

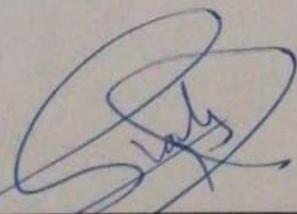
Salamanca, Gto., a 17 de Enero del 2020.

M. en I. HERIBERTO GUTIÉRREZ MARTIN
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
P R E S E N T E.-

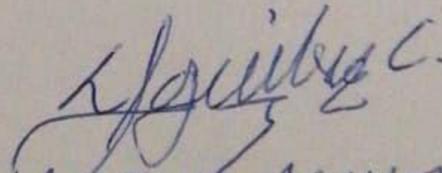
Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno(a) JULIO CESAR GALVIS CHACON del *Programa de Maestría en INGENIERÍA MECÁNICA* y cuyo número de *NUA* es: 145286 del cual soy director. El título de la tesis es: DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO PARA UN ROBOT DE ASISTENCIA SOCIAL AL ADULTO MAYOR.

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

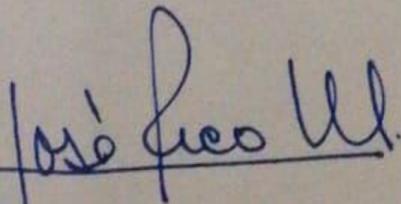
A T E N T A M E N T E



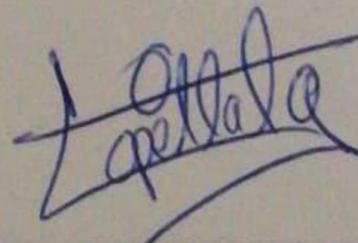
NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO



LUZ ANTONIO AGUILERA C.
NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS



José Mario Rico Martínez
NOMBRE Y FIRMA
PRESIDENTE



NOMBRE Y FIRMA
VOCAL



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

Campus Irapuato-Salamanca División de Ingenierías

“Diseño y simulación del sistema mecánico para un robot de asistencia social al adulto mayor”

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

PRESENTA:

JULIO CÉSAR GALVIS CHACÓN

ASESORES:

DR. MAXIMINO ANTONIO GONZÁLEZ PALACIOS

DR. LUZ ANTONIO AGUILERA CORTÉS

SALAMANCA, GTO

ENERO, 2020

DEDICATORIA

A mis padres Julio y Beatriz, y hermano Javier, por el apoyo incondicional en todos los proyectos emprendidos en mi vida, a mi esposa Madai y a mi hijo César, por ser la motivación para luchar por mis sueños día a día.

A mis abuelitos, Lazaro, Toña y Celmira, por su amor incondicional; a toda mi familia por apoyarme desde Colombia para lograr esta hermosa meta; a mi abuelito Luis y mi tío Luis, que desde el cielo acompañan cada uno de los pasos que doy en mi vida.

A mi compañeros de maestría y de vida, por el apoyo incondicional en esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios en primer lugar, a mis padres, hermano, esposa y mi César Jr., a toda mi familia, porque sin su apoyo esto no sería posible.

A mis asesores Dr. Maximino Antonio González Palacios y al Dr. Luz Antonio Aguilera Cortés, por la oportunidad y apoyo académico en el desarrollo de este proyecto.

A mis evaluadores Dr. Gustavo Capilla González y al Dr. José María Rico Martínez, por su asesoría e invaluable observaciones, las cuales sin duda ayudaron a mejorar el proyecto.

Al Dr. José Manuel Riesco Ávila, quien en su función como coordinador del posgrado, nos permite participar en el proceso de selección para el ingreso a la maestría.

Al profesor Jorge Enrique Meneses Flórez, por su apoyo desde Colombia, para el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad de Guanajuato y al CONACYT, por el apoyo y la oportunidad para el desarrollo del posgrado.

A mis amigos y conocidos, por acompañarme en todos los momentos del proceso de la maestría.

A todos muchas gracias.

CONTENIDO

<u>NOMENCLATURA</u>	<u>VII</u>
<u>GLOSARIO</u>	<u>IX</u>
<u>ÍNDICE DE FIGURAS</u>	<u>X</u>
<u>ÍNDICE DE TABLAS</u>	<u>XIV</u>
<u>RESUMEN</u>	<u>XV</u>
<u>ABSTRACT</u>	<u>XVI</u>
<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>XVII</u>
<u>1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA</u>	<u>1</u>
<u>2. ANTECEDENTES Y MERCADO ACTUAL</u>	<u>2</u>
2.1 SISTEMAS BASADOS EN ESTACIONES DE TRABAJO	2
2.2 SISTEMAS DISEÑADOS PARA SILLAS DE RUEDAS	5
2.3 SISTEMAS ROBÓTICOS MÓVILES	6
2.4 ROBOTS SOCIALES	8
2.5 MERCADO ACTUAL	11
<u>3. DIMENSIONES Y ERGONOMÍA</u>	<u>13</u>
3.1 ERGONOMÍA EN LAS SILLAS DE RUEDAS.	13
3.2 DIMENSIONES DEL SER HUMANO.	13
3.3 DIMENSIONES DE LAS EDIFICACIONES	14
<u>4. GENERACIÓN DEL DISEÑO</u>	<u>16</u>
4.1 PROPUESTAS DE SOLUCIÓN	18
4.1.1 PROPUESTA 1	18
4.1.2 PROPUESTA 2	19
	IV

4.1.3 PROPUESTA 3	20
4.1.4 PROPUESTA 4	21
4.1.5 PROPUESTA 5	22
4.1.6 PROPUESTA 6	24
4.1.7 BRAZOS ROBÓTICOS	25
4.2 SELECCIÓN DEL MODELO	26
5. ANÁLISIS, DESARROLLO Y EVALUACIÓN DEL DISEÑO SELECCIONADO	28
5.1 DISEÑO DE LA CABECERA, ESPALDAR, ASIENTO Y APOYA PIERNAS	28
5.2 ACTUADORES LINEALES PARA EL ROBOT	36
5.2.2 ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS EN EL ROBOT	37
5.2.2.1 Análisis de posición	37
5.2.2.2 Determinación de parámetros para la ubicación de los actuadores lineales.	39
5.2.3 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE LOS ACTUADORES	43
5.2.3.1 Análisis del tamaño de los actuadores y ubicación para la Cabecera.	43
5.2.3.2 Análisis del tamaño de los actuadores y ubicación para el Espaldar y Asiento	46
5.2.3.3 Análisis del tamaño de los actuadores y ubicación para el Apoya piernas:	48
5.2.3 ANÁLISIS DE VELOCIDAD Y ACELERACIÓN GENERAL PARA EL MECANISMO	51
5.2.3.1 Análisis de velocidad y aceleración para la cabecera	52
5.2.3.2 Análisis de velocidad y aceleración para los sistemas espaldar - asiento	53
5.2.3.3 Análisis de velocidad y aceleración para el apoya piernas	55
5.2.3.4 Conclusiones análisis de velocidad y aceleración en los tres sistemas	56
5.3 BRAZOS ROBÓTICOS	56
5.4 SOPORTE PARA EL ROBOT	60
5.5 SOPORTE PARA APOYAR LOS PIES.	64
5.6 SELECCIÓN DEL MOTOR Y RUEDAS.	66
5.7 CARCASA DEL ROBOT EN MODO ASISTENTE.	69
5.8 MODOS DEL ROBOT CON UN MODELO HUMANO.	72
5.8.1 MODO ASISTENTE:	72
5.8.2 MODO SILLA:	73
5.8.3 MODO CAMA:	75
6. EVALUACIÓN DE ESFUERZOS, FACTORES DE SEGURIDAD Y RESULTADOS.	81
6.1 PRIMERA SIMULACIÓN: SISTEMAS DE COJINERÍA, MECANISMOS DE MOVIMIENTO Y CONEXIONES PARA EL MODO CAMA.	81
6.2 SEGUNDA SIMULACIÓN: CHASIS EN EL MODO CAMA.	94
6.3 TERCERA SIMULACIÓN: SISTEMAS DE COJINERÍA, MECANISMOS DE MOVIMIENTO Y CONEXIONES PARA EL MODO SILLA.	98
6.4 CUARTA SIMULACIÓN: CHASIS PARA EL MODO SILLA.	110
6.5 QUINTA SIMULACIÓN: SISTEMA APOYA PIES.	114

<u>7. CONCLUSIONES</u>	<u>121</u>
<u>8. TRABAJO A FUTURO</u>	<u>122</u>
<u>ANEXOS</u>	<u>123</u>
<i>ANEXO A: ANÁLISIS DE POSICIÓN ACTUADORES LINEALES - DESARROLLO MATEMÁTICO</i>	124
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>132</u>

NOMENCLATURA

Lb_f	Libras fuerza
kg	Kilogramos
mm	Milímetro
m	Metro
m^2	Metro cuadrado
<i>MXN</i>	Peso mexicano
MDF	Tablero de fibra de densidad media
£	Libra esterlina
dB	Decibeles
mm/s	Milímetros por segundo
mm/s^2	Milímetros por segundo cuadrado
N	Newton
$\vec{r}_i (i = 1,2,3)$	Vectores de posición
$\text{sen}(\theta)$	Función seno
$\text{cos}(\theta)$	Función coseno
L_i	Longitud
\dot{L}_i	Primera derivada de la función longitud en el tiempo
\ddot{L}_i	Segunda derivada de la función longitud en el tiempo
θ_i	Ángulo u orientación
$\dot{\theta}_i$	Velocidad angular
$\ddot{\theta}_i$	Aceleración angular
$a_i, b_i (i = 1,2,3)$	Coordenadas de la ubicación de los extremos del actuador
C_i	Constante matemática para el análisis de posición
arctan	Función tangente inversa
β	Ángulo u orientación
arccos	Función coseno inverso

$f(x)$	Función cuya variable independiente es x
t	Variable que indica tiempo
vel	Velocidad
ac	Aceleración
VDC	Voltaje de corriente directa
km/h	Kilómetros por hora
Nm	Torque (Newton por metro)
rad/s	Radianes por segundo
MPa	Megapascales
Pa	Pascales
τ	Esfuerzo cortante
τ_s	Esfuerzo cortante de cedencia
N_S	Factor de seguridad

GLOSARIO

- **Robot autónomo:** Son sistemas que trabajan de forma eficiente en sistemas complejos sin la supervisión o guía del ser humano.
- **Sistema mecatrónico:** Es un sistema digital capaz de obtener señales, procesarlas y emitir una respuesta a través de actuadores (mecánicos, térmicos, entre otros), creando movimientos o acciones sobre un elemento, conjunto o sistema.
- **Sensor:** Es un dispositivo que puede variar una propiedad debido a magnitudes físicas o químicas y transformarlas con un transductor en una respuesta eléctrica.
- **Controlador:** Elemento fundamental en los sistemas de control, en función de un conjunto de entradas y un algoritmo programado en su interior, manipula la acción de un conjunto de actuadores.
- **Robot SCARA:** robot que obedece los desplazamientos de Schönflies.
- **Grados de libertad:** se refiere al número mínimo de parámetros que se necesitan para determinar de forma completa la posición y orientación de un mecanismo.
- **Telescópico:** Que está formado por una serie de piezas o tubos alargados que se extienden y recogen al encajar unos con otros.
- **Sensores de ultrasonido:** son detectores de proximidad que trabajan libres de contacto mecánicos, emiten sonido y a partir del tiempo que la señal tarda en regresar, calculan la distancia, a la cual, se encuentra el elemento objeto de la medida.
- **Actuador lineal:** dispositivo que transforma el movimiento de rotación en un movimiento de traslación (de empuje y jalado)
- **Unión revoluta:** (par cinemático) unión entre dos piezas que permite la rotación de las mismas alrededor de un eje común.
- **Unión prismática:** (par cinemático) unión entre dos piezas que permite la traslación de un elemento en relación a otro.
- **Pick and place:** robots cuyo efector final está enfocado en las funciones de recoger y colocar.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Robot Momaru y Silla de ruedas transformable [5] [6]	1
Figura 2. a) Handy 1 Sistema de Comida b) Handy 1 sistema de maquillaje [9]	3
Figura 3. DeVAR Estación de trabajo robótica [10]	3
Figura 4. RAID [11]	4
Figura 5. Estación de trabajo robótica para transporte de piezas [12]	4
Figura 6. MANUS [13]	5
Figura 7. INVENTAID [13]	5
Figura 8. Sistema cama robótica inteligente [14]	6
Figura 9. WALKY [15]	7
Figura 10. Robot asistente doméstico con un chasis rodante [16]	7
Figura 11. Asistente robótico móvil amigable al ser humano [17]	8
Figura 12. AIBO vista frontal [18]	9
Figura 13. AIBO vista posterior [18]	9
Figura 14. PARO Robot Foca [19]	10
Figura 15. ROBOT PERSONAL ASSISTANT [20]	10
Figura 16. Care-o-Bot versiones 1 y 2 [21]	11
Figura 17. Care-o-Bot 3[22]	11
Figura 18. Care-o-Bot 4[23]	12
Figura 19. Care-o-Bot 4 a detalle [23]	12
Figura 20. Dimensiones del adulto mayor América latina [26]	13
Figura 21. Dimensiones Antropométricas del adulto Mayor sentado [26]	14
Figura 22. Dimensiones de las habitaciones [27]	14
Figura 23. Acceso dimensiones antropométricas [27]	15
Figura 24. Primera solución	19
Figura 25. Segunda solución	20
Figura 26. Tercera solución	21
Figura 27. Cuarta solución	22
Figura 28. Quinta Solución	23
Figura 29. Sexta solución	25
Figura 30. Brazos robóticos	25
Figura 31. Brazos robóticos bastidor	26
Figura 32. Propuesta de diseño elegida	28
Figura 33. Lámina de acero doblada	29
Figura 34. Inserto para madera y tornillo	29
Figura 35. Conjuntos para cabecera, espaldar, asiento y apoya piernas	30
Figura 36. Cojinería completa	30
Figura 37. Refuerzos en Espaldar y Asiento	31
Figura 38. Unión Asiento - Apoya Piernas	32
Figura 39. Uniones Asiento - Apoya piernas 2	32
Figura 40. Unión Cabecera - Espaldar	33
Figura 41. Uniones Cabecera - Espaldar 2	33
Figura 42. Unión Espaldar - Asiento	34
Figura 43. Pasador principal - conexión espaldar - asiento	34
Figura 44. Conexión espaldar - pasador principal	35
Figura 45. Conexión pasador principal - asiento	35
Figura 46. Actuadores "Electric Bed Chair" [32]	36

<i>Figura 47. Mecanismo Actuadores lineales</i>	37
<i>Figura 48. Longitudes actuadores [32]</i>	43
<i>Figura 49. Análisis posición actuador cabecera</i>	43
<i>Figura 50. Soluciones para la ubicación del actuador - cabecera</i>	44
<i>Figura 51. Posición actuador lineal con la solución propuesta - cabecera</i>	45
<i>Figura 52. Análisis posición actuadores: Espaldar - Asiento</i>	46
<i>Figura 53. Soluciones para la ubicación del actuador: Espaldar Asiento</i>	47
<i>Figura 54. Posición actuador lineal con la solución propuesta - Espaldar Asiento</i>	48
<i>Figura 55. Análisis posición actuador - Apoya piernas</i>	48
<i>Figura 56. Soluciones para la ubicación del actuador: Apoya piernas</i>	49
<i>Figura 57. Separación punto de rotación - base: apoya piernas</i>	50
<i>Figura 58. Posición actuador lineal con la solución propuesta - Apoya piernas</i>	50
<i>Figura 59. Posición - velocidad - aceleración mecanismo cabecera</i>	52
<i>Figura 60. Orientación actuador lineal - velocidad angular - aceleración angular</i>	53
<i>Figura 61. Orientación θ_3 velocidad - aceleración</i>	53
<i>Figura 62. Posición - velocidad - aceleración mecanismo Espaldar Asiento</i>	54
<i>Figura 63. Orientación actuador lineal - velocidad angular - aceleración angular Espaldar Asiento</i>	54
<i>Figura 64. Orientación θ_3 velocidad - aceleración Espaldar Asiento</i>	54
<i>Figura 65. Posición - velocidad - aceleración mecanismo Apoya piernas</i>	55
<i>Figura 66. Orientación actuador lineal - velocidad angular - aceleración angular Apoya piernas</i>	55
<i>Figura 67. Orientación θ_3 velocidad - aceleración Apoya piernas</i>	56
<i>Figura 68. Brazos robóticos completos</i>	57
<i>Figura 69. Placa en el chasis para anclar al brazo robótico</i>	57
<i>Figura 70. Unión acople - actuador lineal vertical</i>	58
<i>Figura 71. Brazo robótico: vista en detalle</i>	58
<i>Figura 72. Acople pinza - actuador lineal</i>	59
<i>Figura 73. Descripción de la pinza [33]</i>	59
<i>Figura 74. Capacidades actuador lineal [32]</i>	59
<i>Figura 75. Chasis para el robot</i>	60
<i>Figura 76. Perfiles Chasis</i>	61
<i>Figura 77. Centro de masa - estructura modo cama</i>	61
<i>Figura 78. Diagrama de cuerpo libre - modo cama 1</i>	62
<i>Figura 79. Diagrama de cuerpo libre - modo cama 2</i>	63
<i>Figura 80. Descripción Soporte para apoyar los pies</i>	64
<i>Figura 81. Ubicación soporte para los pies</i>	64
<i>Figura 82. Posición vertical apoya pies</i>	65
<i>Figura 83. Ubicación final de la pieza móvil - Apoya pies</i>	65
<i>Figura 84. Conjunto Motor - Rueda</i>	66
<i>Figura 85. Banco de pruebas para medir la resistencia a la rodadura [35]</i>	67
<i>Figura 86. Resultados para una velocidad de 3.2 km/h [35]</i>	67
<i>Figura 87. Funcionamiento motor robot [36]</i>	68
<i>Figura 88. Ruedas auxiliares [37]</i>	69
<i>Figura 89. Conjunto chasis - Motor - Ruedas</i>	69
<i>Figura 90. Robot en modo asistente</i>	70
<i>Figura 91. Carcasa telescópica</i>	70
<i>Figura 92. Carcasa Apoya piernas - Espaldar - Cabecera</i>	71
<i>Figura 93. Carcasa para el chasis</i>	71
<i>Figura 94. Recubrimiento cabecera</i>	72

<i>Figura 95. Robot en forma asistente - usuario</i>	73
<i>Figura 96. Usuario accediendo en el modo silla</i>	74
<i>Figura 97. Sistema en el modo Silla de ruedas - usuario</i>	74
<i>Figura 98. Sistema en modo Cama - usuario</i>	75
<i>Figura 99. Cámara RGB [42]</i>	76
<i>Figura 100. Paso 1 - evaluación sistema modo cama</i>	82
<i>Figura 101. Propiedades mecánicas del pino</i>	82
<i>Figura 102. Características materiales para el cojinete</i>	83
<i>Figura 103. Características materiales "Medium Carbon Steel"</i>	83
<i>Figura 104. Simulación sistema en modo cama</i>	84
<i>Figura 105. Simulación sistema en modo cama a detalle: 1</i>	84
<i>Figura 106. Simulación sistema en modo cama a detalle: 2</i>	85
<i>Figura 107. Materiales sistema en modo cama</i>	85
<i>Figura 108. Condiciones de carga y soportes en el modo cama - 1</i>	86
<i>Figura 109. Condiciones de carga y soportes en el modo cama - 2</i>	86
<i>Figura 110. Condiciones de carga y soportes en el modo cama - 3</i>	87
<i>Figura 111. Zona de contacto chasis - marco estructural</i>	87
<i>Figura 112. Condiciones de carga y soportes en el modo cama - 4</i>	87
<i>Figura 113. Resultado esfuerzo equivalente: sistema en modo cama - 1</i>	88
<i>Figura 114. Resultado esfuerzo equivalente: sistema en modo cama - 2</i>	88
<i>Figura 115. Resultado deformación direccional: sistema en modo cama</i>	89
<i>Figura 116. Factores de seguridad en el modo cama</i>	89
<i>Figura 117. Factor de seguridad: pasador conexión en modo cama</i>	89
<i>Figura 118. Factor de seguridad: pasadores conexiones en modo cama</i>	90
<i>Figura 119. Esfuerzos en cojinetes Iglidur X en el modo cama</i>	90
<i>Figura 120. Factores de seguridad: conjuntos de cojinería - refuerzos estructurales - bases de aluminio modo cama</i>	91
<i>Figura 121. Factor de seguridad: asiento en el modo cama</i>	91
<i>Figura 122. Reacciones soporte 1 en el modo cama</i>	92
<i>Figura 123. Momentos soporte 1 en el modo cama</i>	92
<i>Figura 124. Reacciones soporte 2 en el modo cama</i>	92
<i>Figura 125. Momentos soporte 2 en el modo cama</i>	93
<i>Figura 126. Reacción Apoyo 1 en el modo cama</i>	93
<i>Figura 127. Reacción apoyo 2 en el modo cama</i>	93
<i>Figura 128. Reacciones en el pasador principal de conexión en el modo cama</i>	94
<i>Figura 129. Simulación chasis para el modo cama - 1</i>	94
<i>Figura 130. Materiales para el chasis en el modo cama</i>	95
<i>Figura 131. Simulación chasis para el modo cama - 2</i>	95
<i>Figura 132. Cargas equipos eléctricos y electrónicos en soporte para el modo cama</i>	96
<i>Figura 133. Cargas y soportes en el chasis para el modo cama</i>	96
<i>Figura 134. Resultados chasis en el modo cama: esfuerzo equivalente</i>	97
<i>Figura 135. Resultados chasis en el modo cama: Deformación</i>	97
<i>Figura 136. Resultados chasis en el modo cama: Factores de seguridad</i>	98
<i>Figura 137. Simulación del sistema en modo silla</i>	99
<i>Figura 138. Materiales en el modo silla</i>	99
<i>Figura 139. Simulación del sistema en modo silla - mallado</i>	100
<i>Figura 140. Simulación sistema en modo silla a detalle</i>	100
<i>Figura 141. Condiciones de carga y soportes en el modo silla - 1</i>	101
<i>Figura 142. Condiciones de carga y soportes en el modo silla - 2</i>	102
<i>Figura 143. Condiciones de carga y soportes en el modo silla - 3</i>	102

<i>Figura 144. Resultado esfuerzo equivalente: sistema en modo silla - 1</i>	<i>103</i>
<i>Figura 145. Resultado esfuerzo equivalente: sistema en modo silla - 2</i>	<i>103</i>
<i>Figura 146. Resultado deformación direccional: sistema en modo silla</i>	<i>104</i>
<i>Figura 147. Factores de seguridad en el modo silla</i>	<i>104</i>
<i>Figura 148. Factor de seguridad: pasador conexión en modo silla</i>	<i>105</i>
<i>Figura 149. Factor de seguridad: pasadores conexiones en modo silla</i>	<i>105</i>
<i>Figura 150. Esfuerzos en cojinetes Iglidur X en el modo silla</i>	<i>106</i>
<i>Figura 151. Factores de seguridad: conjuntos de cojinería - refuerzos estructurales - bases de aluminio modo silla</i>	<i>107</i>
<i>Figura 152. Factor de seguridad: asiento en el modo silla</i>	<i>107</i>
<i>Figura 153. Reacciones soporte 1 en el modo silla</i>	<i>108</i>
<i>Figura 154. Momentos soporte 1 en el modo silla</i>	<i>108</i>
<i>Figura 155. Reacciones soporte 2 en el modo silla</i>	<i>108</i>
<i>Figura 156. Momentos soporte 2 en el modo silla</i>	<i>109</i>
<i>Figura 157. Reacción Apoyo 1 en el modo silla</i>	<i>109</i>
<i>Figura 158. Reacciones en el pasador principal de conexión en el modo silla</i>	<i>109</i>
<i>Figura 159. Simulación chasis para el modo silla - 1</i>	<i>110</i>
<i>Figura 160. Materiales para el chasis en el modo silla</i>	<i>110</i>
<i>Figura 161. Simulación chasis para el modo silla - 2</i>	<i>111</i>
<i>Figura 162. Cargas sobre el soporte en el modo silla debido a componentes eléctricos y electrónicos</i>	<i>111</i>
<i>Figura 163. Cargas y soportes en el chasis para el modo silla</i>	<i>112</i>
<i>Figura 164. Resultados chasis en el modo silla: esfuerzo equivalente</i>	<i>112</i>
<i>Figura 165. Resultados chasis en el modo silla: deformación</i>	<i>113</i>
<i>Figura 166. Resultados chasis en el modo cama: Factores de seguridad</i>	<i>113</i>
<i>Figura 167. Paso 1: Evaluación conjunto apoya pies</i>	<i>114</i>
<i>Figura 168. Paso 2: Evaluación conjunto apoya pies</i>	<i>115</i>
<i>Figura 169. Paso 2: Evaluación conjunto apoya pies - detalle</i>	<i>115</i>
<i>Figura 170. Paso 3: Evaluación conjunto apoya pies</i>	<i>116</i>
<i>Figura 171. Resultados soporte apoya pies: Esfuerzo equivalente</i>	<i>116</i>
<i>Figura 172. Resultados soporte apoya pies: Deformación del sistema</i>	<i>117</i>
<i>Figura 173. Resultados soporte apoya pies: Deformación unitaria equivalente</i>	<i>117</i>
<i>Figura 174. Factores de seguridad: Elemento cilíndrico</i>	<i>118</i>
<i>Figura 175. Factores de seguridad: Placa móvil</i>	<i>118</i>
<i>Figura 176. Factores de seguridad: Soporte superior</i>	<i>119</i>
<i>Figura 177. Factores de seguridad: Soporte inferior</i>	<i>119</i>
<i>Figura 178. Anexo A: Esquema simplificado</i>	<i>124</i>
<i>Figura 179. Anexo A: Caso 1</i>	<i>128</i>
<i>Figura 180. Anexo A: Caso 2</i>	<i>129</i>
<i>Figura 181. Anexo A: Caso 3</i>	<i>130</i>
<i>Figura 182. Anexo A: Caso 4</i>	<i>131</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Matriz función de calidad</i>	17
<i>Tabla 2. Requerimientos y especificaciones</i>	17
<i>Tabla 3. Requerimientos seleccionados</i>	18
<i>Tabla 4. Evaluación propuestas</i>	27
<i>Tabla 5. Costos para la fabricación</i>	77

RESUMEN

El panorama a futuro, respecto al cuidado del adulto mayor se torna incierto debido a la falta inevitable de trabajadores de la salud enfocados en esta área, la posibilidad de que los números aumenten es baja, puesto que la población humana actualmente tiende hacia una disminución de la población que puede trabajar y a un aumento del número de personas en la tercera edad, en cifras, se espera que en el 2050, el conjunto de hombres y mujeres que superen los 65 años en México, representen un 25% de la población total.

Como respuesta a lo anterior, se crean de dispositivos que puedan auxiliar, en el desarrollo de las actividades diarias al adulto mayor, tal es el caso de robots asistentes como Care-o-bot, robots de rehabilitación como Handy, Raid, y sistemas robóticos de compañía como AIBO o PARO, muchos de los mismos aún son modelos prototipo, si se encuentran en el mercado sus precios son muy altos, convirtiéndose en un lujo, de esta forma se excluye a gran parte de la sociedad respecto a su uso.

Es necesario, iniciar la búsqueda de robots que suplan esta necesidad, pero que a su vez, puedan ser adquiridos por la mayor parte de la población adulta mayor.

Como un inicio hacia este proceso, parte el presente proyecto, pues el resultado del mismo es el sistema mecánico para un robot, encargado de la asistencia y el transporte dentro del hogar para adultos mayores.

El sistema mecánico se selecciona de una serie de posibles opciones, creadas desde el enfoque morfológico del diseño.

La solución analizada, consta de un conjunto de mueblería, separado en 4 partes principales, una cabecera, un espaldar, un asiento y un apoya piernas, los cuales, pueden cambiar sus orientaciones debido a mecanismos basados en actuadores lineales, como soporte especial se crea un conjunto para que el usuario apoye sus pies, los sistemas anteriores se ubican sobre un chasis y se recubren con una carcasa que le brinda una forma robótica humanoide acorde a los requerimientos del adulto mayor, como sistemas especiales cuenta con un conjunto de actuadores que funcionan, como dos brazos.

La orientación y forma de los componentes, permiten al dispositivo tener tres formas de funcionamiento, una de ellas es la de un asistente, el cual puede llevar y traer elementos de un lugar a otro, también puede convertirse en una cama robótica y el último de los modos de trabajo, es el de una silla robótica de ruedas. El resultado final es el sistema mecánico de un robot de servicio y rehabilitación, enfocado en la asistencia y el transporte del adulto mayor dentro del hogar.

ABSTRACT

The future outlook, regarding the care of the elderly becomes uncertain due to the insufficiency of health workers focussed on this field, an the expected worsening of this situation, since the human population currently tends towards a decrease in the population that can work and an increase in the number of the elderly, in numbers, it is expected that in 2050, people over 65 in Mexico, represent 25% of the total population.

In response to the above, devices are created to assist in the development of daily activities for the elderly, such is the case of assistant robots such as Care-o-bot, or rehabilitation robots such as Handy, Raid, and companion robotic systems such as AIBO or PARO, many of them are still prototype models, if they are found in the market, their prices are very high, becoming a luxury, in this way a large part of society is excluded regarding its use.

It is necessary, to start the search for robots that can satisfy this need, but which, can be acquired by most of the elderly population.

The present project arises as a start towards this process, the result of it is the mechanical system for a robot, it would can asist in daily activities and transport older adults in their homes.

The mechanical system arises from a selection of several solutions created from the morphological approach of design.

The analyzed solution consists of a set of furniture, separated into 4 main parts, a headboard, a back, a seat and a leg support, which can change their orientations due to mechanisms based on linear actuators, as special support is created a set for the user to support their feet, the mentioned systems are located on a chassis and are covered with a housing that provides a humanoid robotic shape according to the requirements of the elderly, as special system, it has a set of actuators that work like two arms.

The orientation and shape of the components, allow the device to have three ways of operation, one of them is become an assistant, who can carry and bring items from one place to another, can also become a robotic bed and the last one mode is a robotic wheelchair. The end result is the mechanical system of a service and rehabilitation robot, focused on the assistance and transportation of the elderly at home.

INTRODUCCIÓN

Debido a la falta de personal calificado para atender a la población mayor de 65 años, y en actual medida la tendencia a la baja en la población mundial, se hace necesario crear un dispositivo automático capaz de ayudar en el cuidado del ser humano, uno de los retos para este tipo de proyectos, es lograr convertirse en un elemento universal, esto consiste en primer lugar que el precio final, en el mercado permita la adquisición del mismo, por un gran porcentaje de la población, desde el enfoque actual, la solución a este problema es un robot, cuyo campo de acción no solo sea el de la asistencia, sino que además incluya componentes que ayuden a la rehabilitación del usuario. El presente documento tiene como fin, ilustrar el proceso de desarrollo para el sistema mecánico del robot de asistencia social creado para ayudar en las tareas diarias del adulto mayor.

El documento se encuentra organizado en ocho capítulos y una serie de anexos.

En el primer capítulo, se presentan los motivos explícitos a detalle sobre el por qué se hace necesario el desarrollo de un robot de asistencia social.

En el segundo capítulo, se describe un breve marco teórico sobre la robótica social y de asistencia, enfocando los modelos actuales que se presentan en el mercado.

Para la creación del robot y debido a la interacción con el ser humano, se hace necesario el uso de datos ergonómicos, que se ajusten a la población latinoamericana, lo anterior se presenta en el tercer capítulo.

La creación de un dispositivo nuevo, implica la postulación de diferentes opciones para resolver el problema, las cuales, con el fin de no fracasar en su disposición, deben ser acordes a las condiciones que interpone el mercado. La presentación de las posibles soluciones y su evaluación con las condiciones que el mercado dicta para modelos comerciales ya existentes, se realiza en el cuarto capítulo.

En el quinto capítulo, se describe paso a paso todos los subsistemas que componen a la opción elegida para el robot, aquí se resaltan los elementos físicos, que conforman tanto al sistema de cojinería, como a los mecanismos usados para modificar la orientación de las partes; en esta sección se describe la forma del movimiento de los actuadores para llevar al conjunto a sus posiciones de trabajo.

El sexto capítulo contiene la evaluación mecánica de esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad, para las piezas y conjuntos que componen el robot. En este punto se comprueba si los materiales usados y las geometrías propuestas, permiten al sistema robótico cumplir las funciones al interactuar con el usuario.

En los capítulos siete y ocho, se describen las conclusiones obtenidas al desarrollar el sistema robótico, junto con los procesos a mejorar y optimizar a fin de encontrar un prototipo que se ajuste con mayor profundidad, a las necesidades del usuario.

En la parte final, se incluye una sección de anexos, en los cuales se trabaja el desarrollo matemático, que trata el análisis de movimiento para los mecanismos implicados en el robot.

1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, una tendencia que se está presentando es el crecimiento del porcentaje que representa a los adultos mayores respecto al total de la población, tales comportamientos se observan en la mayoría de países europeos y algunos del continente asiático como Japón [1], también es una realidad que se presenta en México pues según datos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) se estima que para el año 2050, el porcentaje de adultos mayores sea la cuarta parte de la población total mexicana [2].

Del anterior comportamiento nace la premisa sobre la problemática de la oferta de personal calificado en ayuda, cuidado y asistencia para el adulto mayor [3]. Como parte de la evolución del campo de la robótica enfocado en la búsqueda de una solución a este problema, surge el concepto de “robots sociales para la asistencia de adultos mayores”, los cuales pueden verse divididos en dos campos [4], uno de ellos se enfoca en los dispositivos que sirven para la rehabilitación en las funciones motoras de los adultos mayores, ejemplos como sillas de ruedas robóticas; el otro se dedica a la creación de robots que asistan al usuario, con el fin de permitirle desarrollar las actividades de su rutina diaria (comer, bañarse, etc.) o que dispositivos que tengan la función exclusiva de enfocarse en el cuidado psicológico de los usuarios al brindarles una fuente de compañía.

Se puede considerar como retos para que los robots sociales sean una solución viable a la problemática planteada, los siguientes: la posibilidad de su producción en masa, además de ser ofrecidos al público a precios asequibles.

Para atender los retos, en esta propuesta de tesis se plantea un modelo cuyo diseño pueda considerarse como un estándar que defina a los robots sociales para el cuidado de adultos mayores; es aquí, donde este proyecto tiene interés, pues el objetivo principal es, el desarrollo de la estructura mecánica que defina aquel dispositivo general que pueda ser catalogado como robot social para el cuidado de adultos mayores, enfocado en los dos campos que se divide la clasificación: para la rehabilitación por inhabilidad motora parcial o total de las extremidades inferiores del usuario, del servicio al usuario y de la compañía, aunque en este último aspecto se verá reflejado en su apariencia, tal como se ilustra en la Figura 1.



Figura 1. Robot Momaru y Silla de ruedas transformable [5] [6]

2. ANTECEDENTES Y MERCADO ACTUAL

Para el desarrollo del presente proyecto, es importante aclarar dos conceptos fundamentales: la robótica para la rehabilitación y el robot de asistencia social.

Cuando se habla de robots para la rehabilitación, se aclara que su uso es explícito a compensar la ausencia en la movilidad del usuario [4], por lo tanto no es necesario que el dispositivo permita generar algún tipo de empatía con él. De otra forma se tiene la robótica para la asistencia social, en este punto se cuentan con dos líneas, la primera obedece a los robots de servicio y la segunda a los robots acompañantes, los primeros van enfocados a ser dispositivos mecatrónicos, reprogramables, basados en sensores, que auxilian al ser humano para el desarrollo de sus actividades diarias [7]. Respecto a la parte social en ambos; el robot social, corresponde a, un robot autónomo, que puede interactuar y comunicarse con humanos u otros agentes físicos siguiendo comportamientos sociales y reglas ligadas a este rol [8]. La diferencia prima en que los robots de compañía fundamentan su uso en la interacción con el ser humano, el objetivo de ellos principalmente es generar empatía con las personas y realizar acciones acordes a mejorar el estado de ánimo del usuario

En las siguientes secciones se describen algunos tipos de robots desde los dos enfoques.

Como robots para la rehabilitación, se pueden resaltar tres grupos fundamentales, los cuales corresponden a, sistemas basados en estaciones de trabajo, sistemas diseñados para sillas de ruedas y por último sistemas móviles.

2.1 Sistemas basados en estaciones de trabajo

Son sistemas diseñados para ubicarse en una mesa o un escritorio; consisten en células de trabajo, cuyo fin es brindar en un ambiente determinado la capacidad al usuario para realizar varias tareas pertinentes a su rutina diaria.

- HANDY 1 [9]:

Este robot cuenta con dos modelos para la atención al usuario, uno de ellos se encarga de auxiliar respecto a las acciones de comer y beber, por medio de un brazo lleva el alimento de la charola a la boca del usuario, al realizar algunas modificaciones sobre el modelo, este puede brindarle al usuario, asistencia para el aseo corporal y la limpieza de su boca.

El segundo, se presenta como un asistente para la aplicación de maquillaje sobre el usuario, al igual que el primer modelo, basa su forma de trabajo a un brazo móvil y una bandeja fija de donde toma los productos.

Los modelos del robot se presentan en la figura 2.

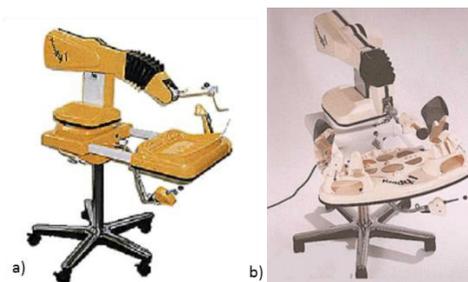


Figura 2. a) Handy 1 Sistema de Comida b) Handy 1 sistema de maquillaje [9]

- DeVAR (Robot asistente vocacional de escritorio) [10]:

Desarrollado en conjunto por la universidad de Stanford y el centro de investigación y desarrollo para los asuntos de rehabilitación de los veteranos de Palo Alto RR&D (por sus siglas en inglés), diseñado para adecuarse a los muebles de oficina, su funcionamiento se basa en el uso de un brazo robótico PUMA 260 en conjunto con una prótesis de mano Greifer de Otto-Bock, usada como pinza. El sistema se ubica sobre un riel de 4 pies, permitiéndole desplazarse de una zona a otra, tal como lo muestra la figura 3. Su velocidad de traslado es muy lenta, sumado a que la fuerza máxima de trabajo a ejercer es de 5 Lb.

El usuario da las instrucciones al sistema a través del sistema de reconocimiento de voz, VOTAN VTC 2100, un computador Compaq desk pro funciona como controlador del robot.

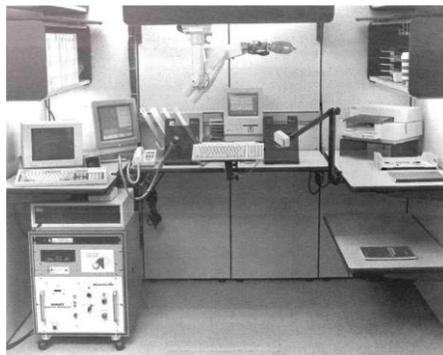


Figura 3. DeVAR Estación de trabajo robótica [10]

- RAID - (Robot para ayudar en la integración de personas discapacitadas) [11]:

Es un centro completo de trabajo, el cual basa su uso en el robot RTX, cuya configuración es del tipo SCARA, este robot se controla por medio de un joystick, ubicado en la silla del usuario. Diseñado para personas con una capacidad mental completa pero con severos daños físicos, el objetivo principal es el de brindar una autonomía al usuario de al menos 4 horas sin la supervisión de otra persona. Este es resultado del programa TIDE (Iniciativa para la telemática en discapacitados y ancianos).



Figura 4. RAID [11]

- Sistema para el transporte de artículos [12]:

El conjunto de elementos presentes en el robot representado en la figura 5. Permite el transporte de piezas con diferentes formas y tamaños, además de ubicarlas en zonas específicas del entorno.

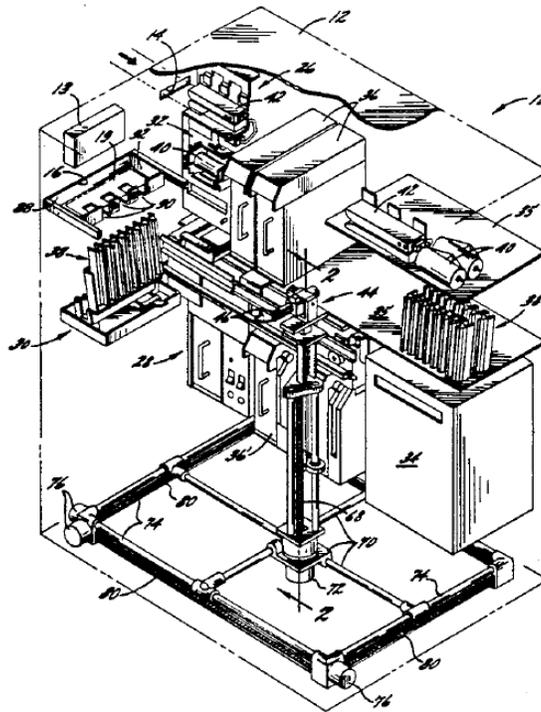


Figura 5. Estación de trabajo robótica para transporte de piezas [12]

2.2 Sistemas diseñados para sillas de ruedas

- MANUS [13]:

Brazo robótico desarrollado en conjunto por 4 instituciones: Instituto para la investigación de rehabilitación, Instituto para ciencias aplicadas - TNO, Centro de productos - TNO, Instituto Holandés de medicina preventiva. Cuenta con 8 grados de libertad, además de una pinza cuya base es telescópica permite un movimiento vertical de 0.25 m, el alcance del robot es de 0.85 m con una carga de 1.5 kg, su sistema de transmisión de potencia se basa en motores, correas, engranajes y ejes concéntricos.



Figura 6. MANUS [13]

- Manipulador para silla de ruedas, Inventaid [13]:

Brazo robótico con siete grados de libertad, cuenta con una pinza. Licenciado a nombre de la compañía, Industrias Papworth de Cambridge, Inglaterra. Cuyo funcionamiento se basa en el actuador proporcional neumático conocido como el músculo de aire, desarrollado por Jim Hennequin, salvo la principal junta para la elevación del sistema, la cual es dirigida por un actuador eléctrico telescópico WARNER®. El sistema puede llegar desde el piso hasta la cara del usuario, transportando un peso máximo de 2 kg.

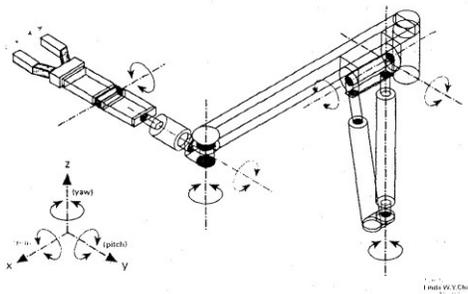


Figura 7. INVENTAID [13]

- Cama robótica equipada con un sensor de presión y un conjunto garra - brazo robótico [14] .

Aunque en el sentido estricto de la clasificación este dispositivo no entraría plenamente, es importante resaltarlo, ya que es una de las patentes que más se acerca al concepto de cama robótica.

El sistema consiste en una cama, provista de un sensor de presión y un par de brazos robóticos, cuyos efectores finales son un par de pinzas, el conjunto posee una serie de rieles, por los cuales pueden deslizarse los actuadores, como se muestra en la Figura 8.

El sensor de presión permite monitorear la orientación y el movimiento del usuario sobre la cama en tiempo real, el conjunto de brazos robóticos se ubican sobre un mismo eje, el cual puede rotar, permitiendo modificar la orientación de los efectores finales.

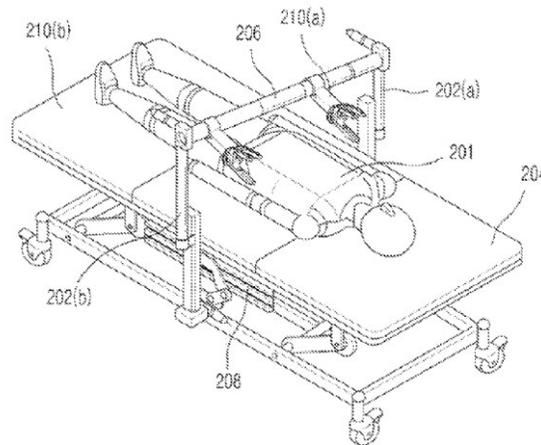


Figura 8. Sistema cama robótica inteligente [14]

2.3 Sistemas robóticos móviles

- WALKY [15]:

Sistema robótico desarrollado en la Universidad de Lund, construido con el fin de permitir a las personas que han sufrido lesiones, retomar prontamente sus puestos de trabajo, también brinda una posibilidad hacia las personas que sufren de alguna discapacidad física.

El sistema está compuesto por una base móvil de 700 x 750 mm, en la cual se encuentran ubicados sensores de ultrasonido, sobre la misma, se cuenta con un robot de 5 ejes Scorbot ER VII. La comunicación se realiza por medio de un modem inalámbrico, enlazado a un computador, donde se presenta la interfaz de trabajo al usuario. Todo el conjunto alcanza una altura máxima de 1350 mm cuando el brazo robótico está completamente erguido.

Su forma de trabajo inicia a través de un esquema presente en la pantalla del computador, donde el usuario define los puntos a los cuales el robot debe moverse, el cual, por medio de la retroalimentación de los sensores ultrasónicos, puede evadir los obstáculos que se presenten en su trayectoria.

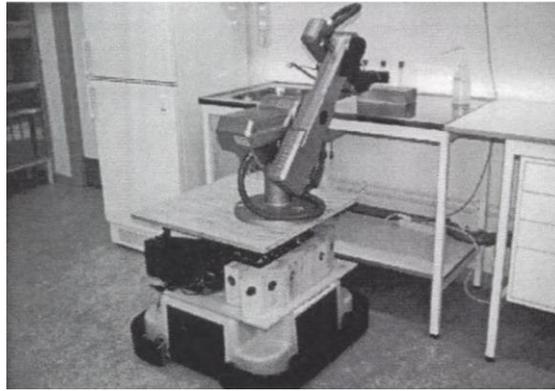


Figura 9. WALKY [15]

- Robot asistente doméstico con un chasis rodante [16]:

Consta de una plataforma robótica, como se muestra en Figura 10, la misma puede llevar elementos desde una zona a otra, asistiendo al usuario en este campo.

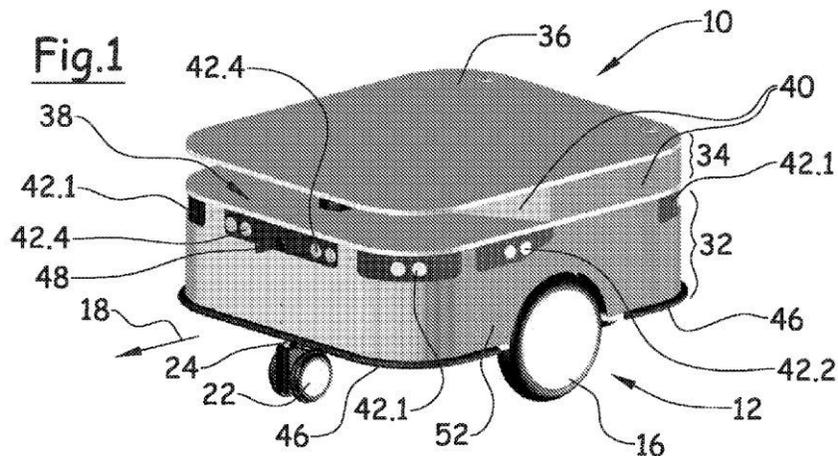


Figura 10. Robot asistente doméstico con un chasis rodante [16]

- Asistente robótico móvil amigable al ser humano [17]:

Consiste en una base motorizada que cuenta con al menos dos ruedas atadas a motores, controladas por una primera plataforma de control. Un brazo robótico dual montado sobre la base, el cual se compone de dos conjuntos de movimiento, ambos controlados por una

segunda plataforma, el dispositivo se controla a través de comandos de audio. El sistema cuenta con una computadora que recibe las instrucciones (Ver, Figura 11).

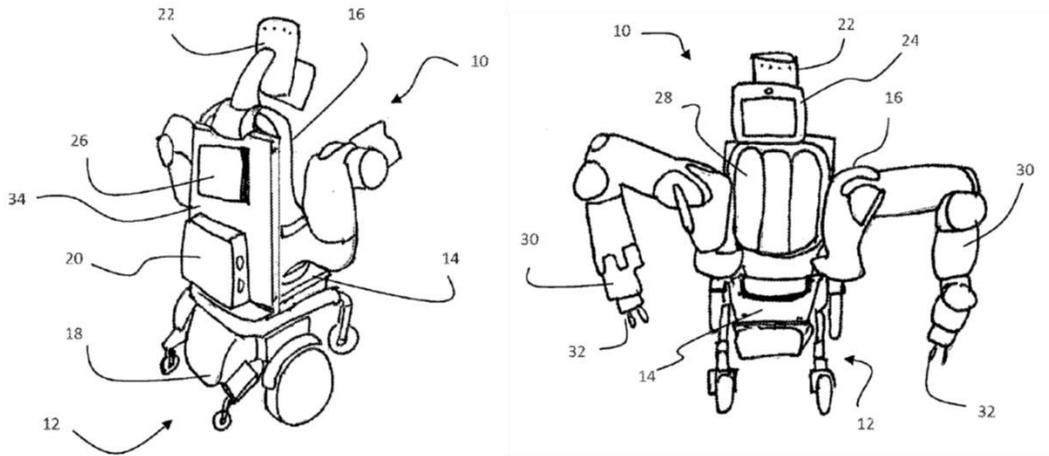


Figura 11. Asistente robótico móvil amigable al ser humano [17]

2.4 Robots Sociales

Por su parte los robots sociales, presentan formas definidas que puedan generar empatía por parte del usuario, a continuación se describen algunos:

- AIBO [18] :

Este es un robot, diseñado para interactuar con el ser humano, tal y como lo haría un perro, con algunas limitaciones en su movilidad y velocidad. Diseñado y producido por la compañía SONY, cuenta con sensores de temperatura, proximidad y táctiles, una cámara, conexión vía wifi. Esto puede verse en las figuras 12 y 13.

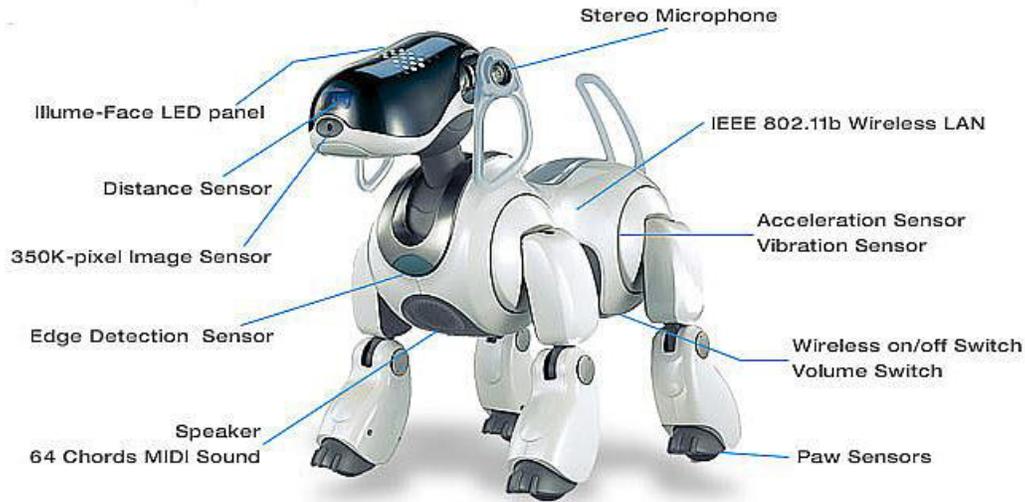


Figura 12. AIBO vista frontal [18]



Figura 13. AIBO vista posterior [18]

- PARO [19]:

PARO, es un robot con la apariencia de una foca marina bebe, está compuesto por una serie de sensores táctiles ubicados entre la suave piel y el fuerte esqueleto interior, esto tiene el objetivo de crear una forma casi real de interacción con el ser humano.

PARO cuenta con cuatro tipos de sensores: visual, audio (para el reconocimiento de voz), de balance, y los del tacto. Como respuesta a los datos proporcionados por los captadores, el robot puede realizar los siguientes movimientos: desplazar su cuello de arriba abajo o de derecha izquierda, o mover sus paletas (las que conforman la cola). Además, de mover cada uno de sus parpados de forma independiente. Estas acciones le permiten crear combinaciones que generan empatía en el ser humano.

