



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Rediseño y fabricación del
sistema estructural de un robot
de servicio para el sector
hospitalario**

TESINA

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Emmanuel Monroy Maganda

DIRECTOR DE TESINA

M.A. Luis Yair Bautista Blanco



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Tabla de contenido

1	Planteamiento del problema.....	11
1.1	Proyecto Ayúdame	11
1.2	Ayúdame 1.0	11
1.2.1	Sistema electromecánico.....	12
1.2.2	Sistema electrónico	13
1.2.3	Soporte y charola de servicio	13
1.2.4	Principales deficiencias identificadas en Ayúdame 1.0 relacionadas con el diseño electromecánico	14
1.3	Ayúdame 2.0	16
1.4	Desarrollo posterior del proyecto.....	18
1.4.1	Requerimientos preliminares para el robot Ayúdame 2.0.....	19
1.4.2	Etapas de empatía	19
1.4.3	Requerimientos de diseño	20
1.4.4	Etapas de Ideación.....	20
1.4.5	Descripción del modelo conceptual de Ayúdame 2.0	23
2	Objetivos.....	29
2.1	Objetivo general	29
2.2	Objetivos específicos	29
3	Identificación de las consideraciones de un robot de servicio para el área médica	31
3.1	Consideraciones en relación con los usuarios	31
3.2	Consideraciones en la usabilidad del dispositivo	31
3.3	Consideraciones en la manufactura del robot.....	32
3.4	Consideraciones en el ciclo de vida del dispositivo	34
3.5	Consideraciones en la etapa de pruebas del dispositivo	34
3.6	Consideraciones con base en los lineamientos de seguridad para robots de uso personal	35

3.6.1	Energía.....	36
3.6.2	Movilidad.....	36
3.6.3	Configuración formal del robot.....	37
3.6.4	Diseño de interfaces.....	37
3.6.5	Ergonomía de los usuarios.....	37
3.6.6	Error humano.....	37
4	Identificación de los parámetros de entrada del proyecto.....	39
4.1	Requerimientos establecidos para el robot Ayúdame 2.0.....	39
5	Análisis de las fortalezas y debilidades para el desarrollo del proyecto.....	42
5.1	Factores internos.....	42
5.1.1	Fortalezas del proyecto.....	43
5.1.2	Debilidades del proyecto.....	44
6	Definición y análisis del diseño modelo conceptual de la solución.....	45
6.1	Definición de los subsistemas del robot.....	45
6.1.1	Módulo 1 – Sistema motriz.....	47
6.1.2	Módulo 2 – Estructura vertical.....	47
6.1.3	Módulo 3 – Carcasa.....	48
6.1.4	Módulo 4 – Almacenamiento.....	48
6.2	Principales deficiencias identificadas en el diseño conceptual preliminar.....	49
6.2.1	Deficiencias identificadas en el módulo 1 – Sistema motriz.....	50
6.2.2	Deficiencias identificadas en el módulo 2 – Estructura vertical.....	51
6.2.3	Deficiencias identificadas en el módulo 3 – Carcasa.....	53
6.2.4	Deficiencias identificadas en el módulo 4 – Almacenamiento.....	54
7	Soluciones ejecutadas para el rediseño del modelo conceptual del robot.....	55
7.1	Diseño e integración del sistema motriz del robot.....	55
7.1.1	Especificaciones técnicas de las principales partes que constituyen al sistema motriz.....	59
7.1.2	Consideraciones en el diseño del escalado del sistema motriz.....	66

7.1.3	Procesos de manufactura.....	67
7.2	Diseño y fabricación de la base sobre la cual se montará la estructura vertical del robot.....	69
7.2.1	Propuestas de diseño de la base	69
7.2.2	Procesos de manufactura para desarrollar la lámina	75
7.2.3	Procesos de manufactura para fabricar las columnas de perfil estructural de aluminio.....	78
7.2.4	Desarrollo de pruebas en la solución implementada	80
7.2.5	Adaptaciones en la base del robot.....	86
7.3	Diseño, manufactura e integración de la estructura vertical del robot	94
7.3.1	Métodos de ensamble de la estructura vertical.....	98
7.3.2	Procesos de manufactura para desarrollar la estructura vertical	105
7.4	Diseño, fabricación e integración de la carcasa del robot	108
8	Identificación de vulnerabilidades, escenarios de riesgo y propuestas para pruebas futuras	120
8.1	Vulnerabilidades del modelo conceptual	120
8.2	Escenarios de riesgo.....	122
8.3	Propuestas para pruebas futuras	122
9	Conclusiones.....	127
10	Referencias	133

Tabla de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. SISTEMA ELECTROMECÁNICO DEL ROBOT <i>AYÚDAME 1.0</i> . [1].....	12
ILUSTRACIÓN 2. MODELO FINAL EN SESIÓN DE PRUEBAS. [1].....	13
ILUSTRACIÓN 3. MODELO FINAL DEL ROBOT <i>AYÚDAME 1.0</i> . [1].....	13
ILUSTRACIÓN 4. MODELO DIGITAL DE LA VERSIÓN FINAL DE <i>AYÚDAME 1.0</i> . [1]	14
ILUSTRACIÓN 5. PROPUESTA 1 DEL REDISEÑO DE <i>AYÚDAME 1.0</i>	16
ILUSTRACIÓN 6. PROPUESTA 2 DEL REDISEÑO DE <i>AYÚDAME 1.0</i>	17
ILUSTRACIÓN 7. PROPUESTA 3 DEL REDISEÑO DE <i>AYÚDAME 1.0</i>	18
ILUSTRACIÓN 8. <i>MOODBOARD</i> GENERADA PARA COMENZAR CON LA ETAPA DE IDEACIÓN.....	21
ILUSTRACIÓN 9. PRIMEROS BOSQUEJOS GENERADOS EN LA ETAPA DE IDEACIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO.	21
ILUSTRACIÓN 10. EVOLUCIÓN DE LOS BOSQUEJOS PARA LA GENERACIÓN DEL MODELO DE <i>AYÚDAME 2.0</i>	21
ILUSTRACIÓN 11. MODELO CONCEPTUAL 1 PARA EL ROBOT <i>AYÚDAME 2.0</i>	22
ILUSTRACIÓN 12. MODELO CONCEPTUAL 2 PARA EL ROBOT <i>AYÚDAME 2.0</i>	22
ILUSTRACIÓN 13. MODELO CONCEPTUAL 3 PARA EL ROBOT <i>AYÚDAME 2.0</i>	23
ILUSTRACIÓN 14. VISTAS DEL MODELO CONCEPTUAL DE <i>AYÚDAME 2.0</i>	24
ILUSTRACIÓN 15. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA INTERNA DEL ROBOT.....	25
ILUSTRACIÓN 16. BOCETO DEL MOLDE A FABRICAR PARA GENERAR LA LÁMINA POSTERIOR DE LA CARCASA DEL ROBOT	26
ILUSTRACIÓN 17. CARCASA LATERAL DEL ROBOT.....	27
ILUSTRACIÓN 18. PROCESO DE MANUFACTURA PROPUESTO PARA LOS PANELES LATERALES.	27
ILUSTRACIÓN 19. ESPECIFICACIONES DEL ROBOT RELACIONADAS CON LA CARCASA.....	28
ILUSTRACIÓN 20. MÓDULO 1 - SISTEMA MOTRIZ.....	47
ILUSTRACIÓN 21. MÓDULO 2 - ESTRUCTURA VERTICAL.	47
ILUSTRACIÓN 22. MÓDULO 3 – CARCASA.	48
ILUSTRACIÓN 23. MÓDULO 4 - ALMACENAMIENTO.	49
ILUSTRACIÓN 24. MÓDULO 1 - SISTEMA MOTRIZ, VISTA EXPLOSIONADA.	50
ILUSTRACIÓN 25. MÓDULO 2 - ESTRUCTURA VERTICAL, VISTA EXPLOSIONADA.....	52
ILUSTRACIÓN 26. MÓDULO 3 - CARCASA, VISTA EXPLOSIONADA.....	54
ILUSTRACIÓN 27. MÓDULO 4 - ALMACENAMIENTO, VISTA EXPLOSIONADA.	54
ILUSTRACIÓN 28. PROPUESTA 1 DEL SISTEMA MOTRIZ.	55
ILUSTRACIÓN 29. PROPUESTA 2 DEL SISTEMA MOTRIZ.	57
ILUSTRACIÓN 30. CHASIS DEL SISTEMA MOTRIZ DONADO.....	57
ILUSTRACIÓN 31. ELECTRÓNICA Y RUEDAS DEL SISTEMA MOTRIZ.	57
ILUSTRACIÓN 32. SISTEMA MOTRIZ PRESENTADO EN EL CATÁLOGO DEL FABRICANTE [19].	58
ILUSTRACIÓN 33. PERFIL C (CATÁLOGO) [19].	59

ILUSTRACIÓN 34. CONECTOR DE ESQUINAS (CATÁLOGO) [18].	59
ILUSTRACIÓN 35. RUEDAS MECANUM (CATÁLOGO) [19].	59
ILUSTRACIÓN 36. CAJA DE ENGRANES (CATÁLOGO) [19].	60
ILUSTRACIÓN 37. MOTOR PM25R (CATÁLOGO) [19].	60
ILUSTRACIÓN 38. APRECIACIÓN DE LOS GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT OMNIDIRECCIONAL [21].	61
ILUSTRACIÓN 39. MOVIMIENTOS EN CUALQUIER DIRECCIÓN: AZUL – DIRECCIÓN DE TRACCIÓN DE LA RUEDA. ROJO – DIRECCIÓN DE MOVIMIENTO DEL VEHÍCULO. A) AVANZANDO EN LÍNEA RECTA, B) MOVIÉNDOSE LATERALMENTE, C) MOVIÉNDOSE DIAGONALMENTE, D) MOVIÉNDOSE ALREDEDOR DE UNA CURVA, E) ROTACIÓN, F) ROTACIÓN ALREDEDOR DEL PUNTO CENTRAL DE UN EJE. [22].	62
ILUSTRACIÓN 40. INSTALACIÓN CORRECTA DE LAS RUEDAS MECANUM. [23]	63
ILUSTRACIÓN 41. VISTA ISOMÉTRICA DEL SISTEMA MOTRIZ ESCALADO.	64
ILUSTRACIÓN 42. VISTA AÉREA DEL SISTEMA MOTRIZ ESCALADO.	64
ILUSTRACIÓN 43. VISTA FRONTAL DEL SISTEMA MOTRIZ ESCALADO.	65
ILUSTRACIÓN 44. VISTA LATERAL DEL SISTEMA MOTRIZ ESCALADO.	65
ILUSTRACIÓN 45. VISTA EXPLOSIONADA DEL SISTEMA MOTRIZ ESCALADO.	66
ILUSTRACIÓN 46. MÁQUINA SIERRA VERTICAL DE CINTA UNIVERSAL.	68
ILUSTRACIÓN 47. PROPUESTA 1 DEL DISEÑO DE LA BASE DEL ROBOT.	70
ILUSTRACIÓN 48. DIFERENTES VISTAS DE LA PROPUESTA 1 DEL DISEÑO DE LA BASE DEL ROBOT.	71
ILUSTRACIÓN 49. VISTA ISOMÉTRICA DE LA DISPOSICIÓN DE LA LÁMINA MONTADA SOBRE EL SISTEMA MOTRIZ.	74
ILUSTRACIÓN 50. VISTA FRONTAL DE LA DISPOSICIÓN DE LA LÁMINA MONTADA SOBRE EL SISTEMA MOTRIZ.	74
ILUSTRACIÓN 51. DESARROLLO DE LA LÁMINA EN 2D.	75
ILUSTRACIÓN 52. GUILLOTINA DE LÁMINA MODELO 137-L DE LA MARCA PEXTO.	76
ILUSTRACIÓN 53. UBICACIÓN DE LOS PLIEGUES EN LA LÁMINA.	77
ILUSTRACIÓN 54. DOBLADORA DE LÁMINA GERBER GVZ-4.	77
ILUSTRACIÓN 55. TALADRO FRESADOR DE LA MARCA MC. LANE MODELO ZX40A.	79
ILUSTRACIÓN 56. PROCESO DE CAREADO EN LOS PERFILES ESTRUCTURALES DE ALUMINIO – CORTE NORMAL A LA SUPERFICIE.	80
ILUSTRACIÓN 57. VISTA ISOMÉTRICA DEL SUBENSAMBLE SOBRE EL QUE SE DESARROLLÓ EL ANÁLISIS DE TENSIÓN.	81
ILUSTRACIÓN 58. VISTA FRONTAL DEL SUBENSAMBLE SOBRE EL QUE SE DESARROLLÓ EL ANÁLISIS DE TENSIÓN.	81
ILUSTRACIÓN 59. VISTA LATERAL DEL SUBENSAMBLE SOBRE EL QUE SE DESARROLLÓ EL ANÁLISIS DE TENSIÓN.	82
ILUSTRACIÓN 60. VISTA POSTERIOR DEL SUBENSAMBLE SOBRE EL QUE SE DESARROLLÓ EL ANÁLISIS DE TENSIÓN.	82
ILUSTRACIÓN 61. CONDICIONES ESTABLECIDAS EN EL ANÁLISIS DE TENSIÓN DEL SUBENSAMBLE.	83
ILUSTRACIÓN 62. PROPUESTA PARA MEJORAR LA ESTRUCTURA DE LA BASE DEL ROBOT.	86
ILUSTRACIÓN 63. FUNCIONAMIENTO DE UNA IMPRESORA 3D FFF [33].	88
ILUSTRACIÓN 64. SOLUCIÓN DISEÑADA PARA MEJORAR LA ESTRUCTURA DE LA BASE DEL ROBOT.	88
ILUSTRACIÓN 65. VISTA FRONTAL-SUPERIOR DE LA SOLUCIÓN DISEÑADA.	89

ILUSTRACIÓN 66. VISTA SUPERIOR DE LA SOLUCIÓN DISEÑADA.	89
ILUSTRACIÓN 67. SOLUCIÓN DISEÑADA CON LA LÁMINA ENSAMBLADA.	90
ILUSTRACIÓN 68. CONDICIONES ESTABLECIDAS EN EL ANÁLISIS DE TENSIÓN DEL SUBENSAMBLE CON LAS ADAPTACIONES IMPLEMENTADAS.	92
ILUSTRACIÓN 69. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN – ANÁLISIS DE TENSIÓN DE VON MISES.....	93
ILUSTRACIÓN 70. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN - ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE SEGURIDAD.	93
ILUSTRACIÓN 71. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN - ANÁLISIS DEL DESPLAZAMIENTO SOBRE EL EJE Y.	94
ILUSTRACIÓN 72. MODELO DE LA ESTRUCTURA VERTICAL, VISTA EXPLOSIONADA.	97
ILUSTRACIÓN 73. ESTRUCTURA VERTICAL ENSAMBLADA. A) VISTA LATERAL B) VISTA FRONTAL C) VISTA ISOMÉTRICA.....	98
ILUSTRACIÓN 74. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON LA PLATAFORMA DEL SISTEMA MOTRIZ - VISTA ISOMÉTRICA.....	99
ILUSTRACIÓN 75. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON LA PLATAFORMA DEL SISTEMA MOTRIZ - VISTA AÉREA.....	99
ILUSTRACIÓN 76. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON LA PLATAFORMA DEL SISTEMA MOTRIZ - VISTA FRONTAL.	100
ILUSTRACIÓN 77. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON LA PLATAFORMA DEL SISTEMA MOTRIZ - VISTA LATERAL.....	100
ILUSTRACIÓN 78. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON EL TRAVESAÑO - VISTA ISOMÉTRICA.....	102
ILUSTRACIÓN 79. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON EL TRAVESAÑO - VISTA LATERAL.	102
ILUSTRACIÓN 80. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON EL TRAVESAÑO - VISTA FRONTAL.	103
ILUSTRACIÓN 81. ENSAMBLE DE LAS BASES SUPERIORES CON LOS POSTES - VISTA ISOMÉTRICA.	103
ILUSTRACIÓN 82. ENSAMBLE DE LAS BASES SUPERIORES CON LOS POSTES - VISTA ISOMÉTRICA FRONTAL.....	104
ILUSTRACIÓN 83. ENSAMBLE DE LAS BASES SUPERIORES CON LOS POSTES - VISTA FRONTAL.....	104
ILUSTRACIÓN 84. PROCESO DE CAREADO EN LOS PERFILES ESTRUCTURALES DE ALUMINIO - CORTE TANGENCIAL A LA SUPERFICIE.....	105
ILUSTRACIÓN 85. TALADRO DE BANCO UTILIZADO EN LA MANUFACTURA (MARCA <i>AB ARBOGA MASKINER</i>).....	107
ILUSTRACIÓN 86. EJEMPLIFICACIÓN DEL PROCESO DE TALADRADO EN LOS POSTES DE LA ESTRUCTURA VERTICAL.	108
ILUSTRACIÓN 87. REDISEÑO DEL PANEL POSTERIOR DE LA CARCASA.	110
ILUSTRACIÓN 88. DIFERENTES VISTAS DEL REDISEÑO DEL PANEL POSTERIOR DE LA CARCASA.....	110
ILUSTRACIÓN 89. ESTRUCTURA DE LOS SOPORTES LATERALES DE LA CARCASA (IMPRESOS EN 3D FFF).....	111
ILUSTRACIÓN 90. MÉTODOS DE ENSAMBLE DE LA CARCASA POSTERIOR.	114
ILUSTRACIÓN 91. PANELES LATERALES ADAPTADOS A LA ESTRUCTURA DEL ROBOT.	115
ILUSTRACIÓN 92. DIFERENTES VISTAS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS PANELES Y PLACAS LATERALES.	116
ILUSTRACIÓN 93. VISTA EXPLOSIONADA DEL ENSAMBLE DEL PANEL SUPERIOR.	118
ILUSTRACIÓN 94. ENSAMBLE DEL PANEL SUPERIOR A LA CARCASA DEL ROBOT.	118
ILUSTRACIÓN 95. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL PANEL SUPERIOR EN LA CARCASA DEL ROBOT.	119

1 Planteamiento del problema

1.1 Proyecto Ayúdame

El proyecto *Ayúdame* surge en el Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS) en el año 2020. Debido al surgimiento de la pandemia de COVID-19 y a las catastróficas cifras de fallecidos, hospitalizados y contagiados que trajo consigo, se evidenció la necesidad de fortalecer los servicios sanitarios. En el caso de México, la Secretaría de Salud del Gobierno de México determinó que para dar atención a la pandemia se requería incrementar la cantidad de personal de salud. Como consecuencia, se presenta una inexorable oportunidad para el surgimiento de robots auxiliares en los hospitales, con la finalidad de asignarles roles que eviten que el personal sanitario se exponga a ambientes contagiosos y que se agilicen los procesos operacionales dentro de los hospitales, como el transporte rutinario de insumos para los pacientes.

Ayúdame es un proyecto de desarrollo tecnológico gestado en el interior de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En términos generales, el objetivo del proyecto es el desarrollo de un robot de servicio para el sector hospitalario, enfocado específicamente en el transporte de alimentos, medicinas y enseres.

Los académicos involucrados en el desarrollo del proyecto son:

- Dr. Víctor Lomas Barrie (IIMAS, UNAM)
- Dr. Mario Peña Cabrera (IIMAS, UNAM)
- Dr. Mauricio Reyes Castillo (CIDI, UNAM)
- Dra. Tamara Alcántara Concepción (DGTIC, UNAM)

1.2 Ayúdame 1.0

Ayúdame 1.0 es una plataforma móvil robótica desarrollada en el Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS) y el Centro de Diseño Industrial de la UNAM. Su objetivo es que sirva de asistente en procesos de enfermería en zonas confinadas en hospitales con pacientes COVID-19 de una forma teleoperada asistida a 50 [m]. [1]

Los sistemas por los que está conformado *Ayúdame 1.0* son los siguientes:

- Sistema electromecánico.
- Sistema electrónico.

- Sistema de control.
- Control remoto.
- Soporte y charola de servicio.

A continuación, se especifican únicamente los sistemas: electromecánico, electrónico y el soporte y charola de servicio; ya que, son los que se alinean con el alcance y enfoque del actual trabajo escrito, y los que tuvieron injerencia para desarrollar versiones posteriores del robot.

1.2.1 Sistema electromecánico

La locomoción de *Ayúdame 1.0* es realizada por una plataforma de orugas comercial (T'Rex Tank) con tracción diferencial basado en seis ruedas de soporte y una de tracción por cada lado y con capacidad de carga total de hasta 8 [kg].

Las orugas son impulsadas por 2 motores de corriente directa de 12 [V] independientes con un consumo de corriente nominal sin carga de 1.3 [A], con carga de 4 [A] y *stall* de 11 [A]. Ambos motores son controlados por un puente H dual VNH5019 de STMicroelectronics y la potencia eléctrica la suministra una batería de polímero de iones de litio (LiPo) 3S de 5,200 [mAh] 35C. [1]

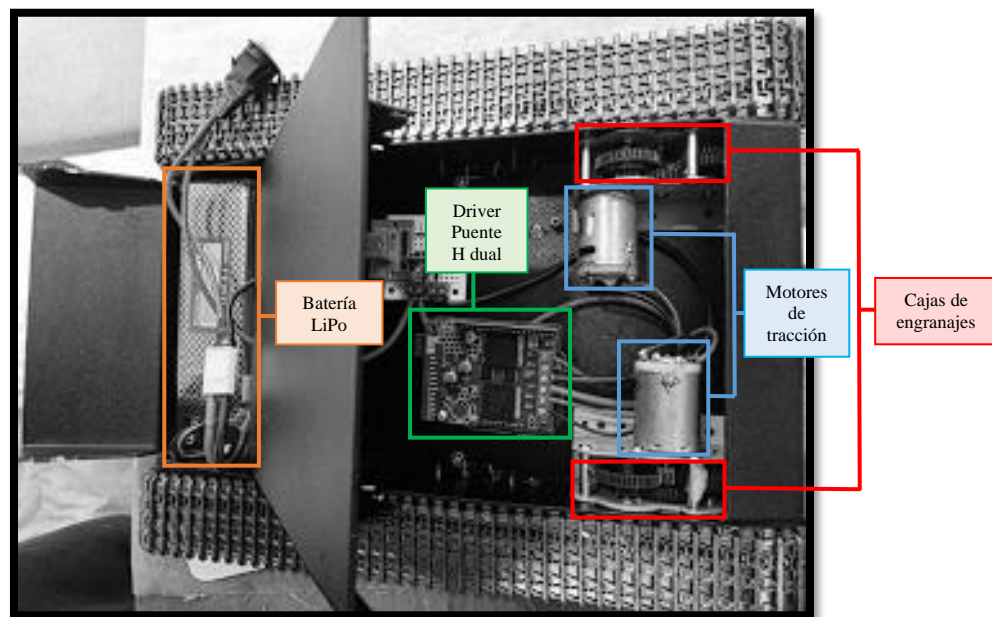


ILUSTRACIÓN 1. SISTEMA ELECTROMECAÁNICO DEL ROBOT AYÚDAME 1.0. [1]

1.2.2 Sistema electrónico

El componente principal del sistema electrónico es la computadora de formato reducido la Raspberry Pi 4 (RPI) de 4GB en memoria RAM. Es ahí donde se llevan a cabo los procesos de comunicación, el control de los motores de tracción de la oruga, la lectura de corriente consumida por ambos motores, la lectura y procesamiento de los valores provenientes de una unidad de medición inercial, la detección de objetos y superficies, a través de dos sensores ultrasónicos y el movimiento de paneo de la cámara.

La batería está conectada a una fuente regulada de bajada la cual alimenta la Raspberry Pi, la AltIMU-10 y el MCP3008 a 5[V]. Un botón de paro de emergencia y un interruptor general cortan el suministro de energía eléctrica. [1]

1.2.3 Soporte y charola de servicio

La estructura está basada en elementos comerciales de bajo costo e impresión 3D. Las cualidades de esta tecnología permiten la personalización de productos, la fabricación modular, la industrialización de piezas de baja producción, la capacidad de actualización accesible de los volúmenes, modificación rápida de peso y resistencia de los elementos y la diversidad de acabados sin hacer grandes cambios en la producción. [1]

A continuación, se presenta una galería de imágenes del modelo final de *Ayúdame 1.0*, con la finalidad de evidenciar las principales deficiencias identificadas en el robot, que se presentan posteriormente.



ILUSTRACIÓN 3. MODELO FINAL DEL ROBOT AYÚDAME 1.0.

[1]



ILUSTRACIÓN 2. MODELO FINAL EN SESIÓN DE PRUEBAS.

[1]

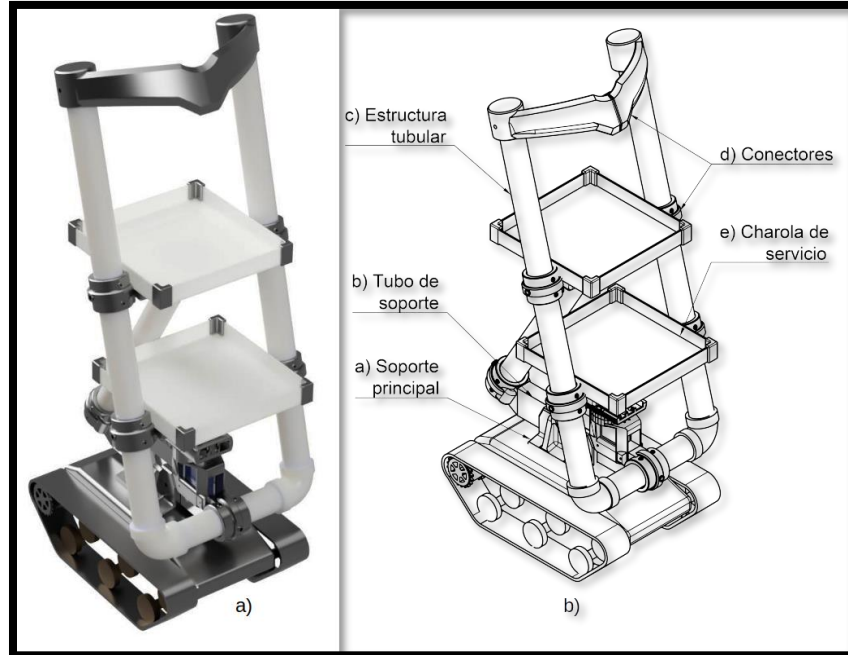


ILUSTRACIÓN 4. MODELO DIGITAL DE LA VERSIÓN FINAL DE AYÚDAME 1.0. [1]

1.2.4 Principales deficiencias identificadas en Ayúdame 1.0 relacionadas con el diseño electromecánico

- Diseño robusto deficiente y adaptabilidad escasa del dispositivo

Con el diseño robusto de un producto se minimiza la posibilidad de errores, buscando que tenga la mínima variación en las características de calidad importantes para el cliente o usuario (según sea el caso), además, con esto se minimiza el costo de calidad. [2]

Simultáneamente, la adaptabilidad del dispositivo al ambiente se relaciona estrechamente con el diseño robusto, ya que, el dispositivo debe ser capaz de reaccionar a las perturbaciones a las que estará expuesto, es decir, minimizar o anular las posibilidades de error en el funcionamiento.

Por lo tanto, es importante priorizar el análisis del ambiente al que estará expuesto el dispositivo para establecer los requerimientos y especificaciones del producto, y con ello, generar un diseño conceptual que minimice la posibilidad de errores, que se adapte al ambiente dinámico al que estará expuesto y que satisfaga las necesidades de calidad del cliente.

La Ilustración 2 y la Ilustración 3 evidencian que los requerimientos y especificaciones con los que se diseñó el robot *Ayúdame 1.0* no consideraron suficientes aspectos a los que estaría expuesto el dispositivo en su ambiente de operación. Por solo mencionar algunos: la ergonomía en la interacción con el usuario, que desemboca en diferentes consideraciones de diseño, como una altura adecuada para que los usuarios puedan manipular los objetos que transportará el robot; otro aspecto es la resistencia de la estructura del robot, ¿Qué sucedería si un usuario se recarga sobre

el robot o choca con este? Al manipular e interactuar con el robot *Ayúdame 1.0* se puede comprobar qué tan endeble es su estructura. Así como los ejemplos anteriores, se pueden extraer más necesidades por satisfacer cuando se realiza un extenso análisis de la interacción del dispositivo con los usuarios y el ambiente de operación.

- *Requerimientos relacionados con el ambiente hospitalario*

En la documentación de la versión *Ayúdame 1.0* no hay claridad en el establecimiento de los requerimientos y especificaciones, lo cual es preocupante al momento de desarrollar un producto, ya que, estos establecen las necesidades y métricas que el producto debe de satisfacer al finalizar su desarrollo.

Por lo tanto, desde la concepción del proyecto se deben establecer dichas características. Además, estas evitarán que el equipo de diseño se disperse o se enfoque en desarrollar cualidades que no son relevantes para el producto final.

- *Apariencia integrativa*

La versión *Ayúdame 1.0*, como se puede observar en la Ilustración 3, no cuenta con una apariencia integrativa en relación con el contexto de uso, es decir, no proyecta confianza ni seguridad a los usuarios.

El origen de esta aseveración proviene del análisis de la estructura interna y externa del robot, que realizó el equipo de diseño y el líder del proyecto; se identificó que los materiales y los métodos de ensamble con los que se construyó el robot no eran suficientemente resistentes para soportar cargas provenientes de la interacción con los usuarios. Por otro lado, al analizar la estética del dispositivo en conjunto con un equipo de diseñadores industriales, se acordó que mantener expuesto el sistema electromecánico del robot puede provocar aversión en los usuarios u otros efectos producidos por la tecnofobia, tal como lo menciona Bertrand Regader en su artículo *Tecnofobia: ¿qué impacto tienen las nuevas tecnologías en nuestra mente?* [3].

- *Materiales y acabados*

Para desarrollar el modelo de *Ayúdame 1.0* se utilizaron principalmente tubos de PVC y piezas impresas por medio de manufactura aditiva. Esta fue una de las razones por la que la estructura del modelo es sumamente débil y está expuesta a riesgos que pueden modificarlo de forma permanente, ya que como se mencionó en el punto anterior, además de que los materiales con los que se construyó la estructura interna y externa del robot son principalmente polímeros, que fueron seleccionados arbitrariamente y no existe un análisis de esfuerzos que permita validar su dureza; la configuración mecánica con la que se diseñó y ensambló tampoco le aportaron la suficiente rigidez para soportar cargas comunes en su ambiente de operación, por ejemplo, si un usuario chocara con el dispositivo, o que se recargara sobre él.

- Movilidad limitada

La tracción por orugas permite controlar con mayor precisión y suavidad sus movimientos, así como garantizar que la distancia recorrida y la dirección del móvil sea la correcta por medio de un sistema de control remoto [1]. A pesar de que este sistema de tracción le proveía dichos beneficios al movimiento del robot, se tenía una limitante considerable, la capacidad direccional de este tipo de tracción; que es bidireccional, es decir, el robot puede ir para adelante o atrás, incluso girar, pero no puede hacer ambos movimientos al mismo tiempo; sí se puede acceder a cualquier sitio con este tipo de movimientos, no obstante, un sistema omnidireccional permitiría observar naturalidad en el movimiento del robot, e incluso, facilitar su navegación.

1.3 Ayúdame 2.0

Ayúdame 2.0 surge como la segunda versión del proyecto, el objetivo principal seguía siendo el mismo, no obstante, la finalidad de esta nueva versión era atender las deficiencias identificadas en la versión *Ayúdame 1.0*.

Ayúdame 2.0 nace a mediados de 2021. Primeramente, se comenzaron a realizar bocetos y CADs para establecer una nueva estructura para el robot. A continuación, se presentan en orden cronológico las primeras dos propuestas del diseño estructural del robot. Es preciso mencionar que, estas dos propuestas las presentaron exalumnos que realizaron su Servicio Social en el proyecto *Ayúdame*.

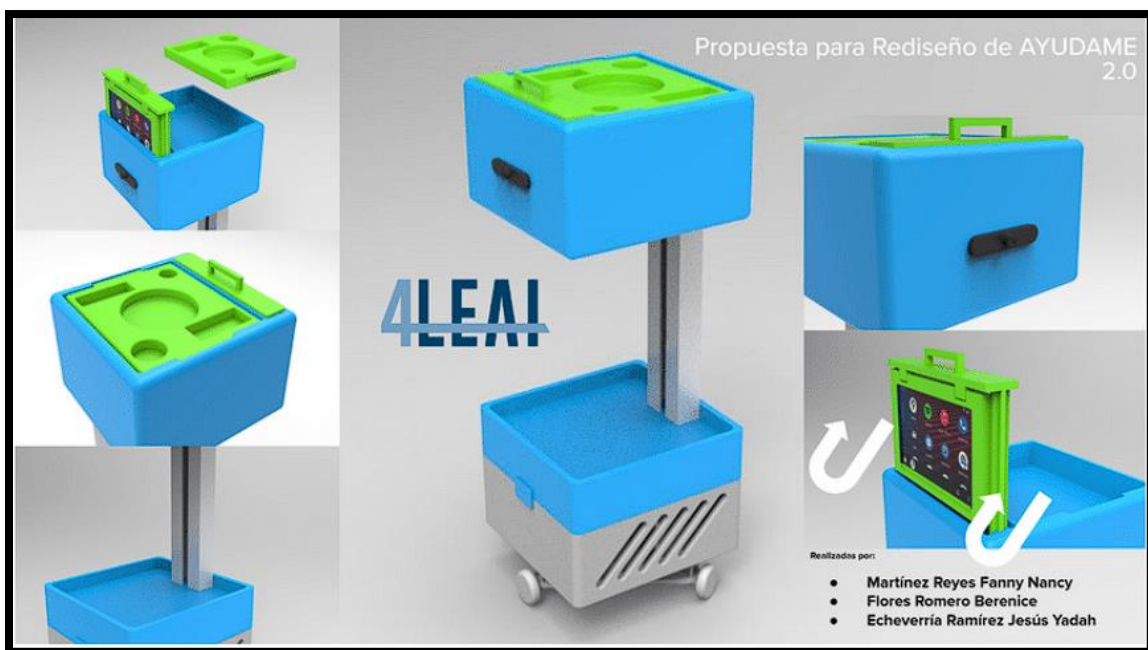


ILUSTRACIÓN 5. PROPUESTA 1 DEL REDISEÑO DE AYÚDAME 1.0.

Como se observa en la *Ilustración 5*, en la propuesta 1 se implementó una modularidad en el robot; estableciendo dos compartimientos principales, uno superior y otro inferior. En cuanto al sistema de movilidad, se proponían 3 llantas, que en versiones posteriores podía evolucionar a una configuración omnidireccional. En cuanto al diseño, se veía más innovador con respecto a *Ayúdame 1.0*; igualmente, era posible que con cambios en la paleta de colores de los materiales, este pudiese emanar una apariencia integrativa al contexto de uso. No obstante, la propuesta fue descartada porque proporcionaba un espacio limitado para el transporte de insumos; el líder del proyecto especificó que para las versiones posteriores de *Ayúdame 1.0*, era necesario por lo menos tener 3 compartimientos a los que pudieran acceder los usuarios pacientes, y por lo menos 1 compartimiento al que pudieran acceder los usuarios del servicio hospitalario.

Posteriormente, surge la propuesta 2 que se muestra en la *Ilustración 6*.

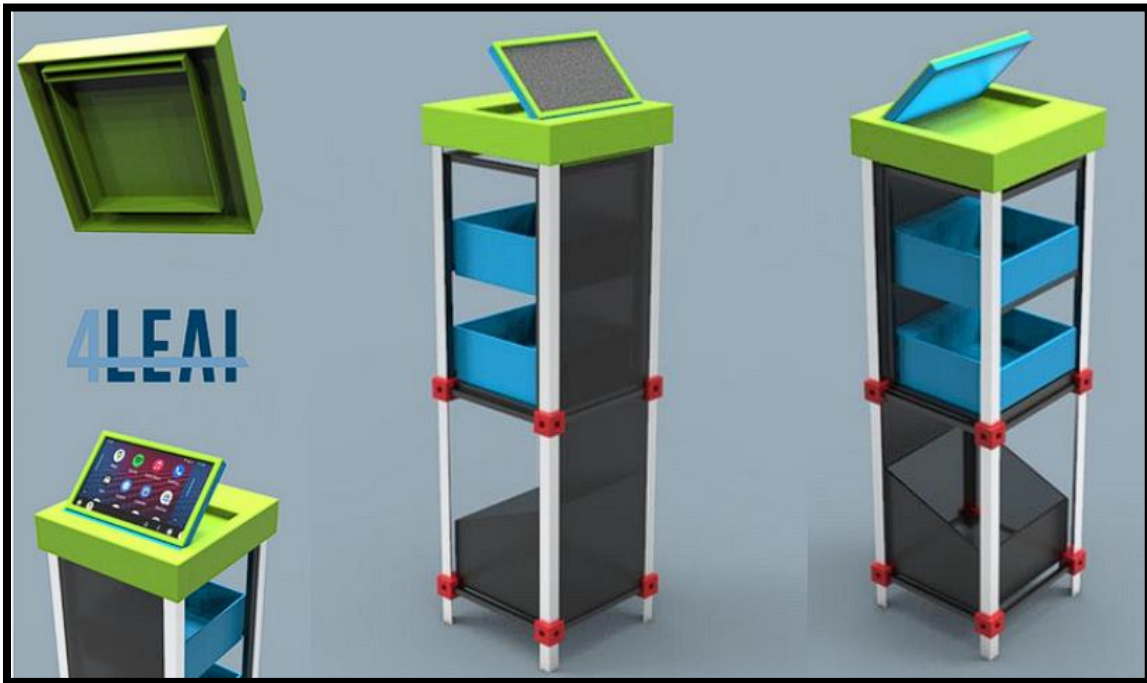


ILUSTRACIÓN 6. PROPUESTA 2 DEL REDISEÑO DE AYÚDAME 1.0.

Este nuevo modelo conceptual de la estructura del robot atendía la falta de espacio y compartimientos para el transporte de insumos, sin embargo, también se descartó por el deficiente desarrollo en la parte tecnológica, es decir, no se consideró en el modelado el sistema de tracción ni otras características que proporcionarían funcionalidades al robot.

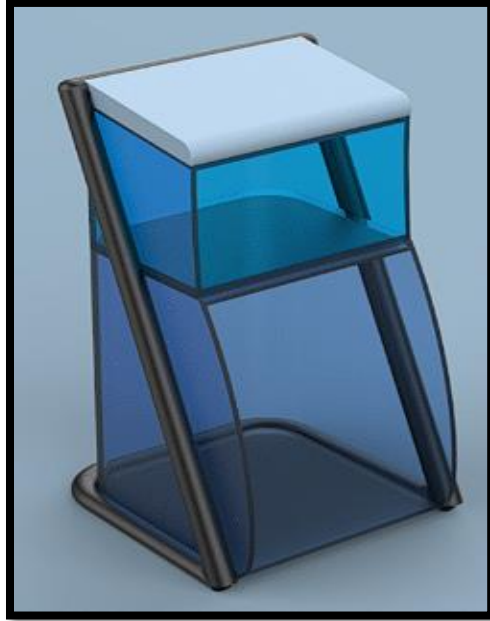


ILUSTRACIÓN 7. PROPUESTA 3 DEL REDISEÑO DE AYÚDAME 1.0.

Posteriormente, se desarrollaron propuestas más sencillas con la finalidad de encontrar una estructura que atendiera las principales deficiencias identificadas en la versión *Ayúdame 1.0*, aunque no se modelara de forma detallada la parte motriz o tecnológica del robot, tal es el caso de la propuesta 3 (*Ilustración 7*), que también fue rechazada, ya que, no expresaba ninguna innovación, además, se asemejaba a una estantería de oficina.

1.4 Desarrollo posterior del proyecto

Después de los diseños presentados previamente, dos diseñadores industriales de la Facultad de Estudios Superiores Aragón entraron al proyecto con la finalidad de liderar el equipo de diseño de *Ayúdame 2.0*. Los diseñadores industriales contaban con los antecedentes del proyecto ya expuestos; sin embargo, notaron que no se estaba documentando ni siguiendo de manera formal una metodología de diseño, por lo cual, decidieron desarrollar su propuesta de diseño siguiendo la metodología *Design Thinking*.

El proceso de *Design Thinking* es una metodología ágil de innovación centrada en el usuario, que consiste en integrar las necesidades de las personas y el uso de las nuevas tecnologías para encontrar las soluciones prácticas ante los problemas de las personas. [4]

La primera etapa de dicho proceso fue establecer los requerimientos preliminares para el robot *Ayúdame 2.0*, estos se establecieron a partir de analizar las deficiencias identificadas en la versión de *Ayúdame 1.0*. El equipo de diseño y el líder del proyecto identificaron necesidades por medio de los resultados, al realizar

pruebas con la versión anterior, y por medio de la observación e investigación del entorno de trabajo del dispositivo.

1.4.1 *Requerimientos preliminares para el robot Ayúdame 2.0*

1. El sistema es capaz de transportar insumos y alimentos de manera autónoma.
2. El sistema tiene la capacidad de cargar cierta cantidad de insumos.
3. El sistema integra un subsistema que evite el derrame de líquidos.
4. El sistema es modular, es decir, se puede separar para su posible compostura.
5. El sistema se produce fácilmente en México, con elementos sencillamente adquiribles.
6. El sistema tiene al menos 3 niveles separados para transportar los diferentes insumos o alimentos.

Posteriormente, se trabajó en la *etapa de empatía*; como se mencionó, el *Design Thinking* es una metodología centrada en el usuario, por ello, esta comenzará sumergiéndose en la vida de los usuarios, con el objetivo de obtener información sobre sus necesidades y deseos para poder aportarles soluciones. De esta forma, se añade una dimensión emocional a la lógica y se pueden identificar oportunidades sobre las que empezar a trabajar. [5]

1.4.2 *Etapa de empatía*

Los diseñadores industriales identificaron las siguientes necesidades y características en los usuarios para los cuáles está dirigido el producto.

1. El usuario paciente está típicamente enfermo con ganas de ver a sus familiares, para comunicar acerca de su estado de salud.
2. A la mayoría de los usuarios pacientes se les aísla de visitas.
3. Los usuarios médicos y enfermeros en un estado de prisa todo el tiempo por la sobrecarga de trabajo.
4. Los usuarios pacientes suelen estar en un estado de reposo.
5. El robot debe compartir espacio y trayectos con el personal médico.

Con la información recabada en la *etapa de empatía*, en conjunto con los antecedentes de la definición del problema, se establecieron los requerimientos de diseño, que sirvieron como guía para elaborar bocetos y propuestas posteriores en la *etapa de ideación*.

