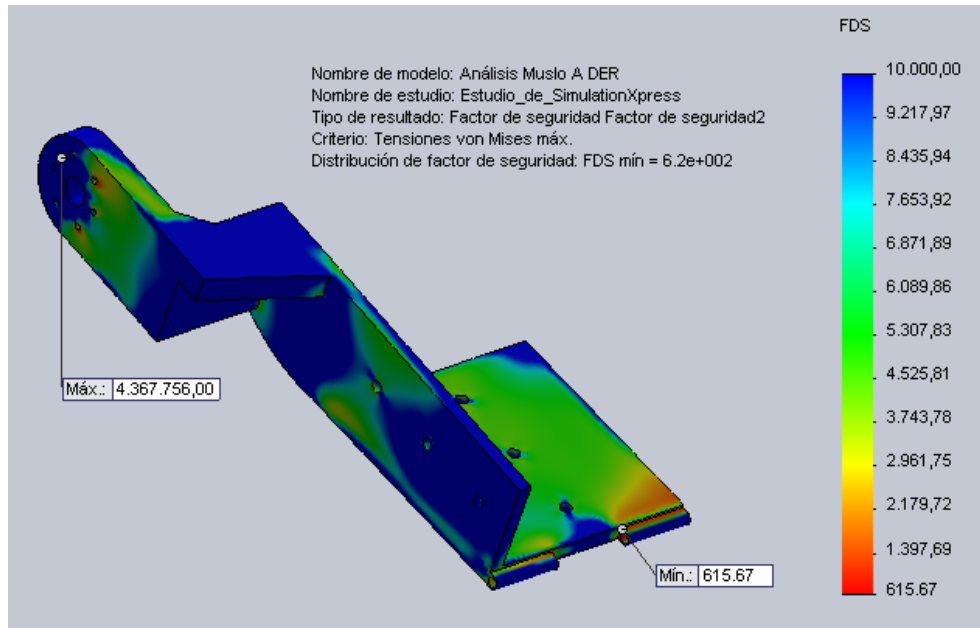


Figura 120. Factor de seguridad en el muslo

4.9 ANÁLISIS FUERZAS DEL SERVO MOTOR LINEAL DE CANILLA

Actúa sobre la parte posterior de la sección C de la espalda y será afectado por las fuerzas componentes A_{2x} y A_{2y} . Este servo motor lineal, articulado en la parte media de la canilla, une estos dos elementos para mantener el Hexo estable sin que su postura crítica ceda hacia delante o hacia atrás.

Aparte de mantener el equilibrio del Hexo, y complementando con un torque en la parte de ensamblaje entre el muslo y la sección C de la espalda, su función es la de aplicar la fuerza necesaria para que la estructura completa, incluida la carga, pueda levantarse.

Al ser mismo servo motor lineal que los utilizados en brazos y antebrazos, su peso es el mismo que se aplica en la determinación de las fuerzas actuantes:

$$W_{sm} = \text{Peso del servo motor de la canilla} = 9.0 \text{ Kg}$$

4.9.1 CENTRO DE MASA DEL SERVO MOTOR LINEAL

Estos servos motores son los que más fuerza deben realizar porque soporta casi todo el peso de la estructura ensamblada. Su posición crítica demanda al servo motor alcanzar un ángulo mínimo de 2° respecto a la horizontal, lo que se traduce en una mayor componente dinámica en el eje x. Al momento de realizar el levantamiento, esta característica provoca un torque que tiende a girar la sección C de la espalda, por lo que se complementa este movimiento con el accionamiento de un servo motor rotacional para contrarrestar dicho efecto. Se muestra el centro de masa en la Figura 121.

Al ser accionado el servo motor lineal en una actividad de levantamiento, el servo coil se desplaza hasta aproximadamente la mitad del servo magnet, por lo que el centro de masa se moverá continuamente. En este análisis se utiliza la posición crítica, cuando se realiza el levantamiento, para calcular las fuerzas actuantes sobre este elemento.

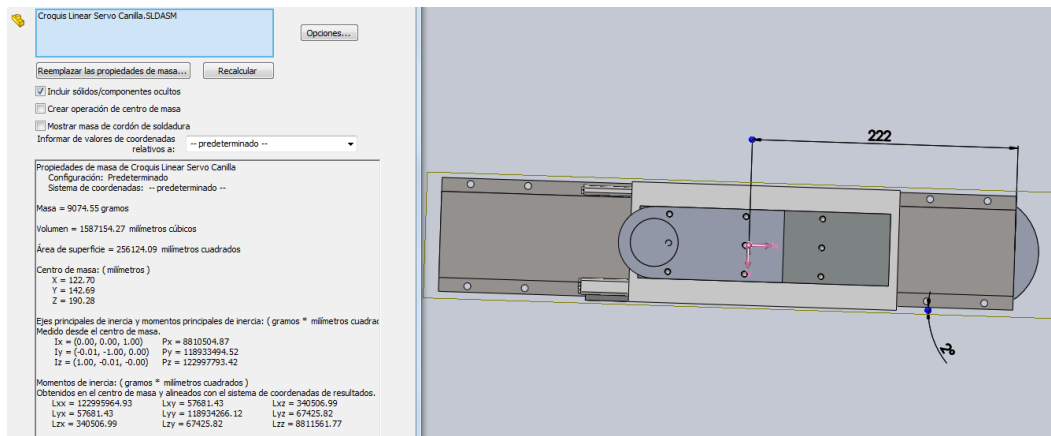


Figura 121. Centro de masa del servo motor lineal de la canilla

4.9.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL SERVO MOTOR DE CANILLA

La posición del servo magnet respecto a la horizontales de 2° . Se muestra un DCL con todas las fuerzas componentes participantes. La fuerza ejercida

por el peso del servo motor lineal, W_{sm} , es aplicada a 222 mm de distancia desde el borde del servo magnet. En el extremo en donde se articula el servo motor lineal con la sección C de la espalda actúan las fuerzas A_{2x} y A_{2y} , y en el otro extremo de sujeción actúan las fuerzas A_x y A_y , estas últimas son las que actúan sobre el componente de la canilla. Se muestra el DCL del servo motor en la Figura 122.

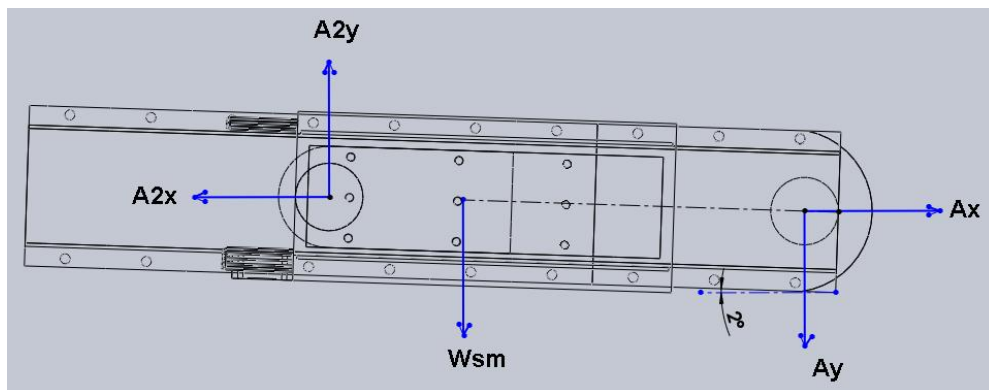


Figura 122. Diagrama del cuerpo libre del servo motor lineal de la canilla

$$\sum F_x = 0 \quad [4.20]$$

$$-A_{2x} + A_x = 0$$

$$A_x = A_{2x}$$

$$A_x = 834.73 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0 \quad [4.21]$$

$$A_{2y} - A_y - W_{sm} = 0$$

$$73.03 - A_y - 88.2 = 0$$

$$A_y = 15.17 \text{ N}$$

$$A_x = 834.73 \text{ N} \rightarrow$$

$$A_y = 15.17 \text{ N} \downarrow$$

En ambos lados de la estructura del Hexo está ubicado el mismo servo motor lineal, por lo que las fuerzas calculadas tienen el mismo valor tanto para la derecha como para la izquierda.

4.10 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN CANILLA

En este elemento actúan las fuerzas generadas por el servo motor lineal y por la estructura superior del Hexo. Es en este elemento en donde se tiene que diseñar un soporte para mantener el peso y la posición de todo el Hexo, ya que es este elemento el que se encuentra más cercano al piso y que permite agacharse al usuario con toda la estructura. Además, al ser un elemento de longitud considerable, permite adicionar a su diseño soportes y cavidades por el espacio que en este se puede manipular. Por esta razón, aquí convergen articuladamente los elementos de los muslos y pies, los actuadores lineales y un soporte diseñado para permitir la flexión y soportar la extensión. La parte inferior de este elemento está en contacto con el elemento del pie de dos formas. La primera forma cuando el Hexo se encuentre recto en cuyo caso el diseño permite que la base de la canilla se apoye en la parte superior del pie. La segunda forma de apoyo se presenta cuando el Hexo se flexiona para agacharse en las acciones de levantamiento, en cuyo caso se soporta mediante dos articulaciones que encajan en dos cavidades diseñadas en el pie; además, se soporta con el dispositivo adicional de resistencia mecánica cuando se realizan las acciones de levantamiento.

En la parte posterior, están diseñada la cavidad para rodamiento FAG 6008, el cual permite la libre rotación del extremo del servo motor lineal que genera el movimiento de la parte inferior de la pierna. En esta parte actúan las fuerzas previamente determinadas en la sección de cálculo del servo motor lineal de la canilla.

Se diseña un pin pasador como parte de la pieza de la canilla, en el cual encaja el elemento de soporte. En este elemento actúa la fuerza normal por el apoyo generado contra el piso.

El elemento se diseña en Aluminio 6061 T6. Se considera el peso para el análisis de fuerzas en su centro de masa determinado por el software.

Los pesos actuantes sobre esta estructura son los siguientes:

$$W_c = \text{Peso de la estructura del muslo} = 2.5 \text{ Kg}$$

4.10.1 CENTRO DE MASA DE LA CANILLA

Junto a la protección de Nylon, y de acuerdo al análisis arrojado por el software, el centro de masa se encuentra ubicado dentro de la estructura de aluminio, ligeramente desplazado hacia la izquierda (Figura 123).

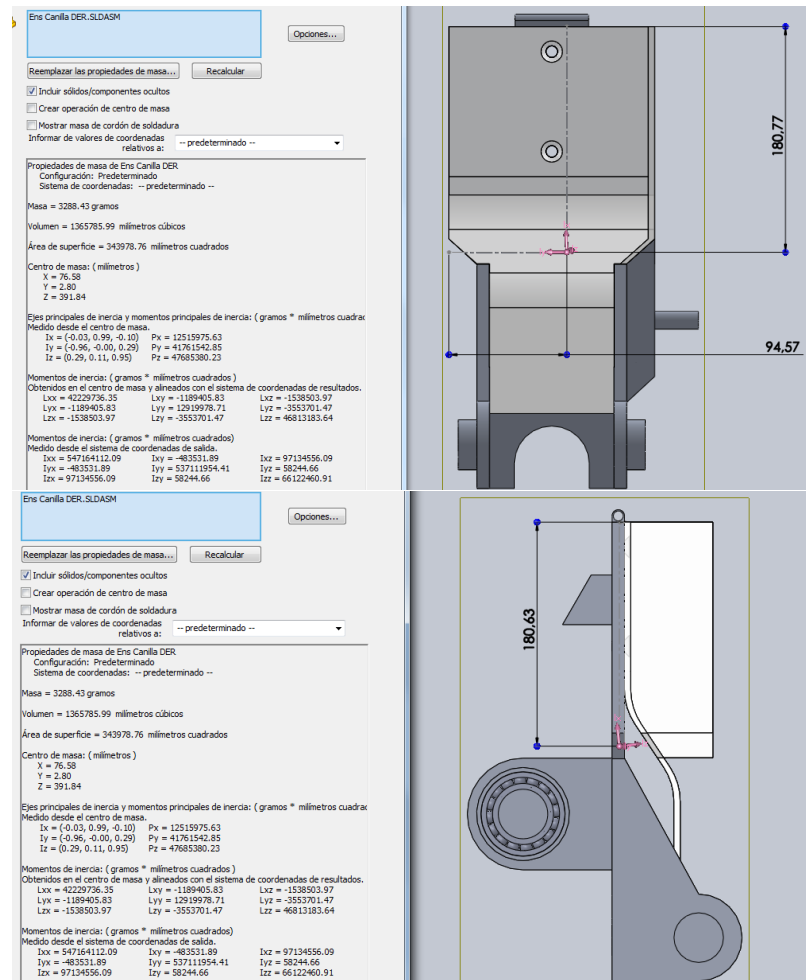


Figura 123. Centro de masa de la canilla

4.10.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE LA CANILLA

Las fuerzas que actúan sobre este elemento son las correspondientes reacciones calculadas anteriormente tanto en el servo motor lineal como en el elemento del muslo. Las fuerzas Ax' y Ay' , que actúan sobre la cavidad del rodamiento FAG 6008, son las generadas por el servo motor lineal; y las fuerzas Ax y Ay son las actuantes sobre la articulación entre el elemento del muslo y la canilla. También se identifican las fuerzas F que actúan entre la canilla y el elemento del pie, estas son consideradas como dos fuerzas debido al diseño de acople en dos puntos geoméricamente simétricos. En los cálculos se utilizan ambas fuerzas F y se presentan con un factor de 2.

Por el efecto del elemento de soporte y apoyo, se determina la acción de la fuerza Fa . En la posición crítica, este elemento actúa con un ángulo de incidencia de 16.02° , e incide sobre el pin de soporte de este elemento.

La fuerza del propio peso de este elemento actúa sobre el centro de masa determinado en la sección anterior y se lo representa como Wc . El valor de este peso es de 24.5 N. El DCL de este elemento se muestra en la Figura 124.

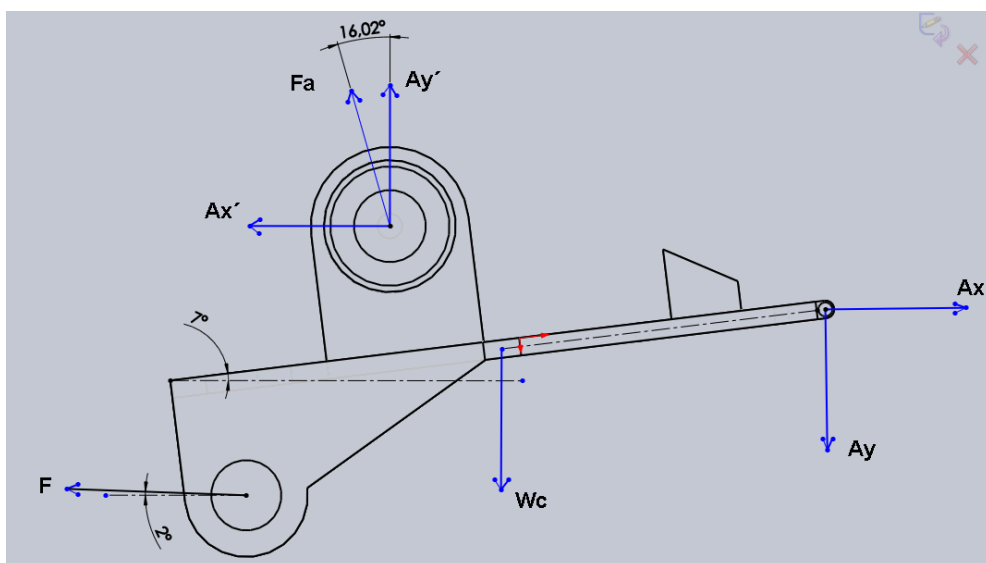


Figura 124. Diagrama del cuerpo libre de la canilla

$$\sum F_x = 0 \quad [4.22]$$

$$-2 \times F \times \cos(2) - Ax' + Ax - Fa \times \sin(16.02) = 0$$

$$-2 \times F \times \cos(2) - 834.73 + 1234.53 - Fa \times \sin(16.02) = 0$$

$$2 \times F \times \cos(2) + Fa \times \sin(16.02) = 399.80$$

$$Fa = \frac{399.80 - 2 \times F \times \cos(2)}{\sin(16.02)}$$

$$Fa = 1448.69 - 7.24 \times F \times \cos(2)$$

$$\sum F_y = 0 \quad [4.23]$$

$$2 \times F \times \sin(2) + Ay' - Ay + Fa \times \cos(16.02) - Wc = 0$$

$$2 \times F \times \sin(2) + 15.17 - 727.46 + Fa \times \cos(16.02) - 24.5 = 0$$

$$2 \times F \times \sin(2) + Fa \times \cos(16.02) = 736.79$$

$$Fa = \frac{736.79 - 2 \times F \times \sin(2)}{\cos(16.02)}$$

$$Fa = 766.55 - 2.08 \times F \times \sin(2)$$

$$1448.69 - 7.24 \times F \times \cos(2) = 766.55 - 2.08 \times F \times \sin(2)$$

$$682.14 = 7.23 \times F - 0.072 \times F$$

$$682.14 = 7.16 \times F$$

$$F = 95.29 \text{ N}$$

$$Fa = 766.55 - 2.08 \times 95.29 \times \sin(2)$$

$$Fa = 759.63 \text{ N}$$

La fuerza F se aplica en ambos lados de los soportes entre la canilla y el pie. Al igual que las otras extremidades, estos valores son los mismos en el elemento de la canilla del lado izquierdo del Hexo. El valor de la fuerza Fa es el que se aplica en el elemento de apoyo y que actúa sobre la canilla en el pin de soporte.

4.10.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN LA CANILLA

Para el análisis, la sujeción establecida en la canilla se da en el punto de apoyo entre la canilla y el elemento del pie. El punto donde se ensambla el elemento de soporte es afectado por las fuerzas resultantes y se utilizan para el análisis en software.