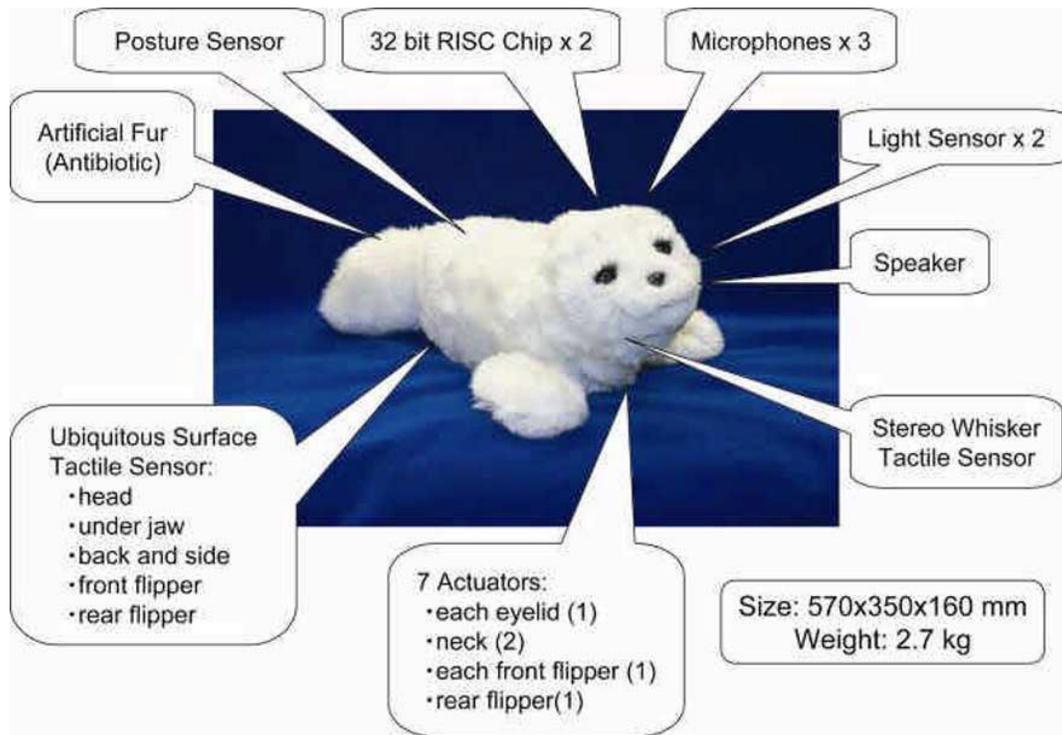


Figura 14. PARO Robot Foca [19]

- ROBOTIC PERSONAL ASSISTANT [20] :

Patente otorgada en Estados Unidos a Gerard Francis Yaeger y Anthony Justo Nunez, en ella se describe la estructura básica de un asistente personal robótico con forma humanoide impulsado por un motor, consta de un par de ruedas impulsadas y dos ruedas guías, como se muestra en la Figura 15. ROBOT PERSONAL ASSISTANT.

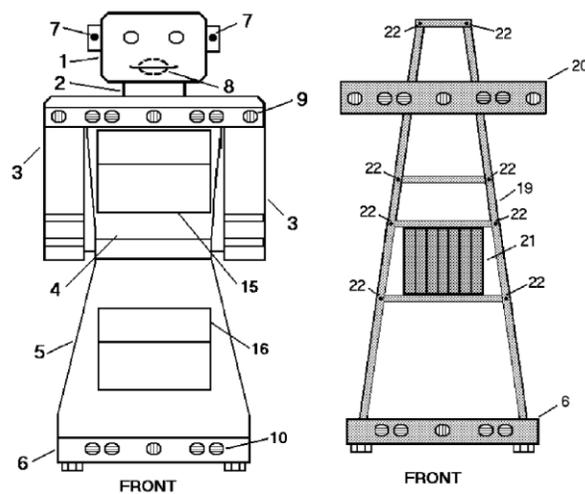


Figura 15. ROBOT PERSONAL ASSISTANT [20]

2.5 Mercado Actual

En el mercado actual, algunas compañías y laboratorios tras años de desarrollo han desarrollado robots enfocados en la asistencia social desde el enfoque de servicios, un ejemplo claro de esto obedece al Instituto Fraunhofer para la ingeniería de manufactura y automatización (FRAUNHOFER IPA), se encuentra en Stuttgart, Alemania.

FRAUNHOFER IPA ha desarrollado cuatro robots de servicio conocidos con el nombre de CARE-O-BOT en sus versiones 1, 2, 3 y 4 [21] [22] [23].



Figura 16. Care-o-Bot versiones 1 y 2 [21]



Figura 17. Care-o-Bot 3[22]



Figura 18. Care-o-Bot 4[23]

Creados en principio como robots de servicio, a medida que el modelo avanzó, su enfoque trata de acoger los principios de un robot para la compañía, tal como lo hacen PARO y AIBO. Esto se refleja perfectamente en CARE-O-BOT 4.

CARE-O-BOT 4 [23] es un robot de servicio, con una base omnidireccional que le permite ir de un lugar a otro en el interior de una casa, cuenta con dos brazos, los cuales en sus extremos poseen unas pinzas para sujetar elementos, el peso del robot completo es de 179 kg, en la parte superior cuenta con una pantalla, con la cual interactúa con el usuario, pues en ella puede reflejar figuras (formas de ojos y boca) con las cuales refleja empatía hacia el ser humano al que sirve.



Figura 19. Care-o-Bot 4 a detalle [23]

Como se observa la limitación principal desde este enfoque, es que este tipo de robots no puede transportar personas de un lugar a otro, además se puede resaltar que su precio es elevado, pues el modelo anterior a este, el CARE-O-BOT 3, se puede conseguir en el mercado por un valor de 180 000 libras esterlinas [24] (alrededor de 4'391,059 pesos mexicanos, precio moneda 2019).

3. DIMENSIONES Y ERGONOMÍA

La ergonomía hace referencia a la interacción entre el ser humano y los elementos del medio donde vive. El objetivo principal es facilitar el uso de los mismos. En la presente sección se describen los parámetros de diseño con criterios ergonómicos y las dimensiones que debe cumplir el dispositivo robótico.

3.1 Ergonomía en las sillas de ruedas.

Los requerimientos principales previstos para este tipo de dispositivos, enfocados al bienestar del usuario, son los siguientes [25]:

- Un espaldar reclinable cuya posición pueda ser modificada puede evitar el deterioro tisular del usuario.
- Una cabecera ajustable para proveer un buen soporte para la cabeza a un gran rango de usuarios.
- Un asiento ajustable.

3.2 Dimensiones del ser humano.

Para el diseño del presente Robot, partiendo de los últimos estudios, realizados respecto a las dimensiones físicas para los adultos mayores hombres y mujeres de América Latina [26], se toman como referencia los datos para el género masculino haciendo uso del percentil 95, con el fin de abarcar la mayor población posible, pues son los de mayor magnitud. Dichas cantidades se resumen en las figuras 20 y 21.

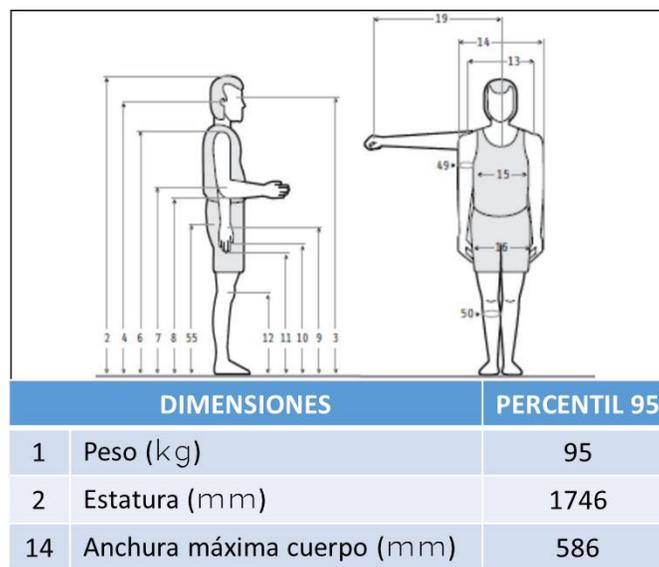


Figura 20. Dimensiones del adulto mayor América latina [26]

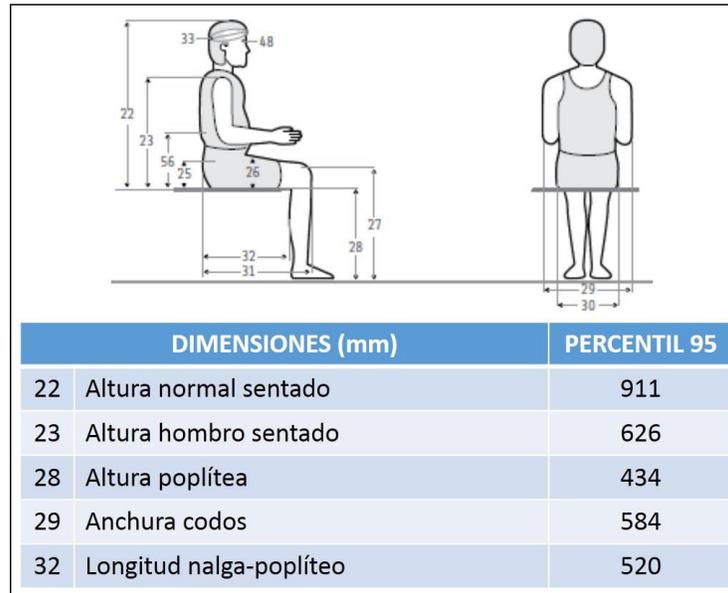


Figura 21. Dimensiones Antropométricas del adulto Mayor sentado [26]

3.3 Dimensiones de las edificaciones

Una parte importante es la definición del medio de trabajo donde se puede movilizar el robot, para esto se parte de las dimensiones para espacios interiores, presentes en los estándares de normas técnicas para la accesibilidad [27], tal como lo muestra la figura 22, el ancho mínimo para las entradas a las habitaciones es de 1 metro, además, en la figura 23, según dimensiones antropométricas debe permitirse un espacio entre 1.5 a 1.6 metros, para el giro de las sillas de ruedas.

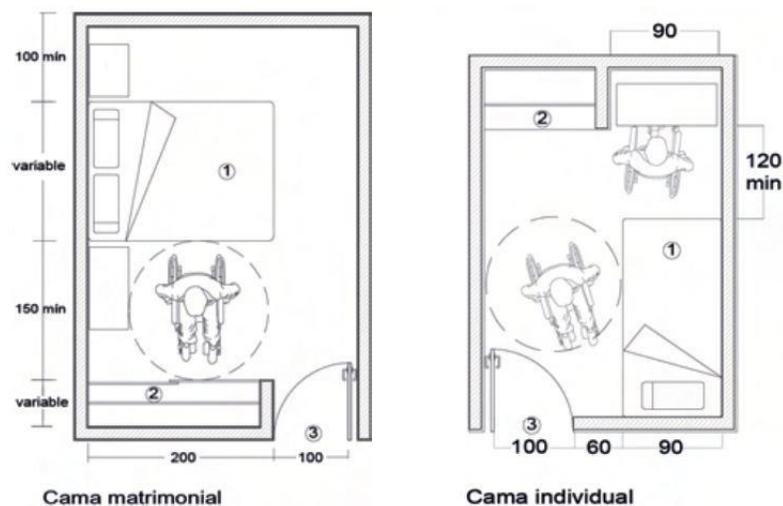


Figura 22. Dimensiones de las habitaciones [27]

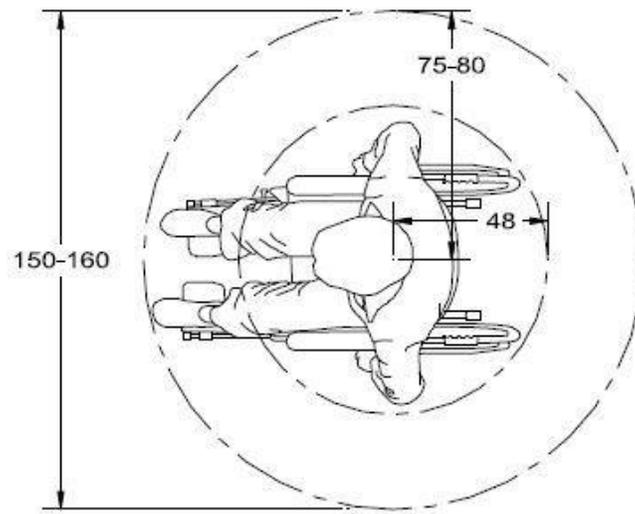


Figura 23. Acceso dimensiones antropométricas [27]

4. GENERACIÓN DEL DISEÑO

En primer lugar, a partir de los requerimientos especificados por el usuario y las consideraciones técnicas, descritas en trabajos enfocados al desarrollo de una silla de ruedas [25]. Se hace el desglose de la función calidad ilustrada en la tabla 1. En la tabla 2, se especifican algunas limitaciones que debe cumplir el robot, de acuerdo a sistemas presentes en el mercado y dimensiones técnicas para los accesos en edificaciones.

Los resultados de la función calidad se presentan en la tabla 3.

Requerimientos del usuario:

- Diseño del espaldar mejorado
- Múltiple uso
- Bajo costo
- Menor peso
- Facilidad de transporte
- Cabecera cómoda
- Fácil mantenimiento

Datos técnicos:

- Cambio de material
- Diseño ergonómico
- Funcionalidad
- Usabilidad
- Peso
- Mecanismos
- Seguridad
- Economía

Tabla 1. Matriz función de calidad

Importancia para el consumidor	DATOS TÉCNICOS		CAMBIO DE MATERIAL	DISEÑO ERGONOMICO	FUNCIONALIDAD	USABILIDAD	PESO	MECANISMOS	SEGURIDAD	ECONOMÍA
	REQUERIMIENTOS DEL USUARIO									
5	DISEÑO DEL ESPALDAR MEJORADO		3	5	1	5	0	5	3	1
3	CABECERA COMODA		3	5	1	3	0	5	3	1
3	MULTIPLE USO		1	3	5	3	0	5	1	3
3	BAJO COSTO		3	0	0	0	0	3	0	5
3	MENOR PESO		5	0	0	5	5	3	0	1
5	FACILIDAD DE TRANSPORTE		3	3	0	3	5	1	3	0
5	FACIL MANTENIMIENTO		0	5	0	3	5	3	5	3
MARGEN DE IMPORTANCIA			66	89	23	88	65	93	67	50
MARGEN DE IMPORTANCIA PORCENTUAL			12,20	16,45	4,25	16,27	12,01	17,19	12,38	9,24

RELACIONES	5	3	1	0
	FUERTE	MEDIO	DÉBIL	NO RELACIÓN

Tabla 2. Requerimientos y especificaciones

Características	Descripción	Especificación
Detalles Dimensiones	Dimensiones Robot - modo cama	Longitud total extendida (valor mínimo)= 1746 mm Ancho mínimo requerido= 586 mm Longitud cabecera = 285 mm
	Dimensiones Robot - modo silla	Longitud Espaldar = 626 mm Longitud Asiento = 520 mm Longitud Apoya piernas = 434 mm
Ergonomía	Peso a soportar	Peso mínimo usuario = 95 kg
Material	Tubería	Acero
	Asiento, Espaldar, apoya piernas	Espuma fuerte, cuero, madera, lámina de acero
Estética	Cubierta Robot	Polipropileno
	Colores	Blanco exterior
Costo	Costo por producto	Debe ser inferior a £ 180 000 (aprox. 4'391,059 pesos MXN, precio del modelo actual).

Tabla 3. Requerimientos seleccionados

No.	Descripción	Especificaciones
1	Estructura	Tubería de acero, bases de madera, espuma dura.
2	Color	Cubierta de polipropileno blanca, estructura gris.
3	Procesos de manufactura	Doblado, soldadura, Moldeo por inyección,
4	Ergonomía	Cabecera, Descansa pies, Espaldar ajustable.
5	Seguridad	Freno eléctrico
6	Características adicionales	Brazos robóticos para ayudar al usuario al transporte de objetos
7	Disposición final	Metales y plásticos, pueden separarse para su reusó

4.1 PROPUESTAS DE SOLUCIÓN

4.1.1 PROPUESTA 1

En este diseño (ver figura 24), se presenta la estructura del robot como un sistema aislado al conjunto de la carcasa. En la estructura: el soporte se basa en la unión de tubos de acero; tanto la cabecera, el espaldar, el asiento, el apoya piernas y el apoya pies se basan en conjuntos compuestos por la unión de tablas de madera soportadas por una lámina doblada de acero. El movimiento de rotación que poseen las partes del robot, en el modo silla-cama (figura 24), se debe a conjuntos motores eléctricos - reductores acoplados a las láminas de acero.

Respecto al sistema de tracción, se cuenta con dos motores de ángulo recto, usados en los modelos actuales para sillas de ruedas eléctricas, cada uno se acopla a una rueda de espuma (foam fill tire), ubicadas en los costados laterales del robot. Cada conjunto motor cuenta con un freno eléctrico acoplado al mismo. Para brindar un mayor soporte, se colocan cuatro ruedas giratorias.

Para la carcasa: compuesta por pequeños segmentos de polipropileno, de color blanco, los cuales están acoplados a un mecanismo del tipo tijera, impulsado por un actuador lineal eléctrico. Al extenderse el cilindro del actuador, el mecanismo se elevará recubriendo la estructura que se encuentra dentro del sistema. En el mismo sentido al retraerse totalmente dejará al descubierto el conjunto Cama - Silla.

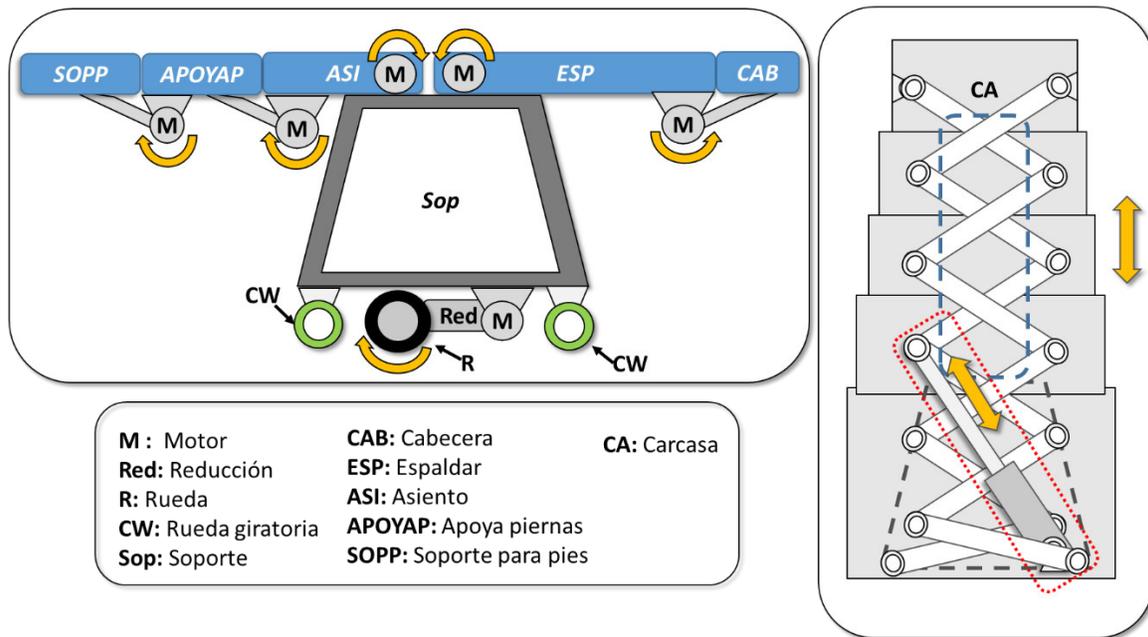


Figura 24. Primera solución

4.1.2 PROPUESTA 2

En este diseño (ver figura 25), se presenta la estructura del robot como un sistema aislado al conjunto de la carcasa. En la estructura: el soporte se basa en la unión de tubos de acero; tanto la cabecera, el espaldar, el asiento, el apoya piernas y el apoya pies se basan en conjuntos compuestos por la unión de tablas de madera soportadas por una lámina doblada de acero.

En este modelo para la cabecera, el apoya piernas y el soporte para los pies, su movimiento de rotación se da por el conjunto motor eléctrico - reductor acoplado a las láminas de acero.

El espaldar y asiento, se encuentran unidos por una bisagra que puede deslizarse por una guía, el mecanismo usa dos actuadores lineales, al extenderse el cilindro, tanto el espaldar como el asiento quedan ubicados de forma vertical, al retraerse totalmente, quedan orientados horizontalmente.

Respecto al sistema de tracción, se cuenta con dos conjuntos de motores de ángulo recto y freno magnético, acoplados cada uno a una rueda de espuma (foam fill tire), ubicadas a los costados laterales. Para brindar un mayor soporte, se colocan cuatro ruedas giratorias.

Para la carcasa: en este modelo al igual que la primera propuesta, la cubierta se forma por segmentos blancos de polipropileno, ligados a las uniones de un mecanismo tipo tijera, donde el efecto de extensión y el de guardado se debe al movimiento de un actuador lineal eléctrico.

Al extenderse el cilindro del actuador, la carcasa sube, recubriendo la estructura Cama - Silla. En el mismo sentido al retraerse totalmente la dejará al descubierto (ver figura 20).

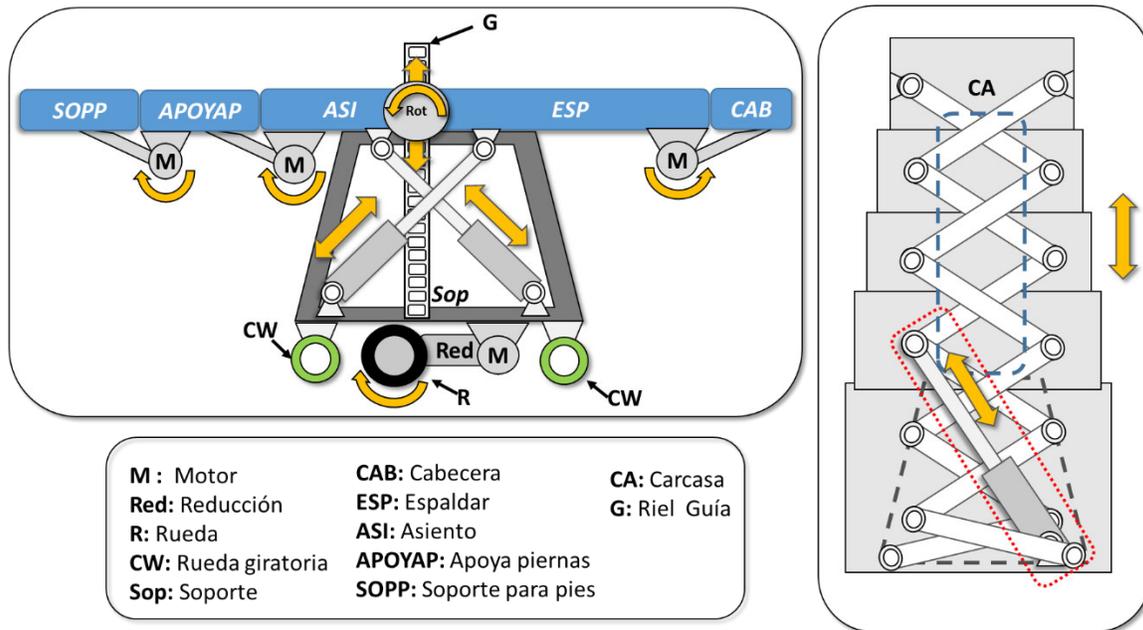


Figura 25. Segunda solución

4.1.3 PROPUESTA 3

En este diseño (ver figura 26), se presenta la estructura del robot como un sistema aislado al conjunto de la carcasa. En la estructura: el soporte se basa en la unión de tubos de acero; tanto la cabecera, el espaldar, el asiento y el apoya piernas se basan en conjuntos compuestos por la unión de tablas de madera soportadas por una lámina doblada de acero. Para este caso, el apoya pies consiste en una placa de aluminio que rota sobre un tubo fijo al soporte.

El espaldar y asiento, se encuentran acoplados a una unión tipo bisagra, la cual está ubicada en un elemento que se desliza sobre una guía. La orientación de los mismos se debe al movimiento de un par de actuadores lineales. Al extenderse el cilindro, asiento y espaldar se ubican de forma vertical, cuando se retrae totalmente quedan horizontalmente.

Respecto a la cabecera y al apoya piernas, su orientación se da en función de un par de actuadores lineales ubicados en el espaldar y el asiento respectivamente, así, cuando el actuador ubicado en el espaldar se extiende, la cabecera pasará de su posición horizontal a formar un ángulo menor a 30° respecto al espaldar (para comodidad del usuario). El apoya piernas, al extenderse el cilindro, queda ubicado de forma horizontal, cuando se retraiga el actuador lineal, queda ubicado en dirección perpendicular al asiento.

Respecto al sistema de tracción, se cuenta con dos conjuntos de motores de ángulo recto - freno magnético, cada uno con una rueda de espuma (foam fill tire), ubicados en la parte inferior del robot cada uno a un costado. Con el objetivo de brindar soporte, se ubican cuatro ruedas giratorias a cada extremo del robot.

Para la carcasa: en este modelo al igual que la primera propuesta, la cubierta se forma por segmentos blancos de polipropileno, los cuales se encuentran unidos a los acoples tipo bisagra del mecanismo tipo tijera, dicho sistema se eleva o se oculta debido a la acción de un actuador lineal eléctrico (ver figura 21).

Al extenderse el cilindro del actuador, la carcasa se extiende y cubre a la estructura Cama - Silla. En el mismo sentido al retraerse totalmente la deja al descubierto.

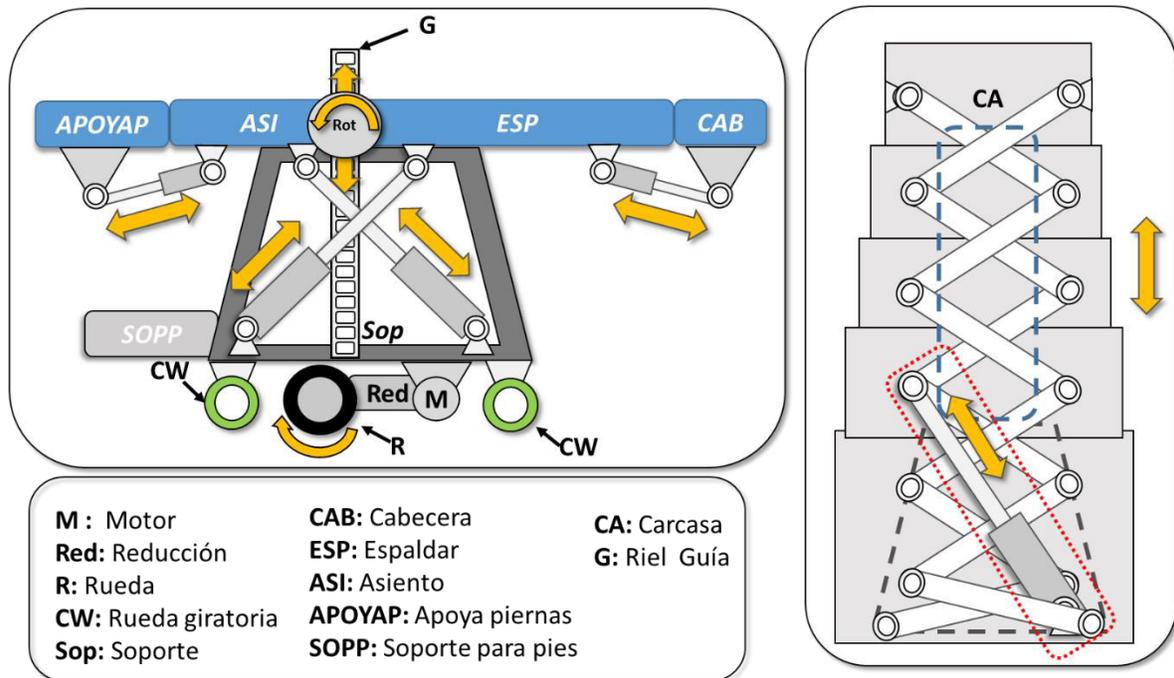


Figura 26. Tercera solución

4.1.4 PROPUESTA 4

En este modelo (ver figura 27), la carcasa y la estructura forman un solo sistema, de tal manera que la carcasa se encuentra ubicada en las caras posteriores tanto de la cabecera, espaldar, asiento, apoya piernas y el soporte para los pies. Esta se compone de pequeñas partes de color blanco hechas de polipropileno, cuya geometría se puede adecuar para guardarse y extenderse cuando la posición de la estructura lo requiera.

Respecto a la estructura, el soporte se compone de tubos de acero soldados. La cabecera, espaldar, asiento, apoya piernas y soporte para los pies se basa en conjuntos de tablas de madera - con espuma dura, ubicados dentro de una base hecha a partir de una lámina de acero doblada. Lo cual brinda rigidez y comodidad al usuario.

Los mecanismos presentes en este diseño son los siguientes:

Conjuntos de motores y reductores acoplados de tal manera que permiten modificar la orientación de la cabecera, el apoya piernas y el apoya pies.

La orientación del espaldar y del asiento (acoplados a una junta tipo revoluta, que desliza sobre una guía) se debe al movimiento de un par de actuadores lineales sujetos al soporte del robot. Cuando estos se extienden tanto el espaldar como el asiento se ubican verticalmente, y horizontalmente al estar los actuadores totalmente retraídos.

Para el tren móvil se cuenta con un par de conjuntos motores de ángulo recto - freno electromagnético y rueda en espuma (foam filled tire), ubicados en la parte inferior del robot, uno a cada costado. Para darle una estabilidad, se ubican cuatro ruedas giratorias, una por cada esquina de la base en el soporte del robot.

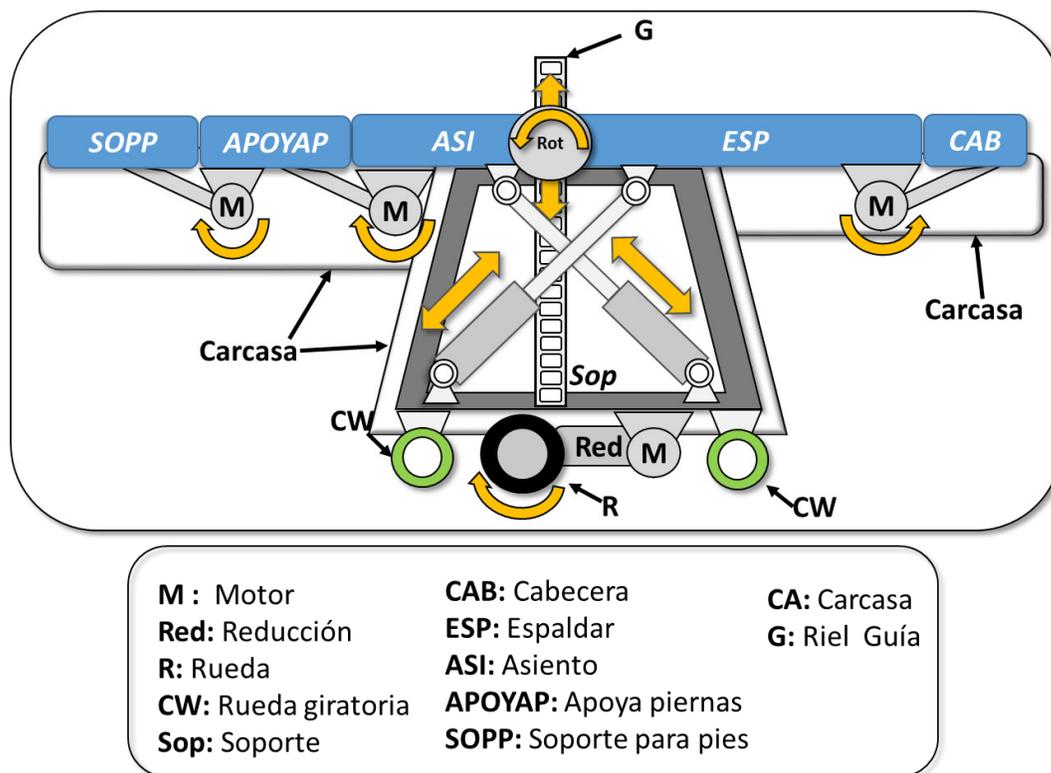


Figura 27. Cuarta solución

4.1.5 PROPUESTA 5

En este modelo (ver figura 28), la estructura y la carcasa son un solo conjunto. La carcasa se compone de elementos blancos de polipropileno, ubicados al respaldo de la cabecera, espaldar, asiento y apoya piernas. La geometría de estas piezas está diseñada de tal manera que, se oculten y no obstruyan los cambios de orientación para las partes del robot.

Respecto a la estructura, el soporte se compone de tubos de acero soldados. La cabecera, espaldar, asiento y apoya piernas son conjuntos de tablas de madera - con espuma dura, acoplados a una base fabricada en una lámina de acero doblada. Brindando rigidez a los mismos y comodidad al usuario.

En este caso el soporte para los pies, se compone de una lámina de aluminio soldada a una base que le permite rotar sobre un tubo circular ubicado al bastidor del robot.

Para la orientación de las partes del robot en sus distintas configuraciones se debe al movimiento de actuadores lineales eléctricos, cuya operación es de la siguiente manera:

Para la cabecera, uno de los extremos del actuador lineal se ubica en ella y el otro en el espaldar, de esta manera al estar contraído, la cabecera se orienta paralela al espaldar, mientras que al extenderse, la misma se orienta a un ángulo respecto al espaldar, permitiendo al usuario sentirse más cómodo.

Para el apoya piernas, uno de los extremos del actuador lineal se ubica en él, el otro extremo en el asiento, de esta forma al estar totalmente extendido, el apoya piernas se encuentra paralelo al asiento, al contraerse totalmente se ubica en una posición perpendicular al asiento.

El espaldar y el asiento se encuentran conectados por una junta revoluta (ver figura 23), que desliza sobre una guía. Para estos, uno de los extremos del actuador lineal se sujeta al bastidor de soporte del robot y el otro se une a ellos, de esta manera, al extenderse el cilindro, estas dos partes del robot se ubican de forma vertical, al retraerse totalmente se orientan de forma horizontal.

Para el tren móvil se cuenta con un par motores de ángulo recto con freno electromagnético y dos ruedas en espuma (foam filled tire), ubicados en la parte inferior del robot, uno a cada costado. Para darle una estabilidad, se ubican cuatro ruedas giratorias, una por cada esquina de la base en el soporte del robot.

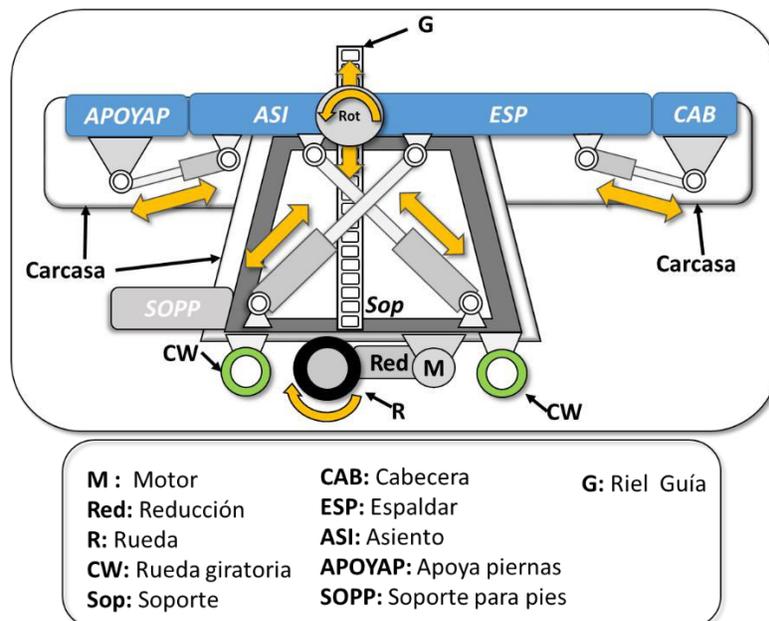


Figura 28. Quinta Solución

4.1.6 PROPUESTA 6

En este modelo (ver figura 29), la estructura y la carcasa forman un solo sistema. La carcasa se conforma por elementos de color blancos hechos de polipropileno, los cuales se ubican al respaldo de la estructura, su geometría se diseña para que las piezas de la estructura, al estar ubicadas de forma vertical, la carcasa cubre al robot completamente.

Respecto a la estructura, el soporte se compone de tubos de acero soldados. La cabecera, espaldar, asiento, apoya piernas y soporte para los pies, están hechos de tablas de madera - con espuma dura, acoplados a una base fabricada en una lámina de acero doblada. Brindando rigidez a los mismos y comodidad al usuario.

La orientación de las partes del robot en sus distintas configuraciones, está dada por el uso de motores eléctricos y reductores de velocidad, acoplados a la parte posterior de las partes de la siguiente manera:

Para el asiento y el espaldar, los motores se acoplan al bastidor del robot. Debido a la rotación de los mismos puede modificarse su posición horizontal a vertical y viceversa.

Para la cabecera, el motor se ubica en el costado del espaldar, el sistema después de la reducción se ubica en el respaldo de la cabecera, de esta manera al rotar el motor, la cabecera modifica su orientación respecto al espaldar.

Para el apoya piernas, el motor se fija al costado del asiento, la parte que va después del reductor de velocidad se ubica al respaldo del mismo, de esta forma al rotar, él modifica su orientación respecto al asiento.

Para el soporte de los pies, el motor se ubica sobre el costado del apoya piernas, la parte que va después del reductor de velocidad, se acopla al respaldo del soporte para los pies, de esta manera, al rotar, la orientación de un respecto al otro se modifica.

Para el tren móvil se cuenta con un par motores de ángulo recto con freno electromagnético y dos ruedas en espuma (foam filled tire), ubicados en la parte inferior del robot, uno a cada costado. Para darle una estabilidad, se ubican cuatro ruedas giratorias, una por cada esquina de la base en el soporte del robot.

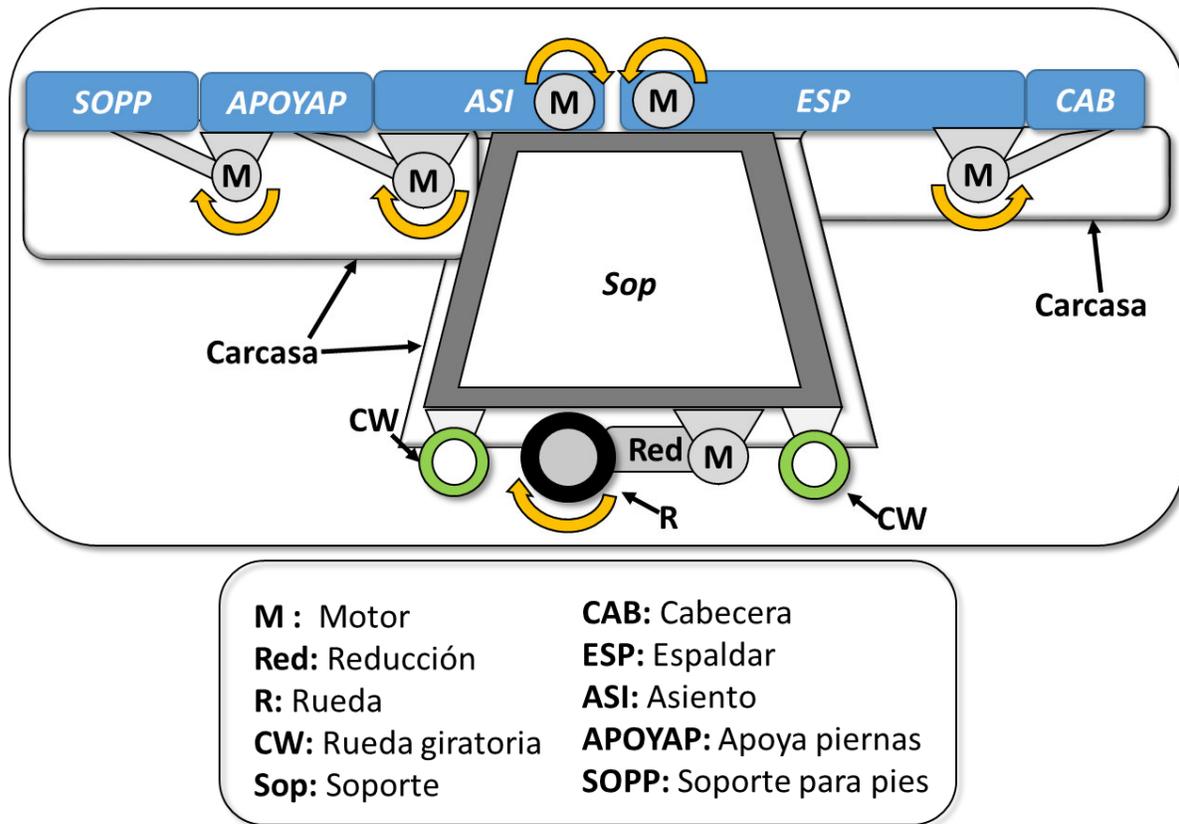


Figura 29. Sexta solución

4.1.7 BRAZOS ROBÓTICOS

Para los brazos robóticos en todas las propuestas se presenta el conjunto de dos actuadores lineales eléctricos, cuyo efector final es una pinza, ubicada al final de uno de los actuadores tal como lo muestra la figura 30. Se ubican dos brazos, uno a cada costado del robot y sujetos al bastidor del robot, como se muestra en la figura 31.

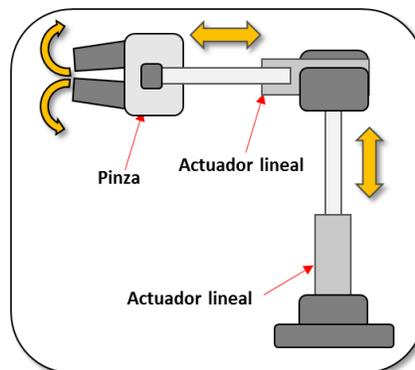


Figura 30. Brazos robóticos

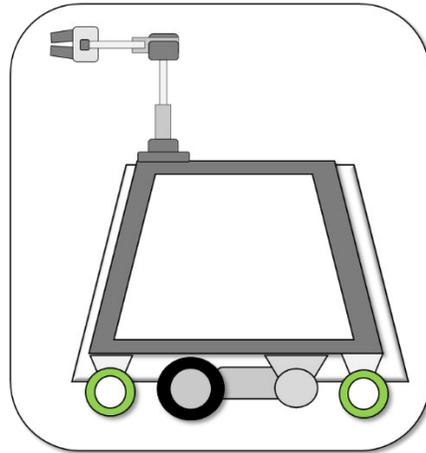


Figura 31. Brazos robóticos bastidor

4.2 SELECCIÓN DEL MODELO

Para la selección de los modelos, se usa el método PUGH, aunque actualmente en el mercado no se comercializa un producto como el desarrollado para este proyecto, que combine un robot de asistencia y un sistema de rehabilitación, se contrastan las soluciones propuestas contra dispositivos que tienden a ser parecidos al robot deseado, tales como, conjuntos de silla de ruedas - cama y robots de servicio.

El método de selección se describe en la tabla 4. Según el análisis, el modelo elegido es la propuesta 5.

Tabla 4. Evaluación de las propuestas

PARAMETROS DE DISEÑO			PROPUESTA 1	PROPUESTA 2	PROPUESTA 3	PROPUESTA 4	PROPUESTA 5	PROPUESTA 6
DISEÑO ERGONOMICO			0	0	0	0	0	0
USABILIDAD			+1	+1	+1	+1	+1	+1
MECANISMOS			-1	-1	-1	0	+1	0
MÚLTIPLE USO			+1	+1	+1	+1	+1	+1
BAJO COSTO			-1	-1	-1	0	0	0
FACILIDAD DE MANTENIMIENTO			+1	+1	+1	+1	+1	+1
DISEÑO DEL ESPALDAR			0	0	0	0	0	0
CABECERA COMODA			+1	+1	+1	+1	+1	+1
	$\sum +$		4	4	4	4	5	4
	$\sum -$		2	2	2	0	0	0
	Total		2	2	2	4	5	4
+1 Indica que es mejor respecto al producto comparado			-1 Indica que es peor respecto al producto comparado			0 Indica que es igual al producto comparado		

5. ANÁLISIS, DESARROLLO Y EVALUACIÓN DEL DISEÑO SELECCIONADO

Con base en el análisis reportado en la tabla 4, la propuesta de diseño elegida se muestra en las figuras 28 y 32.

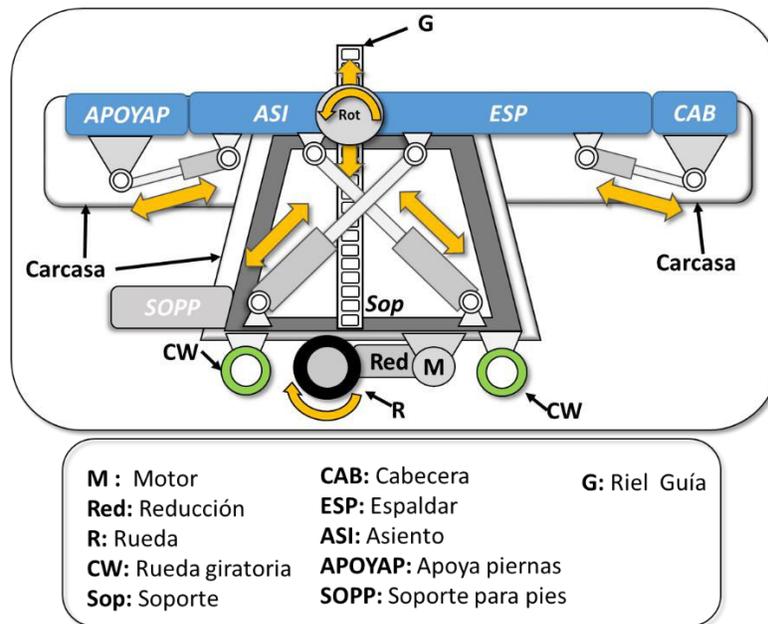


Figura 32. Propuesta de diseño elegida

El mecanismo principal enfocado en la orientación del asiento y del espaldar, se basa en actuadores lineales, que al extenderse o retraerse modifican la posición horizontal a vertical y viceversa. En un principio, se propone que la unión entre el asiento y el espaldar esté anclada a un elemento, que le permite deslizarse verticalmente, de tal manera que al bajar sobre la guía, ambos ubicados en su posición vertical puedan descender y guardarse, así, el robot final ocupa una menor altura. Al analizar con más detenimiento, la altura que logran bajar es de sólo 10 centímetros, por lo cual, para disminuir los costos finales y simplificar el control del mecanismo, se prefiere modificar esta unión a un pasador apoyado a la estructura del robot. En este capítulo se presentan los componentes del robot, describiendo y evaluando su forma de trabajo.

5.1 Diseño de la cabecera, espaldar, asiento y apoya piernas

Los conjuntos que conforman la cabecera, espaldar, asiento y apoya piernas se componen de una lámina de acero galvanizado con un grosor de 0.075 pulgadas, la cual, se dobla a

ángulos rectos, como lo muestra la figura 33, y tablas de Pino radiata con 15 mm de grosor, acopladas a la base de acero usando insertos metálicos en la madera y tornillos. Sobre la cara horizontal de la madera se adhiere una espuma visco elástica de densidad media, usada en el ambiente hospitalario. Como el espaldar y el asiento, son las zonas donde se espera que se concentre un valor considerable de carga respecto a la cabecera y al apoya piernas, se toma la decisión de colocar perfiles estructurales rectangulares como refuerzo. Cada sistema se detalla en las figuras Figura 33 a Figura 37.

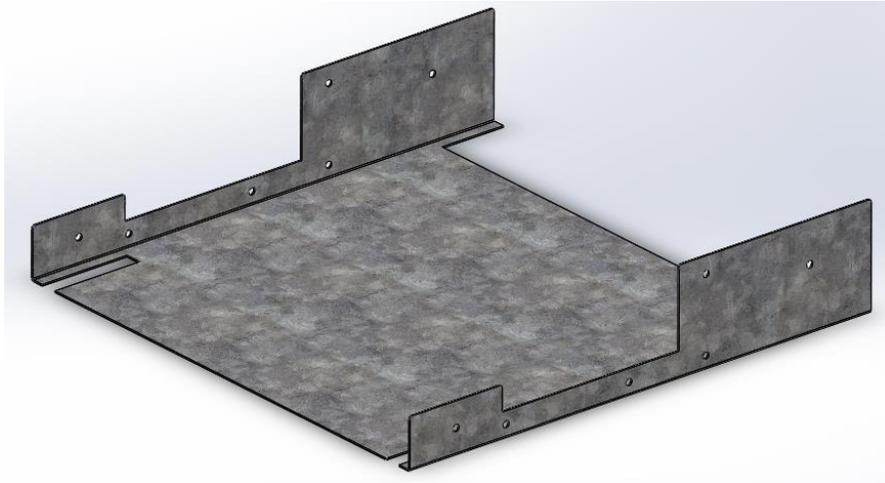


Figura 33. Lámina de acero doblada

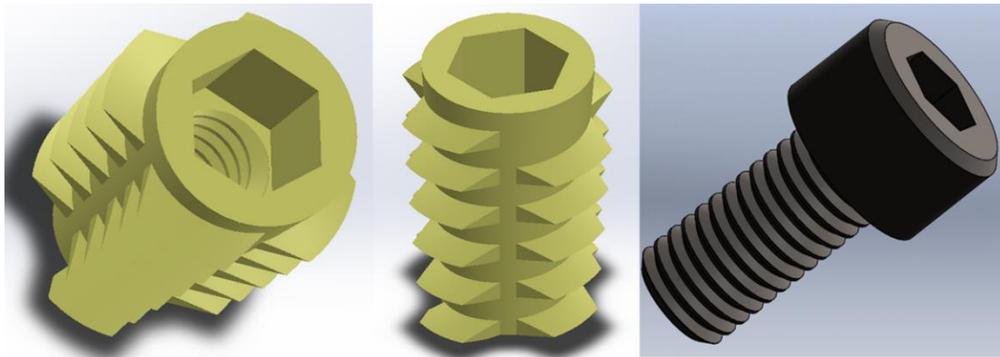


Figura 34. Inserto para madera y tornillo

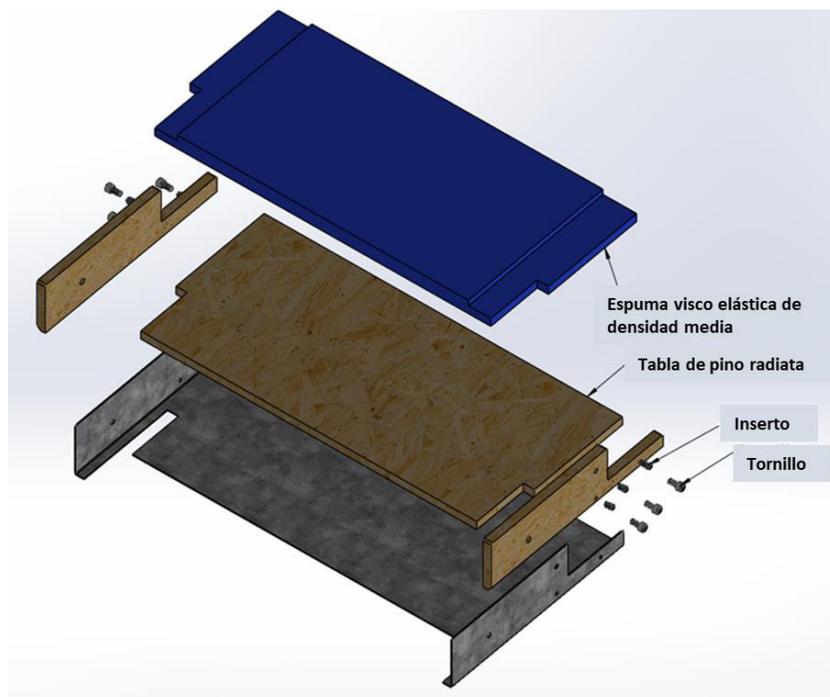


Figura 35. Conjuntos para cabecera, espaldar, asiento y apoya piernas

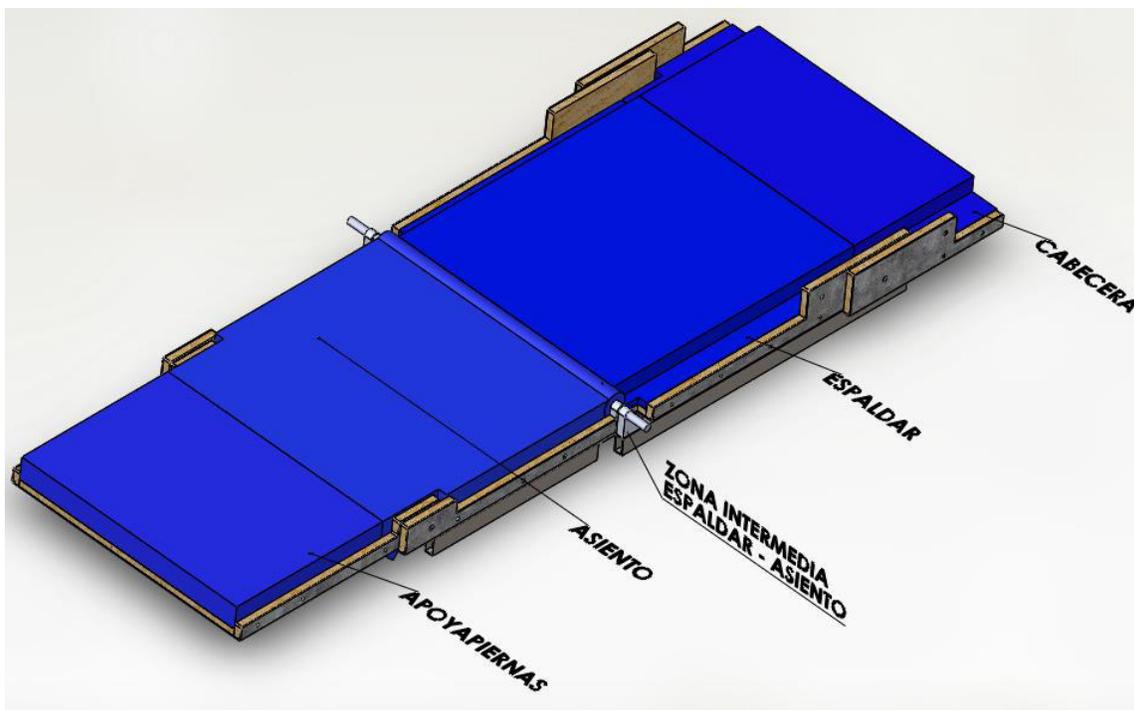


Figura 36. Cojinería completa

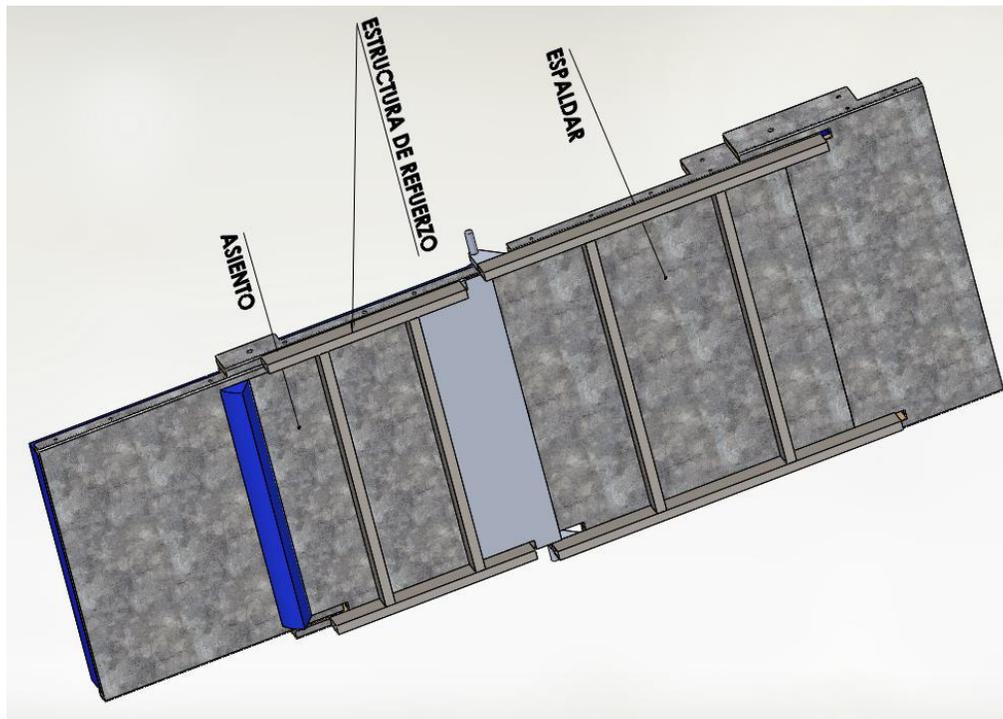


Figura 37. Refuerzos en Espaldar y Asiento

Las conexiones cabecera - espaldar y asiento - apoya piernas, se componen de un pasador roscado acoplado a un inserto, el cual se ubica en las tablas laterales de cada estructura. En la lámina de madera que no posee el inserto, se ubica un cojinete sin fricción en el hueco pasante, permitiéndole al pasador contar con un apoyo para girar. Estos acoples se muestran en las figuras Figura 38 a Figura 41. Como referencias técnicas se propone para los enlaces, que el diámetro del pasador sea de 8 mm, su longitud debido a la forma como se acopla el sistema es de 30 mm, por ende el diámetro interno del cojinete debe ser igual al del pasador con una pequeña tolerancia para la rotación, para este caso por su bajo costo, cerca de los 60 pesos, se elige el modelo iglidur® X de la marca IGUS® [28]. Para los insertos, se usa un modelo de la compañía EZ-LOK® cuyo número de parte 808125-13 [29], con una longitud de 13 mm y con una rosca interior M8x1.25. La evaluación de los mismos en el modelo se hará en secciones más adelante.