1.4.3 *Requerimientos de diseño*

1. *Diseño amigable*
La forma del robot proyecta confianza y seguridad, especialmente a los usuarios.
2. *Estética integrativa al contexto*
La forma del robot se concilia con el contexto hospitalario, con el objetivo de que exista aceptación y confiabilidad con su uso.
3. *Verificar elementos semióticos*
El uso de *Ayúdame 2.0* es intuitivo de acuerdo con la semiótica de los usuarios.
4. *Diseño emocional*
La forma y los componentes del robot expresan confiabilidad y usabilidad, es decir, invitan al usuario a utilizarlo.
5. *Materiales y acabados contemporáneos*
Los materiales y acabados del robot reflejan innovación siguiendo una tendencia futurista.

La *etapa de ideación* es la tercera etapa de la metodología de *Design Thinking*, esta etapa corresponde a un momento de generación de ideas que traten de solucionar el reto planteado en la etapa de definición, a partir de los problemas y necesidades encontrados. [5]

La técnica del *brainstorming* es, por excelencia, la más utilizada para generar gran cantidad de ideas en poco tiempo y es la que se suele emplear en el caso de una aplicación ingenieril. [5]

1.4.4 *Etapa de Ideación*

Para comenzar con esta etapa del proceso de diseño, los diseñadores industriales generaron un *moodboard*, es decir, un tablero de inspiración (*Ilustración 8*). Esta trata de, gráfica y visualmente, exponer y aterrizar un concepto, una idea o definir una línea gráfica sobre la que trabajar. [6]

Como se observa, en la inspiración para desarrollar los bocetos y propuestas de diseño, impera el diseño orgánico, una tendencia minimalista y futurista; con elementos curvos e incluso irregulares.

Una vez que se estableció un estilo de diseño a seguir, se comenzaron con los primeros bosquejos; posteriormente, se presentaron las primeras propuestas de los modelos conceptuales, y poco a poco, el modelo de *Ayúdame 2.0* evolucionó hasta que el modelo conceptual preliminar agradó al equipo de diseño y al líder del proyecto.

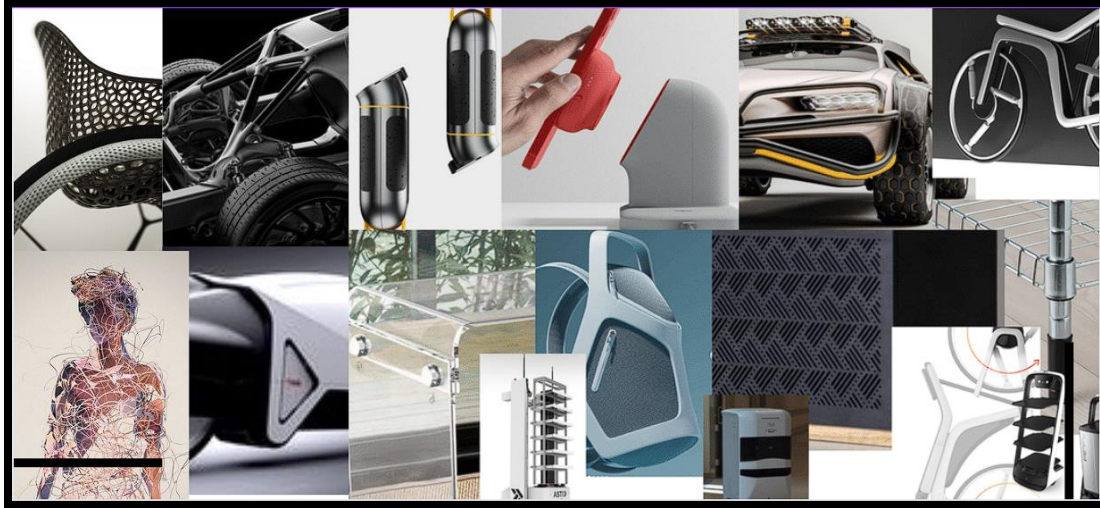


ILUSTRACIÓN 8. MOODBOARD GENERADA PARA COMENZAR CON LA ETAPA DE IDEACIÓN.

A continuación, se muestra la evolución de los modelos de *Ayúdame 2.0*.

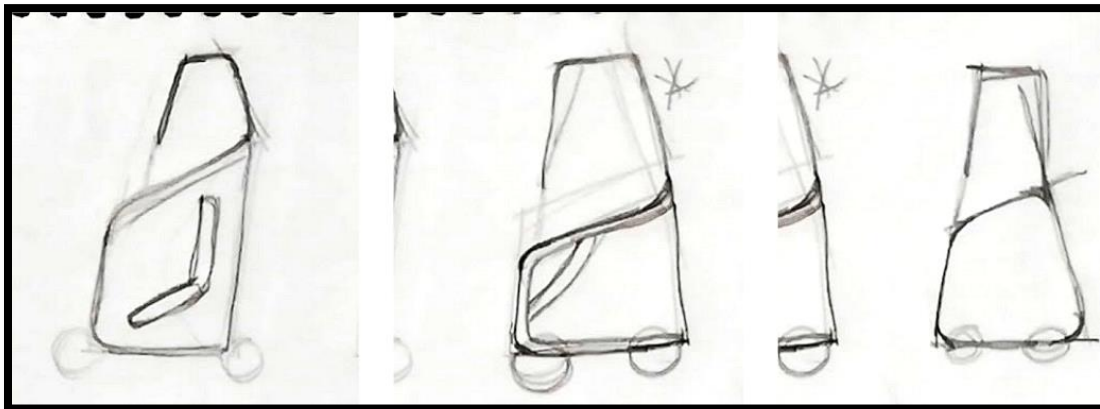


ILUSTRACIÓN 9. PRIMEROS BOSQUEJOS GENERADOS EN LA ETAPA DE IDEACIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO.

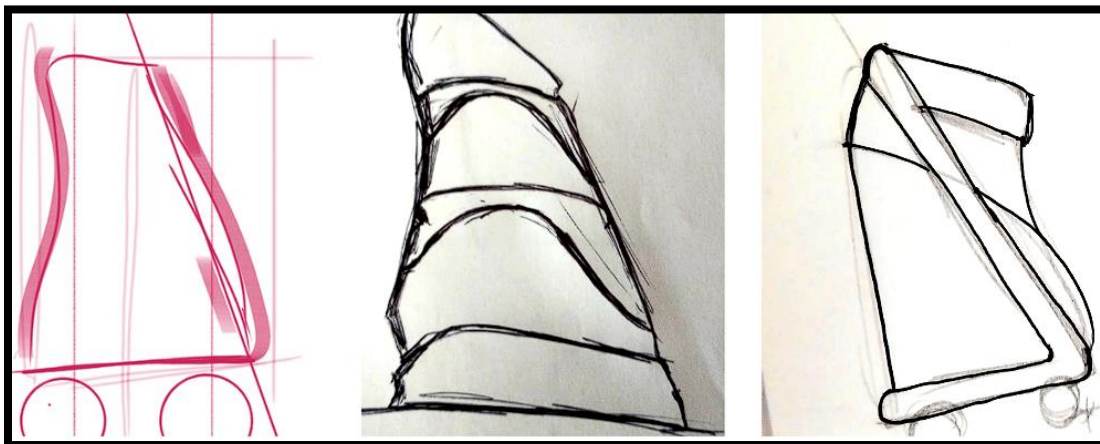


ILUSTRACIÓN 10. EVOLUCIÓN DE LOS BOSQUEJOS PARA LA GENERACIÓN DEL MODELO DE *AYÚDAME 2.0*.



ILUSTRACIÓN 11. MODELO CONCEPTUAL 1 PARA EL ROBOT AYÚDAME 2.0.

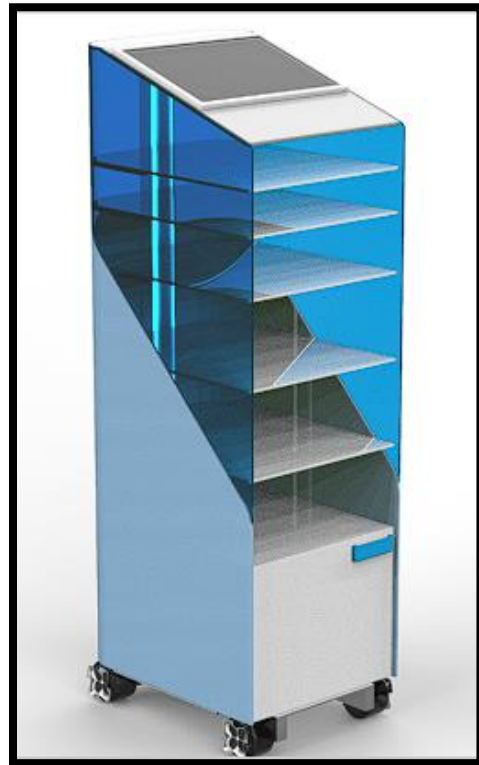


ILUSTRACIÓN 12. MODELO CONCEPTUAL 2 PARA EL ROBOT AYÚDAME 2.0.



ILUSTRACIÓN 13. MODELO CONCEPTUAL 3 PARA EL ROBOT AYÚDAME 2.0.

El equipo de diseño y el líder del proyecto definieron al modelo conceptual 3 (*Ilustración 13*) como el diseño estructural definitivo sobre el cuál se construiría el robot *Ayúdame 2.0*. Las principales razones por las cuáles se definió a este modelo respecto a los modelos conceptuales 1 y 2, fueron las siguientes:

1. Proyecta confianza y seguridad en un primer vistazo.
2. La estructura y apariencia del robot se integra al contexto hospitalario, muy probablemente sea aceptado y usado de forma confiable por los usuarios.
3. Los materiales, acabados contemporáneos y la paleta de colores del robot, invitan al usuario a utilizarlo y reflejan innovación.

1.4.5 Descripción del modelo conceptual de Ayúdame 2.0

El robot *Ayúdame 2.0* cuenta con las siguientes características generales:

- Tiene 3 niveles separados para transportar diferentes insumos o alimentos.
- Cuenta con dos cajones en la parte inferior, en los que se pretenden almacenar medicamentos, instrumentos y equipo médico. Uno de los cajones tendrá seguridad, solo se podrá abrir mediante software.

- En la parte superior está montada una *tablet* que almacenará la HMI (*Human-Machine Interface*, Interfaz Humano – Máquina, en su traducción al español).
- Cuenta con altavoces que permitirán comunicación auditiva con el usuario.
- A un lado de la *tablet* cuenta con un botón de paro de emergencia.
- En las esquinas del panel superior, tiene diodos LEDs que permitirán conocer el estado actual del robot (en ruta, reposo, bloqueado, etc.)
- El robot cuenta con una base de carga, que al mismo tiempo lo aloja y protege.
- La estructura interna del robot es metálica, con la finalidad de aportarle firmeza y robustez.

A continuación, se presenta una galería de imágenes que permiten observar otras perspectivas del modelo conceptual del robot *Ayúdame 2.0*.

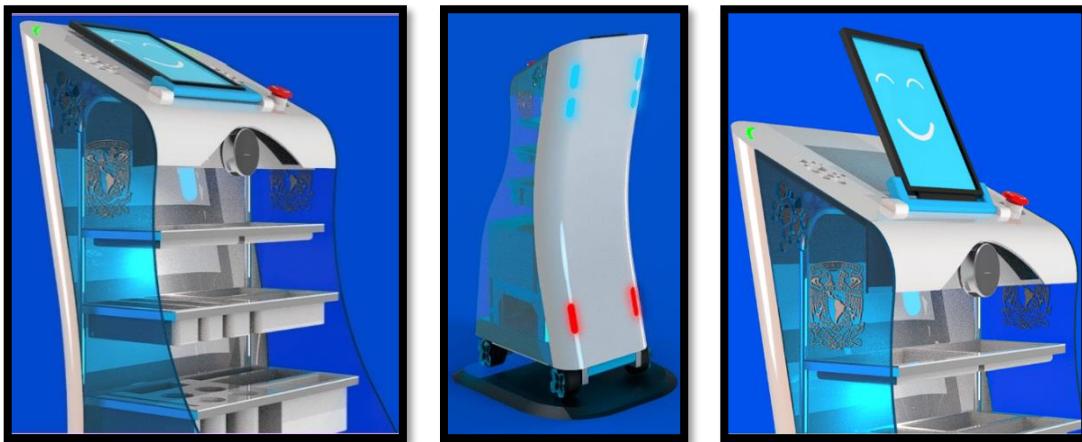


ILUSTRACIÓN 14. VISTAS DEL MODELO CONCEPTUAL DE AYÚDAME 2.0.

Después de haber elegido el modelo conceptual que mejor se adecuaba con las especificaciones de diseño, definidas en la etapa de empatía, y que se ocupó de atender las principales deficiencias identificadas en la versión *Ayúdame 1.0*, los diseñadores industriales propusieron algunos materiales, dispositivos y procesos de manufactura, que servirían para construir el producto final. A continuación, se presentan dichas propuestas.

Estructura interna del robot

Se propuso construir la estructura interna del robot, sobre la cual se montará la carcasa (*Ilustración 15*), utilizando perfiles estructurales de aluminio; estas irían fijadas a la base del sistema motriz. Los diseñadores industriales decidieron utilizar dichos perfiles de aluminio por dos razones. La principal razón fue que se priorizó el ahorro de recursos económicos para desarrollar la nueva versión de *Ayúdame*, el laboratorio del IIMAS ya contaba con este material, por lo cual se convertía en una opción viable a utilizar. Además, por

las bondades que aporta el aluminio, entre ellas: es ligero en comparación con otros metales como el acero, cuenta con un módulo de Young alto con respecto al de la mayoría de los polímeros comerciales (como el polietileno, nylon 6.6, PET, etc.), además, es resistente a la corrosión. Es decir, se trata de un material ligero, resistente y anticorrosivo [7]. Por lo tanto, el perfil estructural de aluminio se convirtió en la mejor opción económicamente viable y que satisfacía las principales propiedades mecánicas y químicas demandadas para dicho material.

Por otro lado, se aprovecharía la geometría de los perfiles estructurales de aluminio para introducir en el agujero transversal, una varilla de acero inoxidable, que llegaría hasta la parte superior del robot. Sobre esta varilla, se soldarían los soportes de los 3 niveles de las charolas. Además, de acuerdo con el arreglo propuesto de los perfiles estructurales, estos servirían para albergar los cajones inferiores del robot, como se observa en la *Ilustración 15 B*).



ILUSTRACIÓN 15. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA INTERNA DEL ROBOT.

Carcasa

La carcasa del robot está constituida principalmente por los paneles azules laterales, el panel curvo posterior y el panel superior. Para los paneles laterales se propuso el material acrílico laminado, y utilizaría el corte láser para darles la geometría deseada (*Ilustración 18*). Se eligió dicho material puesto que, las láminas de acrílico tienen cualidades similares a las del vidrio: claridad, brillo, transparencia, translucidez, pesa significativamente menos (aproximadamente la mitad) y es hasta 10 veces más

resistente a impactos. En adición, mantiene una excelente tolerancia a los rigores de la intemperie y la radiación ultravioleta, es inerte a muchas sustancias corrosivas, es una solución adecuada para un amplio rango de temperaturas (en comparación con otros plásticos); por estas características se trata de un material idóneo para una variedad de aplicaciones al aire libre. [7]

Por otro lado, para el panel curvo posterior, se propusieron láminas de estireno calibre 100 (2.5 mm), se eligió este tipo de lámina debido a que son altamente resistentes al impacto, al mismo tiempo, cuentan con gran flexibilidad y se termoforman con mucha facilidad [8]. Por otro lado, a las láminas de estireno se le pueden añadir aditivos que les proporcionan otras propiedades, como la lámina de estireno antibacterial, que inhibe la acumulación de bacterias, polvos o compuestos orgánicos volátiles; útil en hospitales o sanatorios [9]. El proceso de manufactura que se previó utilizar, para asignarle a la lámina la geometría irregular deseada, es el conformado a presión; se trata de un proceso de termoformado que conlleva calentar la lámina de plástico y utilizar el vacío para extraer el aire y forzar la lámina contra un molde [10]. Dicho molde podría fabricarse de yeso (menor costo, menos usos) o por capas de MDF (mayor costo, más cantidad de usos).

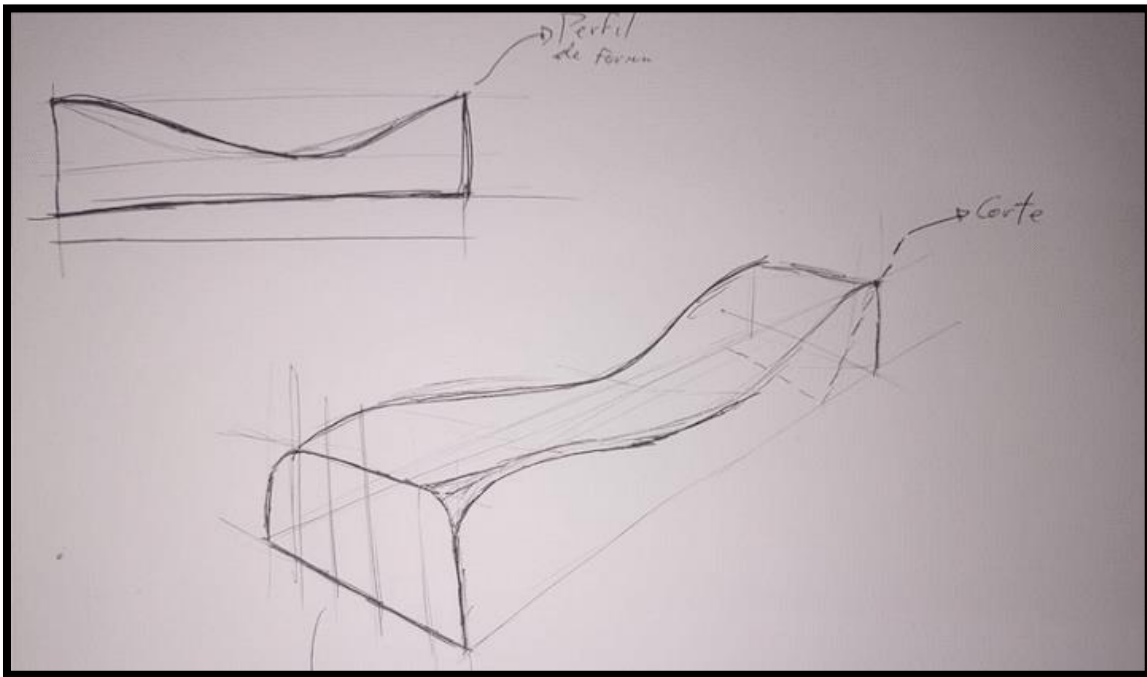


ILUSTRACIÓN 16. BOCETO DEL MOLDE A FABRICAR PARA GENERAR LA LÁMINA POSTERIOR DE LA CARCASA DEL ROBOT.

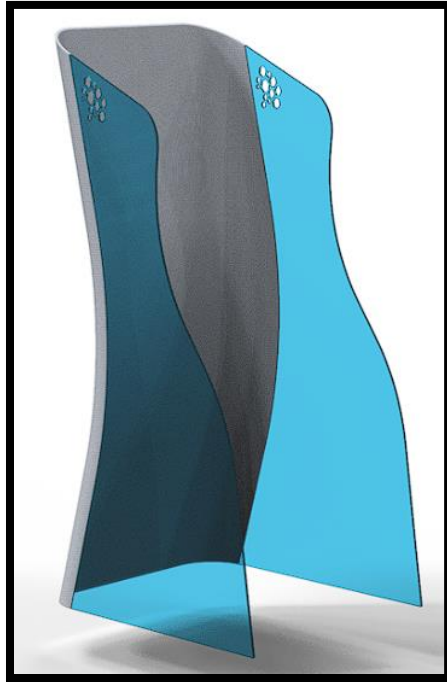


ILUSTRACIÓN 17. CARCASA LATERAL DEL ROBOT.

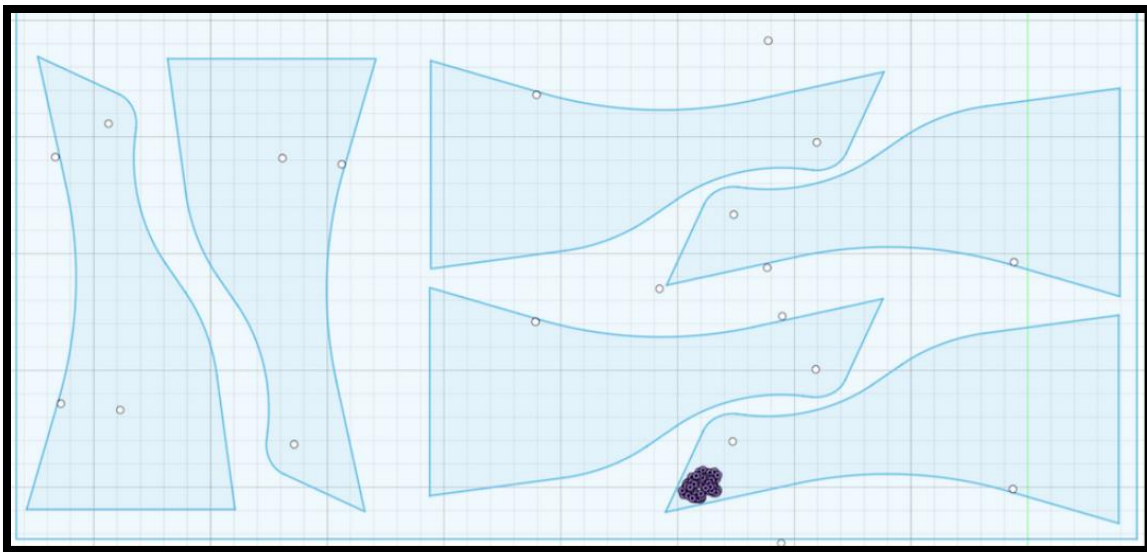


ILUSTRACIÓN 18. PROCESO DE MANUFACTURA PROPUESTO PARA LOS PANELES LATERALES.

Para el panel superior, sobre el cual está situada la *tablet*, se propuso el mismo material que los paneles laterales, no obstante, el acrílico podía tener otro acabado que no fuera traslucido, esto para evitar que el usuario pudiese observar parte de la electrónica interna del robot o la configuración mecánica con la que se ensambló la estructura interna; que como se mencionó antes, puede resultar en una aversión de uso. Para manufacturarlo se podía realizar por corte láser, y para la curvatura frontal, se podía unir con otro material capaz de deformarse en caliente, como el mismo estireno del panel posterior.



ILUSTRACIÓN 19. ESPECIFICACIONES DEL ROBOT RELACIONADAS CON LA CARCASA.

Después de haber elegido el modelo conceptual definitivo, proponer y definir funcionalidades, características y aspectos para el robot, así como materiales y procesos de manufactura; era momento de pensar en cómo empezar con la fabricación del dispositivo. Es decir, el siguiente paso en el proceso de diseño es la *etapa de prototipado*.

En la *etapa de prototipado* llega el momento de converger de nuevo seleccionando las mejores ideas obtenidas en la etapa anterior y prototipando. Se trata de una de las actividades más críticas en el proceso de diseño en la que verdaderamente se experimenta un avance en el proceso. [4]

Para evitar confusiones con otras áreas de estudio, se define el término *prototipo* según la metodología de *Design Thinking*, se trata de un ensayo que permite materializar una idea. Al hacerla palpable, genera preguntas y respuestas que ayudan a visualizar posibles soluciones, poniendo de manifiesto elementos que se deben mejorar o refinar antes de llegar al resultado final. Con la retroalimentación de los usuarios se intentará ajustarse cada vez más a sus necesidades e ir refinando así los prototipos. Por este motivo, se construyen artefactos o escenarios sencillos, rápidos y baratos en la primera iteración, que se van perfeccionando con la ayuda de las personas conforme avanza el proceso. [4]

Para contextualizar la cronología del proyecto, las últimas propuestas de la etapa de ideación se presentaron a finales del 2021. En el mes de enero de 2022, se integran al equipo de diseño del proyecto dos ingenieros mecatrónicos; uno de ellos, el autor del presente trabajo.

La prioridad del equipo de diseño en aquel momento era trasladarle los antecedentes del proyecto a los ingenieros mecatrónicos, con la finalidad de generar retroalimentación y dudas, que propiciaran a un posible rediseño, es decir, un diseño recurrente basado en multidisciplinariedad del equipo.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Rediseñar y fabricar el modelo conceptual del sistema estructural de un robot de servicio para el sector hospitalario, con la finalidad de generar un prototipo físico y digital que interactúe con los usuarios, y así, se puedan identificar e implementar oportunidades de mejora para la versión final del producto.

2.2 Objetivos específicos

Identificar los parámetros de entrada del proyecto.

Con los antecedentes del proyecto, se deben de identificar y jerarquizar los parámetros de entrada, es decir, aquellos requerimientos, especificaciones, necesidades de los usuarios y del cliente, etc., que sean indiscutibles para el diseño recursivo del robot. Esto con la finalidad de priorizar su implementación en el modelo a construir.

Establecer requerimientos técnicos e identificar necesidades en base a investigaciones acerca de las consideraciones en el diseño de robots de servicio para el área médica.

Se requiere realizar una investigación para conocer e identificar las consideraciones en el diseño de robots de servicio para el sector hospitalario, con ello, establecer requerimientos técnicos e identificar necesidades, sustentados en evidencia científica y procesos de investigación.

Dividir y analizar los subsistemas del sistema estructural del robot.

De acuerdo con el modelo conceptual elegido en la etapa de ideación de la metodología *Design Thinking*, desarrollada por los diseñadores industriales, se realizará una división del sistema estructural y se analizará cada subsistema para proponer y establecer materiales y procesos de manufactura.

Diseñar, modificar e integrar el sistema motriz al modelo conceptual elegido.

Con la donación de un sistema motriz para desarrollar el sistema estructural del robot, se diseñarán las modificaciones que necesita dicho sistema para integrarlo al modelo conceptual; eligiendo los procesos de manufactura y materiales que se adecúen con las herramientas y oportunidades con las que cuenta el equipo de trabajo.

Diseñar y fabricar la base sobre la cual se montará la estructura vertical del robot.

Una vez que se tenga el sistema motriz definitivo, se diseñará una estructura que le aporte una base al robot, es decir, que le provea un espacio plano; sobre la cual se pueda montar la estructura vertical y algunos elementos electrónicos del robot.

Diseñar, definir, manufacturar y montar la estructura vertical del robot.

Después de tener el sistema motriz con un base firme, se diseñarán propuestas de la estructura vertical del robot. La estructura vertical definitiva se deberá adecuar a los materiales y herramientas con los que cuenta el equipo de diseño; además, se debe fabricar y montar a la base previamente construida.

Diseñar, fabricar e integrar la carcasa del robot.

Después de haber fabricado e integrado la estructura interna del robot; se van a diseñar, fabricar y montar los paneles que corresponden a la carcasa del robot.

Determinar y proponer pruebas para el prototipo final del robot.

Con el conocimiento adquirido a lo largo del desarrollo del proyecto, se identificarán y analizarán las vulnerabilidades y los escenarios de riesgo del sistema estructural del robot, con esto, se propondrán pruebas con fundamentos ingenieriles que originen retroalimentación para el equipo de diseño, y así se consideren oportunidades de mejora para versiones posteriores del producto.

3 Identificación de las consideraciones de un robot de servicio para el área médica

El equipo de diseño del proyecto realizó una investigación acerca de las consideraciones en el diseño de robots de servicio para la atención médica, con la finalidad de acaparar información relevante que agilizará y beneficiará el desarrollo del proyecto; además, con este trasfondo de información adquirido se sustentará la toma de decisiones al establecer los requerimientos generales en el diseño del producto. La información presentada a continuación se consultó en la revista de investigación en ingeniería e innovación tecnológica *CULCYT. Cultura Científica y Tecnológica*, precisamente en el artículo *Consideraciones en el diseño de robots para la atención médica en el mundo post COVID-19* [11].

3.1 Consideraciones en relación con los usuarios

Los productos biomédicos tienen como usuario final al paciente, pero también se deben considerar a los técnicos de instalación, instructores y personal médico que operan el dispositivo. Estos usuarios tienen la capacidad de influir en los procedimientos, configuración y mantenimiento del dispositivo, por ejemplo, en la elección de la configuración adecuada o en la identificación de problemas de mantenimiento. Además, pueden contribuir al rediseño y mejora del dispositivo, para sacar el máximo provecho en beneficio del paciente.

Es decir, se deben de considerar a todos los agentes que interactúen de forma directa e indirecta con el dispositivo. Eason (1987) identifica 3 categorías de usuario: los primarios, quienes frecuentemente usan el sistema, los secundarios, quienes ocasionalmente usan el sistema, y los terciarios, todos los afectados por la introducción del sistema. No se tienen que involucrar a todas las partes en el desarrollo de un producto, pero es importante ser consciente de su impacto en el proyecto. [12]

3.2 Consideraciones en la usabilidad del dispositivo

La usabilidad se refiere a la facilidad con la que un dispositivo puede ser controlado o manipulado. La norma *ISO 9241-11* define la usabilidad como la habilidad de un dispositivo para permitir que los usuarios alcancen objetivos específicos de manera eficiente, efectiva y satisfactoria en un entorno determinado. La usabilidad debe incentivar la productividad en la tarea para la que se ha diseñado el dispositivo, aumentar la seguridad y reducir el esfuerzo necesario para operarlo. A menudo, la seguridad en los dispositivos médicos está relacionada con la usabilidad, ya que se centra en minimizar o reducir los posibles errores durante el uso y el mantenimiento. Además, el dispositivo debe indicar de inmediato un fallo o un riesgo en su operación mediante señales visuales o auditivas. Los instructivos deben informar sobre los posibles

errores y cómo eliminarlos para poner el sistema en marcha rápidamente. La documentación relacionada con la usabilidad debe estar disponible para los operadores y técnicos encargados.

3.3 Consideraciones en la manufactura del robot

Uno de los objetivos en el diseño de dispositivos médicos es asegurar la fabricación continua a través de procesos industrializados, garantizando la calidad, confiabilidad, rendimiento y disponibilidad, teniendo en cuenta la rentabilidad en términos comerciales. Uno de los objetivos del Diseño para la Fabricación (DFM) es reducir el número de componentes y partes de un dispositivo, lo que facilita su producción en línea y permite reducir costos, aumentar la calidad y favorecer el mantenimiento del producto. La fabricación de dispositivos médicos sigue las leyes de salud pública de cada país para garantizar el control de calidad en los procesos de diseño. La selección de materiales es un factor clave en esta etapa, ya que influye directamente en su industrialización. Esta se realiza teniendo en cuenta diversos factores como las propiedades físicas, mecánicas, térmicas y eléctricas, la resistencia química y la capacidad de esterilización, entre otros.

El líder del proyecto comentó que un objetivo a largo plazo es que el robot se pueda manufacturar de forma continua, es decir, a través de procesos industrializados. No obstante, para la actual etapa del proyecto, se requiere construir el modelo conceptual para comenzar la etapa de pruebas. Así, se acapará información que servirá para determinar si los aspectos relacionados con el diseño electromecánico son funcionales y satisfacen las necesidades de los usuarios. De ser así, en el futuro se atendería únicamente la reducción de componentes, el diseño para ensamble y la elección de materiales para facilitar su producción en línea.

Metales como el aluminio y el acero, así como diferentes aleaciones y plásticos, son comunes en la fabricación de equipos médicos. También se utilizan ampliamente los polímeros, pero su uso debe considerar diversas propiedades como los *lixiviables* (sustancias que pueden ser liberadas de un dispositivo médico o material durante el uso clínico [13]) y *extraíbles* (que pueden liberarse de un dispositivo médico o material utilizando solventes de extracción y/o condiciones de extracción [13]), la vida útil y el envejecimiento, la unión y soldadura, y los plásticos de grado médico y los suplementos. Es importante conocer los datos sobre toxicidad, irritación en la piel, ojos y superficies mucosas, sensibilización, hemocompatibilidad, genotoxicidad, carcinogenicidad y otros efectos durante los procesos de industrialización, incluyendo los efectos en el medio ambiente.

En la investigación de McKeen se especifican muchos de los plásticos que se utilizan en los dispositivos médicos. El análisis se centra en polímeros de grado médico y sus propiedades químicas adecuadas, orientación y aplicaciones de esterilización. Entre los más utilizados en dispositivos médicos se

encuentran: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), poliéster (SP), ácido poliláctico (PLA y otros plásticos bioabsorbibles), policarbonato (PC), cloruro de polivinilo (PVC), polietersulfona (PES), poliacrilato (acrílico, PMMA), hidrogel/acrilato, polisulfona (PSU), poliéter éter cetona (PEEK), elastómeros termoplásticos, elastómeros, siliconas, poli-p-xilileno/parileno y fluoropolímeros.

La situación sanitaria de la pandemia por COVID-19 y la disponibilidad de tecnologías de impresión 3D han impulsado el uso del modelado por deposición fundida (FDM) y la fabricación aditiva por sus capacidades de impresión, materiales accesibles, precisión, volumen de las piezas, tiempo de fabricación y replicabilidad. Los polímeros tienen aplicaciones en áreas médicas y biomédicas, y pueden favorecer los procesos de desinfección y esterilización en centros de salud. Uno de los materiales utilizados en la impresión de piezas tridimensionales para aplicaciones médicas es el filamento de ácido poliláctico (PLA), por sus capacidades de esterilización.

A partir de esta información se puede sustentar la elección de los materiales para fabricar el modelo conceptual. Es decir, el primer factor a considerar es que el material sea de grado médico y que sus propiedades químicas no interfieran con la seguridad de los usuarios; posteriormente, se pueden tomar en cuenta los factores ingenieriles relacionados con el uso del material, ya sean propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas, etc.

En investigaciones complementarias se evaluaron diferentes métodos de esterilización de materiales, incluyendo altas temperaturas, radiación ultravioleta, ozono, óxido de etileno, peróxido de hidrógeno, alcohol isopropílico, rayos gamma o electricidad, microondas, sulfato de cobre, azul de metileno, yodo y cloro sódico. Por otro lado, también se ha evaluado la eficiencia de la radiación ionizante como proceso de descontaminación, mostrando que el uso de rayos gamma con rangos específicos en varios termoplásticos (incluido el PLA) causaba daños estructurales. En otra investigación, Valente mostró que la luz ultravioleta y otros métodos de radiación no afectaban la morfología de la fibra de PLA y su alineación. La radiación ultravioleta tipo C tiene un efecto germicida y se ha utilizado ampliamente para esterilizar espacios confinados en hogares, áreas médicas y espacios comerciales e industriales. Investigaciones anteriores también muestran que la radiación ultravioleta puede inactivar los coronavirus, incluyendo el SARS-CoV y el MERS-CoV.

La esterilización de materiales es otro de los factores a considerar en el periodo de pruebas. En etapas posteriores del proyecto será pertinente asegurar que el método que se elija para desinfectar y esterilizar los materiales que tengan injerencia directa con la seguridad de los usuarios, no afecte la estructura de los materiales o el funcionamiento de los sistemas electrónicos del robot.

3.4 Consideraciones en el ciclo de vida del dispositivo

La duración de los dispositivos médicos puede variar dependiendo del entorno y de los componentes utilizados. Las etapas del ciclo de vida de un dispositivo médico incluyen diseño, desarrollo, pruebas, fabricación, transporte, instalación, pruebas en sitio, operación, limpieza, mantenimiento, retiro del servicio y desmantelamiento o eliminación de componentes peligrosamente contaminados que no pueden ser esterilizados.

Es importante examinar cada etapa del ciclo de vida de un producto, ya que las decisiones tomadas en las primeras etapas pueden tener un impacto en las etapas finales. Esto implica que el flujo entre etapas debe involucrar el mínimo número de variables posible. Uno de los desafíos principales es identificar las condiciones peligrosas en función de la complejidad del sistema, el producto y el ambiente. La parte final del ciclo de vida del producto incluye el desmantelamiento y la eliminación de los componentes, pero en esta etapa también es posible obtener beneficios, como evitar el desperdicio de los componentes, obtener un beneficio económico del producto y reducir el impacto ambiental. La fase final de la vida útil del producto comienza después del desmontaje y los componentes recuperados pueden ser reutilizados, remanufacturados, reciclados o desechados en vertederos especializados. Una selección adecuada de los métodos de análisis de la fase final de la vida útil puede aumentar el valor del producto recuperado.

Actualmente, la versión de *Ayúdame 2.0* se encuentra en la fase de desarrollo, es decir, el modelo que se requiere construir será utilizado en la etapa de pruebas. No obstante, como se menciona en el artículo, la actual toma de decisiones repercutirá en las posteriores etapas del ciclo de vida. Tal como se menciona en la bibliografía referente al diseño del producto, el proceso de diseño suele ser recursivo, es decir, se puede regresar a etapas previas del diseño hasta satisfacer las necesidades del producto a lo largo de su vida útil, sin embargo, regresar a etapas del proceso de diseño aumenta los costos del desarrollo del proyecto. Por lo tanto, antes de decidir cuál será el modelo final para la fabricación del producto, es importante analizar detalladamente cómo influirá esta decisión en las posteriores etapas del ciclo de vida, así se evita el derroche de recursos.

3.5 Consideraciones en la etapa de pruebas del dispositivo

El proceso de pruebas es importante en todas las etapas del diseño y se puede utilizar para evaluar y validar el progreso. Por ejemplo, una vez que se ha desarrollado un concepto avanzado para la operación del sistema, se puede construir un modelo físico para evaluar cómo se comporta en escenarios específicos. El modelo de prueba se puede crear con detalles realistas para obtener información sobre interfaces, antropometría, ergonomía, dimensiones funcionales, elementos psicológicos (como señales y alarmas), etiquetado (como gráficos y texto), pantallas visuales, controles interactivos, retroalimentación,

indicaciones y seguridad. Este modelo también permite el análisis del trabajo mental del operador y la secuencia de uso. [11]

El modelo a construir de la versión *Ayúdame 2.0* se someterá a pruebas en el ambiente de trabajo, con la finalidad de recabar información de los distintos tipos de usuarios. Como lo menciona el artículo, será indispensable evaluar cada aspecto que interfiera con la usabilidad del dispositivo; los aspectos que menciona el artículo serán la base en la etapa de pruebas de *Ayúdame 2.0*, ya que enlista no solo los relacionados a la composición mecánica del robot, sino que engloba aspectos psicológicos, de seguridad e incluso visuales.

La usabilidad se evalúa a través de las interfaces del dispositivo, que son los elementos utilizados para operarlo, o bien, los que brindan información. La interacción y las opiniones del usuario se evalúan a través de escalas y encuestas tipo *Likert*, en aspectos que están condicionados a criterios personales. Las pruebas del dispositivo antes de su fabricación final dependen de un prototipo. Existen criterios internacionales para la evaluación biológica de productos y materiales médicos que se pueden encontrar en la norma *ISO 10993*. Las pruebas son esenciales para identificar debilidades, comportamientos, características y modos de falla del dispositivo. Las pruebas también se realizan para brindar información sobre la compatibilidad de funciones con otros equipos, la verificación y la validación del sistema.

Las pruebas son esenciales para obtener suficiente información para lograr mejoras en la satisfacción del usuario, la salud del paciente, el funcionamiento adecuado y la facilidad de mantenimiento. King y Fries ofrecen una descripción detallada de pruebas y métodos para el diseño de dispositivos médicos. Las pruebas más relevantes son las de hardware y software, funcionales, robustez, estrés, seguridad, regresión, biocompatibilidad de materiales, pruebas de esterilización y demostración de confiabilidad. La demostración de confiabilidad se realiza al final del ciclo de desarrollo del producto.

3.6 Consideraciones con base en los lineamientos de seguridad para robots de uso personal

La interacción personal con robots de servicio inmersos en entornos sociales es fundamental para determinar los parámetros y alcances de los sistemas robóticos. La seguridad durante la implementación es un elemento esencial para definir y orientar las posibilidades de interactividad. Es importante describir los lineamientos de seguridad en relación con los aspectos técnicos que involucran directamente a los usuarios. En general, es necesario identificar los peligros asociados al riesgo laboral cotidiano, independientemente de la presencia de robots, y atender los principios, normas y estandarizaciones que orienten al diseño del sistema.

A partir de la información anterior, el equipo de diseño ha considerado no solo identificar los peligros asociados al riesgo laboral cotidiano que involucren al robot, sino los peligros presentes antes de introducir el dispositivo a su ambiente de trabajo; así se pueden complementar ambos peligros y analizar su relación antes y después de introducir el robot. Así mismo, el equipo de diseño considera importante la documentación de los lineamientos de seguridad, peligros asociados con los distintos tipos de usuarios, los principios, normas y estandarizaciones del sector hospitalario en México, de esta forma la toma de decisiones y consideraciones de diseño estará sustentada en la usabilidad del dispositivo y la seguridad del usuario.

El documento toma en cuenta los principios de la norma *ISO 13482:2014*, que especifica los requisitos y pautas para el diseño seguro, las medidas de protección y la información para el uso de robots de cuidado personal. Se enfoca en los robots de servicio móviles y de asistencia. El objetivo es establecer medidas para garantizar la seguridad de los usuarios que comparten el espacio con los equipos. El ciclo de vida de los productos de diseño y las normas descritas comparten criterios para la configuración general de un robot, especialmente en las pruebas de uso, inspección, medición y análisis de resultados. La implementación funcional se rige por los siguientes aspectos.

3.6.1 Energía

Este rubro se relaciona con los riesgos durante el manejo de baterías y conexiones, el suministro energético durante el inicio y arranque del sistema, el potencial electrostático y el diseño de cubiertas para evitar contacto directo con sistemas eléctricos y electrónicos. También se considera la accesibilidad a baterías, componentes, circuitos y otros sistemas que puedan necesitar mantenimiento. Es necesario tener un espacio adecuado para almacenar el robot y recargar su energía. Otro riesgo es la interferencia electromagnética generada durante la activación y el uso, que puede afectar el desempeño de los equipos electromecánicos.

3.6.2 Movilidad

Los robots que pueden desplazarse en espacios y que tienen componentes articulados pueden activarse de manera no prevista, impactando estructuras, muebles, objetos ornamentales y, en el peor de los casos, a los usuarios. Es necesario tener un control adecuado de la velocidad de desplazamiento y movimiento de las estructuras, así como usar protecciones fabricadas con materiales y formas que reduzcan el riesgo de lesión. Los elementos de los sistemas deben estar asegurados, contenidos y diseñados para evitar contactos no previstos y desprendimientos no deseados.

3.6.3 Configuración formal del robot

El diseño del robot debe ser adecuado para mitigar lesiones en caso de una colisión con los usuarios debido a una falla técnica. Se debe integrar materiales acojinados o suaves y evitar el uso de geometrías con filos para reducir el riesgo de lesiones.