4.10.3.1 Análisis de esfuerzos

Propiedades del Aluminio 6061-T6:

Volumen:	0.00106673 m^3
Densidad:	2700 kg/m^3
Peso:	24.5 N
Límite elástico:	$2.75e^8 \text{ N/m}^2$
Límite de tracción:	$3.1e^8 \text{ N/m}^2$

Fuerzas aplicadas (Figura 125):

W_c	=	24.5	N
A_x	=	1234.53	N
A_y	=	727.46	N
A_x'	=	834.73	N
A_y'	=	15.17	N
F_{ax}	=	729.73	N
F_{ay}	=	209.52	N

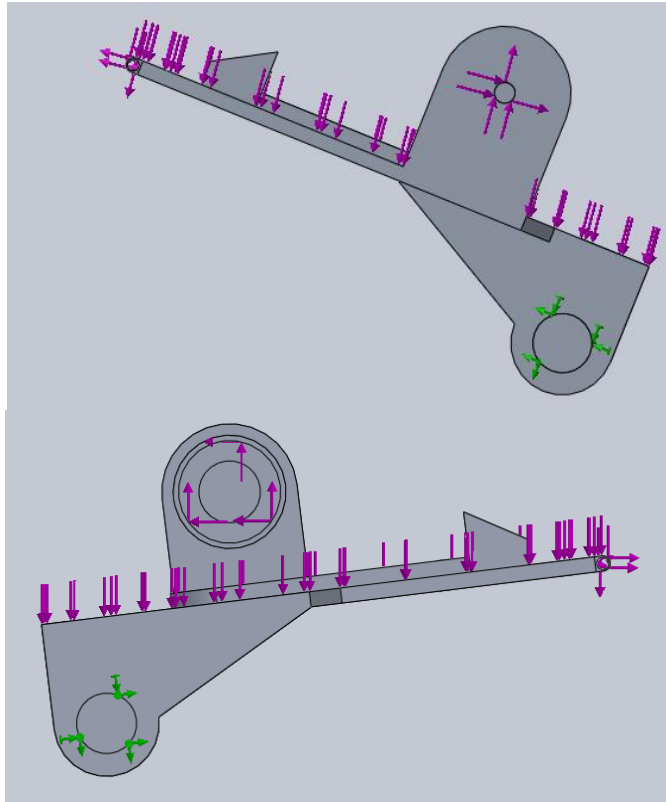


Figura 125. Fuerzas aplicadas en la canilla

Información de malla (Figura 126):

Número total de nodos: 99781

Número total de elementos: 62233

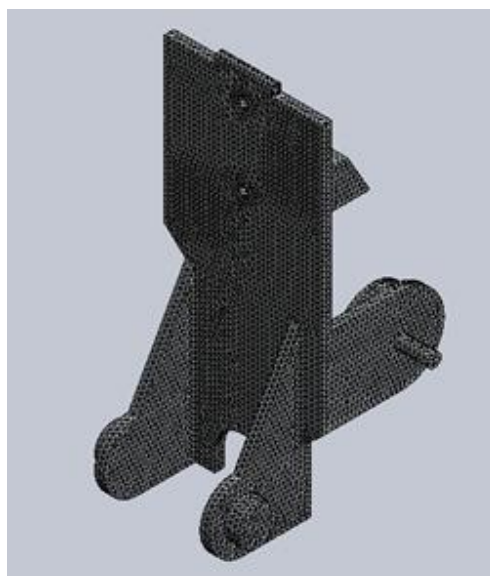


Figura 126. Mallado de la canilla para análisis

Resultados de esfuerzos de Von Mises (Figura 127):

Esfuerzo Mínimo: 6658.75 N/m² en nodo 2331

Esfuerzo Máximo: 9.54e⁷ N/m² en nodo 93961

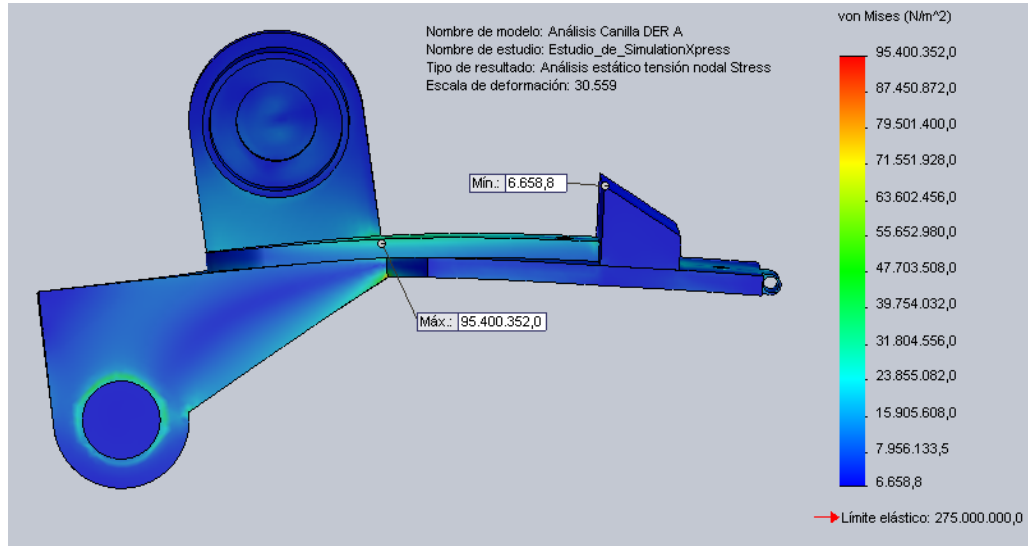


Figura 127. Esfuerzos de Von Mises en la canilla

Resultados de desplazamientos (Figura 128):

Desplazamiento mínimo: 0 mm en nodo 450

Desplazamiento máximo: 1.24836 mm en nodo 676

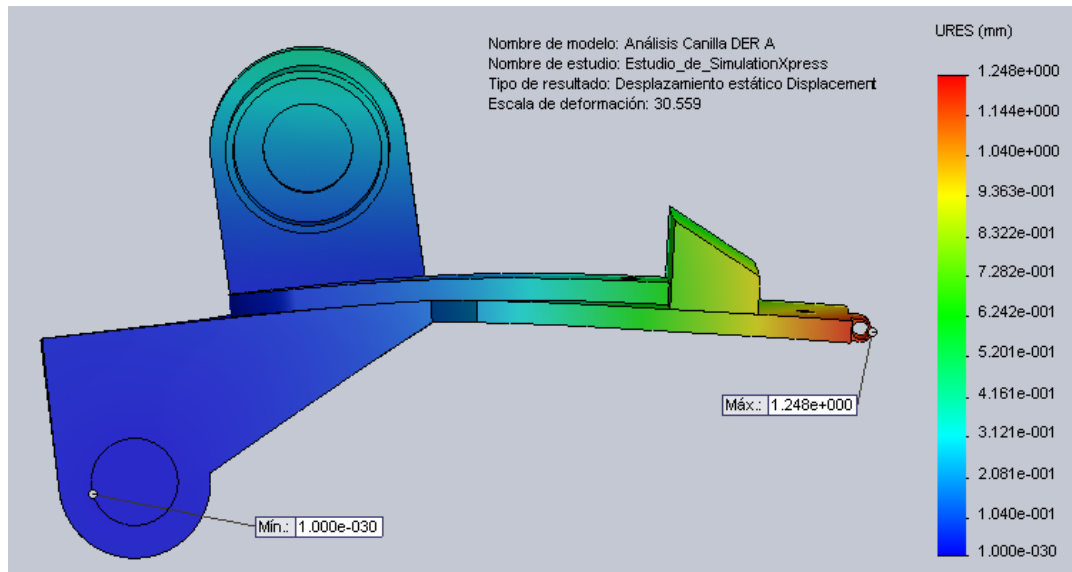


Figura 128. Desplazamientos de la canilla

Deformaciones (Figura 129):

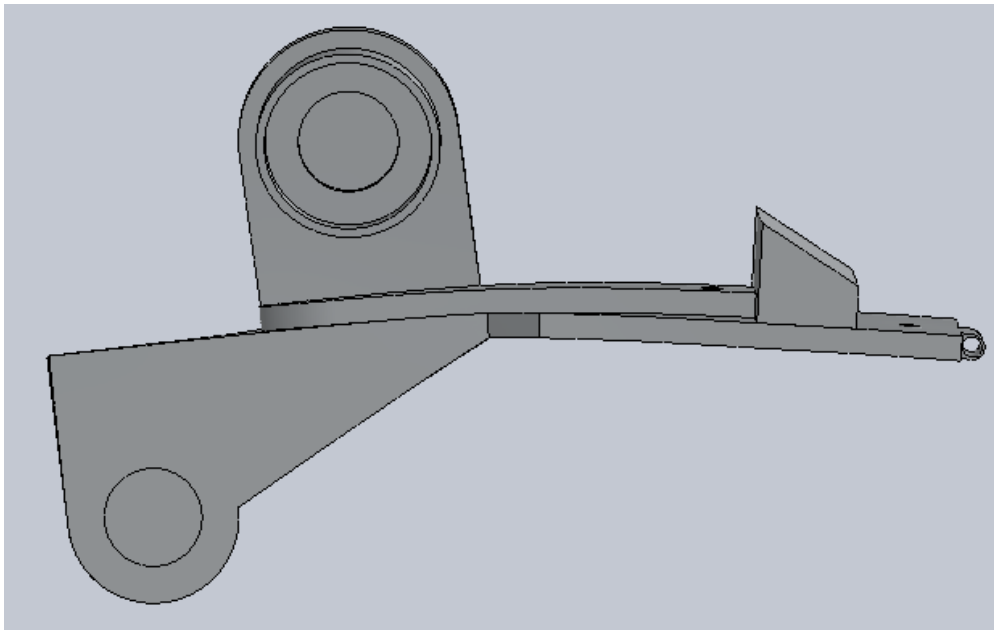


Figura 129. Deformaciones de la canilla

Factor de seguridad (Figura 130):

Mínimo factor: 2.88259 en nodo 93961

Máximo factor: 41299 en nodo 2331

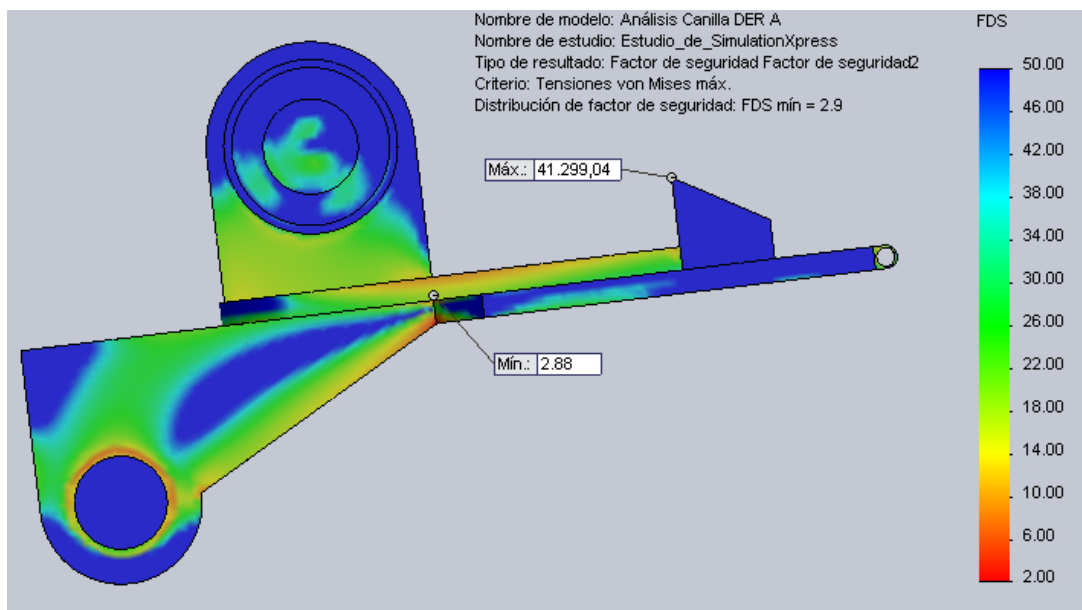


Figura 130. Factor de seguridad en la canilla

4.11 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN PIE

En este elemento convergen las fuerzas generadas por el servo motor lineal y por el elemento de la canilla; además, en este elemento se presenta la reacción normal al peso de todo el Hexo. A diferencia del resto de elementos de las extremidades inferiores, esta se ve afectada por el peso del usuario, magnitud que se aplica en el análisis de esfuerzos.

En la parte de ensamblaje entre el elemento de la canilla y el pie, actúan las fuerzas F_x y F_y , determinadas en la sección anterior. En la parte donde se ensambla el elemento de soporte actúan las fuerzas F_{ax} y F_{ay} .

Las fuerzas a determinar en este análisis son las de reacción del piso sobre la planta del elemento del pie y la de rozamiento. El resto de fuerzas son las transferidas por los elementos anteriores. El peso de este elemento se aplica en el centro de masa.

Se considera el peso del usuario y el peso del elemento del pie. Los valores de estas fuerzas actuantes sobre esta estructura son los siguientes:

$$\begin{aligned} W_p &= \text{Peso de la estructura del pie} &= & 3.0 \text{ Kg} \\ W_h &= \text{Peso del usuario} &= & 80.0 \text{ Kg} \end{aligned}$$

4.11.1 CENTRO DE MASA DEL PIE

La posición del centro de masa se encuentra en el espacio interior del elemento, no se encuentra dentro de la estructura, pero su ubicación está en el centro del plano xy , y en la parte inferior del eje z , lo que favorece para la estabilidad tanto de este elemento como la de todo el Hexo. En este punto es donde se ejerce la acción del peso del elemento y del usuario, en el análisis se lo aplica en toda la superficie de contacto entre la protección y este elemento. La magnitud del peso de la protección de Nylon se considera despreciable. El centro de masa del pie se muestra en la Figura 131.

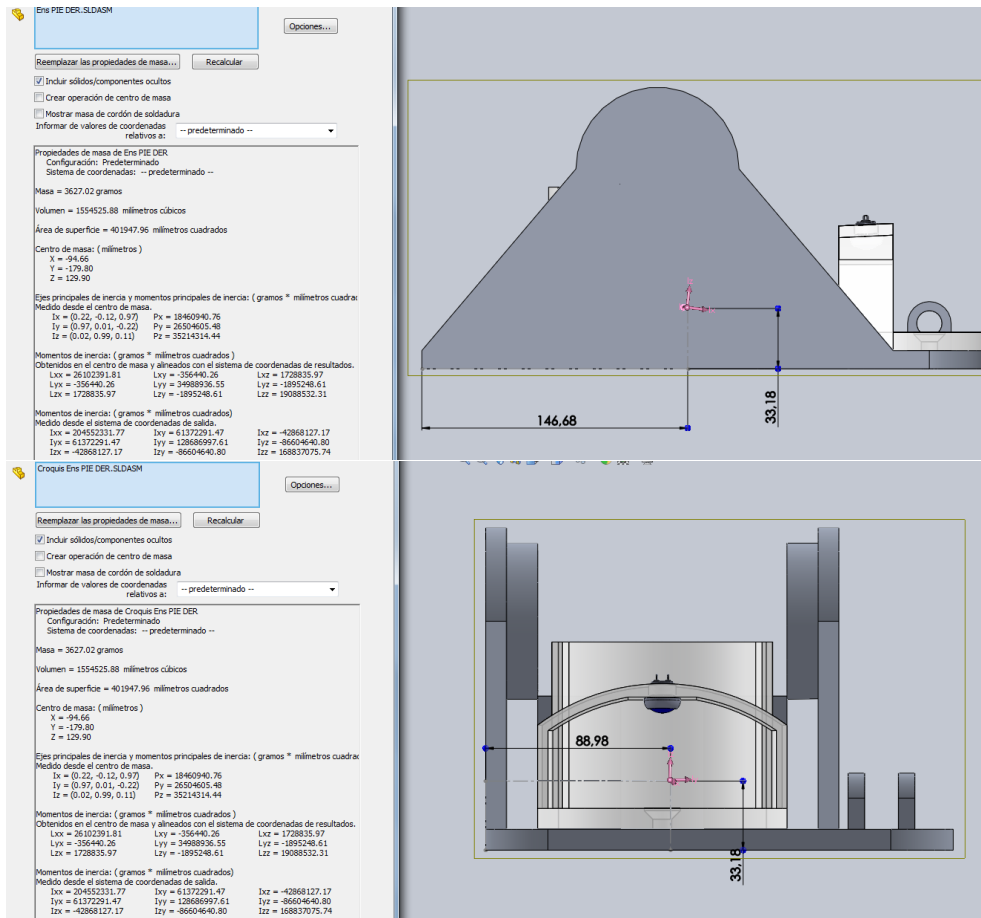


Figura 131. Centro de masa del pie

4.11.2 FUERZAS ACTUANTES SOBRE EL PIE

El análisis realizado en el elemento del pie derecho se aplica también en el pie izquierdo. Las fuerzas actuantes sobre este elemento se muestran en el DCL de la Figura 132, y fueron determinadas en los análisis anteriores del elemento de la canilla y del elemento de soporte F_a , el cual funciona como un eslabón que transfiere la fuerza aplicada entre un extremo y otro, y que ejerce una fuerza sobre la base del pie a un ángulo de 16.02° .

Al entrar en contacto con la superficie del piso, se presenta la fuerza de reacción normal N y la fuerza de fricción, la cual se presenta para compensar las fuerzas horizontales que se transfieren desde todo el Hexo

hasta este elemento. En el análisis se calcula el coeficiente de rozamiento estático que se genera debido a la acción de las fuerzas.

En la posición crítica de análisis, el soporte que contacta con la parte inferior del elemento de la canilla no está siendo afectado por ningún tipo de fuerza debido a que, en esta posición, ambos elementos no se topan en esa sección.

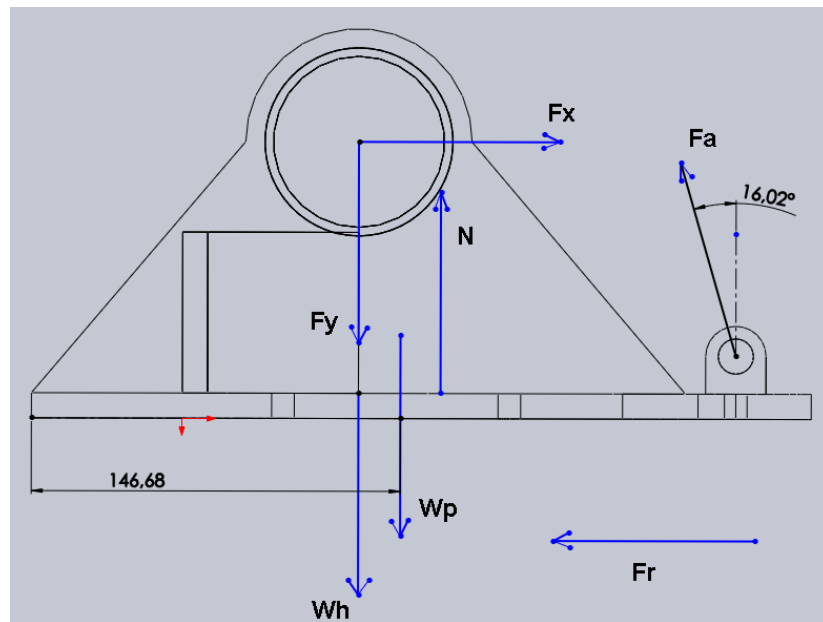


Figura 132. Diagrama del cuerpo libre del pie

$$\sum F_x = 0 \quad [4.24]$$

$$F_x + F_{ax} - F_r = 0$$

$$F_r = 95.29 \times \cos(2) + 759.21 \times \sin(16.02)$$

$$F_r = 304.75 \text{ N} \quad \leftarrow$$

$$\sum F_y = 0 \quad [4.25]$$

$$-W_p - W_h - F_y - F_{ay} + N = 0$$

$$N = 29.4 + 784 + 95.29 \times \sin(2) + 759.21 \times \cos(16.02)$$

$$N = 1546.45 \text{ N} \quad \uparrow$$

$$F_r = \mu \cdot N \quad [4.26]$$

$$\mu = \frac{Fr}{N}$$

$$\mu = \frac{304.75}{1546.45}$$

$$\mu = 0.197$$

Estas fuerzas, determinadas en este cálculo, son las que ejercen directamente el piso sobre el Hexo. El coeficiente de rozamiento estático determinado, es el mínimo requerido para que exista estabilidad en el eje horizontal en el que se posiciona el Hexo. Valores menores al calculado pueden ocasionar que haya un desplazamiento hacia delante de los elementos que conforman los pies, cuando ejecuta acciones de carga, haciendo que toda la estructura se gire hacia atrás, provocando la caída del usuario y el Hexo.