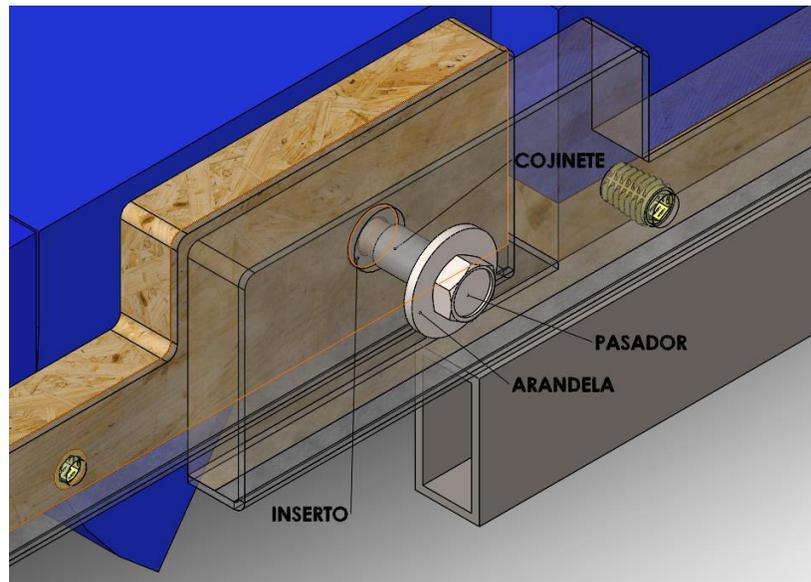


Figura 38. Unión Asiento - Apoya Piernas

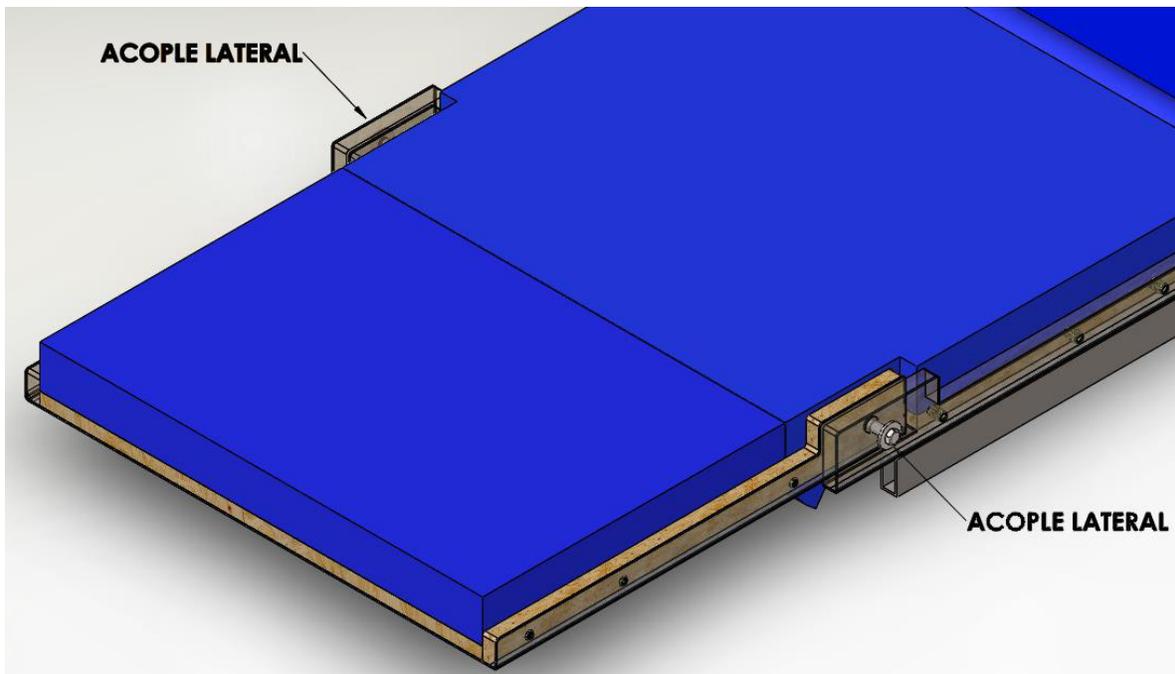


Figura 39. Uniones Asiento - Apoya piernas 2

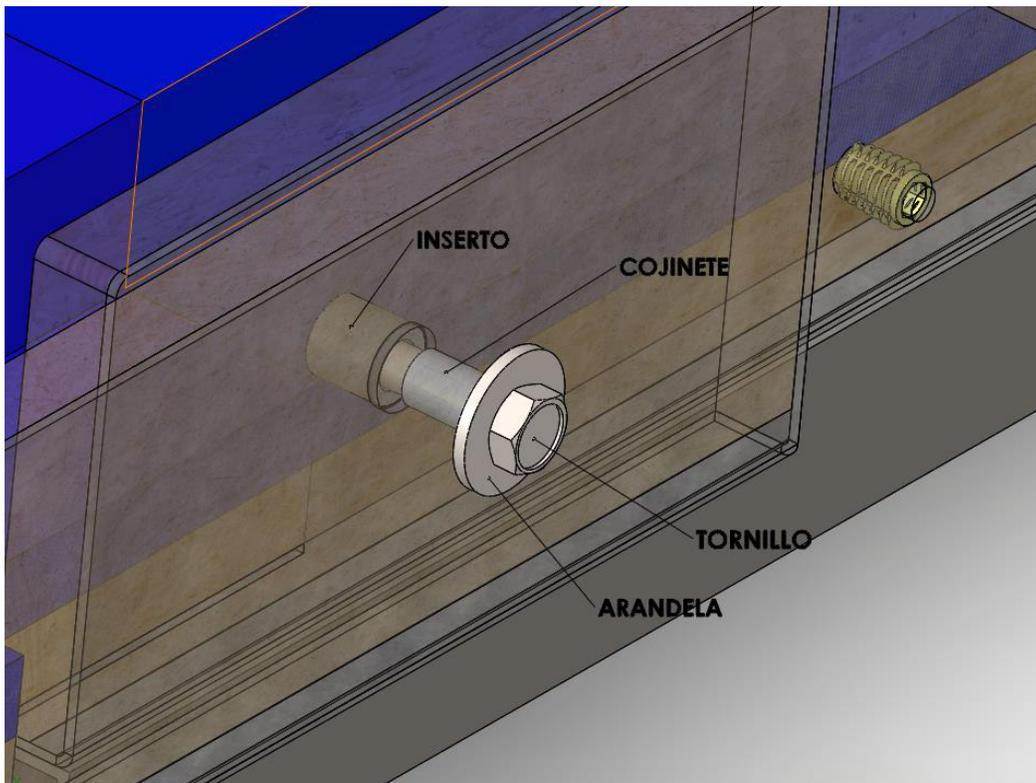


Figura 40. Unión Cabecera - Espaldar

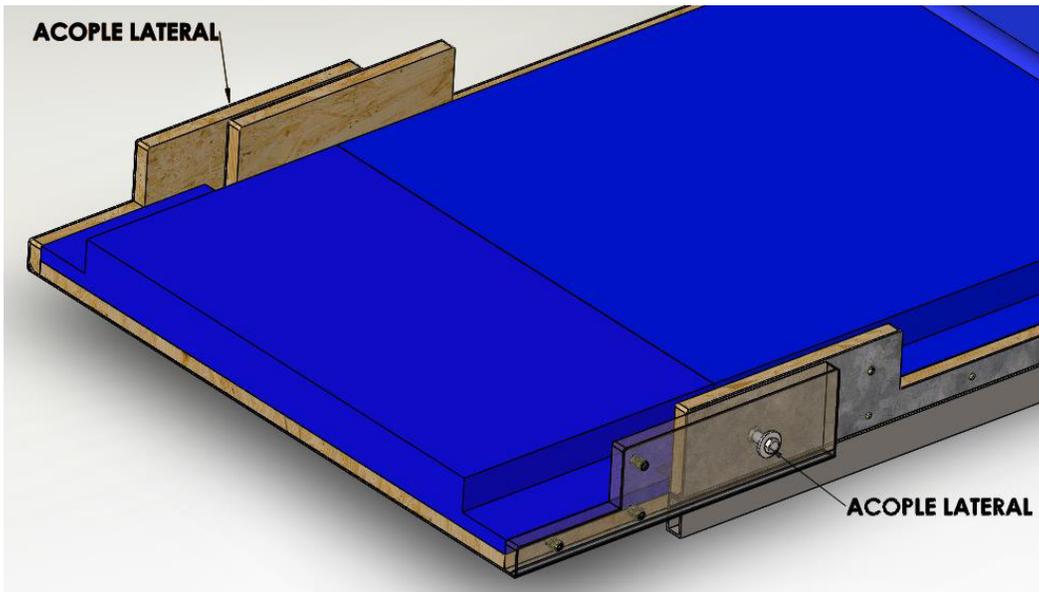


Figura 41. Uniones Cabecera - Espaldar 2

Para la conexión entre el espaldar y el asiento, se tiene un pasador de 15 mm de diámetro, que pasa de lado a lado, soportado en sus extremos por dos conjuntos: KP002 - Jaula de aleación de Zinc y un rodamiento de bolas referencia 608 de la marca SKF® [30], el rodamiento se selecciona en función del diámetro del pasador y de la posible carga máxima que soportará el sistema, en este caso en un rango entre los 1370 N (Figura 42).

El pasador se recubre con una capa de espuma visco elástica de densidad media, evitando que el usuario se sienta incomodo, al recostarse sobre el dispositivo en el modo cama (Figura 43).

El contacto entre el espaldar y el pasador se realiza a través de una base de aluminio acoplada con tornillos al soporte estructural rectangular, dentro de la misma se encuentra un cojinete iglidur® X de la marca IGUS® [28]. Como se muestra en la Figura 44.

Para acoplar el conjunto del asiento al pasador, se usa una base de aluminio anclada con tornillos e insertos a la base de madera, en la misma, se ubica un cojinete iglidur® X de la marca IGUS® [28]. Ver Figura 45.

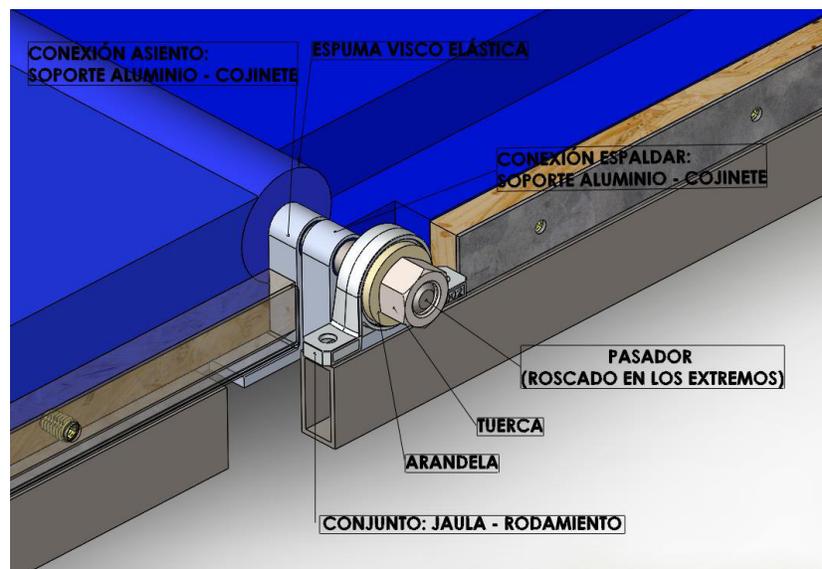


Figura 42. Unión Espaldar - Asiento

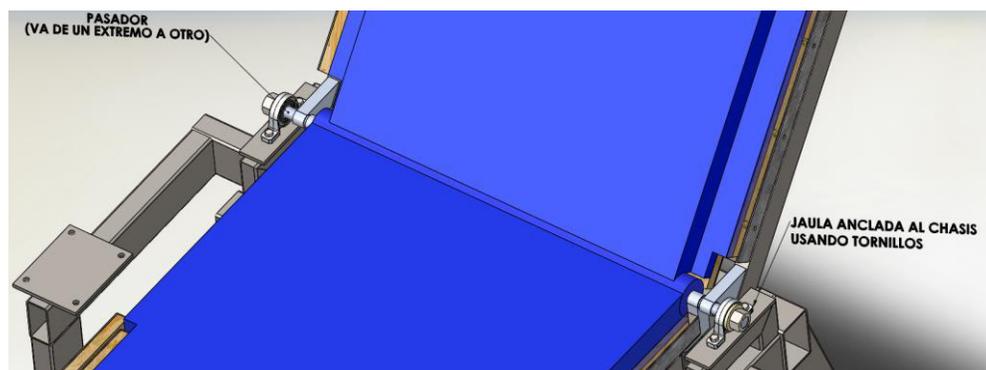


Figura 43. Pasador principal - conexión espaldar - asiento

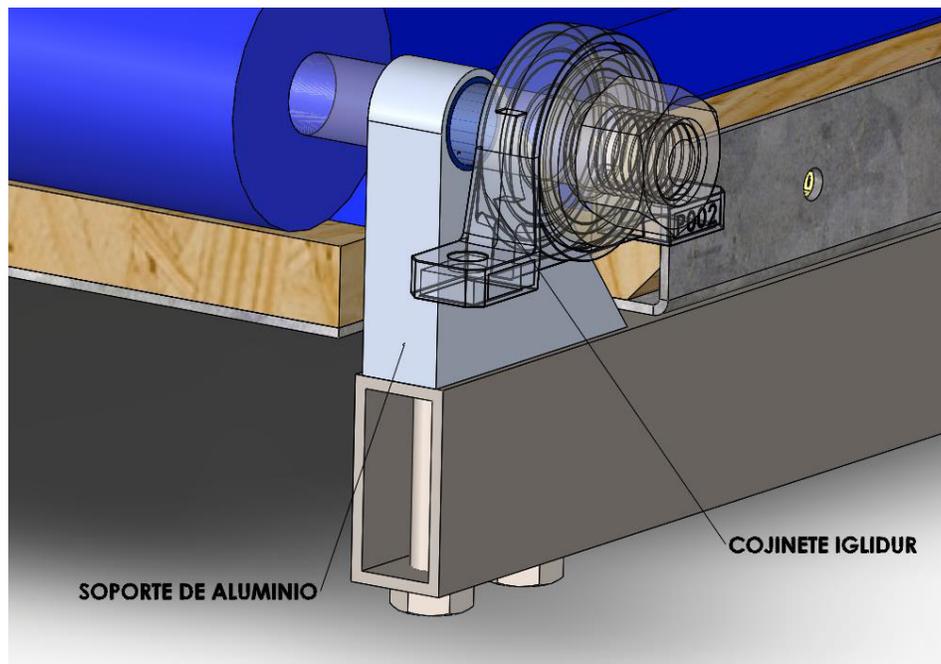


Figura 44. Conexión espaldar - pasador principal

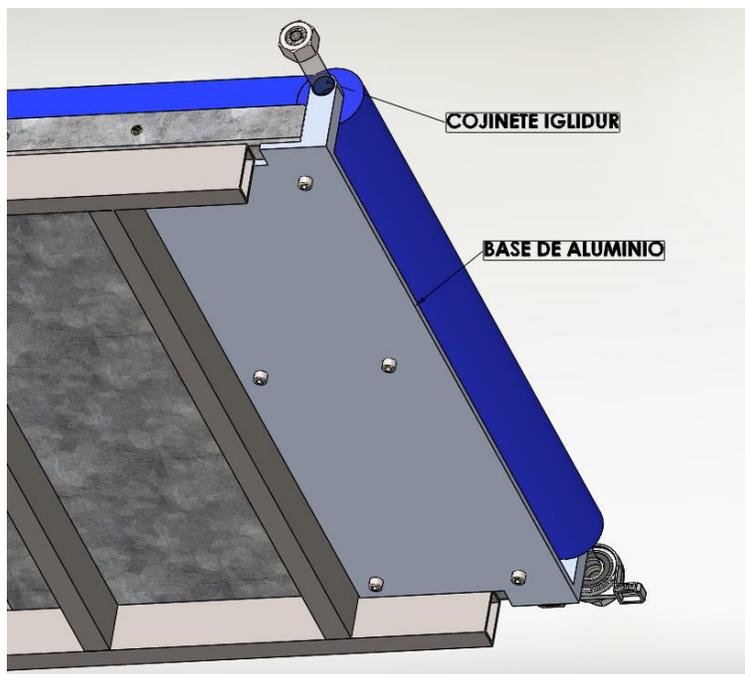


Figura 45. Conexión pasador principal - asiento

5.2 Actuadores lineales para el robot

5.2.1 Actuadores lineales en el mercado

Para el desarrollo del robot se hizo una búsqueda exhaustiva sobre los actuadores lineales que debían usarse. Para la selección, una de las condiciones principales es el ruido que produce el dispositivo al funcionar, pues para aplicaciones que se realizan en el interior y en espacios donde se encuentre el adulto mayor no deben superarse los 50 dB [31], otro criterio para escoger fue el precio, pues al usarse 4 actuadores lineales como mecanismos para dar movimiento a la cojinería, el costo de los mismos es un elemento determinante a la hora de construir el robot.

En este punto y bajo los criterios anteriores se decide usar el modelo “*CE ROHS Certificate Electric Bed Chair Hospital Equipment electric linear actuator 12v*” [32], de la compañía **Nanjing Yongnuo Transmission Equipment Co., Ltd.** Este dispositivo trabaja por debajo de los 50 dB, a la velocidad de trabajo 5 mm/s soporta una carga de 6000N. Los precios están entre los 18 – 22 de dólares [32].

The image shows a screenshot of an Alibaba.com product listing for a 12V electric linear actuator. The product is titled "CE ROHS Certificate Electric Bed Chair Hospital Equipment electric linear actuator 12v". The listing includes technical diagrams showing the actuator in its retracted and extended states, with dimensions: "stroke", "installation distance=stroke+175mm", and "Full extended length=2*stroke+175mm". The product has a 4.5-star rating from 2 reviews and 165 pieces sold. The price is listed as \$18.00 - \$22.00 per piece. The seller is Nanjing Yongnuo Transmission Equipment Co., Ltd., a Gold Supplier with 4 years of experience. The listing also features a "Contact Supplier" button, "Leave Messages" option, and various payment and shipping options.

Figura 46. Actuadores “Electric Bed Chair” [32]

5.2.2 Análisis de los mecanismos en el robot

En la presente sección se realiza un análisis general para el mecanismo base, el cual cuenta con tres uniones del tipo revoluta y una tipo prismática, visto en la figura 47.

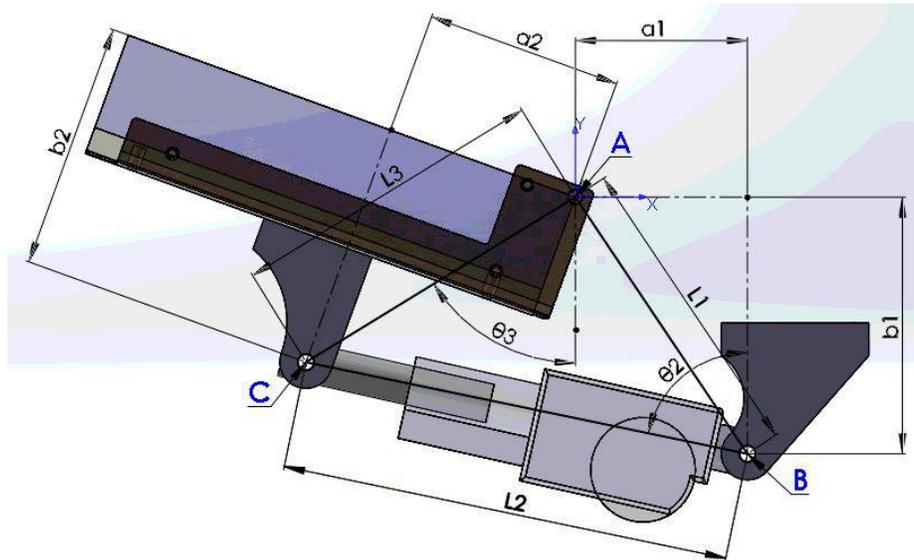


Figura 47. Mecanismo Actuadores lineales

En este mecanismo el nodo B se encuentra ligado a la parte fija y es uno de los extremos del actuador lineal, el nodo A es la unión entre la parte fija y la parte móvil, el nodo C es el otro extremo del actuador lineal, el cual se encuentra ligado a la parte móvil. Por ende entre el nodo C y el nodo B se encuentra la unión prismática.

En los siguientes apartados se describen las ecuaciones y el procedimiento para determinar las ubicaciones y el tamaño de los actuadores para el posicionamiento de la cabecera, espaldar, asiento y apoya piernas.

5.2.2.1 Análisis de posición

Partiendo de la figura 47. Los vectores posición para los puntos B y C respecto al origen A, son, ver anexo A para mayor detalle:

$$\vec{r}_1 = \begin{pmatrix} a_1 \\ -b_1 \end{pmatrix} \quad \vec{r}_2 = \begin{pmatrix} -L_2 \operatorname{sen}\theta_2 \\ L_2 \operatorname{cos}\theta_2 \end{pmatrix} \quad \vec{r}_3 = \begin{pmatrix} -L_3 \operatorname{sen}\theta_3 \\ -L_3 \operatorname{cos}\theta_3 \end{pmatrix}$$

A partir del polígono vectorial, se tiene la siguiente relación:

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_2 = \vec{r}_3$$

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ -b_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -L_2 \operatorname{sen}\theta_2 \\ L_2 \operatorname{cos}\theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L_3 \operatorname{sen}\theta_3 \\ -L_3 \operatorname{cos}\theta_3 \end{pmatrix}$$

Se presentan las ecuaciones (1) y (2).

$$a_1 - L_2 \operatorname{sen}\theta_2 = -L_3 \operatorname{sen}\theta_3 \quad \dots (1)$$

$$-b_1 + L_2 \operatorname{cos}\theta_2 = -L_3 \operatorname{cos}\theta_3 \quad \dots (2)$$

A partir de las dos ecuaciones anteriores, se obtiene:

$$(a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_3)^2 + (b_1 - L_3 \operatorname{cos}\theta_3)^2 = L_2^2 \quad \dots (3)$$

Para el análisis de posición se toman como referencia dos posiciones claves del mecanismo, la primera cuando el actuador está totalmente retraído, en este caso la distancia entre el nodo B y C se escribe como L_{21} , para el ángulo de la parte móvil en esta posición se representa por θ_{31} , de lo anterior, la ecuación (3), se reescribe como:

$$(a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_{31})^2 + (b_1 - L_3 \operatorname{cos}\theta_{31})^2 = L_{21}^2 \quad \dots (4)$$

La segunda posición, sucede cuando el actuador está totalmente extendido, para este caso la distancia entre B y C se indica como L_{22} . El ángulo de la parte móvil respecto al eje vertical se representa por θ_{32} , con lo anterior la ecuación (3), se da paso a la siguiente ecuación:

$$(a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_{32})^2 + (b_1 - L_3 \operatorname{cos}\theta_{32})^2 = L_{22}^2 \quad \dots (5)$$

Despejando la variable b_1 de la ecuación (4),

$$b_1 = \pm \sqrt{L_{21}^2 - (a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_{31})^2} + L_3 \operatorname{cos}\theta_{31} \quad \dots (4')$$

De las ecuaciones (4') y (5), se obtiene el valor de la posición horizontal del nodo B representada en la variable a_1 , para ver a detalle esta solución ver el "Anexo A: Análisis de posición actuadores lineales - Desarrollo Matemático".

$$a_1 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad \dots (6)$$

Donde,

$$A = C_4^2 + 4C_2^2 \quad \dots (7) \quad B = 2C_4C_5 + 8C_2^2C_3 \quad \dots (8) \quad C = C_5^2 + 4C_2^2C_3^2 - 4C_2^2L_{21}^2 \quad \dots (9)$$

$$C_1 = L_3 \operatorname{sen}\theta_{32} \quad \dots (10) \quad C_2 = L_3(\operatorname{cos}\theta_{31} - \operatorname{cos}\theta_{32}) \quad \dots (11) \quad C_3 = L_3 \operatorname{sen}\theta_{31} \quad \dots (12)$$

$$C_4 = 2(C_1 - C_3) \quad \dots (13) \quad C_5 = L_{21}^2 - L_{22}^2 + C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 \quad \dots (14)$$

Al obtener las dos soluciones de la ecuación (6), se pueden reemplazar en la ecuación (4'), para encontrar los valores de la posición vertical del nodo B representada por la variable b_1 .

Respecto a la orientación del actuador lineal, representada por la variable θ_2 y la orientación del elemento móvil, representada por θ_3 , desarrolladas como función de la longitud del actuador lineal, se tienen 4 casos posibles debido a las soluciones de a_1 y b_1 .

Antes de iniciar se define el ángulo β , ver anexo A, como:

$$\beta = \arctan \left| \frac{a_1}{b_1} \right| \dots (15)$$

Y la longitud

$$L_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$$

Para $a_1 > 0$ y $b_1 > 0$

$$\theta_3 = \arccos \left(\frac{L_3^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_3L_1} \right) - \beta \dots (16) \quad \theta_2 = \arccos \left(\frac{L_2^2 + L_1^2 - L_3^2}{2L_2L_1} \right) + \beta \dots (17)$$

Para $a_1 < 0$ y $b_1 > 0$

$$\theta_3 = \arccos \left(\frac{L_3^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_3L_1} \right) + \beta \dots (18) \quad \theta_2 = \arccos \left(\frac{L_2^2 + L_1^2 - L_3^2}{2L_2L_1} \right) - \beta \dots (19)$$

Para $a_1 > 0$ y $b_1 < 0$

$$\theta_3 = \pi - \arccos \left(\frac{L_3^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_3L_1} \right) + \beta \dots (20) \quad \theta_2 = \pi - \arccos \left(\frac{L_2^2 + L_1^2 - L_3^2}{2L_2L_1} \right) - \beta \dots (21)$$

Para $a_1 < 0$ y $b_1 < 0$

$$\theta_3 = \pi - \arccos \left(\frac{L_3^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_3L_1} \right) - \beta \dots (22) \quad \theta_2 = \pi - \arccos \left(\frac{L_2^2 + L_1^2 - L_3^2}{2L_2L_1} \right) + \beta \dots (23)$$

Para ver a detalle cómo se obtienen estos resultados consultar, "Anexo A: Análisis de posición actuadores lineales - Desarrollo Matemático".

5.2.2.2 Determinación de parámetros para la ubicación de los actuadores lineales.

Las coordenadas para los extremos de los actuadores lineales se calculan con el siguiente procedimiento:

1. Se define un valor para la coordenada vertical del extremo del cilindro, en la Figura 47, se describe como b_2 . Junto con las longitudes del actuador lineal cuando se encuentra totalmente retraído L_{21} y extendido L_{22} .
2. Se establece la longitud L_3 , en relación a las coordenadas horizontal y vertical del extremo del cilindro. Como b_2 , es una constante, L_3 es una función de a_2 .

$$L_3 = f(a_2) = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \dots (34)$$

3. Las orientaciones de la parte móvil, para su posición inicial θ_{31} (actuador totalmente retraído) y final θ_{32} (actuador totalmente extendido), se expresan en función de la variable a_2 y la constante b_2 .

La ubicación de los puntos de referencia se presenta en forma diferente para cada parte móvil del robot, por esto las relaciones cambian según la pieza analizada. Lo que comparten todas es la magnitud para la separación entre la posición inicial y final, siendo de 90° , para todas.

Para la cabecera, las referencias de los puntos se ubican como se muestra en la Figura 49, la orientación inicial y final para la parte móvil son:

$$\theta_{31} = f(a_2) = \arctan\left(\frac{a_2}{b_2}\right) \dots (35) \quad \theta_{32} = f(a_2) = \theta_{31} + \frac{\pi}{2} \dots (36)$$

Para el espaldar y el asiento, las referencias de los puntos se ubican como se muestra en la Figura 52, estas partes móviles inician 3° debajo de la horizontal, con el fin de permitir un contacto completo entre la pieza y el soporte del robot, la posición final se encuentra a 93° de la inicial.

$$\theta_{31} = f(a_2) = \arctan\left(\frac{a_2}{b_2}\right) - \frac{\pi}{60} \dots (37) \quad \theta_{32} = f(a_2) = \theta_{31} + \frac{31\pi}{60} \dots (38)$$

Para el apoya piernas, las referencias de los puntos se ubican como se muestra en la Figura 55, la orientación inicial y final para la parte móvil son:

$$\theta_{31} = f(a_2) = -\arctan\left(\frac{b_2}{a_2}\right) \dots (39) \quad \theta_{32} = f(a_2) = \theta_{31} + \frac{\pi}{2} \dots (40)$$

4. Al obtener los valores de θ_{31} y θ_{32} , se pueden determinar los valores para las ecuaciones (7) a (14). De los anteriores y la ecuación (6), se obtienen las dos soluciones para el parámetro a_1 , por tanto, estas quedan definidas en función de la variable a_2 .

$$a_{1 \text{ solución } 1} = f(a_2) = a_1 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \dots (41)$$

$$a_{1 \text{ solución } 2} = f(a_2) = a_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \dots (42)$$

A partir de estas dos funciones y la ecuación (4'), se calculan las 4 posibles soluciones para el parámetro b_1 , así,

$$b_{1 \text{ solución } 1} = f(a_2) = \sqrt{L_{21}^2 - (a_{1 \text{ solución } 1} + L_3 \text{ sen } \theta_{31})^2} + L_3 \text{ cos } \theta_{31} \dots (43)$$

$$b_{1 \text{ solución } 2} = f(a_2) = \sqrt{L_{21}^2 - (a_{1 \text{ solución } 2} + L_3 \text{ sen } \theta_{31})^2} + L_3 \text{ cos } \theta_{31} \dots (44)$$

$$b_{1 \text{ solución } 3} = f(a_2) = -\sqrt{L_{21}^2 - (a_{1 \text{ solución } 1} + L_3 \text{ sen } \theta_{31})^2} + L_3 \text{ cos } \theta_{31} \dots (45)$$

$$b_{1 \text{ solución } 4} = f(a_2) = -\sqrt{L_{21}^2 - (a_{1 \text{ solución } 2} + L_3 \text{ sen} \theta_{31})^2} + L_3 \text{ cos} \theta_{31} \dots (46)$$

5. A partir de las ecuaciones (4) y (5), con las soluciones para a_1 y b_1 , se obtiene la siguientes relaciones,

$$\begin{aligned} R_{\text{solución } 1} &= f(a_2) \\ &= (a_{1 \text{ solución } 1} + L_3 \text{ sen} \theta_{31})^2 + (L_3 \text{ cos} \theta_{31} - b_{1 \text{ solución } 1})^2 \\ &\quad + (a_{1 \text{ solución } 1} + L_3 \text{ sen} \theta_{32})^2 + (L_3 \text{ cos} \theta_{32} - b_{1 \text{ solución } 1})^2 - L_{21}^2 \\ &\quad - L_{22}^2 \dots (47) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{\text{solución } 2} &= f(a_2) \\ &= (a_{1 \text{ solución } 2} + L_3 \text{ sen} \theta_{31})^2 + (L_3 \text{ cos} \theta_{31} - b_{1 \text{ solución } 2})^2 \\ &\quad + (a_{1 \text{ solución } 2} + L_3 \text{ sen} \theta_{32})^2 + (L_3 \text{ cos} \theta_{32} - b_{1 \text{ solución } 2})^2 - L_{21}^2 \\ &\quad - L_{22}^2 \dots (48) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{\text{solución } 3} &= f(a_2) \\ &= (a_{1 \text{ solución } 1} + L_3 \text{ sen} \theta_{31})^2 + (L_3 \text{ cos} \theta_{31} - b_{1 \text{ solución } 3})^2 \\ &\quad + (a_{1 \text{ solución } 1} + L_3 \text{ sen} \theta_{32})^2 + (L_3 \text{ cos} \theta_{32} - b_{1 \text{ solución } 3})^2 - L_{21}^2 \\ &\quad - L_{22}^2 \dots (49) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{\text{solución } 4} &= f(a_2) \\ &= (a_{1 \text{ solución } 2} + L_3 \text{ sen} \theta_{31})^2 + (L_3 \text{ cos} \theta_{31} - b_{1 \text{ solución } 4})^2 \\ &\quad + (a_{1 \text{ solución } 2} + L_3 \text{ sen} \theta_{32})^2 + (L_3 \text{ cos} \theta_{32} - b_{1 \text{ solución } 4})^2 - L_{21}^2 \\ &\quad - L_{22}^2 \dots (50) \end{aligned}$$

Cuando las anteriores relaciones dan cero, confirman que las soluciones encontradas cumplen con los requerimientos del sistema.

6. Como un parámetro final, se presenta la relación entre el cambio en la longitud del actuador y el cambio en la orientación de la parte móvil, dicho cambio nos permite identificar la forma del movimiento en el mecanismo. Lo que se desea es que la diferencia entre la pendiente de la gráfica al final y al inicio del movimiento, sea cercana al cero, ya que esto garantiza un comportamiento lineal entre estas dos variables.

La anterior relación, se expresa para cada grupo de soluciones,

$$\text{pendiente}_{1 \text{ inicio}} = f(a_2) = \frac{L_3}{L_{21}} (a_{1 \text{ solución } 1} \text{ cos} \theta_{31} + b_{1 \text{ solución } 1} \text{ sen} \theta_{31}) \dots (51)$$

$$\text{pendiente}_{2 \text{ inicio}} = f(a_2) = \frac{L_3}{L_{21}} (a_{1 \text{ solución } 2} \text{ cos} \theta_{31} + b_{1 \text{ solución } 2} \text{ sen} \theta_{31}) \dots (52)$$

$$\text{pendiente}_{3 \text{ inicio}} = f(a_2) = \frac{L_3}{L_{21}} (a_{1 \text{ solución } 1} \text{ cos} \theta_{31} + b_{1 \text{ solución } 3} \text{ sen} \theta_{31}) \dots (53)$$

$$\text{pendiente}_{4 \text{ inicio}} = f(a_2) = \frac{L_3}{L_{21}} (a_{1 \text{ solución } 2} \text{ cos} \theta_{31} + b_{1 \text{ solución } 4} \text{ sen} \theta_{31}) \dots (54)$$

$$\text{pendiente}_{1 \text{ final}} = f(a_2) = \frac{L_3}{L_{22}} (a_{1 \text{ solución } 1} \text{ cos} \theta_{32} + b_{1 \text{ solución } 1} \text{ sen} \theta_{32}) \dots (55)$$

$$\text{pendiente}_{2\text{final}} = f(a_2) = \frac{L_3}{L_{22}} (a_{1\text{solución } 2} \cos \theta_{32} + b_{1\text{solución } 2} \sin \theta_{32}) \dots (56)$$

$$\text{pendiente}_{3\text{final}} = f(a_2) = \frac{L_3}{L_{22}} (a_{1\text{solución } 1} \cos \theta_{32} + b_{1\text{solución } 3} \sin \theta_{32}) \dots (57)$$

$$\text{pendiente}_{4\text{final}} = f(a_2) = \frac{L_3}{L_{22}} (a_{1\text{solución } 2} \cos \theta_{32} + b_{1\text{solución } 4} \sin \theta_{32}) \dots (58)$$

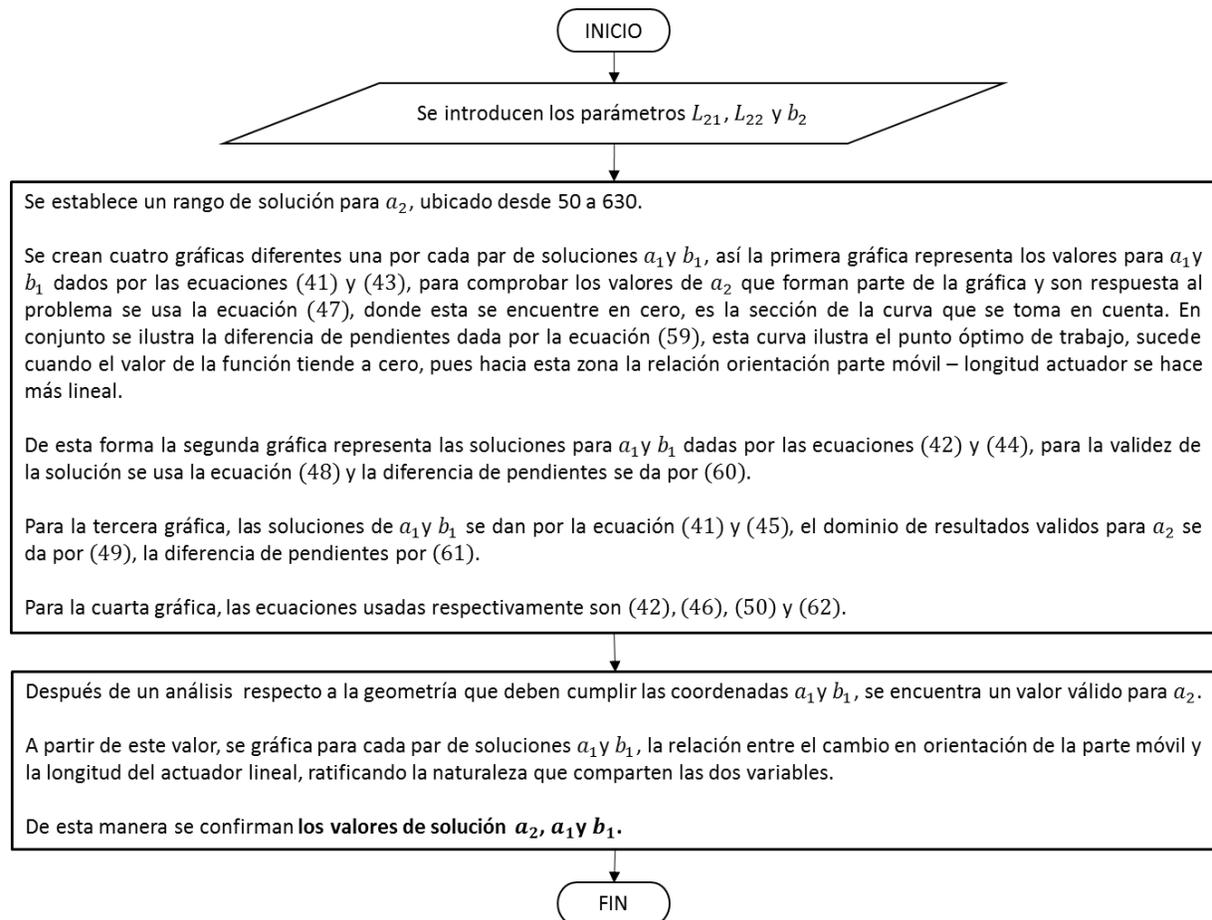
$$\text{Diferenciadependientes}_1 = f(a_2) = \text{pendiente}_{1\text{final}} - \text{pendiente}_{1\text{inicio}} \dots (59)$$

$$\text{Diferenciadependientes}_2 = f(a_2) = \text{pendiente}_{2\text{final}} - \text{pendiente}_{2\text{inicio}} \dots (60)$$

$$\text{Diferenciadependientes}_3 = f(a_2) = \text{pendiente}_{3\text{final}} - \text{pendiente}_{3\text{inicio}} \dots (61)$$

$$\text{Diferenciadependientes}_4 = f(a_2) = \text{pendiente}_{4\text{final}} - \text{pendiente}_{4\text{inicio}} \dots (62)$$

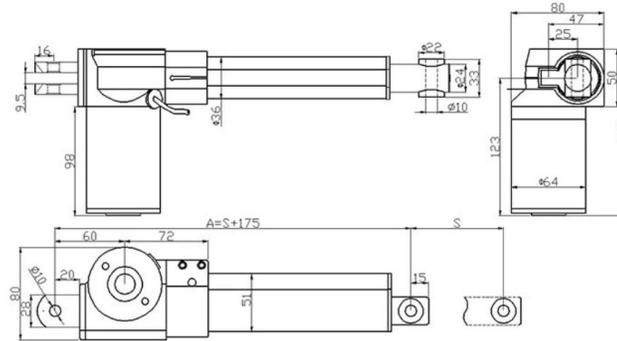
Los pasos anteriores, se pueden resumir de forma más clara en el siguiente esquema de desarrollo,



5.2.3 Análisis y selección del tamaño de los actuadores

Respecto a la selección de los actuadores cabe resaltar las limitaciones interpuestas por el fabricante, donde se sugieren los siguientes tamaños (figura 48):

Mounting Drawing in millimeter:



Common Standard Installation length: Customization

Stroke length (mm)	50	100	200	300	400	500	600
Installation Length (mm)	225	275	375	475	575	675	775
Weight(KG)	1.75	1.85	2.05	2.25	2.45	2.65	2.85

Figura 48. Longitudes actuadores [32]

Esto es un punto de partida para el análisis y dimensionamiento en el movimiento de la cabecera, espaldar, asiento y apoya piernas.

5.2.3.1 Análisis del tamaño de los actuadores y ubicación para la Cabecera.

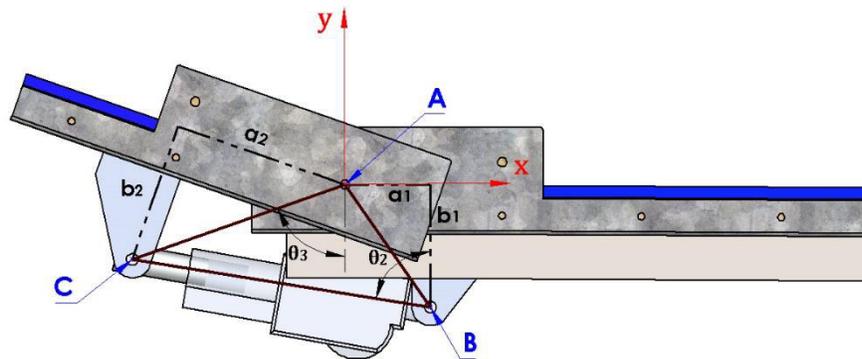


Figura 49. Análisis posición actuador cabecera

Partiendo de la figura 49, para este conjunto, las longitudes propuestas del actuador lineal son $L_{21} = 225$ mm (completamente retraído), $L_{22} = 275$ mm (completamente extendido), con $b_2 = 120.905$ mm.

Las opciones para las coordenadas punto móvil del actuador, se muestran en la figura 50:

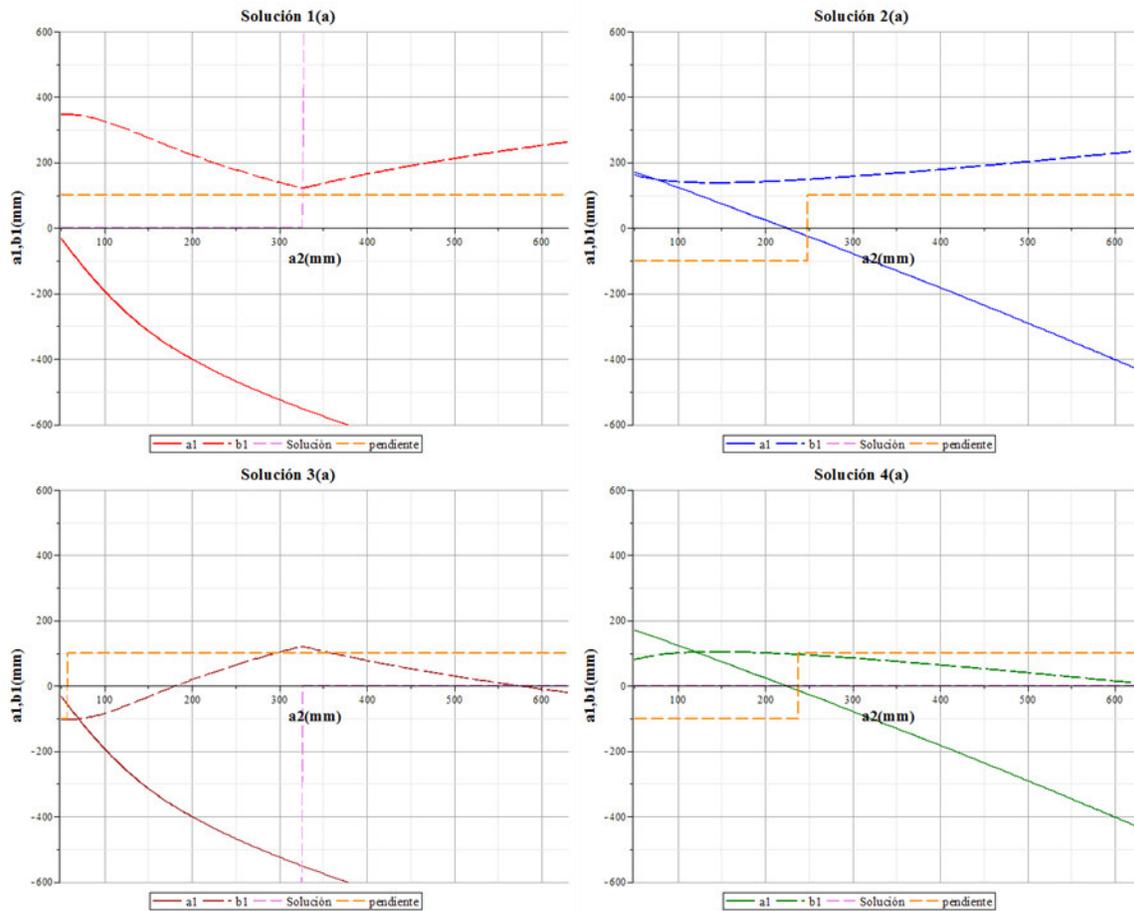


Figura 50. Soluciones para la ubicación del actuador - cabecera

Uno de los parámetros fundamentales para tomar una decisión a partir de las cuatro figuras, es el valor de a_1 , por las condiciones geométricas (Figura 49) debe ser positivo, por tanto, las respuestas ilustradas en las soluciones 1 y 3 (Figuras Figura 50.a y Figura 50.c) quedan descartadas. El siguiente aspecto a considerar es que en la solución 2 (Figura 50.b), ningún valor de a_2 , es una respuesta válida pues la curva de solución (color morado) no tiene valor cero (Sección 5.2.2.2), mientras que para la solución 4 (Figura 50.d), todo el rango de a_2 es una posible respuesta para el problema, la elección debe estar cerca del valor $a_2 = 239$ mm, ya que hacia este punto, la diferencia de pendientes (curva naranja) se acerca a cero (Sección 5.2.2.2). Para garantizar, que la altura en la base que sostiene a uno de los extremos del actuador lineal sea suficiente, para que este no choque contra las partes que conforman la cojinería (Figura 49), se selecciona de la figura 48.d, el valor $a_2 = 150$ mm, ya que en este punto, b_1 (curva verde punteada, figura 48.d) alcanza su mayor altura.

Para observar la relación entre la orientación de la parte móvil θ_3 y la longitud del actuador lineal L_2 , se introducen en la ecuación (3), la magnitud $a_2 = 150$ mm, y las soluciones a_1 y b_1 para este punto obtenidas en la figura 50. De aquí, se obtiene una función por cada par a_1 y b_1 , se muestran en la figura 49.

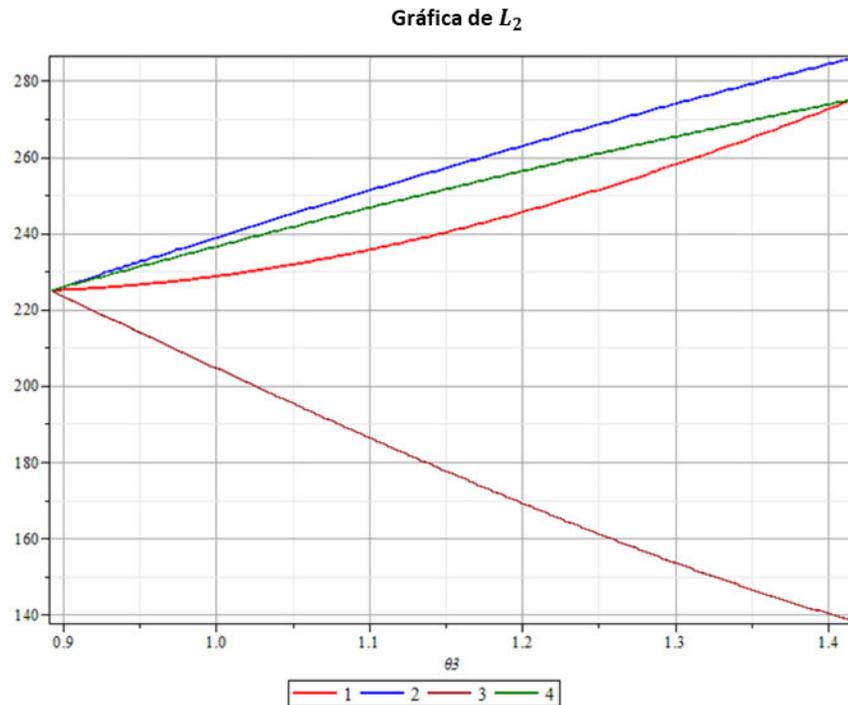


Figura 51. Posición actuador lineal con la solución propuesta - cabecera

De la figura 51, se observa que, la solución 4 (curva verde) presenta una relación casi lineal, por lo tanto, se toman como respuesta los valores $a_1 = 74.4$ mm y $b_1 = 104$ mm, coordenadas de solución para $a_2 = 150$ mm, de la figura 48.d.