3.6.4 Diseño de interfaces

El sistema puede operarse a través de interfaces gráficas y naturales. Las primeras incluyen controles de mando a través de paneles digitales o mecanismos como botones y palancas. Las segundas utilizan reconocimiento de voz y comportamiento emocional o lenguaje corporal. Estos elementos deben ser comprensibles, legibles, fiables y eficaces para cumplir con los objetivos del sistema y las expectativas del usuario.

3.6.5 Ergonomía de los usuarios

Los aspectos físicos y mentales de los usuarios pueden verse alterados durante la interacción con sistemas robóticos. Para los aspectos físicos, el diseño debe considerar la antropometría para reducir los riesgos físicos por posturas que afecten el sistema musculoesquelético. En términos de ergonomía cognitiva, es necesario considerar criterios culturales, sociales, emocionales, nivel educativo y de edad de los usuarios para entender cómo perciben y responden al comportamiento del sistema.

Se han establecido métricas para evaluar los aspectos negativos que emergen durante la interacción, como la Escala de Actitudes Negativas hacia los Robots (NARS) que es un indicador para evaluar la interacción a corto y largo plazo entre humanos y sistemas. Otro elemento importante respecto a la ergonomía cognitiva es el diseño formal, en donde se han realizado estudios como el propuesto por Masahiro Mori llamado el *Valle Inquietante*, que se refiere al concepto de estética en el diseño y el rechazo hacia robots con forma muy cercana a lo humano, antropomórficos.

3.6.6 Error humano

Existen varios factores de riesgo en la interacción con los usuarios de robots personales, como el desconocimiento del sistema, el mal mantenimiento o la reparación inadecuada. Los robots deben ser diseñados para reducir posibles daños causados por exposición de sus componentes. Es importante integrar botones de emergencia, topes de protección, controles de velocidad y estabilidad, así como desarrollar manuales de usuario y técnico de mantenimiento. Estos aspectos se centran en el hardware y descuidan el software y las arquitecturas robóticas. También se deben considerar los riesgos derivados de la interacción en los espacios donde se implementan los robots, así como las medidas sanitarias emergentes.

El artículo logra plasmar los principios de la norma *ISO 13482:2014*, desglosándolos y retomando ideas principales. Muchos de los aspectos que involucran la implementación funcional de los robots ya se habían considerado en el modelo virtual de *Ayúdame 2.0*, sin embargo, hay otros que de manera intuitiva se habían planteado, mas no se ha formalizado su implementación; por ejemplo, los aspectos relacionados con la ergonomía cognitiva de los usuarios, el desarrollo de los manuales de uso y mantenimiento, etc. Por otro lado, existen aspectos que no solo involucran al diseño mecánico del robot, sino que se complementan con la parte eléctrica-electrónica, dichos aspectos se discutirán y considerarán con el equipo de control del proyecto.

4 Identificación de los parámetros de entrada del proyecto

El nuevo equipo de diseño se encargó de identificar los parámetros de entrada con los que les fue entregado el proyecto, esto con la finalidad de priorizar su implementación en el modelo a construir.

A continuación, se presentan enlistados los requerimientos que el anterior equipo de diseño (conformado por diseñadores industriales) y el líder del proyecto, establecieron de acuerdo con la identificación de las necesidades de los usuarios y con la investigación realizada en el capítulo 3 *Identificación de las consideraciones de un robot de servicio para el área médica*, basada en el artículo de divulgación científica *Consideraciones en el diseño de robots para la atención médica en el mundo post COVID-19*.

4.1 Requerimientos establecidos para el robot Ayúdame 2.0

1. El sistema contará con 3 niveles de charolas en las cuales se transportarán insumos.
 - Este requerimiento se estableció en base a las consideraciones en relación con los usuarios. Como se menciona en el artículo, *“Los productos biomédicos tienen como usuario final al paciente, pero también se deben considerar a los técnicos de instalación, instructores y personal médico que operan el dispositivo. Estos usuarios tienen la capacidad de influir en los procedimientos, configuración y mantenimiento del dispositivo”*. En este caso, los usuarios médicos determinaron de manera cualitativa que los 3 niveles de charolas son suficientes para transportar los insumos accesibles a los pacientes.
2. El sistema tendrá por lo menos 1 espacio de almacenamiento, al cual solo puede acceder el personal médico, es decir, es inaccesible para otros usuarios.
 - Igual que con el requerimiento anterior, este se estableció en base a las consideraciones de los usuarios médicos. Estos requerimientos fueron expresados por los usuarios en una encuesta, durante la etapa de recopilación de información sobre el desarrollo del producto.
3. El sistema contará con un botón de paro de emergencia en la parte superior.
 - En este caso, se estableció este requerimiento de acuerdo con las consideraciones en la usabilidad del dispositivo y el diseño de interfaces: *“[...] la seguridad en los dispositivos médicos está relacionada con la usabilidad, ya que se centra en minimizar o reducir los posibles errores durante el uso y el mantenimiento.”*, *“Las interfaces gráficas incluyen controles de mando a través de paneles digitales o mecanismos como botones y*

palancas”. Es decir, el botón de paro de emergencia es una interfaz gráfica del dispositivo, que tiene como objetivo preservar la seguridad de los usuarios ante posibles errores durante su uso o mantenimiento.

4. El sistema tendrá una *tablet* en la parte superior, que servirá como *HMI*.
 - A partir del argumento del requerimiento anterior, específicamente en relación con el diseño de interfaces, se decidió utilizar una *tablet* para cumplir con el siguiente fin: “*El sistema puede operarse a través de interfaces gráficas y naturales. Las primeras incluyen controles de mando a través de paneles digitales o mecanismos como botones y palancas. Las segundas utilizan reconocimiento de voz y comportamiento emocional o lenguaje corporal. Estos elementos deben ser comprensibles, legibles, fiables y eficaces para cumplir con los objetivos del sistema y las expectativas del usuario*”. La *tablet* puede desempeñar las funciones de ambos tipos de interfaces: es capaz de contener controles de mando a través de un panel digital, y simultáneamente, es capaz de ser el medio para interactuar con un sistema de reconocimiento de voz, o de expresarle al usuario comportamientos emocionales a través de imágenes.
5. El sistema contará con un sistema de iluminación que indique su estado de operación.
 - En base a las consideraciones en la usabilidad del dispositivo, en el artículo también se menciona lo siguiente: “*el dispositivo debe indicar de inmediato un fallo o un riesgo en su operación mediante señales visuales o auditivas*”. Es por ello que se estableció implementar un sistema de iluminación que indique el estado de operación del robot.
6. El sistema respetará la forma definida en el modelo conceptual virtual (*Ilustración 13*).
 - Este requerimiento se concibe a partir de las emociones y sentimientos que emite la geometría y el código cromático del modelo virtual a los usuarios. Aunque puede percibirse como un aspecto subjetivo, existen argumentos teóricos relacionados con el diseño gráfico que afirman que el éxito de un producto no radica solo en su utilidad básica sino en el significado que cobra en la vida de los usuarios. Los diseñadores utilizan el color, la luz, las texturas y el sonido para modular las sensaciones que transmite un producto, estos aspectos influyen en la experiencia del usuario. [14]
7. El sistema se construirá con las dimensiones establecidas en el modelo conceptual virtual, con una tolerancia limitada para casos extremos.
 - Este requerimiento se estableció a partir de un análisis ergonómico realizado, de igual forma este aspecto se menciona en las consideraciones en la ergonomía de los usuarios: “*el diseño debe considerar la antropometría para reducir los riesgos físicos por posturas que afecten el sistema musculoesquelético*”. En adición a esto, el análisis dimensional no solo se basó en la ergonomía del usuario, sino también se consideró evitar conflictos con las normas que rigen las áreas hospitalarias en México.

8. El sistema es capaz de soportar perturbaciones causadas por los usuarios y el ambiente, específicamente las relacionadas con posibles choques al navegar o con que los usuarios lo manipulen.
 - Este requerimiento se estableció a partir de las consideraciones de diseño relacionadas con los lineamientos de seguridad para robots de uso personal, específicamente las consideraciones vinculadas con la movilidad del robot, en el artículo se menciona lo siguiente: “*Los elementos de los sistemas deben estar asegurados, contenidos y diseñados para evitar contactos no previstos y desprendimientos no deseados*”. Por otro lado, las consideraciones relacionadas con la configuración formal del robot indican que: “*El diseño del robot debe ser adecuado para mitigar lesiones en caso de una colisión con los usuarios debido a una falla técnica*”.

Analizando los anteriores requerimientos, se puede resumir lo siguiente: se requiere construir el modelo conceptual del robot respetando las dimensiones del modelo virtual, priorizando la resistencia del sistema, que tenga características exteriores que permitan transportar enseres en al menos 4 espacios de almacenamiento (3 de ellos en charolas y 1 accesible solo por el personal médico), que esté acondicionado para la implementación de la electrónica interna, considerando específicamente una *tablet* y un botón de paro de emergencia en la parte superior, además de un sistema de iluminación que indique su estado de operación.

Por lo tanto, el objetivo de los ingenieros mecatrónicos en el proyecto es fabricar dicho modelo conceptual, es decir, hacer tangibles las ideas implementadas y desarrolladas por el equipo de diseñadores industriales. No obstante, en aquel momento, el proyecto se limitaba únicamente a propuestas e ideas, ya que no se habían analizado ni considerado los recursos y oportunidades que tenía el equipo para fabricar el modelo.

A mediados de 2022 (entre los meses de junio y julio), se une al proyecto el Doctor en Ciencias de la computación y Maestro en Diseño Industrial, Mauricio Enrique Reyes Castillo, como director del equipo de diseño. Gracias a la vinculación que existe entre el Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS) y el Centro de Investigaciones de Diseño Industrial (CIDI), el equipo de diseño de *Ayúdame* se pudo alojar en el CIDI; permitiéndole utilizar las instalaciones y laboratorios para manufacturar el modelo. Al mismo tiempo, una diseñadora industrial se une al equipo.

5 Análisis de las fortalezas y debilidades para el desarrollo del proyecto

Después de haber realizado una profunda investigación sobre los aspectos y consideraciones de diseño de un robot de servicio para el sector hospitalario, se decidió llevar a cabo un análisis FODA parcial del proyecto. Realizar un análisis FODA permite mejorar los procesos y planificar el crecimiento de un proyecto. Especialistas en Administración afirman que hay tres razones principales por las que es importante realizar un análisis FODA: permite identificar las fortalezas y debilidades de un proyecto, ayuda a encontrar oportunidades y a planear estrategias para aprovecharlas, y proporciona información para anticipar y prepararse para amenazas potenciales. [15]

Se decidió llevar a cabo este análisis parcial con la finalidad de identificar únicamente las fortalezas y debilidades del equipo de diseño, de esta forma, sabiendo en qué era bueno cada quién, qué tan comprometidos estaban y lo que podían aportar, era posible establecer una estrategia de trabajo que agilizara el desarrollo del proyecto. Por otro lado, para identificar los recursos con los que contaba el equipo, por ejemplo, identificar qué máquinas, herramientas, instalaciones, recursos económicos, tiempo, etc. podían interferir en el desarrollo del mismo, además dichos factores determinarían la toma de decisiones en el diseño, ya que, al tratarse de la fabricación del modelo conceptual, no solo se implementarían las ideas más viables, hablando en términos ingenieriles, sino que se debían considerar otras variables que permitieran su ejecución física. Se decidió únicamente identificar y analizar los factores internos del equipo (fortalezas y debilidades) por el alcance de este, es decir, el equipo de diseño ya tenía establecido lo que se tenía que lograr (construcción del modelo conceptual); los factores externos difícilmente interferirían con el objetivo final del equipo.

En su momento, este análisis se hizo de manera superficial, es decir, sin ninguna formalidad. En las reuniones con el equipo de diseño se comentaban los factores que interferían en ese momento en el desarrollo proyecto. No obstante, para el presente trabajo, se decidió elaborar el análisis de los factores internos siguiendo las recomendaciones y metodologías de diferentes fuentes, basadas en el fundamento teórico de su creador, Albert Humphrey; además, con esta herramienta se pueden identificar oportunidades de mejora para el futuro desarrollo del proyecto.

5.1 Factores internos

Los factores internos de una empresa o proyecto se refieren a todas las cosas que están dentro de la empresa y bajo su control, sin importar si son tangibles o intangibles. Estos factores se agrupan en fortalezas y

debilidades. Si un elemento trae efectos positivos a la empresa, se considera como fortaleza. Si un factor impide el desarrollo de la empresa, es una debilidad. [16]

5.1.1 Fortalezas del proyecto

- ***Multidisciplinariedad del equipo***

El equipo de diseño se conforma de 2 ingenieros mecánicos, 1 diseñadora industrial y el director del equipo. La multidisciplinariedad del equipo permite aportar propuestas desde diferentes puntos de vista, evita sesgos cognitivos, además la experiencia del director se ha traducido en acciones objetivas que beneficiaron la agilización del desarrollo de tareas. A pesar de que el equipo se centró directamente en el diseño mecánico del dispositivo, la experiencia y conocimientos de los ingenieros mecánicos aportó valor para tomar decisiones que involucraban factores de seguridad en la estructura interna y en el posicionamiento futuro de la electrónica del robot. Por otro lado, los diseñadores industriales complementaban el diseño externo aportando ideas que involucran la estética y usabilidad del dispositivo.

- ***Instalaciones***

Gracias a la vinculación existente entre el IIMAS y el CIDI, el equipo de diseño tiene a su disposición herramientas, laboratorios, máquinas, mobiliario, etc. sin las cuales el proyecto no se pudo haber desarrollado. Específicamente, se cuenta con herramientas como taladro de mano, *dremel*, desatornilladores, etc., con laboratorios cuentan con impresoras 3D, además, el equipo tiene la libertad de utilizar los laboratorios de laminado, metalmecánica, maderas y plásticos.

- ***Disponibilidad de tiempo***

Los alumnos involucrados en el proyecto estaban realizando su servicio social, por lo tanto, estrictamente tenían que involucrarse en el proyecto al menos 4 horas al día, es decir, se contaba la disponibilidad de 3 alumnos todos los días; lo cual se traduce en un trabajo continuo.

- ***Comunicación***

Se establecieron canales de comunicación digitales que permitían enterarse de avances y tareas pendientes, esto benefició a conseguir una sinergia en el equipo, que resultó en distribuir correctamente las tareas con relación a los conocimientos y habilidades de cada uno.

- ***Estructura organizacional***

La estructura del equipo es simple pero efectiva. El director se encuentra como líder del equipo, y todos los alumnos tienen la misma jerarquía, todos tienen la libertad de cuestionar y proponer ideas.

5.1.2 *Debilidades del proyecto*

- *Recursos económicos*

El proyecto *Ayúdame* es un desarrollo tecnológico financiado, no obstante, en el momento en el que se comienza con la fabricación del modelo conceptual, a mediados del 2022; el líder del proyecto especificó que se contaba con recursos económicos limitados, por lo tanto, el director del equipo de diseño priorizó el máximo ahorro. Esta es la razón principal por la cual muchas decisiones tomadas en el rediseño del modelo conceptual se llevaron a cabo con materiales y dispositivos donados.

- *Recursos humanos limitados*

El equipo de diseño se conformó por 4 personas; no obstante, para la magnitud del proyecto, los recursos humanos fueron limitados. En distintas ocasiones se asignaban tareas que se tenían que llevar a cabo fuera del horario establecido para poder avanzar. Con una mayor cantidad de colaboradores era posible delegar más tareas con la finalidad de avanzar en paralelo.

- *Planeación del equipo*

La falta de recursos económicos y humanos influyó en la deficiente planeación del equipo de diseño. No existía un calendario de actividades, un diagrama de seguimiento o una ruta crítica de tareas para desarrollar el proyecto. Esto resultó repetidamente en desperdicio de tiempo, incluso en repetir tareas por no haber previsto resultados.

6 Definición y análisis del diseño modelo conceptual de la solución

6.1 Definición de los subsistemas del robot

A continuación, se describe el análisis del diseño conceptual elegido, realizado por los ingenieros mecánicos al integrarse al proyecto. Para llevar a cabo el análisis del modelo, se optó por definir y entender la arquitectura del producto, basándose en la metodología de Karl Ulrich.

En ingeniería de diseño, la arquitectura de un producto se define como el trazo de los componentes funcionales a los componentes físicos. Dentro de un producto, se dice que los componentes están acoplados, si un cambio hecho en un componente requiere de la modificación de otro.

Ulrich definió dos tipos de arquitecturas para diseñar productos, la arquitectura modular (componentes desacoplados) y la arquitectura integral (componentes acoplados). La arquitectura modular permite que cada elemento funcional de un producto sea cambiado de manera independiente, mientras que una arquitectura integral requiere cambios en varios componentes para modificar un elemento funcional. Esto significa que un producto con arquitectura modular es más fácil de actualizar y modificar en comparación con un producto con arquitectura integral.

La ventaja de la arquitectura modular es que permite una mayor flexibilidad en el diseño y la fabricación de productos. Cada componente puede ser diseñado y producido de manera independiente, lo que facilita el proceso de desarrollo y mejora. Además, permite a los fabricantes y diseñadores reutilizar componentes existentes en nuevos productos, lo que reduce los costos y aumenta la eficiencia.

Sin embargo, una desventaja de la arquitectura modular es que puede requerir más tiempo y esfuerzo para integrar los componentes en un producto final. Además, puede ser más difícil de mantener y reparar debido a la complejidad de las conexiones entre los componentes.

En cambio, una arquitectura integral es más simple, fácil de entender y mantener. Sin embargo, requiere cambios en varios componentes para modificar un elemento funcional, lo que puede ser costoso y consumidor de tiempo.

En resumen, la arquitectura modular es más adecuada para productos que requieren un alto grado de flexibilidad y actualizaciones, mientras que la arquitectura integral es más adecuada para productos que requieren una mayor estabilidad y fiabilidad. [17]

Se decidió utilizar la arquitectura modular tanto para analizar el modelo conceptual, como para planear y prever su manufactura, ya que como se mencionó anteriormente, este tipo de arquitectura es adecuada para los productos que se estarán actualizando y modificando constantemente, tal es el caso de *Ayúdame 2.0*. Las actualizaciones y modificaciones que se prevén hacer constantemente se sustentan en dos factores principales, uno de ellos es el constante cambio en el equipo de diseño, es decir, normalmente se conforma por estudiantes que permanecen 6 meses en el proyecto, lo cual genera modificaciones según la conformación del equipo; por otro lado, por las limitaciones económicas y de equipo de fabricación, que no permiten implementar cualquier solución propuesta por el equipo de diseño.

Antes de dividir al modelo conceptual de *Ayúdame 2.0* en subsistemas, se definirá el concepto de *módulo* con la finalidad de entender sus características y su relación con el sistema principal.

Un *módulo* es un bloque, componente o sub-ensamble construido de manera independiente de un sistema más grande, con interfaces bien definidas. Un módulo puede ser removido de un producto como una unidad y el equipo seguirá funcionando sin las funciones que realizaba ese módulo. Es importante mencionar que los módulos son estructuralmente independientes, lo que permite ser fácilmente desmontado y remplazado, sin afectar al funcionamiento del resto del sistema. [17]

A continuación, se especifican los módulos o subsistemas en los que se decidió dividir el modelo conceptual de *Ayúdame 2.0*. El orden en el que se presentan es relevante, ya que se utilizó la estrategia *bottom-up* (de abajo hacia arriba) para procesar al modelo, es decir, se comenzó a analizar desde la parte inferior, ya que se trataba de la parte motriz, la base del robot móvil.

6.1.1 Módulo 1 – Sistema motriz

Funciones que desarrolla – Se encarga de mover a todo el robot.

Descripción – Se prevé que esté compuesto por motores, caja de engranes, llantas y una base que soporte estos componentes en conjunto. Este módulo debe de funcionar independientemente de los demás; es decir, se espera que se pueda mover sin necesidad de estar anclado a los demás módulos.

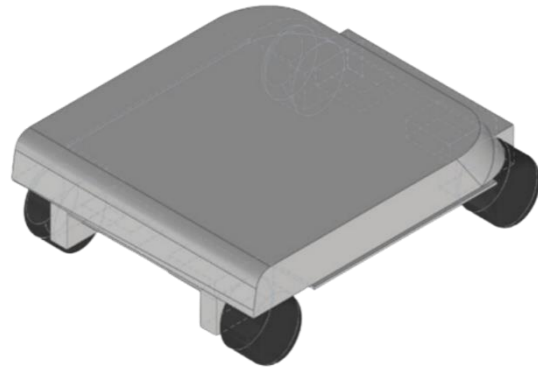


ILUSTRACIÓN 20. MÓDULO 1 - SISTEMA MOTRIZ.

6.1.2 Módulo 2 – Estructura vertical

Funciones que desarrolla – Se encarga de aportarle rigidez y altura al robot, además sirve como soporte de algunos componentes de otros módulos.

Descripción – Se trata de la estructura interna del robot. Se encargará de mantener robusto al robot, evitando excesivos riesgos de colapso o desarme al operar. Se prevé construirlo con materiales duros, de fácil obtención comercial y económicamente asequibles de acuerdo con el presupuesto del proyecto.

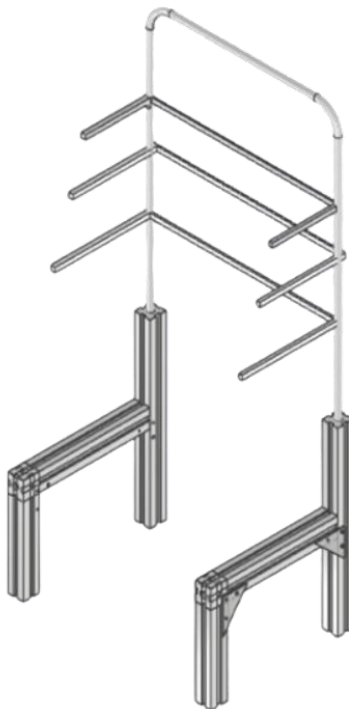


ILUSTRACIÓN 21. MÓDULO 2 - ESTRUCTURA VERTICAL.

6.1.3 Módulo 3 – Carcasa

Funciones que desarrolla – Se encarga de envolver la estructura interna del robot, además le aporta estética contextual al entorno y evita el rechazo del usuario por tecnofobia.

Descripción – Se trata de las superficies externas del robot, aquellas que tendrán contacto directo con el usuario. Por su geometría, colores y requerimientos del usuario, se prevé manufacturarlas con polímeros de grado médico.

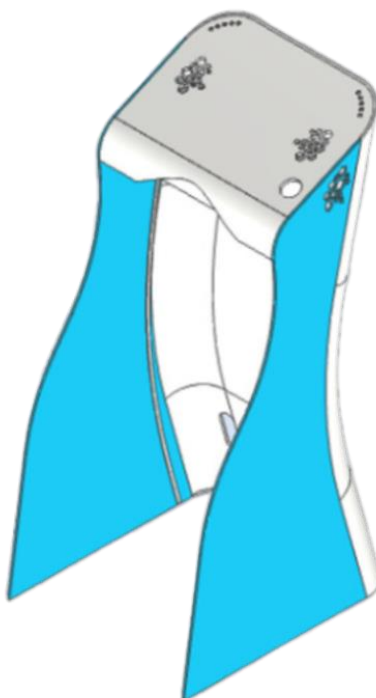


ILUSTRACIÓN 22. MÓDULO 3 – CARCASA.

6.1.4 Módulo 4 – Almacenamiento

Funciones que desarrolla – Se encargan de almacenar los enseres, alimentos y/o provisiones que se requieren transportar.

Descripción – Se trata de las charolas que almacenarán los enseres que podrán tomar directamente los pacientes, y de los cajones que almacenarán equipo y/o herramientas al que solo podrá acceder personal autorizado.

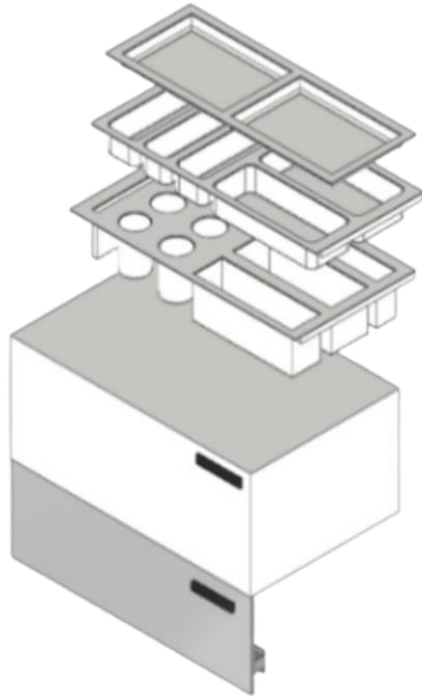


ILUSTRACIÓN 23. MÓDULO 4 - ALMACENAMIENTO.

6.2 Principales deficiencias identificadas en el diseño conceptual preliminar

Después de haber analizado y seccionado el modelo conceptual preliminar de *Ayúdame 2.0*, se identificaron las principales deficiencias en cada uno de los módulos, pensando y previendo la futura manufactura del robot. Para los ingenieros mecatrónicos, tener un gemelo digital era la guía para comenzar con la planeación de la fabricación del robot, ya que de esta manera se podían tomar las decisiones sobre qué maquinaria se utilizaría, qué herramientas eran necesarias, cuánto tiempo iba a requerir fabricarla, etc.

En esta etapa se realizaron reuniones entre el equipo de ingenieros (integrantes que acababan de ingresar al proyecto) y el antiguo equipo de diseñadores industriales (integrantes que estaban a punto de salir del proyecto). En dichas reuniones se realizaban cuestionamientos acerca de los parámetros de entrada explicados en la sección *Identificación de los parámetros de entrada del proyecto*, se discutía acerca de la elección de materiales, y sobre cómo habían pensado los diseñadores industriales en la fabricación del modelo elegido.

A continuación, se describen y explican las principales deficiencias que se identificaron en cada uno de los módulos que constituyen al modelo conceptual de *Ayúdame 2.0*.

6.2.1 Deficiencias identificadas en el módulo 1 – Sistema motriz

Como se observa en la *Ilustración 24*, en el modelo virtual solo se había diseñado una base que simulaba una estructura metálica en la cual iría montado el sistema de transmisión y tracción, es decir, no se habían seleccionado los motores, llantas, ruedas, cajas de engranes, materiales de la base, etc. Era indispensable tener definidos los componentes que conformarían al sistema motriz, ya que sin ellos, no se podía modelar la base sobre la que iría montado todo el sistema, y la *ranura* que ensamblaría a este módulo con otros. Por otro lado, definir el tipo de sistema de tracción y transmisión permite realizar una estimación del peso que los motores podrán movilizar, es decir, sin esta información no era pertinente continuar con el desarrollo de otro módulo del sistema.

Por lo tanto, se sugirió al líder del proyecto, primeramente, definir e incluso adquirir los elementos que conformarían al sistema motriz, para así modelar la base sobre la cuál irían montados, los elementos necesarios para montar dichos componentes (desde tornillos, herramientas, etc.), e igualmente modelar la cubierta que permitiera ocultar la electrónica interna del sistema, incluso diseñar cómo se iba a unir este módulo con el módulo 2 (estructura vertical).

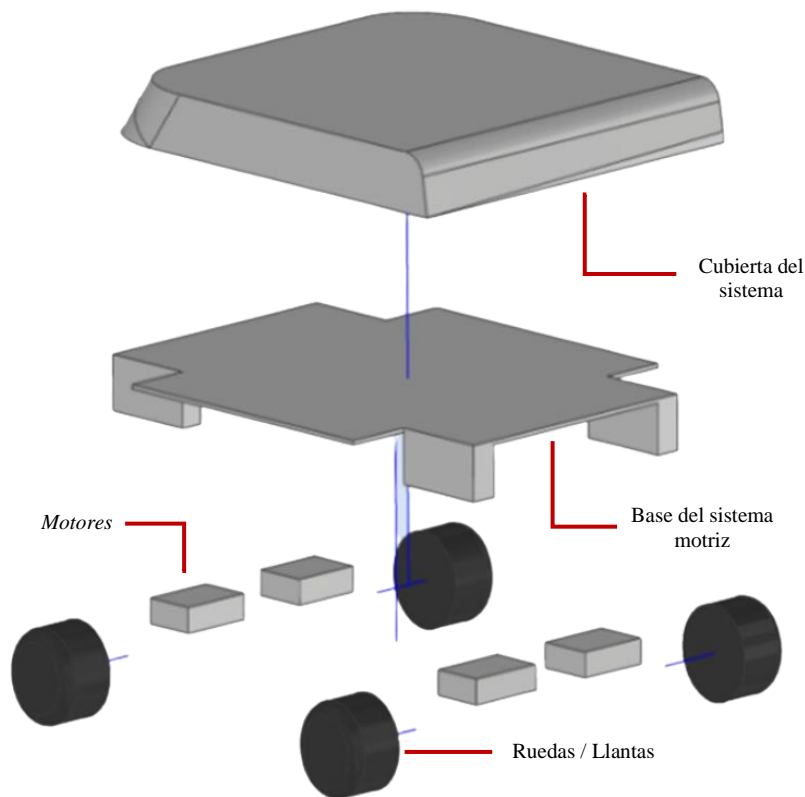


ILUSTRACIÓN 24. MÓDULO 1 - SISTEMA MOTRIZ, VISTA EXPLOSIONADA.

6.2.2 Deficiencias identificadas en el módulo 2 – Estructura vertical

En la *Ilustración 25* se observan de forma agrupada los principales componentes de este módulo. Los principales cuestionamientos que se le plantearon a los diseñadores industriales fueron los siguientes:

- ¿En qué materiales habían pensado para desarrollar esta estructura?
- ¿Cómo se ensamblarían las partes entre sí?
- ¿Cómo se iba a ensamblar esta estructura al módulo del sistema motriz?

La propuesta de material para las articulaciones “h”, el marco vertical y las porta-charolas era el aluminio, por las razones que se describieron en la sección *Descripción del modelo conceptual de Ayúdame 2.0*. Sin embargo, en los métodos de ensamble se identificaron algunas deficiencias. En primer lugar, se propuso unir las porta-charolas con el marco vertical por medio de soldadura, sin embargo, en los procesos de soldadura el aluminio es bien conocido por ser difícil de soldar; ya que muchas de las mismas propiedades que lo hacen un material deseable a menudo pueden convertirse en inconvenientes. Por ejemplo, el aluminio tiene un punto de fusión significativamente más bajo en comparación con el acero, esto combinado con la conductividad térmica aumentada del aluminio, hace que sea más fácil de quemar el metal durante el proceso de soldadura, especialmente al trabajar con chapa de aluminio. Además, el alambre alimentador de aluminio es más suave en comparación con otros metales, lo que puede causar problemas de enredamiento durante la soldadura. Igualmente, cabe mencionar que el proceso de soldadura calienta el metal a una temperatura mucho mayor que el tratamiento térmico, haciendo que el aluminio pierda algunas de sus propiedades mecánicas. Por otro lado, las formas más comunes de soldadura de aluminio son la soldadura por arco de tungsteno con gas (TIG), la soldadura por arco metálico con gas (MIG) y la soldadura por rayo láser [18]; estos métodos representaban un problema para el equipo de diseño por dos razones: requieren a un operador experimentado y el proyecto no contaba con el equipo para llevarlo a cabo. Es cierto que se pudo haber invertido para realizarlo con agentes externos, no obstante, por la limitante económica era preferible hallar una variante en el diseño.

Otra deficiencia hallada en el modelo conceptual fue el método de ensamble entre las articulaciones “h” y el marco vertical; el equipo de diseñadores industriales pensaba en insertar las varillas verticales, por las que estaba constituido el marco vertical, en el agujero central de los perfiles estructurales de aluminio, no obstante, se presentaba un conflicto al desarrollar esta solución. Se tenían que adquirir varillas con un diámetro que encajara al ras del agujero del perfil de aluminio, lo cual no fue posible al contactar con los proveedores del proyecto. Se propuso implementar una sujeción mecánica por medio de un perno transversal a la varilla y al perfil, atravesándolos a ambos, sin embargo, no fue aprobada por el líder del proyecto. Finalmente, al no hallar en conjunto una solución viable y aceptable por todos los miembros del

equipo de diseño, se optó por diseñar otra alternativa y comparar ambas posteriormente, es decir, ni se aceptó ni se rechazó esta solución, momentáneamente.

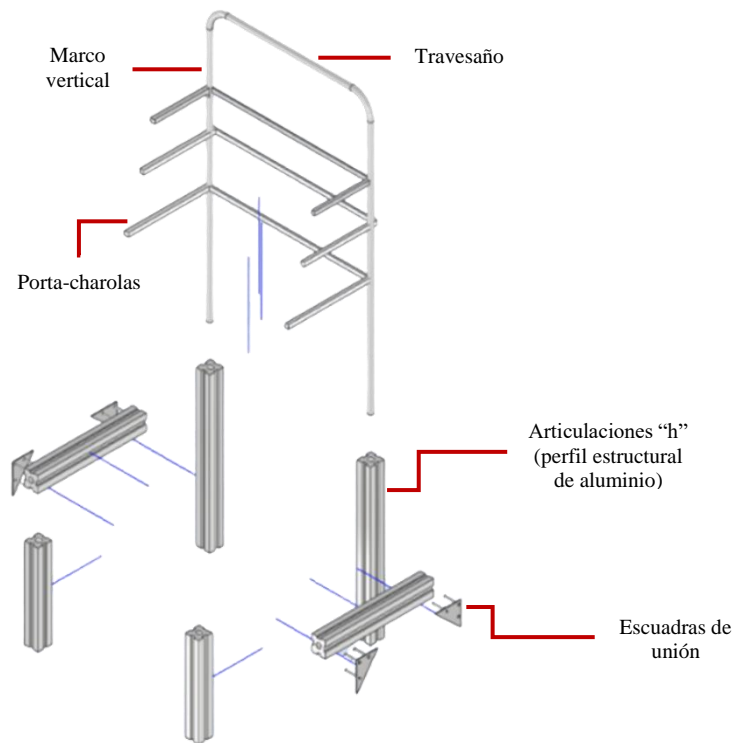


ILUSTRACIÓN 25. MÓDULO 2 - ESTRUCTURA VERTICAL, VISTA EXPLOSIONADA.

En adición a lo anterior, cabe mencionar que se tenía planeado que el travesaño del marco vertical sirviera como soporte del almacenamiento de la electrónica superior, toda aquella electrónica que se requiere ubicar cerca del panel superior de la carcasa, específicamente donde iría conectada la *tablet*, algunos LEDs indicadores, el botón de paro de emergencia, etc. Igualmente, se cuestionó si la geometría de este travesaño (sección transversal circular) serviría como soporte para el plano que alojaría dicha electrónica. Este factor no era determinante para modificar el marco vertical, no obstante, se tenía que considerar y probar en el modelo virtual para observar cómo se comportaría físicamente; en caso de que no funcionara, sí se pretendía cambiar la estructura del marco.

Por último, al no haberse presentado ninguna solución para unir a este módulo con el módulo 1 (sistema motriz), se le asignó al equipo de ingenieros mecatrónicos diseñar dicho ensamble. Sin embargo, para diseñar este acople entre módulos era indispensable haber definido y modelado por completo el sistema motriz.

6.2.3 Deficiencias identificadas en el módulo 3 – Carcasa

La carcasa del modelo conceptual fue uno de los aspectos que convenció a todo el equipo de diseño, especialmente al líder del proyecto (*Ilustración 26*). De hecho, la geometría de los paneles era prácticamente inamovible; el líder del proyecto especificó que era determinante mantener esa forma.

Se observó que en el modelo conceptual no se habían considerado los métodos de ensamble de los paneles que conforman la carcasa del robot; por lo tanto, era un factor a atender. Se requería planear y diseñar la ubicación de las sujeciones, materiales requeridos, e incluso visualizar cómo interferirían estas sujeciones con la estética externa del robot.

Por otro lado, existía incertidumbre en la fabricación del panel posterior. Como se mencionó anteriormente, los diseñadores industriales propusieron fabricarlo por medio de un proceso de termoformado, sin embargo, ningún integrante del equipo había trabajado con dicho proceso en esa escala. Esto representaba un riesgo de derroche de recursos, ya que, si se compraba el material, se experimentaba con el proceso y la pieza no quedaba como se esperaba, significaría no solo pérdida de dinero, sino también de tiempo. No obstante, en aquel momento no se tenía otra alternativa de fabricación; era un factor a considerar antes de comenzar con la manufactura de los demás elementos de este módulo.

Por otro lado, se planteó el siguiente cuestionamiento: ¿Cómo se accedería a la electrónica inferior en caso de que se tuviera que realizar mantenimiento superficial? La electrónica inferior eran todos los componentes que requerían estar cerca del sistema motriz (como la batería, drivers para los motores, controladores, etc.). En el modelo conceptual preliminar este aspecto no se había considerado, no existía un compartimiento para alojar dichos componentes, además, por la parte de enfrente del robot no era posible, ya que se encontraban los cajones de almacenamiento (módulo 4). Una propuesta de los ingenieros mecatrónicos fue considerar un acceso a través del panel posterior de la carcasa, es decir, que este panel tuviera alguna compuerta al que solo pudiera acceder el personal de mantenimiento.

Por último, como se mencionó anteriormente, el equipo de control del proyecto (que se encargaba de gestionar la electrónica del robot) había establecido como requerimiento del diseño, contar con un espacio para almacenar la electrónica inferior y superior del robot. Para la versión actual del modelo conceptual de *Ayúdame 2.0* no se había considerado. Este era otro aspecto para atender en el rediseño del modelo conceptual. Con el ingreso de los ingenieros mecatrónicos comenzó a haber una sinergia con los demás equipos del proyecto, su multidisciplinariedad aportaba cuestionamientos y consideraciones de diseño no previstas anteriormente.

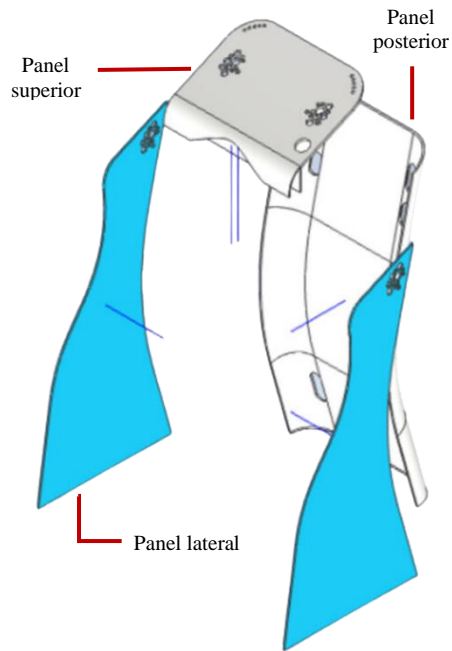


ILUSTRACIÓN 26. MÓDULO 3 - CARCASA, VISTA EXPLOSIONADA.

6.2.4 Deficiencias identificadas en el módulo 4 – Almacenamiento

Respecto a este módulo solo se identificó una deficiencia en el diseño, la sujeción de las charolas. Sí se había diseñado el soporte de las charolas, no obstante, el robot estará en constante movimiento ¿Cómo se aseguraría la sujeción de las charolas a su soporte? Este era otro factor a considerar en el rediseño y fabricación del modelo conceptual.

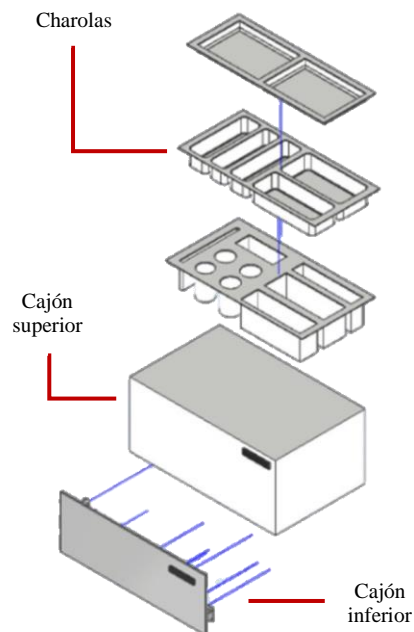


ILUSTRACIÓN 27. MÓDULO 4 - ALMACENAMIENTO, VISTA EXPLOSIONADA.

7 Soluciones ejecutadas para el rediseño del modelo conceptual del robot

7.1 Diseño e integración del sistema motriz del robot

Después de haber analizado la arquitectura del modelo conceptual de *Ayúdame 2.0*, el líder del proyecto solicitó comenzar con la planeación de la manufactura del modelo. Como se mencionó en la sección *Deficiencias identificadas en el módulo 1 – Sistema motriz*, se sugirió comenzar con la elección de los componentes que conformarían al sistema motriz, es decir, los motores, cajas de transmisión, llantas, etc., para que posteriormente se modelara la base sobre la que irían montados dichos componentes, la cubierta de la electrónica del sistema motriz y por último, diseñar la ranura con la que se ensamblaría el módulo 1 con el 2.

En resumen, la ruta de trabajo general para fabricar el módulo 1 era la siguiente.

1. Decidir qué componentes que conformarían al sistema motriz.
2. Diseñar la base sobre la cuál irían montados los componentes adquiridos.
3. Diseñar la cubierta de la electrónica que conforma al sistema motriz.
4. Diseñar la ranura que une los módulos 1 y 2.

El líder del proyecto decidió adquirir un sistema motriz armado, esto es, un sistema que se puede adquirir en tiendas de electrónicas online, que normalmente incluyen los motores, llantas, cajas de transmisión e incluso los *drivers* que utilizan los motores para su control. La idea principal era adquirir este sistema y realizar las adecuaciones pertinentes sobre él, con la finalidad de acoplarlo al modelo conceptual. El sistema que se planeaba adquirir se muestra a continuación (*Ilustración 28*).

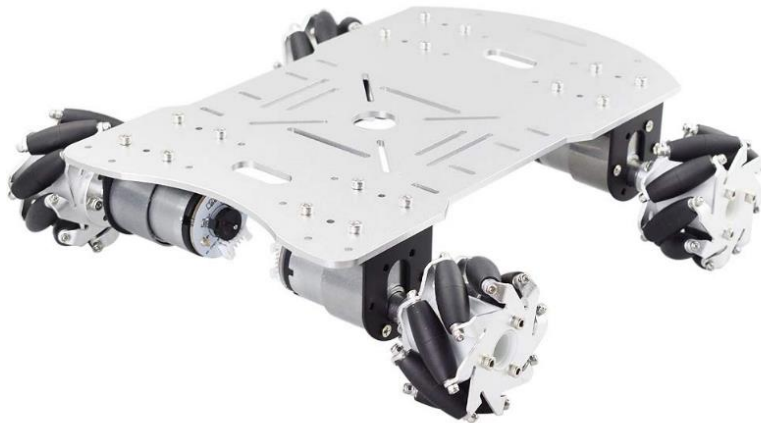


ILUSTRACIÓN 28. PROPUESTA 1 DEL SISTEMA MOTRIZ.