4.11.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN EL PIE

El punto de sujeción de este elemento es en la planta del elemento del pie. Las fuerzas ejercidas sobre este elemento son de compresión, por lo que en el análisis realizado en software, la fuerza normal de reacción N no es considerada como fuerza actuante.

Los resultados del análisis realizado, muestran las áreas donde hay mayor esfuerzo. Se pone especial atención al factor de seguridad mínimo resultante en todo el elemento, ya que este elemento no debe presentar puntos de flexión que provoquen la inestabilidad de toda la estructura del Hexo.

4.11.3.1 Análisis de esfuerzos

Propiedades del Aluminio 6061-T6:

Volumen: 0.00113258 m^3

Densidad:	2700 kg/m^3
Peso:	29.4 N
Límite elástico:	$2.75e^8 \text{ N/m}^2$
Límite de tracción:	$3.1e^8 \text{ N/m}^2$

Fuerzas aplicadas (Figura 133):

W_p	=	29.4	N
W_h	=	784	N
F_{ax}	=	209.52	N
F_{ay}	=	729.73	N
F_x	=	95.23	N
F_y	=	3.32	N
F_r	=	304.75	N

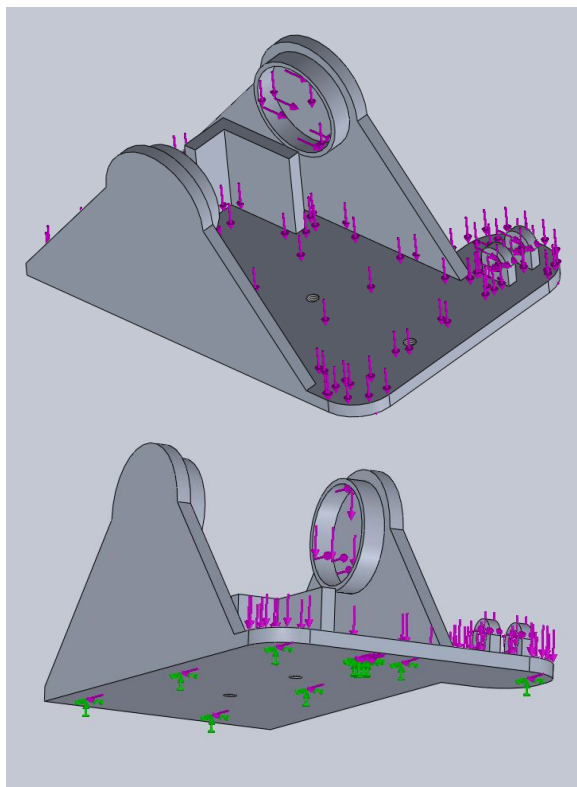


Figura 133. Fuerzas aplicadas en el pie

Información de malla (Figura 134):

Número total de nodos: 17323

Número total de elementos: 9056

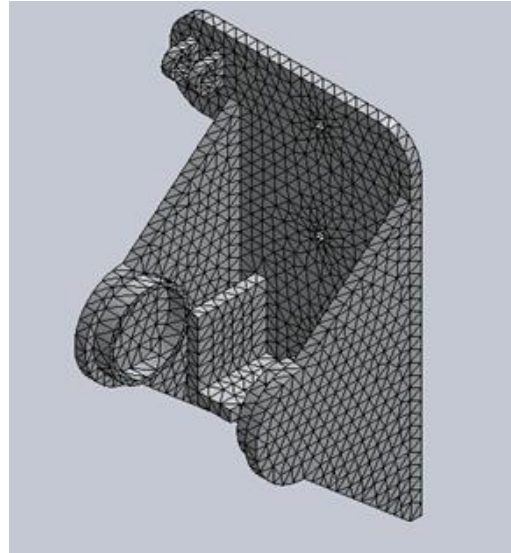


Figura 134. Mallado del pie para análisis

Resultados de esfuerzos de Von Mises (Figura 135):

Esfuerzo Mínimo: 475.35 N/m² en nodo 3413

Esfuerzo Máximo: 1.43635e⁷ N/m² en nodo 17251

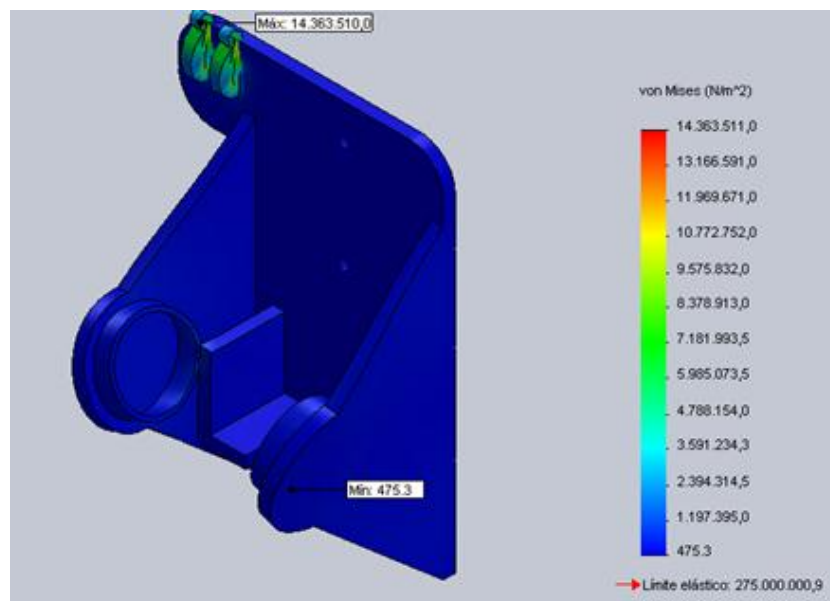


Figura 135. Esfuerzos de Von Mises en el pie

Resultados de desplazamientos (Figura 136):

Desplazamiento mínimo: 0 mm en nodo 21

Desplazamiento máximo: 0.0053 mm en nodo 17227

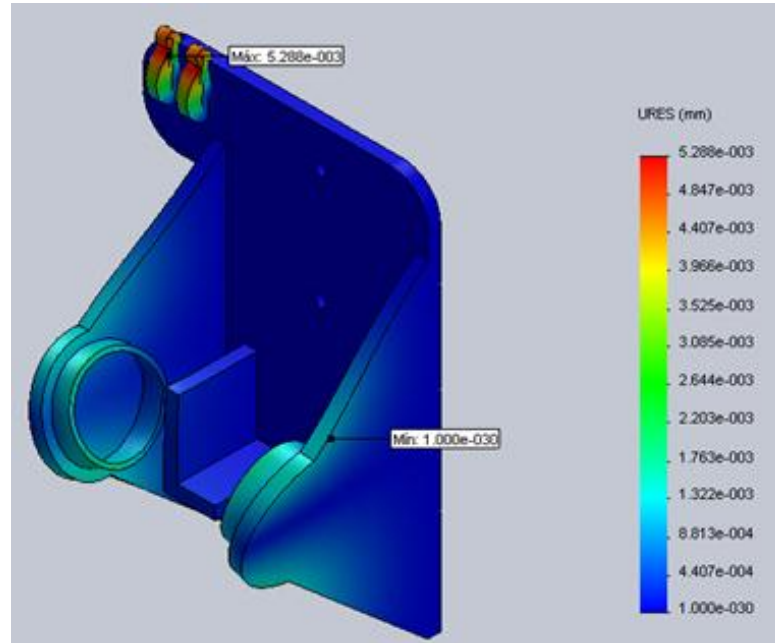


Figura 136. Desplazamientos del pie

Deformaciones (Figura 137):

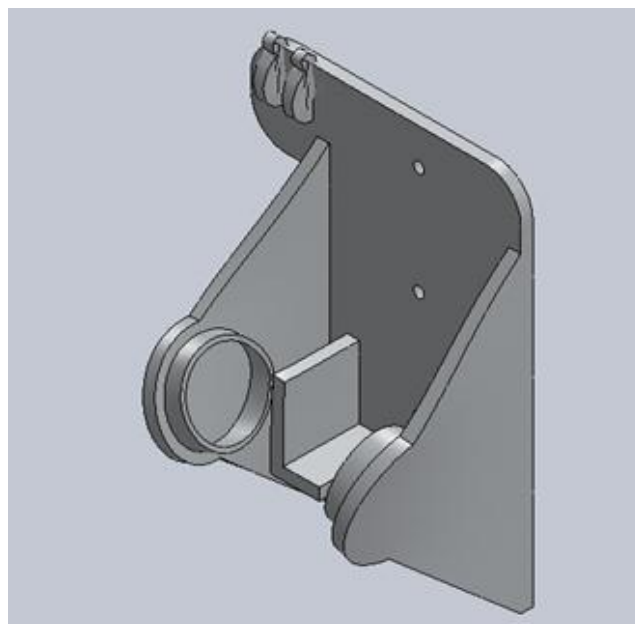


Figura 137. Deformaciones del pie

Factor de seguridad (Figura 138):

Mínimo factor: 19.1457 en nodo 17251

Máximo factor: 578523 en nodo 3413

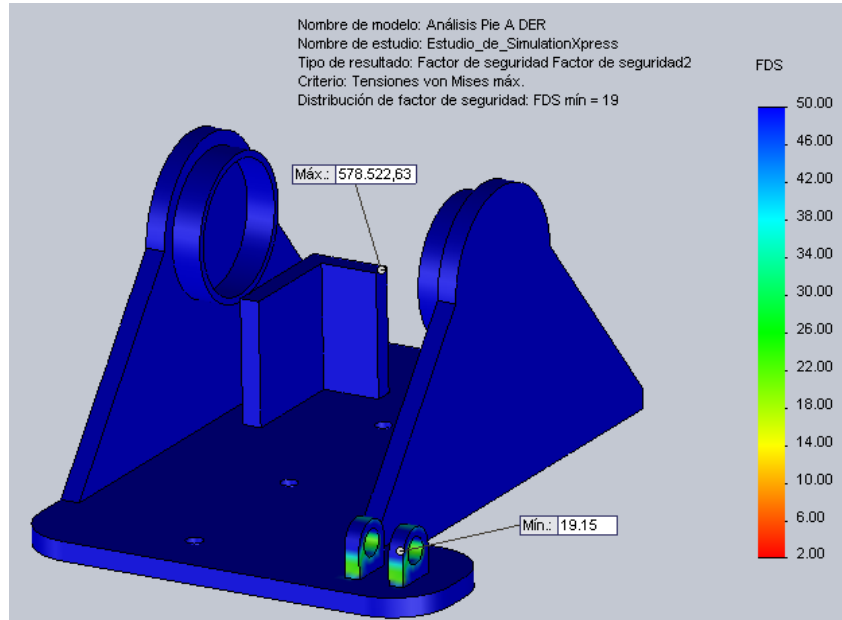


Figura 138. Factor de seguridad en el pie

4.12 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL HEXO

Cuando el centro de masa de toda la estructura se encuentra dentro de la superficie de apoyo del Hexo, todo el sistema completo está estable y no hay riesgo de que caiga. Durante la ejecución de acciones, tanto de levantamiento como de traslación, el centro de masa continuamente cambia de posición física; sin embargo, en todo instante el centro de masa no sale de los límites de la superficie de apoyo.

La superficie efectiva de apoyo está determinada por la superficie de apoyo en los elementos del pie, la cual tiene un área de 0.14198 m^2 (Figura 139). Al estar apoyados ambos pies, la estabilidad es mucho mayor debido a la amplia superficie de apoyo generada; sin embargo, cuando se levanta uno

de los pies para dar un paso, la superficie de apoyo se reduce a menos de la mitad.

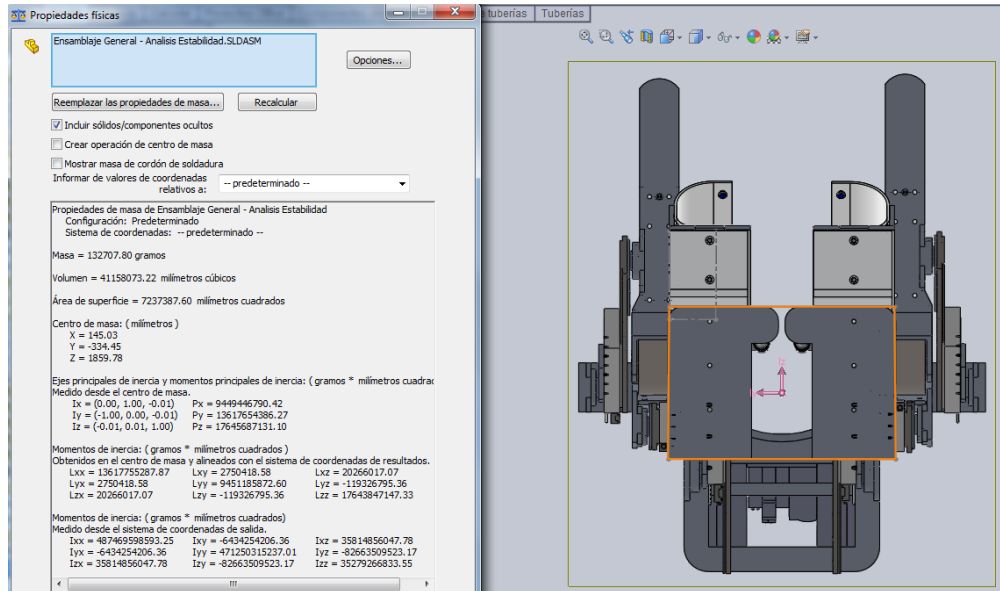


Figura 139. Vista inferior del centro de masa dentro de superficie de apoyo

En posición erguida (Figura 140) y al inclinarse para realizar acciones de levantamiento (Figura 141), el centro de masa se mantiene siempre dentro de la superficie de apoyo.

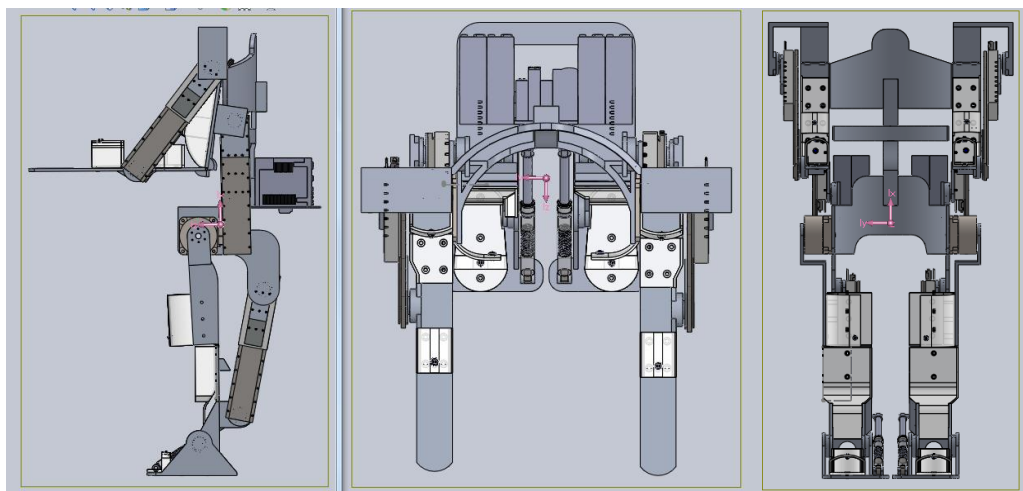


Figura 140. Visualización del centro de masa del Hexo erguido

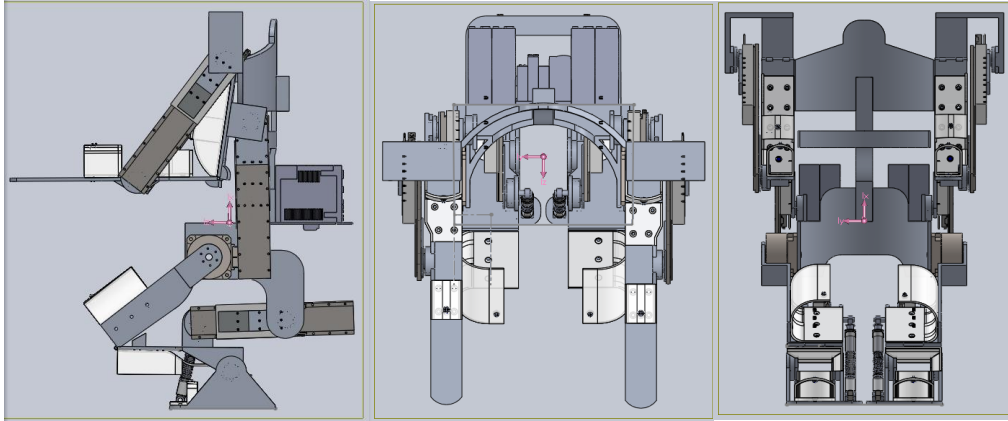


Figura 141. Visualización del centro de masa del Hexo agachado

Cuando el Hexo se encuentra en la posición de avance, el centro de masa queda desplazado fuera de la superficie de apoyo; sin embargo, el usuario y su apoyo con toda la estructura del Hexo, afectan el posicionamiento del centro de apoyo, generando que este se vuelva a ubicar dentro de la superficie de apoyo del pie asentado. En el plano lateral, la posición del centro de masa se mantiene dentro de la superficie de apoyo.

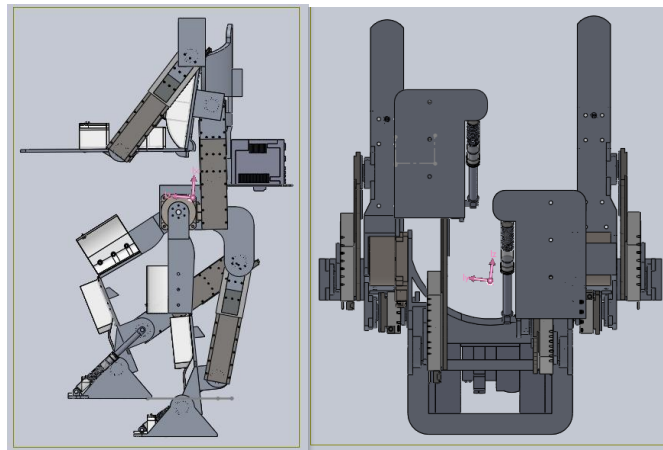


Figura 142. Visualización del centro de masa del Hexo dando un paso

4.13 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la sección D de la espalda, el valor del esfuerzo máximo es bastante elevado, con un valor de $6.17e^7$ N/m² y, por su diseño, se presenta en el área donde se entrecruza con la protección lateral. A pesar de que es un

valor alto, no alcanza a sobrepasar el valor de esfuerzo límite de $2.75e^8$ N/m², por lo que se asegura el soporte de esta estructura.