5.2.3.2 Análisis del tamaño de los actuadores y ubicación para el Espaldar y Asiento

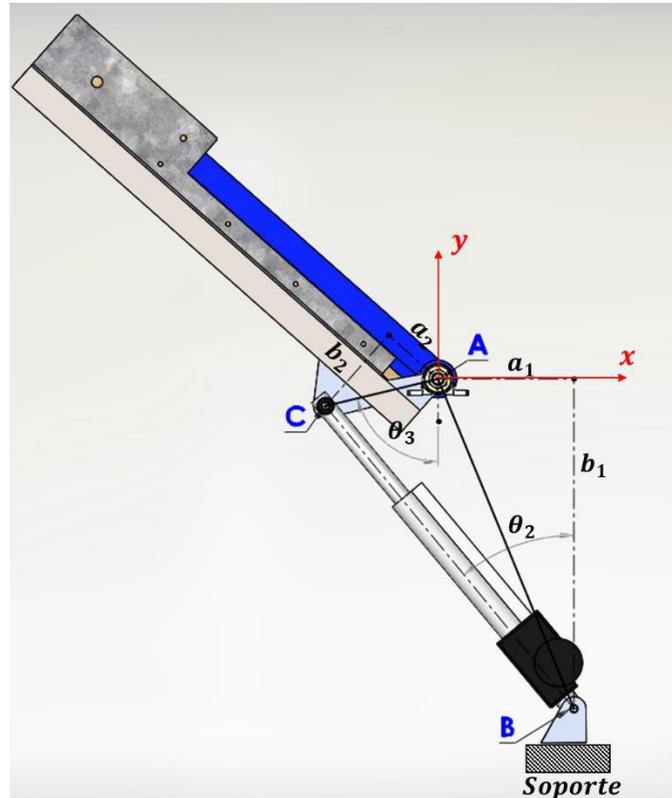


Figura 52. Análisis posición actuadores: Espaldar - Asiento

Partiendo de la figura 52, se toma como decisión, encontrar las posiciones de los actuadores para el espaldar y el asiento usando el mismo análisis.

Cabe resaltar que para mover el espaldar y el asiento se usará un actuador lineal para cada uno, se realiza un solo análisis ya que el actuador del otro elemento, se ubicará en una posición simétrica respecto a un plano vertical que contiene al punto A.

Las longitudes iniciales propuestas para encontrar la solución, son: $L_{21} = 375$ mm, $L_{22} = 575$ mm y $b_2 = 125.905$ mm.

Las gráficas de coordenadas solución, obtenidas para este mecanismo se presentan en la figura 53:

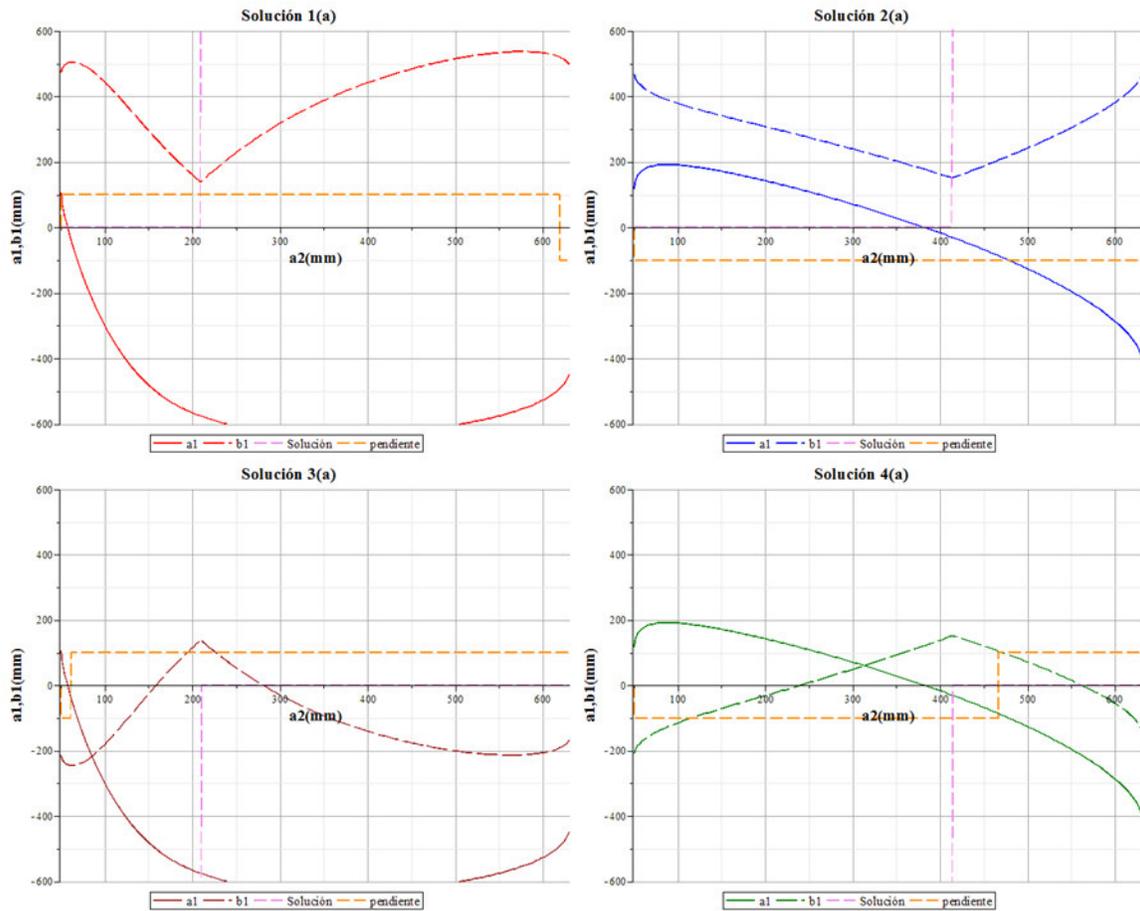


Figura 53. Soluciones para la ubicación del actuador: Espaldar Asiento

En la solución 2 (Figura 53.b), la posición del extremo en el actuador lineal que corresponde a la pieza fija, se ubica hacia el lado opuesto del otro extremo, por esta razón, al extenderse el actuador lineal, choca contra la pieza móvil.

Para la solución 3 (Figura 53.c), el rango de trabajo son todos los valores mayores a $a_2 = 220$ mm, en este intervalo los valores de a_1 , superan la consideración geométrica de $a_1 < 500$ mm, ya que si se supera este valor las dimensiones del robot exceden las permitidas para un dispositivo de este tipo.

En la solución 4 (Figura 53.d), el rango de trabajo son todos los valores mayores a $a_2 = 420$ mm, en este la ubicación del extremo de la parte fija se encuentra sobre el asiento y el espaldar por esta razón, se descarta esta opción.

En la solución 1 (Figura 53.a), el espacio de trabajo consiste en todos los valores menores a $a_2 = 210$ mm, en este punto la opciones para a_1 y b_1 , cumplen con las ubicaciones y limitaciones geométricas, ya que tanto la coordenada horizontal y vertical del extremo anclado a la parte fija, se encuentran localizados debajo de la pieza móvil, de esta manera

se evita que el actuador lineal choque contra la misma. De aquí, se elige como respuesta $a_2 = 85$ mm (punto más cercano al valor cero en la diferencia de pendientes y que brinda un espacio suficiente para la ubicación del soporte, en el cual se acopla el extremo del actuador lineal a la parte móvil), este valor se ingresa junto con los 4 pares de soluciones a_1 y b_1 , en la ecuación (3), para obtener las relaciones entre la orientación de la parte móvil θ_3 y la longitud del actuador lineal L_2 , como se muestra en la figura 54.

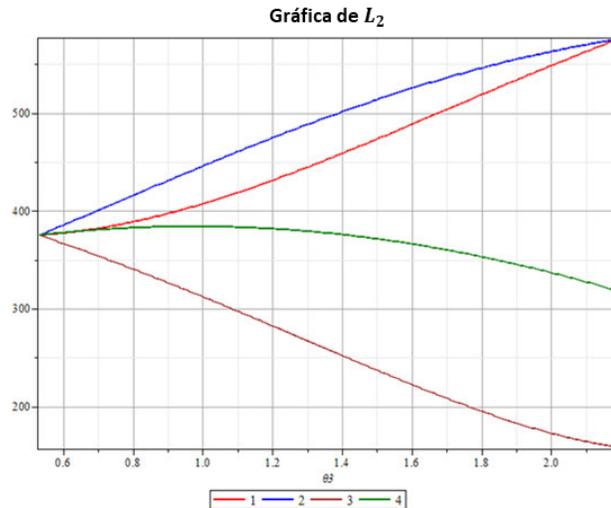


Figura 54. Posición actuador lineal con la solución propuesta - Espaldar Asiento

Se observa que, la solución 1 presenta en este punto una relación casi lineal, curva color rojo, por lo tanto el par de soluciones se toma de esta respuesta, así $a_1 = -214.9$ mm y $b_1 = 479$ mm.

5.3.2.3 Análisis del tamaño de los actuadores y ubicación para el Apoya piernas:

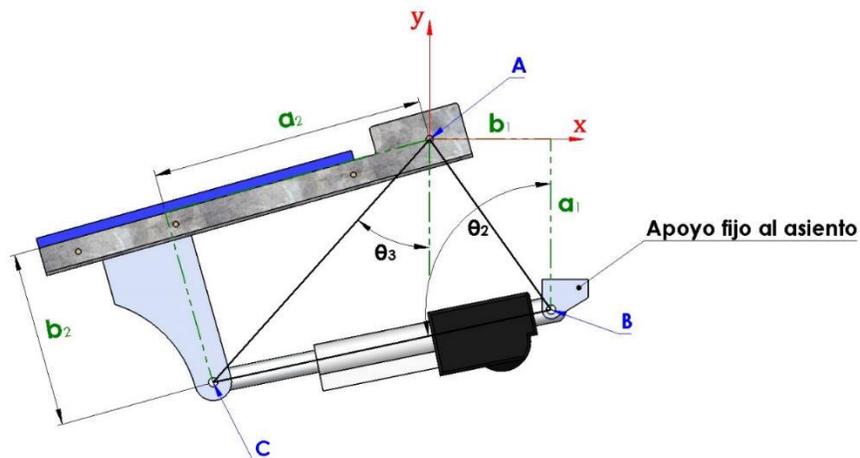


Figura 55. Análisis posición actuador - Apoya piernas

El mecanismo a analizar se presenta en la figura 55, las longitudes propuestas para el actuador lineal son $L_{21} = 275$ mm, $L_{22} = 375$ mm y $b_2 = 190.97$ mm.

Los conjuntos de soluciones obtenidas para este sistema, se muestran en la figura 56:

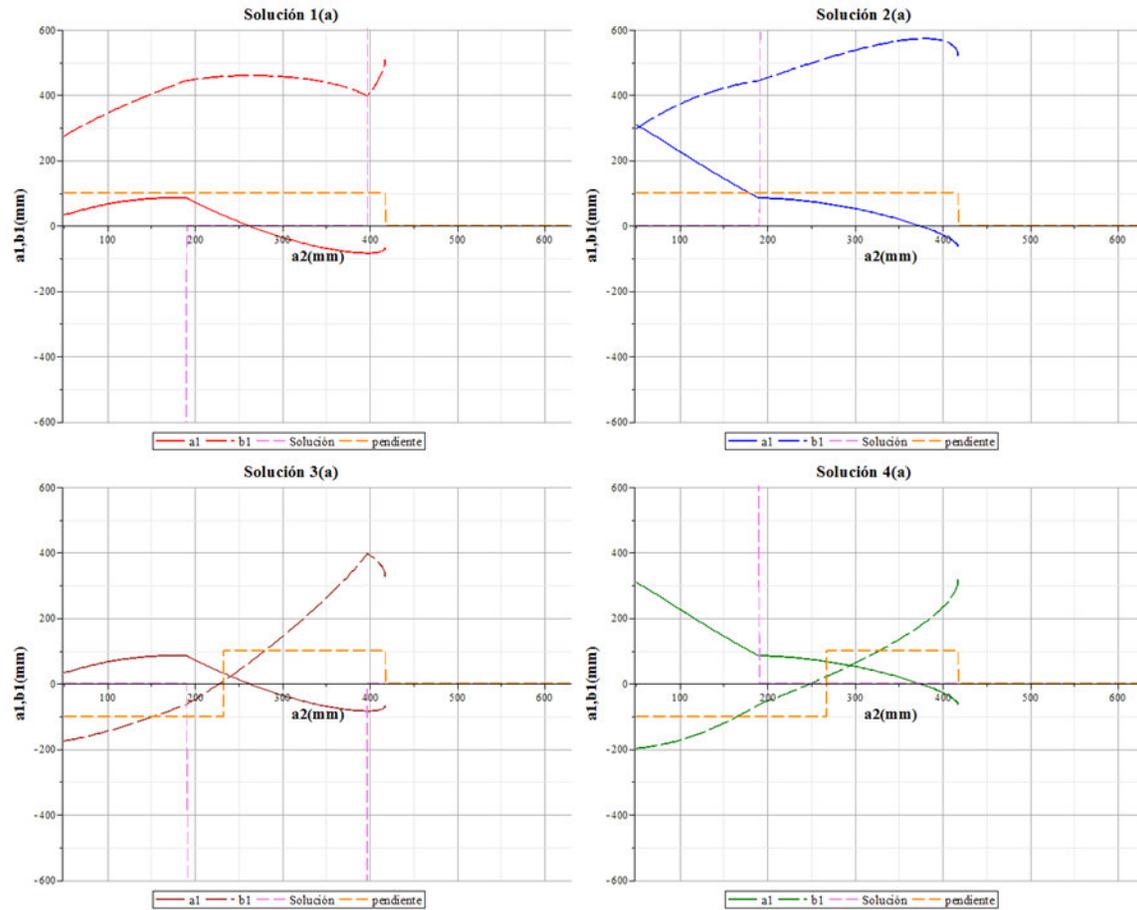


Figura 56. Soluciones para la ubicación del actuador: Apoya piernas

En la solución 1 (Figura 56.a), el rango de trabajo se encuentra entre $a_2 = 180$ mm hasta $a_2 = 390$ mm, para este el valor de b_1 , se encuentra por encima de los 400 mm, por tanto, no es un medida válida de trabajo.

En la solución 2 (Figura 56.b), el rango de trabajo es $a_2 = [0 \dots 180$ mm], los valores de b_1 , se encuentran por encima de los 300 mm, lo cual hace que las respuestas se encuentren fuera de un área de trabajo válida.

Para la solución 3 (Figura 56.c), el rango válido para a_2 , se encuentra en $[0 \dots 180$ mm] y $[390 \dots 600$ mm], en el primer espacio, el valor de b_1 es negativo, por lo cual se descarta, pues esta posición no es válida como se muestra en la figura 55. En el segundo espacio, la dimensión del valor a_2 , es muy grande respecto al tamaño del asiento, en estos puntos los

valores de b_1 , aunque son positivos son mayores a los 300 mm, por ende esta opción no se tiene en cuenta.

En la solución 4 (Figura 56.d), el rango de trabajo para a_2 , son los mayores a 180 mm, en este segmento el valor que ofrece un comportamiento lineal, se encuentra cerca de $a_2 = 267$ mm, debido a consideraciones geométricas para b_1 , como la distancia desde el punto de rotación a la base del asiento es 31 mm (Figura 57), por ende b_1 , debe ser superior a esta medida, se escoge $b_1 = 62.5$ mm, así la base donde se ubica el actuador lineal tiene la altura suficiente, brindándole libertad para realizar su movimiento. De lo anterior, las respuestas a este mecanismo son $a_2 = 350$ mm, $a_1 = 52.3$ mm y $b_1 = 62.5$ mm. La relación entre la orientación de la parte móvil θ_3 y la longitud del actuador lineal L_2 para esta respuesta se ilustra (curva de color verde) en la figura 58.

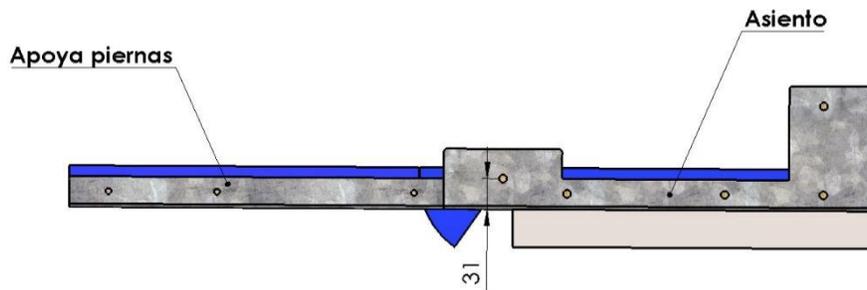


Figura 57. Separación punto de rotación - base: apoya piernas

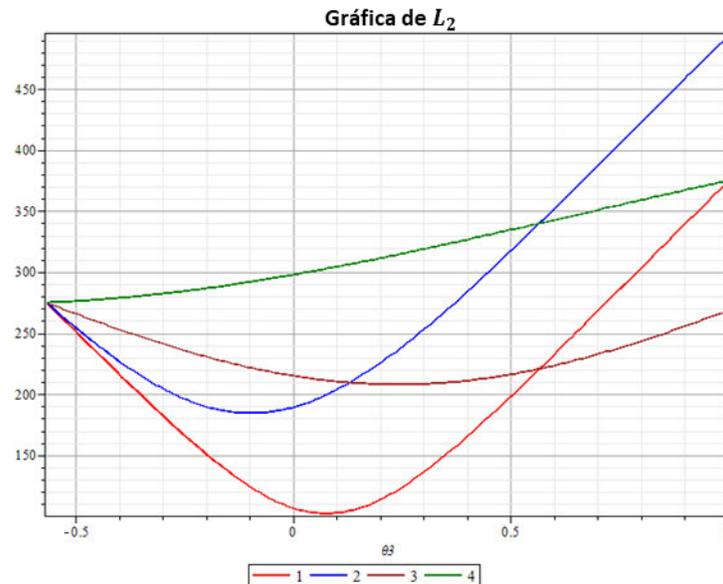


Figura 58. Posición actuador lineal con la solución propuesta - Apoya piernas

5.2.3 ANÁLISIS DE VELOCIDAD Y ACELERACIÓN GENERAL PARA EL MECANISMO

Para este análisis se establece que la longitud del actuador lineal cambia en el tiempo bajo una función específica, teniendo en cuenta como parámetros adicionales, el tamaño del actuador al estar completamente contraído L_{21} y al estar totalmente extendido L_{22} , las posiciones de los extremos del actuador respecto a la pieza móvil a_2, b_2 y la parte fija a_1, b_1 . Obtenidas en la sección anterior, para cada subsistema.

Se presentan las siguientes relaciones:

$$L_2 \rightarrow f(\text{tiempo}, L_{21}, L_{22}) \dots (24)$$

La velocidad y la aceleración en el actuador lineal se definen como,

$$\text{velocidad} \rightarrow \frac{d}{dt}L_2 \rightarrow \dot{L}_2 \dots (25) \quad \text{aceleración} \rightarrow \frac{d^2}{dt^2}L_2 \rightarrow \ddot{L}_2 \dots (26)$$

La función para L_2 usada, para analizar la forma de trabajar en los diferentes mecanismos, es una curva suave, dividida en, un movimiento de aceleración constante, seguido de un desplazamiento a velocidad constante, finalizando con una desaceleración constante hasta detenerse, esta naturaleza se ve reflejada en la siguiente estructura matemática:

$$L_2 = \begin{cases} L_{21} + \frac{1}{2}(ac)(t^2) & \text{para } 0 \leq t \leq t_1 \\ L_{2f1} + vel(t - t_1) & \text{para } t_1 < t \leq t_1 + t_2 \dots (27) \\ L_{2f2} + vel(t - t_1 - t_2) - \frac{1}{2}(ac)(t - t_1 - t_2)^2 & \text{para } t_1 + t_2 < t \leq 2t_1 + t_2 \end{cases}$$

Donde vel , expresa la velocidad del actuador lineal en milímetros por segundo y ac , la aceleración experimentada por el actuador al iniciar y finalizar su movimiento, se expresa en milímetros por segundo cuadrado.

$$t_1 = \frac{vel}{ac} \dots (28) \quad L_{2f1} = L_{21} + \frac{1}{2}(ac)(t_1^2) \dots (29) \quad L_{2f2} = L_{22} - \frac{1}{2}(ac)(t_1^2) \dots (30)$$

$$t_2 = \frac{L_{2f2} - L_{2f1}}{vel} \dots (31)$$

Para la velocidad y aceleración de la orientación del actuador lineal θ_2 , se cuenta con las siguientes ecuaciones:

$$\text{velocidad} \rightarrow \dot{\theta}_2 = \frac{(L_2 - a_1 \text{sen} \theta_2 - b_1 \text{cos} \theta_2) \dot{L}_2}{L_2(a_1 \text{cos} \theta_2 - b_1 \text{sen} \theta_2)} \dots (32)$$

$$\text{aceleración} \rightarrow \ddot{\theta}_2 = 1_{\text{termino}} * (2_{\text{termino}} - 3_{\text{termino}}) \dots (33)$$

$$1_{\text{termino}} = \frac{1}{L_2^2(a_1 \text{cos} \theta_2 - b_1 \text{sen} \theta_2)^2} \dots (34)$$

$$2_{\text{termino}} = L_2(a_1 \text{cos} \theta_2 - b_1 \text{sen} \theta_2) [\ddot{L}_2(L_2 - a_1 \text{sen} \theta_2 - b_1 \text{cos} \theta_2) + \dot{L}_2(\dot{L}_2 - a_1 \dot{\theta}_2 \text{cos} \theta_2 + b_1 \dot{\theta}_2 \text{sen} \theta_2)] \dots (35)$$

$$3_{termino} = (L_2 - a_1 \text{sen} \theta_2 - b_1 \text{cos} \theta_2) \dot{L}_2 [\dot{L}_2 (a_1 \text{cos} \theta_2 - b_1 \text{sen} \theta_2) - L_2 \dot{\theta}_2 (a_1 \text{sen} \theta_2 + b_1 \text{cos} \theta_2)] \dots (36)$$

Para la velocidad y aceleración de la orientación de la parte móvil θ_3 , se cuenta con lo siguiente:

$$\text{velocidad} \rightarrow \dot{\theta}_3 = \frac{L_2 \dot{L}_2}{L_3 (a_1 \text{cos} \theta_3 + b_1 \text{sen} \theta_3)} \dots (37)$$

$$\text{aceleración} \rightarrow \ddot{\theta}_3 = \frac{\dot{L}_2^2 + L_2 \ddot{L}_2}{L_3 (a_1 \text{cos} \theta_3 + b_1 \text{sen} \theta_3)} + \frac{L_2 \dot{L}_2 \dot{\theta}_2 (a_1 \text{sen} \theta_3 - b_1 \text{cos} \theta_3)}{L_3 (a_1 \text{cos} \theta_3 + b_1 \text{sen} \theta_3)^2} \dots (38)$$

5.2.3.1 Análisis de velocidad y aceleración para la cabecera

En esta sección se analizan las velocidades y aceleraciones para: la distancia entre el extremo móvil y el fijo del actuador lineal L_2 , la orientación de la cabecera θ_3 y la orientación del actuador θ_2 .

Partiendo de los siguientes valores para la cabecera, $a_1 = 74.4$ mm, $b_1 = 104$ mm, $a_2 = 150$ mm, $b_2 = 120.905$ mm, $L_{21} = 225$ mm y $L_{22} = 275$ mm. Debido a que el dispositivo está diseñado para adultos mayores, la velocidad de extensión sugerida para el actuador lineal es de $vel = 3$ mm/s y una aceleración de $ac = 0.5$ mm/s². Reemplazando los valores en las ecuaciones (27), (25) y (26), la cuales representan la distancia del extremo móvil respecto al fijo en el actuador, así como su velocidad y aceleración respectivamente.

Los resultados se pueden ver en la figura 59.

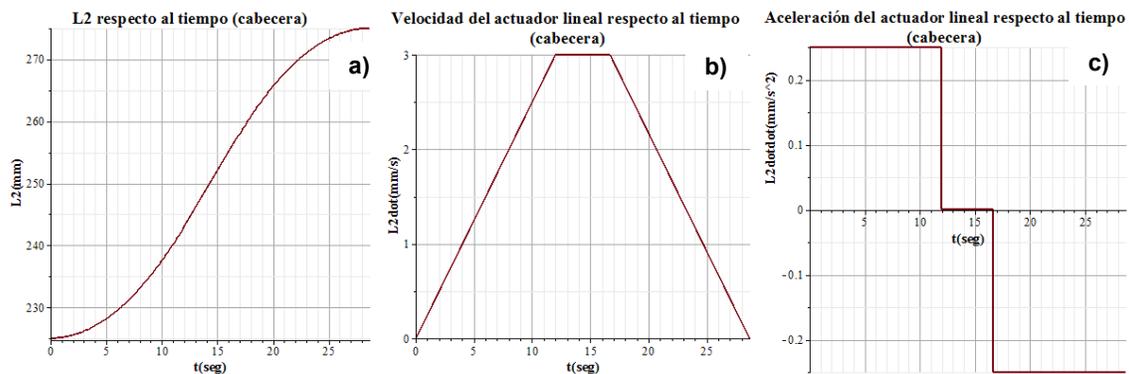


Figura 59. Posición - velocidad - aceleración mecanismo cabecera

Para la orientación del actuador lineal respecto al plano vertical θ_2 , su velocidad $\dot{\theta}_2$ y aceleración angular $\ddot{\theta}_2$, se reemplazan los valores anteriores en las ecuaciones (17), (32), (33), (34), (35) y (36). Los resultados se observan en la figura 60.

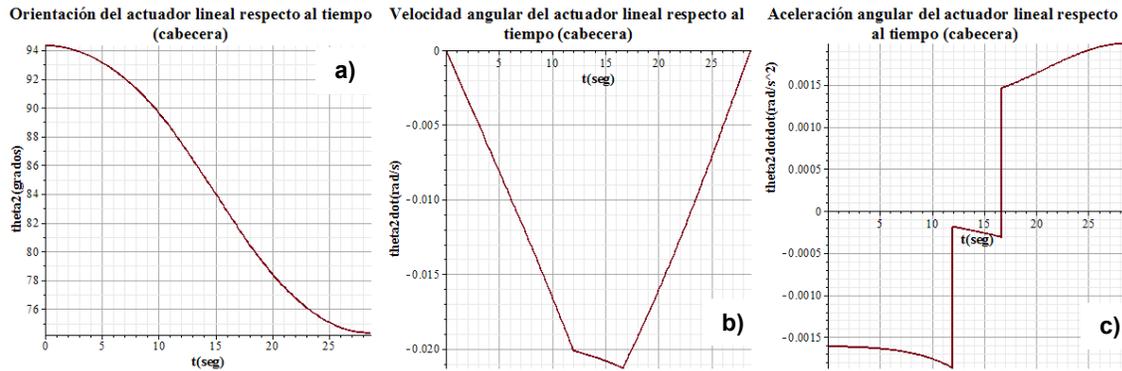


Figura 60. Orientación actuador lineal - velocidad angular - aceleración angular

Respecto a la orientación θ_3 , velocidad angular $\dot{\theta}_3$ y aceleración $\ddot{\theta}_3$ de la parte móvil, se reemplazan los valores en las ecuaciones (16), (37) y (38). Los resultados se observan en la figura 61.

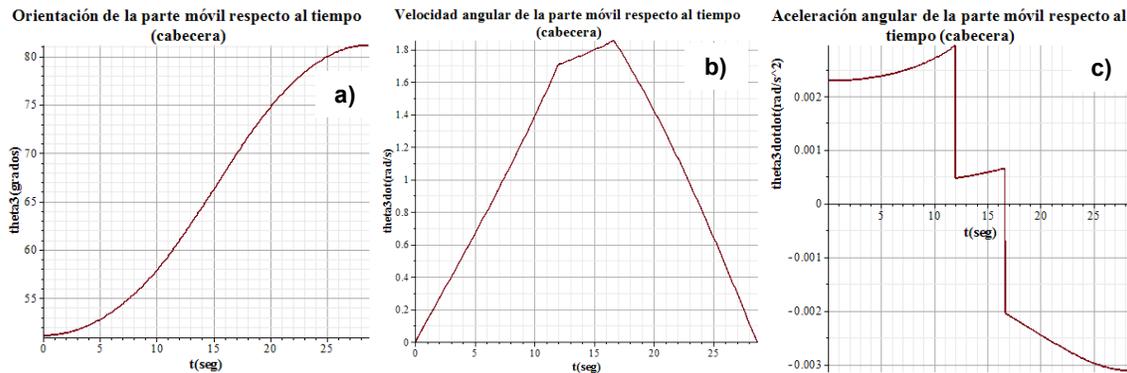


Figura 61. Orientación θ_3 velocidad - aceleración

5.2.3.2 Análisis de velocidad y aceleración para los sistemas espaldar - asiento

Debido a que los mecanismos usados para el espaldar y el asiento son iguales, en esta sección, solo se realiza un análisis para las velocidades y aceleraciones para: la distancia entre el extremo móvil y el fijo para el actuador lineal L_2 , la orientación de la pieza móvil (espaldar o asiento) θ_3 y la orientación del actuador θ_2 .

Partiendo de los siguientes valores para este sistema, $a_1 = -214,9$ mm, $b_1 = 479$ mm, $a_2 = 85$ mm, $b_2 = 125.905$ mm, $L_{21} = 375$ mm y $L_{22} = 575$ mm. Con una velocidad de desplazamiento del actuador lineal de $vel = 3$ mm/s y una aceleración de $ac = 0.5$ mm/s². Reemplazando los datos anteriores en las ecuaciones (27), (25) y (26), las cuales representan a la distancia del extremo móvil respecto al fijo en el actuador, así como su velocidad y aceleración, respectivamente. Los resultados se pueden ver en la figura 62.

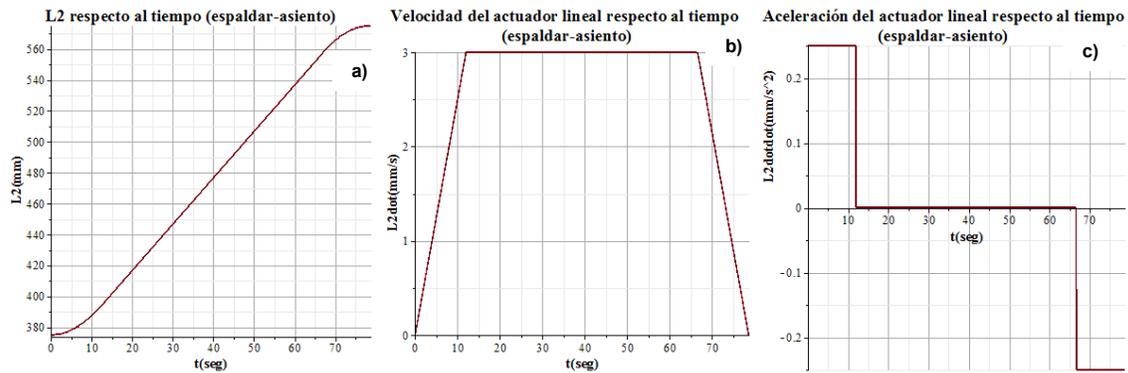


Figura 62. Posición - velocidad - aceleración mecanismo Espaldar Asiento

Para la orientación del actuador lineal respecto al plano vertical θ_2 , su velocidad $\dot{\theta}_2$ y aceleración angular $\ddot{\theta}_2$, se reemplazan los valores anteriores en las ecuaciones (19), (32), (33), (34), (35) y (36). Los resultados para estos valores se observan en la figura 63.

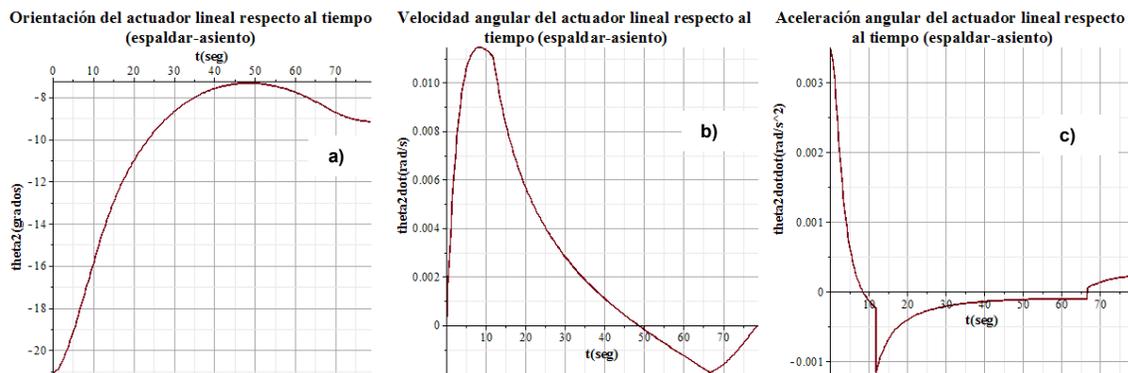


Figura 63. Orientación actuador lineal - velocidad angular - aceleración angular Espaldar Asiento

Respecto a la orientación θ_3 , velocidad angular $\dot{\theta}_3$ y aceleración $\ddot{\theta}_3$ de la parte móvil, se reemplazan los valores en las ecuaciones (18), (37) y (38). Los resultados se observan en la figura 64.

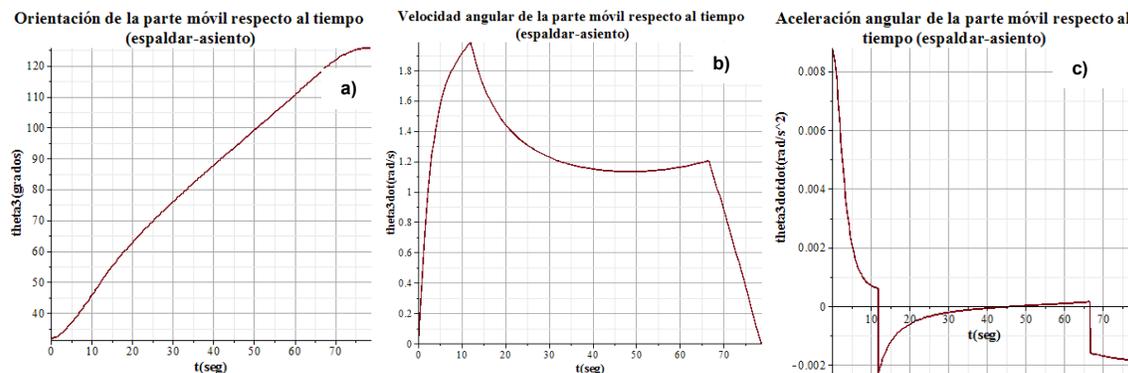


Figura 64. Orientación θ_3 velocidad - aceleración Espaldar Asiento

5.2.3.3 Análisis de velocidad y aceleración para el apoya piernas

En esta sección se analizan las velocidades y aceleraciones para: la distancia entre el extremo móvil y el fijo para el actuador lineal L_2 , la orientación del apoya piernas θ_3 y la orientación del actuador θ_2 .

Partiendo de los siguientes valores para la cabecera, $a_1 = 52.3$ mm, $b_1 = 62.5$ mm, $a_2 = 350$ mm, $b_2 = 190.97$ mm, $L_{21} = 275$ mm y $L_{22} = 375$ mm. Con una velocidad de desplazamiento del actuador lineal de $vel = 3$ mm/s y una aceleración de $ac = 0.5$ mm/s². Reemplazando las cantidades anteriores en la ecuaciones (27), (25) y (26), las cuales, representan la distancia del extremo móvil respecto al fijo en el actuador, así como su velocidad y aceleración, respectivamente.

Los resultados de estas ecuaciones se pueden ver en la figura 65.

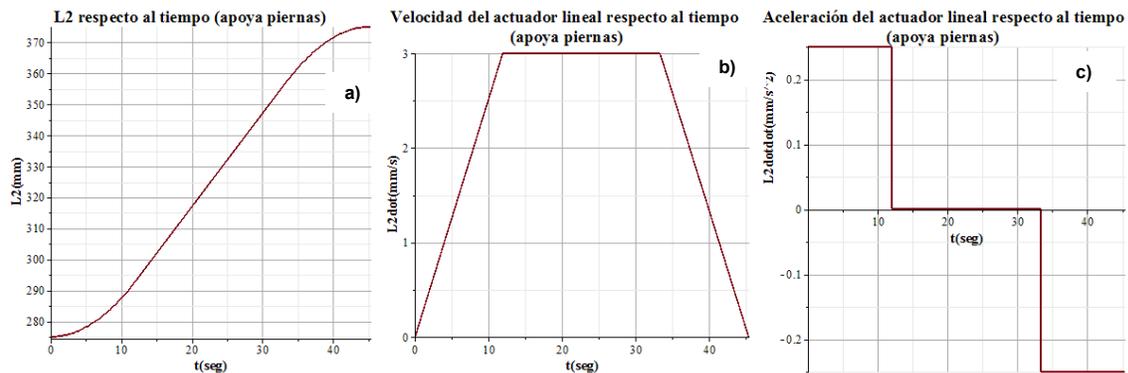


Figura 65. Posición - velocidad - aceleración mecanismo Apoya piernas

Para la orientación del actuador lineal respecto al plano vertical θ_2 , su velocidad $\dot{\theta}_2$ y aceleración angular $\ddot{\theta}_2$, se reemplazan los valores anteriores en las ecuaciones (17), (32), (33), (34), (35) y (36). Los resultados para estos valores se observan en la figura 66.

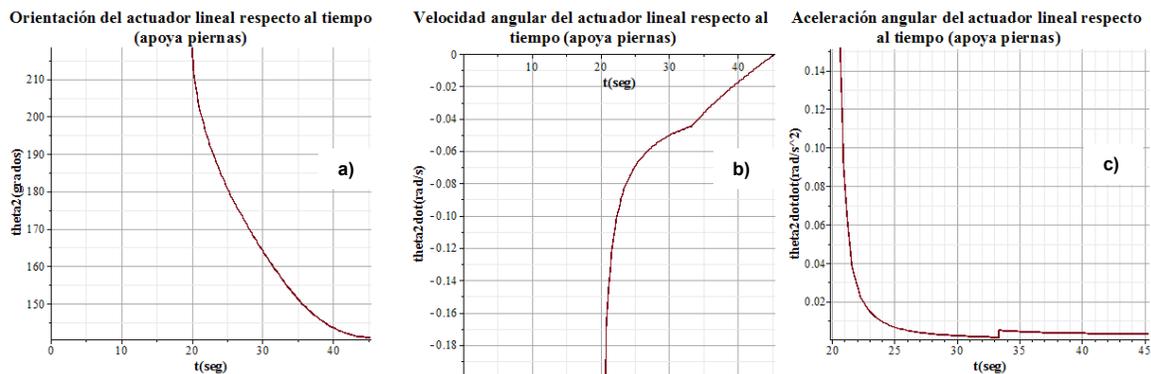


Figura 66. Orientación actuador lineal - velocidad angular - aceleración angular Apoya piernas

Respecto a la orientación θ_3 , velocidad angular $\dot{\theta}_3$ y aceleración $\ddot{\theta}_3$ de la parte móvil, se reemplazan los valores en las ecuaciones (16), (37) y (38). Los resultados se observan en la figura 67.

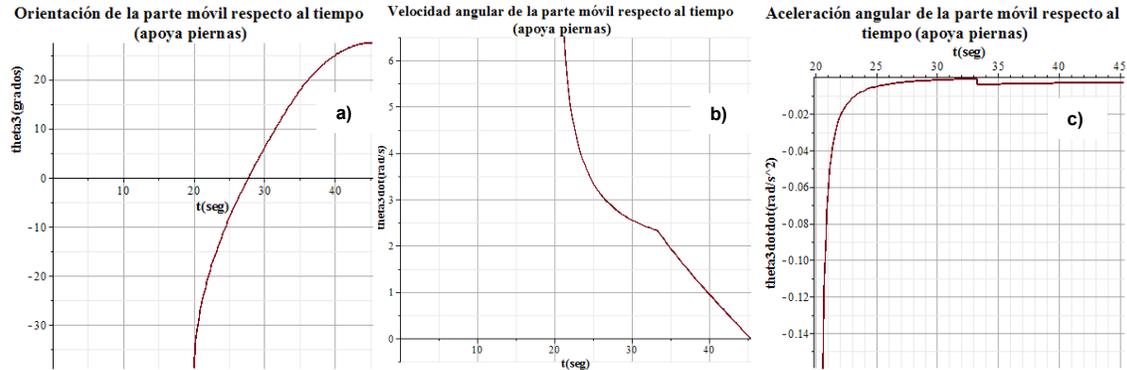


Figura 67. Orientación θ_3 velocidad - aceleración Apoya piernas

5.2.3.4 Conclusiones análisis de velocidad y aceleración en los tres sistemas

Como se observan en los análisis anteriores, la magnitud de las aceleraciones angulares experimentadas por los actuadores lineales y las partes móviles, no superan para la cabecera los 0.003 rad/s^2 , en el espaldar - asiento los 0.008 rad/s^2 y para el apoya piernas los 0.155 rad/s^2 , estos valores son relativamente pequeños, por ende, los efectos producidos por las mismas se pueden despreciar, así el análisis cinético y de esfuerzos en las partes del sistema, se puede realizar en el campo de la estática.

5.3 Brazos Robóticos

Cada brazo robótico se compone de dos actuadores lineales y una pinza como efector final, así cumple funciones del tipo “pick and place”.

Uno de los actuadores lineales le permite al robot modificar la altura, a la cual se encuentra el efector final, mientras que el otro cambia la posición de la pinza, acercándola o alejándola del cuerpo robótico. Este movimiento se describe en la figura 68.

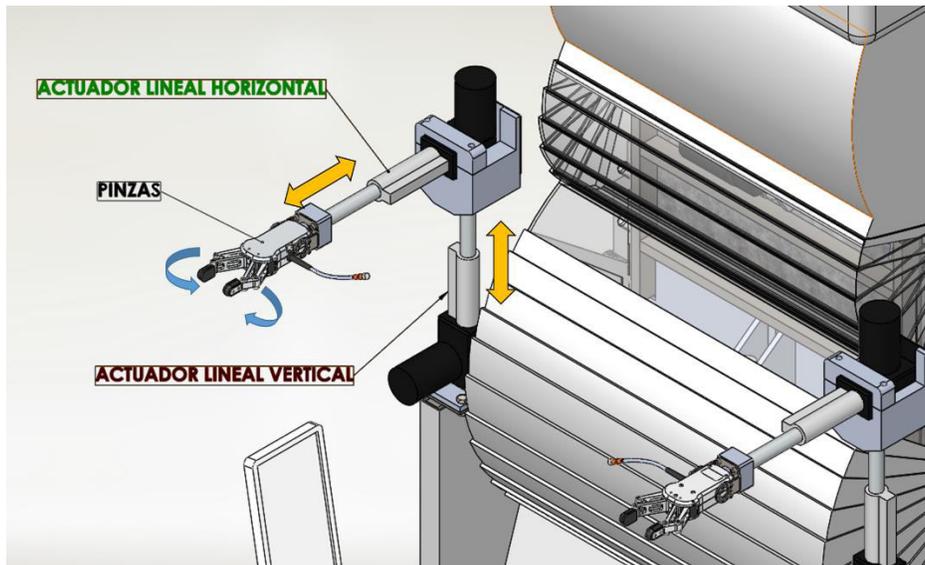


Figura 68. Brazos robóticos completos

Usando tornillos, arandelas y tuercas se sujeta la cara plana del actuador lineal vertical, a una placa gruesa soldada al chasis (Figura 69).

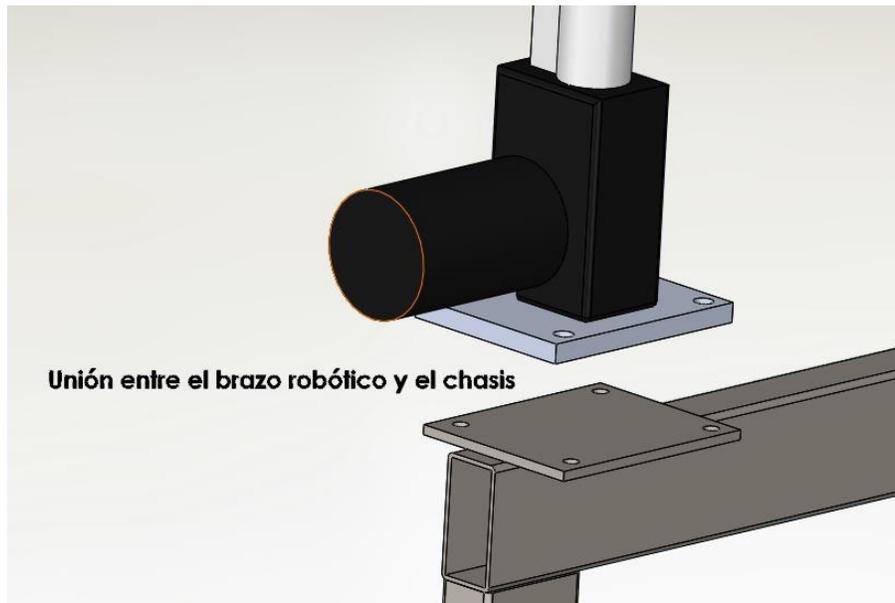


Figura 69. Placa en el chasis para anclar al brazo robótico

Respecto a la estructura que une al actuador vertical con el actuador horizontal, son dos partes de aluminio unidas por tornillos, una de ellas tiene un roscado en una de sus caras con el objetivo de unirse al cilindro del actuador vertical (Figura 70).

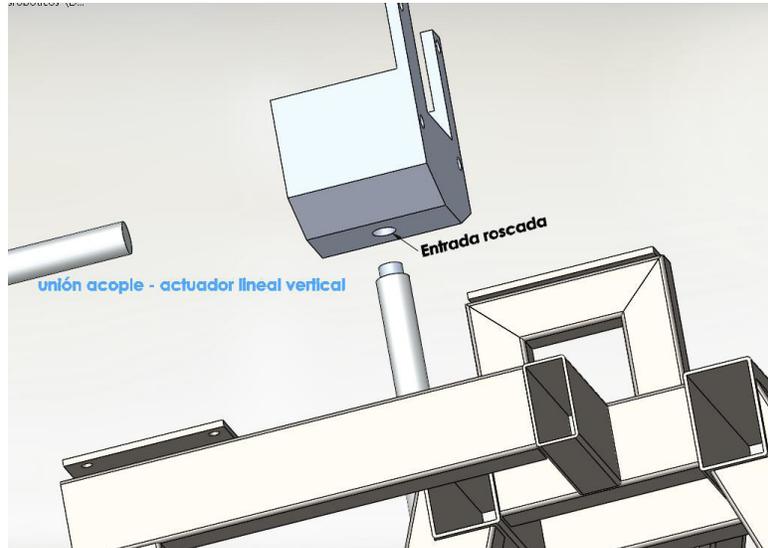


Figura 70. Unión acople - actuador lineal vertical

Al unirse las dos partes forman una base para sostener al conjunto actuador horizontal - pinza (Figura 71).

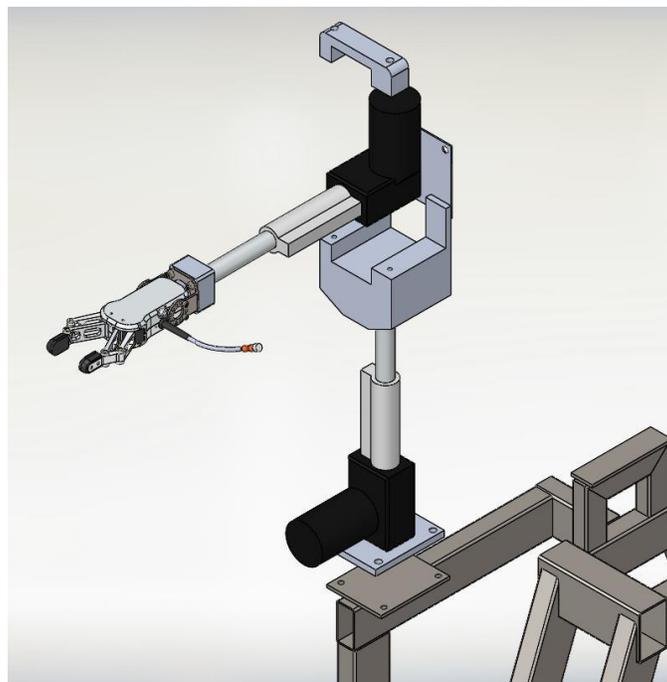


Figura 71. Brazo robótico: vista en detalle

El conjunto pinza y cilindro del actuador horizontal se unen por un acople de aluminio como se muestra en la figura 72. La pinza usada se detalla en la figura 73 [33].

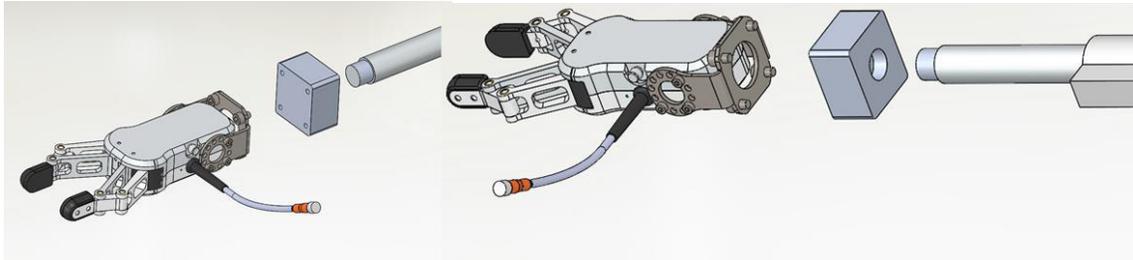


Figura 72. Acople pinza - actuador lineal



Figura 73. Descripción de la pinza [33]

En total el conjunto actuador lineal horizontal - pinza con su máxima carga tiene un valor aproximado de 6 kg (peso de los actuadores de 100 mm, ver figura 48). Como se puede observar en la figura 74 a una velocidad de 5 mm/s, el actuador lineal vertical soporta sin mayor dificultad estas magnitudes.

Load Capacity and Speed performance:

YNT-01 linear actuator support several load and speed based on different worm gear ratio.

Dynamic Load Force	6000N	3000N	1500N	500N
Static Load Force	6000N	3000N	1500N	500N
Speed with Load	5mm/s	10mm/s	20mm/s	30mm/s
Input Voltage	12/24VDC			

Figura 74. Capacidades actuador lineal [32]

5.4 Soporte para el robot

El soporte mide 976 mm X 976 mm X 626 mm, como se muestra en la figura 75, posee cuatro patas laterales debajo de las cuales se ubican las ruedas de apoyo. La distribución de las mismas se hace para evitar volcaduras de forma lateral.

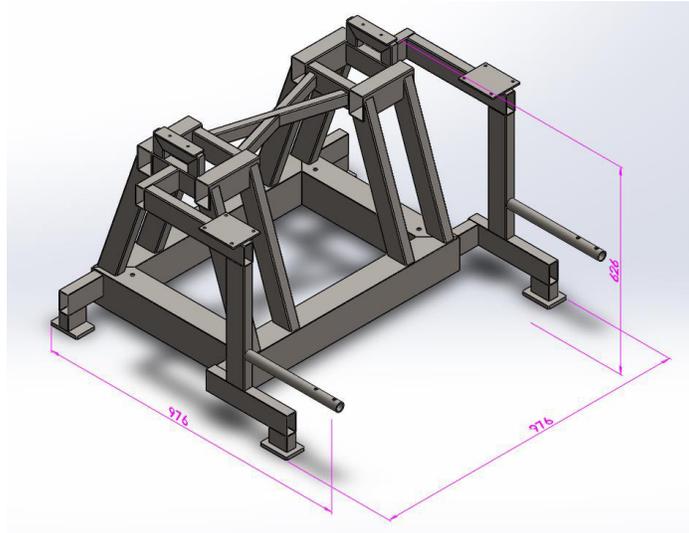


Figura 75. Chasis para el robot

La estructura está compuesta de perfiles rectangulares y circulares de acero estructural, para este caso se eligen como referencia los modelos de la empresa PROLAMSA[®], puesto que es un proveedor nacional.

Los perfiles usados [34] y su distribución en el chasis, se describen a continuación (Ver, figura 76).