A primera vista el sistema lucía bien, no obstante, se investigaron sus especificaciones y se concluyeron las siguientes deficiencias:

1. **Discrepancia dimensional** - Las dimensiones del sistema eran muy pequeñas respecto a las del modelo conceptual, es decir, diseñar una adecuación de este sistema a las dimensiones con las que se requería construir *Ayúdame 2.0*, era prácticamente inviable.
2. **Potencia insuficiente** – El torque nominal que proveían los motores era de 5 [kg·cm] y la velocidad nominal era de 250 [rpm], sin necesidad de desarrollar un cálculo, era evidente que la potencia de estos motores sería insuficiente para mover al robot conceptual, ya que, de acuerdo con hipótesis basadas en las especificaciones del modelo de *Ayúdame 1.0* y las dimensiones propuestas en el modelo conceptual de *Ayúdame 2.0*, se preveía que el robot por sí solo pesara más de 15 kg, sin contabilizar la carga de trabajo.
3. **Resistencia deficiente** – Las debilidades previamente descritas reflejan que el sistema que se quería adquirir no estaba diseñado para un proyecto de la magnitud de *Ayúdame 2.0*. Por lo tanto, era evidente que la resistencia de sus materiales, principalmente de la base y de los ejes de las llantas sufrirían una deformación plástica, es decir, irreversible, en caso de que este sistema fuera expuesto a las cargas que debería soportar *Ayúdame 2.0*.

A pesar de que este sistema motriz fue definitivamente descartado por el equipo de ingeniería del proyecto, se destacó su sistema de movimiento omnidireccional por medio de ruedas *mechamum*.

En marzo de 2022, uno de los académicos involucrados con el desarrollo del proyecto, el Dr. Mario Peña Cabrera, tuvo la posibilidad de donar un sistema motriz que pertenecía a un antiguo proyecto del IIMAS. Anteriormente, este sistema motriz fue capaz de cargar y mover a una persona sobre él, por lo tanto, en primera instancia atendía las deficiencias del último sistema elegido (*Ilustración 28*). Este nuevo sistema motriz fue adquirido a través de una empresa americana llamada *AndyMark Inc.*, que se encarga de desarrollar, fabricar y distribuir piezas mecánicas y eléctricas para el mercado de la robótica móvil y competitiva, con un enfoque en la educación robótica. A continuación, se presenta una galería de imágenes del sistema motriz donado.

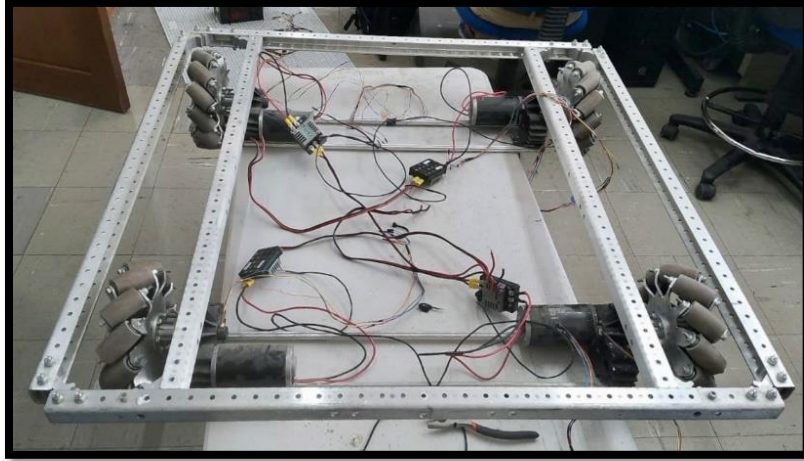


ILUSTRACIÓN 29. PROPUESTA 2 DEL SISTEMA MOTRIZ.

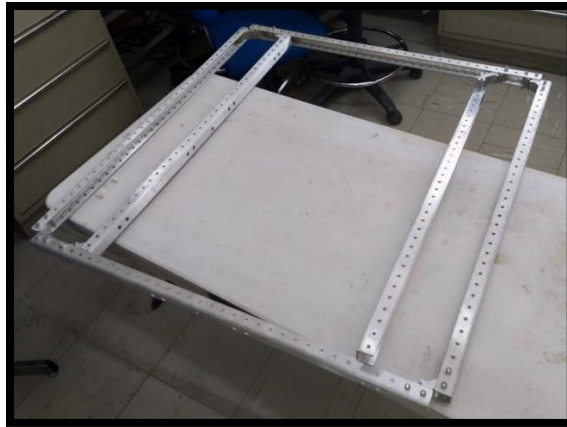


ILUSTRACIÓN 30. CHASIS DEL SISTEMA MOTRIZ DONADO.

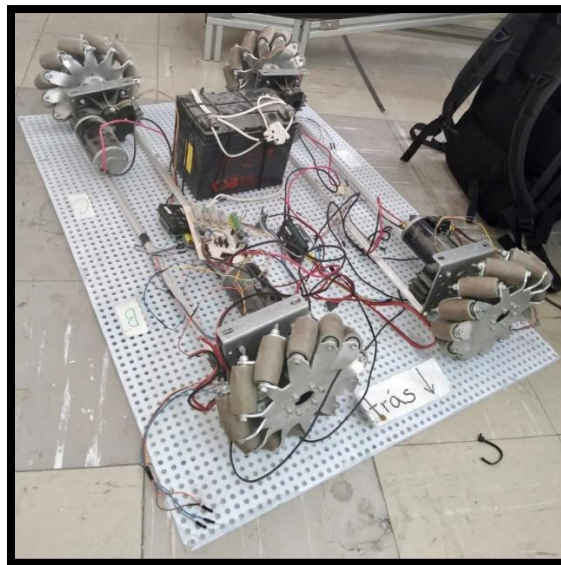


ILUSTRACIÓN 31. ELECTRÓNICA Y RUEDAS DEL SISTEMA MOTRIZ.

El sistema motriz expuesto en la *Ilustración 29* es un kit conformado por los productos *C-Base Frame Wide, Toughbox Mini Gearboxes, Direct Drive, 8" Mecanum Wheels* de la empresa *Andy Mark Inc.* Este kit conforma una plataforma móvil omnidireccional que se utiliza para el desarrollo de robots móviles. El sistema cuenta con las siguientes características [19]:

- Ancho: 37.25 [in] \approx 95 [cm].
- Longitud: 26.25 [in] \approx 67 [cm].
- Altura: 8 [in] \approx 20 [cm].
- Distancia del suelo: 1.25 [in] \approx 3 [cm].
- Peso estimado: 32.5 [lb] \approx 15 [kg].
- Capacidad estimada de carga (basas en las ruedas): 320 [lb] \approx 145 [kg].
- Máxima velocidad estimada: 11 [ft/s] = 3.35 [m/s].
- Máximo torque estimado en las ruedas: 5100 [oz·in] \approx 3.67 [kg·m].



ILUSTRACIÓN 32. SISTEMA MOTRIZ PRESENTADO EN EL CATÁLOGO DEL FABRICANTE [19].

Actualmente, la empresa *Andy Marc Inc.* ha descontinuado la venta de este kit completo, no obstante, se pueden comprar los componentes por separado, y armar el sistema motriz de acuerdo con las necesidades del cliente.

Después de recibir y definir el sistema motriz, se decidió desmantelarlo y analizar cada una de sus piezas y componentes, esto con la finalidad de identificar y conocer detalladamente la constitución del sistema, ya que no se contaba con instructivos ni fichas técnicas del armado; además, al saber cómo estaba montado el sistema, se podía desarrollar una lluvia de ideas para diseñar el escalado de la estructura, con el fin de adecuarlo a las dimensiones del modelo conceptual de *Ayúdame 2.0*.

Por otro lado, se investigaron en la página web del fabricante (*AndyMark Inc.*) las especificaciones técnicas de las principales partes que constituían al sistema; de esta forma se conocieron los materiales exactos de la estructura, parte de las fichas técnicas de los motores, las cajas de transmisión, etc. [19]

7.1.1 Especificaciones técnicas de las principales partes que constituyen al sistema motriz

Perfil C de 72 pulgadas

- Dimensión interior del perfil C: 1 [in].
- Longitud: 72 [in].
- Material: Aluminio.
- Tamaño: 1.25 [in] de alto x 1.13 [in] de ancho.
- Grosor de la pared: 0.125 [in].
- Peso: 2.6 [lb].



ILUSTRACIÓN 33. PERFIL C (CATÁLOGO) [19].

Conector de esquinas de perfiles C

- Material: Aluminio 6061 T6 (extruido).
- Grosor: 0.995 [in].
- Peso: 0.24 [lb].



ILUSTRACIÓN 34. CONECTOR DE ESQUINAS (CATÁLOGO) [18].

Ruedas Mecanum modelo MK 8in

- Diámetro interior: 1.125 [in] de diámetro x 0.25 [in] de profundidad con un orificio pasante de 0.96 [in] de diámetro.
- Diámetro: 8 [in].
- Capacidad de carga: 500 [lb] por rueda.
- Material: Policarbonato negro, Nylon.
- Eje del rodillo: Tubo de latón, 1/4 [in] de diámetro.
- Durómetro del rodillo: 80A.
- Rodillos: 12.
- Peso: 4.58 [lb].
- Anchura a través del centro: 3.50 [in].



ILUSTRACIÓN 35. RUEDAS MECANUM (CATÁLOGO) [19].

Cajas de engranes

- Perfil del engrane: 20 DP (Diámetro primitivo), ángulo de presión de 14.5°.
- Material del engrane: Acero 4140 conformado en frío.
- Eje de salida: 0.5 [in] hexagonal, Acero 4140.
- Material de la carcasa: Nylon 6/6 con refuerzos de fibra larga.



ILUSTRACIÓN 36. CAJA DE ENGRANES (CATÁLOGO) [19].

Motores (PM25R)

- Voltaje: 12 [V] DC.
- RPM máximas sin carga: 5,310 (+/- 10%).
- Corriente a rotor libre: 2.7 [A].
- Máxima potencia: 337 Watts (a 2655 rpm, 172[oz·in] y 68 [A]).
- Par a rotor bloqueado: 2.42 [N·m] o 343.4 [oz·in].
- Corriente rotor bloqueado: 133 [A].



ILUSTRACIÓN 37. MOTOR PM25R (CATÁLOGO) [19].

Con la información recabada se pudo concluir que, la estructura estaba constituida por materiales suficientemente rígidos de acuerdo con las necesidades de *Ayúdame 2.0*. Como se expuso previamente, el aluminio (material por el que se conforma la estructura del chasis) es un material comúnmente utilizado para desarrollar estructuras que requieren ser livianas y rígidas al mismo tiempo, además de otras bondades que aporta el material para trabajar en ambientes exteriores (ver en la página 25). Por otro lado, uno de los puntos críticos era la capacidad de carga del sistema motriz, sin embargo, como lo especifica la ficha técnica de las ruedas *mecanum*, estas son capaces de soportar hasta 200 [kg]. En contraparte, el eje de la caja de engranes fabricado en acero 4140, que sería el elemento expuesto a mayor esfuerzo cortante en caso de que se aplique un exceso de carga en el centro de la estructura, cuenta con un módulo de elasticidad de 190 [GPa], es decir, se utiliza para aplicaciones que requieren una alta resistencia a la tracción [20]. Dicho lo anterior, con las características de los elementos del sistema motriz se pudo solventar el requerimiento de la capacidad de carga. En adición a lo anterior, de manera experimental se corroboró dicha capacidad, ya que en el proyecto que anteriormente fue utilizado el sistema motriz, pudo movilizar a una persona de aproximadamente 70 [kg].

La plataforma cuenta con un sistema de movimiento omnidireccional, anteriormente se abordó de manera superficial la principal diferencia entre los tipos de movimientos omnidireccional y bidireccional; no

obstante, a continuación, se describe explícitamente la definición de un robot omnidireccional, sus características y algunas ventajas.

Un robot de movilidad omnidireccional es un tipo de robot que puede moverse de un punto a otro sin la necesidad de reorientarse previamente. Estos robots, también conocidos como robots holonómicos, tienen la capacidad de moverse en el plano con tres grados de libertad. La configuración más simple de estos robots requiere al menos tres ruedas especiales para lograr su movimiento único, que debe ser controlado mediante un sistema de control cinemático un poco complejo debido a los posibles deslizamientos que puedan ocurrir. [21]

La gran ventaja de los robots omnidireccionales es su mayor grado de libertad en comparación con otros tipos de robots móviles, ya que la eficiencia de un robot móvil en la realización de una tarea depende en gran medida de su movilidad en el ambiente de trabajo. En ciertos entornos de trabajo pueden surgir desafíos, como la necesidad de evitar obstáculos o pasar por caminos estrechos, que requieren una gran maniobrabilidad, y es aquí donde la movilidad omnidireccional brinda una gran ventaja. [21]

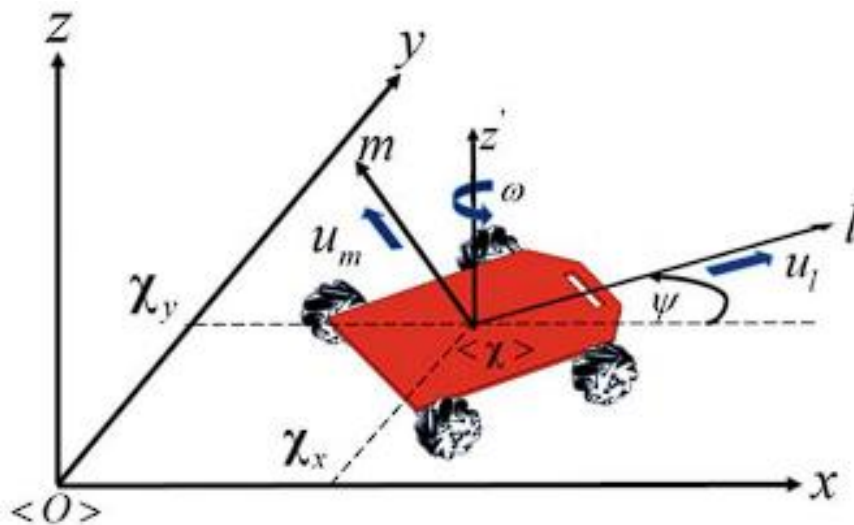


ILUSTRACIÓN 38. APRECIACIÓN DE LOS GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT OMNIDIRECCIONAL [21].

El sistema de potencia de la plataforma omnidireccional se conforma por 4 motores con movimientos bidireccionales rotativos. El elemento que permite la omnidireccionalidad son las ruedas *mecanum*, las cuales están compuestas por rodillos externos de goma dispuestos oblicuamente en toda su circunferencia. En general, cada rodillo tiene un eje de rotación inclinado a 45° en relación con la superficie de la rueda y la línea del eje. Cada rueda *mecanum* es independiente y puede generar fuerza propulsora al girar, la cual se puede vectorizar en un componente longitudinal y transversal respecto al vehículo.

El diseño típico de un sistema de ruedas *mecanum* consiste en cuatro ruedas, dispuestas de manera alternada con rodillos derechos e izquierdos. Los ejes de los rodillos se encuentran en paralelo con la diagonal del marco del vehículo y están dispuestos perpendicularmente cuando están en contacto con el suelo. Cada rueda genera una fuerza paralela a la diagonal del marco correspondiente.

Al variar la velocidad y dirección de rotación de cada rueda, se genera un movimiento lineal o rotativo del vehículo. Por ejemplo, si todas las ruedas giran en la misma dirección a la misma velocidad, se producirá un movimiento hacia adelante o hacia atrás; si las ruedas en un lado giran en una dirección y las del otro lado en dirección opuesta, se producirá una rotación estacionaria; y si las ruedas diagonales giran en direcciones opuestas, se producirá un movimiento lateral. La combinación de diferentes movimientos de las ruedas permite que el vehículo se mueva en casi cualquier dirección y con cualquier rotación. [22]

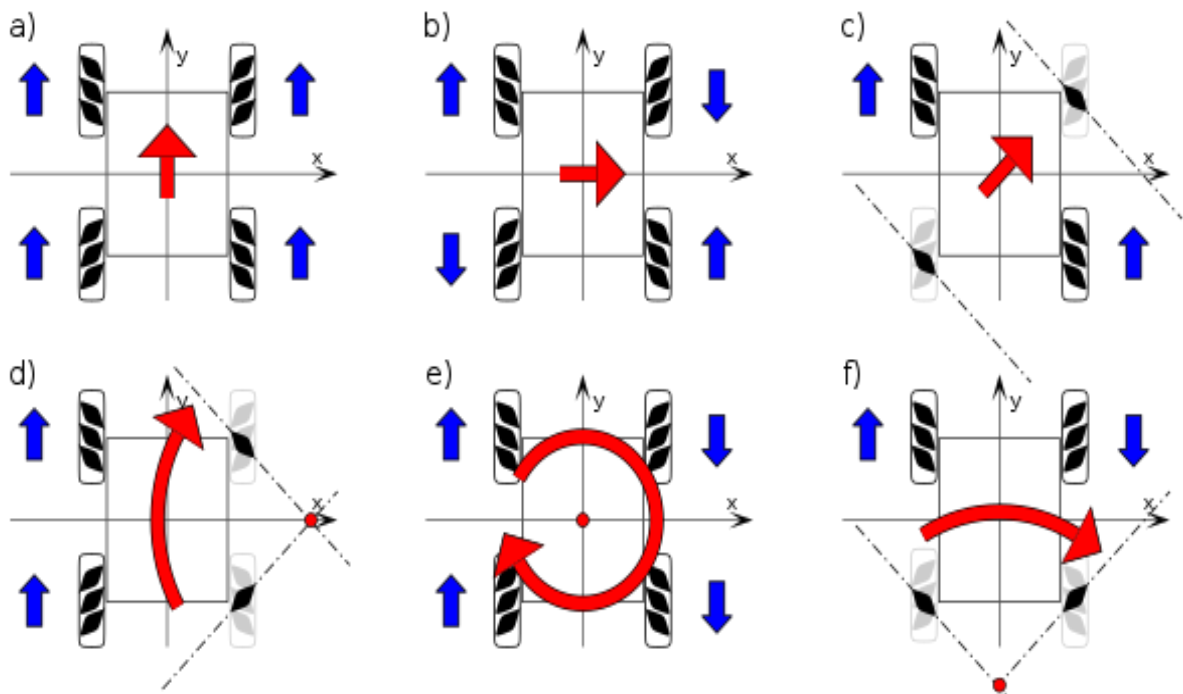


ILUSTRACIÓN 39. MOVIMIENTOS EN CUALQUIER DIRECCIÓN:

AZUL – DIRECCIÓN DE TRACCIÓN DE LA RUEDA.

ROJO – DIRECCIÓN DE MOVIMIENTO DEL VEHÍCULO.

A) AVANZANDO EN LÍNEA RECTA, B) MOVIÉNDOSE LATERALMENTE, C) MOVIÉNDOSE DIAGONALMENTE, D) MOVIÉNDOSE ALREDEDOR DE UNA CURVA, E) ROTACIÓN, F) ROTACIÓN ALREDEDOR DEL PUNTO CENTRAL DE UN EJE. [22]

Para lograr el funcionamiento correcto en este tipo de configuración es indispensable instalar las ruedas *mecanum* con una orientación específica, desde la vista superior todos los rodillos deben apuntar al centro de la base (Ilustración 40). De no ser así, habrá variaciones en el movimiento esperado del sistema. [23]

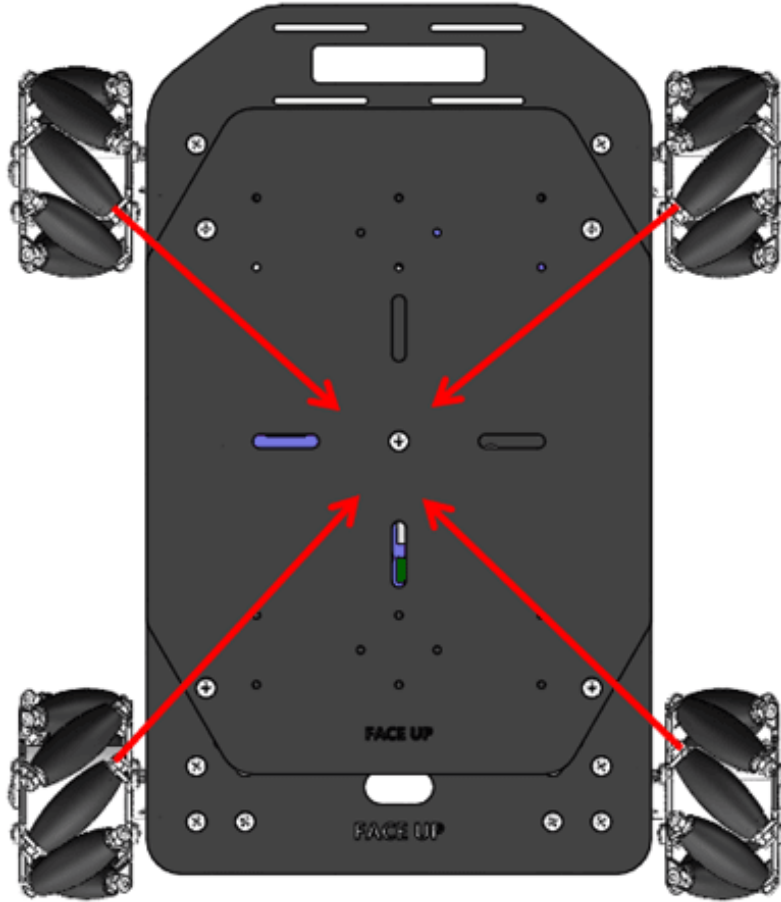


ILUSTRACIÓN 40. INSTALACIÓN CORRECTA DE LAS RUEDAS MECANUM. [23]

Se decidió desarrollar un modelo digital del sistema motriz con la finalidad de diseñar en CAD las modificaciones requeridas para adecuar el sistema original a las dimensiones de *Ayúdame 2.0*. Para ello, se utilizaron algunos recursos CAD que el fabricante proporciona de sus productos, y otros se diseñaron en *Autodesk Inventor* con las medidas de los componentes. Se decidió crear este modelo para prever cómo quedaría el sistema motriz escalado, prevenir colisiones entre los componentes, planear la manufactura de las modificaciones en relación con las herramientas y equipo disponible, además, de tener la validación del líder del proyecto, ya que, al desarrollar dichas modificaciones, el estado del sistema motriz sería irreversible. A continuación, se presenta el modelo CAD de la plataforma modificada de acuerdo con el requerimiento dimensional del modelo conceptual de *Ayúdame 2.0*.

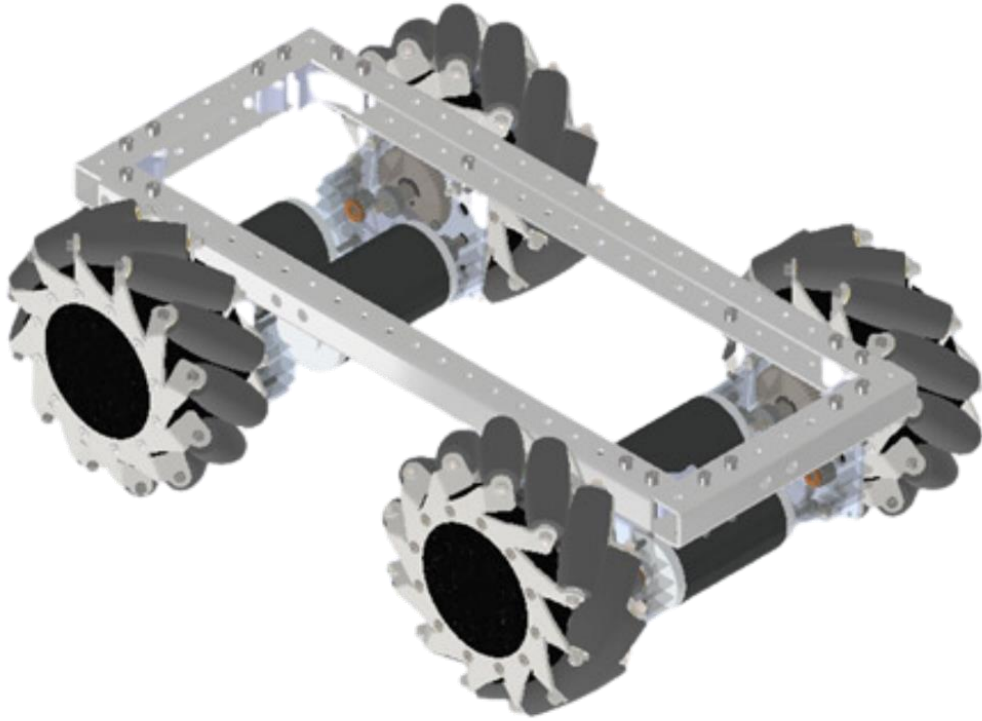


ILUSTRACIÓN 41. VISTA ISOMÉTRICA DEL SISTEMA MOTRIZ ESCALADO.

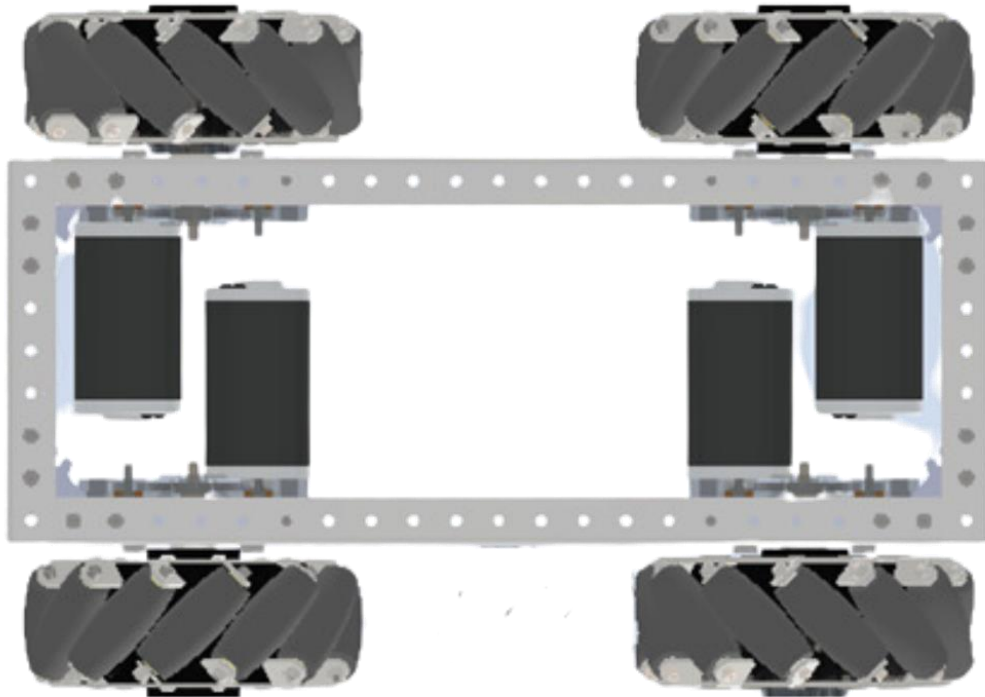


ILUSTRACIÓN 42. VISTA AÉREA DEL SISTEMA MOTRIZ ESCALADO.

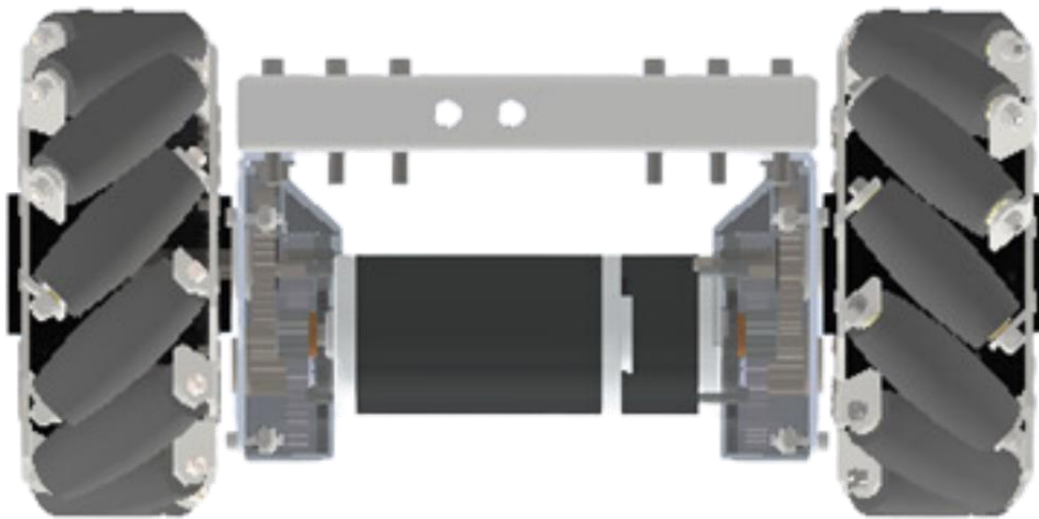


ILUSTRACIÓN 43. VISTA FRONTAL DEL SISTEMA MOTRIZ ESCALADO.

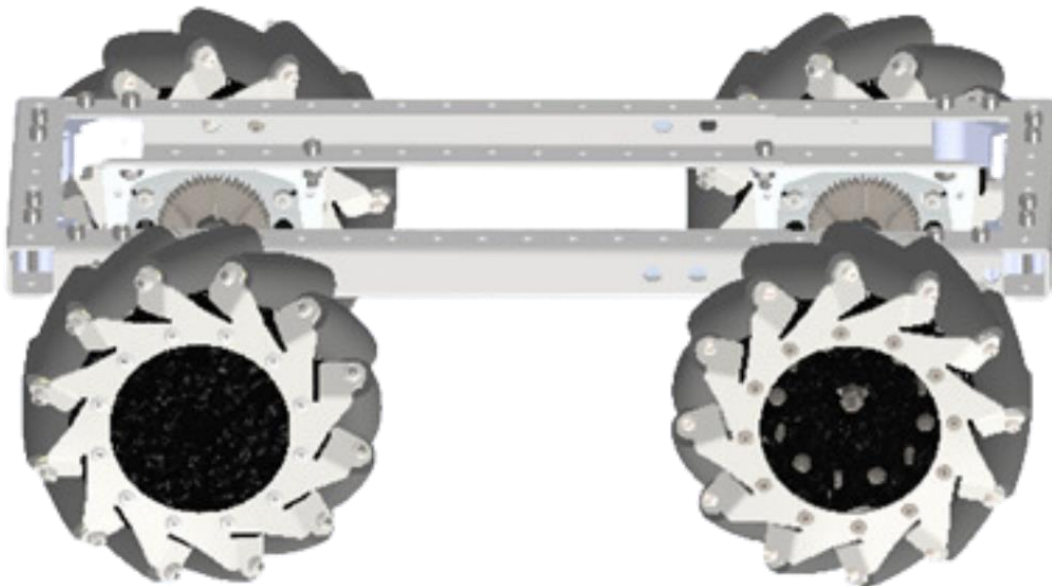


ILUSTRACIÓN 44. VISTA LATERAL DEL SISTEMA MOTRIZ ESCALADO.

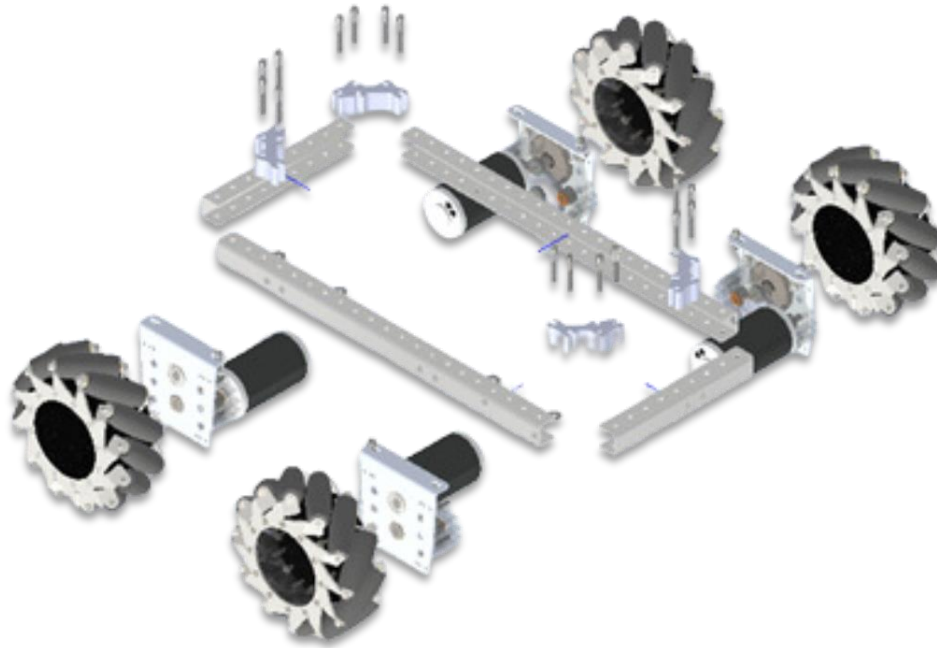


ILUSTRACIÓN 45. VISTA EXPLOSIONADA DEL SISTEMA MOTRIZ ESCALADO.

7.1.2 Consideraciones en el diseño del escalado del sistema motriz

Una vez presentadas las imágenes de la plataforma escalada a las dimensiones del modelo conceptual de *Ayúdame 2.0*, se describirán las principales consideraciones en el diseño.

El modelo conceptual de *Ayúdame 2.0* tiene un ancho de 42.2 [cm], un largo de 53 [cm], y una altura de la base de 15 [cm]. Estas medidas eran parte de los parámetros de entrada del proyecto; el previo análisis del equipo de diseñadores industriales, de acuerdo con las normas mexicanas relacionadas con el sector hospitalario y la ergonomía del usuario, sugieren que esas dimensiones están adecuadas para el correcto funcionamiento del robot. Por lo tanto, al diseñar el escalado del sistema motriz, era indispensable aproximarse a dichas dimensiones. No obstante, se tenían dos aspectos a tomar en cuenta, el primero de ellos es la forma de ensamblar la plataforma, y el segundo es la correcta instalación de la orientación de las ruedas *mecanum*.

- **Ensamble de la plataforma** – Como se observa en la *Ilustración 41*, la plataforma constituida por los perfiles *C* (*Ilustración 33*) y los conectores de esquinas (*Ilustración 34*), se ensamblan por medio de sujeciones mecánicas (tornillos y tuercas) en los agujeros transversales del perfil. Por lo tanto, había que considerar este tipo de ensamble al momento de reducir la longitud de los perfiles.

- **Orientación de las ruedas *mecanum*** – Como se mencionó anteriormente, es indispensable que los rodillos de las ruedas *mecanum* apunten al centro de la base, formando una “X”. Por lo tanto, al desarrollar el escalado de la plataforma, se consideró una simetría exacta respecto al centro.

Después de desarrollar distintas propuestas de diseño, se logró redimensionar la plataforma satisfaciendo el requerimiento de simetría para posicionar correctamente las ruedas *mecanum*, no obstante, no fue posible simultáneamente dimensionar con exactitud el marco del robot a las medidas del modelo conceptual. A pesar de ello, las medidas de la plataforma escalada quedaron de 41 [cm] de ancho, 58.7 [cm] de largo y 17.7 [cm] de alto desde el suelo, que satisfacían con la tolerancia dimensional permitida, según el análisis de los diseñadores industriales.

El desarrollo del modelo CAD del sistema motriz permitió rediseñar la plataforma, sin necesidad de realizar modificaciones permanentes sobre las piezas físicas, y estructurar el ensamble final. Por otro lado, permitió prever qué procesos de manufactura se requerirían para lograr el redimensionamiento, específicamente, solo se requerían cortar los perfiles C; por medio del modelo virtual se tomaron las medidas de corte.

7.1.3 Procesos de manufactura

Corte del perfil C de 72 pulgadas

Para desarrollar físicamente el redimensionamiento de la plataforma se requerían cortar los perfiles C a las dimensiones establecidas por el modelo CAD. Para ello se utilizó una sierra vertical de cinta universal (*universal band sawing machine*), específicamente el modelo L-300 de la marca LUXO (*Ilustración 46*), situada en el laboratorio de metal-mecánica del CIDI.

Las especificaciones de la máquina son las siguientes:

- Motor de 1 [HP]
- Capacidad de corte: 12 [in] × 5 ½ [in]

La tabla de parámetros de corte de la máquina es la siguiente:

TABLA 1. PARÁMETROS DE CORTE DE LA SIERRA VERTICAL DE CINTA UNIVERSAL.

Grosor	Paso de la hoja de sierra			Velocidad [ft·min]		
	1/16 [in] ~	5/16 [in] ~	1 [in] ~	1/16 [in] ~	5/16 [in] ~	1 [in] ~
Hierro y Acero	24, 18	14	10	330	200	80

Hierro fundido	18	14	10		265	135	85
Aleaciones de acero	18	10	8		330	330	330
Metales no ferrosos	18	10	8		330	330	330



ILUSTRACIÓN 46. MÁQUINA SIERRA VERTICAL DE CINTA UNIVERSAL.

Para realizar las operaciones de manufactura se requirió la orientación de los encargados del laboratorio. El corte que se le realizó a los perfiles fue transversal; estos tienen un espesor de pared de 0.125 [in]. El taller de metal-mecánica únicamente contaba con una hoja de sierra de acero de alta velocidad de 18 hilos por pulgada con un grosor de 3/8", que según los parámetros de corte de la máquina, era la indicada para realizar el corte de metales no ferrosos, como el aluminio de los perfiles. El corte se hizo a una velocidad de 330 [ft-min]. Al finalizar el proceso de corte, se decidió mejorar el acabado de la superficie con un kit

de limas, eliminando rebabas y geometrías punzocortantes; este proceso de acabado se realizó en casi todos los elementos que conforman el robot, ya que como se menciona en el artículo *Consideraciones en el diseño de robots para la atención médica en el mundo post COVID-19* (capítulo 3 *Identificación de las consideraciones de un robot de servicio para el área médica*) “Es necesario [...] usar protecciones fabricadas con materiales y formas que reduzcan el riesgo de lesión”, con esto no solo se salvaguarda la integridad de los usuarios, sino también de quienes manipulen el robot en su fabricación, integración o mantenimiento.

7.2 Diseño y fabricación de la base sobre la cual se montará la estructura vertical del robot

Una vez que se definió y construyó el sistema motriz de *Ayúdame 2.0*, se procedió a diseñar la base sobre la cual iría montada la estructura vertical del robot. El diseño de la base requería satisfacer los requerimientos cualitativos identificados por el equipo de diseño.

El objetivo de esta base es acoplar el módulo 1 (sistema motriz) y el módulo 2 (estructura vertical), además sirve para alojar parte de la electrónica interna del robot, específicamente, se pensó en los microcontroladores, *drivers*, baterías, etc. Por lo tanto, debía ser un diseño que pudiera unir ambos módulos, que fuera lo suficientemente rígido para soportar las cargas que se aplicarían sobre la estructura vertical, además de soportar el peso de los componentes electrónicos y la carga útil de los cajones de almacenamiento.

7.2.1 Propuestas de diseño de la base

Inicialmente, se diseñó la propuesta que se muestra en la *Ilustración 47*. La idea principal de la propuesta es que cuatro pequeñas columnas de perfil estructural de aluminio soportaran una lámina (lámina superior), sobre la cual iría montada la estructura vertical (en forma de “h”). Además, el marco de perfiles *C* que conforma la plataforma del sistema motriz, también tendría otra lámina (lámina inferior); en el espacio que queda entre ambas láminas de aluminio se alojaría la electrónica interna del robot.

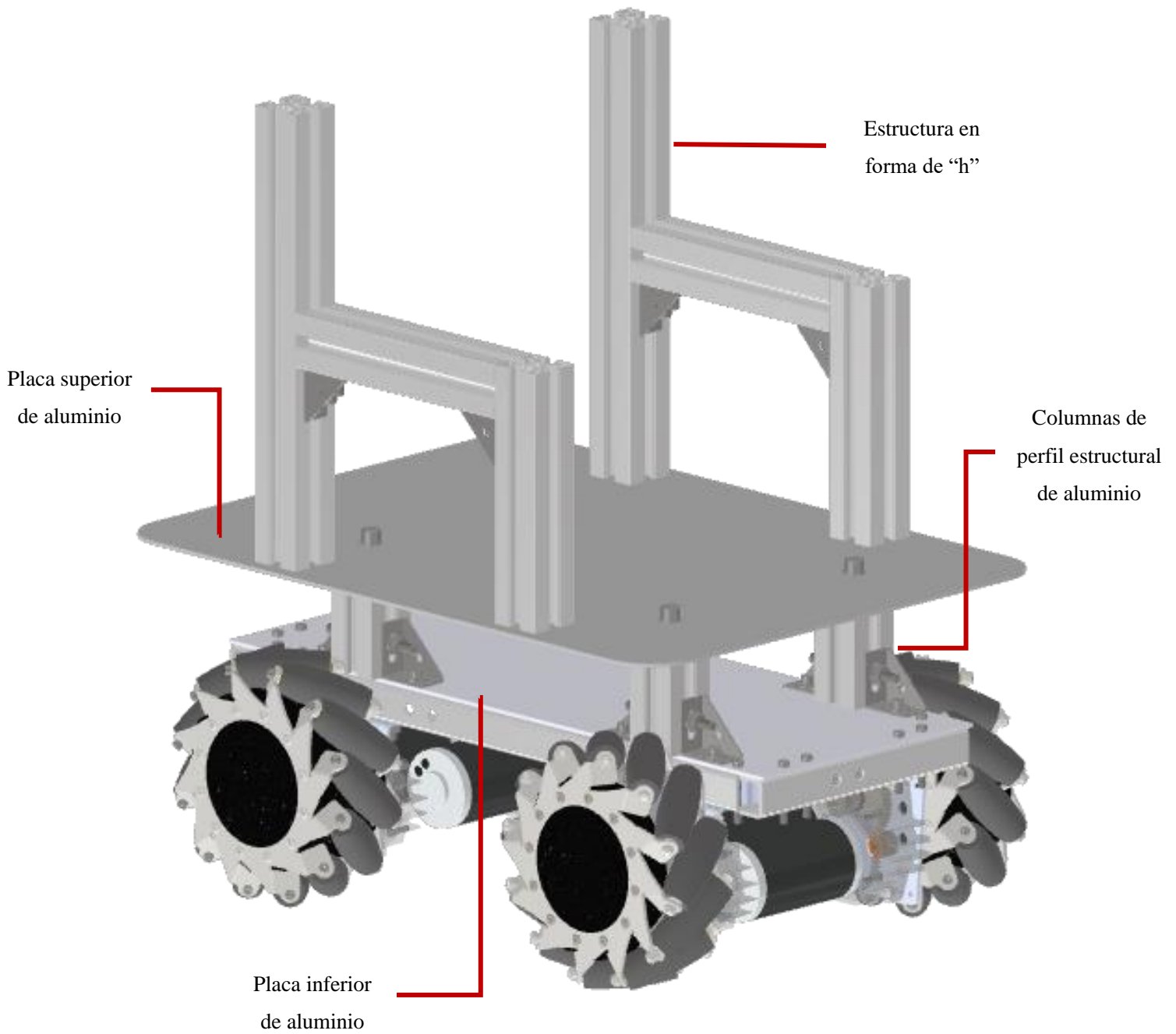


ILUSTRACIÓN 47. PROPUESTA 1 DEL DISEÑO DE LA BASE DEL ROBOT.