En la parte del pie, donde se ensambla el elemento de soporte, aunque en las simulaciones de esfuerzo se muestra una deformación del elemento, el valor del esfuerzo máximo es de $1.43e^7$ N/m². Se garantiza la seguridad del elemento de soporte, debido a las características del material, brindando un factor de seguridad mínimo de 19.14.

La sección C de la espalda es la parte principal del Hexo porque en este convergen la mayoría de los actuadores. En el análisis del momento rotacional, se determina el valor requerido para que la estructura no gire y cause la inestabilidad del Hexo; es por esto que se complementa con la utilización de servo motores rotacionales, los cuales permiten el giro del elemento del muslo cuando se realizan acciones de traslación y complementa la estabilidad del sistema cuando se encuentra realizando acciones de levantamiento. Continuamente estos servos motores rotacionales generan un momento opuesto al provocado por las fuerzas actuantes sobre todo el Hexo.

En esta misma sección C de la espalda, se complementa la bandeja que alberga los módulos electrónicos y amplificadores. En el análisis se toma en cuenta el peso que esto realiza, y el valor del esfuerzo máximo de $2.97e^7$ N/m². Aunque parece ser que no soporta el peso de todo el sistema electrónico, no se evidencia mayor desplazamiento de la bandeja, lo que asegura una sujeción adecuada que mantenga a todos los módulos en su lugar. Para mayor seguridad, se empernan los módulos contra la bandeja. El diseño de la estructura permite que el cableado sea sencillo y no se presenten enredos entre cables o con los elementos de la estructura.

La ubicación y desplazamiento de los servo motores lineales se diseña considerando las posiciones mínimas para evitar que existan trabamientos

de los elementos. En la posición crítica de levantamiento, cuando el Hexo se encuentra agachado, el servo motor lineal de la canilla guarda un ángulo de 2° para poder actuar en ambos ejes del plano lateral. Si el motor llegara a estar a 0° , el sistema se traba y no podría subir. Para evitar alcanzar esta posiciones, se implementan topes de seguridad en ciertas partes, de esta manera se resguarda la posición máxima de las extremidades para que no se desplace más allá de los límite y provoquen daños en el usuario, y para que no se trabe el Hexo. En los actuadores lineales de los brazos, también se trata este inconveniente con topes para resguardar el desplazamiento. El elemento del pie requiere que la superficie en la que se apoya guarde un coeficiente de rozamiento de 0.197 para asegurar la estabilidad del Hexo. Si la superficie en la que se lo está utilizando presenta un coeficiente de rozamiento menor al del valor calculado, aumenta el riesgo de que toda la estructura se desestabilice y esta caiga.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En los planos de movimiento del cuerpo humano se determinan los grados de libertad de las extremidades cuando estas ejecutan acciones de traslación y de levantamiento. Para la finalidad del Hexo no hace falta diseñar articulaciones y elementos que emulen exactamente los mismos grados de libertad que una persona, se limitan a ser seleccionados los grados de libertad requeridos para ejecutar las acciones necesarias. Se concluye que las extremidades solamente requieren de flexión y extensión para poder trasladarse y levantar pesos, dejando de lado para el diseño movimientos de aducción y abducción, y de pronación y supinación.

Los valores arrojados por la aplicación Simulation Xpress muestran que cada elemento mecánico diseñado presenta un buen comportamiento cuando es sometido a las fuerzas extremas de carga de peso. Los desplazamientos de cada elemento son mínimas, y aunque los valores de desplazamiento de los elementos del brazo y la sección A de la espalda se encuentran alrededor de los 3 milímetros, cada elemento se mantiene en su lugar y no presentan deformaciones representativas que impliquen desajustes o trabamientos en el sistema Hexo. Cada uno de los elementos mantiene su forma y su característica de diseño sin afectar al objetivo de toda la estructura.

La selección de actuadores se ve limitada por la cantidad mínima de elementos que se ofrece en el mercado. El diseño mecánico del Hexo se condiciona principalmente a los actuadores que existe, teniendo en cuenta en primer lugar su peso, el tamaño y dimensiones que presentan, la compatibilidad con los módulos de control, la fuerza máxima que entregan y su facilidad de montaje. El diseño inicial se somete a muchos cambios debido a las características de los primeros servo motores lineales propuestos.

Los valores de esfuerzos máximos obtenidos en cada elemento, aseguran que los elementos no presentan fallas cuando están trabajando. En ninguno de los elementos se presentan esfuerzos máximos que superan el límite elástico. El factor de seguridad sobre pasa el valor de 2 (siendo de 2,33 en el elemento del brazo), lo que ratifica la improbabilidad de fallas en la estructura del Hexo. Al no presentar fallas, estos elementos son seleccionados para formar parte del diseño final del Hexo.

El diseño electrónico presenta condicionamientos en la programación de la ejecución de acciones en las extremidades inferiores. Se requiere que la postura sea segura antes de que realice acciones de levantamiento y de traslación, debido a que la estabilidad de todo el Hexo se puede comprometer al tratar de realizar acciones en condiciones no favorables. Las extremidades superiores no requieren ser condicionadas, debido a que estas pueden moverse libremente y no comprometen la estabilidad del Hexo, ni pone en riesgo a la ejecución de las acciones de brazos y antebrazos.

5.2 RECOMENDACIONES

El diseño de un exoesqueleto con servo motores eléctricos se ve limitado por el tamaño de estos actuadores existentes en el mercado. La gran mayoría de los exoesqueletos para levantamiento de peso utilizan actuadores neumáticos, lo que implica la utilización de compresores de aire que ocupan mayor espacio o no permiten que los exoesqueletos se alejen de estos. Además, el peso de las estructuras aumenta en peso considerablemente. Se recomienda plantear diseños de actuadores eléctricos de menor tamaño y de mayor fuerza que permitan versatilidad en el diseño de exoesqueletos.

En las extremidades hay topes que resguardan la seguridad del usuario y limitando el desplazamiento de los elementos que las componen. Cada tope

de seguridad pueden ser sustituidos por elementos de soporte, como los diseñados para los elementos de los pies, que complementan la restitución de la posición original mediante el almacenamiento de energía potencial elástica cuando se somete a fuerzas aplicadas.

Los elementos de protección son de Tecno polímero, material que puede ser reemplazado por otro de menor costo y versatilidad. El diseño de estos elementos se basa en el banco de materiales existente en SolidWorks, pero puede ser seleccionado otro material menos denso, ya que no se especifica su exclusividad y no se somete a análisis de esfuerzos, pues no se constituyen como elementos participantes en el soporte de peso.

El ensamble de algunos elementos se lo realiza mediante pernos avellanados. Las medidas con la que se presentan las perforaciones pueden ser cambiadas por el diámetro a convenir; sin embargo, la cantidad de perforaciones y los lugares donde se los ubica deben ser los que se indican en el diseño.

Se recomienda que el cableado de los módulos controladores y amplificadores se establezca con exactitud, ya que no se especifica por donde pasan los cables y como se los soporta contra la estructura del Hexo. En SolidWorks se realiza este análisis; sin embargo, los conectores existentes en el banco de elementos no son los necesarios para los módulos Mitsubishi seleccionados.

El diseño del Hexo es la pauta para una investigación más profunda dedicada a exoesqueletos. Se recomienda la investigación y análisis para ampliar las prestaciones del Hexo con un mayor número de grados de libertad, permitiendo versatilidad en los movimientos e incluyendo facultades de pronación, supinación, abducción y aducción en las extremidades superiores e inferiores.

BIBLIOGRAFÍA

- Aoki, E., Manabe, S., Konosu, H., Imaida, M., Nakashima, I., & Elbihara, Y. (2015). Leg assist device. *United States patent*, 1-9.
- Bolton, W. (2010). *Mecatrónica, sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica* (4ta ed.). México: Alfaomega.
- Catálogo de rodamientos FAG WL 41 520/3 SB. (2000). FAG. Recuperado el 07 de abril de 2016 de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut214/FAG.pdf>.
- Chen, J., & Liao, W. (2006). A leg exoskeleton utilizing a magnetorheological actuator. *Smart materials and structure laboratory*. 824-828.
- Chen, Y., Li, G., Zhu, Y., Zhao, J., & Cai, H. (2014). Design of a 6 DOF upper limb rehabilitation exoskeleton with parallel actuated joints. *IOS Press*, 1-8.
- Duncan, L. (1997). *Ergonomics and the management of musculoskeletal disorders* (2dn ed.). United States: Elsevier.
- Floyd, R. T. (s.f.). Basic biomechanical factors & concepts. *Structural kinesiology*. Recuperado el 10 de marzo de 2016 de http://www.kean.edu/~jeadams/docs/Kinesiology/Kines_Power_Points/Kines_PPT_PDF_Chap3.pdf.
- Glowinski, S., Krzyzynski, T., Pecolt, S., & Maciejewski, I. (2014). Design of motion trajectory of an arm exoskeleton. *Arch appl mech*, 2015, 76-85.
- Guo, Q., Li S., & Jiang D. (2015). A lower extremity exoskeleton: Human.machine coupled modeling, robust control design, simulation, and overload-carrying experiment. *Hindawi publishing corporation*, 2015, 2-9.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mecánica de materiales* (8va ed.). México: Pearson Prentice Hall.
- Kazerooni, H. (s.f.). Berkeley Lower Extremity Exoskeleton BLEEX. Recuperado el 15 de abril de 2015, de

<http://bleex.me.berkeley.edu/wp-content/uploads/media/images/CV/BLEEX-Summary.pdf>

- Li, Y., Guan, X., Tong Y., & Xu, C. (2015). Design and simulation study of the translational-knee lower extremity exoskeleton. *Mechanika*, 21, 207-212.
- Linear shaft motor. (2016). Nippon pulse. Recuperado el 20 de enero de 2016, de <http://nipponpulse.com/products/overview/linear-shaft-servomotors>.
- Louie, D. R., Eng, J. J., & Lam, T. (2015). Gait speed using powered robotic exoskeleton after spinal cord injury: a systematic review oand correlational study. *Journal or neuroengineering and rehabilitation*, 2015, 3-6.
- Megatorque motor. (2009). NSK. Recuperado el 17 de enero de 2016 de http://onexia.com/nsk/pdf/NSK%211_PS_and_PN_Motor_Catalog.pdf.
- Megatorque motor system user´s manual. (2003). NSK. Recuperado el 19 de enero de 2016, de <https://www.jp.nsk.com/services/download/manualpdf/C237-01.pdf>.
- Melsec Q series motion controller programming manual. (s.f.). Mitsubishi. Recuperado el 20 de enero de 2016 de <http://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/plc/sh080809eng/sh080809engs.pdf>.
- Melsec Q series motion controller users manual. (s.f.). Mitsubishi. Recuperado el 21 de enero de 2016 de <http://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/plc/sh080007/sh080007o.pdf>
- Melsec Q series users manual. (2004). Mitsubishi. Recuperado el 11 de enero de 2016 de https://www.plcsystems.ru/catalog/Mitsubishi/doc/SystemQ_MultipleCPU.pdf.
- Melsec system Q beginners manual. (2007). Mitsubishi. Recuperado el 12 de enero de 2016 de <https://www.mitsubishi/mitsubishi-q-series-beginners-manual.pdf>.

- Melsec system Q users manual. (2007). Mitsubishi. Recuperado el 12 de enero de 2016 de https://www.plcsystems.ru/catalog/Mitsubishi/doc/SystemQ_DigitalIO_Manual.pdf.
- Micro actuador MA-35. (2014). Pi. Recuperado el 25 de enero de 2016, de http://www.pi-usa.us/products/Linear-actuador-linear-pusher/precision_actuator_overview.php.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* (4ta ed.). México: Pearson Prentice Hall.
- MXB rodless belt drive actuators. (2015). Tolomatic. Recuperado el 18 de enero de 2016, de <http://www.tolomatic.com/products/product-details/mxb-u-unguided-belt-driven-actuators#/>.
- Navas, F. (2011). Diseño mecatrónico aplicado a la robótica. *UNAB*. 1-4.
- Norton, R. (2008). *Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos* (3ra ed.). México: Mc Graw Hill.
- Pons, J. (2008). *Wearable robots, biomechatronic exoskeletons*. United States: Wiley.
- Push button Switches. (2014). Multicomp. Recuperado el 06 de enero, de 2016, de <http://uk.farnell.com/multicomp/mcpas6b2m1ce7/switch-push-button-spst-ip67-blue/dp/1638332>.
- Resolute absolute optical encoder with Mitsubishi serial communications. (2016). Renishaw. Recuperado el 10 de abril de 2016, de <http://resources.renishaw.com/en/details/--65959>.
- Riesgos asociados a la manipulación manual de cargas en el lugar de trabajo. (2007). Facts. Recuperado el 15 de marzo de 2016, de https://osha.europa.eu/sites/default/files/publications/documents/es/publications/factsheets/73/Factsheet_73_-Riesgos_asociados_a_la_manipulacion_manual_de_cargas_en_el_lugar_de_trabajo.pdf+&cd=1&hl=en&ct=clnk&gl=ec.
- Roncon, E., Moreno, J. C., Gallego, J. A., & Pons, J. L. (2009). *Wearable robots in rehabilitation engineering tremor suppression*. Spain: Intech.
- Servo amplifier & motors Melservo-J4. (2016). Mitsubishi. Recuperado el

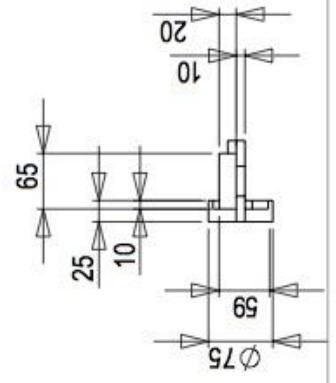
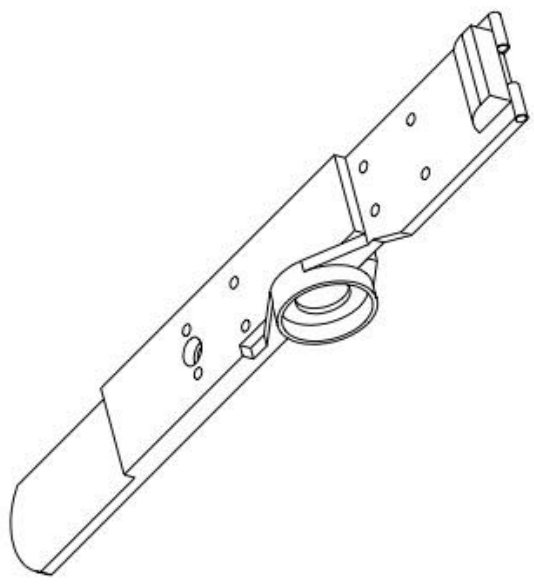
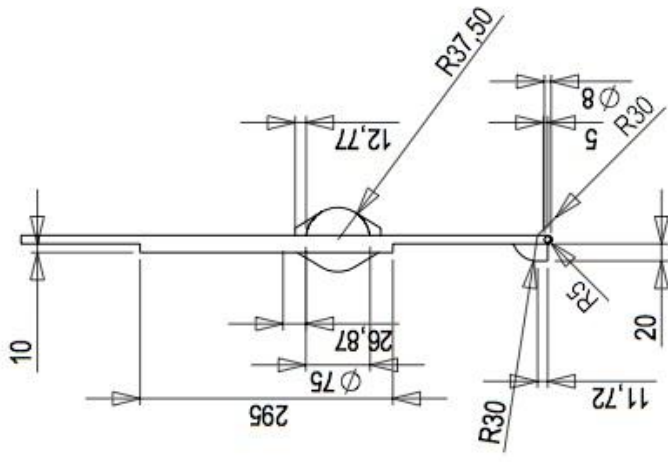
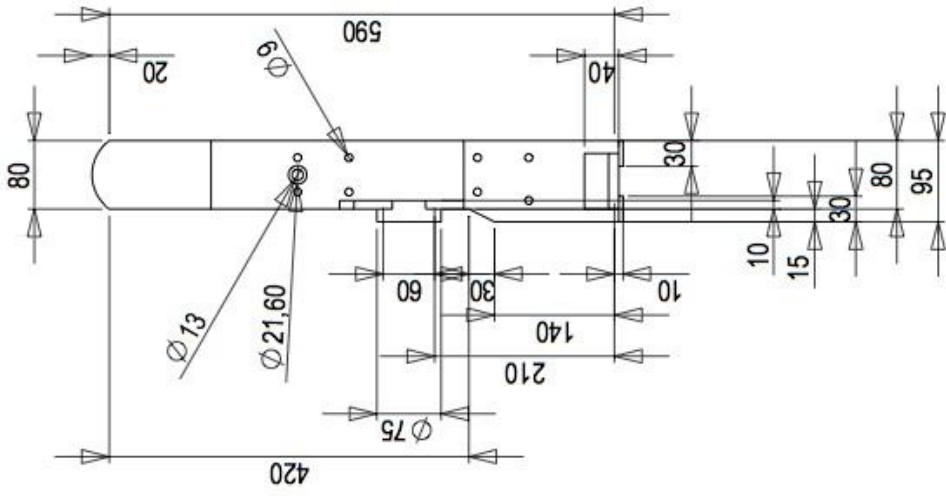
06 de marzo de 2016, de https://us.mitsubishielectric.com/fa/en/products/drive-products/ac_servos-melservo/melservo-j4.

- Servo geared motors KSG. (2014). Georgii Kobold. Recuperado el 15 de enero de 2016, de www.georgii-kobold.de.
- Servo system controller. (2012). Mitsubishi. Recuperado el 02 de marzo de 2016, de <http://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/catalog/ssc/l03062/l03062f.pdf>.
- System Q. (2004). Mitsubishi. Recuperado el 01 de marzo de 2016, de https://www.hiflexonline.nl/products/mitsubishi/plc/documentatie/Q_Automation_Book.pdf.
- Torque motors KTY-Q. (2014). Georgii Kobold. Recuperado el 15 de enero de 2016, de www.georgii-kobold.de.
- Walsh, C. J., Paluska, D., Pasch, K., Grand, W., Valiente, A., & Herr, H, (2006). Development of a lightweight, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation. *MIT media lab*, 3485-3490.
- Wolf, J., Parker, C., Borisoff, J., Mortenson, W. B., & Mattie, J. (2014). A survey at stakeholder perspectives on exoskeleton technology. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 2-12.