- R-249 dimensiones 2.5 in x 1.25 in con un grosor de 0.0747 in
- R-151 dimensiones 1.5 in x 1 in con un grosor de 0.1196 in
- R-302 dimensiones 3 in x 2 in con un grosor de 0.1046 in
- R-403 dimensiones 4 in x 3 in con un grosor de 0.0747 in
- Circular R-1.125 in x 0.12 in

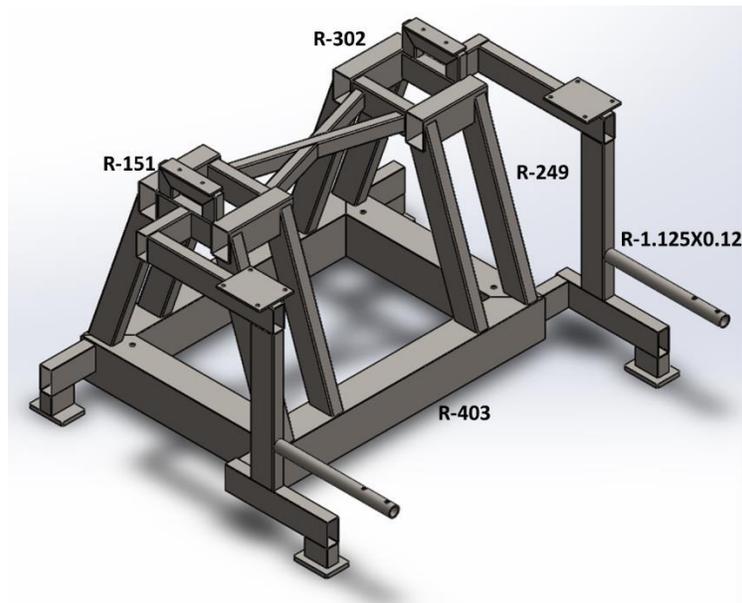


Figura 76. Perfiles Chasis

El análisis de la posición para las ruedas, con el fin de evitar la volcadura de forma frontal, se muestra a continuación:

Antes de realizar el análisis, es importante identificar el peso de la estructura y la posición del centro de masa, es por eso que a través de mediciones en el software Solidworks®, donde se han asignado las densidades a cada parte del elemento, se tiene que la masa del ensamble completo es aproximadamente de 200kg, dato ilustrado en la figura 77.

Considerando el peso de las baterías eléctricas que pueden llegar a usarse en el presente dispositivo [35] y de algunos elementos electrónicos. La masa completa del sistema puede asumirse cercana a los 300kg.

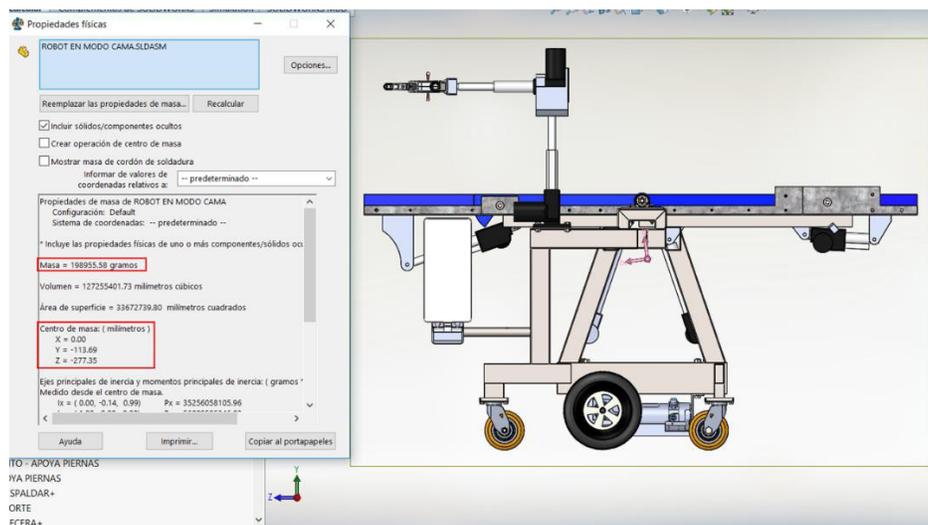


Figura 77. Centro de masa - estructura modo cama

Retomando la evaluación, el objetivo principal es comprobar si la distancia propuesta para la separación entre las ruedas, permite que el sistema no vuelque, cuando se encuentre en modo cama y se aplique carga en los extremos.

El análisis se divide en dos partes, en la primera, se supone una carga puntual en el extremo de la cabecera, para la segunda, se evalúa aplicando una fuerza en un extremo del apoya pies.

Primer caso (carga puntual en el extremo de la cabecera)

El diagrama de cuerpo libre considerado, se muestra en la figura 78.

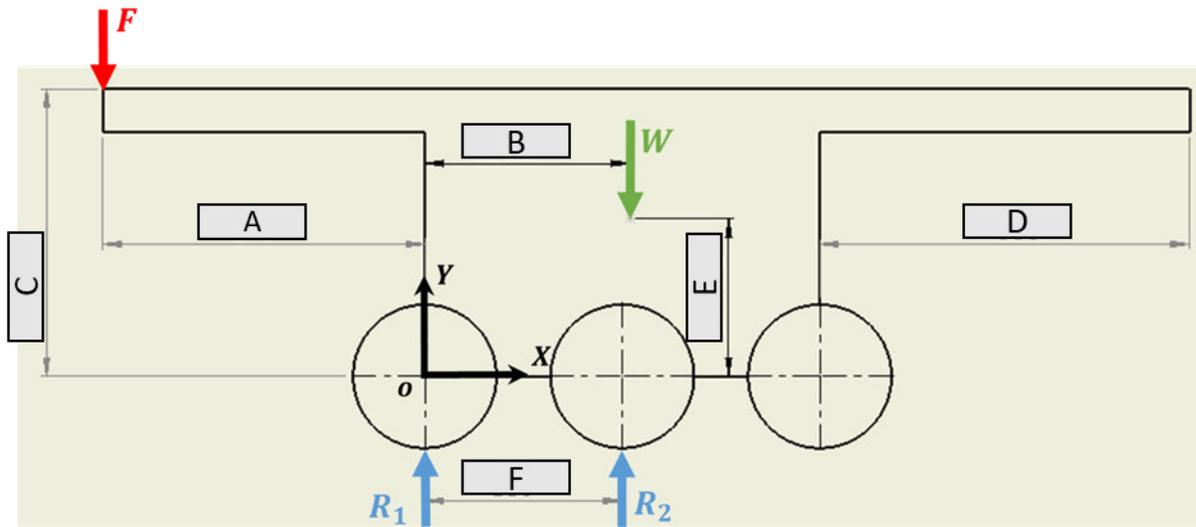


Figura 78. Diagrama de cuerpo libre - modo cama 1

Donde los valores para las dimensiones son los siguientes: $A = 640 \text{ mm}$, $B = 232 \text{ mm}$, $C = 743 \text{ mm}$, $D = 420 \text{ mm}$, $E = 555 \text{ mm}$.

En el diseño, la posición de la rueda respecto a la rueda del motor es $F = 377 \text{ mm}$. La ecuación que describe el evento es:

$$\sum \zeta_+ M_o = (640)F + (377)R_2 - (232)W = 0$$

El conjunto volcaría cuando la llanta del centro dejase de tocar el piso, esta condición se ve reflejada si $R_2 = 0$. Reemplazando en la ecuación,

$$F = \frac{(232)}{(640)}W = (0.3625)W$$

La fuerza aplicada debe ser menor a este valor para evitar el volcamiento,

$$F < (0.3625)W$$

La masa del sistema sin el usuario como se indicó anteriormente se prevé cerca de los 300 kg, $W = 2943 \text{ N}$, para este caso,

$$F < 1066 \text{ N}$$

Lo que equivaldría que al ubicar una masa igual o superior a los 108 kg aproximadamente en esta posición, el sistema volcaría.

Segundo caso (carga puntual en el extremo del descanso pies)

El diagrama de cuerpo libre considerado, se ilustra en la figura 79.

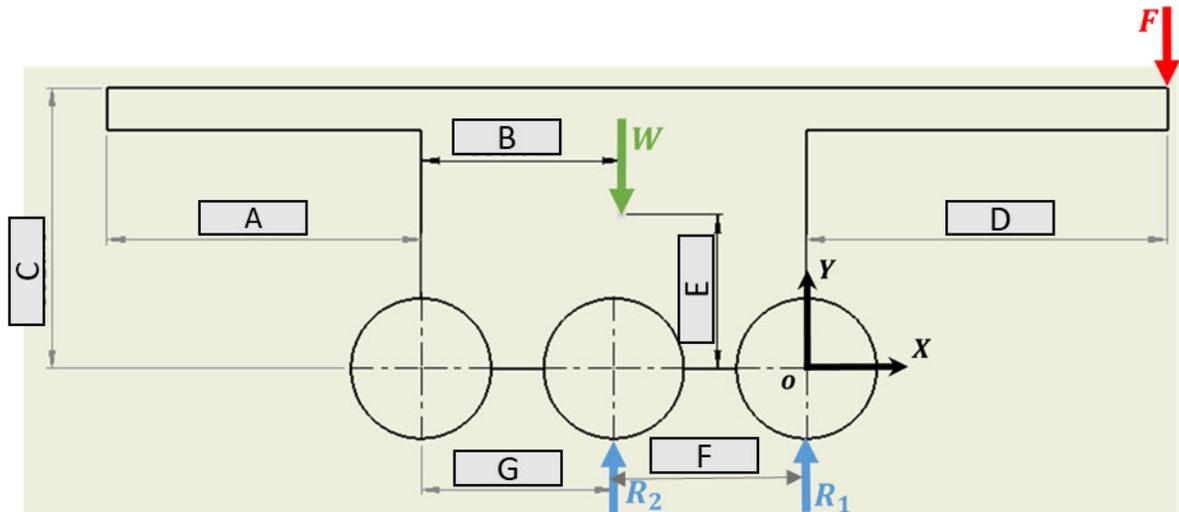


Figura 79. Diagrama de cuerpo libre - modo cama 2

Donde los valores para las dimensiones son los siguientes: $A = 640 \text{ mm}$, $B = 232 \text{ mm}$, $C = 743 \text{ mm}$, $D = 420 \text{ mm}$, $E = 555 \text{ mm}$, $G = 377 \text{ mm}$.

En el diseño, la posición de la rueda respecto a la rueda del motor es $F = 352 \text{ mm}$. La ecuación que describe el evento es:

$$\sum M_o = -(420)F - (352)R_2 + (497)W = 0$$

El conjunto volcaría cuando la llanta del centro dejase de tocar el piso, esta condición se ve reflejada si $R_2 = 0$. Reemplazando en la ecuación,

$$F = \frac{(497)}{(420)}W = (1.183)W$$

La fuerza aplicada debe ser menor a este valor para evitar el volcamiento,

$$F < (1.183)W$$

La masa del sistema sin el usuario como se indicó anteriormente se prevé cerca de los 300 kg, $W = 2943 \text{ N}$, para este caso,

$$F < 3482 \text{ N}$$

Lo que equivaldría que al ubicar una masa igual o superior a los 355 kg aproximadamente en esta posición, el sistema volcaría.

5.5 Soporte para apoyar los pies.

Por ergonomía es importante, crear una parte en el dispositivo, para que el usuario pueda apoyar sus pies cuando el sistema se encuentre en modo silla, de esta manera se le libera de la tensión creada en sus piernas, además de ayudarlo en acceder y salir de la silla.

El soporte para los pies, se compone de una placa móvil, la cual está sujeta al perfil circular del chasis, por medio de dos elementos hechos de aluminio, ver figuras Figura 80 y Figura 81.

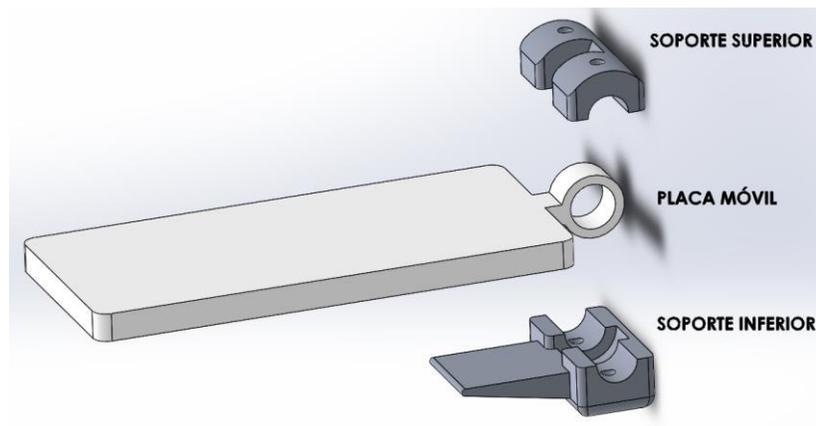


Figura 80. Descripción Soporte para apoyar los pies

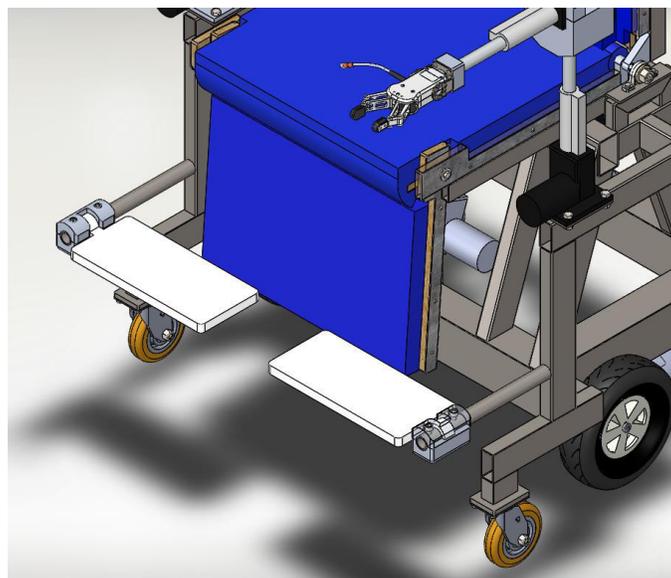


Figura 81. Ubicación soporte para los pies

Para que la placa de aluminio, no sea un impedimento para cambiar del modo silla al modo cama, esta puede rotar alrededor del soporte cilíndrico del chasis, de tal manera, que al llegar al tope superior, la misma queda inclinada hacia el lado opuesto. El usuario puede ponerla de nuevo en forma horizontal cuando se necesario, ver figuras Figura 82 y Figura 83.

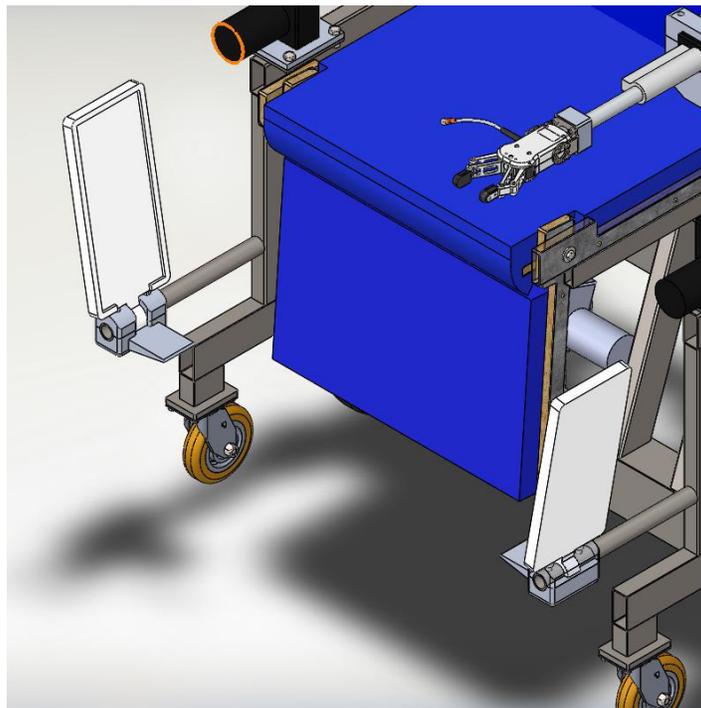


Figura 82. Posición vertical apoya pies

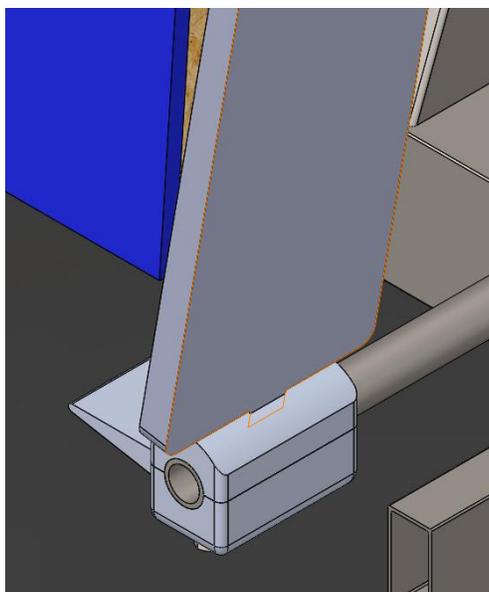


Figura 83. Ubicación final de la pieza móvil - Apoya pies

5.6 Selección del motor y ruedas.

Respecto al motor y las ruedas escogidas, se selecciona un modelo presente en las sillas de ruedas eléctricas actuales, para este caso se usa un motor de corriente directa con un sistema de reducción mecánica de ángulo recto, cuya salida se conecta a una rueda de poliuretano, el motivo de seleccionar esta rueda es porque no requiere de un ajuste constante, como si lo requieren las ruedas neumáticas, en este caso nuestro usuario es una persona de la tercera edad, entendiendo las limitaciones en su movilidad, lo que se busca es que esta tenga la menor intervención sobre el robot, respecto a su mantenimiento y ajuste. Ver figura 84.

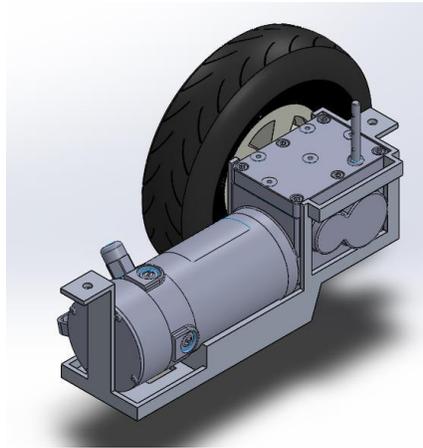


Figura 84. Conjunto Motor - Rueda

La selección del par que debe ejercer el motor se hizo en función de la fuerza de rozamiento, que produce al usar ruedas de poliuretano, en el artículo “*Test of two new polyurethane foam wheelchairs tires*” [36], se realizaron varios test en un modelo como lo muestra la figura 85, creado para determinar la fuerza que debe realizar un motor para mover la silla de ruedas a cierta velocidad, cuando esta soporta una carga específica. Los datos de estos experimentos se muestran en la figura 86.

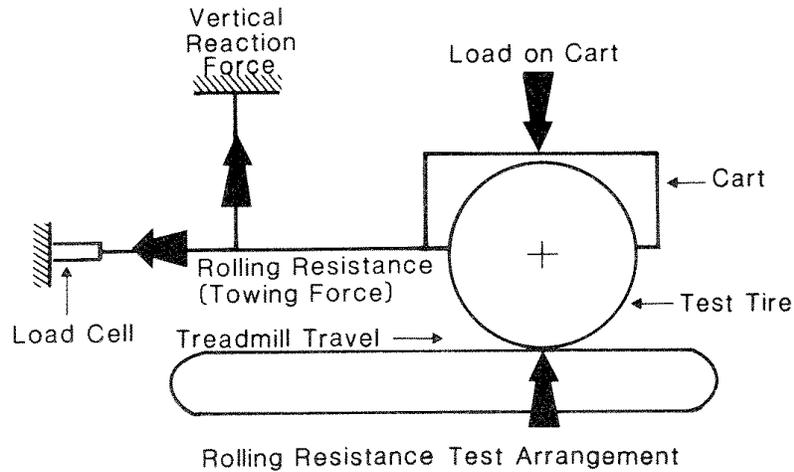


Figura 85. Banco de pruebas para medir la resistencia a la rodadura [36]

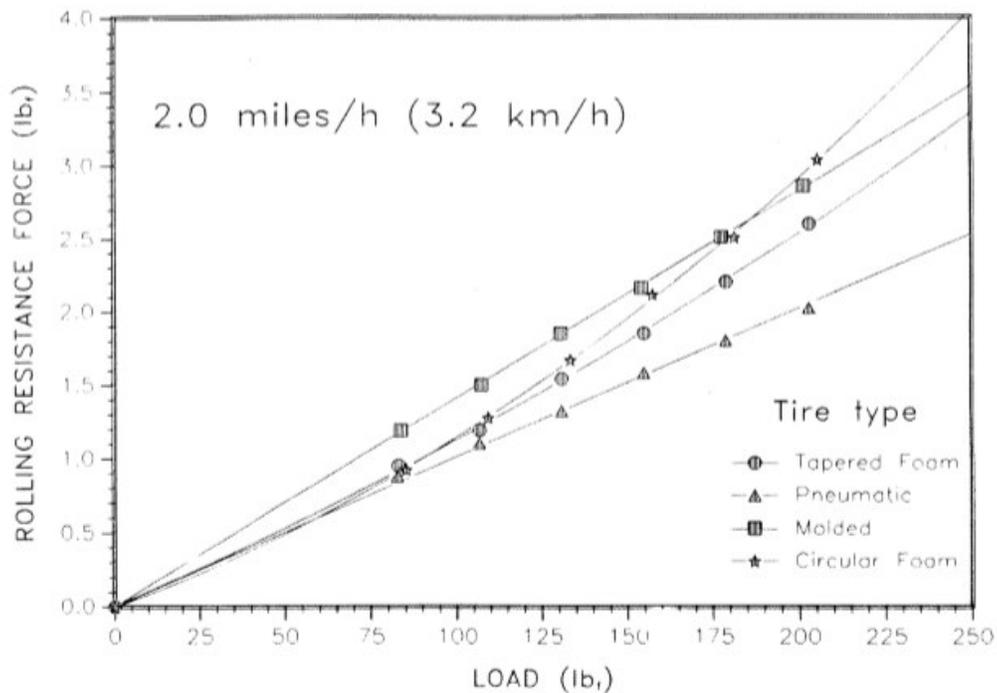


Figura 86. Resultados para una velocidad de 3.2 km/h [36]

Como se puede ver en la figura 86, la fuerza de rozamiento se analiza para una velocidad de 3.2 km/h o su equivalente 0.89 m/s. Para los requerimientos del presente robot, esta magnitud es la más indicada para equipos de movilidad, diseñados para personas de la tercera edad. En este punto, cabe resaltar que el modelo de rueda seleccionada de poliuretano, corresponde a la del tipo "molded", la carga de todo el equipo junto con el usuario es de 400kg ó 880 Lb_f (este valor considera que todo el peso del equipo y de la persona se sostienen por un solo par de ruedas, para el diseño actual, se ubica un motor

en cada llanta principal como se muestra en la Figura 89, por ende el dato usado como referencia para la Figura 86 es de 440 Lb_f, tomando como referencia el comportamiento casi lineal de la curva, prevé que para este valor, la fuerza de resistencia a la rodadura es de 7Lb_f ó 31.14 N.

Por ende, si la rueda analizada es de 10 pulgadas (0.254m) de diámetro, el par realizado por el motor debe ser de $T_{MOTOR} = \left(\frac{0.254}{2} m\right) (31.14N) = 3.95 \text{ Nm}$.

Para el proyecto y en función de los datos analizados, se elige un motor de la compañía Allied Motion®. Diseñados para este tipo de aplicaciones (sillas de ruedas eléctricas), modelo GRD-50970161 [37], el cual, en su zona de trabajo continuo a una rotación de 67 rpm (7 rad/s, debido al radio de la rueda, este dato hace referencia a una velocidad de 0.89 m/s), tiene un valor de 6 Nm (Figura 87), este valor se elige considerando que aún faltan elementos de la parte de control y eléctricos que puedan aumentar el peso del funcionamiento.

RAD 36 Series Gear Motors – Performance

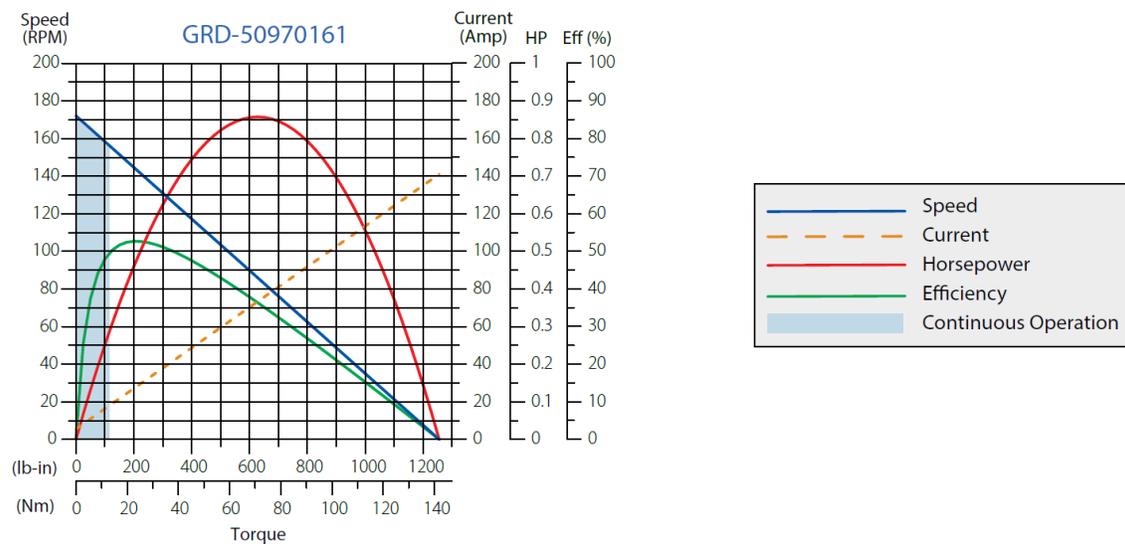


Figura 87. Funcionamiento motor robot [37]

Para mejorar la estabilidad de la silla de ruedas se ubican en las patas laterales del chasis, ruedas guías “Caster Wheel” de 6 pulgadas marca Faultless [38], como se muestra en la figura 88, con capacidad para soportar 1100 Lb_f y con un valor de 600 pesos.



Figura 88. Ruedas auxiliares [38]

El chasis junto con las ruedas y los motores se muestra en la figura 89.

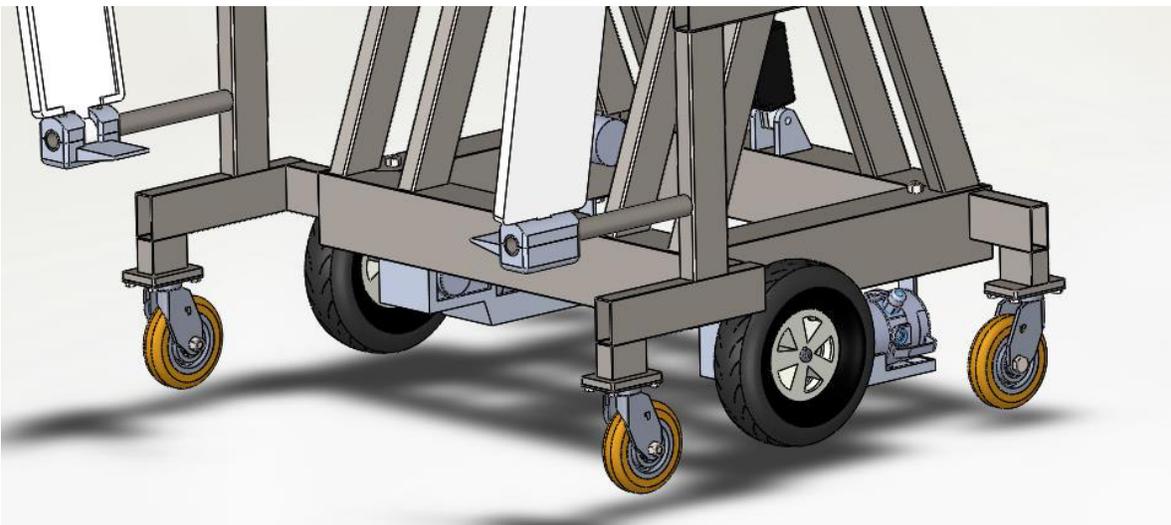


Figura 89. Conjunto chasis - Motor - Ruedas

5.7 Carcasa del robot en modo asistente.

Para que el sistema esté completo en su modo asistente es necesario, que la forma externa del robot corresponda a los deseos del adulto mayor.

En un estudio realizado a adultos mayores [39], el resultado más acogedor respecto a la forma externa de un asistente robótico, es una estructura parecida a la de un electrodoméstico, pero con algunas formas suaves casi humanoides, esto con el fin de generar empatía con el usuario.

Para cumplir este requerimiento la forma de la carcasa del robot, corresponde a una figura rectangular parecida a la de un refrigerador con algunos detalles humanoides, como una cabeza, y dos brazos generando un diseño empático al adulto mayor, tal como se muestra en la figura 90.

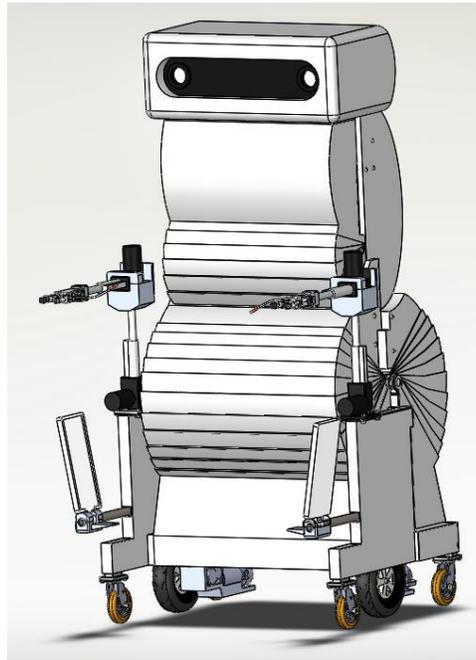


Figura 90. Robot en modo asistente

La carcasa del robot se compone de una serie de partes hechas de plástico, las cuales, pueden retraerse de forma telescópica, para generar las diferentes posiciones en el robot, cada una posee una serie de pestañas en su interior y exterior a fin de limitar el movimiento de su pareja interior y exterior, esto se puede observar en la figura 91.

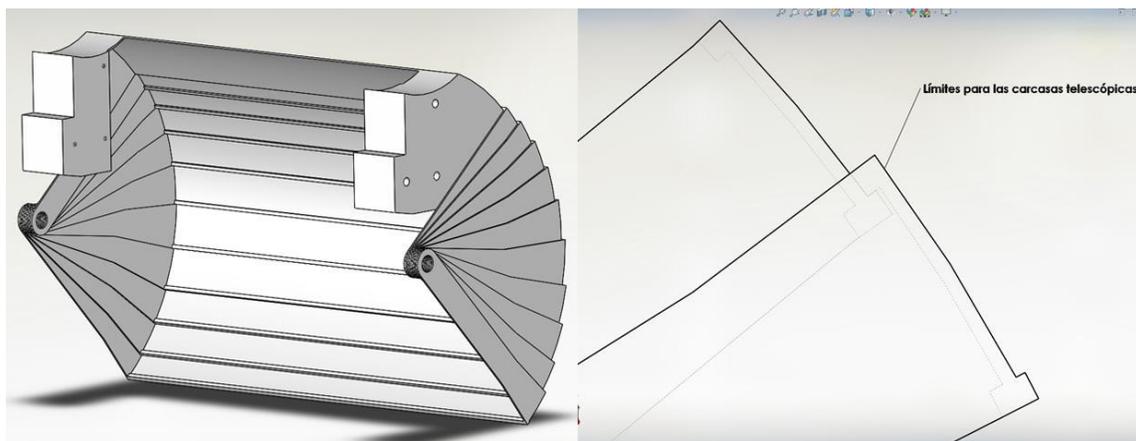


Figura 91. Carcasa telescópica

La forma de las mismas tiene como objetivo no aumentar el volumen final del robot, por eso se hace preciso que su forma exterior sea lo menor posible pero su interior debe

permitir el movimiento de los mecanismos, además de que la geometría externa debe ser curva para dar el toque de una forma suave en el mismo. Este fue uno de los mayores retos al diseñar la carcasa. La solución a esta dificultad se observa (ver figuras Figura 92 y Figura 93), en las partes que recubren al apoya piernas, asiento - chasis, espaldar - chasis y el espaldar.

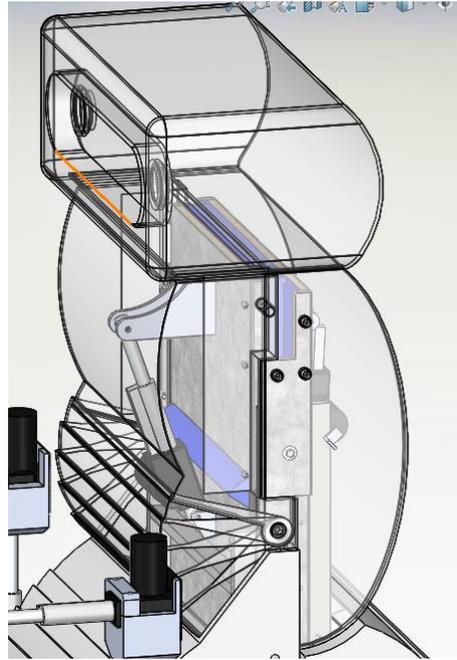


Figura 92. Carcasa Apoya piernas - Espaldar - Cabecera

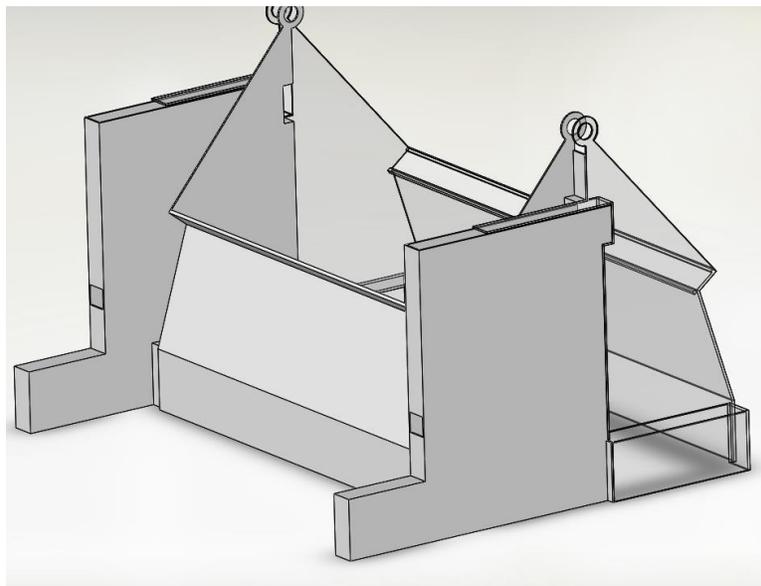


Figura 93. Carcasa para el chasis

Cabe resaltar la parte que recubre el mecanismo para la cabecera (Figura 94), pues esta estructura es importante ya que allí se ubica la cabeza del robot, en la cual se ubicará, el sistema de visión para el robot.

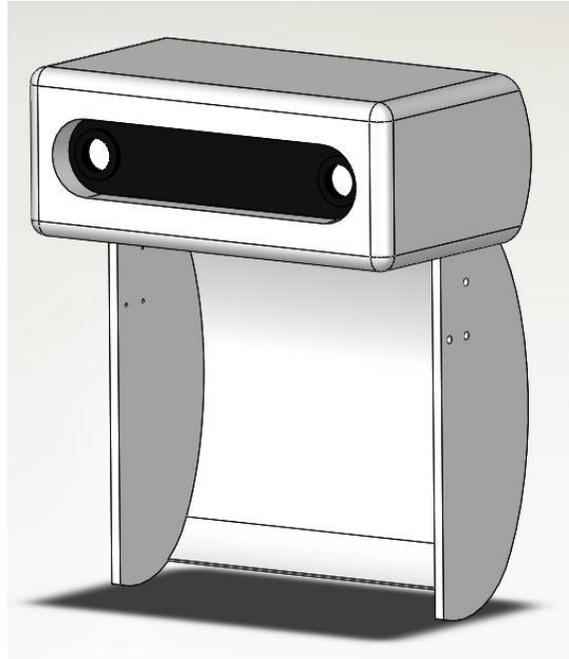


Figura 94. Recubrimiento cabecera

5.8 Modos del robot con un modelo humano.

En una forma final es importante ilustrar el uso del robot final, en esta sección se usa el modelo 3D de un ser humano, en las diferentes posiciones del robot.

5.8.1 Modo asistente:

Tal como lo muestra la figura 95, en esta posición toda la cojinería se ubica en forma vertical y la carcasa se encuentra completamente extendida.

En esta forma el robot asiste al adulto mayor, transportando elementos hasta la posición indicada por el usuario.

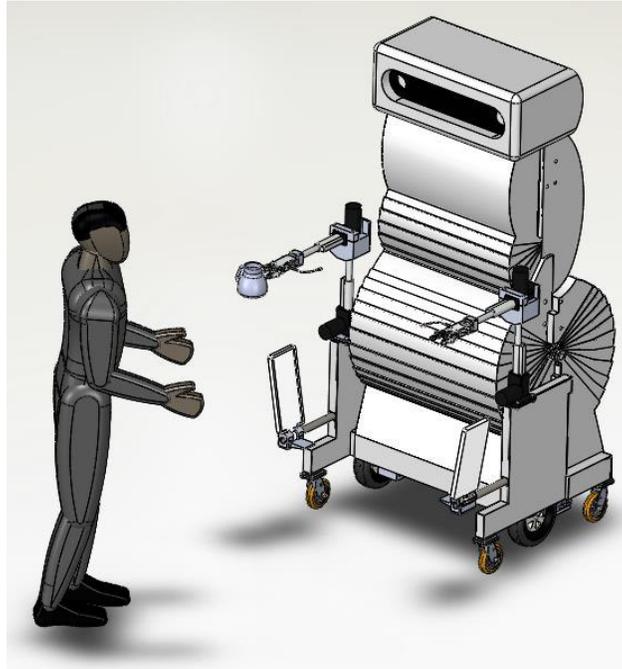


Figura 95. Robot en forma asistente - usuario

5.8.2 Modo Silla:

En esta forma de trabajo (Figura 96), se hace necesario que el apoya pies se encuentre en forma vertical, para que al descender el conjunto asiento - apoya piernas no choque con este sistema.

El espaldar en este punto, puede modificar su posición, para que el usuario encuentre la forma más cómoda al utilizarlo. En este modo de trabajo el usuario puede hacer uso de los brazos robóticos como asistentes para el traslado de elementos de un lugar a otro.

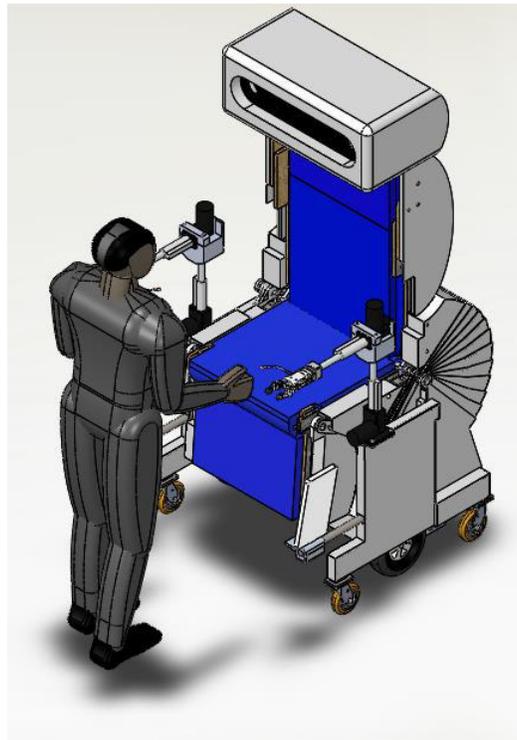


Figura 96. Usuario accediendo en el modo silla

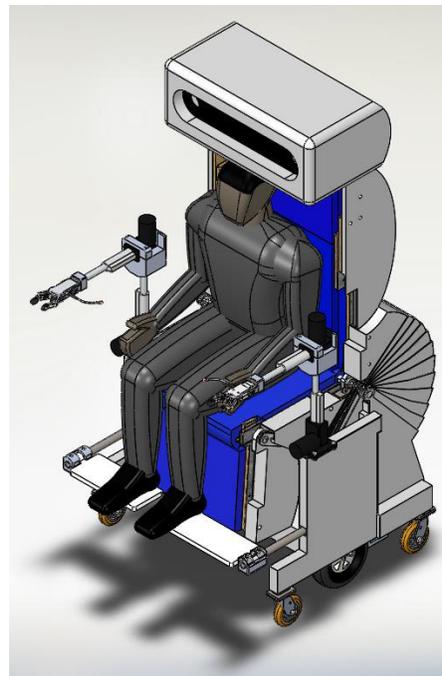


Figura 97. Sistema en el modo Silla de ruedas - usuario

5.8.3 Modo Cama:

En este punto, la cojinería del espaldar - asiento - apoya piernas se encuentran completamente horizontales (Figura 98), en este punto la cabecera puede modificar su inclinación para darle comodidad al usuario. Las carcasas se retraen debido a la modificación de la posición en los actuadores.

En este punto el usuario puede hacer uso de los brazos robóticos para sostener algún elemento que requiera mientras se encuentra acostado.

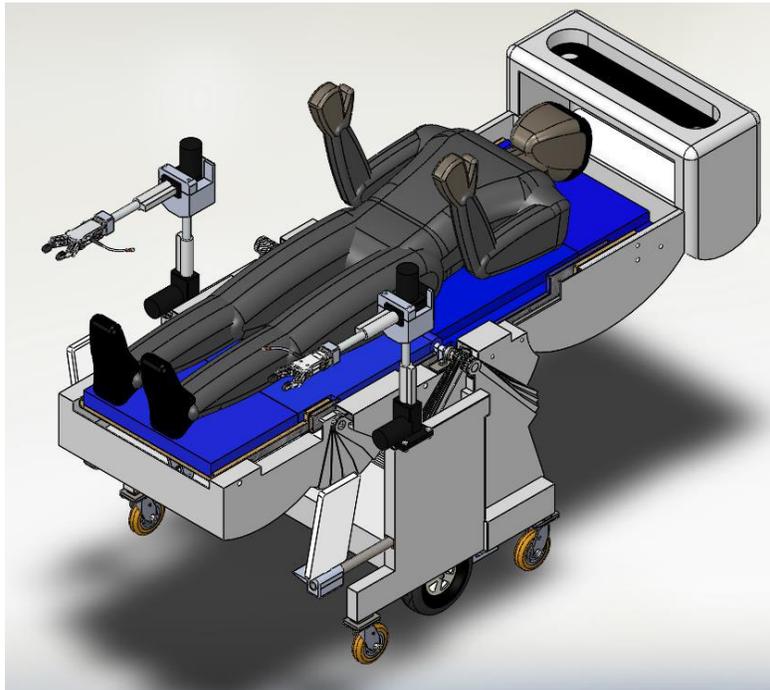


Figura 98. Sistema en modo Cama - usuario

5.9 Componentes eléctricos y electrónicos del robot.

Cuando se realiza un proyecto de este tipo, en especial un robot de servicio, es importante considerar los aspectos eléctricos y electrónicos del mismo.

Debido a las limitaciones del presente proyecto, el enfoque del diseño mecánico, se hará mención de los componentes electrónicos y eléctricos, que son significativos respecto a la función que brindan para el robot, así como su importancia sobre el precio en la construcción del robot.

Para los siguientes elementos se toma como referencia al sistema Care-o-Bot 4 [23].

➤ Sistemas de alimentación.

Para este caso se toma como referencia una batería de Ion - Litio de 48 VDC modelo comercial usado en la robótica, sillas robóticas de ruedas y motos eléctricas, con una capacidad de 40 Ah [35], a partir del consumo de los motores presentes en el robot, se aconseja el uso de dos baterías de este tipo. El valor comercial de este tipo de baterías es alrededor de los 700 dólares (13,720 pesos mexicanos) [40].

Para alimentar los sistemas electrónicos como sensores, actuadores, motores y equipos de procesamiento - control, se puede agregar un convertidor de voltaje, conectado a las baterías.

En función de la velocidad a la cual deben moverse los motores, la distancia recorrida por el sistema, además de la forma de trabajo de los actuadores lineales. Se puede asegurar que, la autonomía proporcionada por los sistemas de alimentación es de aproximadamente 10,320 metros recorridos por el robot o 1440 ciclos completos de extensión para los actuadores lineales.

➤ Sistema de cómputo y control.

Para el procesamiento y almacenamiento de la información se usa un dispositivo Intel NUC Kit NUC7I5BNH, Intel Core i5-7260U 2.20GHz, con un precio en el mercado entre 7,600 a 12,000 pesos mexicanos [41].

➤ Sensores.

Para el sistema de visión ubicado en la cabeza del robot se sugiere una cámara 3D-RGB(ver Figura 99), con una profundidad de 0.5 a 20 metros, su precio es alrededor de los 250 dólares (4,900 pesos mexicanos) [42].



Figura 99. Cámara RGB [42]

En este robot se pueden incluir sensores de proximidad para delimitar sus movimientos, pulsadores para interactuar con el usuario, finales de carrera, entre otros elementos.

➤ Interfaz humano - robot.

Para la interacción entre el robot y el usuario, el diseño se realizó pensando en la comunicación a través de una Tablet o celular, en estos dispositivos se crea una app, con las funciones específicas para el uso del robot.

Se contempla que la aplicación móvil pueda trabajarse en modelos de tipo gama media, con un procesador de 1.8 GHz, una memoria ram de 2 Gb y una capacidad de almacenamiento de 8 Gb. Cuyos precios en el mercado se encuentran entre los 3,400 pesos en adelante.

5.10 Costos para la fabricación del robot.

Durante el presente capítulo, se han descrito todos los elementos que conforman al robot, esta sección final, se cierra el presente análisis tabulando los precios de los elementos más representativos para el desarrollo del presente proyecto, se incluyen algunos valores aproximados respecto a procesos de maquinados y ensamble.

Tabla 5. Costos para la fabricación

DESCRIPCIÓN	COSTO (MXN)
Cojineria:	
Tablas de pino radiata 15 mm - 520 pesos por lámina [43], se requieren al menos 3.	1,560
Proceso de taladrador, corte y pegado de las piezas	5,000
Láminas de acero galvanizado, paquete de 5 por 2,834 MXN [44]	2,834
Proceso de doblado y taladrado	5,000
Insertos: 12 dólares por paquete [45], en total se requieren 3.	707
Colchón de espuma visco elástica tamaño matrimonial grosor 5 cm (se toma como referencia un modelo cuyo precio superará al usado en el dispositivo) precio de 2,079 MXN [46]	

Cantidad utilizada: dos colchones	4,185
Corte y pegado	3,000
Tornillería y pasadores:	
- Tornillos con cabeza hueca, paquete de 25 [47].	380
- Tornillos M8, pasadores de conexión, debido a su forma especial, de poseer una parte sin rosca, se espera que su precio aumente cerca de los 3000 pesos.	3,000
- Material y fabricación pasador principal de acero de medio carbono.	15,000
Piezas fabricadas en aluminio:	
- Apoya pies: se espera que por precio de fabricación y del aluminio, el valor de cada conjunto sea alrededor de los 1000 pesos	2,000
- Soportes pasador principal: se espera un valor de cada elemento alrededor de los 1500 pesos	6,000
- Uniones y soportes brazos robóticos: Se espera por fabricación y precio del material, un valor de 1500 pesos por cada conjunto	3,000
- Soportes actuadores lineales (6 en total)	3,600
Perfiles de Acero:	

<p>Para un perfil de acero de 3 pulgadas, se especifica un valor de 750 pesos por cada seis metros [48], se requieren 5 elementos.</p> <p>Soldadura y cortes: construcción chasis y soportes estructurales</p>	<p>3,750</p> <p>8,000</p>
<p>Carcasa:</p> <p>Para fabricar la carcasa, las partes se pueden hacer haciendo uso de una impresora 3D. Un valor aproximado en la impresión de piezas es de 0.23 pesos por gramo. La carcasa fabricada en PLA, tendrá una masa de 35500 gramos.</p> <p>Se utilizan 36 filamentos, cada paquete de 1 kg cuesta alrededor de los 500 pesos.</p>	<p>8,165</p> <p>18,000</p>
<p>Actuadores lineales:</p> <p>Se requieren en total 6 actuadores, con un valor de 22 dólares según la referencia seleccionada</p>	<p>2,600</p>
<p>Rodamientos (ver Sección 5.1) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Para los pasadores de conexión: Kp 08 y SKF. - Cojinetes de fricción 	<p>1,800</p> <p>68</p>
<p>Pinzas robóticas:</p> <p>Cada una por 4360 dólares, se requieren 2.</p>	<p>171,386</p>
<p>Conjunto motores:</p>	

Sistema de motores con reductor de velocidad y llantas.	64,000
Ruedas guía	2,400
Sistemas de alimentación eléctricos (baterías, etc)	27,440
Sistemas de control:	
2 Dispositivos NUC7I5BNH	24,000
Sistemas de comunicación (módems, antenas, etc)	20,000
Sensores:	
- Cámara	4,900
- Sensores de proximidad, etc.	40,000
Interfaz - HMI:	
Celular o Tablet.	3,400
Total parcial de los elementos	455,175
Adicional (transporte de equipos y otros gastos 60% extra)	273,105
TOTAL PROYECTADO PARA EL ROBOT	728,280

6. EVALUACIÓN DE ESFUERZOS, FACTORES DE SEGURIDAD Y RESULTADOS.

Para la evaluación de los esfuerzos y factores de seguridad, se usa el paquete CAE ANSYS WORKBENCH®, a continuación se presenta a detalle el proceso realizado para evaluar el diseño conceptual.

En primer lugar es importante definir, como se analizan los elementos del robot. En este punto se pueden rescatar las conclusiones presentes en la sección 5.2.3.4, donde se especifica que la evaluación de los dispositivos presentes en esta máquina, puede darse desde un enfoque estático. Por esta razón, las simulaciones realizadas sobre los mecanismos del robot serán del tipo “Estructural - Estático”. De lo anterior y los posibles ciclos de trabajo, se considera que no es necesario realizar un análisis de fatiga sobre el sistema robótico.

Debido a la complejidad del robot, se optan por realizar cinco simulaciones simplificando la geometría de algunos elementos.

En la primera se incluirán los subsistemas que componen a la cabecera, espaldar, asiento y apoya piernas, los sistemas de acople (pasadores, cojinetes cilíndricos), además de los mecanismos que permiten el movimiento de los mismos, para el modo cama.

La segunda simulación se retroalimenta de los datos obtenidos en la anterior, para las reacciones que actúan sobre el chasis, a fin de evaluarlo en esta parte.

En la tercera se evalúan los subsistemas: cabecera, espaldar, asiento, apoya piernas, mecanismos para el movimiento y los sistemas de conexión (pasadores y cojinetes cilíndricos) para el modo Silla.

En la cuarta simulación se evalúa el chasis, a partir de las reacciones en los soportes, obtenidas en el modo silla.

En la quinta, se evalúa el sistema apoya pies, descrito en la sección 5.5.

Para el caso de los actuadores lineales, por efectos del cómputo, se evalúan como una barra de aluminio, cuya longitud corresponde a la distancia entre los extremos de los actuadores en las posiciones necesarias para los modos cama y silla.

6.1 Primera Simulación: Sistemas de cojinería, mecanismos de movimiento y conexiones para el modo cama.

El análisis inicia con un modelo del sistema (Figura 100), para mejorar el mallado se toman todos los cuerpos como una sola parte. Aprovechando la geometría del dispositivo, la cual favorece a una distribución simétrica de las cargas, se realiza una operación de simetría

sobre el conjunto, a fin de analizar solo una parte del mismo. Lo anterior, permite una optimización sobre los requerimientos para el sistema de cómputo.

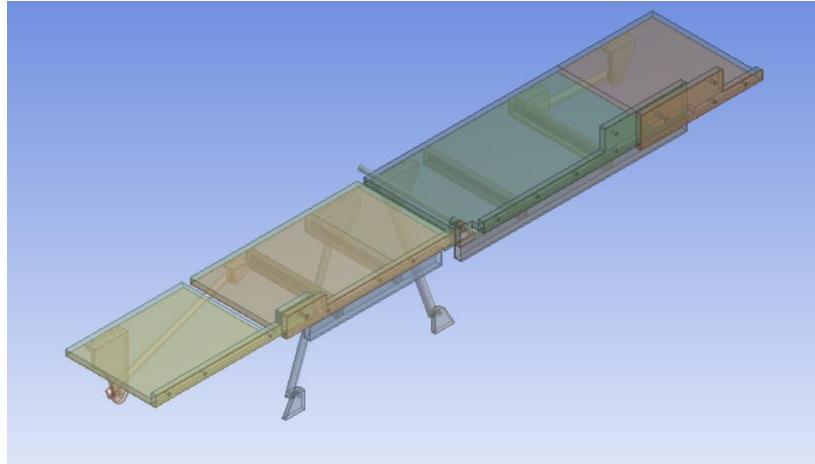


Figura 100. Paso 1 - evaluación sistema modo cama

En un segundo paso, se definen los materiales de los cuerpos del sistema. Los datos para el acero galvanizado, acero estructural, las aleaciones de aluminio y de zinc se encuentran definidos dentro de las librerías del software ANSYS WORKBENCH®. Para la madera, en este caso que es pino radiata, se usa el valor incluido dentro de las librerías del software (Figura 101). Las características mecánicas de los cojinetes cilíndricos (Figura 102), se obtienen de la página del proveedor IGUS® [28]. Para los pasadores se toma como referencias los datos para “Medium Carbon Steel” (Figura 103), material ubicado dentro de las bases de datos del programa. Sugerido para la fabricación de este tipo de pasadores roscados [49] [50].