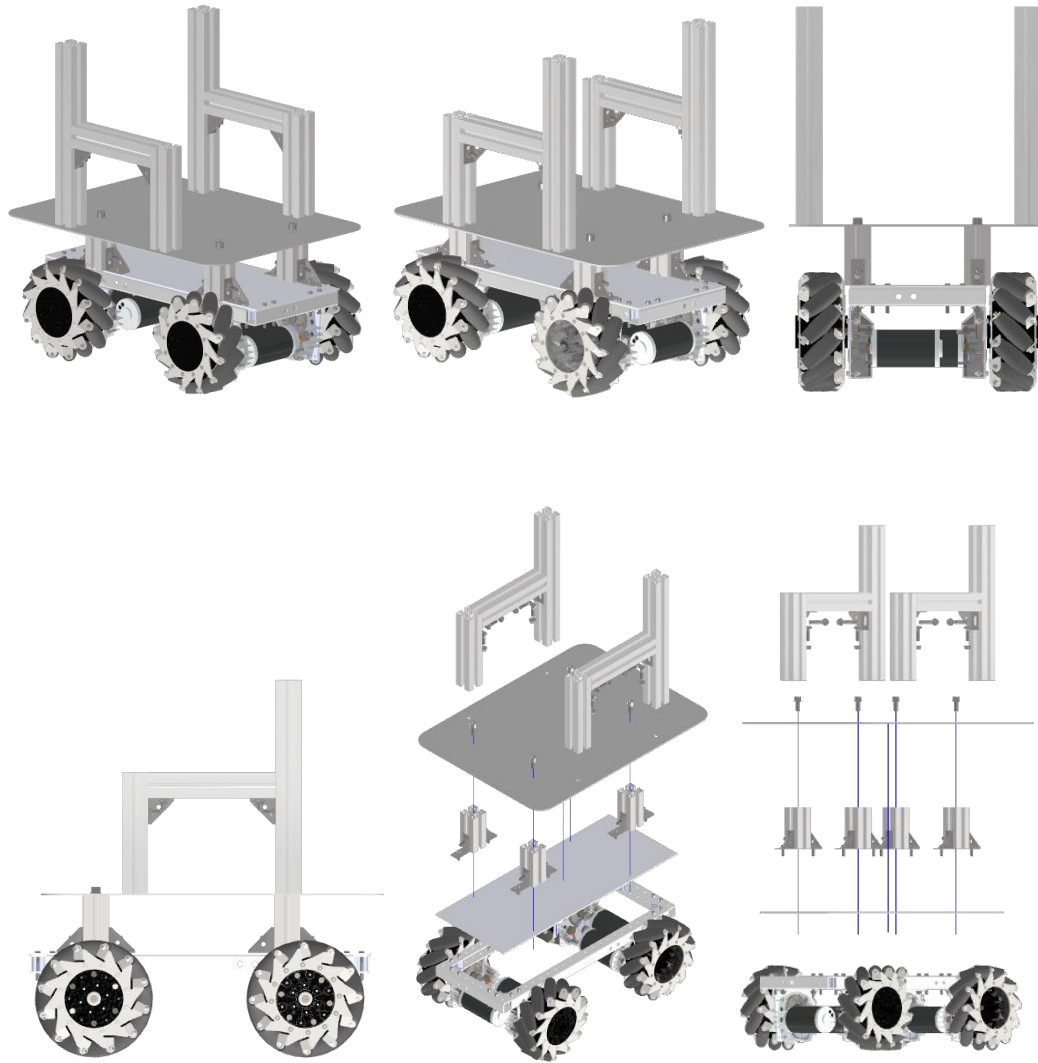


ILUSTRACIÓN 48. DIFERENTES VISTAS DE LA PROPUESTA 1 DEL DISEÑO DE LA BASE DEL ROBOT.

Esta era una solución que, a falta de pruebas cuantitativas, cumplía con los requerimientos que había estipulado el equipo de diseño, además había sido aprobada por el líder del proyecto. Antes de comenzar a planear su manufactura, se realizó una investigación acerca de los materiales que se debían utilizar con la finalidad de cumplir con las especificaciones técnicas. Principalmente, los materiales que se necesitarían para fabricar este modelo eran las láminas, las escuadras que sostendrían las pequeñas columnas de perfil estructural de aluminio, además de los tornillos con cabeza de martillo. No obstante, se requería desarrollar una investigación acerca de las láminas, especialmente para saber de qué material, de qué grosor, el costo, la facilidad de adquisición, etc.

El principal dilema por resolver era si las láminas debían ser de metal o de algún otro material, sin embargo, debido a la alta resistencia en este tipo de disposición (láminas), los metales suelen ser los más adecuados para este tipo de aplicaciones.

Como segundo punto, se requiere saber qué tipo de metal es más apto de acuerdo con el tipo de aplicación; los dos principales candidatos son el acero y el aluminio, debido a la facilidad de adquisición con los proveedores. Tanto el acero como el aluminio tienen similitudes en cuanto a su acabado, color y en algunos casos firmeza, lo que puede generar confusión, sin embargo, hay grandes diferencias entre estos dos materiales. El acero tiene una resistencia mayor que el aluminio, pero es más pesado y difícil de manejar, mientras que el aluminio es más liviano y moldeable. El aluminio es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones debido a su practicidad. Por otro lado, el acero se utiliza principalmente en la construcción debido a su resistencia. Además, el acero y el aluminio también difieren en su respuesta a la corrosión. El acero se oxida generando un polvo blanco y se vuelve poroso, pero se puede proteger mediante revestimientos. El aluminio, por otro lado, no es tan resistente a la corrosión causada por altas temperaturas y puede fragmentarse o romperse a menos que tenga un recubrimiento especializado que lo haga más resistente. En cuanto a costos, depende del tipo de acero o de aluminio que se utilice, pero el aluminio suele ser más accesible. [24]

De acuerdo con lo anterior y con el tipo de aplicación, es conveniente el uso de láminas de aluminio, sin embargo, existe una amplia variedad de aleaciones de aluminio con diferentes características. Dentro de los catálogos de los proveedores para el proyecto se posicionaron como opciones viables el aluminio 6061 y el 3003. El aluminio 6061 es una aleación endurecida que se compone principalmente de aluminio, magnesio y silicio. Esta aleación tiene buenas propiedades mecánicas y es adecuada para soldaduras. Es una de las aleaciones más populares para aplicaciones generales, como estructuras de alta resistencia que necesitan un buen comportamiento contra la corrosión, se suele utilizar en la fabricación de camiones, barcos, vehículos ferroviarios, mobiliario, tuberías, estructuras de aeronaves, en piezas de automóviles, etc. [25]. Por otro lado, la aleación de aluminio 3003 se obtiene mediante la adición de manganeso y cobre al aluminio puro, lo que aumenta su resistencia en un 20%, respecto a la aleación 1100. Aunque no es el metal más resistente, es muy conformable y cuenta con excelentes propiedades como su soldabilidad y resistencia a la corrosión. Debido a esto, se utiliza ampliamente en aplicaciones que requieren una resistencia media, como chapa, tanques de combustible, equipos químicos, puertas de garaje, techos de edificios, cajas de herramientas, etc. [26].

Con lo recabado hasta ahora quedaba claro que la aleación de aluminio 6061 era la mejor opción para el propósito del proyecto, era más dura comparándola con la 3003; que era el requerimiento que más se priorizaba para elegir el material. No obstante, al cotizar la adquisición de la lámina con los proveedores, la aleación de aluminio 6061 era mucho más costosa respecto a la 3003.

Antes de realizar las iteraciones de análisis de elementos finitos por CAE (*Computer Assisted Engineering*) en el software de *Autodesk Inventor*, para verificar qué grosor de lámina era conveniente, los proveedores compartieron el inventario con el que contaban. Con esto, el líder del proyecto canceló la adquisición de la lámina debido al presupuesto del proyecto. Los proveedores solo vendían láminas de 2.8 [m²] que, dependiendo del calibre de la lámina, el costo mínimo de aluminio 3003 rebasaba los \$5000 MXN; además, de esos 2.8 [m²] solo se ocuparían como máximo 0.3 [m²]. Por lo tanto, ese costo abarcaría gran parte del presupuesto general del proyecto, el cual no era prioridad para la actual etapa de desarrollo. Ese fue el principal motivo por el que se descartó la primera propuesta de solución de la base de la estructura vertical.

En mayo de 2022 se une al proyecto el Dr. Mauricio Enrique Reyes Castillo, quien propone una disposición diferente para la base. La idea principal de esta nueva propuesta era la unión de la estructura vertical directamente a la plataforma (conformada por perfiles *C*) del sistema motriz; que entre la unión de ambos módulos, se colocara una lámina de aluminio que serviría para satisfacer 3 necesidades: soportar la carcasa del robot, para alojar parte de la electrónica interna y como base de los cajones de almacenamiento. A diferencia de la propuesta anterior, la lámina ya no se encargaría de soportar las cargas de la estructura vertical, sino que estas cargas recaerían directamente sobre la plataforma del tren motriz; que como se mencionó en sus especificaciones, se tiene la certeza de que soporta más de 70 [kg]. De esta forma, la nueva lámina a diseñar ya no requería ser necesariamente de un material estrictamente duro, simplemente con que cumpliera con los requerimientos cualitativos.

El plan se estructuró para que primero se diseñara la lámina y, posteriormente la unión entre la estructura vertical y el sistema motriz. Se diseñó la disposición presentada en la *Ilustración 49* para acomodar la lámina en el sistema motriz.

La lámina cuenta con 6 dobleces. La parte media queda soportada por la plataforma de perfiles *C*. La lámina se ensambla con el sistema motriz por medio de 8 pernos, 4 en cada lado (frente y detrás). En la parte media se forma una *cajuela*, pensada para almacenar parte de la electrónica interna del robot. Por otro lado, la lámina cuenta con dos *alas*, es decir, con dos secciones voladizas a los costados que quedan sobre las ruedas; estas secciones no están soportadas directamente por la plataforma del sistema motriz, por este motivo se decidieron mantener las columnas de perfil estructural de aluminio que le aportarían rigidez a la estructura de la lámina; ya que, de manera premeditada se pretendía que sobre estas secciones se podrían construir los cajones de almacenamiento. Igualmente, a diferencia de la lámina inferior de la propuesta 1, esta lámina es envolvente en los costados, sobre esas pequeñas pestañas laterales se planeó soportar parte de la carcasa del robot. En términos coloquiales, se pretendía que esta lámina fuese el *piso* de la estructura del robot.

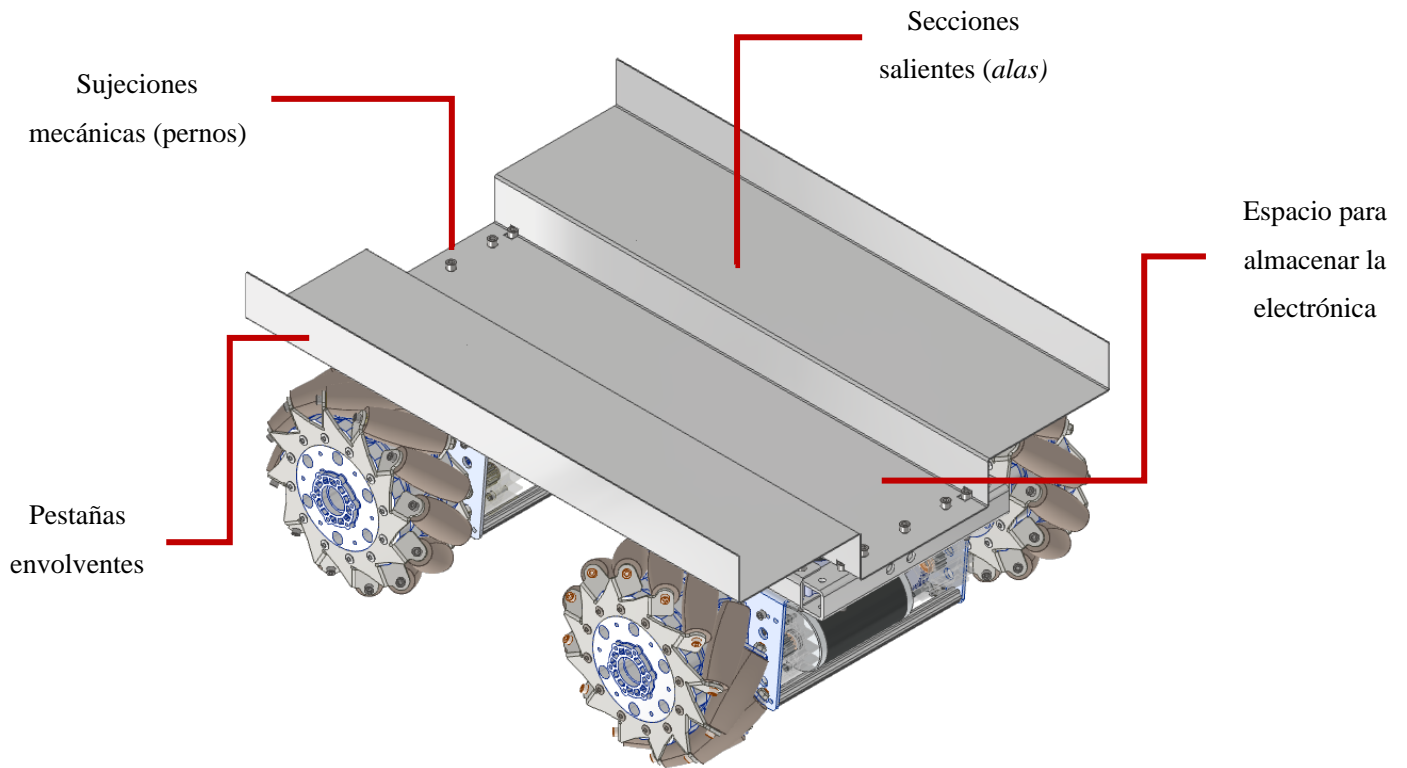


ILUSTRACIÓN 49. VISTA ISOMÉTRICA DE LA DISPOSICIÓN DE LA LÁMINA MONTADA SOBRE EL SISTEMA MOTRIZ.

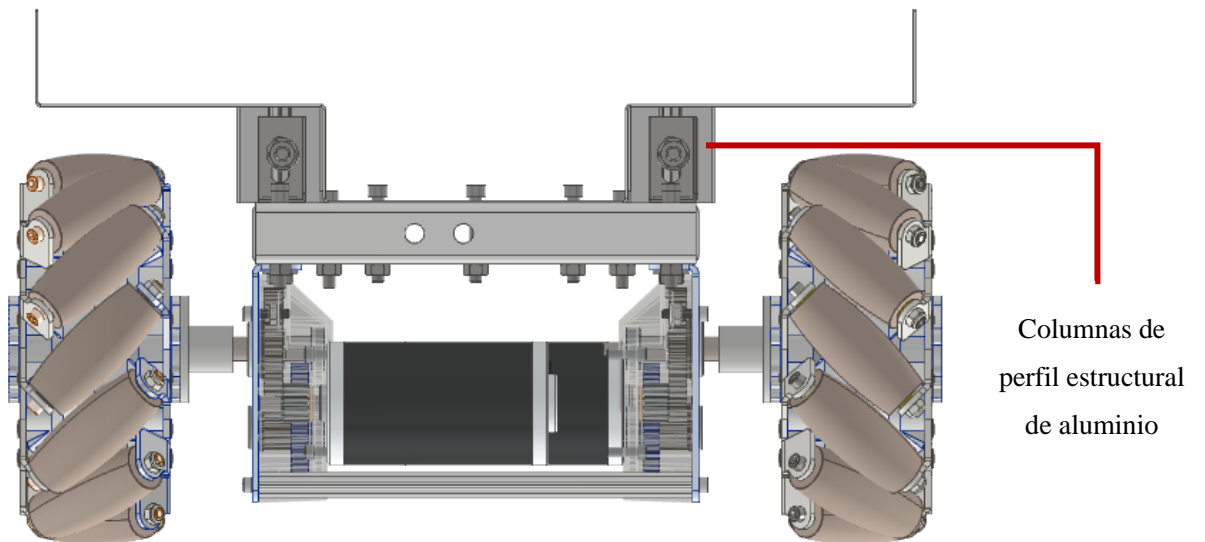


ILUSTRACIÓN 50. VISTA FRONTAL DE LA DISPOSICIÓN DE LA LÁMINA MONTADA SOBRE EL SISTEMA MOTRIZ.

La viabilidad de construcción de este modelo fue superior a la de la propuesta 1, ya que el laboratorio de laminados del CIDI, le donó al proyecto un pliego de lámina de aluminio en hoja lisa, con un temple H-14, semidura (aleación 1100) de calibre 18 (1.2 [mm]). Por lo tanto, se pudo ahorrar la inversión en la construcción de esta estructura, que fue el principal motivo por el que se descartó la primera propuesta. Además, el director del equipo de diseño aprobó y apoyó la segunda propuesta, debido a que se trataba de un diseño más robusto, seguro y económico, de acuerdo con las razones expuestas anteriormente.

7.2.2 *Procesos de manufactura para desarrollar la lámina*

Para manufacturar la lámina presentada en la *Ilustración 49*. Vista isométrica de la disposición de la lámina montada sobre el sistema motriz. se requirió acudir al laboratorio de laminados del CIDI. Principalmente se utilizaron dos máquinas que se presentan a continuación.

Guillotina para lámina

En la *Ilustración 51* se muestra el desarrollo de la lámina en 2D, en ella se pueden observar la ubicación de los pliegues y de los cortes. Inicialmente, se requería cortar y encuadrar el pliego de lámina a las dimensiones establecidas en el modelo CAD (650.84 [mm] × 607.50 [mm]). Para ello se utilizó una guillotina para lámina, específicamente el modelo 137-L de la marca *PEXTO* (*Ilustración 52*), la cual cuenta con una capacidad de corte de calibre 16 en acero suave.

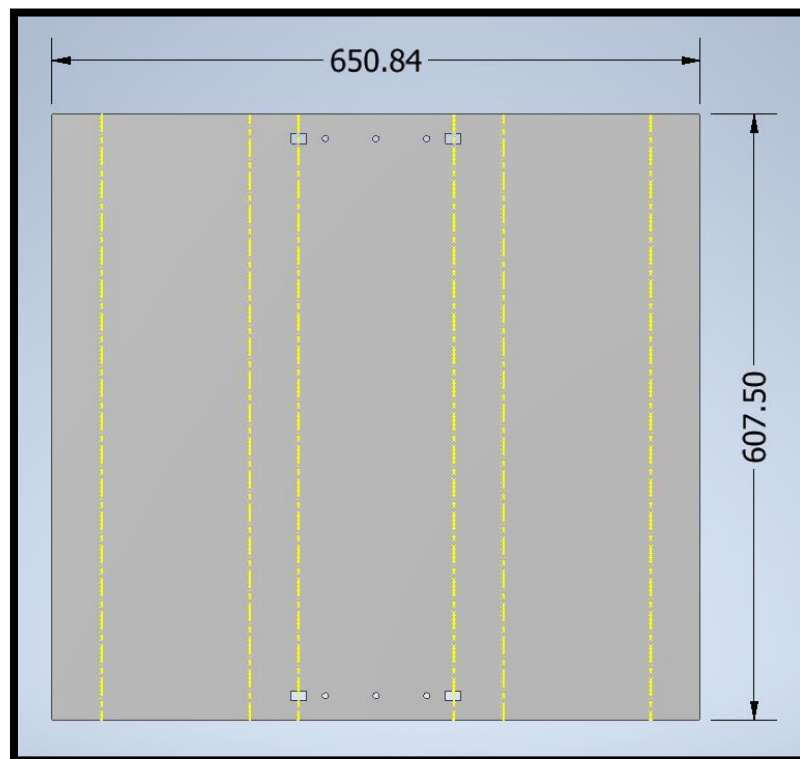


ILUSTRACIÓN 51. DESARROLLO DE LA LÁMINA EN 2D.



ILUSTRACIÓN 52. GUILLOTINA DE LÁMINA MODELO 137-L DE LA MARCA PEXTO.

Cortes de la lámina

Antes de doblar la lámina se realizaron los cortes, ya que sería más complicado llevar a cabo el proceso en orden inverso. Los cortes circulares (donde van insertados los pernos de sujeción) se realizaron con una punzonadora manual. Los cortes rectangulares se realizaron utilizando un cincel y un martillo, marcando el perímetro con la punta plana del cincel.

Dobladora de lámina

Por último, se realizaron los pliegues en la lámina. Haber desarrollado la lámina en *Autodesk Inventor*, con la herramienta de chapa (*Sheet metal*), proporcionó las ubicaciones exactas de los pliegues, como se muestra en la *Ilustración 53*. Para llevar a cabo dichos pliegues se utilizó una dobladora de lámina de la marca *GERVER*, modelo *GVZ-4* (*Ilustración 54*).

La dobladora cuenta con las siguientes características: [27]

- Longitud: 610 [mm]
- Espesor de la lámina: 1.5 [mm]
- Longitud de plegado: 300 [mm] (tope trasero)
- Profundidad de galga trasera: 0 – 125 [°]

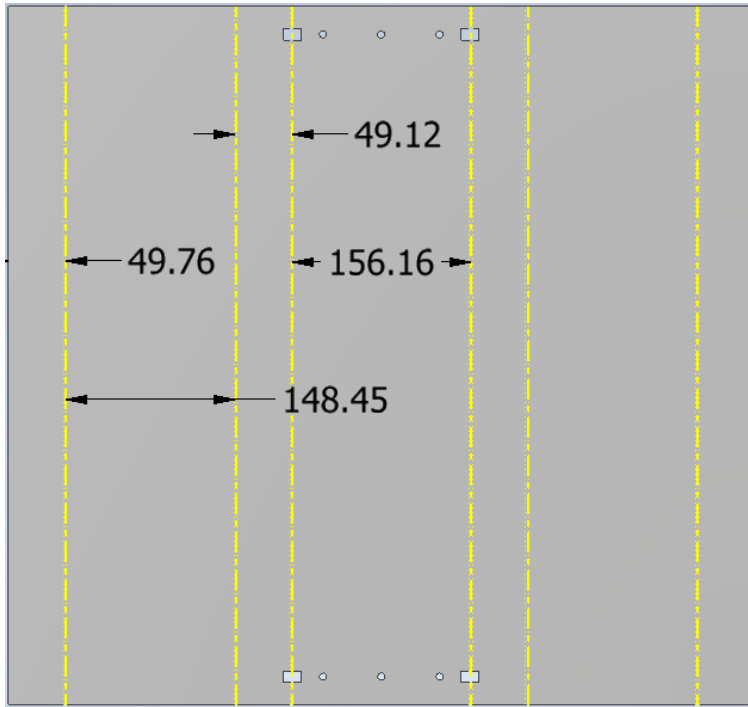


ILUSTRACIÓN 53. UBICACIÓN DE LOS PLIEGUES EN LA LÁMINA.



ILUSTRACIÓN 54. DOBLADORA DE LÁMINA GERVER GVZ-4.

Acabados de la lámina

Al finalizar con los anteriores procesos la lámina estaba prácticamente terminada. Sin embargo, los encargados del laboratorio sugirieron que se utilizaran limas para eliminar el filo de las esquinas de la lámina.

7.2.3 Procesos de manufactura para fabricar las columnas de perfil estructural de aluminio

En la *Ilustración 50* se observan y señalizan las columnas de perfil estructural de aluminio. Igualmente, en la sección *1.4.5 Descripción del modelo conceptual de Ayúdame 2.0*, se detallan las razones por las que se eligió utilizar el perfil estructural de aluminio para fabricar algunas partes de la estructura interna del robot.

Corte de los perfiles estructurales de aluminio con la sierra vertical de cinta universal

Inicialmente, el perfil estructural de aluminio que se adquirió con el proveedor tenía una longitud de 5 [m], las columnas tienen una longitud de 5 [cm], por lo tanto, se utilizó la sierra vertical de cinta universal (*Ilustración 46*), con los mismos parámetros aplicados para cortar los perfiles C, para cortar 28 [cm] del perfil. Posteriormente, el fragmento de 28 [cm] se volvió a cortar en 4 trozos de aproximadamente 7 [cm]. El corte realizado con la sierra vertical deja en la pieza un acabado impreciso y rugoso, esa es la razón por la que se cortaron de 7 [cm] las columnas, estas requerían someterse a otro proceso para darles un acabado rectificado.

Acabado de los perfiles estructurales de aluminio con fresadora

Una vez que se tenían las columnas con una longitud de aproximadamente 7 [cm], la única forma que el equipo de diseño y los encargados del laboratorio de metal-mecánica encontraron para darles un acabado rectificado y reducir su longitud a los 5 [cm] que se buscaba, fue con la fresadora.

Se utilizó un taladro fresador de banco marca *MC. LANE* modelo ZX40A, que cuenta con las siguientes características [28]:

- Cabezal engranado
- Guías del eje vertical cola de milano
- Tamaño de mesa 800 x 240 [mm]
- Cono del husillo R8
- Carrera del husillo 130 [mm]
- Distancia máxima husillo a mesa 450 [mm]
- 6 velocidades: 80 - 1,250 [rpm]

- Motor 1.5 [HP]
- Conexión 220 [V] trifásico
- Peso aproximado 310 [kg]



ILUSTRACIÓN 55. TALADRO FRESADOR DE LA MARCA MC. LANE MODELO ZX40A.

Para llevar a cabo el proceso de *careado* en los perfiles estructurales de aluminio se requería utilizar el cortador con mayor área de sección transversal, de los que se encontraban en el taller. Al tener el cortador con mayor área de sección transversal se disminuye el riesgo de fractura, además el proceso se haría más rápido. En este caso, el taller contaba con un cortador plano de 4 filos, con un grosor de 3/8" y un largo de 2 1/2". A pesar de que no se pudo hacer una selección específica de otro cortador, el resultado fue útil ya que se logró reducir los perfiles estructurales exactamente a los 5 [cm] de largo que se buscaba, además las caras de los perfiles quedaron con un acabado rectificando. En la *Ilustración 56*, se puede observar la ejemplificación de cómo se llevó a cabo este proceso.

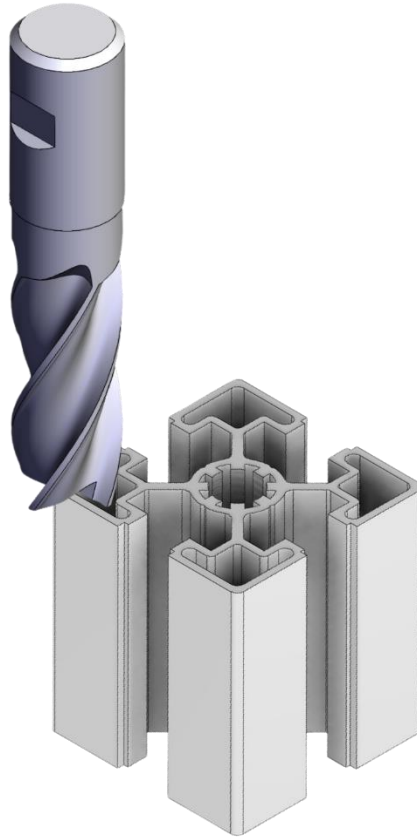


ILUSTRACIÓN 56. PROCESO DE CAREADO EN LOS PERFILES ESTRUCTURALES DE ALUMINIO – CORTE NORMAL A LA SUPERFICIE.

7.2.4 Desarrollo de pruebas en la solución implementada

Después de haber manufacturado y ensamblado los elementos que conforman la base del robot. El equipo de diseño detectó a primera vista que la lámina utilizada no era lo suficientemente rígida para satisfacer con los requerimientos de diseño, expuestos al inicio de este capítulo. Por ello, se decidió desarrollar una sesión de pruebas, tanto cualitativas como cualitativas.

Prueba cualitativa

Para desarrollar esta prueba se expuso la solución a cargas de aproximadamente 10 [kg] en cada una de las *alas* de la lámina. Lo que se buscaba comprobar era el desplazamiento de estas *alas* al aplicar cierta carga. La razón por la cual se decidió 10 [kg] en cada *ala* no tiene una justificación explícita detrás, simplemente fue la cantidad de masa que se pudo reunir con los elementos que disponía el laboratorio de robótica del CIDI.

Después de llevar a cabo estas pruebas cualitativas se concluyó que, efectivamente las *alas* de la lámina se desplazaban en la misma dirección de la fuerza de gravedad, en proporción a la carga expuesta, es decir, entre más carga se aplicara sobre las *alas*, mayor era el desplazamiento. A pesar de haber extraído estas conclusiones por medio de la observación de este fenómeno, se decidió desarrollar pruebas cuantitativas por medio de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE - *Computer Aided Engineering*) en *Autodesk Inventor*.

Pruebas cuantitativas

Para desarrollar las pruebas cuantitativas en *Autodesk Inventor*, se extrajo una parte del ensamble presentado en la *Ilustración 49*, ya que al desarrollar el análisis de tensión estático con el ensamble completo, se presentaba lentitud y una alta demanda de procesamiento en la computadora utilizada. En la siguiente galería de ilustraciones se muestra el subensamble utilizado para llevar a cabo el análisis de tensión de la estructura.

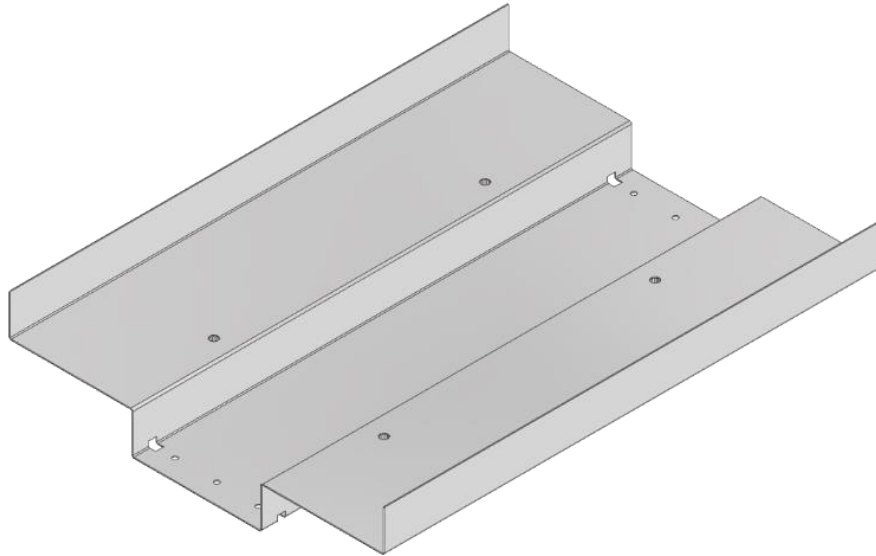


ILUSTRACIÓN 57. VISTA ISOMÉTRICA DEL SUBENSAMBLE SOBRE EL QUE SE DESARROLLÓ EL ANÁLISIS DE TENSIÓN.

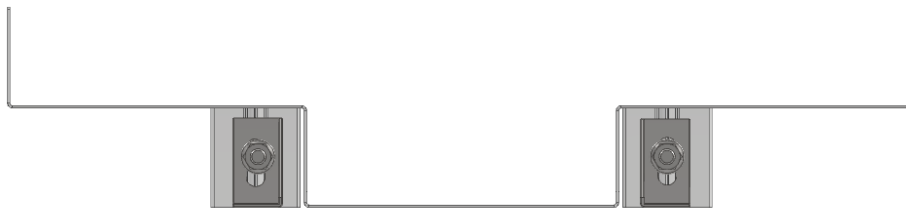


ILUSTRACIÓN 58. VISTA FRONTAL DEL SUBENSAMBLE SOBRE EL QUE SE DESARROLLÓ EL ANÁLISIS DE TENSIÓN.

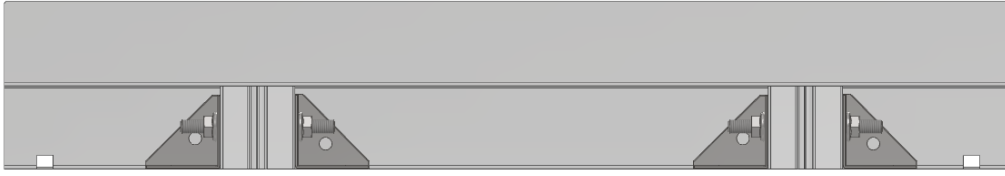


ILUSTRACIÓN 59. VISTA LATERAL DEL SUBENSAMBLE SOBRE EL QUE SE DESARROLLÓ EL ANÁLISIS DE TENSIÓN.

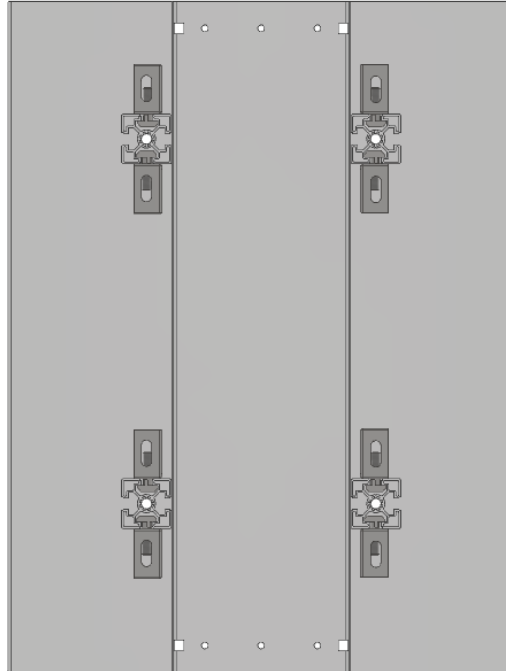





ILUSTRACIÓN 60. VISTA POSTERIOR DEL SUBENSAMBLE SOBRE EL QUE SE DESARROLLÓ EL ANÁLISIS DE TENSIÓN.

Para desarrollar el análisis de tensión se requieren 3 componentes esenciales: las restricciones fijas, las restricciones de pasador y las cargas. A continuación, se explica el concepto de cada una de ellas para entender el análisis presentado posteriormente.

- **Restricciones fijas**  – Restringe el movimiento en todas las direcciones de la geometría seleccionada.
- **Restricciones de pasador**  – Restringe el movimiento en las direcciones radial, axial, o tangencial dependiendo de las restricciones definidas.
- **Cargas**  - Fuerzas externas ejercidas a los elementos resistentes o a su propio peso.

Las condiciones que se establecieron para desarrollar el análisis fueron las siguientes (*Ilustración 61*):

- Se establecieron restricciones fijas en las caras superior e inferior de las columnas del perfil estructural de aluminio y en la base de la *cajuela* (que está fija a los perfiles *C* que conforman la plataforma del sistema motriz).
- Se establecieron restricciones de pasador en cada uno de los agujeros que tiene la lámina para mantenerse fija. Estos están ubicados en la base de la *cajuela* y en las *alas* para unir las con las columnas.
- Se establecieron 3 cargas. La carga naranja es referente a la fuerza de gravedad, *Autodesk Inventor* la ubica por defecto en el centroide del elemento. Las cargas amarillas simulan la fuerza ejercida sobre las *alas* para detectar el desplazamiento de la lámina en esa dirección (ver *Ilustración 61*).

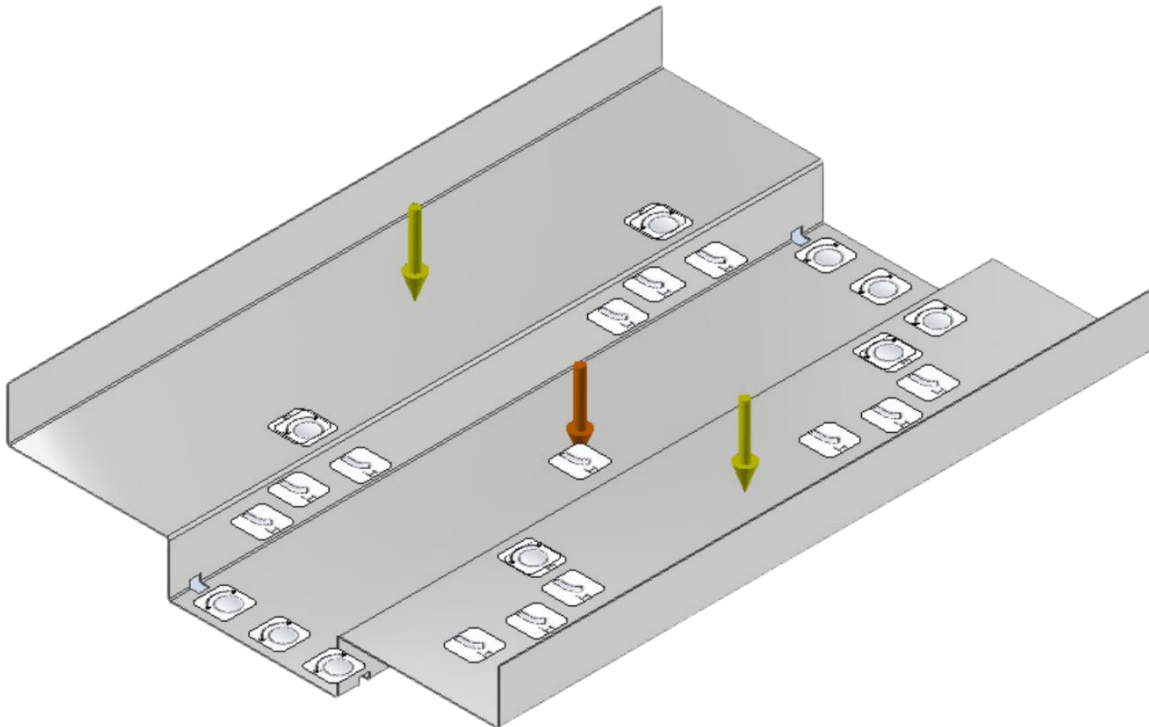


ILUSTRACIÓN 61. CONDICIONES ESTABLECIDAS EN EL ANÁLISIS DE TENSIÓN DEL SUBENSAMBLE.

Resultados de la simulación

Al realizar la simulación del análisis de tensión de Von Mises, se decidió iterar aumentando el valor de las cargas aplicadas sobre las *alas* de la lámina, con la finalidad de registrar el comportamiento del desplazamiento y de detectar con qué carga puntual el esfuerzo de Von Mises se acerca al límite de fluencia del material de la lámina. A continuación, se muestran los resultados:

TABLA 2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL ANÁLISIS DE TENSIÓN DE VON MISES DE LA LÁMINA DE LA BASE DEL ROBOT.

No. Iteración	Magnitud de las cargas aplicadas sobre las <i>alas</i> de la lámina [N]	Esfuerzo de Von Mises máximo [MPa]	Desplazamiento máximo de la lámina en el eje Y [mm]	Coefficiente o factor de seguridad mínimo
1	50	33.36	1.546	2.89
2	100	63.54	2.93	1.52
3	150	93.72	4.314	1.03
4	200	123.9	5.697	0.78
5	300	184.3	8.465	0.52

Antes de presentar las conclusiones del análisis de tensión, se definirán las variables registradas para comprender cómo influyen en las propiedades mecánicas del material de la lámina, en este caso, aluminio 1100-H14.

La tensión o esfuerzo de Von Mises es una medida combinada de todas las tensiones en el espacio y se utiliza para determinar si un componente se romperá bajo una carga dada. En la simulación, se compara la tensión de Von Mises con la tensión máxima admisible del material para determinar el factor de seguridad. El factor de seguridad es un índice que mide la seguridad del diseño desde el punto de vista de su resistencia mecánica [29]. Si la tensión de Von Mises es menor que la tensión máxima admisible, el factor de seguridad es mayor que 1 y el componente no se romperá. Si la tensión de Von Mises es mayor que la tensión máxima admisible, el factor de seguridad es menor que 1 y se debe considerar redimensionar el componente o realizar análisis no lineales para determinar si se puede seguir adelante con el mismo. [30]

Dicho lo anterior, cuanto mayor sea el valor del factor de seguridad, más seguro será el dispositivo. Un valor del factor de seguridad igual a 1 indica que el dispositivo fallará cuando alcance la carga de diseño y no será capaz de soportar ninguna carga adicional. En la industria, no se aceptan dispositivos con factor de seguridad menor a 1. Si las consecuencias de un fallo son graves, como la pérdida de vidas o lesiones físicas, se exige un valor de factor de seguridad más alto, ya sea por diseño o por ley. En resumen, un dispositivo es más seguro cuando es capaz de soportar una carga mayor que la carga de diseño, y el factor de seguridad indica cuántas veces el diseño es más seguro que la carga a la que estará expuesto el dispositivo en condiciones normales de operación. A continuación, se presenta una tabla de recomendaciones generales para establecer el factor de seguridad dependiendo de los materiales, condiciones de carga y ambientales, aplicaciones, etc. [31]

TABLA 3. RECOMENDACIONES GENERALES PARA ESTABLECER EL FACTOR DE SEGURIDAD EN BASE A SU APLICACIÓN.

Aplicaciones	FoS
Para su uso con materiales de alta fiabilidad donde las condiciones de carga y ambientales no son severas y donde el peso es una consideración importante.	1.3 – 1.5
Para su uso con materiales fiables cuando las condiciones de carga y ambientales no son severas.	1.5 – 2
Para su uso con materiales ordinarios cuando las condiciones de carga y ambientales no son severas.	2 – 2.5
Para su uso con menos intentos y para materiales frágiles donde la carga y las condiciones ambientales no son severas.	2.5 – 3
Para su uso con materiales cuyas propiedades no son fiables y cuyas condiciones de carga y ambientales no son severas, o cuando se utilizan materiales fiables en condiciones difíciles y ambientales.	3 – 4

Por último, el desplazamiento es la distancia y la dirección de la posición final respecto a la posición inicial de un objeto, en este caso, de las *alas* de la lámina que está siendo analizada.