ANEXOS

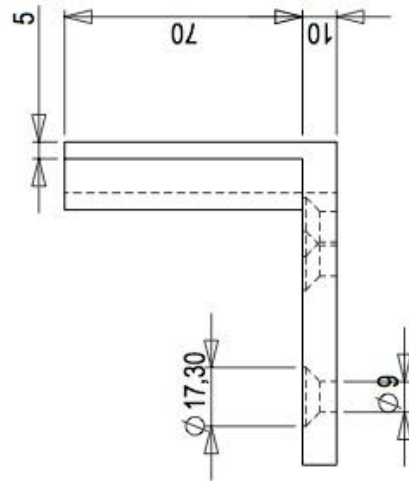
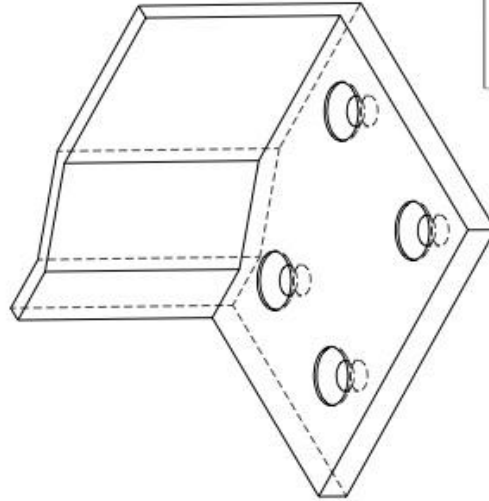
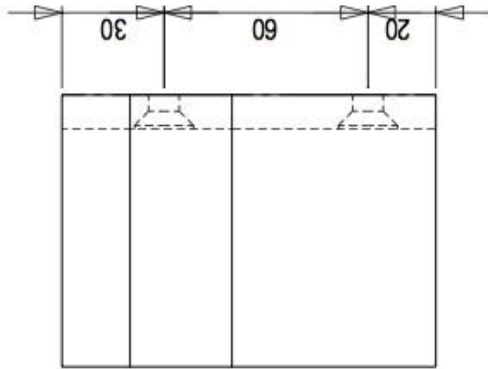
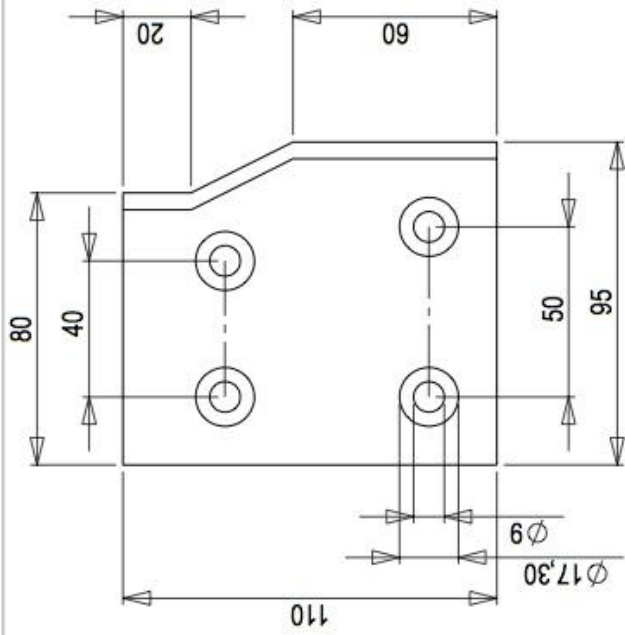
ANEXOS 1

Planos de elementos mecánicos



DIBUJANTE		NOMBRE		FECHA	
H. ARIAS		H. ARIAS		01/07/2016	
REVISIÓN		COMENTARIOS:		01/06/2016	
H. ARIAS					
DIMENSIONES EN mm					
TOLERANCIAS:					
FRACCIONAL: ± 0.05					
ANGULAR: ± 0.05					
MATERIAL					
ALUMINIO 6160 T6					
FINALIZADO					
01 /07/2016					

HARRY R. ARIAS R.	
ESTRUCTURA DE ANTEBRAZOS DE HEXO	
DBJ. NO.	REV.
HE-001	
ESCALA:	PESO:
	HUALLA DE 1



HARRY R. ARIAS R.

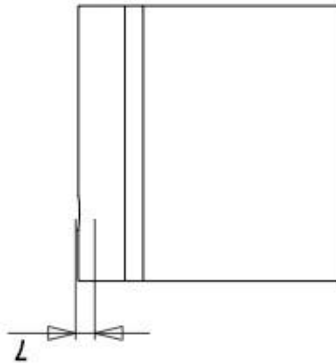
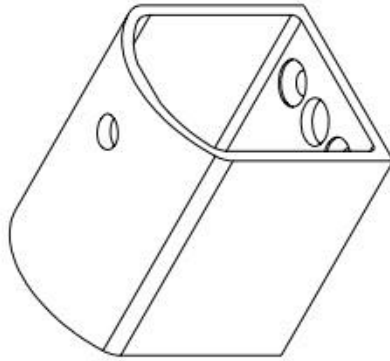
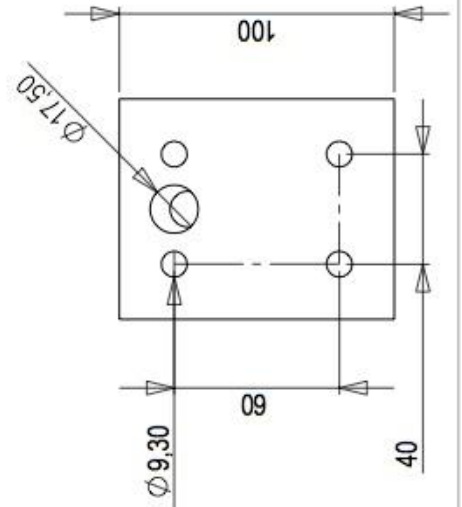
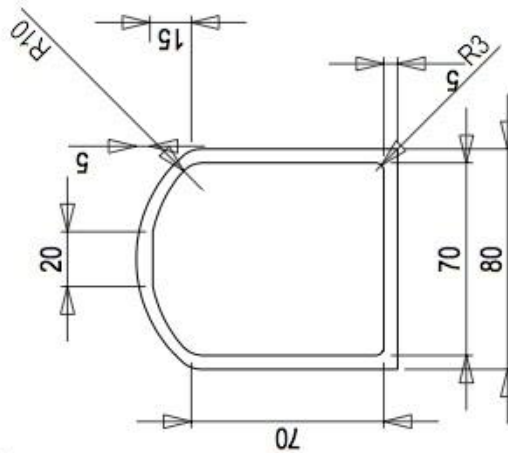
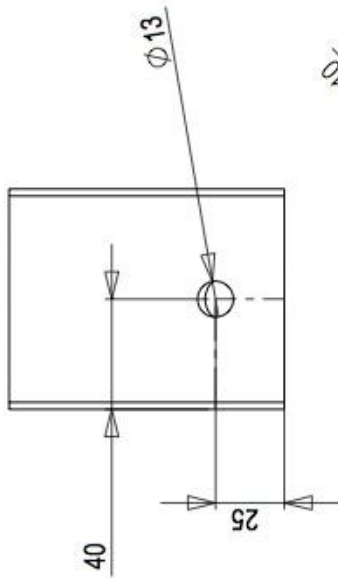
PROTECCIÓN DE ANTEBRAZOS
DE HEXO

DIBUJANTE	NOMBRE	FECHA
REVISION	H. ARIAS	01/07/2016
COMENTARIOS:	H. ARIAS	01/08/2016

DIMENSIONES EN mm
TOLERANCIAS:
FRACCIONAL: $\pm 0,05$
ANGULAR: $\pm 0,05$

MATERIAL:
TECNOPLIMERO - NYLON
FINALIZADO
01 /07/2016

OBJ. NO.	HE-002	REV.
ESCALA:	PESO:	HOUA T DE 1



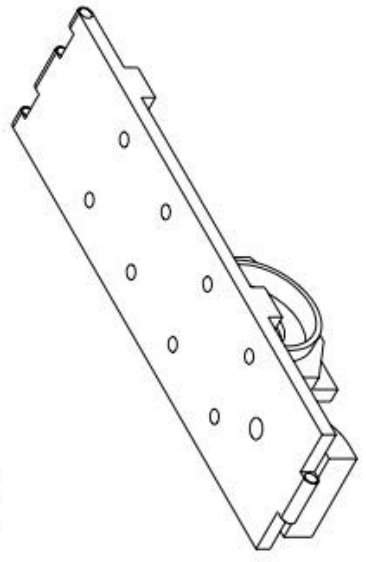
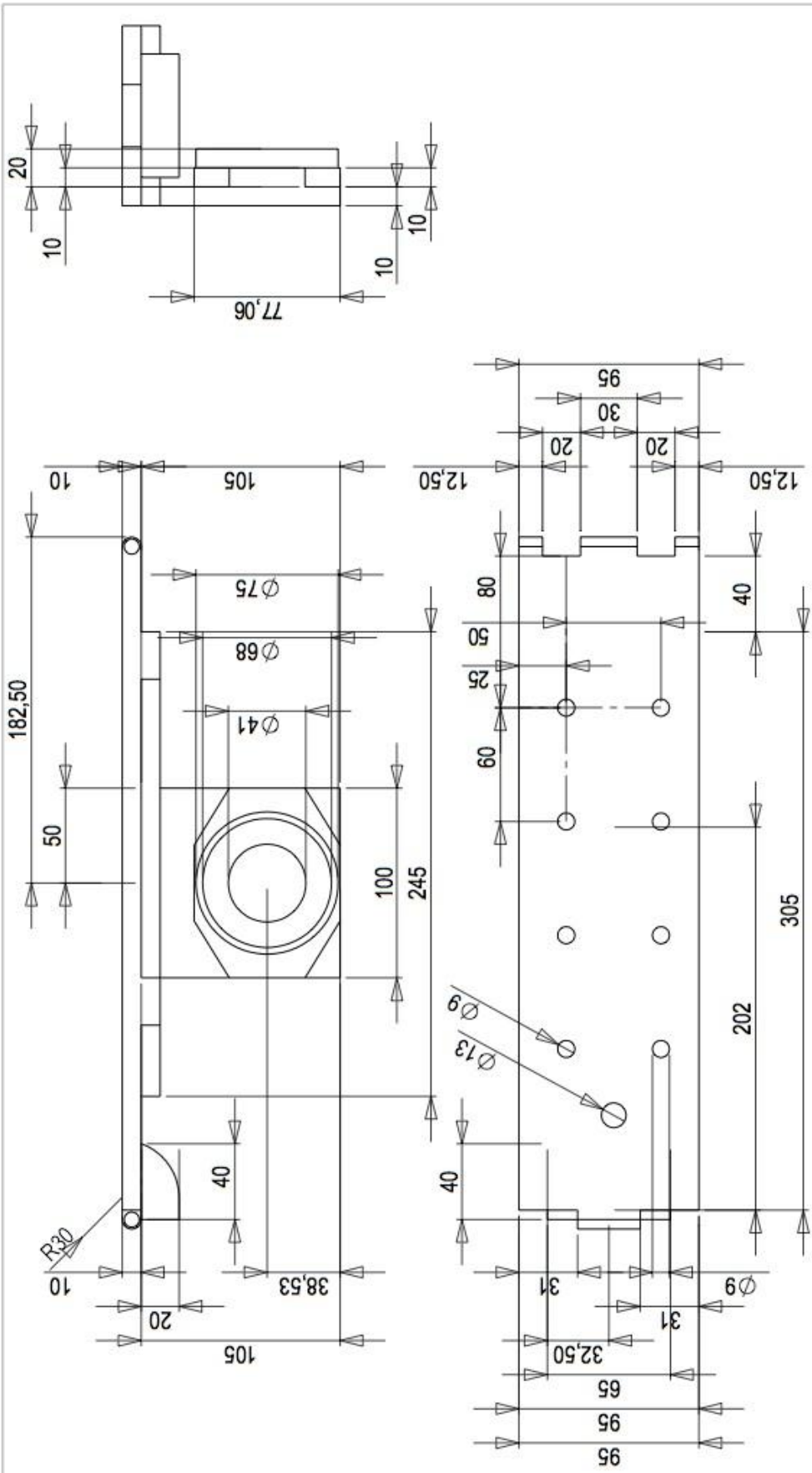
HARRY R. ARIAS R.

PROTECCIÓN DE MANO
DE HEXO

DIBUJANTE	NOMBRE	FECHA
H. ARIAS	H. ARIAS	01/07/2016
REVISIÓN	H. ARIAS	01/08/2016
COMENTARIOS:		

DIMENSIONES EN mm	MATERIAL
TOLERANCIAS: FRACCIONAL: ± 0.05 ANGULAR: ± 0.05	TECNOPLIMERO - NYLON
FINALIZADO	01 /07/2016

DBJ. NO.	REV.
	HE-003
ESCALA:	PESO:
	HOJA 1 DE 1



HARRY R. ARIAS R.

ESTRUCTURA DE BRAZO DE HEXO

OBJ. NO. **HE-004**

ESCALA: PESO: REV.

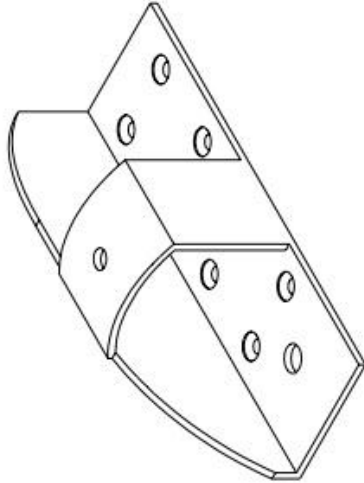
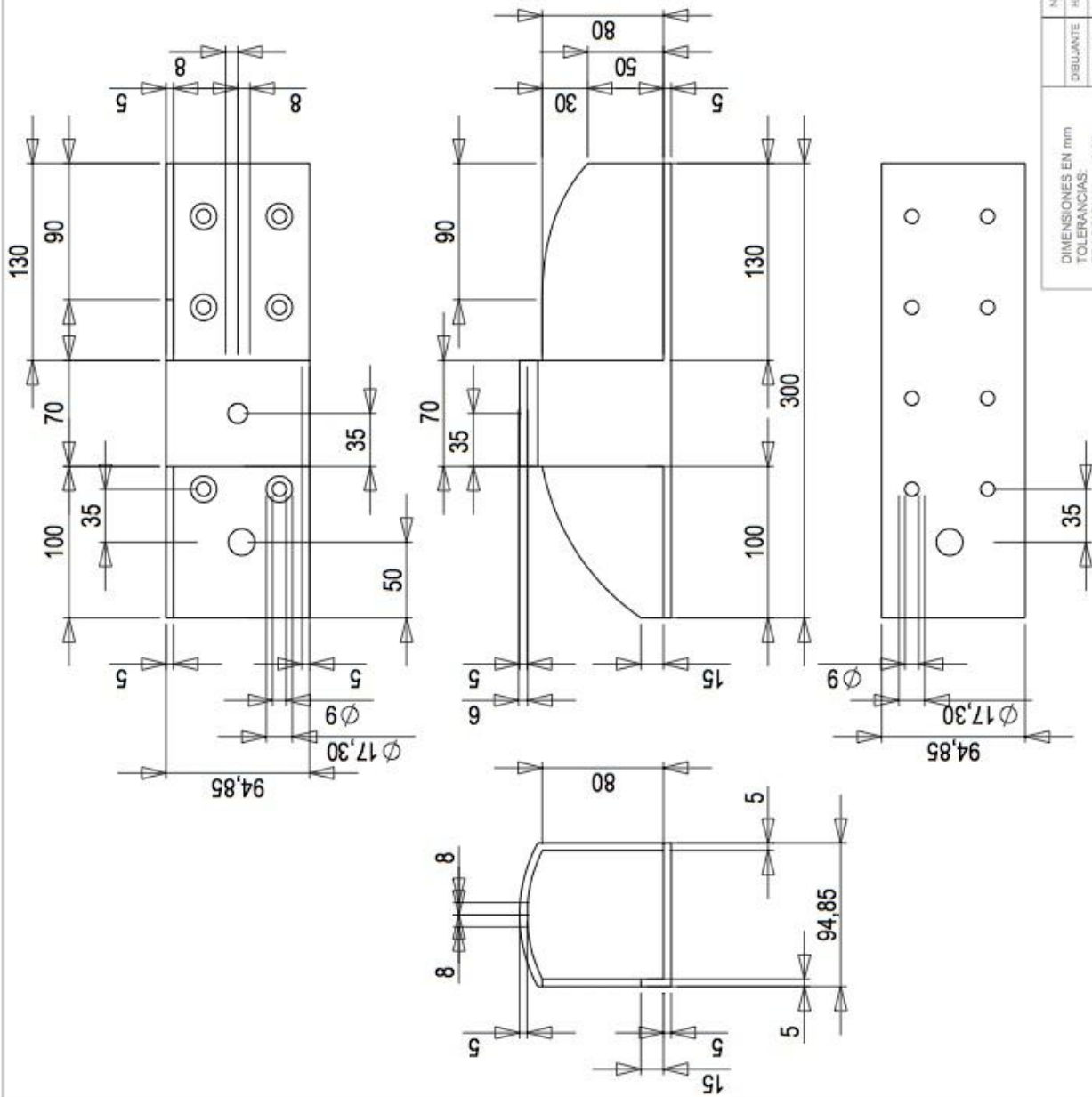
HUJA 1 DE 1

DIBUJANTE	NOBRE	FECHA
REVISOR	H. ARIAS	01/07/2016
COMENTARIOS:	H. ARIAS	01/08/2016

DIMENSIONES EN mm.
 TOLERANCIAS:
 FRACCIONAL : 0,05
 ANGULAR : 0,05

MATERIAL:
 ALUMINIO 6160 T6

FINALIZADO: 01 / 07 / 2016



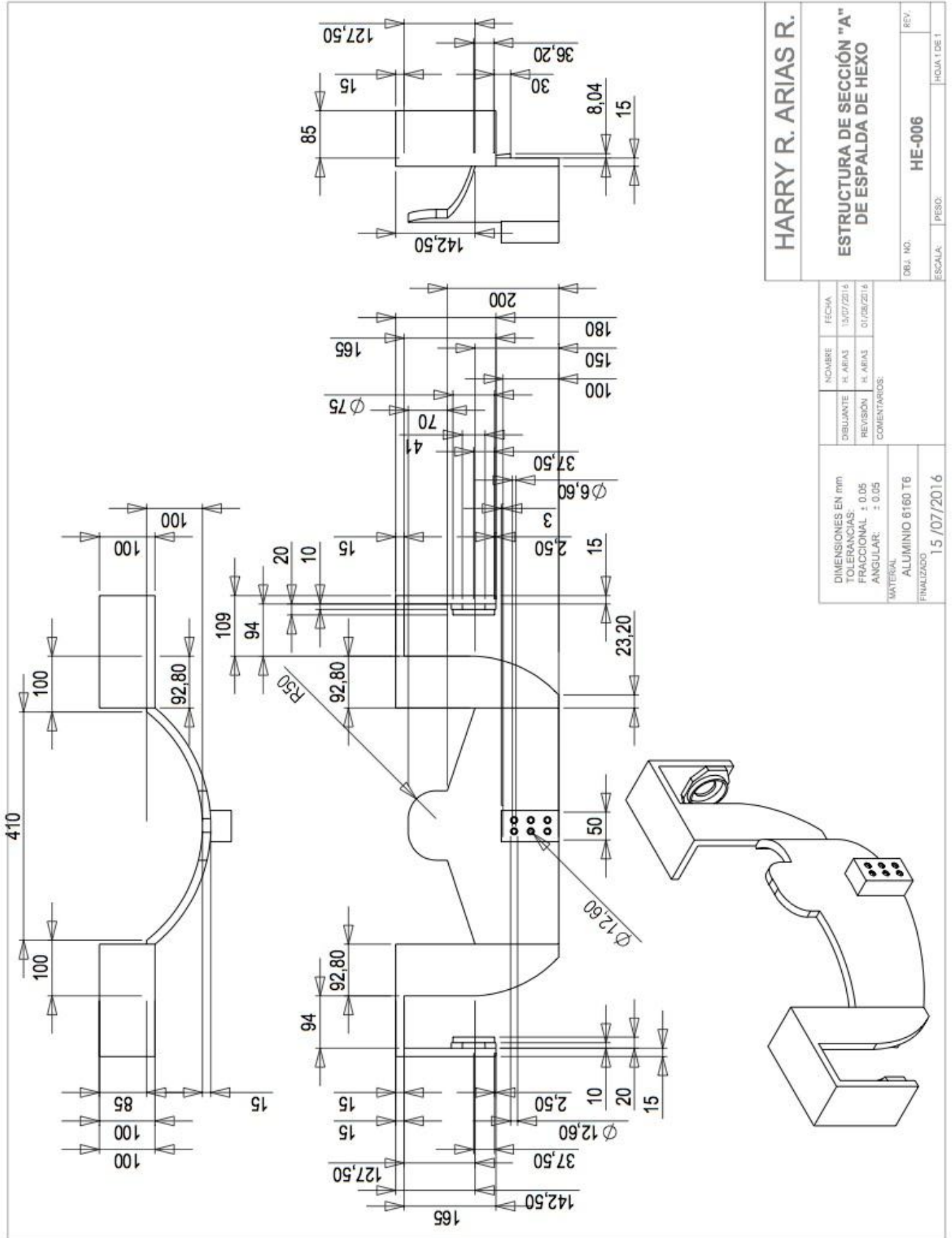
HARRY R. ARIAS R.