7		Pine wood	Granta_Design_Typical_Materials.xml	Pine (pinus spp.), longitudinal
Sample materials data from Granta Design. Additional data and information available through the Granta website.				
Granta provides no warranty for the accuracy of the data.				
Properties of Outline Row 7: Pine wood				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Density	487	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
4	Coefficient of Thermal Expansion	4.69E-06	C ⁻¹	
5	Isotropic Elasticity			
6	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
7	Young's Modulus	9.3E+09	Pa	
8	Poisson's Ratio	0.374		
9	Bulk Modulus	1.2302E+10	Pa	
10	Shear Modulus	3.3843E+09	Pa	
11	Tensile Yield Strength	4.1E+07	Pa	
12	Tensile Ultimate Strength	6.63E+07	Pa	

Figura 101. Propiedades mecánicas del pino

A		B	C	D	E
Contents of Engineering Data				Source	Description
1	Material				
2	Aluminum Alloy			C:\Users\{R32SLA_RS3}\Desktop\{SISTEMA COMPLETO EN ANSYS\PRUEBASFINALES\{SISTEMAENTREGAVERSION2MEJORADO...	General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-9H, page 3-277.
3	COJINETEX			C:\Users\{R32SLA_RS3}\Desktop\{SISTEMA COMPLETO EN ANSYS\PRUEBASFINALES\{SISTEMAENTREGAVERSION2MEJORADO...	
4	Galvanized steel			C:\Users\{R32SLA_RS3}\Desktop\{SISTEMA COMPLETO EN ANSYS\PRUEBASFINALES\{SISTEMAENTREGAVERSION2MEJORADO...	Carbon steel, galvanized (zinc coated) Sample materials data from Granta Design. Additional data and information available through the Granta website. Granta provides no warranty for the accuracy of the data.
5	MDF			C:\Users\{R32SLA_RS3}\Desktop\{SISTEMA COMPLETO EN ANSYS\PRUEBASFINALES\{SISTEMAENTREGAVERSION2MEJORADO...	
6	Structural Steel			General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
* Click here to add a new material					

Properties of Outline Row 4: COJINETEX			
A	B	C	D
Property	Value	Unit	
1	Table		
2	1.44	g cm ⁻³	
3	Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Shear Modulus and Young's Modulus	
5	Young's Modulus	8100	MPa
6	Poisson's Ratio	0	
7	Bulk Modulus	2.7E+09	Pa
8	Shear Modulus	4050	MPa
9	Tensile Yield Strength	170	MPa
10	Compressive Yield Strength	150	MPa

Figura 102. Características materiales para el cojinete

A		B	C	D	E
Contents of Engineering Data				Source	Description
1	Material				
2	Aluminum Alloy			C:\Users\{R32SLA_RS3}\Desktop\{SISTEMA COMPLETO EN ANSYS\PRUEBASFINALES\{SISTEMAENTREGAVERSION2M...	General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-9H, page 3-277.
3	COJINETEX			C:\Users\{R32SLA_RS3}\Desktop\{SISTEMA COMPLETO EN ANSYS\PRUEBASFINALES\{SISTEMAENTREGAVERSION2M...	
4	Galvanized steel			C:\Users\{R32SLA_RS3}\Desktop\{SISTEMA COMPLETO EN ANSYS\PRUEBASFINALES\{SISTEMAENTREGAVERSION2M...	Carbon steel, galvanized (zinc coated) Sample materials data from Granta Design. Additional data and information available through the Granta website. Granta provides no warranty for the accuracy of the data.
5	MDF			C:\Users\{R32SLA_RS3}\Desktop\{SISTEMA COMPLETO EN ANSYS\PRUEBASFINALES\{SISTEMAENTREGAVERSION2M...	
6	Medium carbon steel			Granta_Design_Typical_Materials.xml	Medium carbon steel, heat treated Sample materials data from Granta Design. Additional data and information available through the Granta website. Granta provides no warranty for the accuracy of the data.
7	Structural Steel			General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
* Click here to add a new material					

Properties of Outline Row 7: Medium carbon steel			
A	B	C	D
Property	Value	Unit	
1	7850	kg m ⁻³	
2	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
3	Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
5	Young's Modulus	2.12E+11	Pa
6	Poisson's Ratio	0.29	
7	Bulk Modulus	1.6829E+11	Pa
8	Shear Modulus	8.2171E+10	Pa
9	Tensile Yield Strength	5.89E+08	Pa
10	Tensile Ultimate Strength	7.76E+08	Pa
11	Isotropic Thermal Conductivity	52	J m ⁻¹ s ⁻¹ C ⁻¹
12	Specific Heat, C _p	485	J kg ⁻¹ C ⁻¹
13	Isotropic Resistivity	1.74E-07	ohm m

Figura 103. Características materiales "Medium Carbon Steel"

En una tercera etapa, el programa asigna automáticamente una serie de conexiones entre los elementos, las cuales se revisan eliminando aquellas que pueden llegar a no tener sentido físico pero que el sistema genera, como por ejemplo dos caras de diferentes cuerpos que no están unidas pero aun así el software genera esta relación.

En una cuarta fase, se aplica una malla al sistema completo, para este punto, es importante definir que el tamaño de elemento designado es de 2 mm. Con esta magnitud el número de elementos generados es de 1'143,487 y 2'14,634 nodos (Figura 104), si se

eligen valores más pequeños esta cantidad se incrementa a unas cifras que por las limitaciones del equipo de cómputo no pueden analizarse.

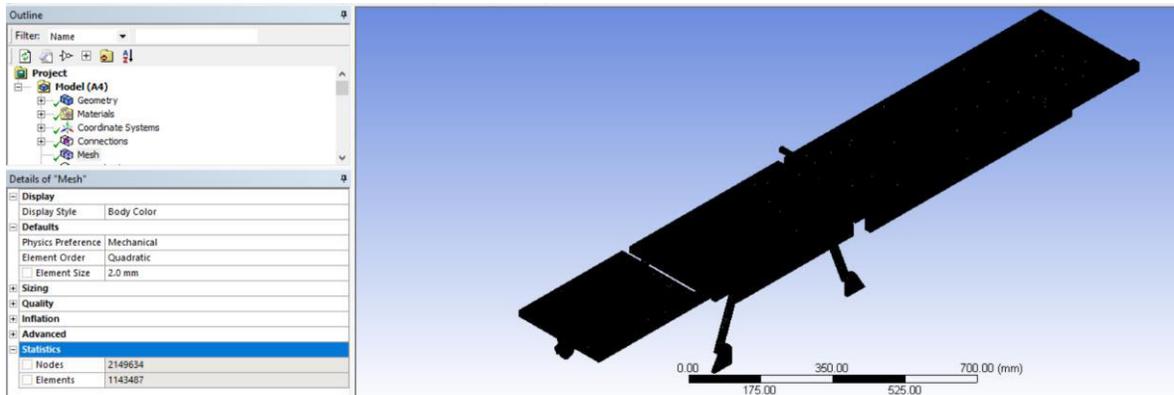


Figura 104. Simulación sistema en modo cama

De la Figura 105 y Figura 106, se muestran algunos de los elementos mallados del sistema.

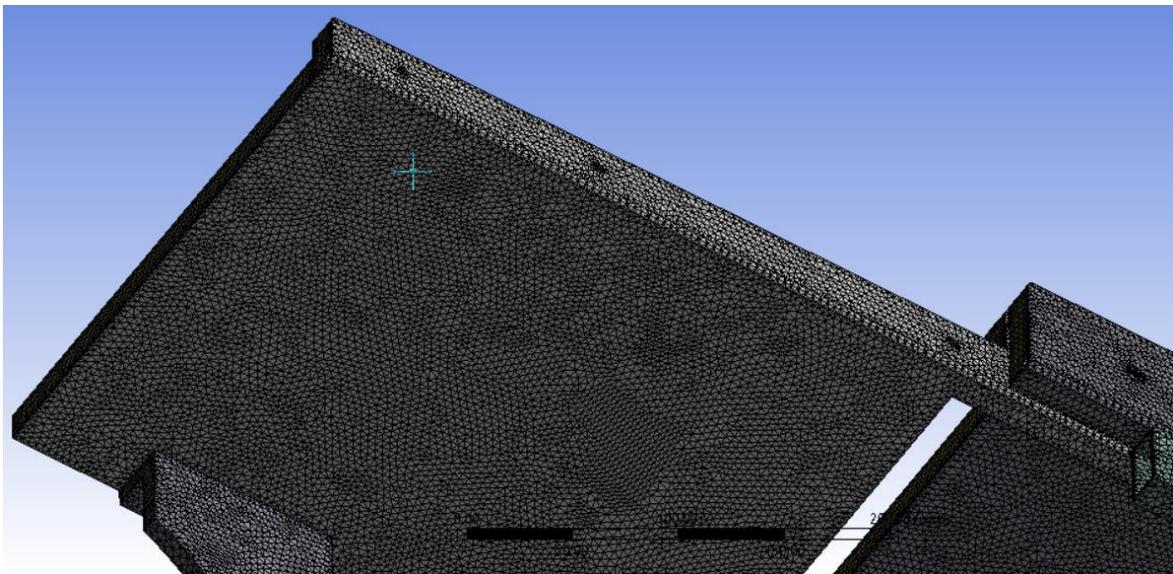


Figura 105. Simulación sistema en modo cama a detalle: 1



Figura 106. Simulación sistema en modo cama a detalle: 2

La asignación de materiales se ilustra en la Figura 107.

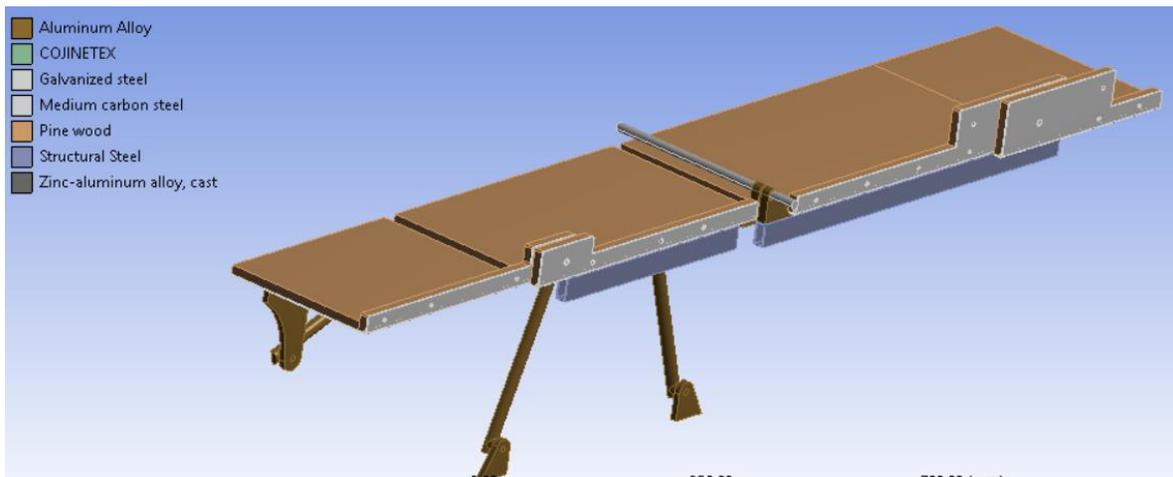


Figura 107. Materiales sistema en modo cama

En una siguiente fase, se definen las cargas a trabajar sobre los cuerpos.

Sobre las caras de las tablas de madera se ubican fuerzas perpendiculares simulando la aplicación del peso por el cuerpo de un adulto mayor. Suponiendo según el manual de dimensiones antropométricas [26], el percentil 95 para el peso de un adulto mayor en Latinoamérica es de 95 kg (valor más grande entre todos los pesos), por ende, la magnitud de las fuerzas, se hace en relación a este valor. Para el apoya piernas se aplica una fuerza total de 232 N, como se aplica de forma simétrica en el programa se maneja una magnitud de 116 N, correspondientes a $\frac{1}{4}$ del peso máximo, se toma este valor para la cabecera. Respecto al asiento y al espaldar, en ellos se aplica la mitad del peso máximo, lo que se

traduce en una fuerza de 466 N, debido a la simetría se traduce en una fuerza de 233 N, en cada uno, en el pasador se ubica una fuerza igual a 77.67 N, correspondiente a ubicar una masa igual 15.8 kg (debido a la simetría) (Figura 108 y Figura 109).

Para las bases que estarían sujetas al chasis, se ubica sobre su cara inferior un soporte fijo simulando la conexión con la base del robot (“Fixed Support” y “Fixed Support 2” en la Figura 108).

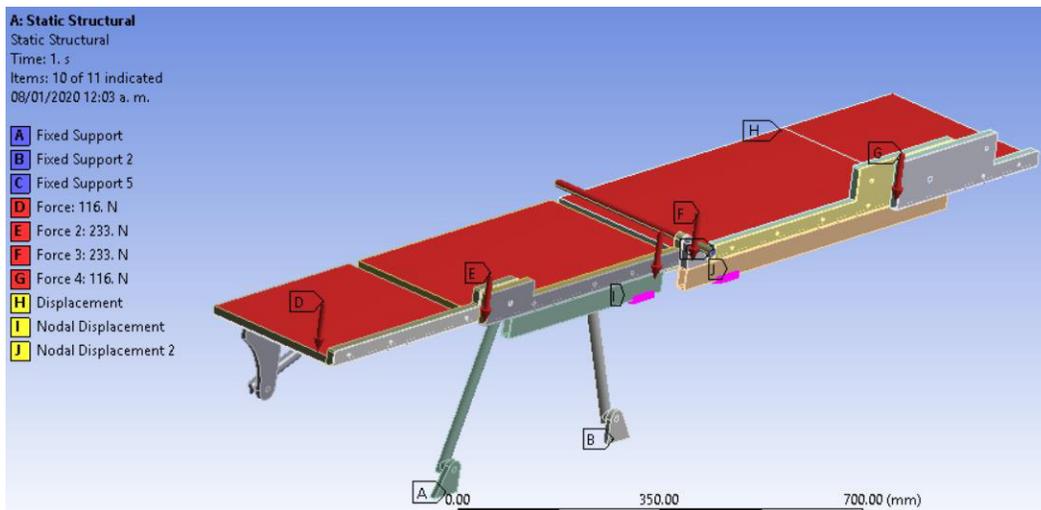


Figura 108. Condiciones de carga y soportes en el modo cama - 1

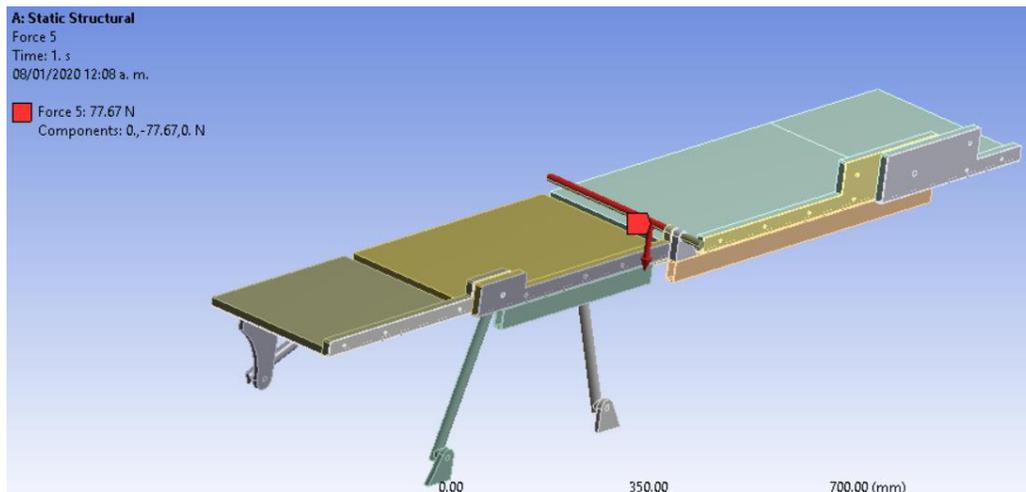


Figura 109. Condiciones de carga y soportes en el modo cama - 2

Para el pasador que une al asiento con el espaldar, se simula el efecto que tiene el estar fijo a un extremo, creando una restricción al movimiento sobre una de sus caras (Figura 110).

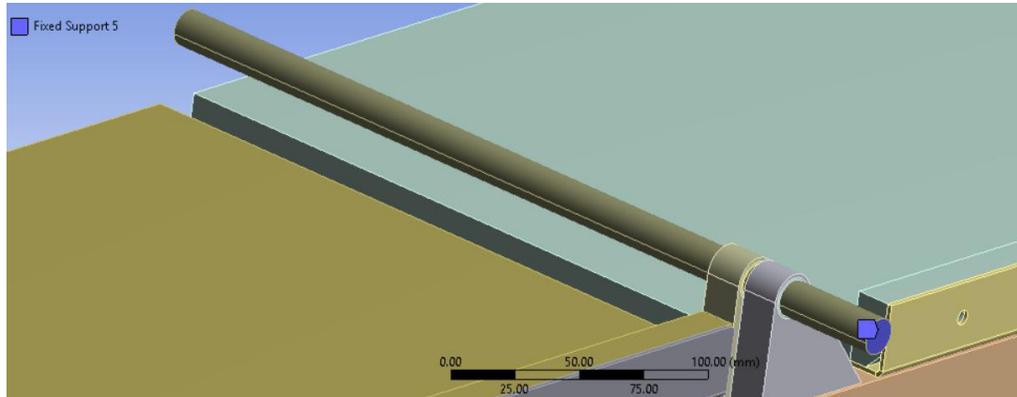


Figura 110. Condiciones de carga y soportes en el modo cama - 3

Los apoyos creados en el contacto del robot con el chasis como se muestra en la figura 111, se simulan condicionando los nodos ubicados sobre los soportes laterales a un desplazamiento en el eje vertical igual a cero (Figura 112), ya que es la única restricción que crea el bastidor. Esta se justifica observando claramente que, debido al efecto de las fuerzas, se puede garantizar que los cuerpos descenderán de su posición inicial generando un contacto con el bastidor.



Figura 111. Zona de contacto chasis - marco estructural

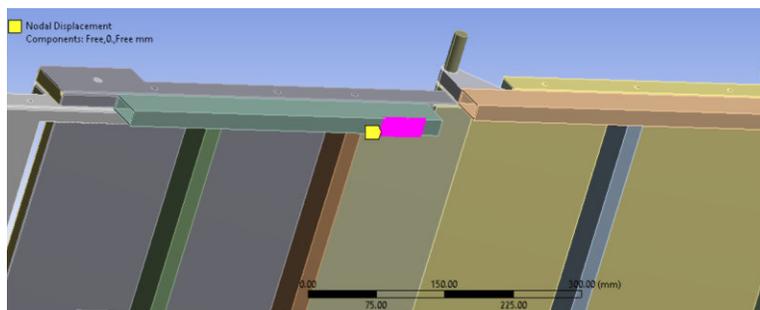


Figura 112. Condiciones de carga y soportes en el modo cama - 4

Como proceso final se evalúa el sistema, obteniendo como resultado un valor para el esfuerzo equivalente máximo de 50.87 MPa, y ocurre en la lámina de acero galvanizado que compone al espaldar (ver figuras Figura 113 y Figura 114). Respecto a la deformación, el valor máximo alcanzado corresponde a 0.1693 mm (Figura 115), un valor pequeño comparado con las dimensiones del sistema, cabe resaltar que no es suficiente para afectar de forma negativa a la madera. Los puntos que logran este valor se encuentran en uno de los extremos de la cojinería que conforman la cabecera y en el pasador principal, como lo muestra la Figura 115.

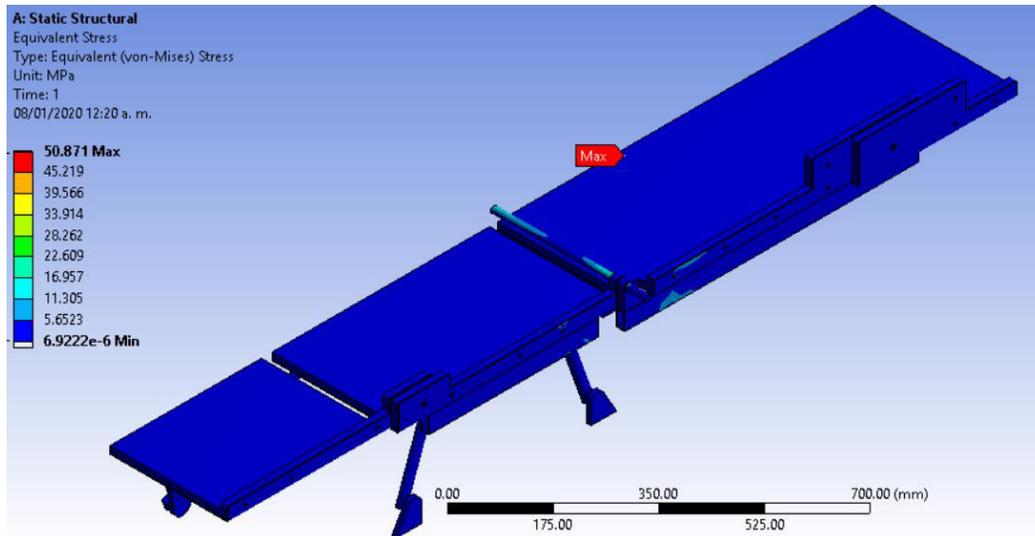


Figura 113. Resultado esfuerzo equivalente: sistema en modo cama - 1

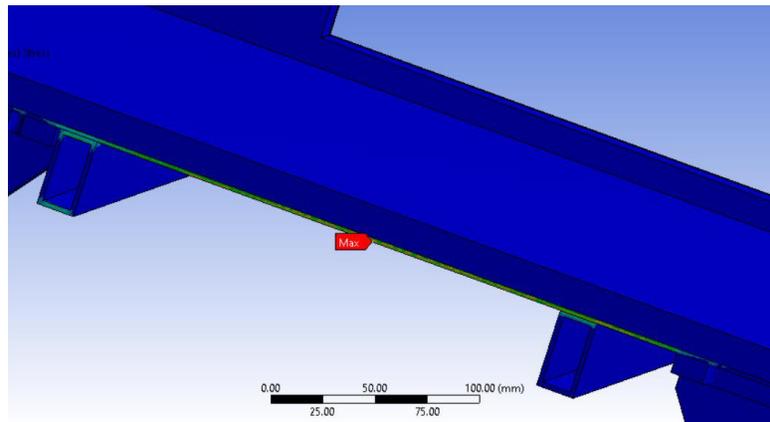


Figura 114. Resultado esfuerzo equivalente: sistema en modo cama - 2

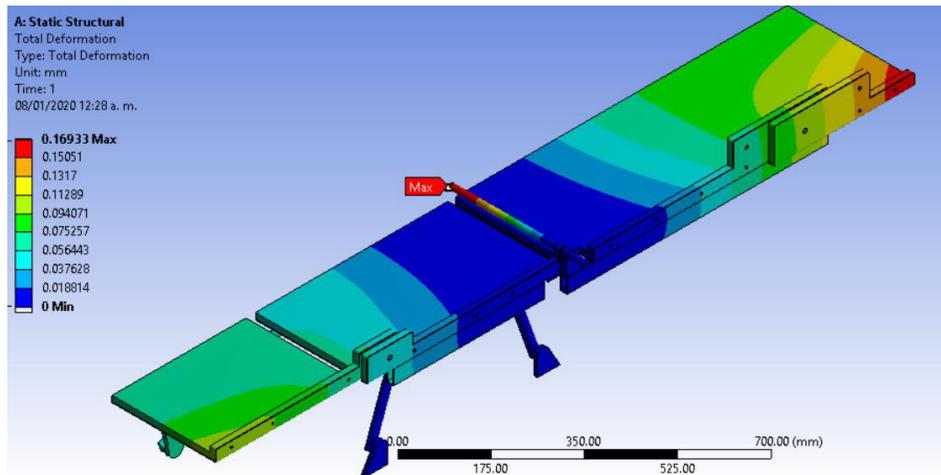


Figura 115. Resultado deformación direccional: sistema en modo cama

Respecto a los factores de seguridad (comparados desde el esfuerzo equivalente, Figura 116) en las partes claves, se tienen los siguientes resultados:

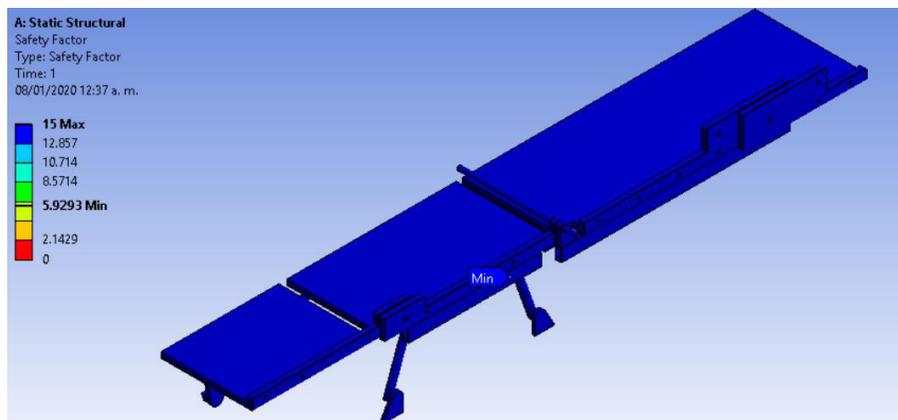


Figura 116. Factores de seguridad en el modo cama

- **pasador de conexión entre el asiento y el espaldar.**

Se observa que su valor es de 15 (Figura 117), muy superior a la unidad, esto es un buen indicio, sobre el tamaño y el material, usado en el pasador.

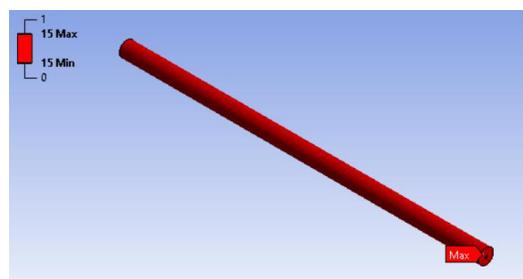


Figura 117. Factor de seguridad: pasador conexión en modo cama

- **Pasadores de conexión cabecera - espaldar y asiento - apoya piernas.**

En estos el factor de seguridad es de 15 (Figura 118), por ende se demuestra que, están perfectamente diseñados para soportar la carga en el sistema.

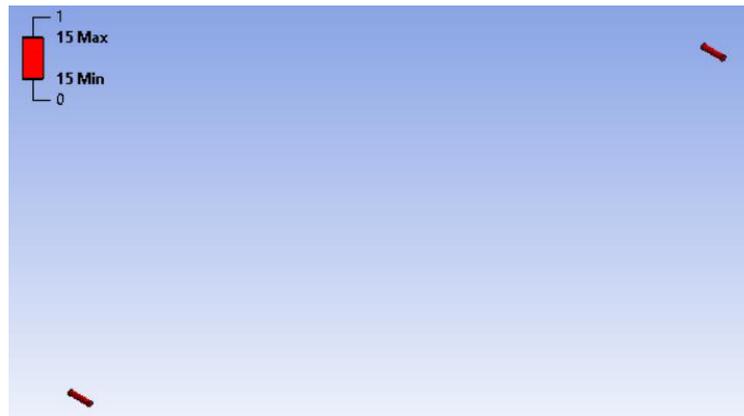


Figura 118. Factor de seguridad: pasadores conexiones en modo cama

- **Cojinetes Iglidur X.**

El análisis sobre estos elementos demuestra que el esfuerzo máximo alcanzado es de 10.582 MPa (Figura 119), no excede los límites de trabajo correspondientes a los 150 MPa [28].

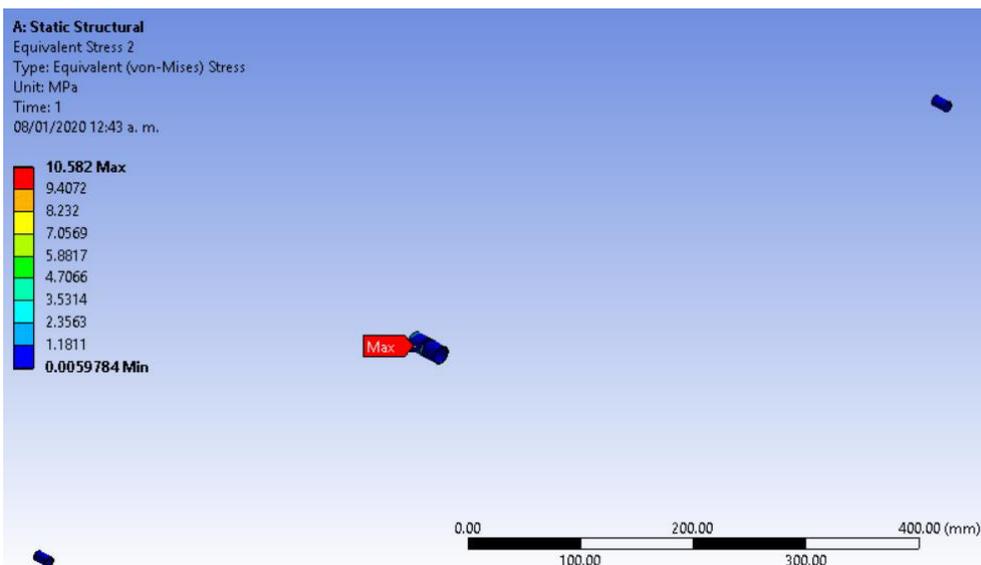


Figura 119. Esfuerzos en cojinetes Iglidur X en el modo cama

- **Cojinería Cabecera - Espaldar - Asiento - Apoya piernas, soportes estructurales de refuerzo y bases de aluminio para la conexión con el pasador principal.**

En estos conjuntos, se observa que los sistemas soportan la carga sin ningún problema (Figura 120), cabe resaltar que en el asiento, el valor del factor de seguridad mínimo es 5.9, ubicado en uno de los soportes estructurales (Figura 121). Aun así, si se ubica en el asiento un peso mayor al analizado, la posible falla ocasionada, no representa peligro alguno para el usuario, permitiéndole bajarse del robot-cama.

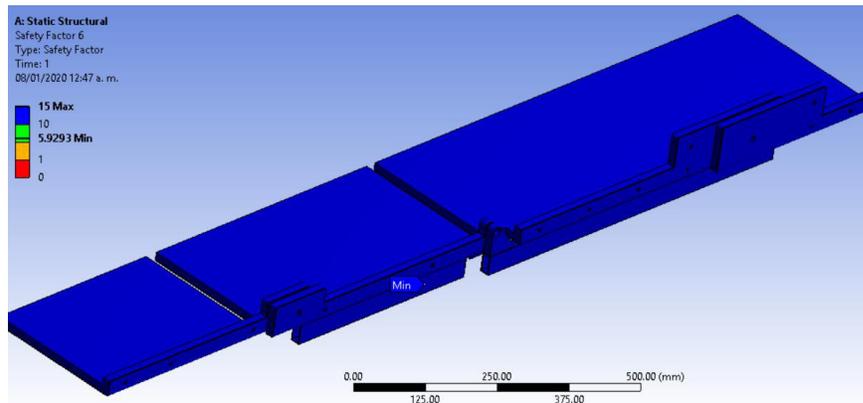


Figura 120. Factores de seguridad: conjuntos de cojinería - refuerzos estructurales - bases de aluminio modo cama

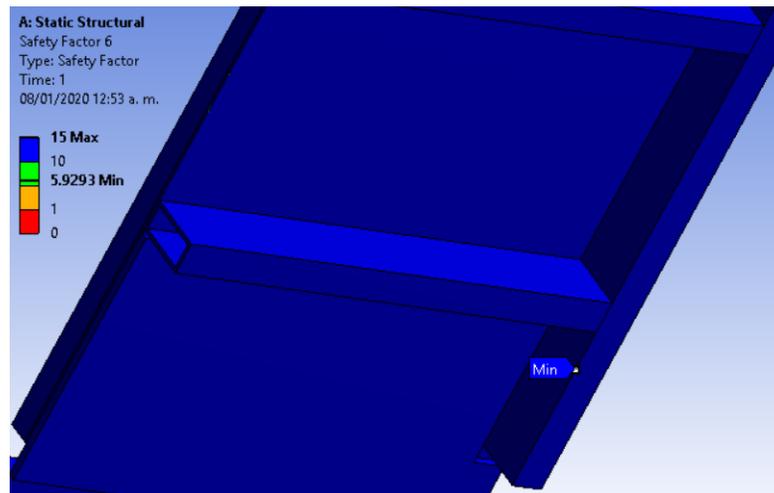


Figura 121. Factor de seguridad: asiento en el modo cama

Para finalizar el análisis de este conjunto se toman los valores necesarios para la evaluación del chasis.

La fuerzas de reacción para el soporte fijo 1 (más cercano al apoya pies, Figura 122) son: en el eje x , igual a -30.574 N, para el eje y , 174.97 N y para el eje z , -20.964 N. Para una fuerza total aplicada en este punto de 178.85 N.

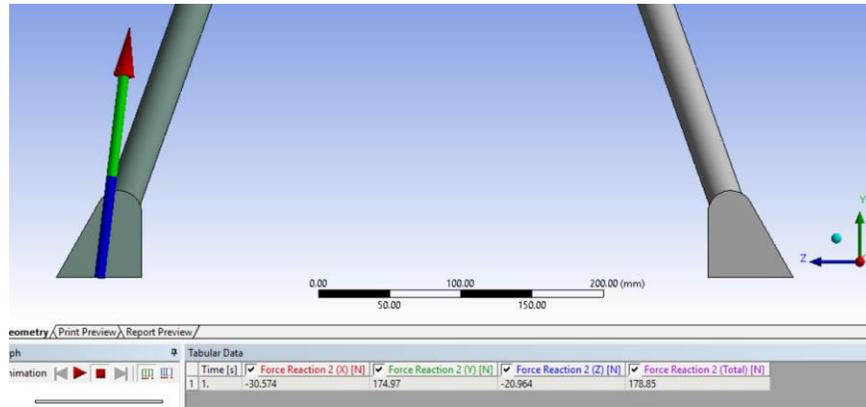


Figura 122. Reacciones soporte 1 en el modo cama

Los momentos en el soporte fijo 1 (más cercano al apoya pies, Figura 123) son: en el eje x , igual a 1501.3 Nmm, para el eje y , 318.83 Nmm y para el eje z , 456.89 Nmm. Para un momento total aplicada en este punto de 1601.4 Nmm.

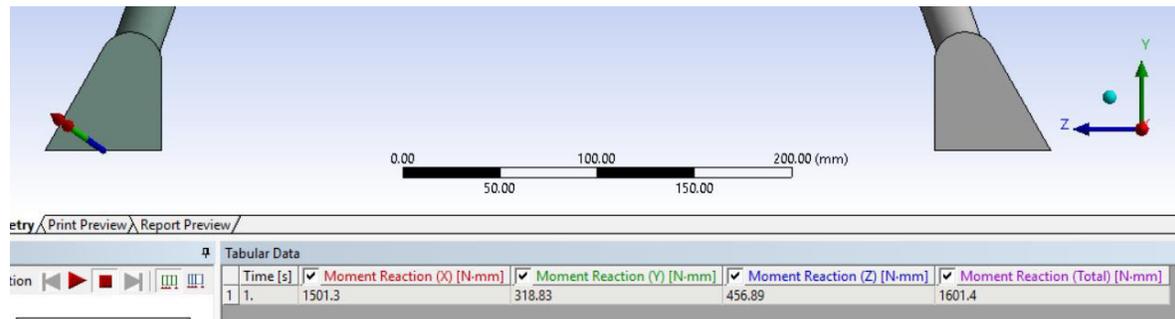


Figura 123. Momentos soporte 1 en el modo cama

La fuerzas de reacción para el soporte fijo 2 (más cercano a la cabecera, Figura 124) son: en el eje x , igual a -32.412 N, para el eje y , 185.87 N y para el eje z , 22.276 N. Para una fuerza total aplicada en este punto de 189.98 N.

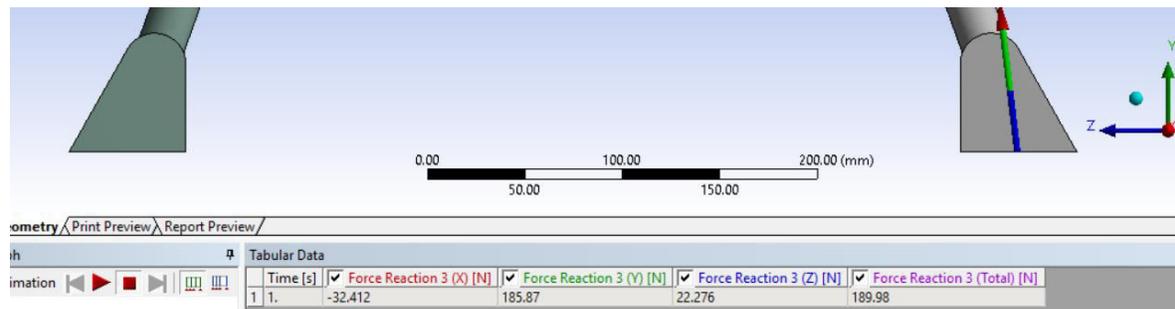


Figura 124. Reacciones soporte 2 en el modo cama

Los momentos en el soporte fijo 2 (más cercano a la cabecera, Figura 125) son: en el eje x , igual a -1593.9 Nmm, para el eje y , -338.69 Nmm y para el eje z , 484.24 Nmm. Para un momento total aplicada en este punto de 1699.9 Nmm.

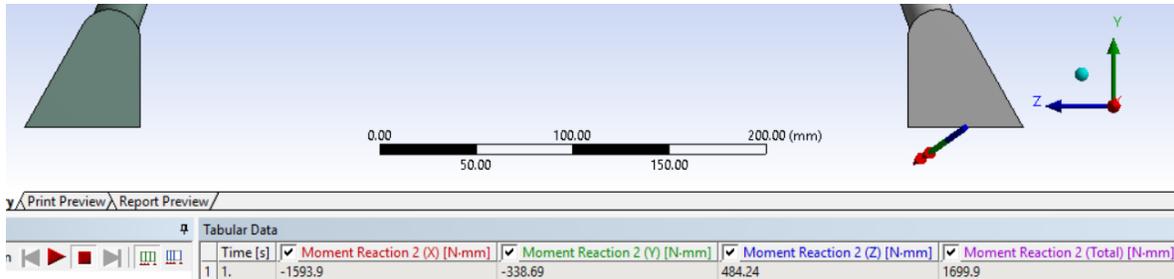


Figura 125. Momentos soporte 2 en el modo cama

Para las zonas de contacto indicadas en la figura 111, los valores de las fuerzas aplicadas son:

Para el apoyo 1, donde se soporta el asiento, su magnitud es de 251.48 N, como se muestra en la figura 126.

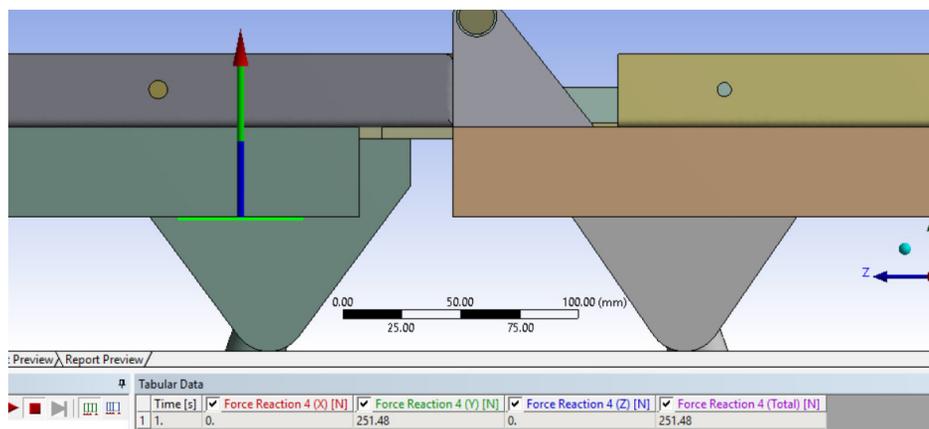


Figura 126. Reacción Apoyo 1 en el modo cama

Para el apoyo 2, donde se soporta el espaldar, su magnitud es de 275.23 N, como se muestra en la figura 127.

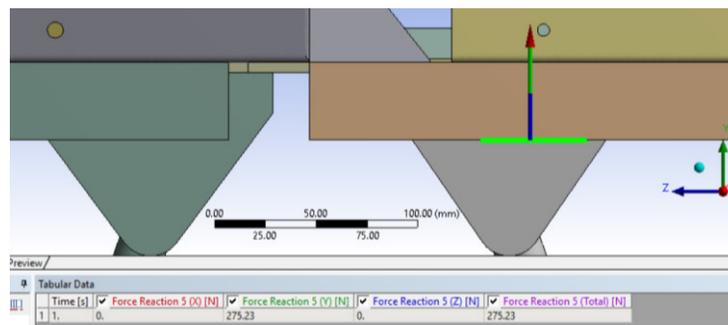


Figura 127. Reacción apoyo 2 en el modo cama

Mientras que la fuerza aplicada en el pasador de conexión entre el asiento y el espaldar corresponde a los siguientes valores (Figura 128): en el eje x , igual a 99.551 N, para el eje y , -111.88 N y para el eje z , -13.508 N. Para una fuerza total aplicada en este punto de 150.36 N.

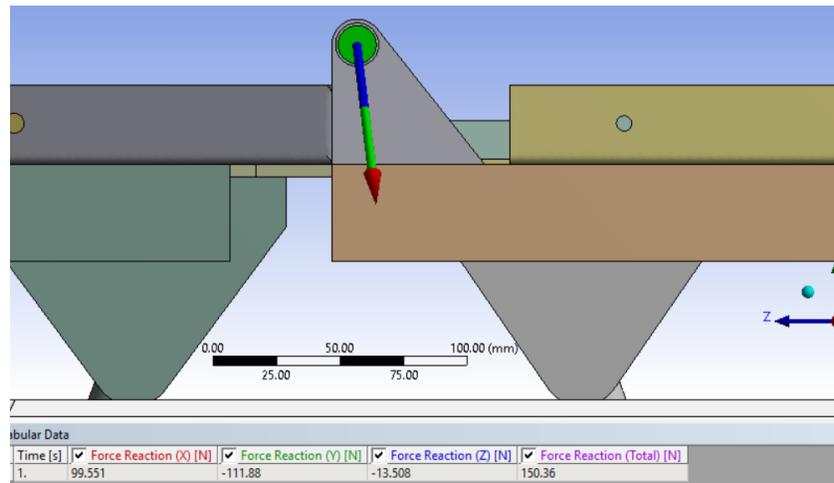


Figura 128. Reacciones en el pasador principal de conexión en el modo cama

6.2 Segunda Simulación: Chasis en el modo cama.

En esta sección se analizan las fuerzas ejercidas sobre el chasis del robot. Se rescatan los valores de la primera simulación, además en este punto se tiene en consideración la fuerza ejercida en el mismo por los brazos robóticos.

Se describe paso por paso las condiciones para evaluar este sistema.

En un primer paso (Figura 129), se carga la geometría del chasis, debido a la forma como se ubican las cargas en él, se puede aplicar una simetría, esto permite reducir para la simulación, los requerimientos en cuanto a cómputo se refiere. Cabe resaltar, que para facilitar el proceso de mallado, se unen todos los cuerpos como una sola parte.

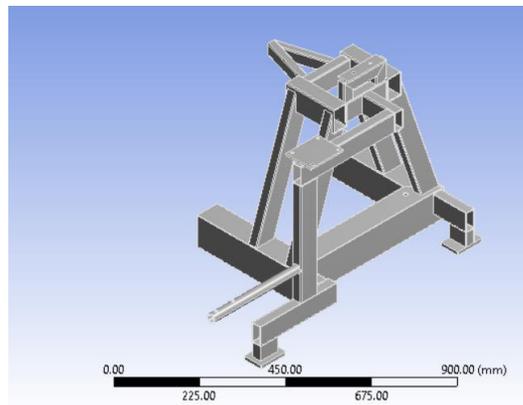


Figura 129. Simulación chasis para el modo cama - 1

En un segundo paso, se establece el acero estructural como material para todos los cuerpos, que conforman la pieza (Figura 130).

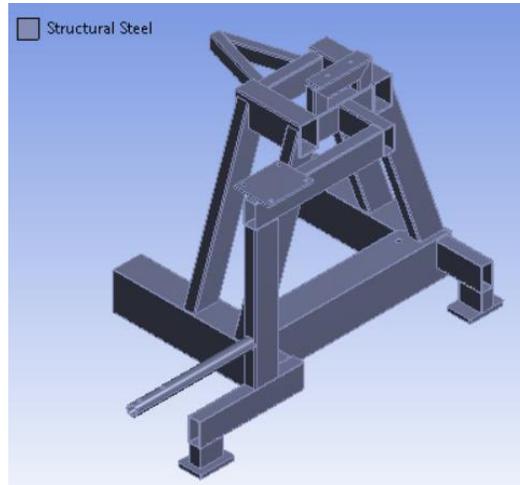


Figura 130. Materiales para el chasis en el modo cama

Continuando a una tercera instancia, se malla el sistema con un tamaño de elemento de 3 mm, cabe resaltar que en este punto se usa el método “Hex Dominant” para el análisis de los cuerpos, ya que esta forma de elementos se ajusta en mejor calidad a la geometría de la estructura. La cantidad de elementos generados bajo estas condiciones es de 201,710 y 1'085,986 nodos (Figura 131).

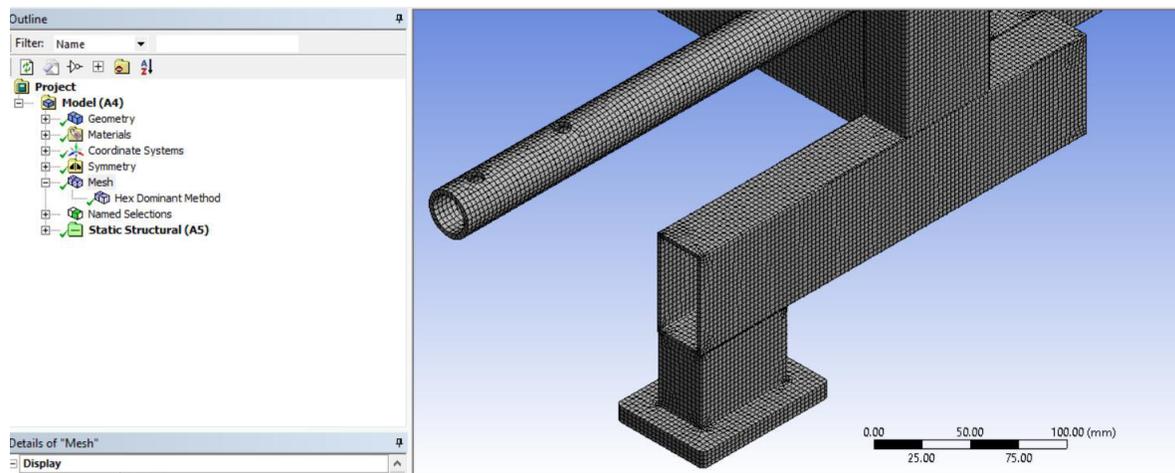


Figura 131. Simulación chasis para el modo cama - 2

Como cuarto paso, se definen las cargas sobre el sistema, estas se toman de la simulación para el modo cama (Figura 122 a la Figura 128). El efecto de los brazos robóticos puede verse representado por la aplicación de una fuerza vertical de 70 N sobre las bases que los sostienen, esta magnitud representa al peso aproximado del sistema indicado en la sección 5.3. Para las zonas de soporte, se incluye un soporte fijo sobre las caras del

sistema, donde se ubican las ruedas guías, además se restringe la traslación vertical de los nodos, en la zona del chasis donde se encuentra anclado el motor y la rueda principal.

Para representar la masa de las baterías y equipos electrónicos aproximadamente de 60 Kg, se aplica una fuerza de 147 N en las caras laterales del soporte (considere el efecto de la simetría), como se muestra en las Figura 132 y figura 133.

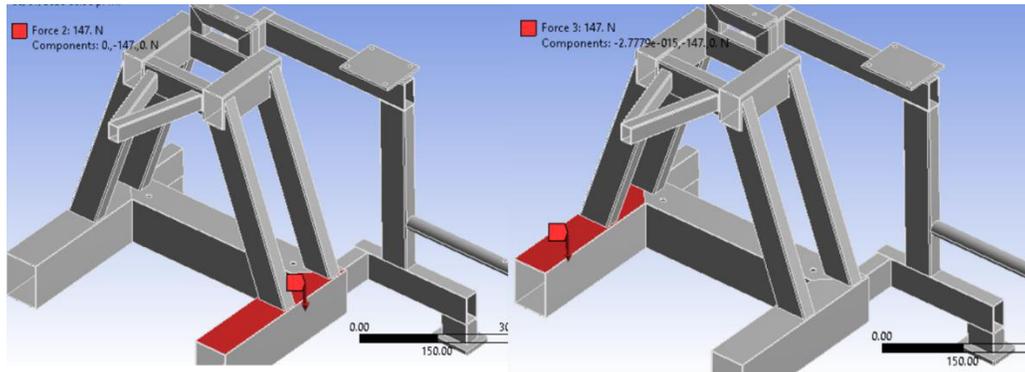


Figura 132. Cargas equipos eléctricos y electrónicos en soporte para el modo cama

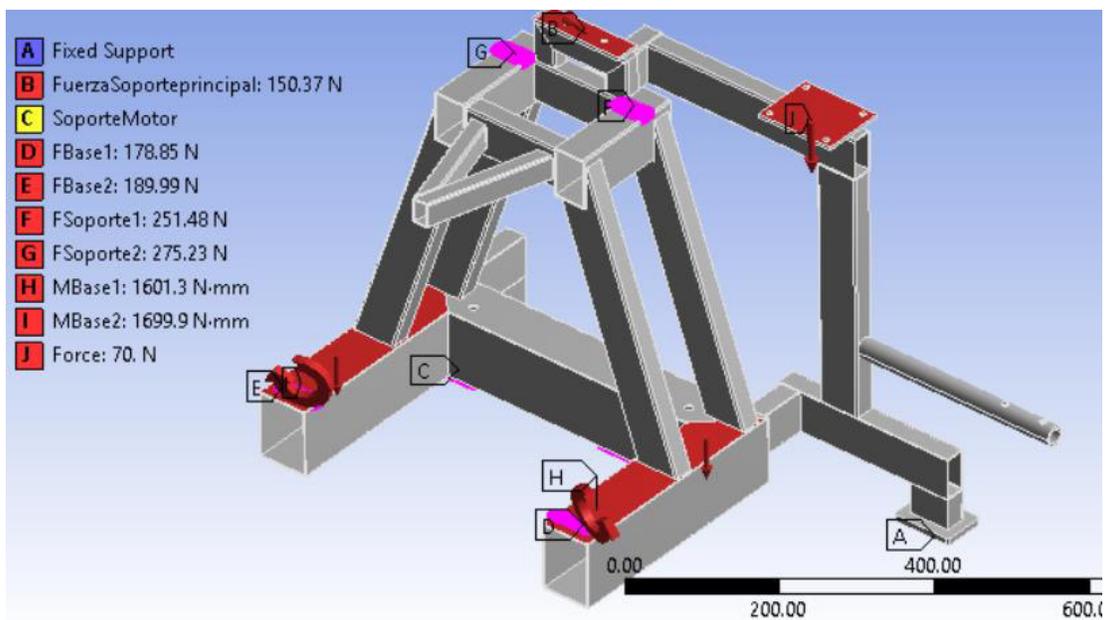


Figura 133. Cargas y soportes en el chasis para el modo cama

Por último, se resuelve el sistema obteniendo los siguientes resultados.

Respecto al esfuerzo máximo, el valor máximo es de 49.259 MPa, se ubica en una de las uniones (Figura 134).

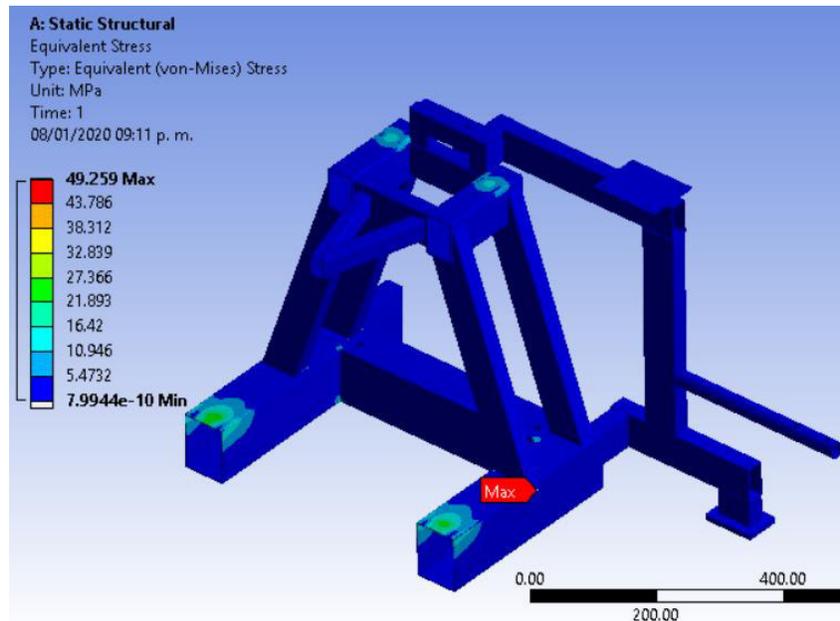


Figura 134. Resultados chasis en el modo cama: esfuerzo equivalente

La deformación en el chasis con estas cargas es mínima, solo alcanza el valor de 0.065 mm (Figura 135). Por ende, visto desde esta perspectiva el sistema está lejos de fallar por sus cambios en las longitudes.