El punto crítico para analizar en este estudio es el esfuerzo, se busca evitar la deformación plástica de la lámina; ya que si deforma de manera irreversible sería inútil, y afectaría a la composición de la estructura interna del robot. Por lo tanto, para desarrollar las conclusiones de las pruebas realizadas, se requiere conocer la resistencia mecánica del material, según la bibliografía de algunos fabricantes de lámina de aluminio 1100-H14, este material cuenta con una resistencia a la tracción de 125 [MPa] y un límite elástico de 115 [MPa]. [32]

Por lo tanto, de acuerdo con los resultados de las distintas iteraciones de la simulación, aplicando una carga puntual de 150 [N] (aproximadamente el peso de 15 [kg]) en el *ala* de la lámina, esta no se deformaría plásticamente, es por ello que, el coeficiente de seguridad para esta carga aplicada es de 1.03. Sin embargo, sobrepasando la magnitud de 150 [N] de carga puntual aplicada, la lámina estaría expuesta a deformarse plásticamente, como sucede al simular con cargas de 200 y 300 [N]. Para estos dos casos, el esfuerzo de Von Mises sobrepasa el límite elástico de 115 [MPa] de la lámina, de igual forma, esta es la razón por la que el coeficiente de seguridad de ambas iteraciones es menor a 1.

De acuerdo con los requerimientos de diseño, el equipo estimó que el dispositivo debía ser capaz de soportar una carga puntual de al menos 500 [N] en cada *ala*, es decir, una carga distribuida W de 824 [N/m], calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$W = \frac{F}{L} = \frac{500 \text{ [N]}}{0.607 \text{ [m]}} \approx 824 \text{ [N/m]}$$

Para poder satisfacer este requerimiento, en el diseño mecánico existen 2 posibilidades: cambiar la geometría o cambiar el material. Sin embargo, el proyecto tenía la limitante económica de no poder adquirir otra lámina, es decir, no se podía cambiar ni el material ni la geometría.

Este hecho fue determinante para que el equipo de diseño se planteara diseñar una nueva solución o para rediseñar la configuración y composición de la estructura. No obstante, antes de manufacturar y ensamblar cualquier otra solución, se optó por desarrollar en CAD una mejora que se pudiera implementar a la base actual del robot, de esta forma, se podría iterar con la simulación de análisis de elementos finitos para comprobar que la solución a diseñar funcionaría antes de manufacturarla. La métrica por satisfacer era que soportara la carga puntual de 500 [N] con un factor de seguridad de al menos 1.5, de acuerdo con las recomendaciones expuestas anteriormente (para su uso con materiales fiables cuando las condiciones de carga y ambientales no son severas.)

7.2.5 Adaptaciones en la base del robot

El equipo de diseño comenzó a desarrollar bosquejos de las posibles soluciones para mejorar la base del robot, y así satisfacer los requerimientos de diseño. Sin embargo, el director Mauricio Reyes propuso seguir una de las bases estructurales de las superficies *voladizas*: utilizar escuadras en el ángulo recto formado en las *alas* de la lámina (ver *Ilustración 62*).

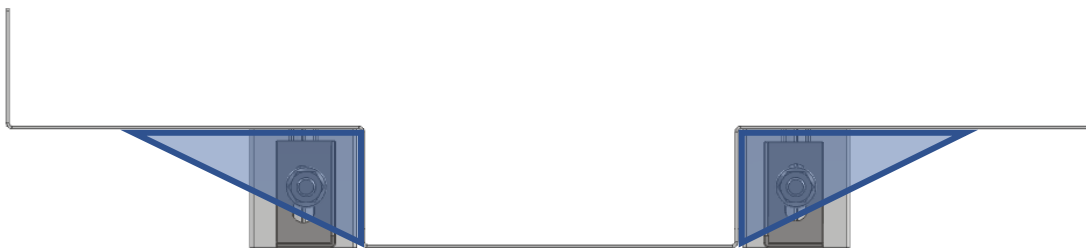


ILUSTRACIÓN 62. PROPUESTA PARA MEJORAR LA ESTRUCTURA DE LA BASE DEL ROBOT.

Por lo tanto, el equipo de diseño comenzó a desarrollar el CAD de estas escuadras para identificar cómo se podrían adaptar a la estructura, hasta ahora construida, del robot. Esta propuesta no descartaba el uso de las escuadras del perfil estructural, es decir, eran una adición a lo que ya estaba ensamblado.

Después de desarrollar algunas propuestas en *Autodesk Inventor* se identificó que lo que repercutía directamente en el desplazamiento de las *alas* de la lámina se fundamentaba en el concepto del momento de fuerza.

El momento de una fuerza, también conocido como torque, momento dinámico o simplemente momento, es una magnitud vectorial que mide la capacidad que posee una fuerza para alterar la velocidad de giro de un cuerpo, en este caso, de la lámina.

Por lo tanto, entre más longitud de la superficie *voladiza* se pudiera sostener con las escuadras, habría una mayor reducción en el momento de la fuerza aplicada sobre el *ala*.

Por otro lado, al tomar la decisión de utilizar escuadras para mejorar la estructura de la base, se estableció que estas se iban a manufacturar por impresión 3D. La impresión 3D, también conocida como manufactura aditiva (AM - *Additive Manufacturing*), es el proceso de creación de objetos mediante el depósito de capas de material unas sobre otras. Este proceso funciona cortando un modelo digital 3D en cientos de capas finas mediante un software específico; cada capa corresponde a la forma 2D exacta de una sección del objeto. Las capas se imprimen consecutivamente en 3D de una en una hasta obtener el objeto completamente impreso. [33]

Existen diferentes formas de imprimir objetos en 3D, sin embargo, para el caso del proyecto *Ayúdame* se utilizará el conocido FFF (Fabricación de Filamento Fundido) o FDM (Modelado por Deposición Fundida) que utilizan bobinas de filamento, ya que el laboratorio de robótica del CIDI cuenta con 4 diferentes modelos de impresoras 3D FFF. Una impresora 3D FFF dibuja una capa de plástico fundido en su lecho de impresión o construye una placa. La fusión se produce dentro de un extrusor, que calienta el filamento de plástico a medida que los engranajes lo empujan a través de la boquilla. [33]

Una de las principales ventajas de la manufactura aditiva es la capacidad de producir diseños muy complejos que serían imposibles de realizar con otros métodos de producción. Además, la impresión 3D es más rápida que los métodos de producción habituales y puede permitir la creación de prototipos en poco o ningún tiempo de espera [33]. Por lo tanto, la geometría de las escuadras no iba a ser una limitante en el diseño.

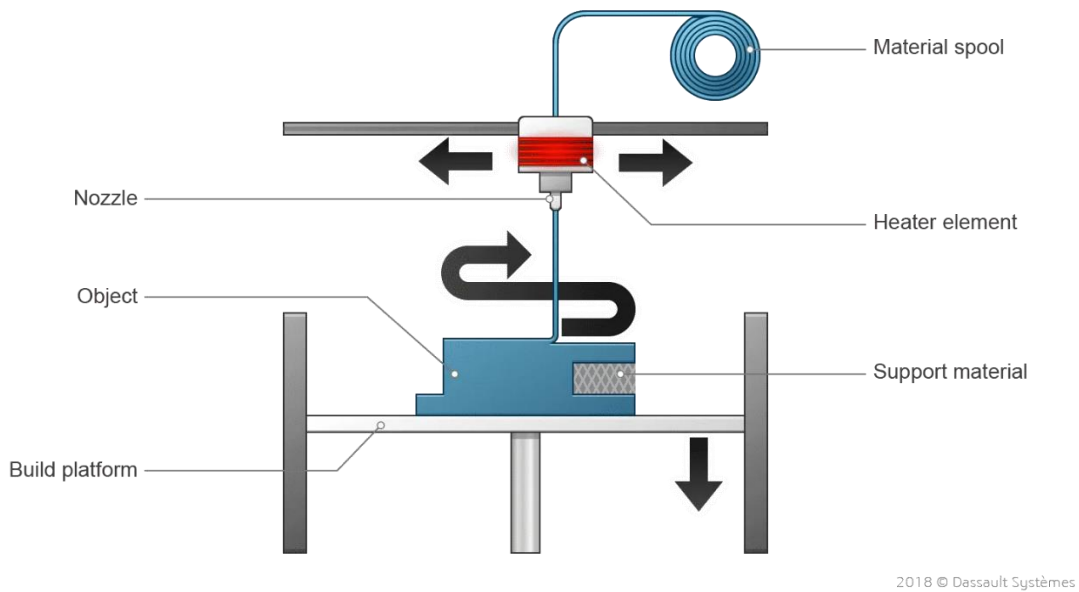


ILUSTRACIÓN 63. FUNCIONAMIENTO DE UNA IMPRESORA 3D FFF [33].

Solución diseñada

Después de desarrollar diferentes bocetos y modelos 3D de las escuadras, y de diseñar la adaptación de estas al ensamble hasta ahora manufacturado, el equipo de diseño decidió utilizar la siguiente configuración.

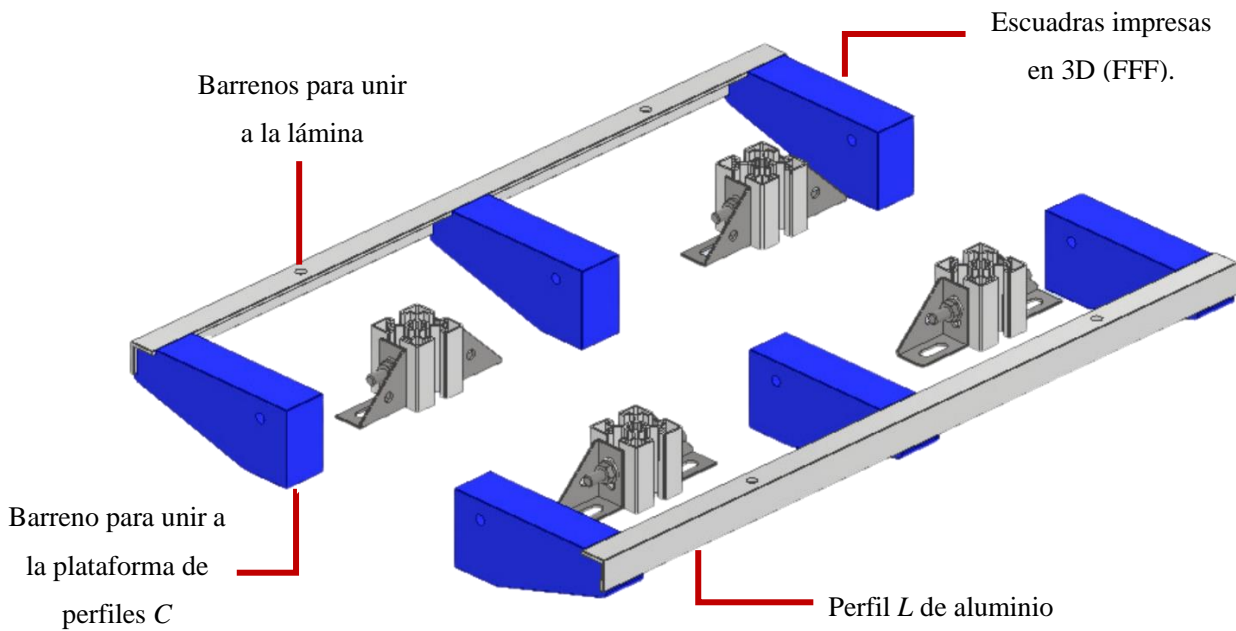


ILUSTRACIÓN 64. SOLUCIÓN DISEÑADA PARA MEJORAR LA ESTRUCTURA DE LA BASE DEL ROBOT.

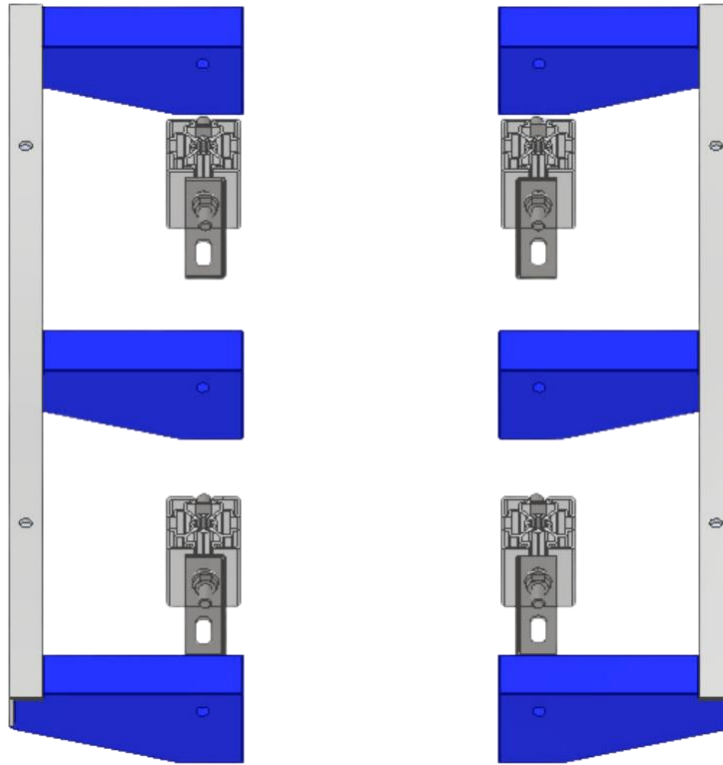


ILUSTRACIÓN 65. VISTA FRONTAL-SUPERIOR DE LA SOLUCIÓN DISEÑADA.

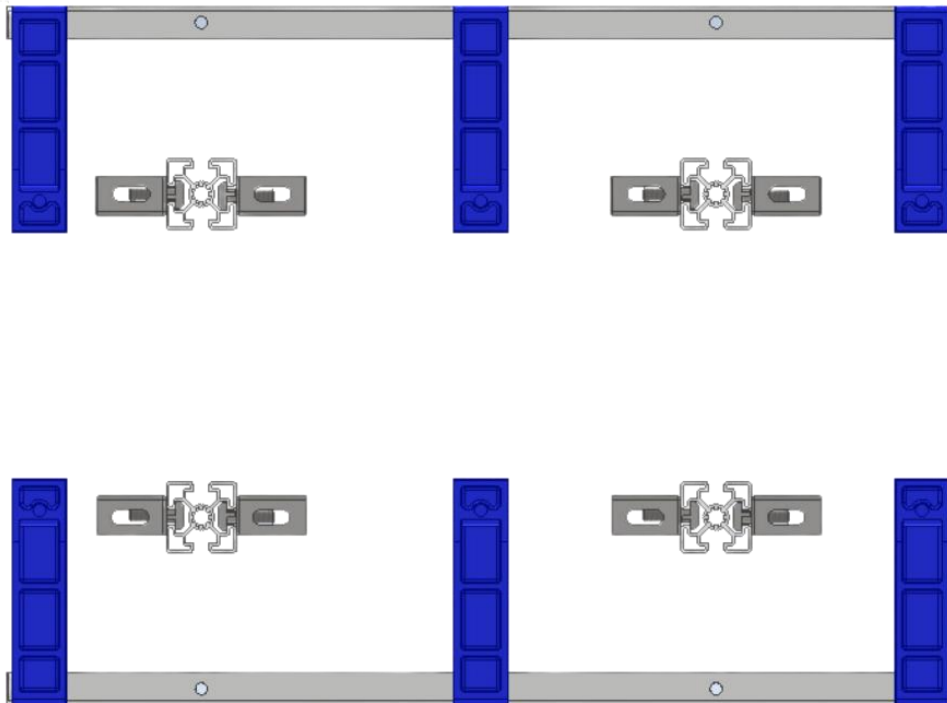


ILUSTRACIÓN 66. VISTA SUPERIOR DE LA SOLUCIÓN DISEÑADA.

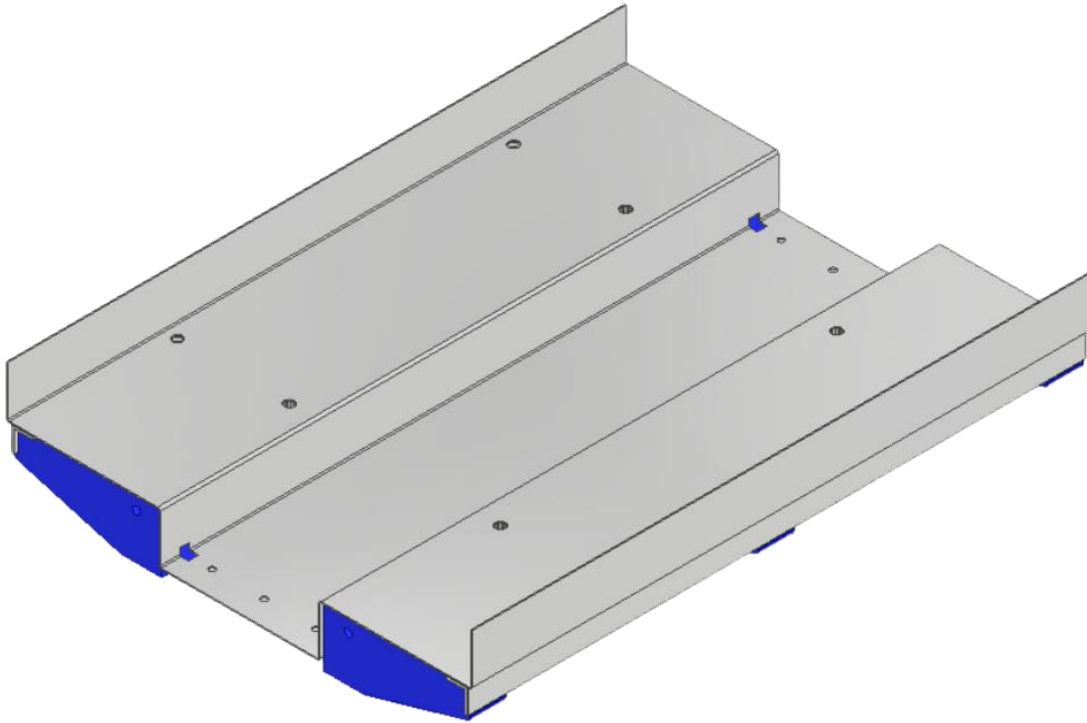


ILUSTRACIÓN 67. SOLUCIÓN DISEÑADA CON LA LÁMINA ENSAMBLADA.

Se optó por diseñar las escuadras de tal forma que pudieran soportar en su totalidad la superficie *voladiza*, sin embargo, se quería evitar unir mecánicamente estas escuadras directamente a la lámina. El laboratorio de laminado del CIDI pudo donar un sobrante de perfil *L* de aluminio, por lo tanto, se desarrolló la adaptación de unir mecánicamente dicho perfil a la orilla externa de cada *ala* de la lámina, para que posteriormente este perfil embonara perfectamente sobre las escuadras impresas. Es decir, las escuadras están ensambladas directamente a la plataforma del tren motriz (conformada por los perfiles *C* de aluminio) por medio de un perno; el perfil *L* está ensamblado a las *alas* de la lámina por dos pernos. Inicialmente, se pondrían solo 2 escuadras debajo de cada *ala*, una en cada extremo, sin embargo, se decidió colocar una tercera en el centro de la superficie *voladiza* para evitar que los esfuerzos producidos se centralizaran en esa sección que *a priori* sería la menos reforzada.

El laboratorio de robótica del CIDI cuenta con impresoras 3D FFF de diferentes marcas y modelos, entre ellas: Ultimaker Extended 2+, Maker bot replicator 2, Ender 3 Pro y Ender 5 Plus. El equipo de diseño se encargó de diseñar las soluciones en *Autodesk Inventor* o en *Fusion 360*, y los responsables del laboratorio de robótica imprimían dichas piezas en alguna de las impresoras antes mencionadas. El filamento utilizado para manufacturar las diferentes piezas del proyecto era de PLA (ácido poliláctico), uno de los materiales más utilizados en la impresión 3D FFF debido a su facilidad de uso. El PLA es considerado como polímero semicristalino con una temperatura de fusión de entre 170-180 [°C], lo que evita la necesidad de utilizar

una bandeja calefactada y una cámara de impresión cerrada. El PLA ofrece altas velocidades de impresión y bordes bastante definidos, pero también tiene una mayor viscosidad que otros termoplásticos estándar, lo que puede generar atasco del cabezal de impresión si no se tiene cuidado. En comparación con otros termoplásticos como el ABS, el PLA no tiene la misma resistencia y flexibilidad, por lo que se recomienda utilizarlo en piezas que no tengan grandes complejidades mecánicas. Una de sus desventajas es que no es adecuado para aplicaciones donde se requiera una mayor resistencia a altas temperaturas. [34]

Pruebas cuantitativas en la nueva solución

Una vez que se realizó el ensamble mostrado en la *Ilustración 67* en *Autodesk Inventor*, antes de manufacturar la nueva solución se desarrolló nuevamente un análisis de tensión de Von Mises, con la finalidad de comparar el comportamiento de la nueva solución respecto a los resultados antes de la adaptación.

De igual forma que con el primer análisis de tensión, se iteró la simulación aumentando el valor de las cargas aplicadas sobre las *alas* de la lámina, y se registró el comportamiento del desplazamiento, el esfuerzo máximo de Von Mises y el factor de seguridad. A continuación, se muestran los resultados:

TABLA 4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS DOS SIMULACIONES DE ANÁLISIS DE TENSIÓN, ANTES Y DESPUÉS DE IMPLEMENTAR LAS ADAPTACIONES.

No. Iteración	Cargas aplicadas sobre las <i>alas</i> de la lámina [N]	Simulación 1			Simulación 2		
		Esfuerzo de Von Mises máximo [MPa]	Desplazamiento máximo en el eje Y [mm]	Factor de seguridad mínimo	Esfuerzo de Von Mises máximo [MPa]	Desplazamiento máximo en el eje Y [mm]	Factor de seguridad mínimo
1	50	33.36	1.546	2.89	4.614	0.025	15
2	100	63.54	2.93	1.52	8.986	0.048	10.74
3	150	93.72	4.314	1.03	13.36	0.0724	7.23
4	200	123.9	5.697	0.78	17.73	0.096	5.44
5	300	184.3	8.465	0.52	26.47	0.1434	3.65

Observando la tabla anterior, es notoria la reducción en el esfuerzo de Von Mises en la lámina de aluminio, por otro lado, el desplazamiento de las *alas* se redujo considerablemente, y por su parte el factor de seguridad aumentó en cada iteración. Por lo tanto, teóricamente la adaptación implementada arrojó los resultados esperados, es decir, con las cargas aplicadas en la simulación, la lámina no estaría expuesta a

una deformación plástica. Sin embargo, como se explicó anteriormente se estima que, para satisfacer los requerimientos de diseño, las *alas* de la lámina deben ser capaz de soportar una carga puntual de al menos 500 [N]. Por esa razón, a continuación se adjunta el informe generado en *Autodesk Inventor* del análisis estático de tensión, aplicando dichas cargas sobre las superficies *voladizas*.

En la *Ilustración 68* se muestran las condiciones establecidas para desarrollar el análisis estático. A diferencia del análisis hecho antes de implementar las adaptaciones en el ensamble, se añadieron más restricciones tanto de tipo pasador como fijas. En cuanto a las cargas, de forma similar al estudio anterior, la naranja es referente a la fuerza de gravedad y las amarillas son fuerzas puntuales de 500 [N].

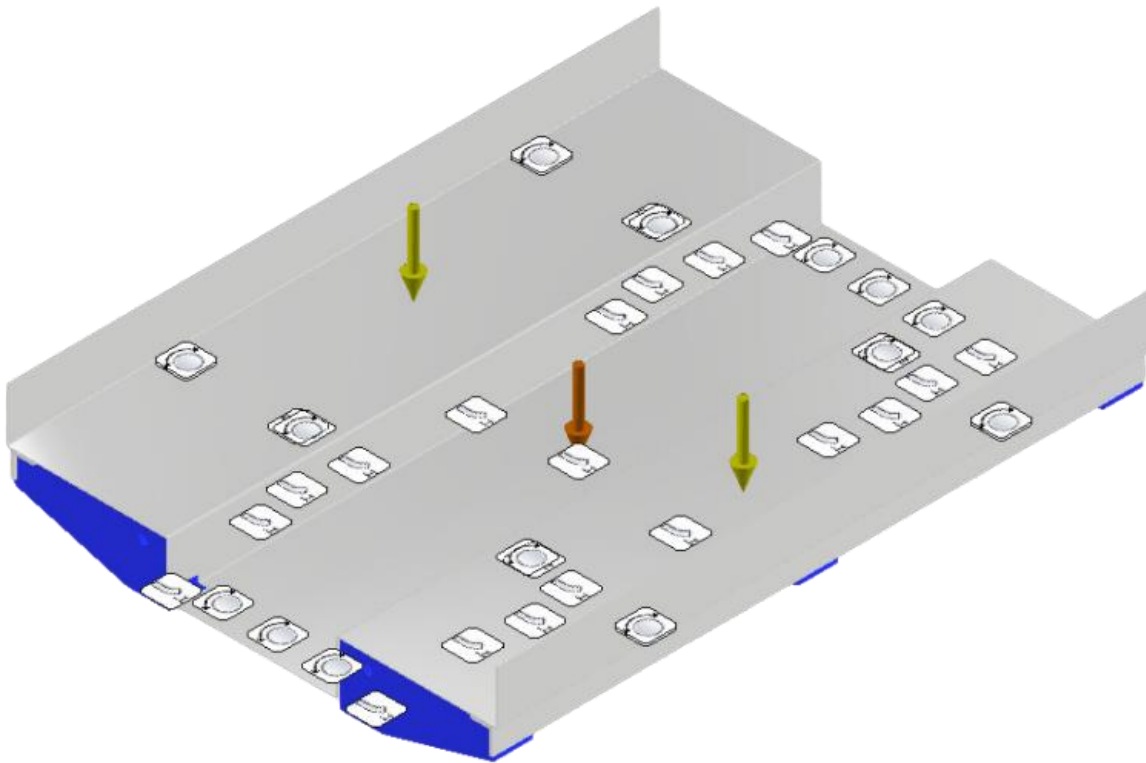


ILUSTRACIÓN 68. CONDICIONES ESTABLECIDAS EN EL ANÁLISIS DE TENSIÓN DEL SUBENSAMBLE CON LAS ADAPTACIONES IMPLEMENTADAS.

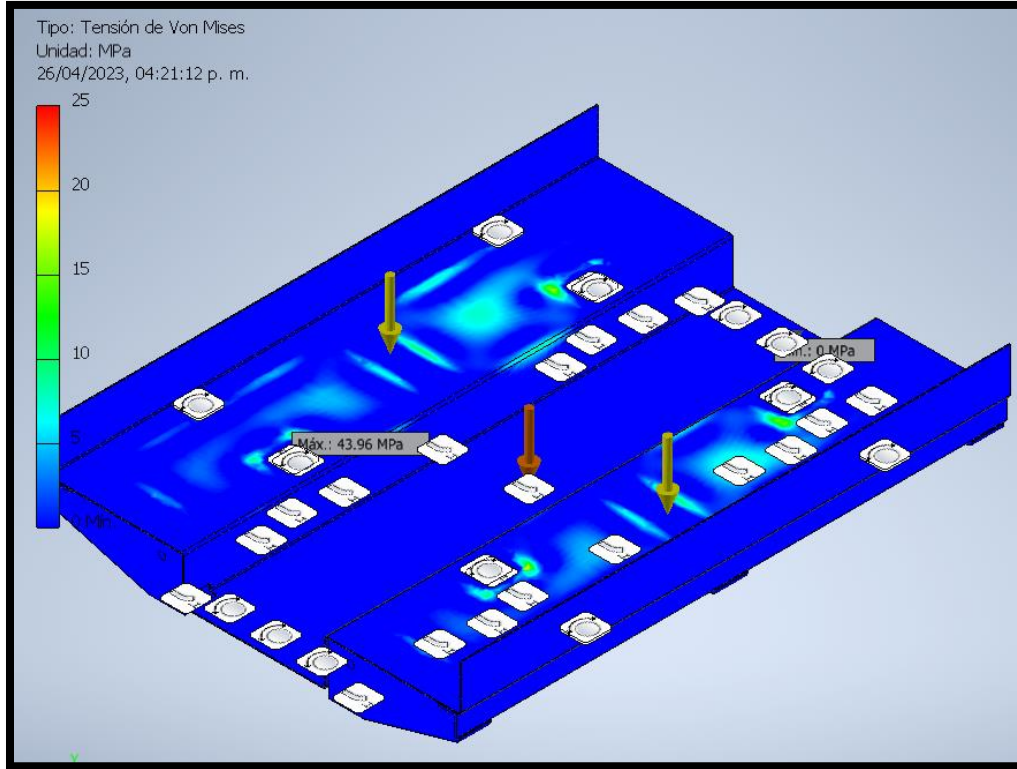


ILUSTRACIÓN 69. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN – ANÁLISIS DE TENSIÓN DE VON MISES.

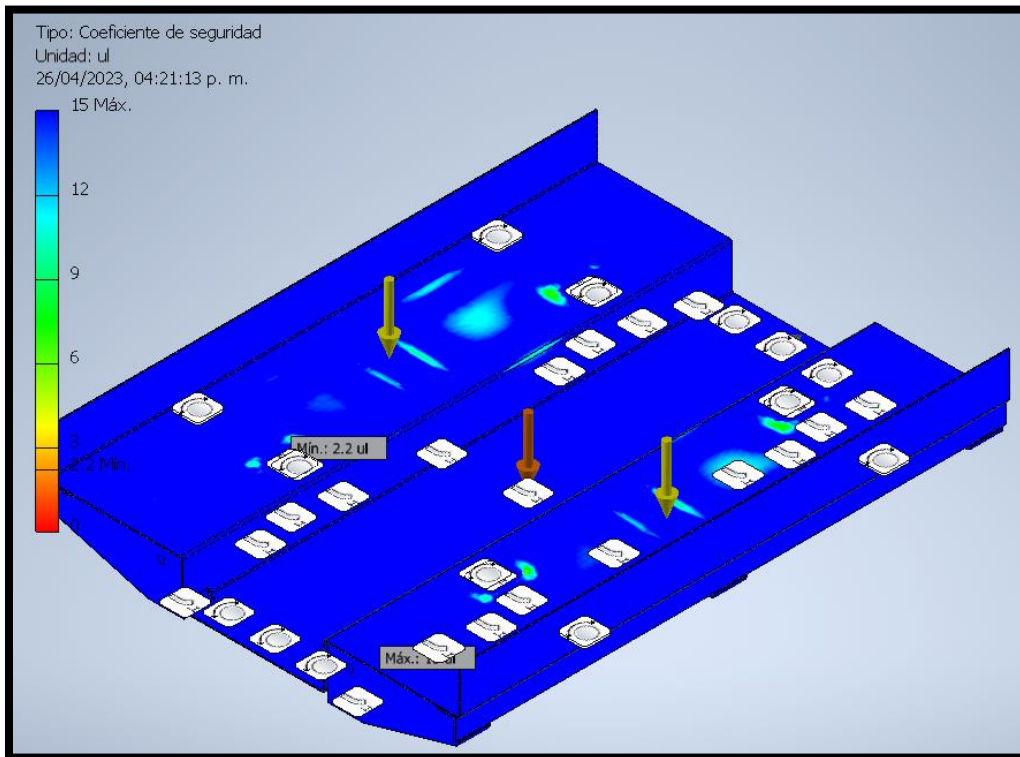


ILUSTRACIÓN 70. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN - ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE SEGURIDAD.

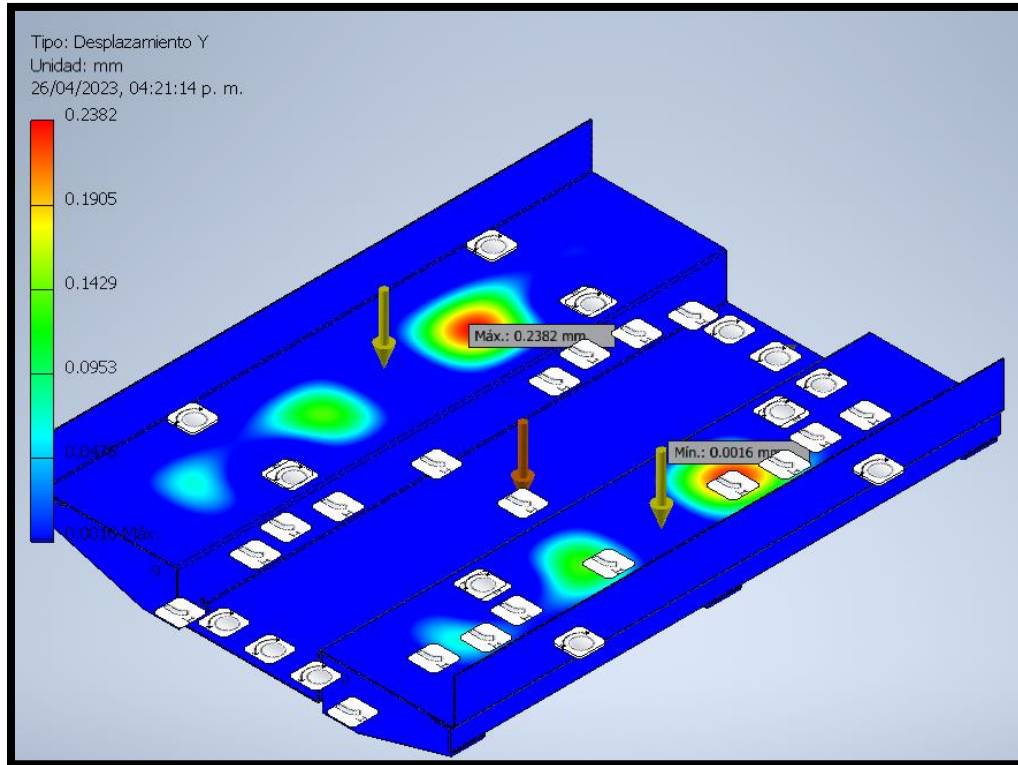


ILUSTRACIÓN 71. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN - ANÁLISIS DEL DESPLAZAMIENTO SOBRE EL EJE Y.

La métrica por satisfacer era que soportara la carga puntual de 500 [N] con un factor de seguridad de al menos 1.5. De acuerdo con los resultados presentados, el equipo de diseño aceptó la solución, ya que con las cargas de 500 [N] aplicadas sobre la lámina, esta no se deformaría plásticamente, debido a que el esfuerzo de Von Mises máximo ejercido en la simulación es de 43.96 [MPa], y el límite elástico del material es de 115 [MPa]. Por otro lado, el factor de seguridad mínimo es de 2.2, por lo tanto, supera con creces el 1.5 solicitado.

Al aceptar esta solución, el equipo de diseño procedió a manufacturarla e implementarla en la estructura del robot.

7.3 Diseño, manufactura e integración de la estructura vertical del robot

Anteriormente, en la sección *Deficiencias identificadas en el módulo 2 – Estructura vertical*, se enuncian y detallan las deficiencias que se identificaron en el modelo conceptual de *Ayúdame 2.0*. Entre las principales deficiencias estaban los métodos de ensamble, los procesos de manufactura propuestos para su fabricación y la adquisición de los elementos que la conformaban.

En el momento que se propuso el diseño de dicha estructura vertical no estaba definido el sistema motriz, ni la base del robot. Por lo tanto, el actual equipo de diseño decidió desarrollar una nueva propuesta de la estructura vertical, que se adecuara a lo que hasta ahora se había construido y ensamblado físicamente, es decir, al sistema motriz y a la base del robot.

El proceso que se llevó a cabo para desarrollar esta propuesta fue el siguiente. Primeramente, se realizó una lluvia de ideas con el equipo; en ella se esbozó la forma y los elementos principales que conformarían dicha estructura. Después, se decidió desarrollar el modelo CAD de lo que se había acordado en los bosquejos, con la finalidad de prever los métodos de ensamble y la adquisición de nuevos elementos. Por último, una vez que se tuvo el modelo 3D de la estructura, se planeó la manufactura y la implementación de la solución.

Para desarrollar la nueva propuesta de la estructura vertical, el equipo priorizó utilizar los recursos disponibles y reducir al máximo nuevas inversiones en la adquisición de materiales o elementos, con la finalidad de utilizar los recursos económicos restantes en los materiales necesarios para manufacturar la carcasa del robot, posteriormente. El equipo de diseño disponía de 4 metros de perfil estructural de aluminio y la posibilidad de manufacturar una gran cantidad de piezas por impresión 3D FFF.

La nueva propuesta se muestra en la *Ilustración 72*. Esta estructura está compuesta principalmente por dos *postes* de perfil estructural de aluminio (el mismo con el que se fabricaron las columnas que se encuentran debajo de las *alas* de la lámina de la base), que pasan a través de la lámina de la base del robot, y que están sujetos directamente a la plataforma del sistema motriz (constituida por los perfiles *C* de aluminio) por medio de dos escuadras de unión de acero galvanizado. Como se ha mencionado en secciones anteriores del presente trabajo; los perfiles estructurales de aluminio o perfiles de aluminio extruido cuentan con propiedades mecánicas que permiten satisfacer una amplia variedad de necesidades, entre las más relevantes están:

- Son muy resistentes a las condiciones climáticas, ofreciendo perdurabilidad.
- Son fáciles de trabajar y pueden emparejarse con otros materiales como placas de yeso, vidrio templado, madera o policarbonato.
- Son excelentes aislantes térmicos y acústicos en combinación con materiales como el noryl o la poliamida.
- Son ligeros y adaptables.
- Pueden recibir terminados esmaltados, lacados, texturizados, etc.
- Es un material altamente reciclable
- No requiere mucho mantenimiento y es fácil de limpiar. [35]

Por lo tanto, además de ahorrar en la adquisición de otro tipo de material, los perfiles de aluminio extruido satisfacen los requerimientos de diseño de la estructura vertical, expuestos en el apartado 6.1.2 *Módulo 2 – Estructura vertical*.

Con respecto a las escuadras de unión, se utilizaron las de acero galvanizado debido a los beneficios que aporta este material tales como: su resistencia a la corrosión y al óxido, tiene una gran durabilidad, cuenta con un alto módulo de Young, es decir, es muy resistente y es económico en comparación con otros metales. Además, este tipo de escuadras son fáciles de adquirir en el mercado. [36]

El equipo de diseño decidió recortar la lámina de la base del robot, para que por ahí pasaran los *postes*, por dos razones principales. La primera razón fue que con la última adaptación que se le hizo a la base del robot, cuando se colocaron las 6 escuadras debajo de las *alas* de la lámina, esta base quedó suficientemente reforzada, es decir, con creces satisfizo los requerimientos de diseño (como se pudo observar en los resultados del análisis de tensión), por lo tanto, se estimó que si se retiraban 2 de las 4 columnas (específicamente las traseras) no interferiría abruptamente en el comportamiento esperado de la base. La segunda razón fue que, analizando los requerimientos de diseño de la estructura vertical, esta se encarga de aportarle rigidez y altura al robot, además sirve como soporte de algunos componentes de la carcasa y del módulo de almacenamiento; por este motivo se priorizó la rigidez de esta estructura. Así, se decidió unificar la estructura vertical (específicamente los *postes*) con la plataforma del sistema motriz; que al estar constituida por perfiles *C* de aluminio, proveía mayor rigidez y robustez que si los *postes* se hubiesen ensamblado directamente a la lámina de la base. Además, analizando cómo se transmitirían las cargas que se aplicarían directamente sobre la estructura vertical, estas recaerían hasta el sistema de amortiguación de las llantas *mecanum*, es decir, la energía proveniente de las cargas externas se distribuiría a través del sistema motriz y la estructura vertical, no se concentrarían en un solo elemento.

Por otro lado, se decidió colocar un travesaño de perfil estructural de aluminio que mantuviera a los *postes* paralelos, ya que, por el método de ensamble utilizado, estos oscilaban en función de las cargas que se les aplicarían; el travesaño ayudó a que los *postes* se mantuvieran paralelos y rígidos.

Por último, se diseñó una pieza que pudiera embonar en la parte superior de los *postes* y que, simultáneamente, fuera capaz de soportar el panel superior de la carcasa del robot. Esta pieza fue diseñada a partir de la inclinación de dicho panel, la cual fue determinada por el análisis ergonómico desarrollado en la etapa conceptual del modelo. Al ser una pieza personalizada para satisfacer dichos requerimientos, se decidió manufacturar por impresión 3D FFF, con un filamento de plástico PLA (características en la página). Esta pieza se diseñó priorizando su geometría, sin embargo, también se consideró una

composición estructural robusta para evitar deformaciones plásticas. Al no estar expuesta a cargas suficientemente grandes se omitió analizar a fondo el riesgo de deformación.

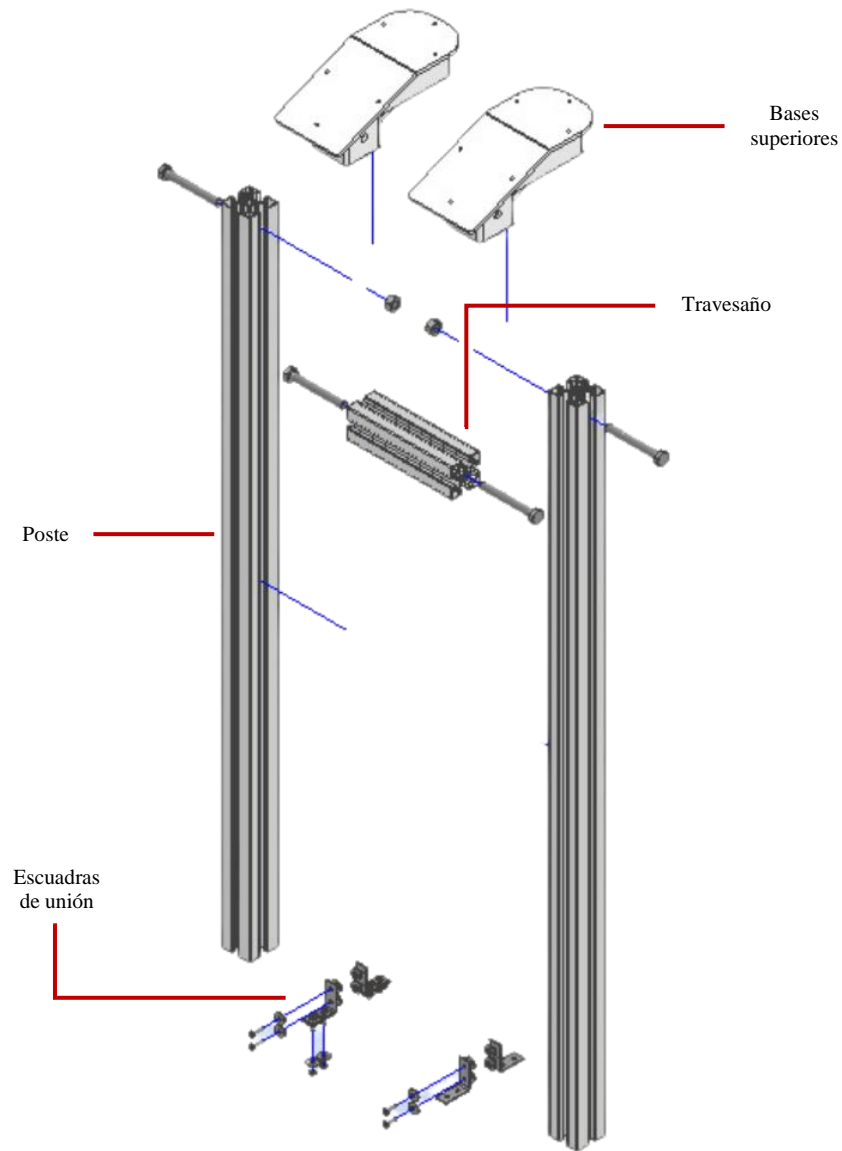


ILUSTRACIÓN 72. MODELO DE LA ESTRUCTURA VERTICAL, VISTA EXPLOSIONADA.