**PROTECCIÓN DE BRAZOS
DE HEXO**

NOVEMBRE	FECHA
H. ARIAS	01/07/2016
REVISIÓN	REVISOR
H. ARIAS	01/08/2016
COMENTARIOS:	

OBJ. NO.	REV.
HE-005	
ESCALA:	PESO:
	HOJA 1 DE 1

DIMENSIONES EN mm.
 TOLERANCIAS:
 FRACCIONAL : 0,05
 ANGULAR : 0,05
 MATERIAL:
 TECNOPOLIMERO - NYLON
 FINALIZADO
 01 /07/2016

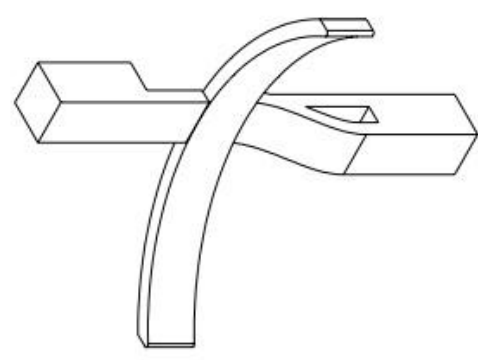
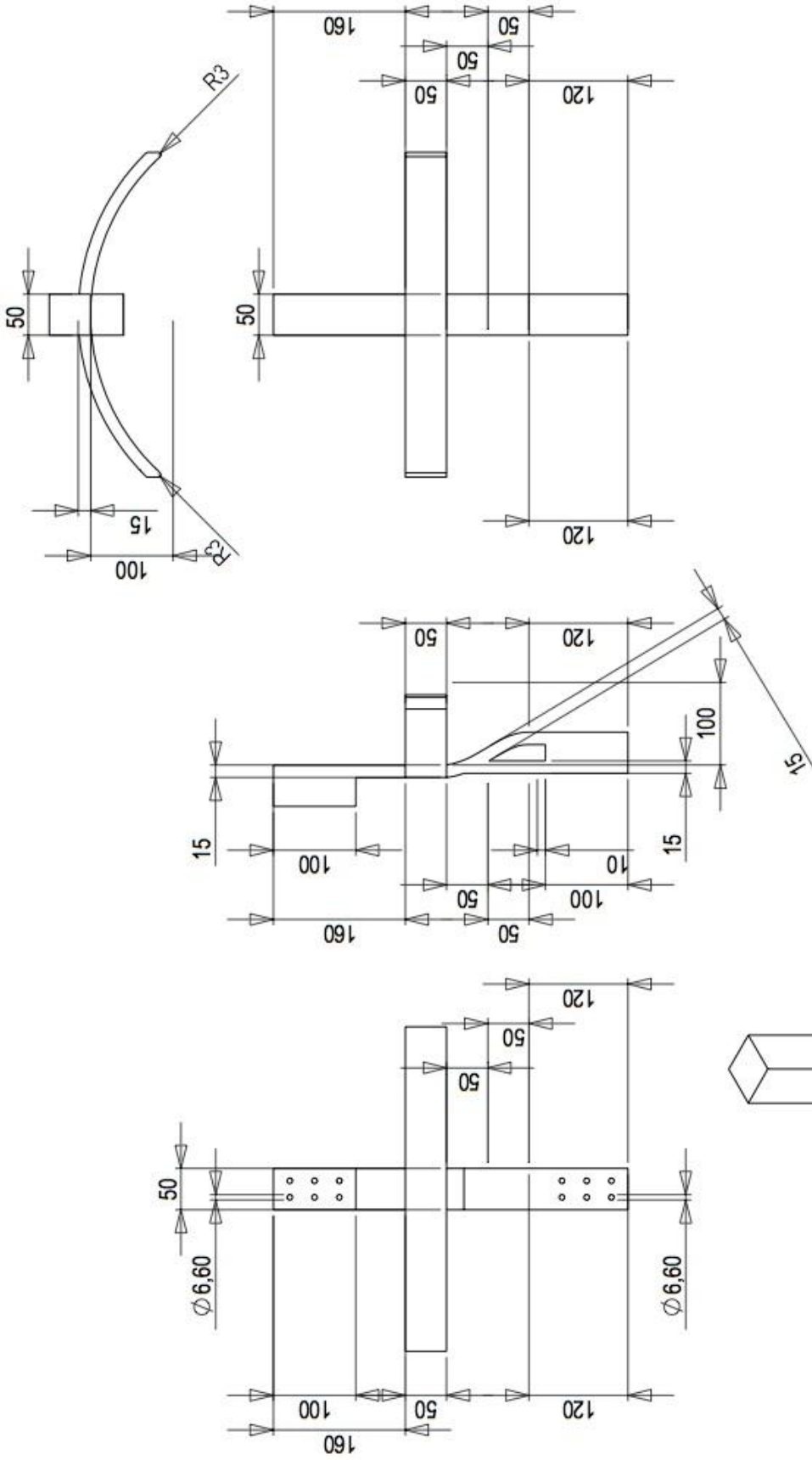


HARRY R. ARIAS R.

ESTRUCTURA DE SECCIÓN "A"
DE ESPALDA DE HEXO

OBJ. NO. HE-006

REV. ESCALA: PESO: HOJA DE 1



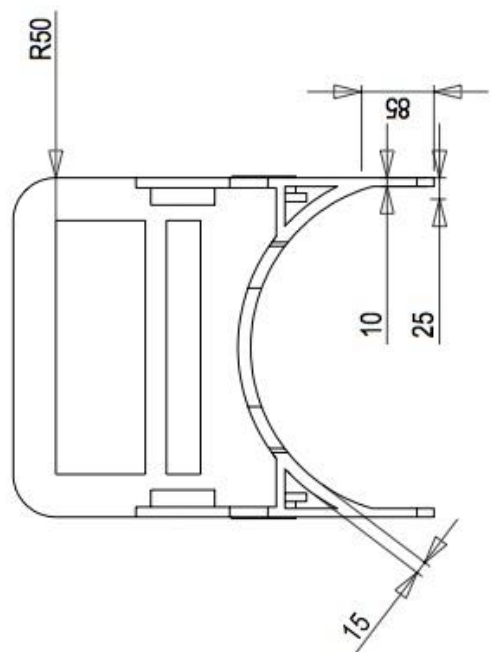
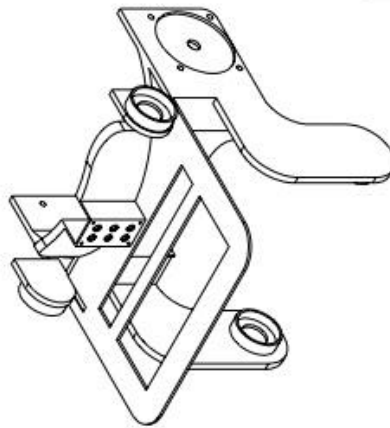
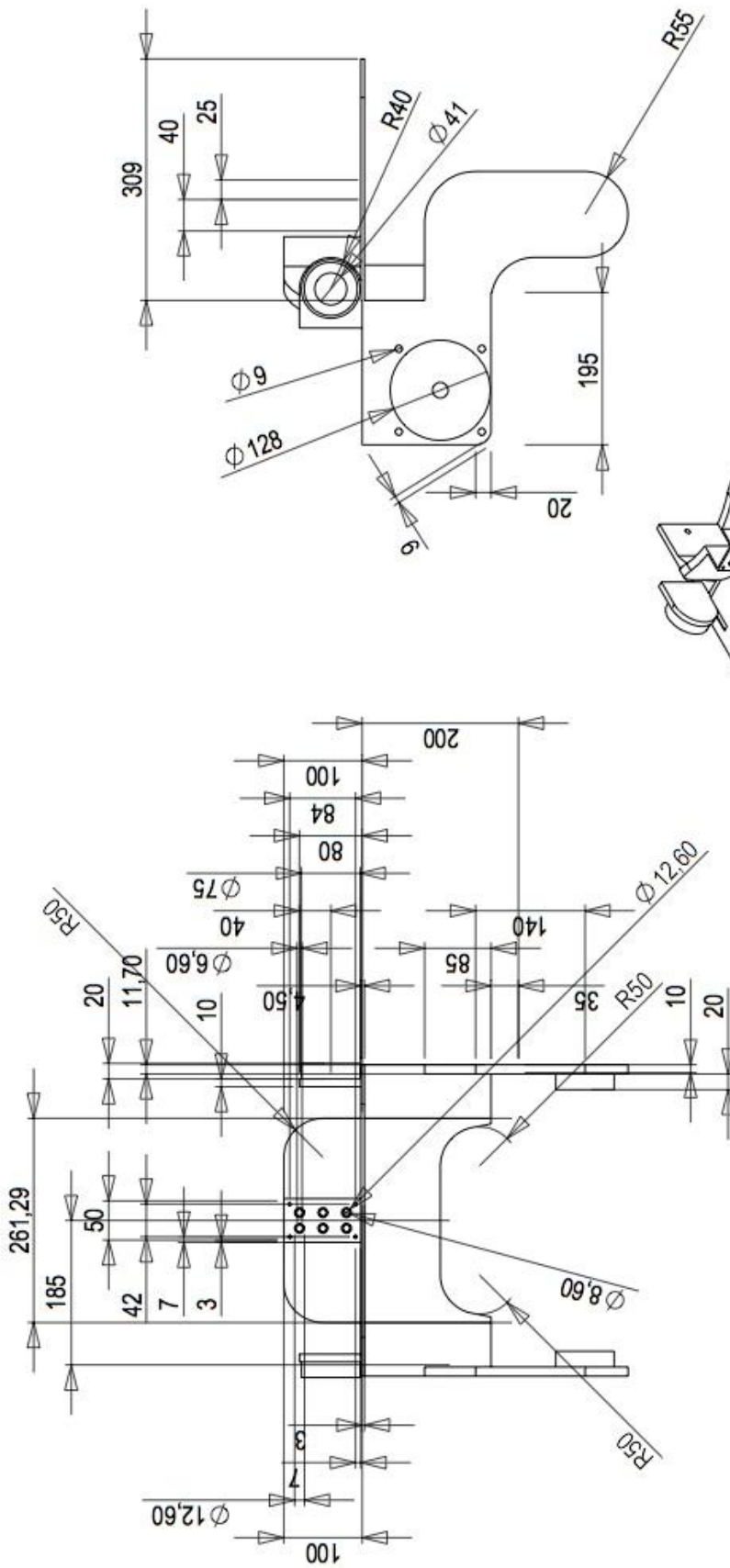
HARRY R. ARIAS R.

**ESTRUCTURA DE SECCIÓN "B"
DE ESPALDA DE HEXO**

DIBUJANTE	NOMBRE	FECHA
REVISIÓN	H. ARIAS	15/07/2016
COMENTARIOS:	H. ARIAS	01/08/2016

DIMENSIONES EN mm
 TOLERANCIAS:
 FRACCIONALES: ± 0,05
 ANGULAR: ± 0,05
 MATERIAL:
 ALUMINIO 6160 T6
 FINALIZADO
 15 /07/2016

OBJ. NO.	HE-007	REV.
ESCALA:	PESO:	HOUJA DE 1

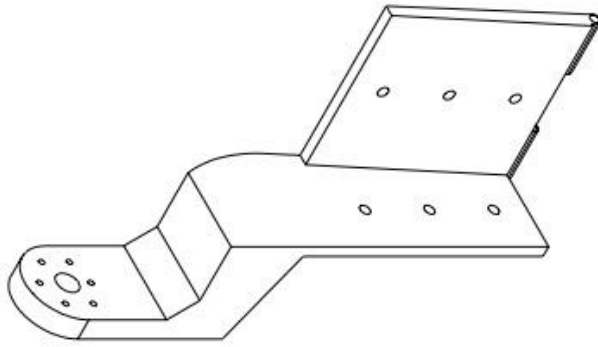
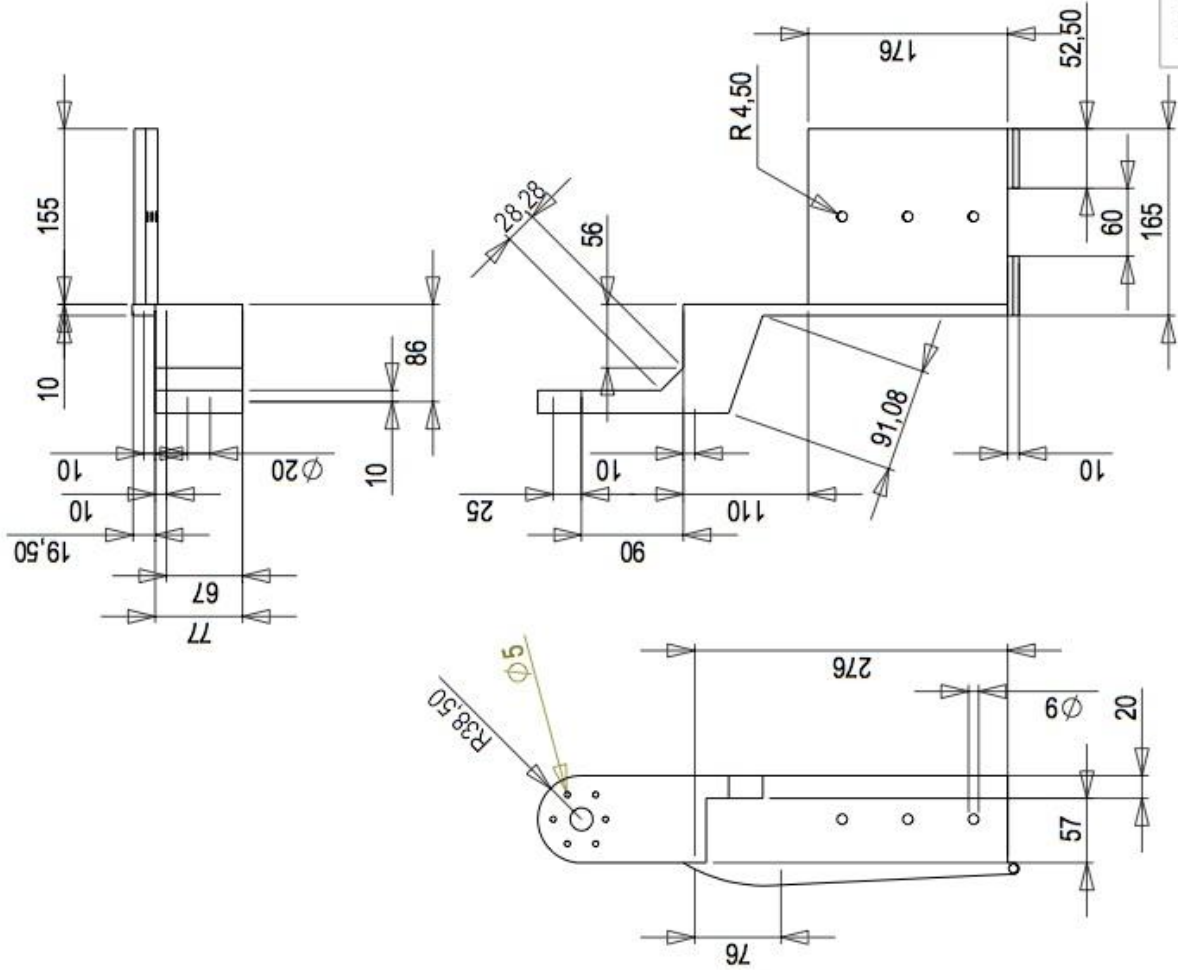


HARRY R. ARIAS R.

ESTRUCTURA DE SECCIÓN "C"
DE ESPALDA DE HEXO

DIBUJANTE	NOBRE	FECHA
H. ARIAS	H. ARIAS	13/07/2016
REVISIÓN	H. ARIAS	01/08/2016
COMENTARIOS:		
MATERIAL: ALUMINIO 6160 T6		
FINALIZADO 15/07/2016		

DEJ. NO.	HE-008	REV.
ESCALA:	PESO:	HUJA 1 DE 1



HARRY R. ARIAS R.