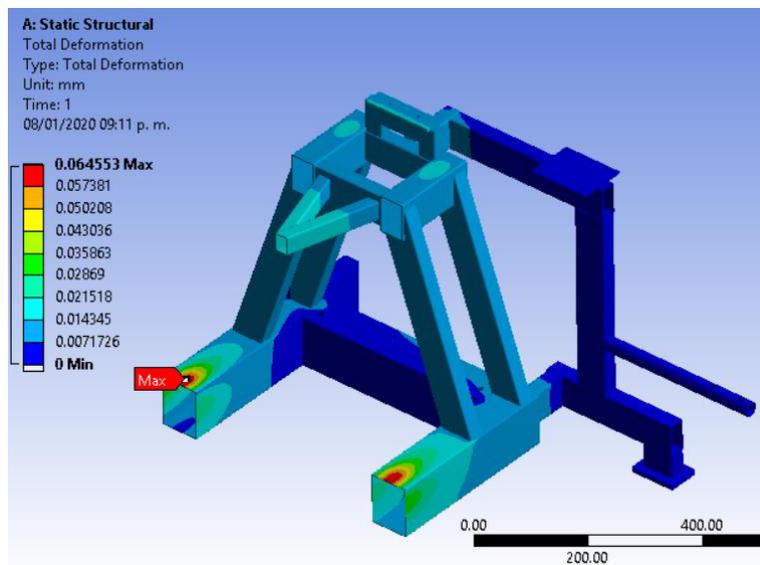


Figura 135. Resultados chasis en el modo cama: Deformación

Para finalizar el análisis de resultados, se observa el factor de seguridad a partir del esfuerzo equivalente, la magnitud mínima obtenida es de 5.07 (Figura 136), por ende, se concluye que el chasis soporta sin ningún problema, las cargas a las cuales, se encuentra sometido.

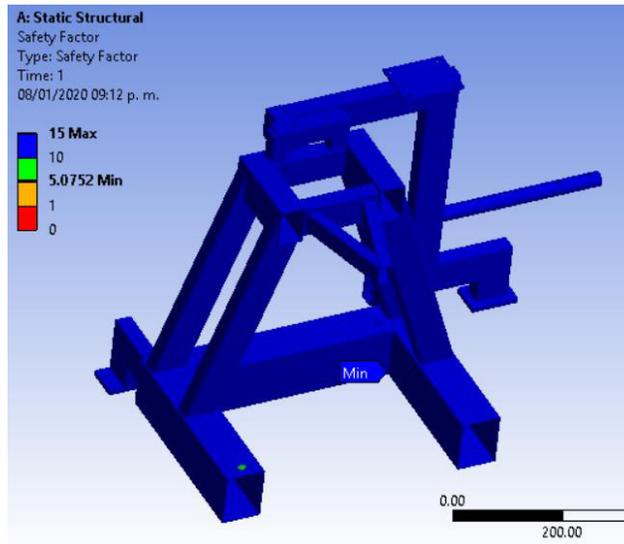


Figura 136. Resultados chasis en el modo cama: Factores de seguridad

6.3 Tercera Simulación: Sistemas de cojinería, mecanismos de movimiento y conexiones para el modo silla.

El análisis inicia con un modelo del sistema (Figura 137), para mejorar el mallado se toman todos los cuerpos como una sola parte. A partir de la geometría del dispositivo, se favorece una distribución simétrica de las cargas, se crea una operación de simetría sobre el conjunto, a fin de analizar solo una parte del mismo, permitiendo una optimización sobre los requerimientos para el sistema de cómputo.

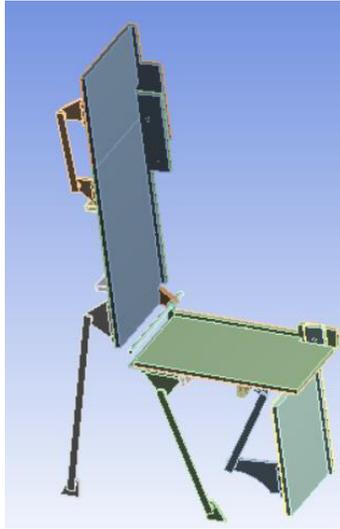


Figura 137. Simulación del sistema en modo silla

Como segundo paso, se definen los materiales de los cuerpos del sistema. Para este caso se comparten los materiales presentes en el modo cama (Figura 138).

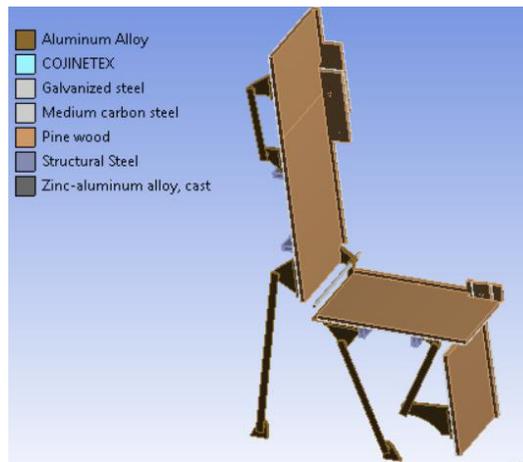


Figura 138. Materiales en el modo silla

En una tercera etapa, el programa asigna automáticamente una serie de conexiones entre los elementos, las cuales se revisan eliminando aquellas que pueden llegar a no tener sentido físico pero que el sistema genera, como por ejemplo dos caras de diferentes cuerpos que no están unidas pero aun así el software genera esta relación.

En una cuarta fase, se aplica una malla al sistema completo, para este punto, es importante definir que el tamaño de elemento designado es de 2 mm. Con esta magnitud el número de elementos generados es de 1'151,122 y 2'165,291 nodos (Figura 139), si se eligen valores más pequeños esta cantidad se incrementa a unas cifras que por las limitaciones del equipo de cómputo no pueden analizarse.

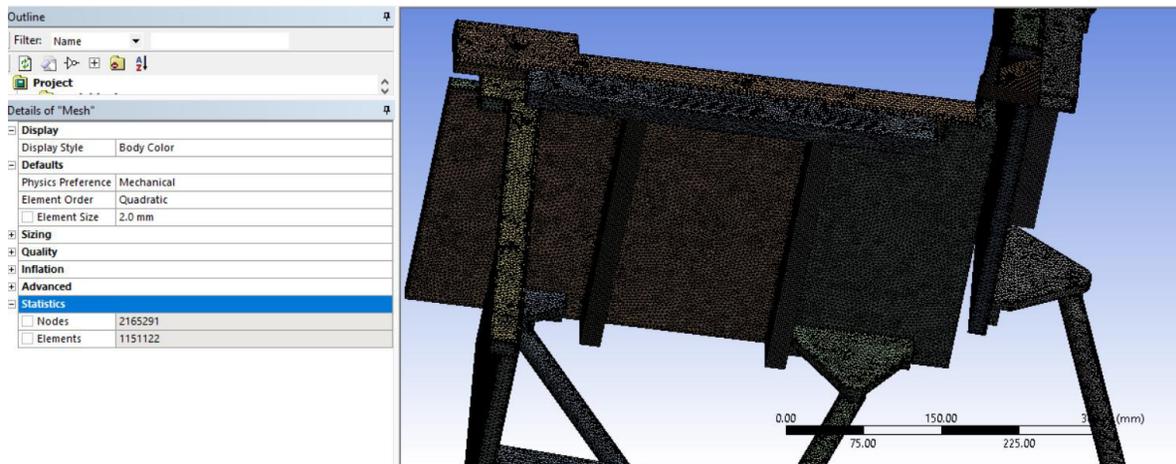


Figura 139. Simulación del sistema en modo silla - mallado

En la Figura 140 se muestran algunos de los elementos mallados del sistema.

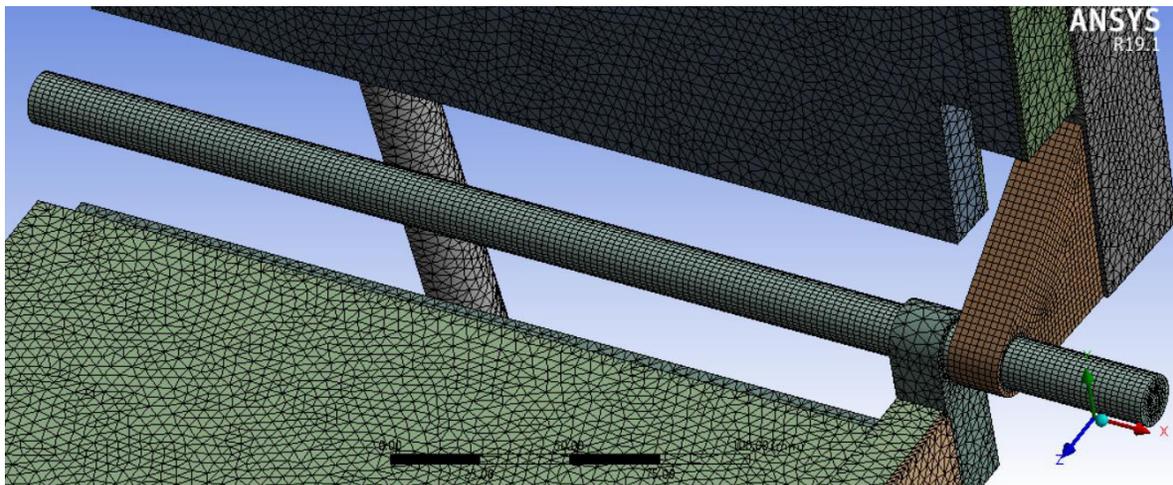


Figura 140. Simulación sistema en modo silla a detalle

En una siguiente fase, se definen las cargas a trabajar sobre los cuerpos.

Sobre las caras de las tablas de madera se ubican fuerzas perpendiculares simulando la aplicación del peso por el cuerpo de un adulto mayor. Suponiendo según el manual de dimensiones antropométricas [26], el percentil 95 para el peso de un adulto mayor en Latinoamérica es de 95 kg (valor más grande entre todos los pesos), por ende, la magnitud de las fuerzas, se hace en relación a este valor.

En el apoya piernas se aplica una fuerza total de 232 N, como se aplica de forma simétrica, para el programa se maneja una magnitud de 116 N, correspondientes a $\frac{1}{4}$ del peso máximo.

En este caso diferente al modo de trabajo se esperaría que el efecto del peso del usuario sea percibido en una mayor medida por el asiento y por el pasador principal, para el asiento se aplica la mitad del peso máximo, es decir una fuerza de 466 N, debido a la simetría se traduce en una fuerza de 233 N.

Para el pasador principal se aplica una fuerza de 174.5 N, por el efecto de simetría, esta corresponde a aplicar un 38% del peso máximo de un adulto mayor.

Para la cabecera y el espaldar en ambas se aplican fuerzas iguales a 87.25 N.

Para las bases que estarían sujetas al chasis, se ubica sobre su cara inferior un soporte fijo simulando la conexión con la base del robot (“Fixed Support” y “Fixed Support 2” en la Figura 141).

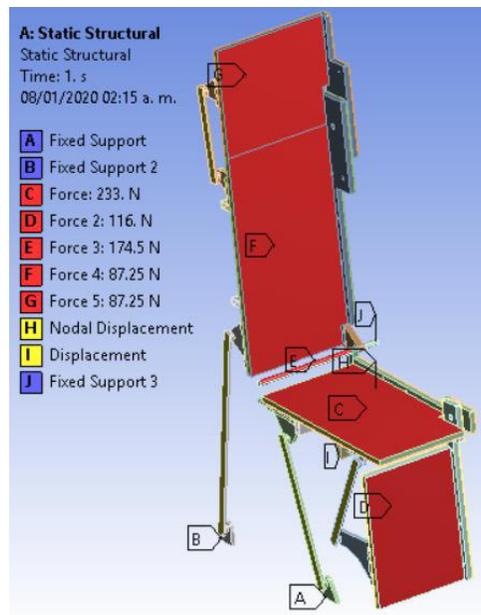


Figura 141. Condiciones de carga y soportes en el modo silla - 1

Para el pasador que une al asiento con el espaldar, se simula el efecto que tiene el estar fijo a un extremo, creando una restricción al movimiento sobre una de sus caras (Figura 142).

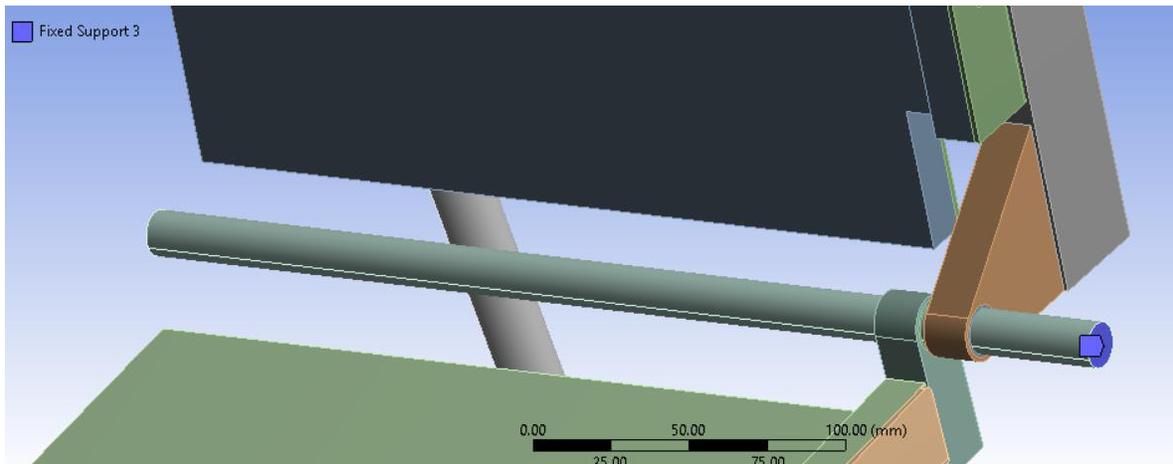


Figura 142. Condiciones de carga y soportes en el modo silla - 2

Los apoyos creados en el contacto del robot con el chasis como se muestra en la figura 111, se simulan condicionando los nodos ubicados sobre los soportes laterales a un desplazamiento en el eje vertical igual a cero (Figura 143), ya que es la única restricción que crea el bastidor. Esta se justifica observando claramente que, debido al efecto de las fuerzas, se puede garantizar que la zona del asiento descenderá de su posición inicial generando un contacto con el bastidor.

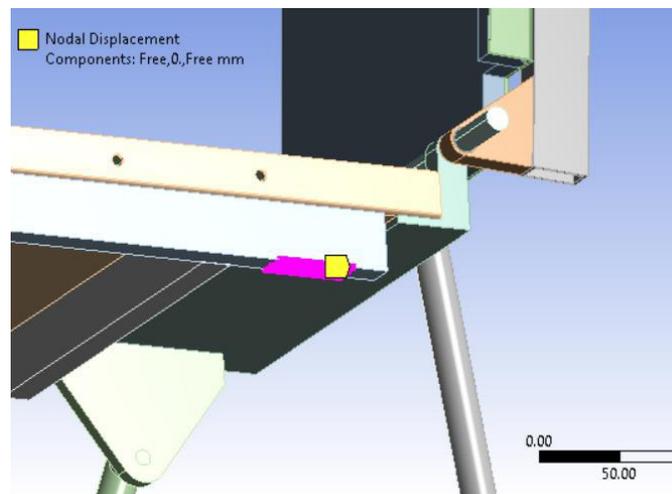


Figura 143. Condiciones de carga y soportes en el modo silla - 3

Como proceso final se evalúa el sistema, obteniendo como resultado un valor para el esfuerzo equivalente máximo de 49.727 MPa, y ocurre en el pasador principal, (ver figuras Figura 144 y Figura 145). Respecto a la deformación, el valor máximo alcanzado corresponde a 0.402 mm (Figura 146), un valor pequeño comparado con las dimensiones del sistema.

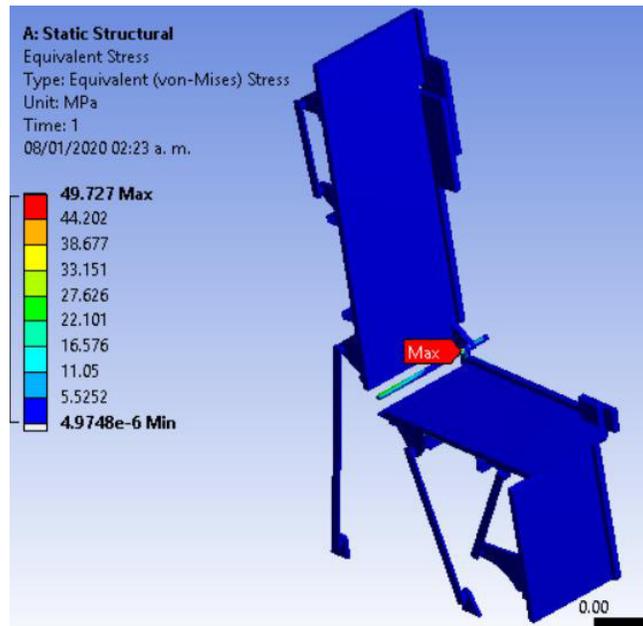


Figura 144. Resultado esfuerzo equivalente: sistema en modo silla - 1

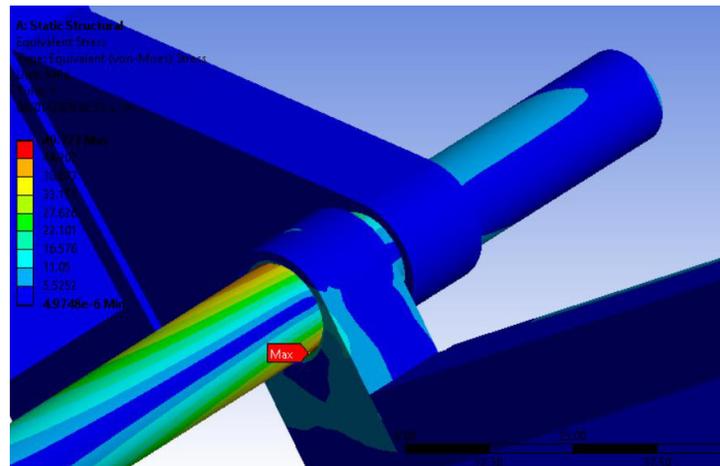


Figura 145. Resultado esfuerzo equivalente: sistema en modo silla - 2

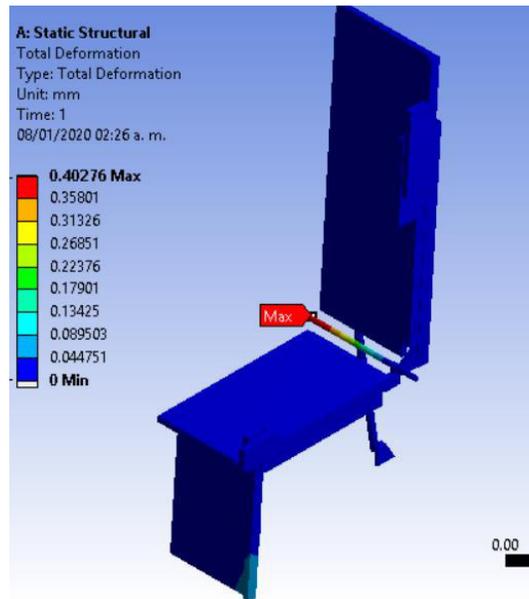


Figura 146. Resultado deformación direccional: sistema en modo silla

Respecto a los factores de seguridad (comparados desde el esfuerzo equivalente, (Figura 147) en las partes claves, se tienen los siguientes resultados:

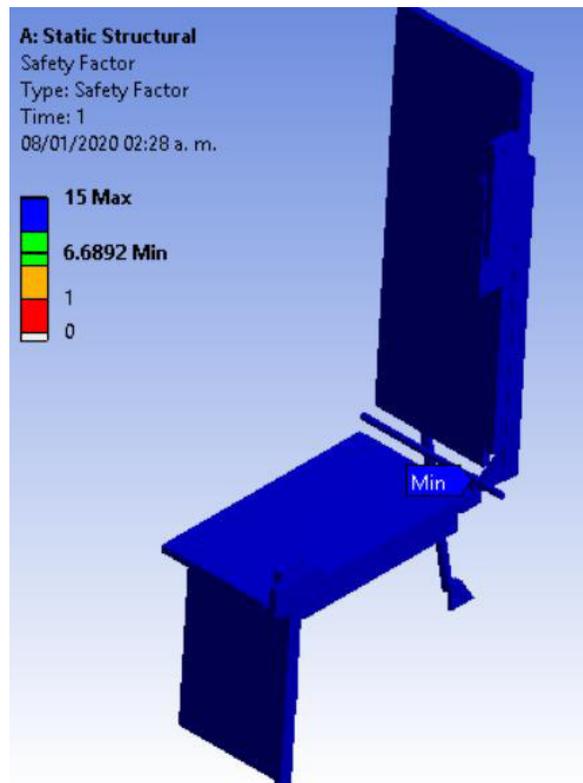


Figura 147. Factores de seguridad en el modo silla

- **pasador de conexión entre el asiento y el espaldar.**

Se observa que su valor es de 11.845 (Figura 148), muy superior a la unidad, esto es un buen indicio, sobre el tamaño y el material, usado en el pasador.

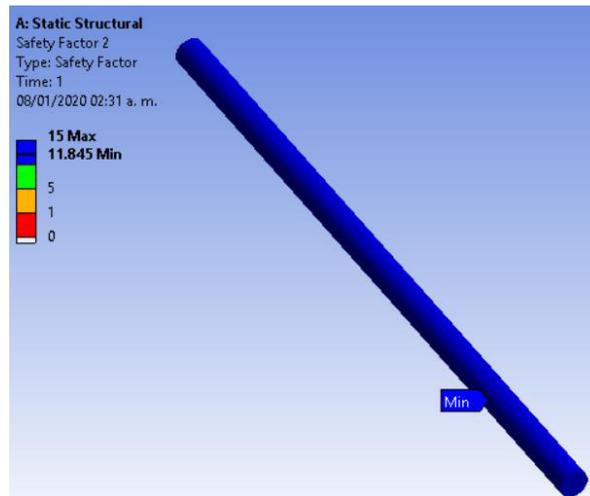


Figura 148. Factor de seguridad: pasador conexión en modo silla

- **Pasadores de conexión cabecera - espaldar y asiento - apoya piernas.**

En estos el factor de seguridad es de 15 (Figura 149), por ende se demuestra que, están perfectamente diseñados para soportar la carga en el sistema.

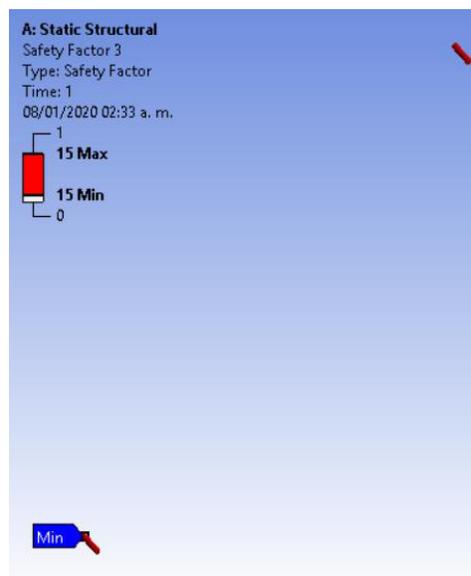


Figura 149. Factor de seguridad: pasadores conexiones en modo silla

- **Cojinetes Iglidur X.**

El análisis sobre estos elementos demuestra que el esfuerzo máximo alcanzado es de 25.414 MPa (Figura 150), no excede los límites de trabajo correspondientes a los 150 MPa [28].

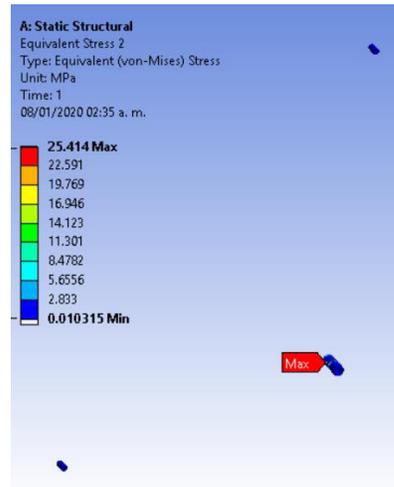


Figura 150. Esfuerzos en cojinetes Iglidur X en el modo silla

- **Cojinería Cabecera - Espaldar - Asiento - Apoya piernas, soportes estructurales de refuerzo y bases de aluminio para la conexión con el pasador principal.**

En estos conjuntos, se observa que los sistemas soportan la carga sin ningún problema (Figura 151), cabe resaltar que en el asiento, el valor del factor de seguridad mínimo es 6.7, ubicado en uno de los soportes estructurales (Figura 152). Aun así, si se ubica en el asiento un peso mayor al analizado, la posible falla ocasionada, no representa peligro alguno para el usuario, permitiéndole bajarse del robot-cama.

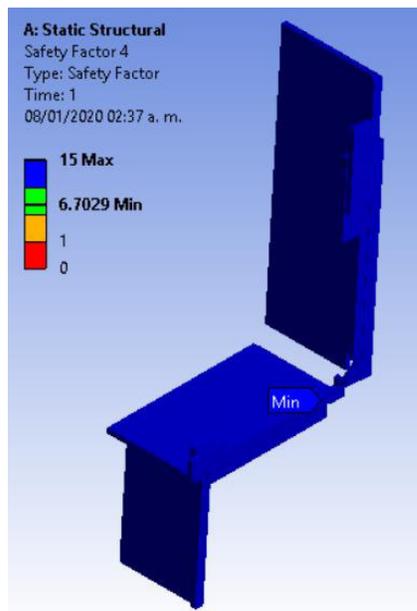


Figura 151. Factores de seguridad: conjuntos de cojinería - refuerzos estructurales - bases de aluminio modo silla

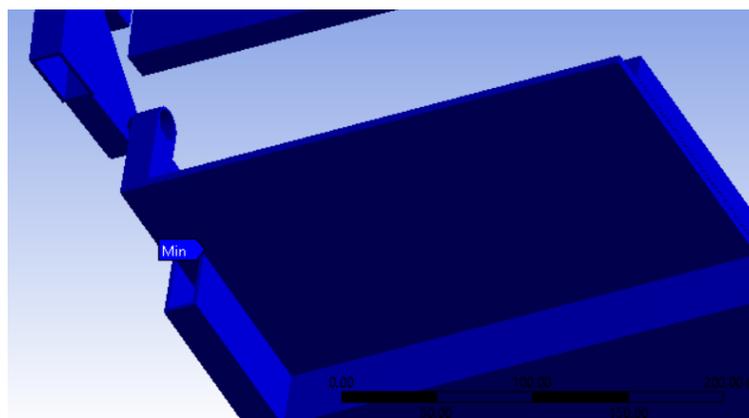


Figura 152. Factor de seguridad: asiento en el modo silla

Para finalizar el análisis de este conjunto se toman los valores necesarios para la evaluación del chasis.

La fuerzas de reacción para el soporte fijo 1 (más cercano al apoya pies, Figura 153) son: en el eje x , igual a -18.531 N, para el eje y , 105.81 N y para el eje z , -12.718 N. Para una fuerza total aplicada en este punto de 108.17 N.

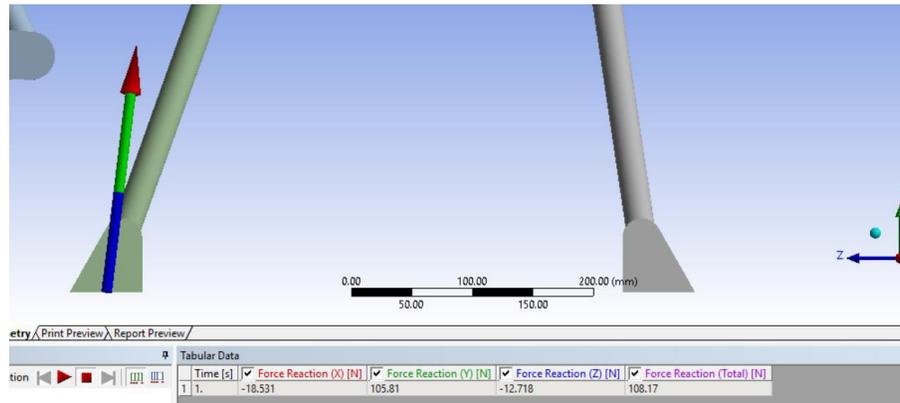


Figura 153. Reacciones soporte 1 en el modo silla

Los momentos en el soporte fijo 1 (más cercano al apoya pies, Figura 154) son: en el eje x , igual a 906.63 Nmm, para el eje y , 193.83 Nmm y para el eje z , 276.86 Nmm. Para un momento total aplicada en este punto de 967.58 Nmm.

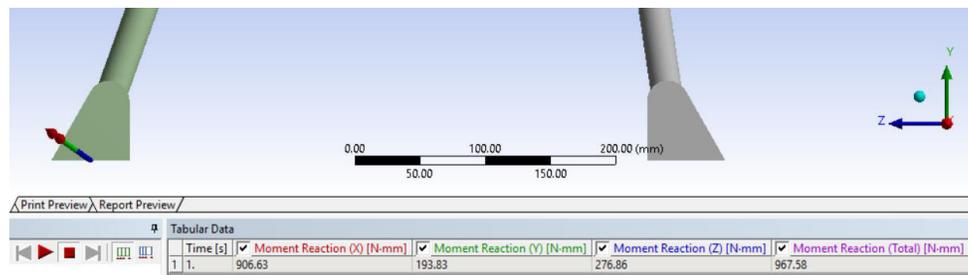


Figura 154. Momentos soporte 1 en el modo silla

La fuerzas de reacción para el soporte fijo 2 (más cercano a la cabecera, Figura 155) son: en el eje x , igual a -7.5318 N, para el eje y , 43.453 N y para el eje z , 4.4387 N. Para una fuerza total aplicada en este punto de 44.323 N.

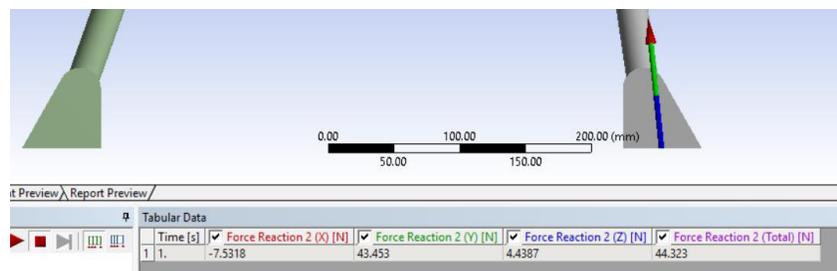


Figura 155. Reacciones soporte 2 en el modo silla

Los momentos en el soporte fijo 2 (más cercano a la cabecera, Figura 156) son: en el eje x , igual a -405.38 Nmm, para el eje y , -79.987 Nmm y para el eje z , 112.19 Nmm. Para un momento total aplicada en este punto de 428.15 Nmm.

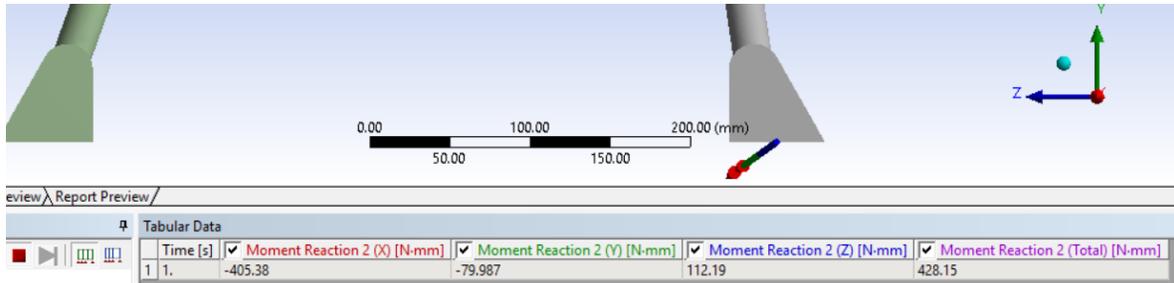


Figura 156. Momentos soporte 2 en el modo silla

Para las zonas de contacto indicadas en la figura 111, los valores de las fuerzas aplicadas son:

Para el apoyo 1, donde se soporta el asiento, su magnitud es de 349.29 N, como se muestra en la Figura 157.

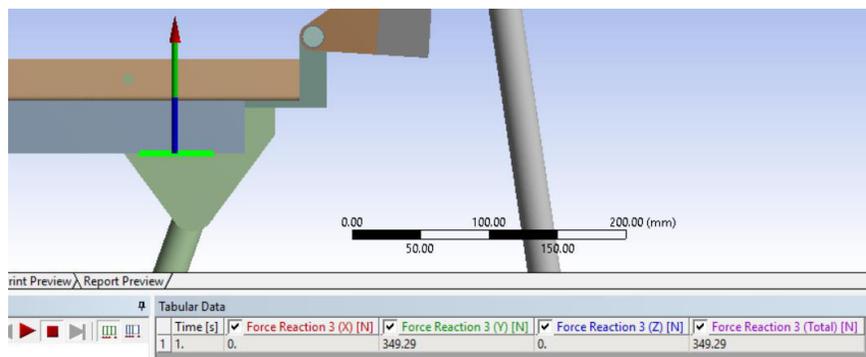


Figura 157. Reacción Apoyo 1 en el modo silla

Mientras que la fuerza aplicada en el pasador de conexión entre el asiento y el espaldar corresponde a los siguientes valores (Figura 158): en el eje x , igual a 170.5 N, para el eje y , -71.402 N y para el eje z , 27.14 N. Para una fuerza total aplicada en este punto de 186.83 N.

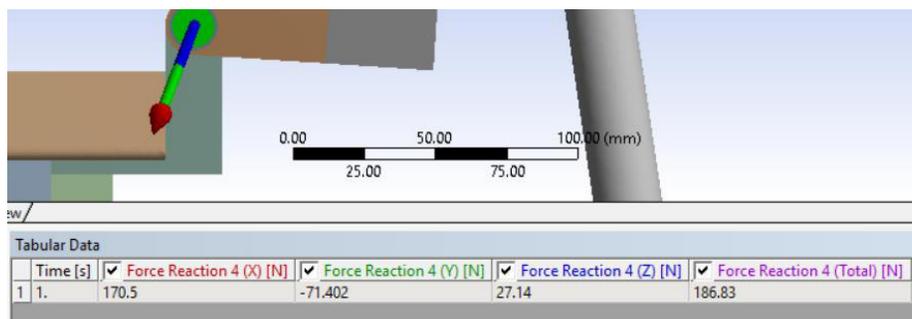


Figura 158. Reacciones en el pasador principal de conexión en el modo silla

6.4 Cuarta Simulación: Chasis para el modo silla.

En esta sección se analizan las fuerzas ejercidas sobre el chasis del robot. Se rescatan los valores de la tercera simulación, además en este punto se tiene en consideración la fuerza ejercida en el mismo por los brazos robóticos.

Se describe paso por paso las condiciones para evaluar este sistema.

En un primer paso (Figura 159), se carga la geometría del chasis, debido a la forma como se ubican las cargas en él, se puede aplicar una simetría, esto permite reducir para la simulación, los requerimientos en cuanto a cómputo se refiere. Cabe resaltar, que para facilitar el proceso de mallado, se unen todos los cuerpos como una sola parte.

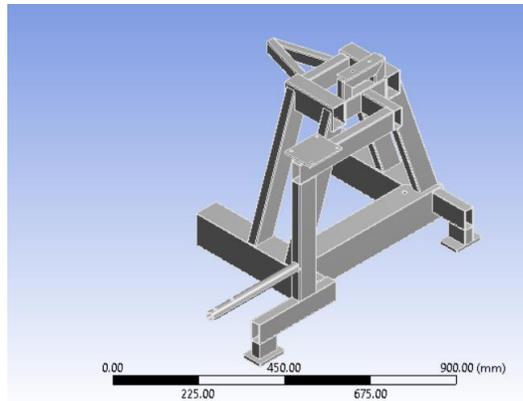


Figura 159. Simulación chasis para el modo silla - 1

En un segundo paso, se establece el acero estructural como material para todos los cuerpos, que conforman la pieza (Figura 160).

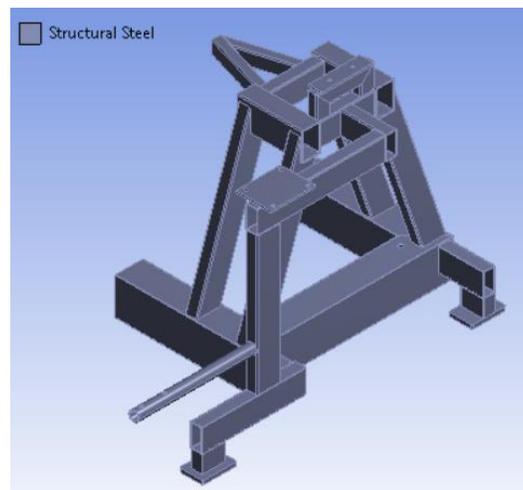


Figura 160. Materiales para el chasis en el modo silla

Continuando a una tercera instancia, se malla el sistema con un tamaño de elemento de 3 mm, cabe resaltar que en este punto se usa el método “Hex Dominant” para el análisis de los cuerpos, ya que esta forma de elementos se ajusta en mejor calidad a la geometría de la estructura. La cantidad de elementos generados bajo estas condiciones es de 201,710 y 1’085,986 nodos (Figura 161).

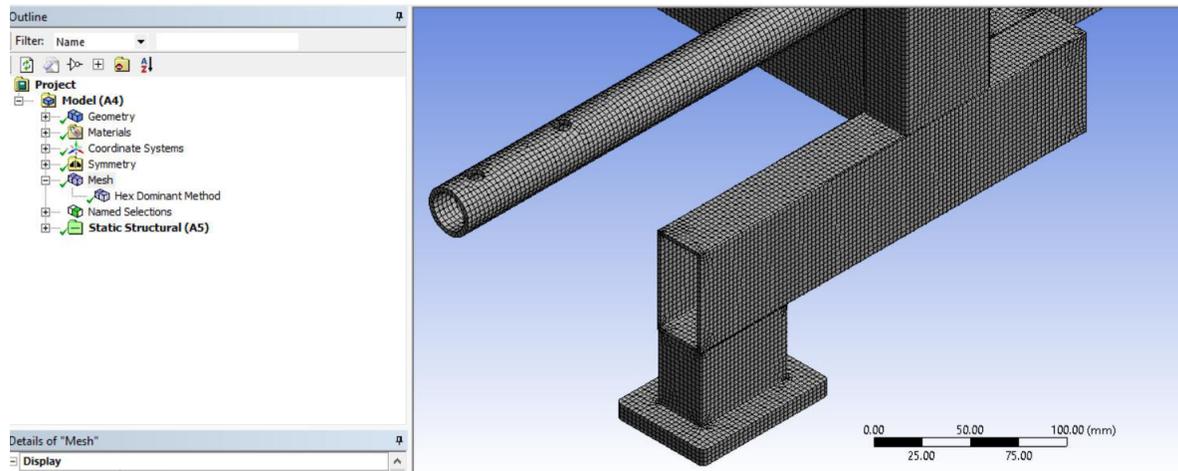


Figura 161. Simulación chasis para el modo silla - 2

Como cuarto paso, se definen las cargas sobre el sistema, estas se toman de la simulación para el modo silla (Figura 153 a la Figura 158). El efecto de los brazos robóticos puede verse representado por la aplicación de una fuerza vertical de 70 N sobre las bases que los sostienen, esta magnitud representa al peso aproximado del sistema indicado en la sección 5.3. Para las zonas de soporte, se incluye un soporte fijo sobre las caras del sistema, donde se ubican las ruedas guías, además se restringe la traslación vertical de los nodos, en la zona del chasis donde se encuentra anclado el motor y la rueda principal.

Para representar la masa de las baterías y equipos electrónicos aproximadamente de 60 Kg, se aplica una fuerza de 147 N en las caras laterales del soporte (considere el efecto de la simetría), como se muestra en las Figura 162 y Figura 163.

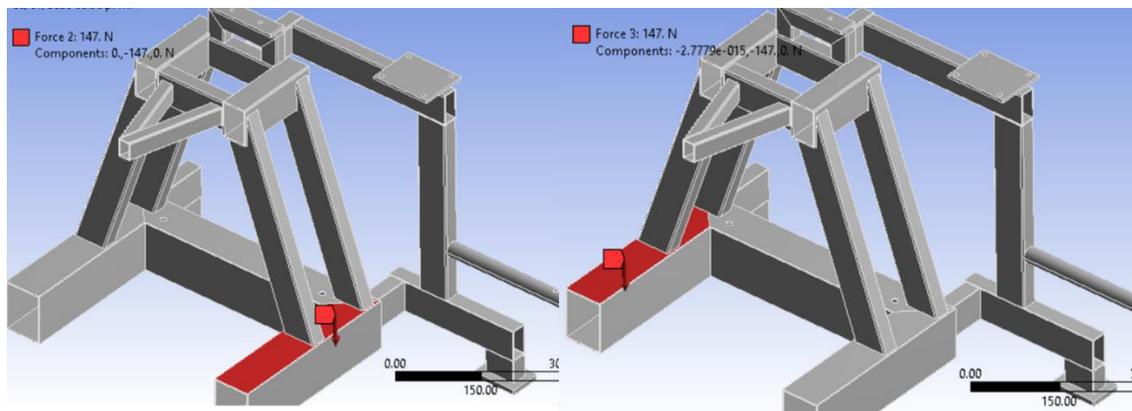


Figura 162. Cargas sobre el soporte en el modo silla debido a componentes eléctricos y electrónicos

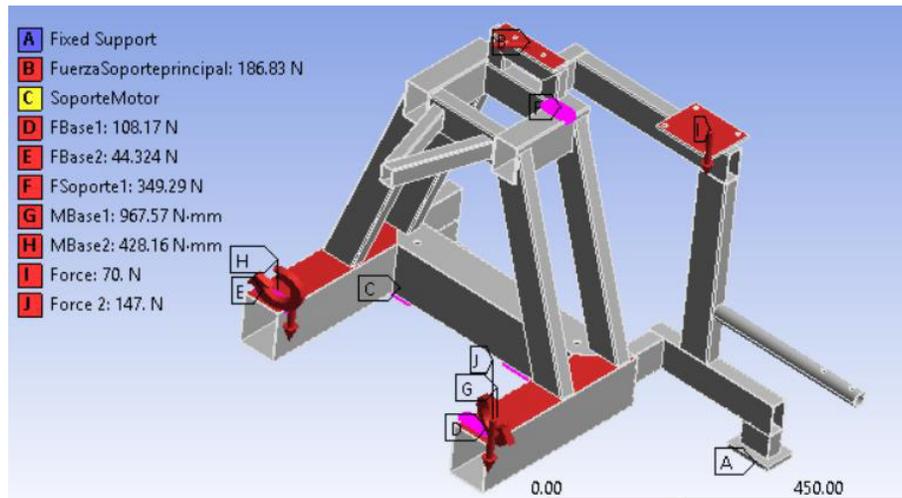


Figura 163. Cargas y soportes en el chasis para el modo silla

Por último, se resuelve el sistema obteniendo los siguientes resultados.

Respecto al esfuerzo máximo, el valor máximo es de 42.953 MPa, se ubica en una de las uniones (Figura 164).

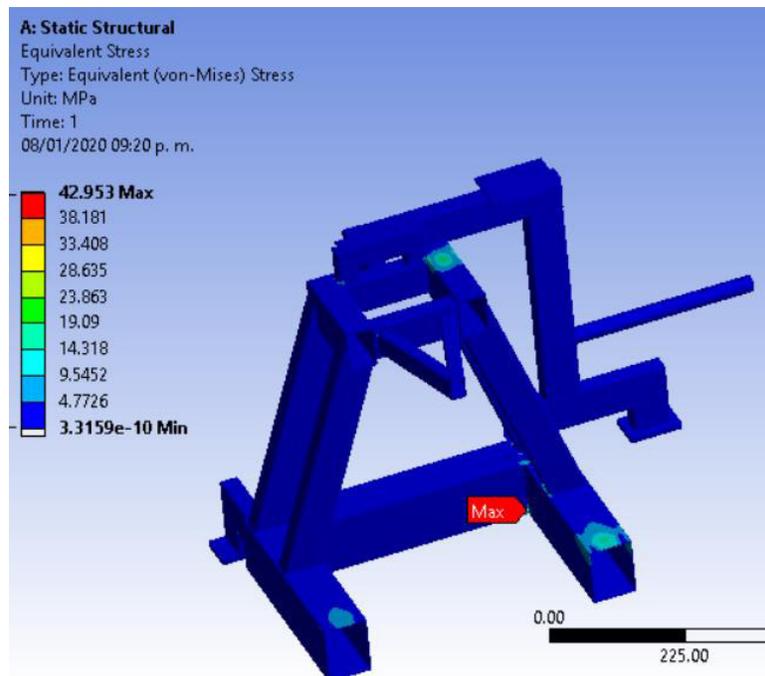


Figura 164. Resultados chasis en el modo silla: esfuerzo equivalente

La deformación en el chasis con estas cargas es mínima, solo alcanza el valor de 0.0439 mm (Figura 165). Por ende, visto desde esta perspectiva el sistema está lejos de fallar por sus cambios en las longitudes.

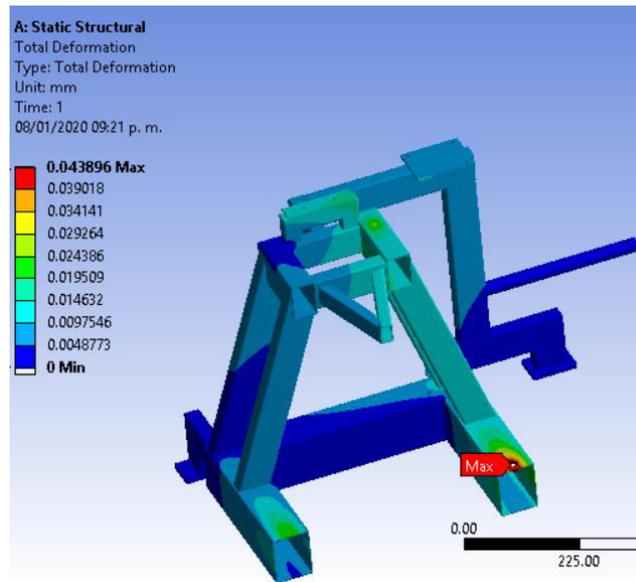


Figura 165. Resultados chasis en el modo silla: deformación

Para finalizar el análisis de resultados, se observa el factor de seguridad a partir del esfuerzo equivalente, la magnitud mínima obtenida es de 5.8203 (Figura 166), por ende, se concluye que el chasis soporta sin ningún problema, las cargas a las cuales, se encuentra sometido.

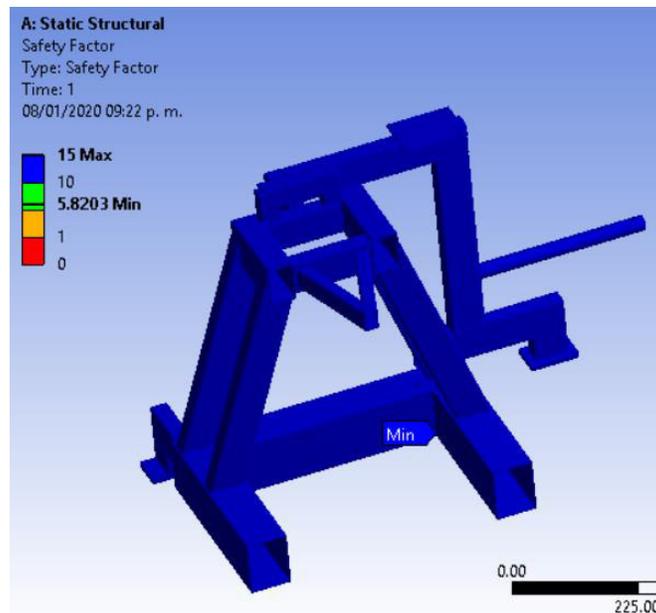


Figura 166. Resultados chasis en el modo cama: Factores de seguridad

6.5 Quinta Simulación: Sistema Apoya pies.

En esta sección se analiza el sistema donde el usuario apoya sus pies, descrito en la sección 5.5, usado cuando el robot se encuentra en su forma de silla de ruedas eléctrica.

Como se muestra en la figura 81, este sistema se encuentra ubicado en uno de los tramos laterales del chasis.

Para simplificar el proceso de análisis se tomara como sistema objetivo, al conjunto de tramo lateral, sistema apoya pies, como se muestra en la figura 167. Para mejorar el mallado del sistema, los cuerpos se agrupan como una sola parte.

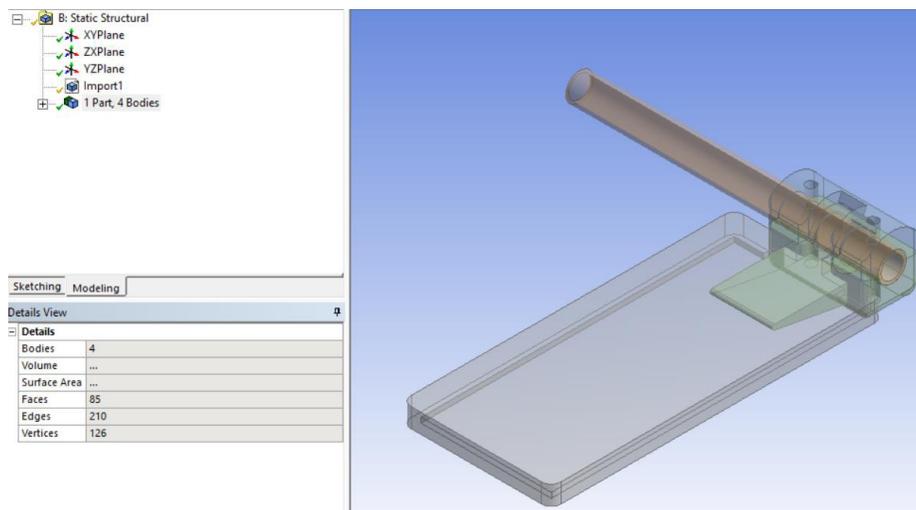


Figura 167. Paso 1: Evaluación conjunto apoya pies

Respecto a la asignación de materiales, respetando lo descrito en la sección 5.5, los elementos que conforman al soporte apoya pies, son de aleación de aluminio, mientras que el tramo cilíndrico es de acero estructural.

Para el mallado del sistema, la magnitud del tamaño de elemento es 1.5 mm, cabe resaltar que se usa un método, basado en elementos hexaédricos, estos logran ubicarse de una manera óptima a las geometrías.

La cantidad de elementos generados a partir de las condiciones anteriores es de 416,770, y cuenta con 1'701,277 nodos (Figura 168 y Figura 169).