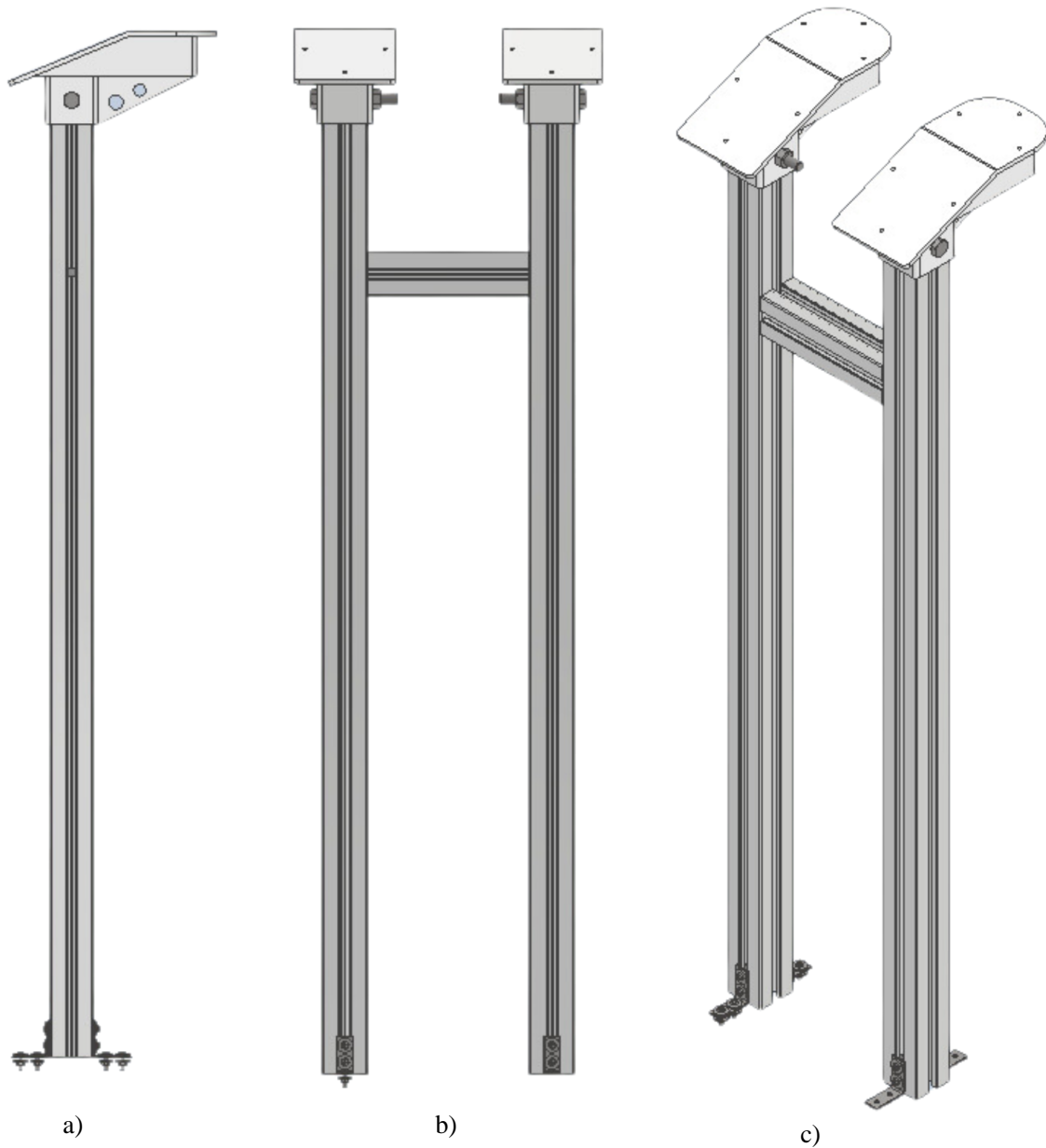


ILUSTRACIÓN 73. ESTRUCTURA VERTICAL ENSAMBLADA.

- A) VISTA LATERAL
- B) VISTA FRONTAL
- C) VISTA ISOMÉTRICA

7.3.1 Métodos de ensamble de la estructura vertical

Ensamble de los postes con la plataforma del sistema motriz

Como se mencionó antes, se decidió unir los postes de la estructura vertical con la plataforma del sistema motriz. Para hacerlo, se optó por utilizar las escuadras de unión de acero galvanizado; cada una de ellas sujeta por 4 pernos, 2 anclados al poste y 2 al perfil C de la plataforma, como se observa en la *Ilustración*

74. Igualmente, se utilizaron arandelas y tuercas para generar la sujeción mecánica que se muestra en la *Ilustración 77*, donde se colocó una arandela delante y otra detrás de la escuadra, y una tuerca que mantiene acoplados todos los elementos. Este acomodo de tornillos, arandelas y tuercas se eligió para evitar desarrollar un proceso de manufactura sobre el poste o sobre el perfil C, es decir, con la configuración de estos elementos mecánicos se logró realizar la unión que se buscaba. A continuación, se muestran diferentes vistas de este ensamble con la finalidad de que el lector pueda comprender la descripción anterior.

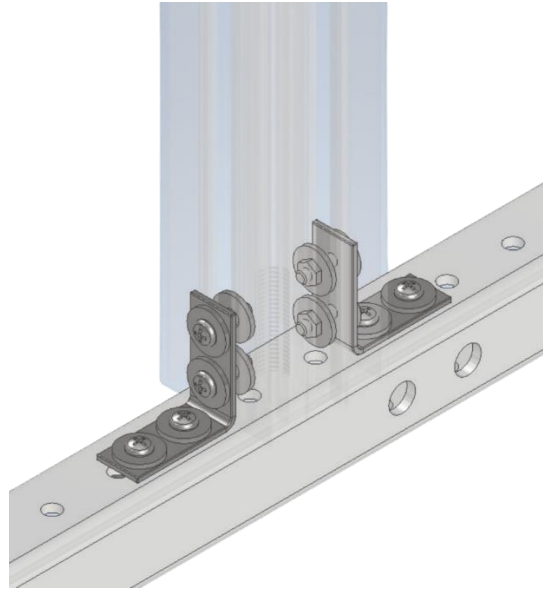


ILUSTRACIÓN 74. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON LA PLATAFORMA DEL SISTEMA MOTRIZ - VISTA ISOMÉTRICA.

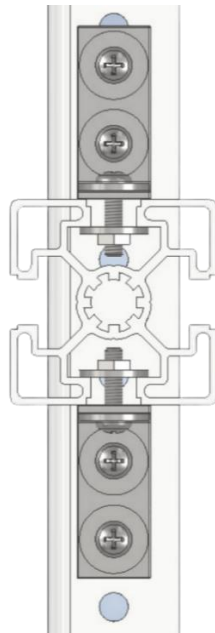


ILUSTRACIÓN 75. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON LA PLATAFORMA DEL SISTEMA MOTRIZ - VISTA AÉREA.

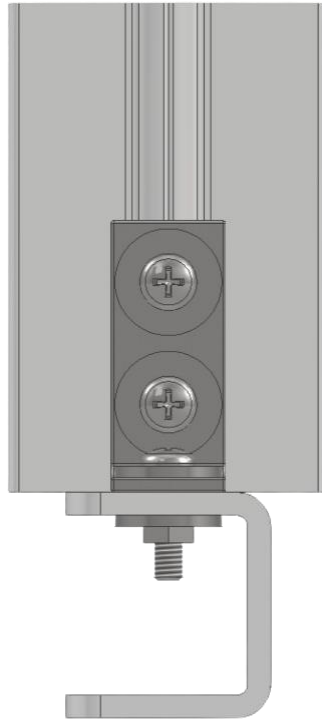


ILUSTRACIÓN 76. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON LA PLATAFORMA DEL SISTEMA MOTRIZ - VISTA FRONTAL.

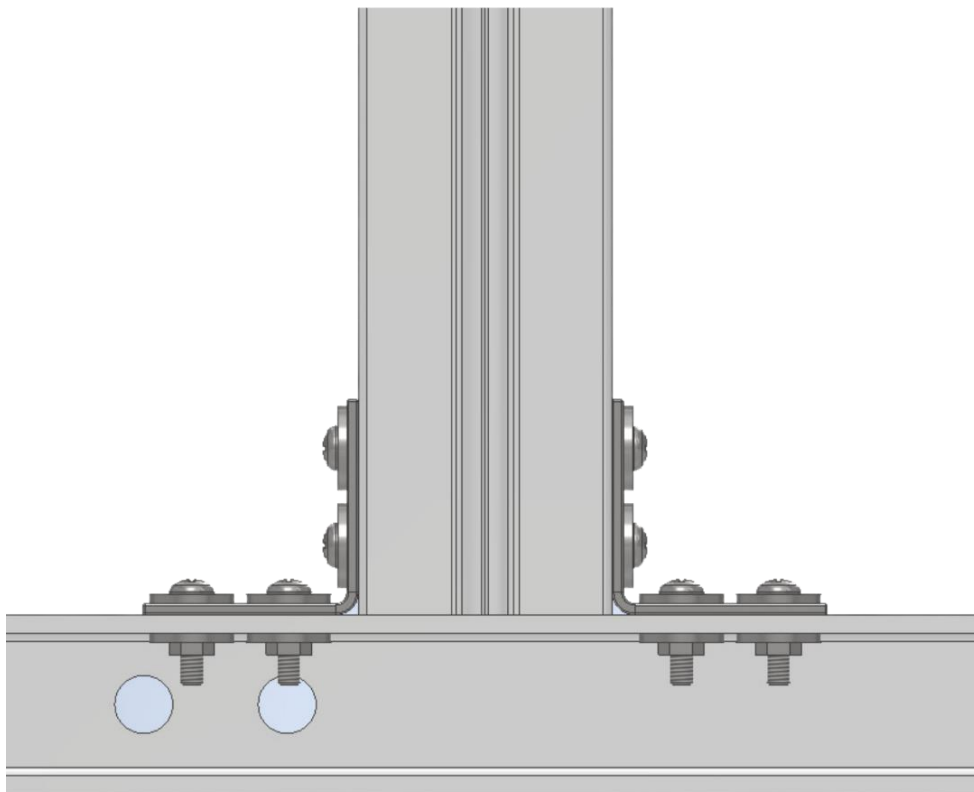


ILUSTRACIÓN 77. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON LA PLATAFORMA DEL SISTEMA MOTRIZ - VISTA LATERAL.

Ensamble de los postes con el travesaño

Como se mencionó antes, la función de este travesaño es mantener los postes paralelos, equidistantes y rígidos. Para diseñar el ensamble del travesaño con los postes, primeramente, se investigó cómo se suelen unir este tipo de perfiles estructurales entre sí para formar un ángulo de 90° entre ellos. Se descubrió que se suele colocar un tornillo con cabeza de martillo en la sección circular que atraviesa todo el perfil, y la cabeza de dicho perno se embona en uno de los rieles laterales del perfil al que se quiere unir (para entender esta descripción observe la *Ilustración 80*). Sin embargo, se detectaron tres aspectos necesarios para llevar a cabo el ensamble presentado en la *Ilustración 80*.

El primer aspecto era que la sección circular que atraviesa todo el perfil no estaba roscada; para solucionar esto se requería roscar dicha sección con un machuelo o tarraja.

El segundo aspecto era que los tornillos con cabeza de martillo no eran de fácil adquisición en la CDMX, para solucionar esto se optó por comprar pernos con cabeza hexagonal y con herramientas como ceguetas y lijas, asemejar lo más posible a la forma de la sección transversal del riel del perfil.

Por último, el tercer aspecto fue que el travesaño requería roscarse de un lado con una rosca derecha y del otro lado con una rosca izquierda; en caso contrario, al momento que se insertaran la cabeza de los tornillos en los rieles de los postes, y el travesaño comenzara a girar sobre su propio eje para que los tornillos se apretaran, y así el travesaño quedase fijo; mientras un tornillo se apretase, el otro se aflojaría. Para solucionar esto, lo ideal hubiese sido utilizar un machuelo de rosca izquierda, sin embargo, no era posible por el presupuesto limitado; al final se optó por taladrar de lado a lado los postes y a los pernos hacerles una línea en la cabeza hexagonal con la finalidad de que se pudieran apretar con un desatornillador plano, como se muestra en la *Ilustración 78*.

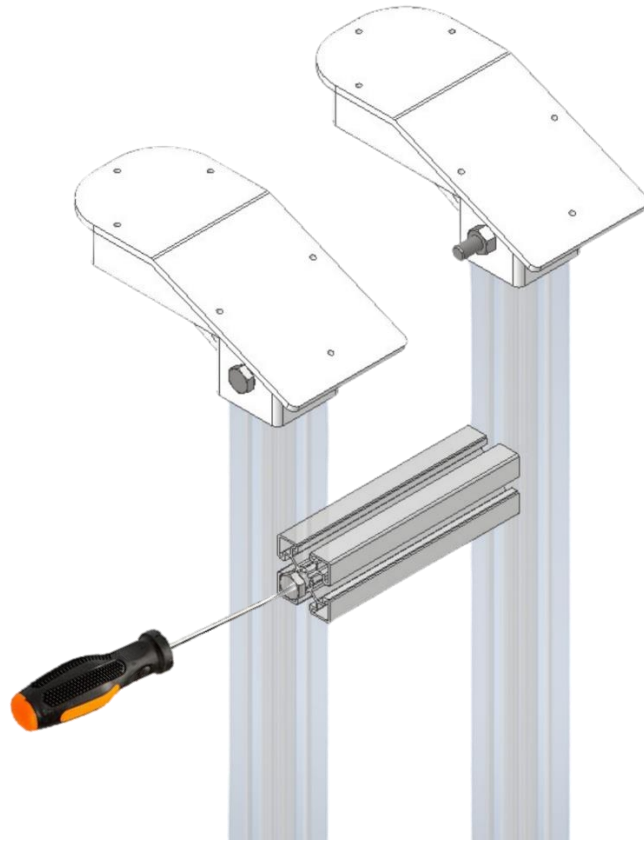


ILUSTRACIÓN 78. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON EL TRAVESAÑO - VISTA ISOMÉTRICA.

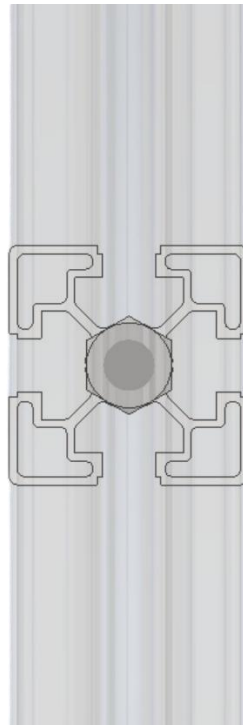


ILUSTRACIÓN 79. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON EL TRAVESAÑO - VISTA LATERAL.

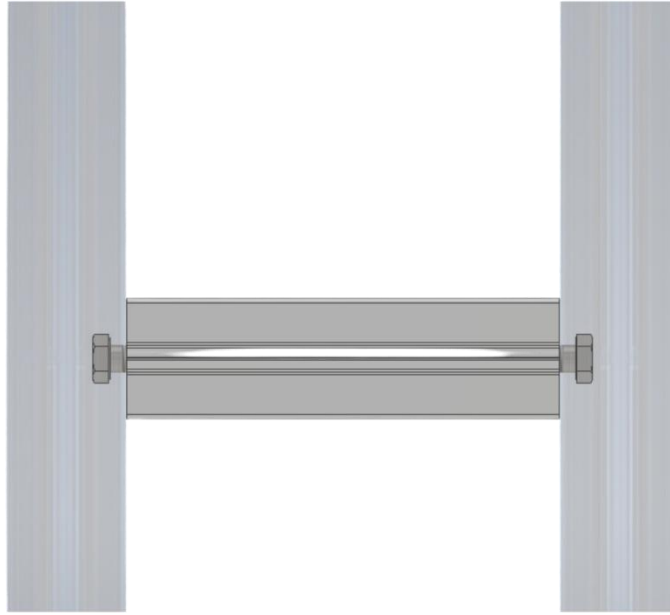


ILUSTRACIÓN 80. ENSAMBLE DE LOS POSTES CON EL TRAVESAÑO - VISTA FRONTAL.

Ensamble de las bases superiores con los postes

La ventaja de haber fabricado las bases superiores mediante manufactura aditiva es que la base se podía adaptar a los postes y no viceversa. Para ensamblarlas se optó por una sujeción mecánica mediante un perno de cabeza hexagonal, que atraviesa al poste, acompañado de una tuerca, como se observa en la *Ilustración 81*. Con esta sujeción mecánica se limitaban todos los grados de libertad de la pieza.

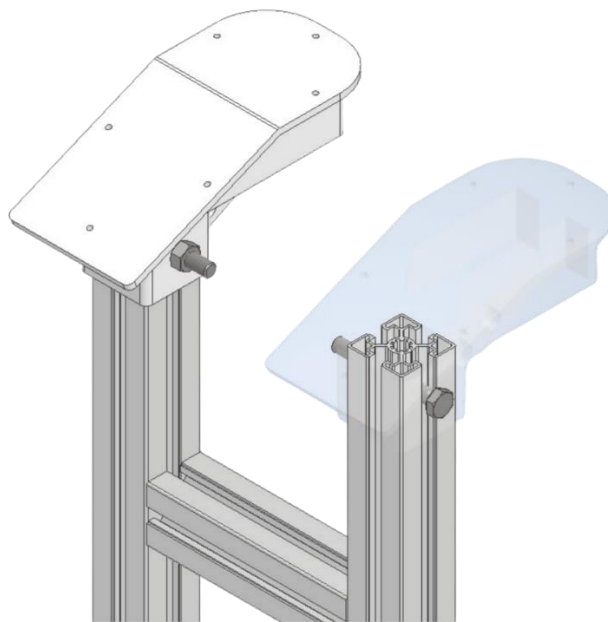


ILUSTRACIÓN 81. ENSAMBLE DE LAS BASES SUPERIORES CON LOS POSTES - VISTA ISOMÉTRICA.

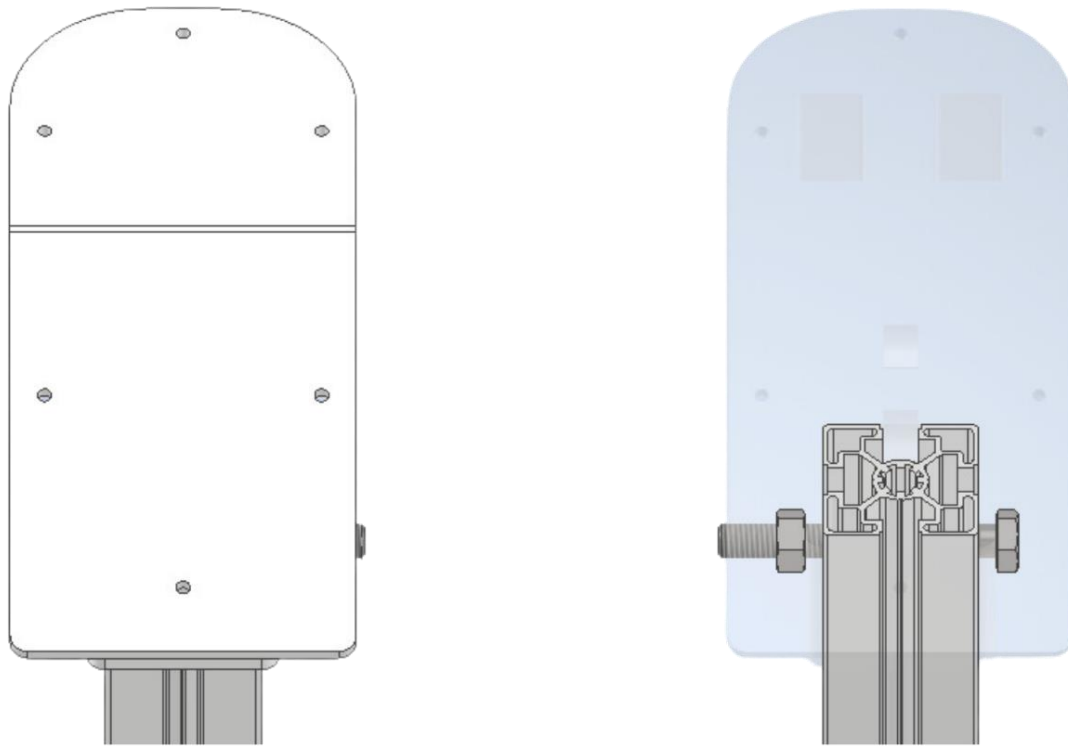


ILUSTRACIÓN 82. ENSAMBLE DE LAS BASES SUPERIORES CON LOS POSTES - VISTA ISOMÉTRICA FRONTAL.

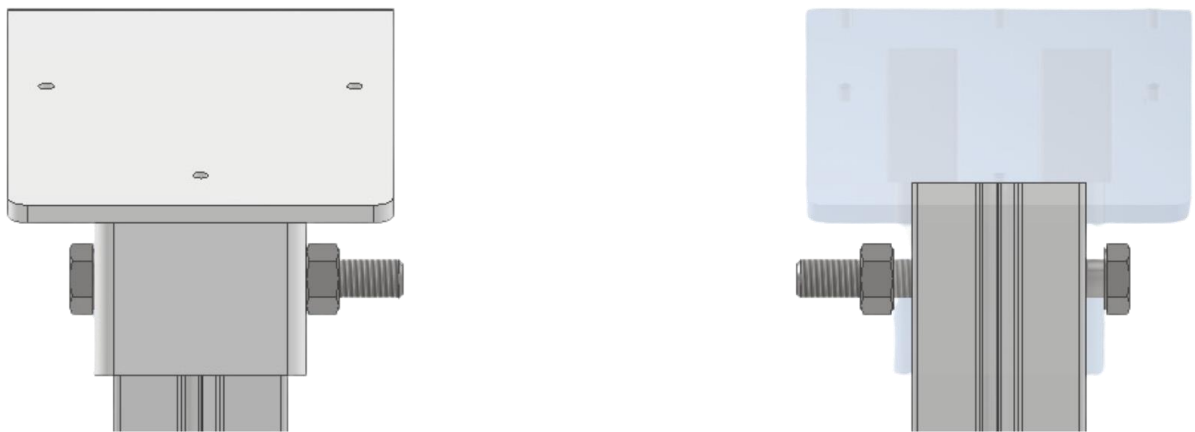


ILUSTRACIÓN 83. ENSAMBLE DE LAS BASES SUPERIORES CON LOS POSTES - VISTA FRONTAL.

7.3.2 *Procesos de manufactura para desarrollar la estructura vertical*

Corte de los postes y el travesaño

El proyecto contaba con un perfil estructural de aluminio con una longitud de 4 [m]. Según el modelo CAD desarrollado, los postes requerían tener una longitud de 1 [m]. Se utilizó la sierra vertical de cinta universal (*Ilustración 46*) para cortar el perfil estructural a una longitud aproximada de 1.10 [m], con la finalidad de darle un acabado rectificadado a los *postes*, posteriormente. Para el travesaño se realizó el mismo proceso, no obstante, se cortó a una longitud de 17 [cm].

Para llevar a cabo este proceso se utilizaron los mismos parámetros del corte de los perfiles C de aluminio; con una hoja de sierra de acero de alta velocidad de 18 hilos por pulgada con un grosor de 3/8", la indicada para realizar el corte de metales no ferrosos, a una velocidad de 330 [ft·min].

Careado de los postes y el travesaño

Para cortar a la longitud exacta y darles un acabado rectificadado, a los postes y al travesaño, se utilizó el taladro fresador de banco (modelo ZX40A - *Ilustración 55*). Sin embargo, a diferencia del proceso efectuado sobre las columnas (utilizadas en la base del robot), para los postes y el travesaño no se pudo desarrollar el corte normal a la superficie (*Ilustración 56*) debido a su longitud. Por lo tanto, se decidió realizar el corte de manera tangencial a la superficie del perfil estructural (*Ilustración 84*).

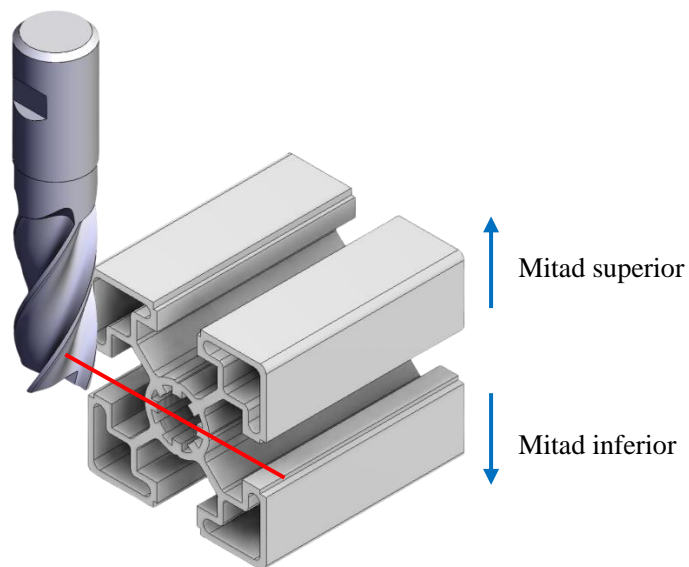


ILUSTRACIÓN 84. PROCESO DE CAREADO EN LOS PERFILES ESTRUCTURALES DE ALUMINIO - CORTE TANGENCIAL A LA SUPERFICIE.

Al efectuar el corte tangencial a la superficie se presentó una diferencia respecto al corte normal, debido a que el cortador no era lo suficientemente largo para realizar el careado en una sola pasada. El corte se

realizó en dos partes, primero la mitad superior y posteriormente se giró el perfil 180° para carear la mitad inferior, como se ejemplifica en la *Ilustración 84*.

Por el mismo motivo expuesto anteriormente con este proceso de manufactura, se utilizó el cortador con mayor área de sección transversal para disminuir el riesgo de fractura. Se utilizó un cortador plano de 4 filos, con un grosor de 3/8” y un largo de 2 ½”. El proceso resultó exitoso con estos parámetros, los postes quedaron con una longitud final de 1 [m] y el travesaño de 16.2 [cm], ambos con un acabado rectificado.

Taladrado de los postes

En la *Ilustración 78* se observa el método de ensamble de los postes con el travesaño. Igualmente, en la *Ilustración 81*, el de los postes con las bases del panel superior. Para ambos ensambles se requería taladrar transversalmente los postes. Este proceso se llevó a cabo con un taladro de banco de la marca *ABARBOGA MASKINER* (*Ilustración 85*), se desconoce el modelo de la maquinaria, ya que no se encuentra especificado en la placa de características.

Los parámetros que se pudieron recabar sobre el taladro de banco son los siguientes:

- Alimentación eléctrica trifásica
- Frecuencia: 50/60 [Hz]
- Potencia eléctrica: 0.75/0.6 [kW]
- Corriente: 3.1/3.1 [A]
- Voltaje: 220 [V]
- Velocidad máxima: 2780/1310 [RPM]

Por otro lado, la tabla de parámetros de corte de la máquina es la siguiente:

TABLA 5. PARÁMETROS DE CORTE DEL TALADRO DE BANCO UTILIZADO EN LA MANUFACTURA.

Revoluciones por minuto [RPM]	Material
100	Acero
205	
345	Laminado en frío
695	Bronce
440	Acabados
885	Aluminio



ILUSTRACIÓN 85. TALADRO DE BANCO UTILIZADO EN LA MANUFACTURA (MARCA *AB ARBOGA MASKINER*).

Para realizar el taladrado de los *postes* se utilizó un kit de brocas de acero rápido recubiertas con titanio. El acero rápido es utilizado para fabricar brocas de taladro para metales debido a su capacidad para resistir altas temperaturas y desgaste, lo que permite aumentar la velocidad de corte. Está compuesto de hierro, carbono y otros materiales como vanadio, cromo, molibdeno o wolframio, que mejoran su resistencia. Las brocas de acero rápido se conocen también como brocas acero de alta velocidad o *HSS* (por las siglas en inglés de *High Speed Steel*). Para evitar que la broca pierda su temple debido al calor, se utilizan recubrimientos especiales, siendo el más común el óxido negro que actúa como lubricante y reduce la fricción. El nitrato de titanio es otro recubrimiento común de brocas de metal, de color dorado, que puede prolongar hasta 5 veces la vida útil de una broca, ya que reduce la fricción y la hace soportar mejor la

temperatura. Además, al reducirse la fricción, se puede usar una mayor velocidad de corte. Esto, a su vez, mejora el rendimiento de la broca. [37]

Dicho lo anterior, el proceso de taladrado se llevó a cabo a una velocidad angular de 885 [RPM] con una broca de acero rápido recubierta con titanio de 3/8" de diámetro.

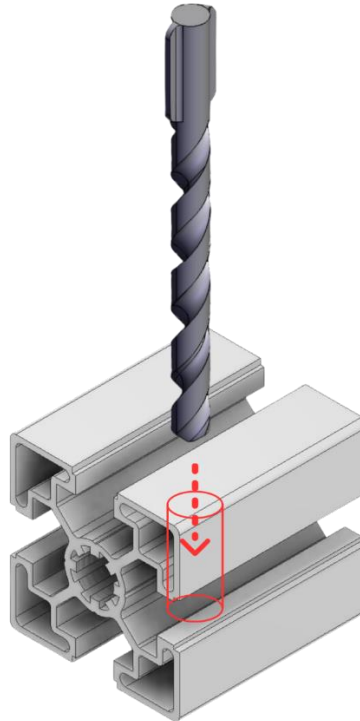


ILUSTRACIÓN 86. EJEMPLIFICACIÓN DEL PROCESO DE TALADRADO EN LOS POSTES DE LA ESTRUCTURA VERTICAL.

Roscado interno del travesaño

Para generar las roscas en el cilindro interno del perfil estructural del travesaño, se utilizó un maneral de la marca *TRUPER*, junto con un machuelo de acero al carbón de 7/16" de diámetro con 20 hilos NF (cuerda fina). Desarrollar las cuerdas con esta herramienta sirvió para unir los pernos de 3/8" al travesaño, de manera exacta. La herramienta fue provista por el laboratorio de metal-mecánica del CIDI.

7.4 Diseño, fabricación e integración de la carcasa del robot

Anteriormente, en el apartado 6.2.3 *Deficiencias identificadas en el módulo 3 – Carcasa*, se mencionaron los principales defectos o complicaciones desde el punto de vista ingenieril para manufacturar e implementar la carcasa previamente diseñada en la etapa del diseño conceptual.

A continuación, se presentan en forma resumida dichas deficiencias, con la finalidad de contextualizar las decisiones tomadas para el rediseño, la fabricación y la integración física de la carcasa del robot.

Deficiencias previamente identificadas en el módulo 3 (carcasa del robot):

- Métodos de ensamble de los componentes de la carcasa
 - Planear y diseñar la ubicación de las sujeciones, materiales requeridos, e incluso visualizar cómo interferirían estas sujeciones con la estética externa del robot.
- Incertidumbre en la fabricación del panel posterior
 - Previa propuesta de fabricación por medio de un proceso de termoformado, lo que implicaba un riesgo de derroche de recursos.
- ¿Cómo se accedería a la electrónica inferior en caso de que se tuviera que realizar mantenimiento superficial?
 - Propuesta de diseño de un acceso a través del panel posterior de la carcasa al que solo pudiera acceder el personal de mantenimiento.

A partir de lo anterior se explicarán las decisiones tomadas para rediseñar y fabricar la carcasa del robot.

Primeramente, uno de los aspectos que mayor incertidumbre generó en el desarrollo de la carcasa era la manufactura del panel posterior. Como se mencionó anteriormente, se propuso fabricarlo mediante un proceso de termoformado, sin embargo, no se contaba con la experiencia suficiente para generar una pieza de esas dimensiones; mandarla a fabricar con un tercero implicaba una gran inversión, que por la relación costo-beneficio, no valía la pena llevar a cabo. Por otro lado, mantener la geometría de la carcasa era uno de los requerimientos del líder del proyecto, de tal modo que, cambiarla abruptamente no era una opción. Después de pensar en diferentes posibilidades, se decidió fabricarla mediante impresión 3D FFF, gracias a las bondades de este tipo de manufactura era posible crear piezas con geometrías irregulares como era el caso del panel posterior. Sin embargo, existía una limitante en este proceso de manufactura, no es posible fabricar piezas tan grandes con las impresoras que contaba el laboratorio de robótica del CIDI. Así que, se decidió dividir el panel posterior en diferentes piezas que embonaran entre sí para después integrarlas en una sola. De igual manera, otra de las deficiencias de la propuesta anterior era la falta de un acceso a la electrónica inferior desde alguna parte de la carcasa, con la finalidad de realizar mantenimiento superficial; anteriormente, se propuso que este acceso estuviera en la parte trasera del robot y que, simultáneamente, fuese discreta a la vista e interacción de los usuarios. Por lo tanto, después de desarrollar una lluvia de ideas y diferentes bosquejos, se optó por el rediseño expuesto a continuación.

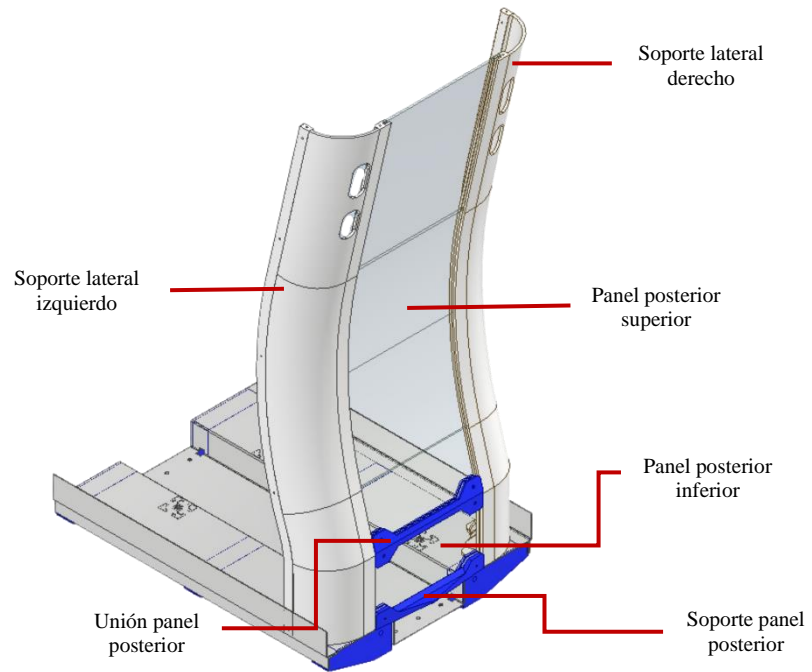


ILUSTRACIÓN 87. REDISEÑO DEL PANEL POSTERIOR DE LA CARCASA.

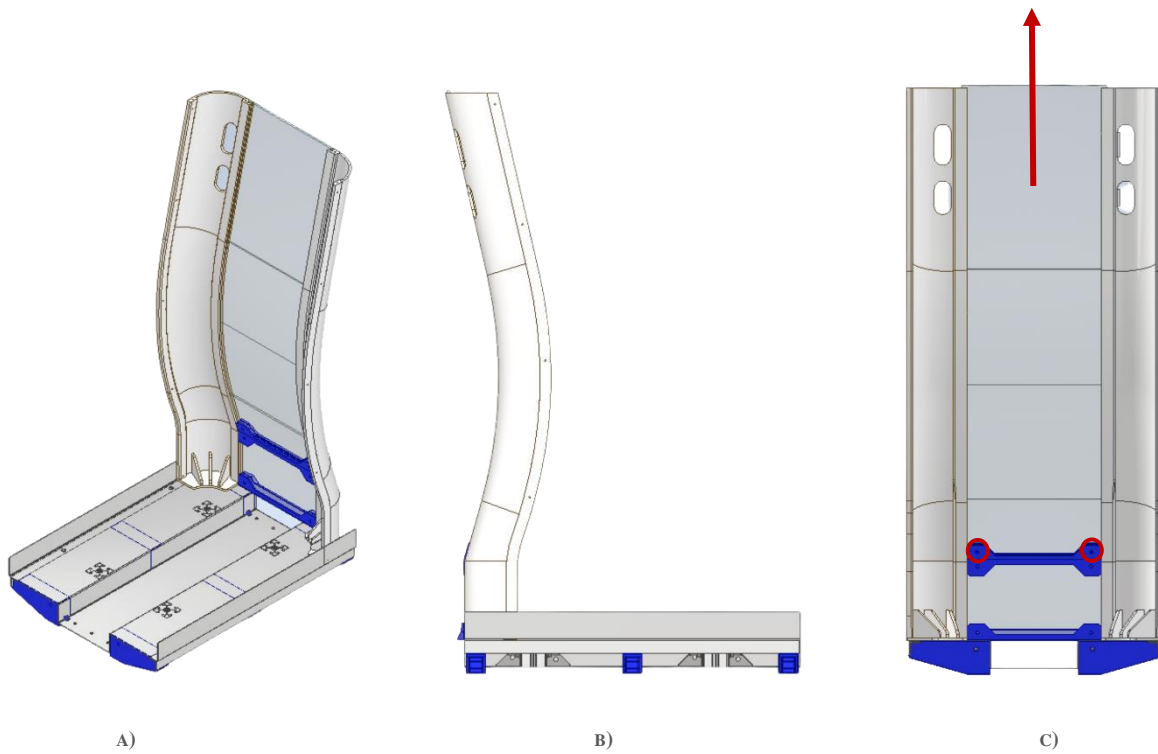


ILUSTRACIÓN 88. DIFERENTES VISTAS DEL REDISEÑO DEL PANEL POSTERIOR DE LA CARCASA.



ILUSTRACIÓN 89. ESTRUCTURA DE LOS SOPORTES LATERALES DE LA CARCASA (IMPRESOS EN 3D FFF).

En la *Ilustración 87* se muestra la propuesta del rediseño del panel posterior de la carcasa. Anteriormente, el panel posterior era una unidad completa. Sin embargo, por los motivos expuestos no fue viable desarrollarla de esta manera, en su lugar, condicionado por los procesos de manufactura y recursos económicos disponibles se decidió por la nueva disposición.

La nueva configuración del panel posterior se conforma por 7 piezas distintas. Los soportes laterales se encargan de respetar la geometría propuesta en el modelo conceptual, además, estos soportes contienen una guía por el que se desplazan los paneles posteriores (inferior y superior). Como la geometría de los soportes laterales trazan una curva irregular que posteriormente se convierte en recta, se decidieron colocar dos paneles, uno para cada parte de la trayectoria. Para unir estos paneles, el inferior con el superior, se manufacturó en 3D una pieza que fungiera como unión de ambos paneles. Por último, para que el panel posterior inferior se mantuviera rígido en su posición, también se imprimió en 3D una pieza que lo soportara. Con esta nueva disposición se resolvió la deficiencia identificada en la anterior propuesta acerca de tener un acceso a la electrónica inferior a través de un elemento de la carcasa, ya que el panel posterior

superior se podía deslizar a través de las guías que lo contenía, de modo que al retirar dos tornillos de la unión de los paneles, el superior podía extraerse fácilmente (véase el c) de la *Ilustración 88*. Ilustración 88. Diferentes vistas del rediseño del panel posterior de la carcasa.

Como se mencionó, existía una limitante para imprimir en 3D los soportes laterales completos, ya que aproximadamente miden 1 [m] de altura, por lo tanto, se imprimieron en 3 tandas. Es decir, el soporte lateral se dividió en 3 partes, cada una aproximadamente de 33 [cm] de altura, a cada una se le diseñó una guía de ensamble para que pudiesen embonar entre sí. Posteriormente, los encargados del laboratorio de robótica del CIDI, soldaron entre sí las 3 partes empleando un cautín y el mismo filamento con el que se imprimieron (PLA). La ventaja de haber desarrollado primeramente el CAD de los soportes laterales es que se previeron las sujeciones mecánicas que ensamblarían la carcasa con la estructura previamente fabricada. En la *Ilustración 89* se muestra cómo se dividieron los soportes laterales.

En la etapa previa a la construcción de la carcasa del robot, mientras se fabricaba la estructura vertical del robot, el director del equipo había decidido qué materiales se utilizarían para la fabricación de los paneles que conforman la carcasa. El presupuesto restante del proyecto se utilizó para la adquisición de estos materiales, se compró una lámina calibre 118 (3 [mm]) de 2.4 [m] × 1.2 [m] de PET G transparente con acabado mate y otra lámina de PVC espumado color azul rey de las mismas dimensiones que la anterior. La selección de estos materiales se basó en la información presentada en el artículo *Consideraciones en el diseño de robots para la atención médica en el mundo post COVID-19*, analizado en la sección 3 *Identificación de las consideraciones de un robot de servicio para el área médica*.