ESTRUCTURA DE MUSLO
DE HEXO

DIBUJANTE	REVISIÓN	COMENTARIOS	NOMBRE	FECHA
H. ARIAS	H. ARIAS		H. ARIAS	15/07/2016
				01/08/2016

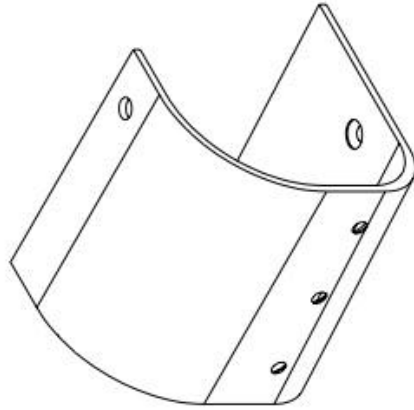
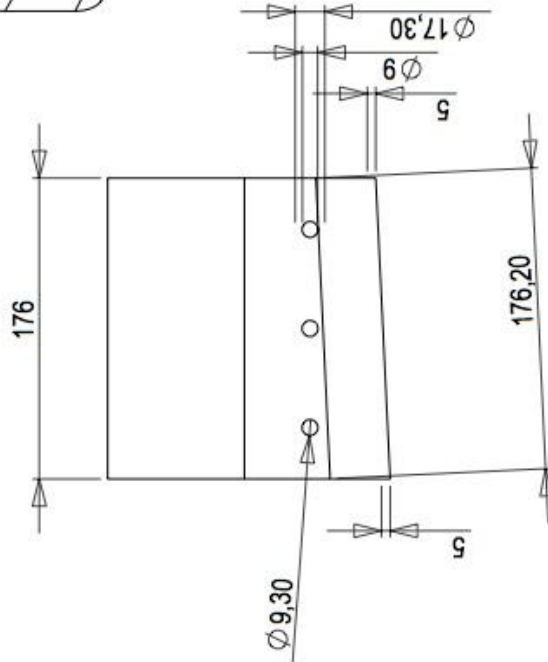
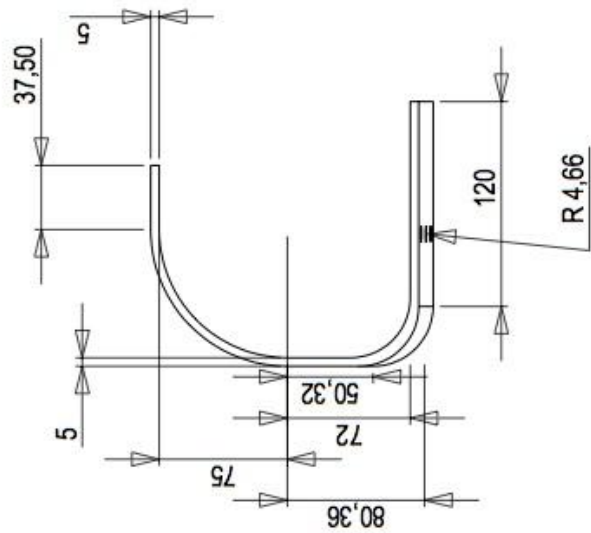
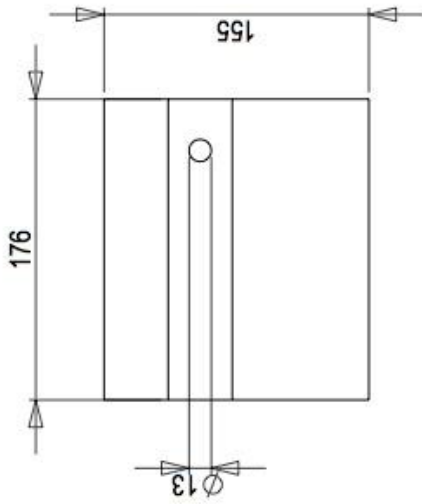
DIMENSIONES EN mm
TOLERANCIAS:
FRACCIONAL : ± 0,05
ANGULAR : ± 0,05

MATERIAL:
ALUMINIO 6160 T6

FINALIZADO
15 /07/2016

OBJ. NO. HE-009

ESCALA: PESO: REV. HOJA 1 DE 1



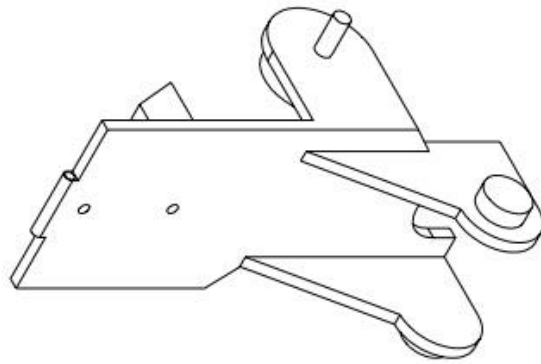
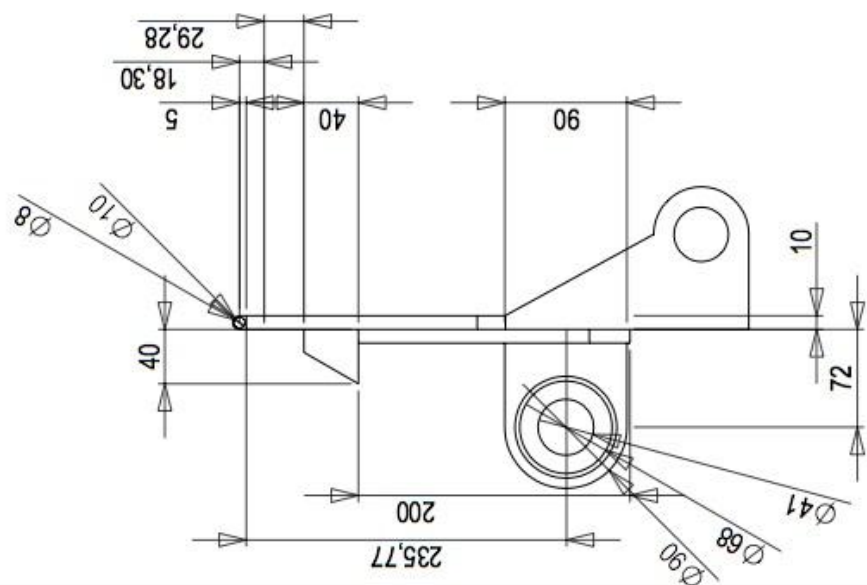
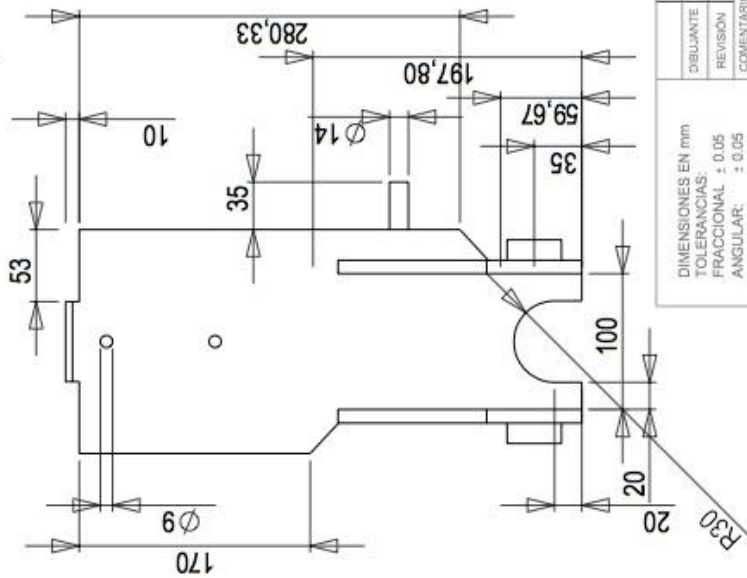
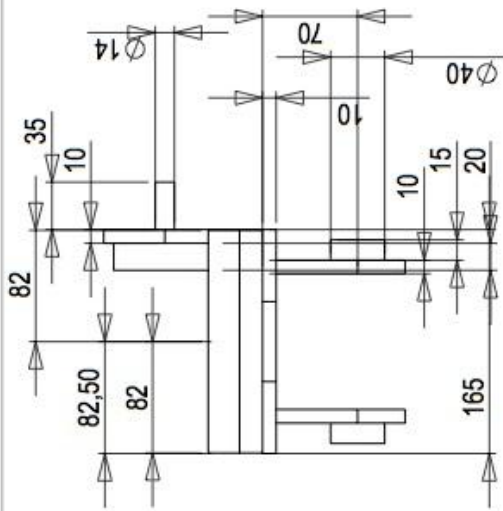
HARRY R. ARIAS R.

PROTECCIÓN DE MUSLO
DE HEXO

NOMBRE		FECHA	
H. ARIAS		15/07/2016	
REVISIÓN		REVISIÓN	
H. ARIAS		01/08/2016	
COMENTARIOS:			

OBJ. NO.		REV.	
HE-010			
ESCALA		PESO:	
		HOLIA 1 DE 1	

DIMENSIONES EN mm.
TOLERANCIAS:
FRACCIONAL: ± 0,05
ANGULAR: ± 0,05
MATERIAL:
TECNOPLIMERO - NYLON
FINALIZADO
15 /07/2016

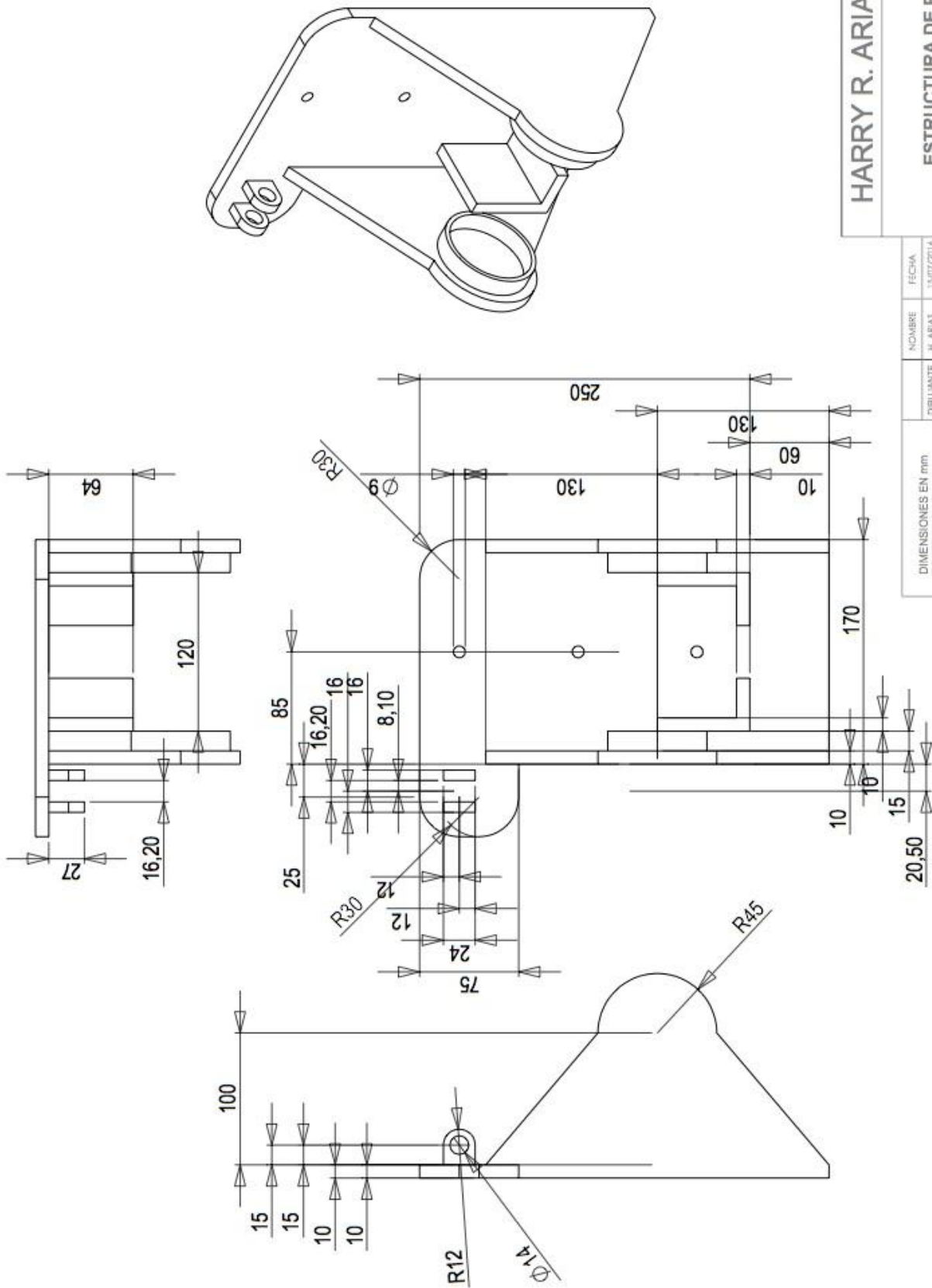


HARRY R. ARIAS R.

ESTRUCTURA DE CANILLA DE HEXO

DIMENSIONES EN mm	NOMBRE	FECHA
TOLERANCIAS:	H. ARIAS	15/07/2016
FRACCIONAL: ± 0.05	H. ARIAS	01/08/2016
ANGULAR: ± 0.05	COMENTARIOS:	
MATERIAL:		
ALUMINIO 6160 T6		
FINALIZADO		
15/07/2016		

OBJ. NO.	REV.
HE-011	
ESCALA:	HOJA DE 1
PESO:	



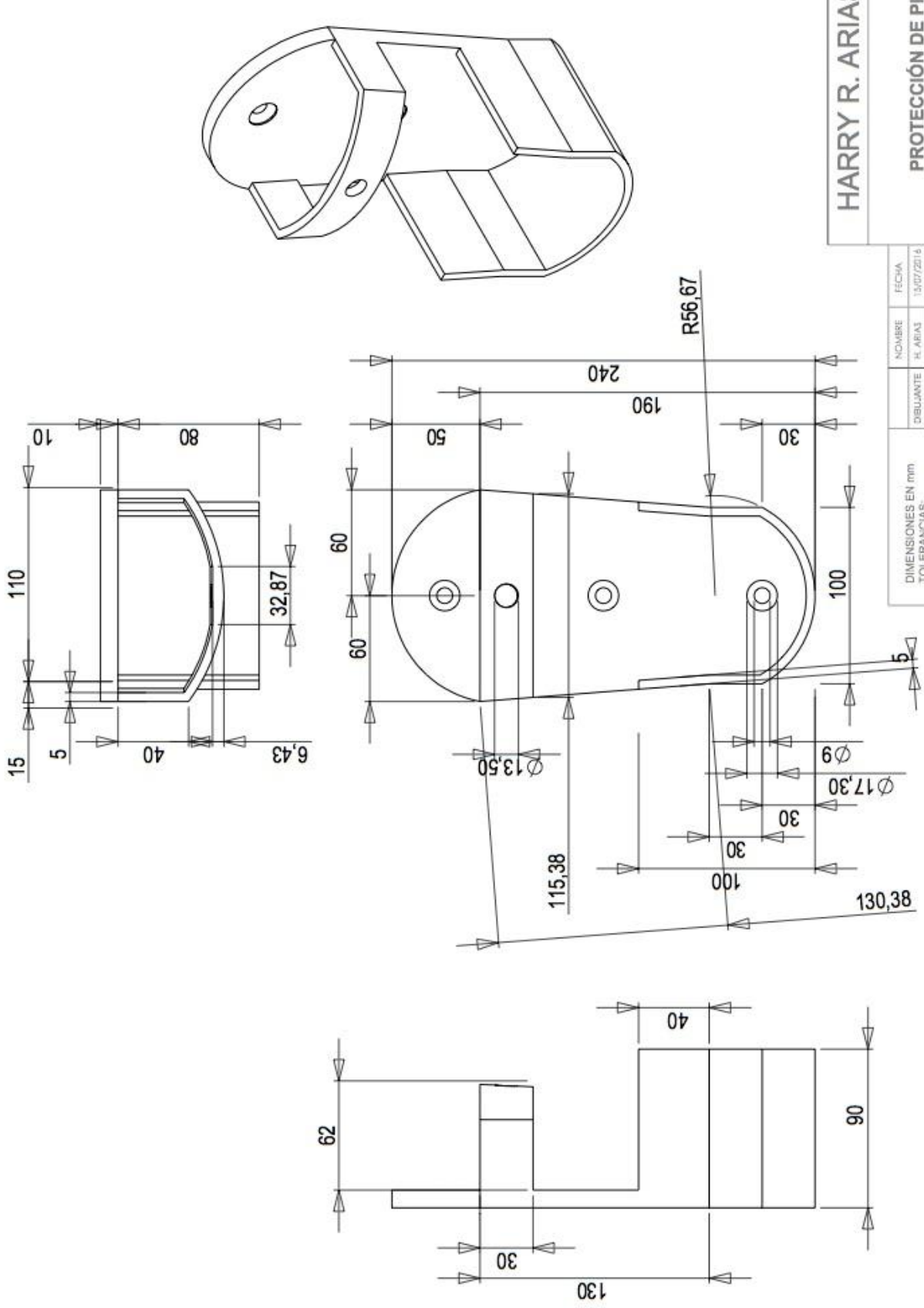
HARRY R. ARIAS R.