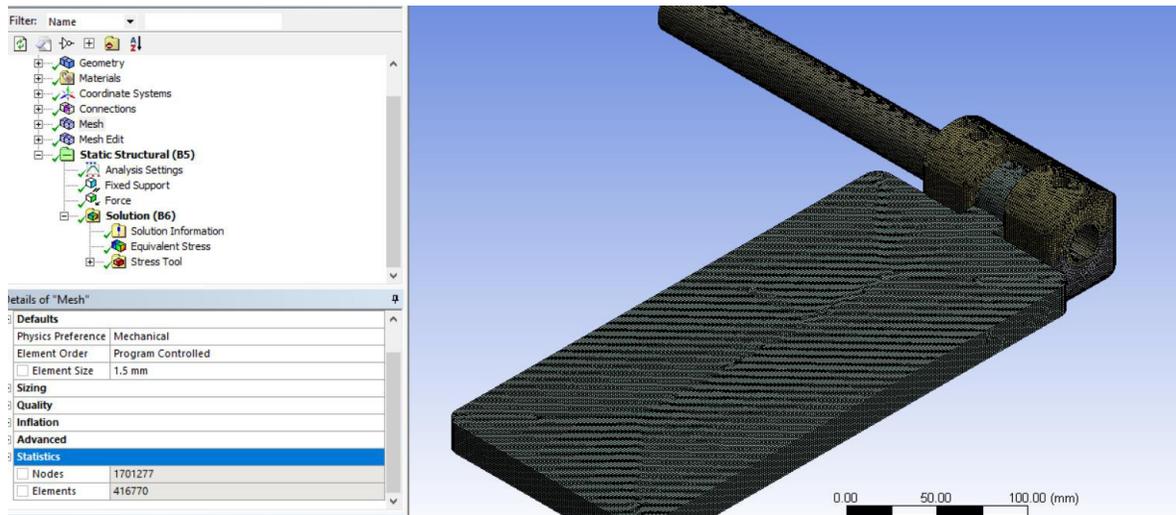


Figura 168. Paso 2: Evaluación conjunto apoya pies

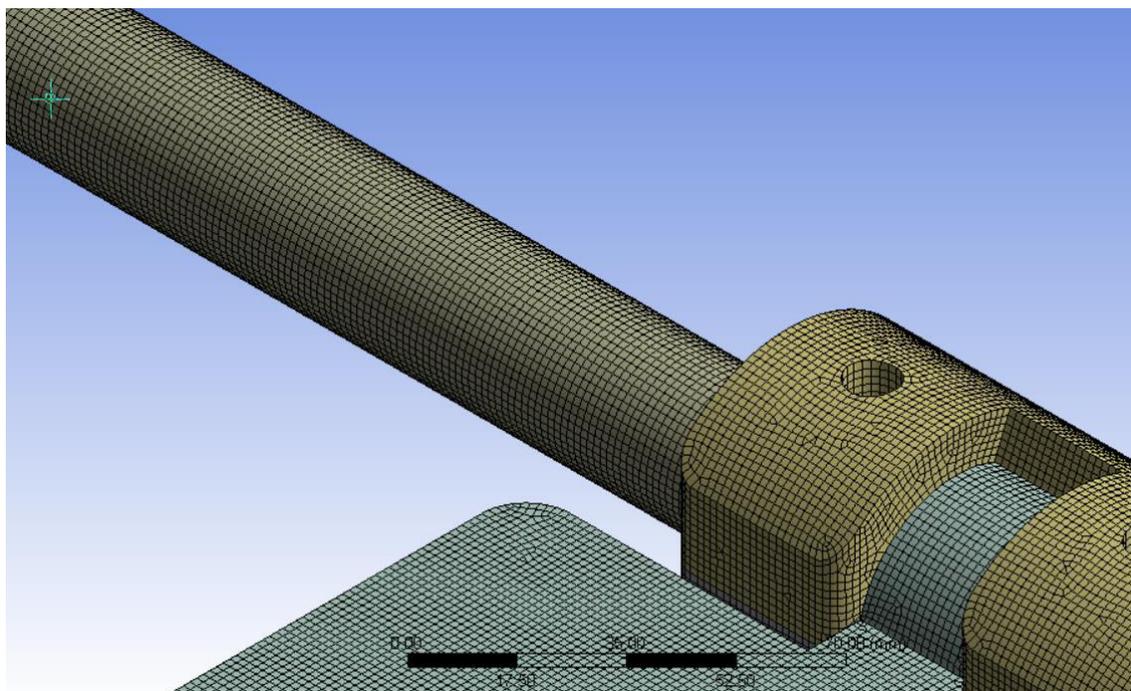


Figura 169. Paso 2: Evaluación conjunto apoya pies - detalle

Para simular las condiciones de trabajo, se ubica un soporte fijo en una de las caras del elemento cilíndrico, que corresponde al chasis, respecto a la carga soportada por el sistema apoya pies, se considera que se aplica una fuerza cercana al mayor peso para un adulto mayor [26], es decir de 838 N, equivalente a 85 kg. Esta se ubica sobre la cara del elemento que puede rotar sobre el cilindro, lo anterior se puede ver en la figura 170.

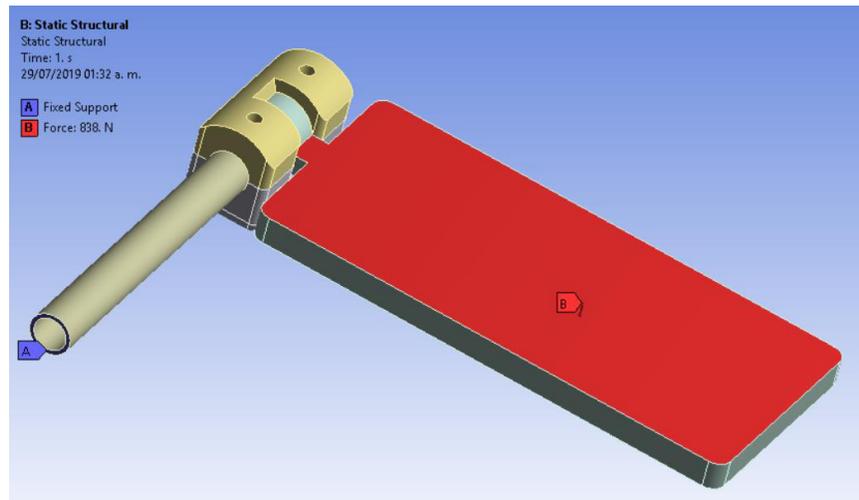


Figura 170. Paso 3: Evaluación conjunto apoya pies

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- **Esfuerzo máximo equivalente:**

El valor del esfuerzo máximo es de 254 MPa, este se ubica sobre uno de las puntas del soporte inferior, como se muestra en la figura 171.

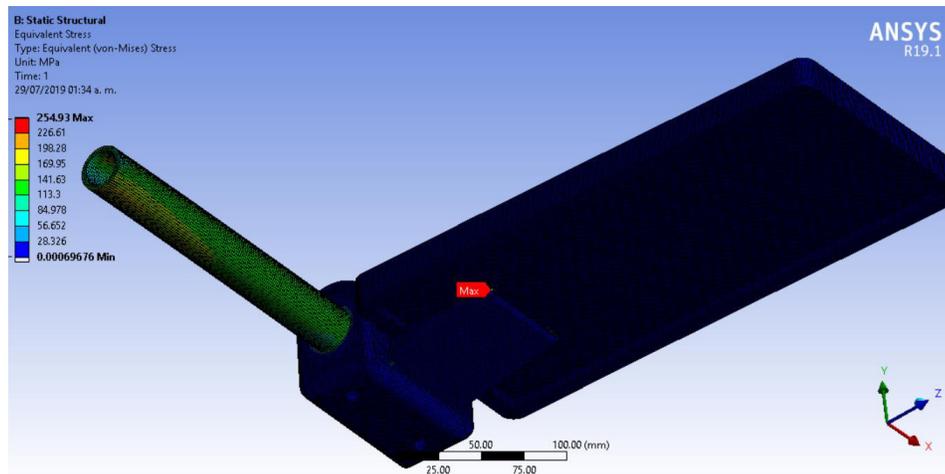


Figura 171. Resultados soporte apoya pies: Esfuerzo equivalente

- **Deformación del sistema:**

Respecto a la deformación del sistema, el valor máximo corresponde a 7.3 mm (Figura 172), hay que considerar que en este punto, esta magnitud se presenta en un caso extremo donde el usuario, decide apoyar la totalidad de su peso sobre el soporte.

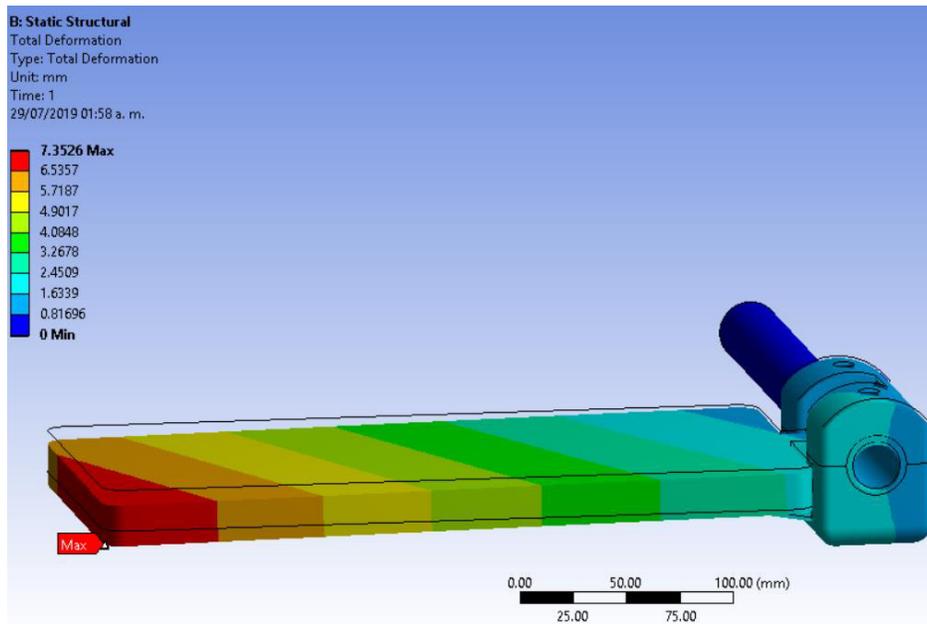


Figura 172. Resultados soporte apoya pies: Deformación del sistema

Realizando un análisis detallado sobre la deformación unitaria del elemento, se observa que la referencia para llegar a la zona plástica es de aproximadamente 0.04 mm/mm [51]. El valor máximo alcanzado por el sistema es de 0.0042 mm/mm (Figura 173), por ende, el sistema se encuentra en su zona elástica.

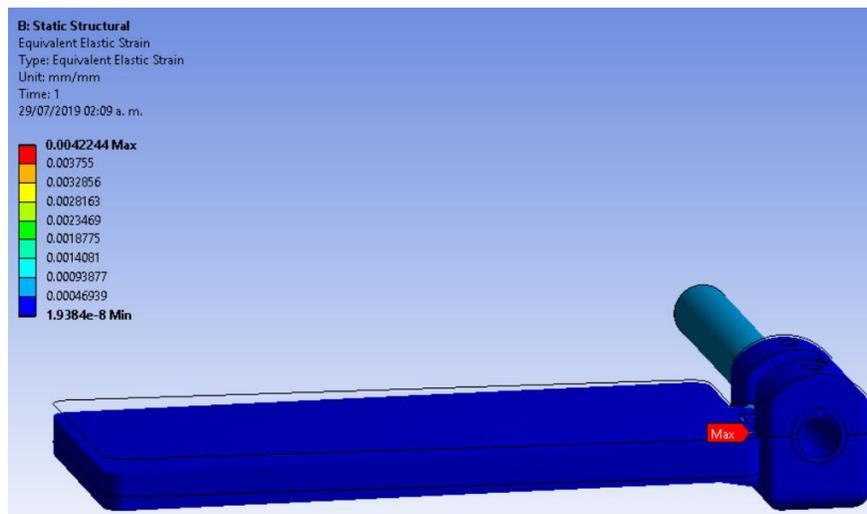


Figura 173. Resultados soporte apoya pies: Deformación unitaria equivalente

- **Factor de seguridad (enfocado al esfuerzo equivalente):**

El factor de seguridad para cada una de las partes del sistema es:

- **Elemento cilíndrico.**

El valor del factor de seguridad mínimo es de 1.15 (Figura 174), aunque es cercano a la unidad, cabe resaltar que una falla en este elemento, no representa un mayor problema para el usuario, ya que se encontrará sentado cuando use el soporte apoya pies.

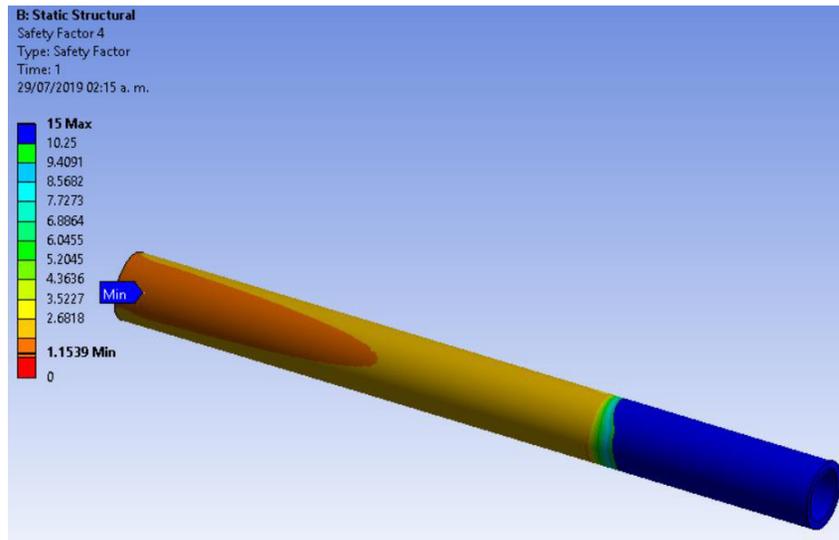


Figura 174. Factores de seguridad: Elemento cilíndrico

- **Placa móvil:**

El valor mínimo para el factor de seguridad es 1.89 (Figura 175), es una magnitud no tan cercana a la unidad, pero aun así, la falla de este elemento, no representa peligro alguno para el usuario.

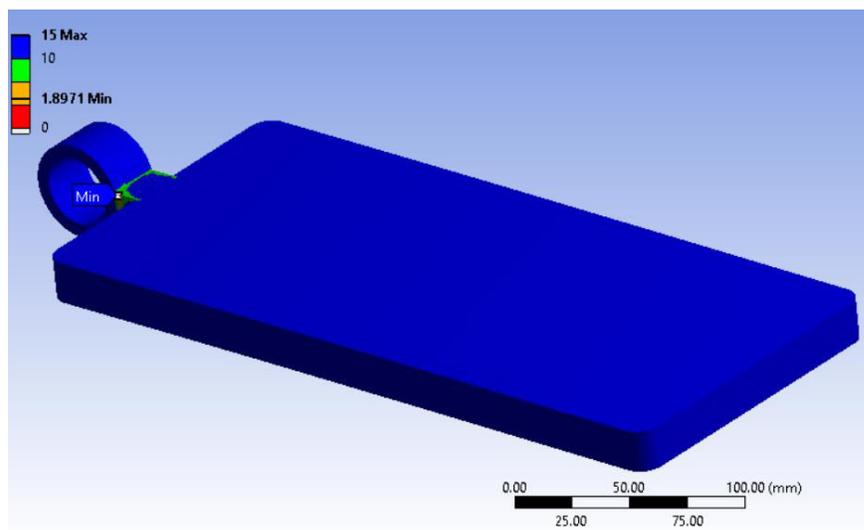


Figura 175. Factores de seguridad: Placa móvil

- **Soporte superior:**

Para este elemento el factor de seguridad mínimo es 1.65 (Figura 176), aunque es cercano a la unidad, las zonas donde se concentra el esfuerzo son bordes que no afectan el funcionamiento del soporte.

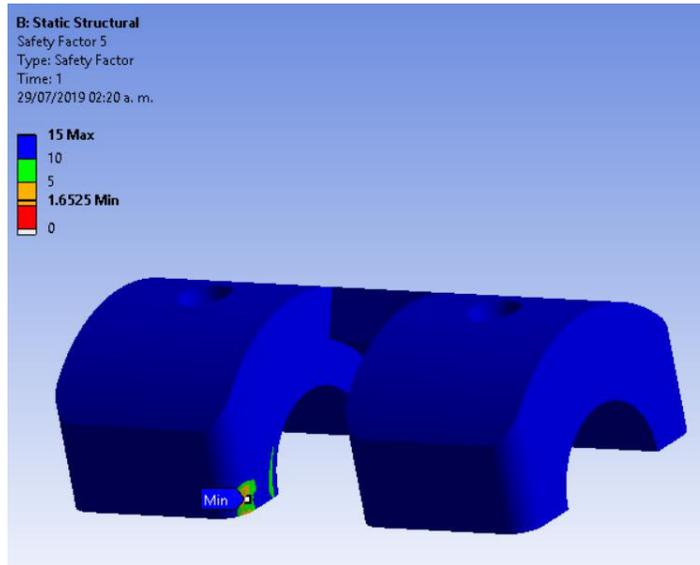


Figura 176. Factores de seguridad: Soporte superior

- **Soporte Inferior:**

El valor mínimo para este elemento es 1.098 (Figura 177), aunque este valor es casi la unidad, los puntos donde se concentran los esfuerzos, no afectan el funcionamiento de esta parte del sistema, aún si el evento extremo supuesto ocurriera, las fallas presentadas en esta pieza no representan un peligro para el usuario.

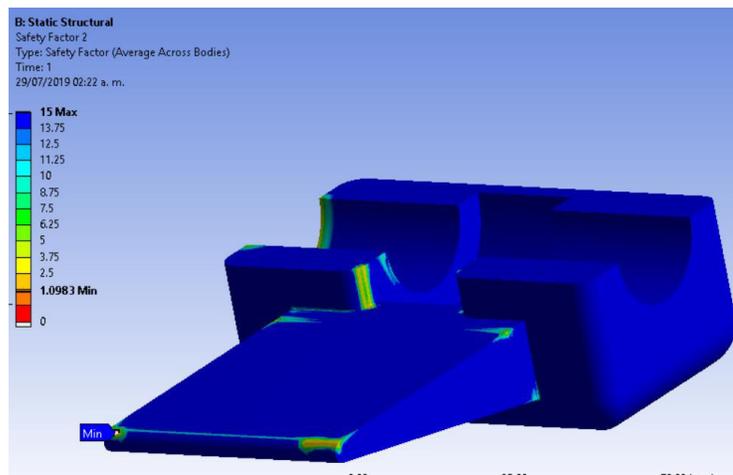


Figura 177. Factores de seguridad: Soporte inferior

De los factores de seguridad para el apoyo pies se puede concluir que, las piezas en el sistema, aunque sus valores mínimos se encuentran en un rango cercano a la unidad, todas se encuentran por encima de la misma, además es de considerar que las zonas donde suceden estas concentraciones de esfuerzos no afectan el correcto funcionamiento de los elementos del conjunto.

7. CONCLUSIONES

Del desarrollo del presente proyecto, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- En el diseño de robots, generar un dispositivo para la rehabilitación no es excluyente respecto a las características complementarias, que pueden ser creadas para pertenecer al grupo de la asistencia social, un claro ejemplo se demuestra en este trabajo, **ya que de forma eficiente se ha desarrollado una máquina capaz de combinar dos formas de trabajo relativas a la rehabilitación y una referente a un asistente social de servicio.**

En el enfoque de rehabilitación se cuenta con: **una silla robótica de ruedas**, brindándole al usuario movilidad, la segunda forma, obedece a una **cama robótica**. Desde el **punto de vista de asistente social**, ayuda al usuario en el transporte de **elementos de un lugar a otro**, además de contar con una **forma humanoide** que le permite al adulto mayor **generar empatía con el dispositivo**.

- El robot de servicio y rehabilitación, obtenido como resultado del presente proyecto, **tiene un precio competitivo**, respecto al mercado actual, ya que el valor de los componentes y procesos necesarios para su fabricación, suman alrededor de **728,280 pesos mexicanos** (ver Tabla 5. Costos para la fabricación), cifra representativamente baja respecto a los **4'391,059 de pesos**, límite establecido en la **Tabla 2. Requerimientos y especificaciones**, para el desarrollo del robot.
- Un aporte importante del presente proyecto es, el desarrollo de un **método de optimización**, en la **selección de actuadores lineales usados como mecanismos para la rotación de elementos**.

A partir de los parámetros: **longitud mínima y máxima del dispositivo lineal**, el **ángulo de rotación de la pieza móvil** respecto a la parte fija, se desarrollan una **serie de gráficas** para las diferentes ubicaciones de los extremos del actuador lineal, que satisfacen este movimiento de rotación. De esta manera, el diseñador puede seleccionar la posición de su actuador lineal en función del espacio de trabajo disponible.

Como parte final del **algoritmo de optimización** se presenta una **gráfica**, en la cual, el seleccionador puede evaluar la **naturaleza entre el avance del actuador y el ángulo de rotación de la pieza móvil**, de esta manera puede escoger la relación que presente una **forma lineal**, facilitando el proceso en el desarrollo del control para la orientación de la parte rotada.

8. TRABAJO A FUTURO

Como propuestas para mejorar y complementar el presente proyecto son:

- Mejorar el sistema de brazos robóticos, creando un sistema de más grados de libertad, permitiéndole al usuario una mayor área de trabajo, respecto a la sujeción de elementos. Además, de crear una serie de efectores finales, tal como un sistema para la alimentación del usuario presente en robots como HANDY [9] (ver figura 2), los cuales, permitan al robot el apoyo del adulto mayor en sus labores diarias.
- Rediseñar el sistema de cojinería con materiales, más flexibles a fin de crear, formas que se adapten de mejor forma con base a criterios ergonómicos a un adulto mayor.
- Diseñar el chasis con materiales más ligeros, a fin de disminuir el peso final del robot.
- Automatizar el movimiento del sistema apoya pies, a fin de quitar la responsabilidad al usuario, respecto a la posición del mismo en los cambios para el modo de trabajo, además de brindarle la posibilidad de modificar la altura a la cual se ubica la placa móvil.
- Implementar el sistema eléctrico y electrónico para el funcionamiento de los motores y los actuadores lineales, además de la inclusión de los diferentes sistemas de información y sensores para el desarrollo de las funciones del asistente robótico.

ANEXOS

ANEXO A: Análisis de posición actuadores lineales - Desarrollo Matemático

Partiendo de la figura 47, la presente sección muestra el desarrollo matemático realizado sobre los actuadores lineales.

La figura 178. Representa un esquema simplificado del mecanismo - actuador lineal, cabe recordar las siguientes características:

- El punto A se encuentra una unión que solo permite rotación, por lo tanto este se encuentra fijo en el espacio (su posición no se modifica). Por esta razón, se toma como el origen del sistema coordenado.
- Entre los puntos C y B se encuentra el actuador lineal, por ende la magnitud L_2 , expresa la longitud del actuador lineal en la posición actual.
- El punto C, se encuentra unido a la pieza móvil, o la cual va a rotar alrededor del punto A. En él, se encuentra una unión del tipo revoluta permitiendo que la orientación del actuador lineal no se encuentre anclada al mismo. De manera similar sucede en el punto B, la única diferencia es, que este punto se encuentra en la parte fija.
- La distancia del punto A y el punto C, es decir, desde el punto de rotación hasta uno de los extremos del actuador, se representa por L_3 , cabe resaltar que esta distancia se debe a dos puntos entre la pieza móvil.
- La ubicación del punto B, se representa por la coordenada horizontal a_1 y vertical b_1 , tomadas desde el origen A. Cabe resaltar que, este punto se mide de esta forma, ya que la orientación de B, por estar ubicado en la parte fija.

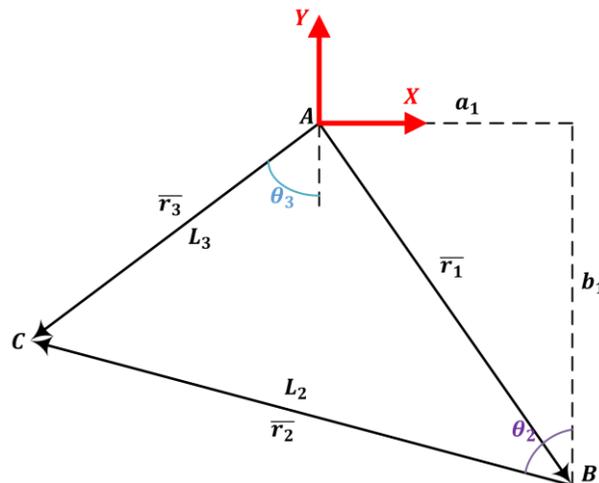


Figura 178. Anexo A: Esquema simplificado

El análisis realizado se basa en un polígono vectorial, donde θ_2 representa la orientación del actuador lineal respecto a un eje vertical y θ_3 , la orientación de la pieza móvil medida respecto a un eje vertical, ver figuras Figura 47 y Figura 178.

A partir del polígono vectorial en la figura 178. Los vectores se definen como:

$$\vec{r}_1 = \begin{pmatrix} a_1 \\ -b_1 \end{pmatrix} \quad \vec{r}_2 = \begin{pmatrix} -L_2 \operatorname{sen}\theta_2 \\ L_2 \operatorname{cos}\theta_2 \end{pmatrix} \quad \vec{r}_3 = \begin{pmatrix} -L_3 \operatorname{sen}\theta_3 \\ -L_3 \operatorname{cos}\theta_3 \end{pmatrix}$$

A partir del polígono vectorial, se tiene la siguiente relación:

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_2 = \vec{r}_3$$

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ -b_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -L_2 \operatorname{sen}\theta_2 \\ L_2 \operatorname{cos}\theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L_3 \operatorname{sen}\theta_3 \\ -L_3 \operatorname{cos}\theta_3 \end{pmatrix}$$

Se presentan las ecuaciones (1) y (2).

$$a_1 - L_2 \operatorname{sen}\theta_2 = -L_3 \operatorname{sen}\theta_3 \quad \dots (1)$$

$$-b_1 + L_2 \operatorname{cos}\theta_2 = -L_3 \operatorname{cos}\theta_3 \quad \dots (2)$$

Tomando la ecuación (1), se tiene lo siguiente:

$$a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_3 = L_2 \operatorname{sen}\theta_2 \quad \rightarrow \quad (a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_3)^2 = L_2^2 \operatorname{sen}^2\theta_2 \quad \dots (1')$$

Tomando la ecuación (2), se tiene lo siguiente:

$$b_1 - L_3 \operatorname{cos}\theta_3 = L_2 \operatorname{cos}\theta_2 \quad \rightarrow \quad (b_1 - L_3 \operatorname{cos}\theta_3)^2 = (L_2 \operatorname{cos}\theta_2)^2$$

$$\rightarrow (b_1 - L_3 \operatorname{cos}\theta_3)^2 = L_2^2 \operatorname{cos}^2\theta_2 \quad \dots (2')$$

Sumando las dos ecuaciones (1') y (2'), se tiene que:

$$(a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_3)^2 + (b_1 - L_3 \operatorname{cos}\theta_3)^2 = L_2^2 \operatorname{sen}^2\theta_2 + L_2^2 \operatorname{cos}^2\theta_2$$

$$\downarrow$$

$$(a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_3)^2 + (b_1 - L_3 \operatorname{cos}\theta_3)^2 = L_2^2 (\operatorname{sen}^2\theta_2 + \operatorname{cos}^2\theta_2)$$

$$\downarrow$$

$$(a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_3)^2 + (b_1 - L_3 \operatorname{cos}\theta_3)^2 = L_2^2 \quad \dots (3)$$

Para el análisis de posición se toman como referencia dos posiciones claves del mecanismo:

La primera posición, sucede cuando el actuador está totalmente retraído, en este caso la distancia entre el nodo B y C se escribe como L_{21} , para el ángulo de la parte móvil en esta posición se representa por θ_{31} , reemplazando estos valores en la ecuación (3):

$$(a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_{31})^2 + (b_1 - L_3 \operatorname{cos}\theta_{31})^2 = L_{21}^2 \quad \dots (4)$$

En la segunda posición, el actuador está totalmente extendido, en este evento la distancia entre B y C se indica como L_{22} y el ángulo de la parte móvil respecto al eje vertical se representa por θ_{32} , reemplazando estos valores en la ecuación (3):

$$(a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_{32})^2 + (b_1 - L_3 \operatorname{cos}\theta_{32})^2 = L_{22}^2 \quad \dots (5)$$

Despejando la variable b_1 de la ecuación (4),

$$b_1 = \pm \sqrt{L_{21}^2 - (a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_{31})^2} + L_3 \cos\theta_{31} \dots (4')$$

Reemplazando la ecuación (4') en (5).

$$L_{22}^2 = (a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_{32})^2 + \left(\pm \sqrt{L_{21}^2 - (a_1 + L_3 \operatorname{sen}\theta_{31})^2} + L_3 \cos\theta_{31} - L_3 \cos\theta_{32} \right)^2$$

↓

$$C_1 = L_3 \operatorname{sen}\theta_{32} \dots (10) \quad C_2 = L_3 \cos\theta_{31} - L_3 \cos\theta_{32} \dots (11) \quad C_3 = L_3 \operatorname{sen}\theta_{31} \dots (12)$$

↓

$$L_{22}^2 = (a_1 + C_1)^2 + \left(\pm \sqrt{L_{21}^2 - (a_1 + C_3)^2} + C_2 \right)^2$$

↓

$$L_{22}^2 = a_1^2 + 2a_1C_1 + C_1^2 + (L_{21}^2 - (a_1 + C_3)^2) \pm 2C_2\sqrt{L_{21}^2 - (a_1 + C_3)^2} + C_2^2$$

↓

$$L_{22}^2 = \cancel{a_1^2} + 2a_1C_1 + C_1^2 + L_{21}^2 - \cancel{a_1^2} - 2a_1C_3 - C_3^2 \pm 2C_2\sqrt{L_{21}^2 - (a_1 + C_3)^2} + C_2^2$$

↓

$$\pm 2C_2\sqrt{L_{21}^2 - (a_1 + C_3)^2} = 2(C_1 - C_3)a_1 + (C_1^2 + L_{21}^2 - C_3^2 + C_2^2 - L_{22}^2)$$

↓

$$C_4 = 2(C_1 - C_3) \dots (13)$$

$$C_5 = L_{21}^2 - L_{22}^2 + C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 \dots (14)$$

↓

$$\left(\pm 2C_2\sqrt{L_{21}^2 - (a_1 + C_3)^2} \right)^2 = (C_4a_1 + C_5)^2$$

↓

$$4C_2^2L_{21}^2 - 4C_2^2a_1^2 - 8C_2^2C_3a_1 - 4C_2^2C_3^2 = C_4^2a_1^2 + 2C_4C_5 + C_5^2$$

↓

$$(C_4^2 + 4C_2^2)a_1^2 + (2C_4C_5 + 8C_2^2C_3)a_1 + (C_5^2 + 4C_2^2C_3^2 - 4C_2^2L_{21}^2) = 0 \dots (5')$$

Como se puede observar en la ecuación (5'), vista como una función a_1 , obedece a una forma cuadrática cuyas soluciones, se pueden expresar de la forma:

$$a_1 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad \dots (6)$$

Donde,

$$A = C_4^2 + 4C_2^2 \quad \dots (7) \quad B = 2C_4C_5 + 8C_2^2C_3 \quad \dots (8) \quad C = C_5^2 + 4C_2^2C_3^2 - 4C_2^2L_{21}^2 \quad \dots (9)$$

De esta forma se puede obtener de la ecuación (6), el valor de la posición horizontal del nodo B representada en la variable a_1 .

A partir de los valores $L_3, L_{21}, L_{22}, \theta_{31}$ y θ_{32} , usando la ecuación (6), se pueden obtener las posibles soluciones de a_1 , con estas a su vez siendo reemplazadas en la ecuación (4), se obtienen las posibles magnitudes para la variable b_1 (posición vertical del nodo B).

➤ Orientación del actuador lineal y la pieza móvil:

Respecto a los valores θ_2 y θ_3 , es necesario definir en primer lugar un ángulo conocido como β , Figuras 155 a 158.

$$\beta = \arctan \left| \frac{a_1}{b_1} \right| \quad \dots (15)$$

Y la longitud

$$L_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$$

En función de los valores para a_1 y b_1 , se pueden tener cuatro configuraciones diferentes, para la ubicación del actuador lineal, a continuación se explican a detalle, cada una.

Caso número uno: para $a_1 > 0$ y $b_1 > 0$

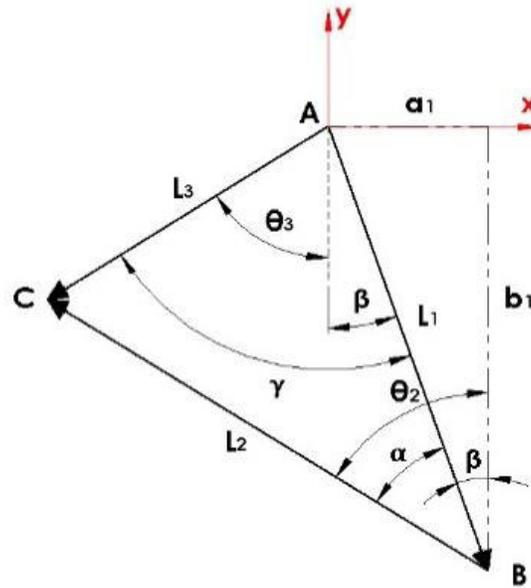


Figura 179. Anexo A: Caso 1

Por leyes de los cosenos:

$$L_2^2 = L_3^2 + L_1^2 - 2L_3L_1 \cos \gamma \rightarrow \gamma = \arccos \left(\frac{L_3^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_3L_1} \right)$$

$$L_3^2 = L_2^2 + L_1^2 - 2L_2L_1 \cos \alpha \rightarrow \alpha = \arccos \left(\frac{L_2^2 + L_1^2 - L_3^2}{2L_2L_1} \right)$$

A partir de las relaciones en la figura 179, se tiene que:

$$\theta_3 = \gamma - \beta = \arccos \left(\frac{L_3^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_3L_1} \right) - \beta \quad \dots (16)$$

$$\theta_2 = \alpha + \beta = \arccos \left(\frac{L_2^2 + L_1^2 - L_3^2}{2L_2L_1} \right) + \beta \quad \dots (17)$$

Caso número dos: para $a_1 < 0$ y $b_1 > 0$

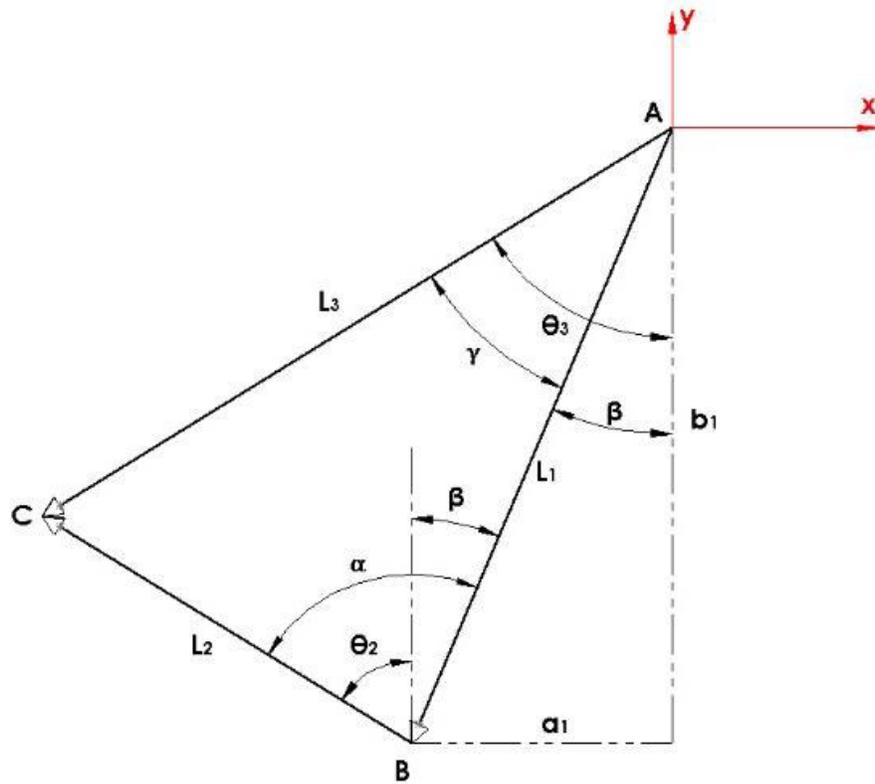


Figura 180. Anexo A: Caso 2

$$\gamma = \arccos\left(\frac{L_3^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_3L_1}\right) \quad \alpha = \arccos\left(\frac{L_2^2 + L_1^2 - L_3^2}{2L_2L_1}\right)$$

A partir de las relaciones en la figura 180, se tiene que:

$$\theta_3 = \gamma + \beta = \arccos\left(\frac{L_3^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_3L_1}\right) + \beta \quad \dots (18)$$

$$\theta_2 = \alpha - \beta = \arccos\left(\frac{L_2^2 + L_1^2 - L_3^2}{2L_2L_1}\right) - \beta \quad \dots (19)$$

Caso número tres: Para $a_1 > 0$ y $b_1 < 0$.

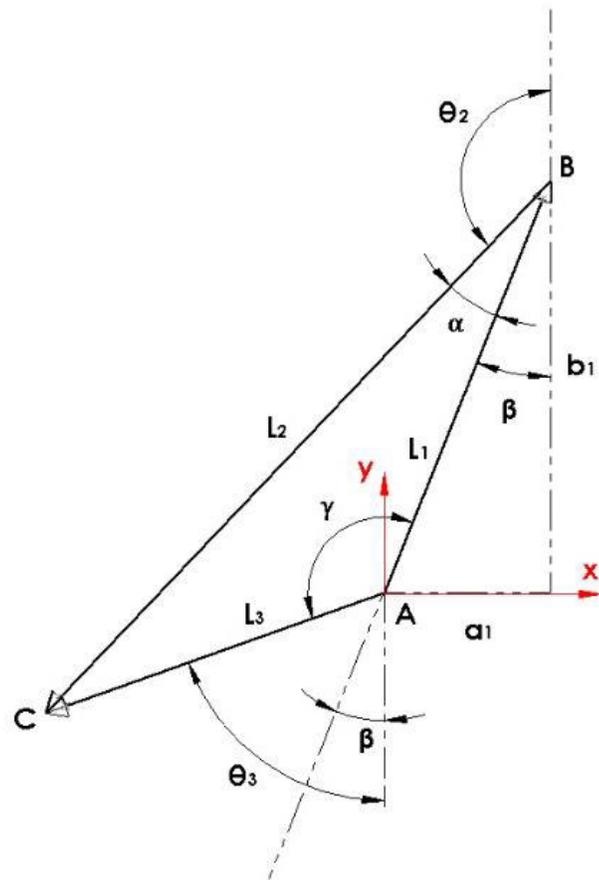


Figura 181. Anexo A: Caso 3

$$\gamma = \arccos\left(\frac{L_3^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_3L_1}\right) \quad \alpha = \arccos\left(\frac{L_2^2 + L_1^2 - L_3^2}{2L_2L_1}\right)$$

A partir de las relaciones en la figura 181, se tiene que:

$$\theta_3 = \pi - \gamma + \beta = \pi - \arccos\left(\frac{L_3^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_3L_1}\right) + \beta \dots (20)$$

$$\theta_2 = \pi - \alpha - \beta = \pi - \arccos\left(\frac{L_2^2 + L_1^2 - L_3^2}{2L_2L_1}\right) - \beta \dots (21)$$

Caso número Cuatro: para $a_1 < 0$ y $b_1 < 0$

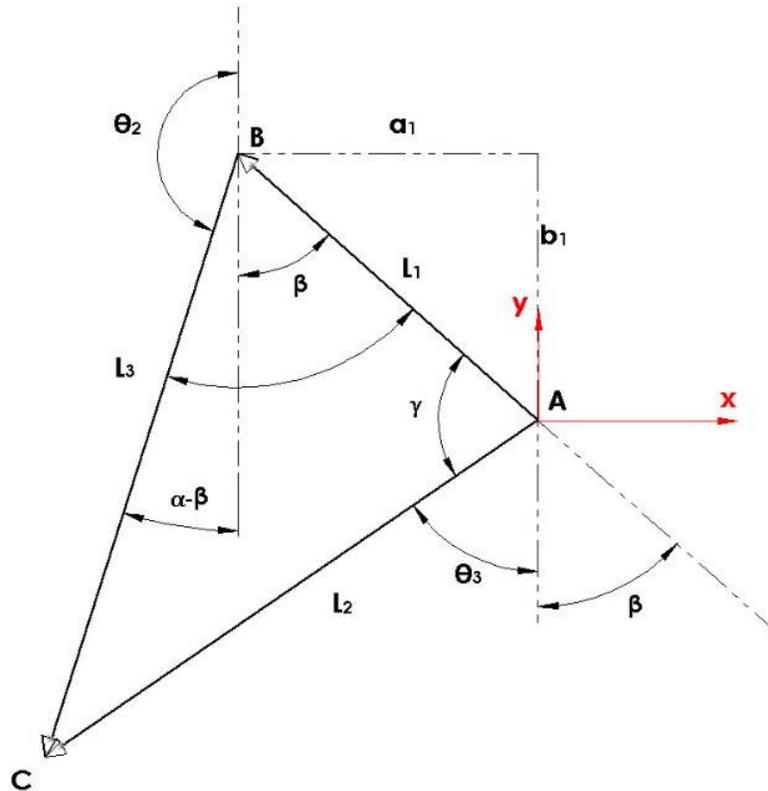


Figura 182. Anexo A: Caso 4

$$\gamma = \arccos\left(\frac{L_3^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_3L_1}\right) \quad \alpha = \arccos\left(\frac{L_2^2 + L_1^2 - L_3^2}{2L_2L_1}\right)$$

A partir de las relaciones en la figura 182, se tiene que:

$$\pi = \theta_3 + \gamma + \beta$$

↓

$$\theta_3 = \pi - \gamma - \beta = \pi - \arccos\left(\frac{L_3^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_3L_1}\right) - \beta \dots (22)$$

$$\pi = \theta_2 + \alpha - \beta$$

↓

$$\theta_2 = \pi - \alpha + \beta = \pi - \arccos\left(\frac{L_2^2 + L_1^2 - L_3^2}{2L_2L_1}\right) + \beta \dots (23)$$

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. DAVIES, "Ageing and health in the 21st century: an overview," in *Ageing and health: a global challenge for the twenty-first century*, Kobe, 1998.
- [2] CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe, "Base de datos de población," 2016. [Online]. Available: <http://www.eclac.cl/celade/proyecciones/basedatos BD.htm>. [Accessed 2016].
- [3] OMS: Organización Mundial de la Salud, "Investing in the health workforce enables stronger health systems," in *Fact Sheet*, Belgrado, 2007.
- [4] J. BROEKENS, M. HEERINK and H. ROSENDAL, "Assistive social robots in elderly care: a review," *Gerontechnology*, vol. 8, no. 2, pp. 99-103, 2009.
- [5] R. Today, "Robots: Mamoru," *Robotics Today*, 2011-2018. [Online]. Available: <http://www.roboticstoday.com/robots/mamoru>. [Accessed 01 06 2018].
- [6] H. KHLID, B. LUHUR and A. PRIMA, "A Size-Bed Wheelchair Design Manufacture with Scaled Prototype and Kinematic - Virtual Reality Model Simulation," *Advanced Materials Research*, Vols. 488-489, pp. 1207-1212, 2012.
- [7] K. KAWAMURA, R. PACK, M. BISHAY and M. ISKAROUS, "Design philosophy for service robots.," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 18, pp. 109-116, 1996.
- [8] Wikipedia, "Social Robot," Wikipedia, 2016. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Social_robot. [Accessed 2016].
- [9] M. TOPPING, B. A. CERT, J. SMITH and B. A. HONS, "HANDY 1: A ROBOTIC SYSTEM TO ASSIST THE SEVERELY DISABLED," 2002.
- [10] B. TAYLOR, M. E. CUPO y S. J. SHEREDOS, «Workstation robotics: a pilot study of a Desktop Vocational Assistant Robot,» *American Journal of Occupational Therapy*, vol. 47, nº 11, pp. 1009-1013, 1993.
- [11] T. JONES, «RAID-Toward Greater Independence in the Office & Home environment,» de *Procedimientos de la sexta conferencia sobre Robótica de rehabilitación*, 1999.
- [12] P. A. Hakenewerth, G. D. Rohrer and N. G. Stalberg, "SELF-SERVICE TRANSACTION APPARATUS AND METHOD USING A ROBOT FOR ARTICLE TRANSPORT AND REPAIR OF INTERNAL ARTICLE HANDLING DEVICES". Estados Unidos Patent 5183999, 2 Febrero 1993.

- [13] S. D. Prior and P. R. Warner, "Wheelchair-mounted robots for the home environment," *Intelligent Robots and Systems' 93*, vol. 2, pp. 1194-1200, 1993.
- [14] J. J. LEE, K. H. Seo and C. M. OH, "INTELLIGENT BED ROBOT EQUIPPED WITH PRESSURE SENSOR-PROVIDED MATTRESS AND GRIPPER-PROVIDED SUPPORTING ROBOT ARM". Estados Unidos Patent US 2008/0078030 A1, 3 Abril 2008.
- [15] H. Neveryd and G. Bolmsjo, "WALKY, an Ultrasonic Navigation Mobile," in *The European Context for Assistive Technology: Proceedings of the 2nd TIDE Congress (Vol. 1, p. 366)*, 1995.
- [16] BOSOF, "DOMESTIC ROBOT ASSISTANT HAVING A ROLLING CHASSIS". Bureau International Patent PCT/FR2008/050833, 11 Diciembre 2008.
- [17] J. T. Wen, J. Braasch, U. Sinha, A. Cunningham, W. H. Keddy-Hector, D. C. Kruse, D. Whalen and L. Lu, "MOBILE HUMAN-FRIENDLY ASSISTIVE ROBOT". Estados Unidos Patent US 2017/0095382 A1, 6 Abril 2017.
- [18] S. & Y. T. Yamada, "Training AIBO like a Dog," in *the 13th International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 2004.
- [19] K. WADA and T. SHIBATA, "Living with seal robots—its sociopsychological and physiological influences on the elderly at a care house.," in *IEEE transactions on robotics vol 23*, 2007.
- [20] G. F. Yaeger and A. J. Nunez, "ROBOTIC PERSONAL ASSISTANT". Estados Unidos Patent US 9283990 B1, 15 Marzo 2016.
- [21] B. GRAF, M. HANS and R. D. SCHRAFT, "Care-O-bot II—Development of a next generation robotic home assistant.," *Autonomous robots*, vol. 16, no. 2, pp. 193-205, 2004.
- [22] U. e. a. REISER, "Care-O-bot® 3-creating a product vision for service robot applications by integrating design and technology," in *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE*, 2009.
- [23] F. IPA, "Care-O-Bot 4," 25 06 2019. [Online]. Available: <https://www.care-o-bot.de/en/care-o-bot-4.html>. [Accessed 25 06 2019].
- [24] J. Parsons, "Tech/Science Reporter," *Mirror*, 9 Febrero 2015. [Online]. Available: <https://www.mirror.co.uk/news/technology-science/technology/robot-butler-fetch-your-drinks-5131988>. [Accessed 25 JUNIO 2019].
- [25] K. KAWAMURA and M. ISKAROUS, "Trends in service robots for the disabled and the elderly.," in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94). IEEE*, 1994.

- [26] R. Á. CHAURAND, L. R. P. LEÓN and E. L. G. MUÑOZ, *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana.*, Guadalajara: Universidad de Guadalajara, CUAAD, 2007.
- [27] G. d. I. C. d. M. México, *Manual de Normas Técnicas de Accesibilidad*, Ciudad de México, 2016.
- [28] IGUS, "Iglidur X rodamiento de Casquillo," 2019. [Online]. Available: <https://www.igus.com.mx/product/9>. [Accessed 04 Julio 2019].
- [29] E.-Z. LOOK, "E-Z Hex™ (Hex Drive) Inserts for Soft Wood," 2019. [Online]. Available: <https://www.ezlok.com/e-z-hex-threaded-inserts-for-soft-wood>. [Accessed 04 Julio 2019].
- [30] SKF, "Rodamientos rígidos de bolas," 2019. [Online]. Available: <https://www.skf.com/mx/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=608&unit=metricUnit>. [Accessed 04 Julio 2019].
- [31] R. S. MENDOZA-SÁNCHEZ, R. H. ROQUE-SÁNCHEZ and B. MONCADA-GONZÁLEZ, "Nivel de ruido en una institución hospitalaria de asistencia y docencia," *Gac Méd Méx*, vol. 132, no. 2, 1996.
- [32] Nanjing Yongnuo Transmission Equipment Co., Ltd., "CE ROHS Certificate Electric Bed Chair Hospital Equipment electric linear actuator 12v," Alibaba.com, 2019. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/CE-ROHS-Certificate-Electric-Bed-Chair_60603351672.html?spm=a2700.7735675.30.69.f88Tfs&s=p. [Accessed 07 Julio 2019].
- [33] Thinkbot Solutions LLC, "OnRobot RG2 Collaborative Gripper," Thinkbot Solutions LLC, 2019. [Online]. Available: <https://www.thinkbotsolutions.com/shop/onrobot-rg2>. [Accessed 16 Julio 2019].
- [34] Prolamsa, "Productos de Línea," Enero 2019. [Online]. Available: <http://www.prolamsa.com/wp-content/uploads/2019/02/PRODUCT-CATALOG.pdf>. [Accessed 16 Julio 2019].
- [35] Dongguan Large Electronics Co., Ltd., "26650 48V 40Ah LiFePO4 Battery PLB Battery for Robot," Large, 2018. [Online]. Available: <https://www.large.net/product/8nu43d2.html>. [Accessed 06 Agosto 2019].
- [36] J. Gordon, J. J. Kauzlarich and J. G. Thacker, "Tests of two new polyurethane foam wheelchair tires," *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol. 26, no. 1, pp. 33-46, 1989.

- [37] Allied Motion, "Right-Angle PMDC Brush Gear Motors 3/8 HP, Single-Reduction Worm Drive," 15 Mayo 2017. [Online]. Available: https://www.alliedmotion.com/wp-content/uploads/documents/Allied_Motion_Datasheet-Gearmotor_RAD30-36_20170701.pdf. [Accessed 16 Julio 2019].
- [38] Faultless, "1400 Series casters," Faultless, 2019. [Online]. Available: <https://faultlesscaster.com/6-inch-wheel-casters/1448-6x2>. [Accessed 16 Julio 2019].
- [39] Y. H. Wu, C. Fassert and A. S. Rigaud, "Designing robots for the elderly: appearance issue and beyond," *Archives of gerontology and geriatrics*, vol. 54, no. 1, pp. 121-126, 2012.
- [40] Dongguan Power Long Battery Technology Co., Ltd., "48v lithium battery 40ah," Dongguan Power Long Battery Technology Co., Ltd., 2019. [Online]. Available: <https://plb.manufacturer.globalsources.com/si/6008844710999/pdtl/Electric-tricycle/1168857703/48v-lithium-battery-40ah.htm>. [Accessed 08 Agosto 2019].
- [41] Cyberpuerta, "Intel NUC Kit NUC7I5BNH, Intel Core i5-7260U 2.20GHz," Cyberpuerta, 06 Agosto 2019. [Online]. Available: https://www.cyberpuerta.mx/index.php?cl=details&anid=75b0a9ce69e2a6deded991bd5b6154ec&gclid=Cj0KCQjwp5_qBRDBARIsANxdcik5Y7a6Hgvu_Z3WfCglsMO-NmYC20F1cnWtXR6jVMSjo84oyvBOokoaAlQWEALw_wcB. [Accessed 06 Agosto 2019].
- [42] AMAZON, "MYNT Eye 3D Stereo Camera Depth Sensor," MYNT EYE, 2019. [Online]. Available: https://www.amazon.com/MYNT-Stereo-Camera-Depth-Sensor/dp/B07DD4QZXH/ref=pd_lpo_sbs_229_t_1?encoding=UTF8&pssc=1&refRID=BYZSWS78KXVJ086YDG3G. [Accessed 06 Agosto 2019].
- [43] HOME DEPOT, "Materiales construcción," HOME DEPOT, 08 Enero 2020. [Online]. Available: <https://www.homedepot.com.mx/materiales-de-construccion/terciada-triplay/triplay-construccion-15mm-122x244-285999>. [Accessed 08 Enero 2020].
- [44] VentDepot, "Galvax 3, Lamina Galvanizada 3 Pies, MXGVX-001-066," VentDepot, 2019. [Online]. Available: <https://ventdepot.mx/products/galvax-3-lamina-galvanizada-3-pies-mxgvx-001-066?variant=22692415635541>. [Accessed 06 Agosto 2019].
- [45] AMAZON, "LQ Industrial tuercas a rosca para muebles de madera," LQ Industrial, 06 Agosto 2019. [Online]. Available: https://www.amazon.com/LQ-Industrial-Furniture-Connector-Assortment/dp/B073NXM46M/ref=pd_lpo_sbs_201_t_1?encoding=UTF8&pssc=1&refRID=0808JCXSVMJVN76WJP8N. [Accessed 06 Agosto 2019].
- [46] AMAZON, "LUCID Topper de colchón de Espuma viscoelástica ventilada de Alta Densidad con infusión de Gel de 5 cm 3 años de garantía en EE. UU, matrimonial

XL," LUCID, 08 Enero 2020. [Online]. Available: https://www.amazon.com.mx/Lucid@-LU20FX45GT-Infusión-Colchón-Memoria-Full/dp/B00PBIVXIY/ref=asc_df_B00PBIVXIY/?tag=gledskshopmx-20&linkCode=df0&hvadid=325299251647&hvpos=1o19&hvnetw=g&hvrnd=8755652090717152107&hvppone=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmld=&hvl. [Accessed 08 Enero 2020].

- [47] GRAINGER MEXICO, "Tornillos Cabeza Hueca," GRAINGER MEXICO, 2019. [Online]. Available: https://www.grainger.com.mx/categoria/Tornillos-Cabeza-Hueca/c/3546?isWildCard=false&q=%3AtopSeller%3A162005%3A1%252F4%2522&text=&remove_token=#. [Accessed 06 Agosto 2019].
- [48] VentDepot, "PTRtub, Perfil de Acero al Carbón PTR, MXTRT-001-057," VentDepot, 2019. [Online]. Available: <https://ventdepot.mx/products/ptrtub-perfil-de-acero-al-carbon-ptr-mxtrt-001-057?variant=22694687113301>. [Accessed 06 Agosto 2019].
- [49] Tornillos y Tuercas Tepeyac, "MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE TUERCAS Y TORNILLOS," Tornillos y Tuercas Tepeyac, 28 Diciembre 2016. [Online]. Available: http://tornillosytuercas.mx/blog/2_tipos-de-acero-que-se-utilizan-para-la-fabricacion-de-tornillos-y-herrajes.html. [Accessed 27 Julio 2019].
- [50] G. Zavala Zavala, *Tema: de Tornillos*, Master Thesis, UANL: Monterrey, 1985.
- [51] J. R. Benavides Ortiz, *Caracterización mecánica en aluminio, acero y latón*, Master Thesis, UANL: Monterrey, 2000, p. 66.