ESTRUCTURA DE PIE DE HEXO

NOMBRE		FECHA	
H. ARIAS		15/07/2016	
REVISION		COMENTARIOS	
H. ARIAS		01/05/2016	

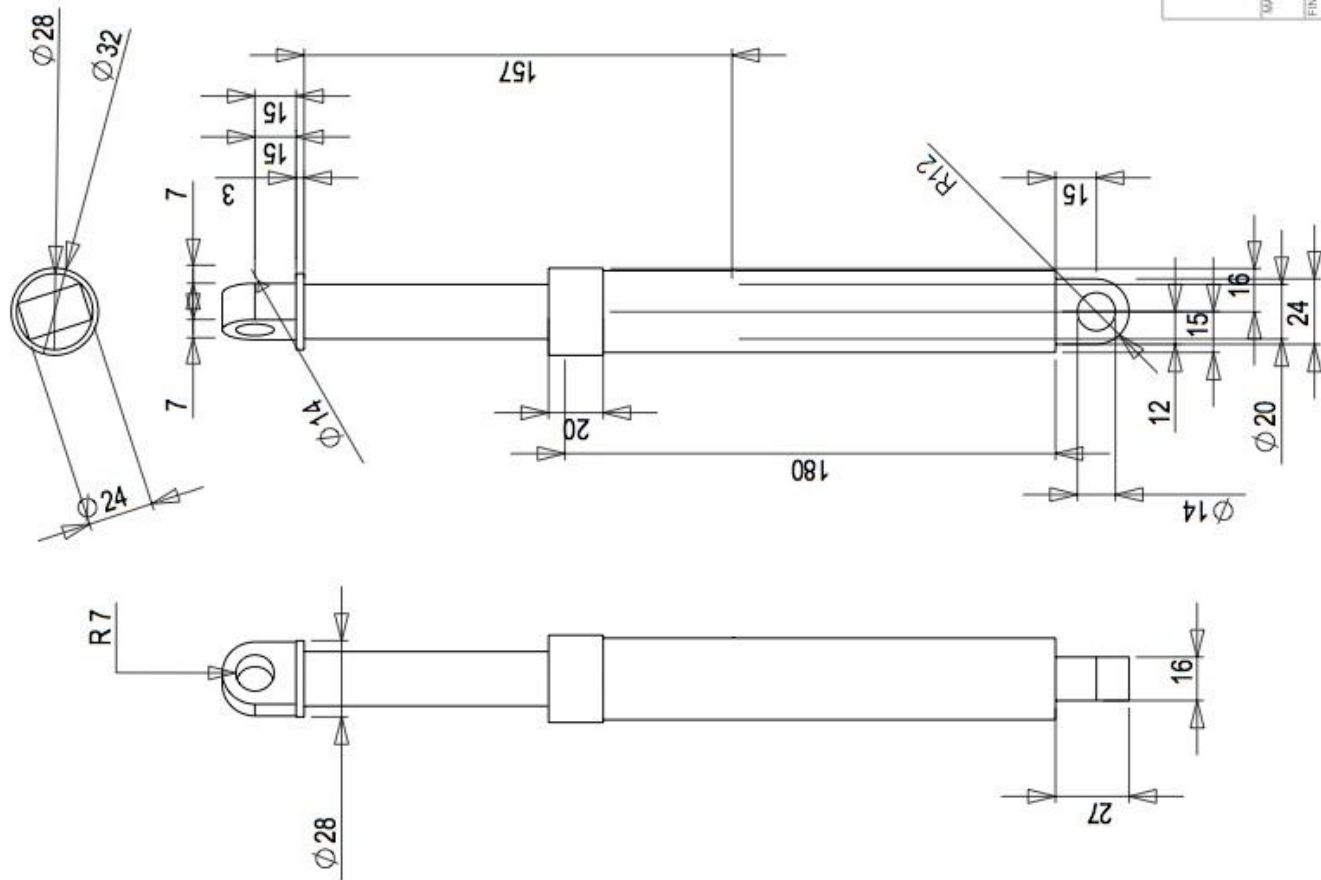
OBJ. NO.	HE-013	REV.
ESCALA:	PESO:	HUJA 1 DE 1

DIMENSIONES EN mm.	
TOLERANCIAS: ± 0,05	
ANGULAR: ± 0,05	
MATERIAL: ALUMINIO 6160 T6	
FINALIZADO	15/07/2016

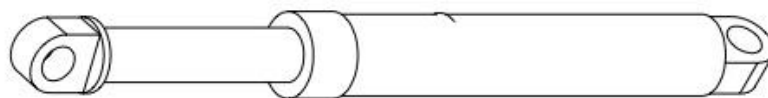
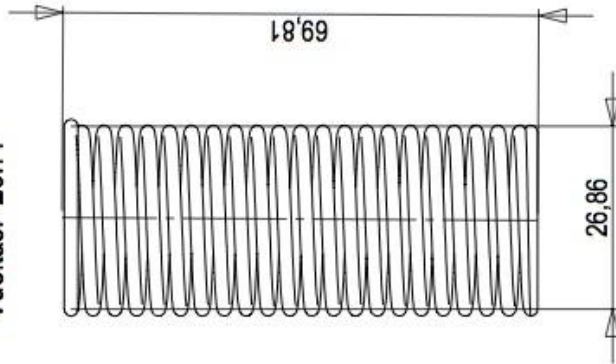


DIBUJANTE: H. ARIAS		NOMBRE: H. ARIAS		FECHA: 15/07/2016	
REVISIÓN: H. ARIAS		COMENTARIOS:		01/05/2016	
DIMENSIONES EN mm					
TOLERANCIAS: FRACCIONAL: ± 0.05					
ANGULAR: ± 0.05					
MATERIAL: TECNOPOLIMERO - NYLON					
FINALIZADO: 15 /07/2016					

HARRY R. ARIAS R.	
PROTECCIÓN DE PIE DE HEXO	
DBJ. NO.:	HE-014
ESCALA:	PESO:
REV.:	HUJA 1 DE 1



Resorte Interno
Vueltas: 20.77



HARRY R. ARIAS R.

ELEMENTO DE SOPORTE
DE HEXO

NOBRE	FECHA
H. ARIAS	13/07/2016
H. ARIAS	01/08/2016

DIBUJANTE	REVISOR	COMENTARIOS

OBJ. NO.	PESO:	REV.

DIMENSIONES EN mm.	FINALIZADO
TOLERANCIAS:	15 / 07 / 2016
FRACCIONAL : 0.05	
ANGULAR : 0.05	
MATERIAL:	
ALUMINIO 6160 T6	

ANEXO 2

Tablas y figuras para el cálculo de resortes

Material ASTM núm.	Módulo en cortante, G		Módulo en tensión, E	
	(psi)	(GPa)	(psi)	(GPa)
Acero estirado en frío: A227	11.5×10^6	79.3	28.6×10^6	197
Alambre para instrumentos musicales: A228	11.85×10^6	81.7	29.0×10^6	200
Templado en aceite: A229	11.2×10^6	77.2	28.5×10^6	196
Al cromo-vanadio: A-231	11.2×10^6	77.2	28.5×10^6	196
Al cromo-silicio: A401	11.2×10^6	77.2	29.5×10^6	203
Aceros inoxidables: A313				
Tipos 302, 304, 316	10.0×10^6	69.0	28.0×10^6	193
Tipo 17-7 PH	10.5×10^6	72.4	29.5×10^6	203
Latón de resortes: B134	5.0×10^6	34.5	15.0×10^6	103
Bronce fosforado: B159	6.0×10^6	41.4	15.0×10^6	103
Cobre al berilio: B197	7.0×10^6	48.3	17.0×10^6	117
Monel y K-Monel	9.5×10^6	65.5	26.0×10^6	179
Inconel e Inconel-X	10.5×10^6	72.4	31.0×10^6	214

Nota: Los datos son valores promedio. Puede haber pequeñas variaciones por el tamaño del alambre y su tratamiento.

Tabla A1. Módulo de elasticidad en cortante (G) de alambres

(Mott, 2006)

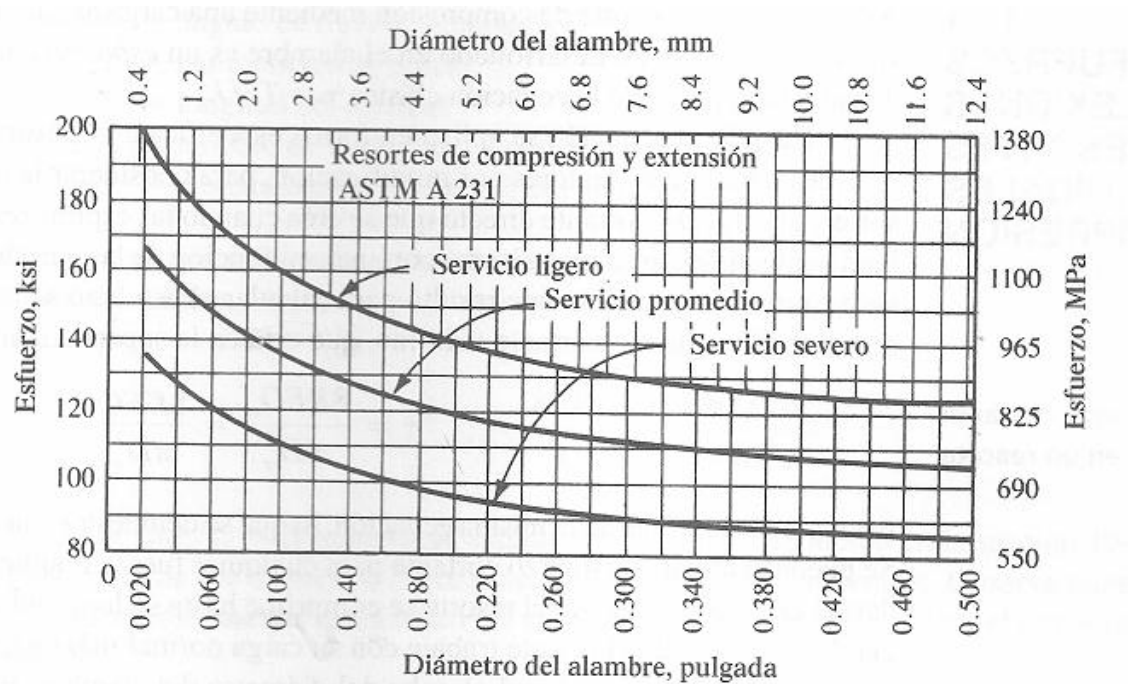


Figura A1. Esfuerzos cortantes para alambre de acero ASTM A231

(Mott, 2006)

Calibre núm.	Calibre U.S. para alambre de acero (pulg) ^a	Calibre para alambre de instrumentos musicales (pulg) ^b	Calibre Brown & Sharpe (pulg) ^c	Diámetros métricos preferidos (mm) ^d
7/0	0.4900			13.0
6/0	0.4615	0.004	0.5800	12.0
5/0	0.4305	0.005	0.5165	11.0
4/0	0.3938	0.006	0.4600	10.0
3/0	0.3625	0.007	0.4096	9.0
2/0	0.3310	0.008	0.3648	8.5
0	0.3065	0.009	0.3249	8.0
1	0.2830	0.010	0.2893	7.0
2	0.2625	0.011	0.2576	6.5
3	0.2437	0.012	0.2294	6.0
4	0.2253	0.013	0.2043	5.5
5	0.2070	0.014	0.1819	5.0
6	0.1920	0.016	0.1620	4.8
7	0.1770	0.018	0.1443	4.5
8	0.1620	0.020	0.1285	4.0
9	0.1483	0.022	0.1144	3.8
10	0.1350	0.024	0.1019	3.5
11	0.1205	0.026	0.0907	3.0
12	0.1055	0.029	0.0808	2.8
13	0.0915	0.031	0.0720	2.5
14	0.0800	0.033	0.0641	2.0
15	0.0720	0.035	0.0571	1.8
16	0.0625	0.037	0.0508	1.6
17	0.0540	0.039	0.0453	1.4
18	0.0475	0.041	0.0403	1.2
19	0.0410	0.043	0.0359	1.0
20	0.0348	0.045	0.0320	0.90
21	0.0317	0.047	0.0285	0.80
22	0.0286	0.049	0.0253	0.70

Tabla A2. Calibres y diámetros de alambres para resortes
(Mott, 2006)

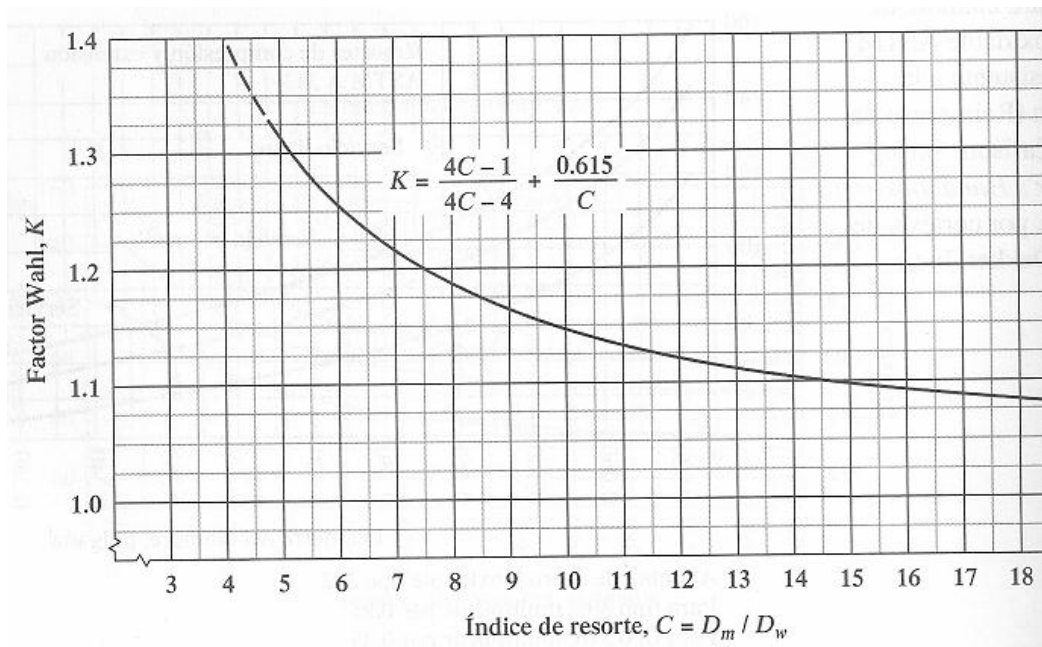


Figura A2. Factor Wahl en función del índice de resorte
(Mott, 2006)

ANEXO 3

Características técnicas de los servo actuadores

LM-H3 Series Specifications

Linear servo motor model		LM-H3	P2A-07P-BSS0	P3A-12P-CSS0	P3B-24P-CSS0	P3C-36P-CSS0	P3D-48P-CSS0	P7A-24P-ASS0	P7B-48P-ASS0	P7C-72P-ASS0	P7D-96P-ASS0	
Primary side (coil)	LM-H3											
	LM-H3	S20-288-BSS0	S30-288-CSS0					S70-288-ASS0				
Secondary side (magnet)	LM-H3	S20-384-BSS0	S30-384-CSS0					S70-384-ASS0				
	LM-H3	S20-480-BSS0	S30-480-CSS0					S70-480-ASS0				
	LM-H3	S20-768-BSS0	S30-768-CSS0					S70-768-ASS0				
	LM-H3	S20-960-BSS0	S30-960-CSS0					S70-960-ASS0				
Compatible servo amplifier model	MR-J4- MR-J4W_-	Refer to "Combinations of Linear Servo Motor and Servo Amplifier" on p. 3-5 in this catalog.										
Power supply capacity	[kVA]	0.9	0.9	1.3	1.9	3.5	1.3	3.5	3.8	5.5		
Cooling method		Natural cooling										
Thrust	Continuous ^(Note 5)	[N]	70	120	240	360	480	240	480	720	960	
	Maximum	[N]	175	300	600	900	1200	600	1200	1800	2400	
Maximum speed ^(Note 1)	[m/s]	3.0										
Magnetic attraction force	[N]	630	1100	2200	3300	4400	2200	4400	6600	8800		
Rated current	[A]	1.8	1.7	3.4	5.1	6.8	3.4	6.8	10.2	13.6		
Maximum current	[A]	5.8	5.0	9.9	14.9	19.8	9.6	19.1	28.6	38.1		
Regenerative braking frequency ^(Note 2)	MR-J4- [times/min]	175	95	108	78	300	108	308	210	159		
	MR-J4W_- [times/min]	173 ^(Note 3)	95 ^(Note 4)	271	197	-	241	-	-	-		
Recommended load to motor mass ratio		Maximum of 35 times the mass of the linear servo motor primary side										
Insulation class		155 (F)										
Structure		Open (IP rating: IP00)										
Environment	Ambient temperature	Operation: 0 °C to 40 °C (non-freezing), storage: -15 °C to 70 °C (non-freezing)										
	Ambient humidity	Operation: 80 %RH maximum (non-condensing), storage: 90 %RH maximum (non-condensing)										
	Ambience	Indoors (no direct sunlight); no corrosive gas, inflammable gas, oil mist or dust										
	Altitude	1000 m or less above sea level										
Vibration resistance		49 m/s ²										
Compliance to global standards		Refer to "Conformity with Global Standards and Regulations" on p. 59 in this catalog.										
Mass	Primary side (coil)	[kg]	0.9	1.3	2.3	3.3	4.3	2.2	3.9	5.6	7.3	
	Secondary side (magnet)	[kg]	288 mm/pc: 0.7 384 mm/pc: 0.9 480 mm/pc: 1.1 768 mm/pc: 1.8	288 mm/pc: 1.0 384 mm/pc: 1.4 480 mm/pc: 1.7 768 mm/pc: 2.7					288 mm/pc: 2.8 384 mm/pc: 3.7 480 mm/pc: 4.7 768 mm/pc: 7.4			

Tabla A3. Características técnicas de servo motores lineales LM-H3
(Servo amplifier & motors Melservo-J4, 2016)

TM-RFM Series Specifications

Direct drive motor model	TM-RFM	002C20	004C20	006C20	006E20	012E20	018E20	
Compatible servo amplifier model	MR-J4- MR-J4W_-	Refer to "Combinations of Direct Drive Motor and Servo Amplifier" on p. 4-1 in this catalog.						
Motor outer diameter (frame dimensions)	[mm]	ø130			ø180			
Power supply capacity ¹⁾	[kVA]	0.25	0.38	0.53	0.46	0.81	1.3	
Continuous running duty	Rated output	[W]	42	84	126	126	251	377
	Rated torque ^(Note 2)	[N·m]	2	4	6	6	12	18
Maximum torque	[N·m]	6	12	18	18	36	54	
Rated speed	[r/min]	200						
Maximum speed	[r/min]	500						
Permissible instantaneous speed	[r/min]	575						
Power rate at continuous rated torque	[kW/s]	3.7	9.6	16.1	4.9	12.9	21.8	
Rated current	[A]	1.3	2.1	3.2	3.2	3.8	5.9	
Maximum current	[A]	3.9	6.3	9.6	9.6	12	18	
Regenerative braking frequency ²⁾	MR-J4-	[times/min]	No limit	5830	2950	464	572	421
	MR-J4W_-	[times/min]	No limit	5620	No limit	2370	1430	1050
Moment of inertia J	[x 10 ⁻⁴ kg·m ²]	10.9	16.6	22.4	74.0	111	149	
Recommended load to motor inertia ratio ^(Note 1)		50 times or less						
Absolute accuracy	[s]	±15			±12.5			
Speed/position detector		Absolute/incremental 20-bit encoder ³⁾ (resolution: 1048576 pulses/rev)						
Insulation class		155 (F)						
Structure		Totally enclosed, natural cooling (IP rating: IP42) ^(Note 2)						
Environment ⁴⁾	Ambient temperature	Operation: 0 °C to 40 °C (non-freezing), storage: -15 °C to 70 °C (non-freezing)						
	Ambient humidity	Operation: 80 %RH maximum (non-condensing), storage: 90 %RH maximum (non-condensing)						
	Ambience	Indoors (no direct sunlight); no corrosive gas, inflammable gas, oil mist, dust or splash of oil or water						
	Altitude	1000 m or less above sea level						
Vibration resistance ⁵⁾		X: 49 m/s ² Y: 49 m/s ²						
Vibration rank		V10 ⁷⁾						
Compliance to global standards		Refer to "Conformity with Global Standards and Regulations" on p. 59 in this catalog.						
Rotor permissible load ⁶⁾	Moment load	[N·m]	22.5			70		
	Axial load	[N]	1100			3300		
Mass	[kg]	5.2	6.8	8.4	11	15	18	

Tabla A4. Características técnicas de servo motores rotacionales TM-RFM
(Servo amplifier & motors Melservo-J4, 2016)