Para los paneles posteriores, se utilizó el PET G por dos razones. La principal razón era por sus propiedades mecánicas. El PET G es un material versátil que ofrece numerosas ventajas. Permite realizar diferentes procesos, como atornillar, imprimir, cortar y termoformar fácilmente, incluso en frío, sin sufrir daños o deformaciones. Una de las principales ventajas del PET G es su economía, ya que es más accesible que el policarbonato y más resistente que el acrílico. Esto significa que se obtiene un material de alta calidad a un costo reducido. En cuanto a su resistencia, las láminas de PET G son aproximadamente de 15 a 20 veces más fuertes que el acrílico de uso general. Esto se traduce en menos roturas y desperdicios, lo que a su vez reduce la necesidad de reemplazos constantes. Otra característica destacada del PET G es su resistencia química, lo que lo hace adecuado para resistir una amplia variedad de agentes químicos y solventes comunes. En cuanto a la fijación mecánica, el PET G se puede ensamblar con sujeciones mecánicas, lo que permite obtener juntas estéticas y seguras. Se pueden utilizar tornillos de rosca automática o presillas de metal rosqueadas, dependiendo de la necesidad de desmontaje frecuente. Además, existen opciones específicas de remaches y tornillos diseñados para su uso con plásticos. El montaje mecánico con resortes, grapas y tuercas también es una opción rápida y económica. [38]

La segunda razón era por la estética contextualizada al entorno y por la relación cromática de la carcasa, estas decisiones están sustentadas principalmente con los conocimientos de los diseñadores industriales de la época. A pesar de que se priorizó evitar la tecnofobia al ocultar los componentes mecánicos y eléctricos, el PET G al ser transparente con un acabado mate, combina con los demás elementos de la carcasa de modo que transmite una armonía cromática, además permite entrever los componentes electrónicos internos del robot, expresando que se tiene un producto tecnológico complejo, que hipotéticamente podría impactar de forma positiva en la interacción con el usuario. La diseñadora gráfica Ellen Lupton lo expresa en su libro *El Diseño como Storytelling* de la siguiente manera: “*Los diseñadores usan el color, la luz, las texturas y el sonido para modular las sensaciones que transmite un producto, un servicio o un lugar.*” [14]. Es decir, el objetivo de esta decisión es que el usuario respete al producto (intuyendo que se trata de un aparato delicado y complejo), y que simultáneamente, la paleta de colores elegida impacte en la fase visceral de la experiencia del usuario, es decir, a lo que procesa el usuario de forma inmediata con su mente y cuerpo al ver el producto. [14]

Las piezas *unión panel posterior* y *sopORTE panel posterior* se crearon mediante manufactura aditiva por las ventajas que provee el proceso; permite crear piezas personalizables con exactitud; además, al no estar expuestas a cargas altas respecto a las propiedades mecánicas del PLA, no representan ningún riesgo de deformación.

Los métodos de ensamble de esta parte de la carcasa son principalmente sujeciones mecánicas con tornillos (ver *Ilustración 90*). Los soportes laterales se diseñaron con orificios de 5 y 3 [mm] de diámetro, los de 5 [mm] están en su base, estos sirvieron para fijarlos a la lámina; los de 3 [mm] se diseñaron para ensamblarlos a las pestañas laterales de las *alas* de la lámina y para unir posteriormente los paneles laterales de la carcasa. Por otro lado, como se mencionó anteriormente, los paneles posteriores quedan ensamblados a los soportes laterales por una guía que los contiene. La unión de los paneles igualmente cuenta con orificios de 3 [mm] para ensamblar ambos paneles (superior e inferior) por medio de tornillos y tuercas. Por último, el soporte del panel posterior inferior también tiene una guía horizontal que contiene al panel, esta pieza tiene orificios de 3 [mm] para fijarse al panel que contiene, y que por la fuerza de gravedad recae sobre la base de la lámina, manteniendo al elemento estático.

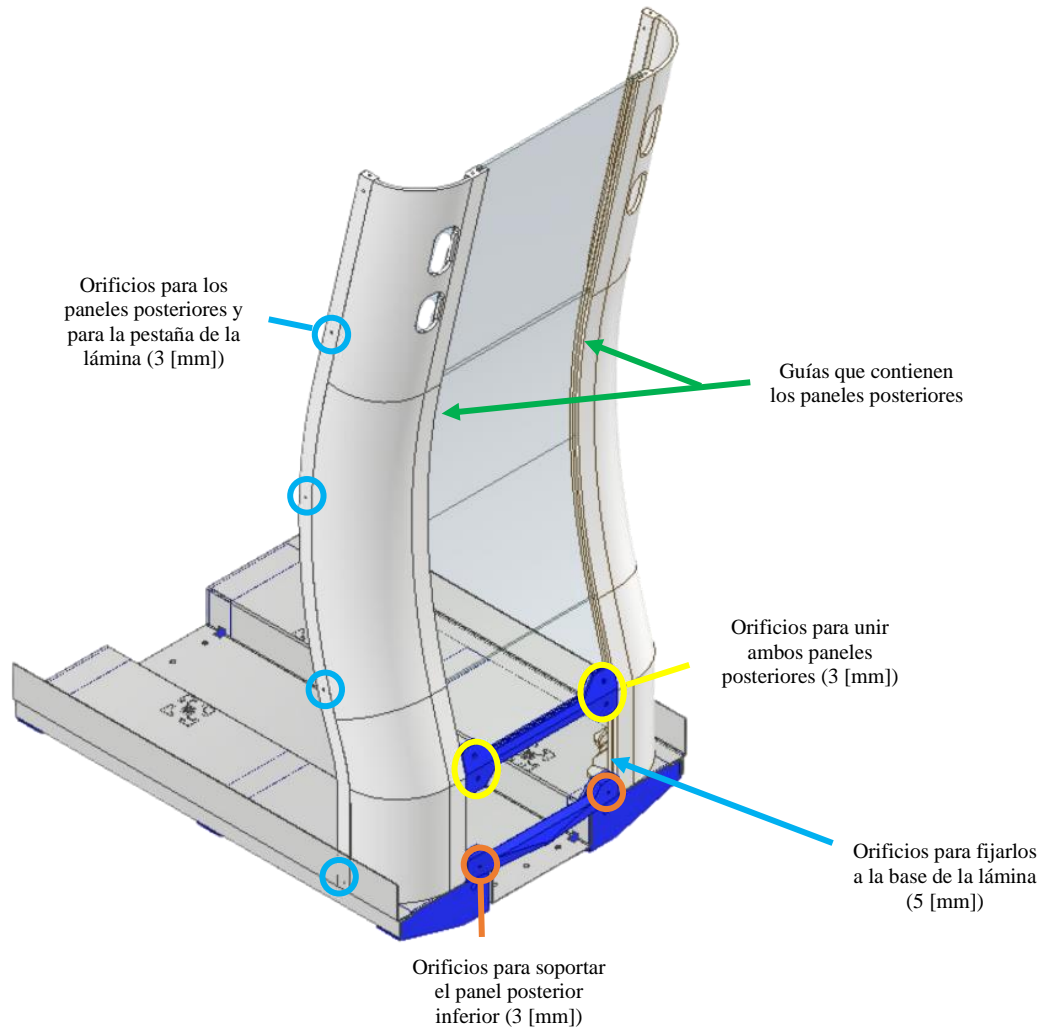


ILUSTRACIÓN 90. MÉTODOS DE ENSAMBLE DE LA CARCASA POSTERIOR.

Una vez que se definió y diseñó la parte posterior de la carcasa del robot hubo que adaptar y diseñar el ensamble de los laterales. La geometría de los paneles laterales no se modificó radicalmente, se respetó casi en su totalidad con respecto a la propuesta del diseño conceptual; el director del equipo y los diseñadores industriales decidieron modificar sutilmente la curvatura de los paneles para mejorar el equilibrio visual. Además, se añadió un nuevo elemento al que se le denominó *placa lateral*, este funciona como un elemento de ensamble entre el panel y el soporte lateral de la carcasa, adicionalmente esta pieza cuenta con detalles estéticos como el grabado del nombre del robot. En la *Ilustración 91* se expone el ensamble de estos elementos.

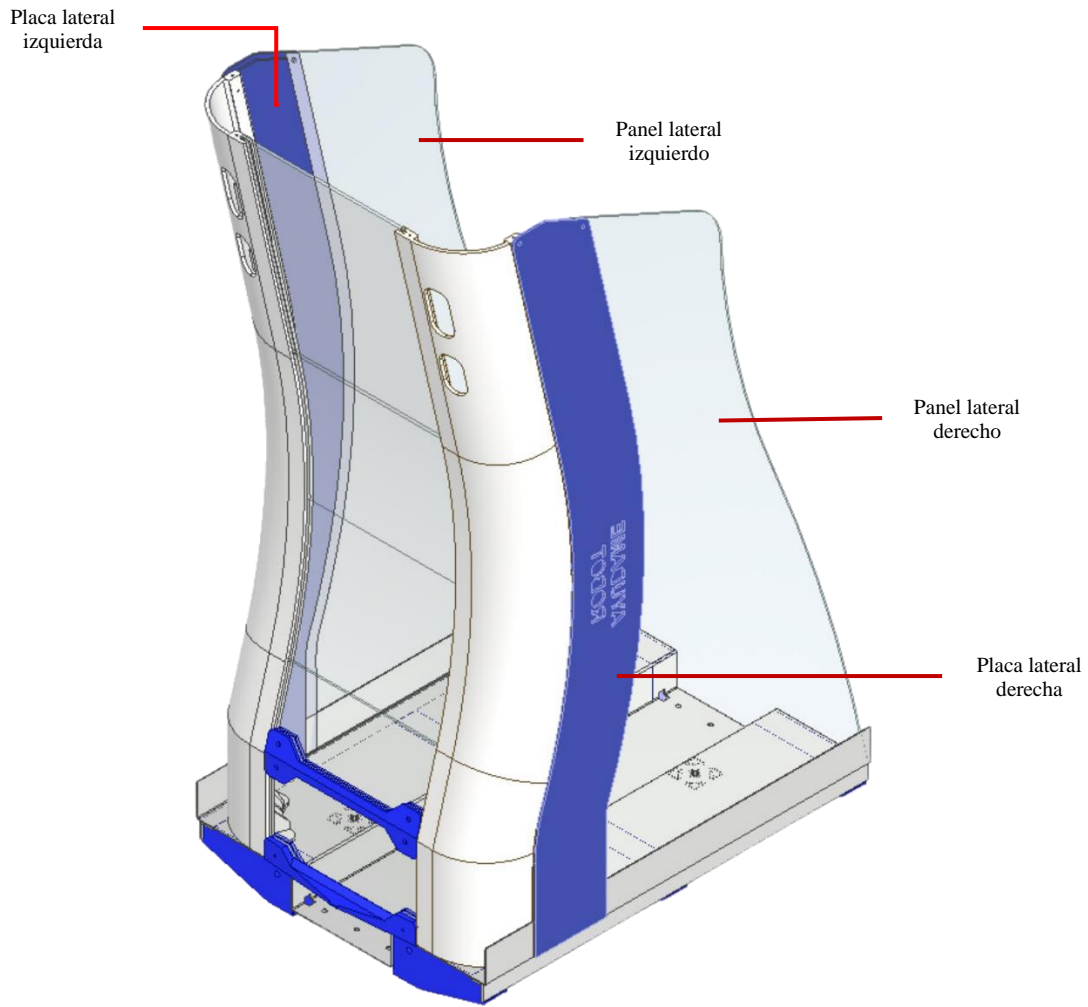


ILUSTRACIÓN 91. PANELES LATERALES ADAPTADOS A LA ESTRUCTURA DEL ROBOT.

Para manufacturar los paneles y las placas laterales del robot, se utilizaron las láminas de PET G y PVC espumado, respectivamente. Los paneles laterales se fabricaron con el PET G por las mismas razones por las que se fabricó el panel posterior (propiedades mecánicas y facilidad de manufactura). Las placas laterales se fabricaron con la lámina de PVC espumado por las propiedades físicas que este material aporta, además del aspecto estético de la armonía cromática.

Se adquirió el PVC espumado para la fabricación de algunos elementos de la carcasa porque se caracteriza por su homogeneidad y ligereza, siendo aproximadamente la mitad del peso del PVC rígido debido a su estructura celular fina. En cuanto a sus características, el PVC espumado es un material no quebradizo y altamente versátil. Además, se destaca por su rigidez y resistencia a agentes químicos y corrosivos. Es un material no tóxico, autoextinguible y difícilmente inflamable. También ofrece propiedades de aislamiento térmico y acústico, así como capacidad de absorción de vibraciones. Otra ventaja importante del PVC espumado es su relación calidad-precio favorable. Su facilidad de manipulación no requiere métodos o

herramientas específicas, lo que ayuda a amortizar rápidamente la inversión sin aumentar significativamente el costo del producto final [39]. La mayoría de las características de este material se adecúan a la usabilidad del dispositivo dentro de su ambiente de trabajo.

El proceso de diseño de la carcasa principalmente lo llevó a cabo el equipo de diseñadores industriales que intervinieron en el proyecto; los ingenieros mecatrónicos tuvieron poca injerencia en aspectos estéticos de esta parte del robot, principalmente por la falta de conocimientos y experiencia con el diseño gráfico. Sin embargo, ellos aportaron en la planeación de los métodos de ensamble. Para esta parte de la carcasa, se sugirió utilizar sujeciones mecánicas para mantener unidos el panel, la placa y el soporte laterales. No obstante, otro aspecto identificado fue que mantener unidos dichos elementos no aseguraba que todos sus grados de libertad se anularan, igualmente se sugirió que faltaban elementos de sujeción para aportarle rigidez y robustez a la carcasa del robot, especialmente en la unificación de los paneles laterales con la estructura interna del robot (base y estructura vertical). Con dicha retroalimentación, el director del equipo comenzó a considerar estos aspectos, sin embargo, mencionó que sería preciso adecuarlos después de la implementación de los elementos electrónicos, para evitar un exceso de modificaciones futuras.

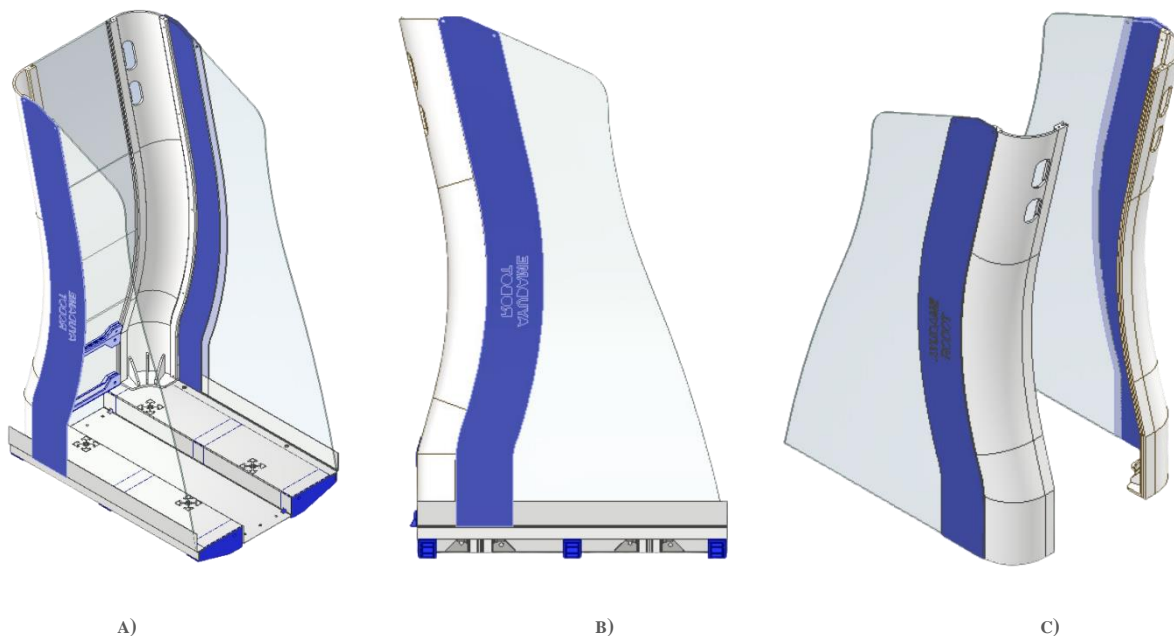


ILUSTRACIÓN 92. DIFERENTES VISTAS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS PANELES Y PLACAS LATERALES.

Después de haber diseñado el CAD de todos los elementos expuestos de la carcasa del robot, se procedió con su manufactura. La fabricación de las piezas impresas en 3D FFF fue gestionada por los encargados del laboratorio de robótica del CIDI. Los paneles y placas de PET G y PVC espumado se mandaron a cortar al laboratorio de plásticos del CIDI, específicamente se cortaron mediante un proceso de fresado CNC; el equipo de diseño no tuvo interacción directa con la maquinaria, los encargados del laboratorio de plásticos del CIDI únicamente solicitaron los planos en formato DXF para realizar los cortes.

Por otro lado, el único elemento que faltaba rediseñar y fabricar era el panel superior. Inicialmente, en el modelo conceptual se pretendía fabricarlo con acrílico (como se menciona en la sección *1.4.5 Descripción del modelo conceptual de Ayúdame 2.0*). Dicho panel superior estaba constituido por una sección plana y otra curva (*Ilustración 26*), como se describió con anterioridad, el líder del proyecto quería que la geometría y la estética de la carcasa del modelo conceptual se mantuviera fiel, por lo tanto, se priorizó dicho requerimiento cualitativo mientras fuese viable. Para manufacturar dicho panel superior, se había propuesto que la parte plana se fabricaría mediante corte láser y la curva mediante termoformado.

Posteriormente, se rediseñó en CAD el panel superior con la finalidad de prever cómo ensamblaría en la nueva estructura del robot, con la condición de que el panel estaría fabricado con la placa de PET G o PVC espumado, eran las dos únicas opciones posibles, ambos materiales se adecuaban a los requerimientos de diseño expuestos anteriormente. Con el CAD se previó la nueva estructura del panel y las sujeciones mecánicas. Se decidió fabricarlo en tres secciones (como se muestra en la *Ilustración 93*). La sección plana estaría fabricada con alguna de las placas ya mencionadas, el corte se desarrollaría por fresado CNC, como se hizo con los paneles y placas laterales. La sección curva se decidió mantenerla, ya que todo el equipo estaba de acuerdo con el equilibrio estético que este elemento le aportaba a la carcasa; se decidió que esta parte curva se fabricara en dos piezas por medio de manufactura aditiva, por las mismas razones expuestas anteriormente: se trataba de dos piezas muy particulares, no estarían expuestas cargas relativamente altas, el color del filamento se adecuaba con los colores de los soportes laterales (seguía manteniendo la armonía cromática). Otra razón por la que se siguió priorizando la utilización del filamento de PLA para fabricar elementos de la carcasa del robot, se enuncia en el apartado *3.3 Consideraciones en la manufactura del robot*: “Uno de los materiales utilizados en la impresión de piezas tridimensionales para aplicaciones médicas es el filamento de ácido poliláctico (PLA), por sus capacidades de esterilización.”.

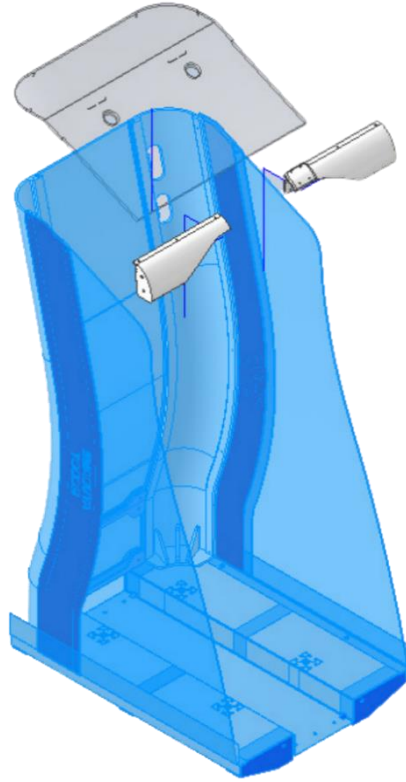


ILUSTRACIÓN 93. VISTA EXPLOSIONADA DEL ENSAMBLE DEL PANEL SUPERIOR.

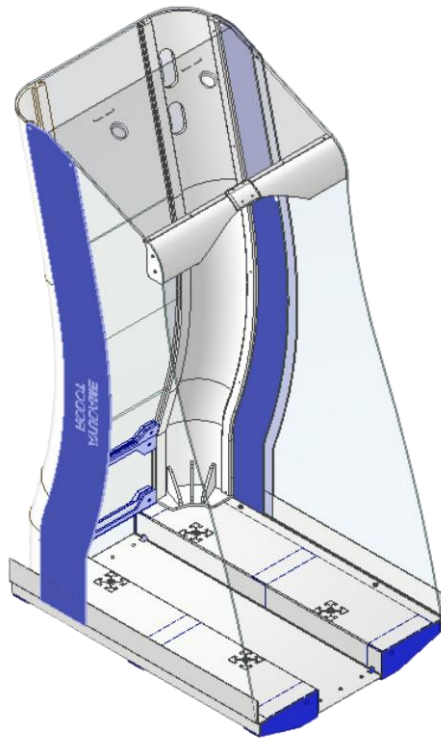


ILUSTRACIÓN 94. ENSAMBLE DEL PANEL SUPERIOR A LA CARCASA DEL ROBOT.

A pesar de que se había previsto la manufactura de los elementos que conforman el panel superior de la carcasa del robot, únicamente se decidieron manufacturar de manera definitiva las piezas que conforman la curvatura del panel, para verificar su implementación física en el robot. No obstante, se decidió no manufacturar la sección plana de dicho panel porque muy probablemente este elemento estaría expuesto a cambios potencialmente radicales al integrar la electrónica interna del robot, quería evitarse el desperdicio de material. En contraparte, se fabricó un prototipo de esta sección plana con un panel de policarbonato donado por el laboratorio de robótica del CIDI; este prototipo ayudó a verificar las medidas del modelo CAD y a prever su implementación a la carcasa del robot. En la *Ilustración 95* se expone la implementación física del prototipo del panel superior.



ILUSTRACIÓN 95. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL PANEL SUPERIOR EN LA CARCASA DEL ROBOT.

8 Identificación de vulnerabilidades, escenarios de riesgo y propuestas para pruebas futuras

El objetivo del presente trabajo es *rediseñar y fabricar el modelo conceptual del sistema estructural de un robot de servicio para el sector hospitalario, con la finalidad de generar un prototipo físico y digital que interactúe con los usuarios, y así, se puedan identificar e implementar oportunidades de mejora para la versión final del producto*. Con lo expuesto hasta el capítulo 7, se ha satisfecho la primera parte del objetivo general; en este capítulo se presentarán algunas vulnerabilidades, escenarios de riesgo y propuestas de pruebas, reconocidos a lo largo del desarrollo del proyecto, con el objetivo de complementar la identificación e implementación de oportunidades de mejora para la versión final del producto.

8.1 Vulnerabilidades del modelo conceptual

A pesar de que, durante todo el proceso de rediseño y construcción del modelo conceptual de *Ayúdame 2.0* se priorizó la toma de decisiones en base a argumentos teóricos o conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería, en todo momento se reconoció que, por las limitantes y condiciones con las que se desarrolló el producto, este contaría con vulnerabilidades, es decir, elementos o configuraciones que tienen una considerable probabilidad de fallo.

Dentro de las vulnerabilidades que se pudieron identificar y que se consideraron como evidentes se encuentran en los subsistemas de la base y la carcasa del robot.

Vulnerabilidades identificadas en la base del robot

Como se expuso en la sección 7.2.4 *Desarrollo de pruebas en la solución implementada*, la solución elegida para construir la base del robot estuvo condicionada por la adquisición de nuevos materiales. Inicialmente, se había solicitado la adquisición de una lámina de aluminio 3003 o 6061, que son láminas frecuentemente utilizadas para la construcción de estructuras altamente resistentes; no obstante, las limitaciones económicas del proyecto no lo permitieron. En cambio, el diseño de la solución se tuvo que adaptar con una lámina de aluminio 14, semidura (aleación 1100) de calibre 18 (1.2 [mm]), que no era la ideal para la construcción de la estructura del robot. Ese fue el principal motivo por el que, posteriormente, a la base de la estructura se le implementaron adaptaciones; para que pudiera cumplir con los requerimientos de diseño (7.2.5 *Adaptaciones en la base del robot*).

Por otro lado, el equipo de diseño propuso a partir de una estimación, que la estructura de la base fuera capaz de soportar una carga puntual de al menos 500 [N] en cada *ala*, es decir, una carga distribuida W de 824 [N/m]. No obstante, esta estimación no tuvo un sustento convincente. Este es el motivo por el que se considera una vulnerabilidad. No se estableció con exactitud la especificación técnica de la carga que tiene que soportar la lámina en condiciones de uso cotidianas.

Por lo tanto, se determinó que en versiones posteriores se establezcan las especificaciones técnicas de qué tanta fuerza debe soportar el elemento, y a partir de ello seleccionar nuevamente el material; inclusive las adaptaciones que se implementaron pueden mantenerse, ya que le aportan rigidez a la estructura.

En adición a lo anterior, como se describe en la sección 7.3 *Diseño, manufactura e integración de la estructura vertical del robot*, al desarrollar la solución de la estructura vertical, se decidió ensamblar los postes de la estructura a la plataforma del sistema motriz; se tuvo que perforar la lámina para que a través de ella pasaran dichos postes. Se identificó que esta modificación debilita la estructura de la lámina utilizada para la base del robot.

Vulnerabilidades identificadas en la base del robot

En la sección 7.4 *Diseño, fabricación e integración de la carcasa del robot* se describe el proceso llevado a cabo para fabricar los elementos de la carcasa del robot. Se expuso que uno de los aspectos más complicados por solucionar e implementar fue el rediseño y construcción del panel posterior de la carcasa. Finalmente, se optó por fabricar los soportes laterales en impresión 3D FFF, estos soportes permiten mantener la geometría del robot (deseada por el cliente). No obstante, la capacidad de las impresoras 3D no permitió fabricar dichos soportes en una sola pieza; se tuvieron que dividir en 3 piezas que embonaran entre sí. He aquí la vulnerabilidad identificada. Para unificar estas 3 piezas impresas, se utilizó un método de soldadura, utilizando un caudín y el mismo filamento de PLA con el que se fabricaron las piezas. A primera vista los soportes laterales parecen rígidos, inclusive no es evidente que se tuvieron que unificar 3 piezas para conformarlos. Sin embargo, al manipularlos e implementarlos en la estructura del robot, se puede identificar la falta de rigidez en las uniones. Es decir, individualmente las piezas se perciben suficientemente rígidas y resistentes, respecto a sus requerimientos de diseño cualitativos (el riesgo mayor es soportar una colisión contra elementos del ambiente), no obstante, el método de ensamble utilizado para unir las 3 piezas entre sí se nota deficiente.

En el momento en el que se implementaron físicamente los soportes laterales, se propuso mejorar este método de ensamble. Al imprimirse las piezas en 3D, se le pueden diseñar estructuras internas que permitan sujeciones mecánicas invisibles para el usuario. Es cierto que la descripción desarrollada de esta vulnerabilidad es meramente cualitativa; se podría fundamentar mediante un análisis de esfuerzos de

elementos finitos, no obstante, gracias a la experiencia adquirida en las asignaturas prácticas de la carrera se cuenta con los conocimientos suficientes para aseverar estos aspectos con probabilidad de fallo.

Por otro lado, como se mencionó en la página 116, anteriormente se identificó que los métodos de ensamble diseñados para unir los soportes, paneles y las placas laterales del robot mantenían unidos los elementos, sin embargo, no aseguraban que todos sus grados de libertad se anularan (es decir, que permanecieran totalmente estáticos). Adicionalmente, se sugirió que faltaban elementos de sujeción para aportar rigidez y robustez a la carcasa del robot, especialmente en la unificación de los paneles laterales con la estructura interna del robot (base y estructura vertical). Estos aspectos fueron considerados por el director del equipo, mencionó que se atenderían en etapas posteriores del proyecto.

8.2 Escenarios de riesgo

El riesgo se define como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas [40]. El alcance del actual trabajo se basa principalmente en el diseño estructural y la usabilidad del robot, por lo tanto, se analizaron los escenarios de riesgo que comprometen estos aspectos del robot.

Algunos escenarios de riesgo identificados son:

- Rotura o deformación de componentes provocados por colisiones con el ambiente o por exceso de cargas aplicadas.
- Desensamble de componentes provocados por colisiones con el ambiente.
- Selección de materiales inadecuados para el objetivo del producto.
- Aversión del producto con el usuario.

Estos escenarios de riesgo se identificaron a lo largo del desarrollo del proyecto, ya sea mediante hipótesis expuestas en lluvias de ideas o en la implementación física de las soluciones diseñadas.

8.3 Propuestas para pruebas futuras

La última etapa de la metodología *Design Thinking* es la etapa de ensayo. Durante esta fase, se presentan y someten a prueba los prototipos con los usuarios implicados en la solución. Es un momento crítico en el que se deben tomar decisiones sobre las acciones a seguir para acercarse a la solución óptima, basándose en la retroalimentación recibida por parte de los usuarios. [5]

En cuanto a los posibles escenarios a los que se puede enfrentar el equipo, existen tres opciones: iterar, producir o abandonar el proceso. La iteración implica repetir el proceso desde el principio o desde una

fase más avanzada con el fin de perfeccionar el producto, servicio o proceso y satisfacer así plenamente las expectativas de las personas para las cuales se está diseñando. Usualmente, se opta por este camino y se pueden llevar a cabo múltiples iteraciones, no obstante, siempre se deben tener en cuenta consideraciones presupuestarias, el alcance del proyecto y los plazos de entrega. La producción se da cuando la retroalimentación es satisfactoria y el equipo se siente convencido, en este punto se procede a fabricar el producto o implementar el servicio o proceso. Por último, el abandono del proceso implica interrumpir el trabajo de diseño, y esta decisión puede ser motivada por diversas razones, como la falta de demanda en el mercado, críticas negativas por parte de los usuarios o limitaciones de presupuesto. [5]

Con el rediseño y construcción del modelo conceptual de *Ayúdame 2.0*, se han identificado las vulnerabilidades y los principales escenarios de riesgo que comprometen el sistema estructural y la usabilidad del robot. El objetivo de este apartado es materializar dichos aspectos identificados en propuestas de pruebas futuras, con el apoyo del sustento teórico expuesto en el capítulo 3 *Identificación de las consideraciones de un robot de servicio para el área médica*, con la finalidad de que el personal que retome el proyecto en posteriores etapas pueda consultar el actual trabajo y entienda cuáles son las fortalezas y las debilidades del modelo conceptual fabricado; y así, al implementar los elementos electrónicos del robot o en la etapa de pruebas con los usuarios, se puedan verificar y prever las posibilidades de fallo expuestas anteriormente.

Por lo tanto, en base a los escenarios de riesgo identificados en el apartado anterior, se propone el desarrollo de las siguientes pruebas:

TABLA 6. DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS PROPUESTAS Y SU RELACIÓN CON LAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE UN ROBOT DE SERVICIO PARA EL SECTOR HOSPITALARIO, EN BASE A LOS ESCENARIOS DE RIESGO IDENTIFICADOS.

Escenario de riesgo identificado	Descripción de las pruebas propuestas	Consideraciones en el diseño relacionadas con la prueba propuesta
Rotura o deformación de componentes provocados por colisiones con el ambiente o por exceso de cargas aplicadas.	Navegar el robot exponiéndolo a colisiones a su velocidad de operación. Se recomienda que las colisiones sean contra los elementos externos del robot, como la carcasa y la plataforma del sistema motriz.	Es necesario tener un control adecuado de la velocidad de desplazamiento y movimiento de las estructuras, así como usar protecciones fabricadas con

Escenario de riesgo identificado	Descripción de las pruebas propuestas	Consideraciones en el diseño relacionadas con la prueba propuesta
	<p>Observar si se generan deformaciones o roturas en los elementos, principalmente en los elementos vulnerables expuestos en el capítulo 8.1 <i>Vulnerabilidades del modelo conceptual</i>.</p> <p>Determinar en conjunto con los usuarios médicos, aproximadamente qué cantidad de masa se requerirá transportar de manera cotidiana. Sobre la carga útil que se contemple, determinar un factor de seguridad con base a las recomendaciones de la Tabla 3. Realizar pruebas de deformación cualitativas con la carga útil, considerando el factor de seguridad establecido. Observar si se generan deformaciones en los elementos, principalmente en los elementos vulnerables expuestos anteriormente.</p>	<p>materiales y formas que reduzcan el riesgo de lesión.</p> <p>Los elementos de los sistemas deben estar asegurados, contenidos y diseñados para evitar contactos no previstos y desprendimientos no deseados.</p> <p>El diseño del robot debe ser adecuado para mitigar lesiones en caso de una colisión con los usuarios debido a una falla técnica.</p>
<p>Desensamble de componentes provocados por colisiones con el ambiente.</p>	<p>Con las mismas pruebas de colisión desarrolladas en el punto anterior, observar si se desensamblan elementos o si su método de ensamble se debilita a raíz de una colisión, principalmente en los elementos vulnerables expuestos en el capítulo 8.1 <i>Vulnerabilidades del modelo conceptual</i>.</p>	<p>(Mismas consideraciones de diseño que la prueba propuesta anterior)</p>

Escenario de riesgo identificado	Descripción de las pruebas propuestas	Consideraciones en el diseño relacionadas con la prueba propuesta
Selección de materiales inadecuados para el objetivo del producto.	En conjunto con los usuarios médicos, comprobar si los elementos con los interactuarán directamente los usuarios representan algún factor de riesgo para su seguridad. Por ejemplo, para transportar microorganismos que amenacen la propagación de enfermedades, en caso de que sí, determinar métodos de esterilización, y si estos serán viables para el uso cotidiano del robot.	<p>Considerar diversas propiedades como los lixiviables y extraíbles, la vida útil y el envejecimiento, la unión y soldadura, y los plásticos de grado médico y los suplementos. Es importante conocer los datos sobre toxicidad, irritación en la piel, ojos y superficies mucosas, sensibilización, hemocompatibilidad, genotoxicidad, carcinogenicidad y otros efectos durante los procesos de industrialización, incluyendo los efectos en el medio ambiente.</p> <p>Evaluar diferentes métodos de esterilización de materiales. No solo para asegurar la seguridad de los usuarios, sino también para comprobar que no afecte la estructura de los materiales o el funcionamiento de los sistemas electrónicos del robot.</p>
Aversión del producto con el usuario.	Realizar pruebas de usabilidad con los usuarios, comprobar si los elementos con los que interactúa física y emocionalmente le crean aversión o empatía. Recabar información de los usuarios.	Los productos biomédicos tienen como usuario final al paciente, pero también se deben considerar a los técnicos de instalación, instructores y personal médico que operan el dispositivo. Estos usuarios tienen la capacidad de influir en los procedimientos, configuración y mantenimiento del dispositivo.

Escenario de riesgo identificado	Descripción de las pruebas propuestas	Consideraciones en el diseño relacionadas con la prueba propuesta
		La usabilidad se evalúa a través de las interfaces del dispositivo, que son los elementos utilizados para operarlo, o bien, los que brindan información.

9 Conclusiones

El objetivo general del trabajo se cumplió, se rediseñó y manufacturó el modelo conceptual del sistema estructural de un robot de servicio para el sector hospitalario. Se generaron los prototipos físico y digital del modelo conceptual, con los que se espera que, en etapas futuras del desarrollo del proyecto, interactúen con los distintos tipos de usuarios, con la finalidad de identificar oportunidades de mejora para versiones posteriores del producto.

A pesar de que se cumplió con el objetivo general del trabajo, a lo largo del desarrollo se enfrentaron a dificultades que retrasaron el rediseño y manufactura del modelo. Las principales dificultades se enuncian como debilidades del proyecto en el capítulo 5 *Análisis de las fortalezas y debilidades para el desarrollo del proyecto*, que principalmente fueron: la capacidad limitada de recursos económicos y humanos, que se tradujo en una deficiente planeación del desarrollo del proyecto. No obstante, la capacidad de adaptación, la explotación de creatividad y la conjunción de conocimientos multidisciplinarios para generar soluciones, permitieron lograr lo estipulado al inicio del proyecto. Más adelante se expresa con detalle cómo estos 3 factores influyeron en la toma de decisiones para generar resultados satisfactorios.

A continuación, se enuncian las conclusiones referentes a cada uno de los objetivos específicos del trabajo, priorizando los conocimientos adquiridos y la retroalimentación identificada a lo largo del proceso.

- ***Identificar los parámetros de entrada del proyecto.***

Se cumplió el objetivo, se identificaron y jerarquizaron los parámetros de entrada con los que fue entregado el proyecto. No solo se aceptaron para su implementación, sino que se entendieron los fundamentos funcionales y se realizaron sesiones de lluvias de ideas para retroalimentar muchas de los requerimientos que ya estaban establecidos para diseñar el sistema estructural del robot.

Se aprendió que considerar a las personas que retoman un proyecto comenzado impacta en el desarrollo posterior. A partir de la integración de un nuevo equipo de trabajo se pueden generar nuevas ideas, retroalimentación y pensamiento crítico respecto a las decisiones tomadas previamente. En términos generales, el saber o no desarrollar una transición de un equipo de trabajo a otro, puede enriquecer o debilitar al proyecto.

- ***Establecer requerimientos técnicos e identificar necesidades en base a investigaciones acerca de las consideraciones en el diseño de robots de servicio para el área médica.***

Existen diferentes metodologías para el diseño y desarrollo del producto, algunas más populares que otras, sin embargo, la mayoría (por no decir todas) establecen la identificación de necesidades de los usuarios como uno de los primeros pasos al diseñar un nuevo producto o servicio.

En este caso, para desarrollar la versión de *Ayúdame 2.0* no se pudo tener contacto directo con los usuarios, ya que el equipo que comenzó con el desarrollo del proyecto ya había llevado a cabo esta tarea. Gracias a la enriquecedora transición que se realizó de un equipo de trabajo a otro, estas necesidades identificadas se lograron transitar al nuevo equipo en forma de requerimientos.

No obstante, otra de las primeras etapas en el desarrollo de un producto es la búsqueda de información, enriquecerse acerca el problema que se quiere solucionar; esta búsqueda va desde estadísticas y datos, hechos anteriores al problema, patentes, benchmarking, etc. Para los fines de este trabajo, se decidió recabar información principalmente para saber cuáles eran los aspectos y consideraciones en el diseño de robots de servicio, específicamente para el área médica. Esa es la razón por la que se examinó y analizó el artículo *Consideraciones en el diseño de robots para la atención médica en el mundo post COVID-19*, consultado en la revista de investigación en ingeniería e innovación tecnológica *CULCYT. Cultura Científica y Tecnológica*. Consultar fuentes confiables (como artículos científicos, tesis, tesinas, etc.) permite eliminar sesgos cognitivos y prejuicios, que se pueden traducir en aspectos negativos a lo largo del desarrollo del proyecto, como pérdida de recursos económicos, desperdicio de tiempo, mala organización, funcionalidades innecesarias, etc.

- ***Dividir y analizar los subsistemas del sistema estructural del robot.***

El objetivo se cumplió de manera satisfactoria, utilizando como herramienta principal la metodología de Karl Ulrich. Con base en ella, se decidió utilizar la arquitectura modular para dividir y analizar los subsistemas que conforman el sistema estructural del robot.

Se aprendió acerca del concepto de la arquitectura de un producto, para qué se utiliza en la ingeniería de diseño, los diferentes tipos de arquitecturas, las ventajas y desventajas de cada una; y a partir de ello, se eligió utilizar la modular, de acuerdo con el tipo de producto que se quería desarrollar en *Ayúdame*.

Esta herramienta permitió analizar en partes el modelo conceptual, realizar la planeación de la manufactura, prever algunos materiales, establecer las funciones de cada módulo que conforma el producto e identificar sus principales deficiencias.

- ***Diseñar, modificar e integrar el sistema motriz al modelo conceptual elegido.***

Para desarrollar y cumplir este objetivo se aplicaron los conocimientos multidisciplinarios de la mecatrónica, ya que, desde la primera presentación del modelo conceptual del sistema motriz, se identificó que era el módulo menos avanzado, y del cual dependía el desarrollo posterior del proyecto.

Para diseñar el sistema motriz se aplicaron conocimientos referentes a mecánica de sólidos, diseño de elementos de máquinas, máquinas eléctricas y diseño mecatrónico. Se analizó lo suficiente este subsistema para evitar que en el futuro causara problemas en la integración de los demás módulos.

La ingeniería mecatrónica aplicada permite entender cómo van a interactuar entre sí subsistemas mecánicos, eléctricos-electrónicos, digitales y de control. Probablemente, no siempre se sabrá a detalle cómo funcionan dichos subsistemas, sin embargo, sí se debe conocer en términos generales cómo es que funcionan en conjunto; cómo se acoplan, comunican y trabajan entre sí. En este caso se priorizó entender aspectos tales como: cómo la estructura mecánica del sistema motriz soportaría las cargas de los demás componentes, cómo los motores generarían el trabajo mecánico suficiente para mover al robot, cómo se alimentarían y controlarían los motores, etc. Es decir, no se involucraría, por ejemplo, en conocer las especificaciones técnicas de los *dirvers* y de los motores para programarlos, sino realmente, para saber qué tipo de baterías se necesitarían, y así estimar su tamaño y adecuarlas al diseño mecánico de la estructura del robot.

Por otro lado, se decidió tomar la iniciativa de tangibilizar el modelo conceptual, ya que todo el proyecto se mantenía solo en ideas, ningún equipo se atrevía a aplicar físicamente lo propuesto. De esta forma, teniendo algún elemento tangible, habría una base sobre la cuál comenzar a trabajar en paralelo.

- ***Diseñar y fabricar la base sobre la cual se montará la estructura vertical del robot.***

El objetivo se cumplió, sin embargo, como se explica en el capítulo 7.2 *Diseño y fabricación de la base sobre la cual se montará la estructura vertical del robot*, este aspecto fue uno de los más complicados de implementar.

Las limitantes económicas del proyecto fueron más notorias y determinantes en el desarrollo de este módulo del producto. Se pretendía diseñar una base robusta y muy resistente con la finalidad de que prácticamente no experimentará modificaciones futuras. Sin embargo, al diseñar soluciones con estas características, se identificó que el factor común eran los materiales estructurales resistentes, como las láminas de aluminio 3003 o 6061; no obstante, por la falta de recursos económicos, no fue posible adquirir materiales con esas características. Al no poder depender de las propiedades mecánicas de los materiales, se buscó depender de la estructura y configuración de los elementos, es decir, el rediseño se basó en

acomodar elementos *menos* resistentes (que los mencionados) de tal forma que aportaran la robustez y rigidez deseada. La capacidad de adaptación fue muy importante para lograr satisfactoriamente el objetivo.

- ***Diseñar, definir, manufacturar y montar la estructura vertical del robot.***

Desarrollar este objetivo fue relativamente sencillo, ya que al contar con los materiales con los que se debía fabricar, hizo el proceso diferente pero más fácil. Fue como diseñar un rompecabezas, se contaba con las piezas y materiales, solo había que diseñar cómo se iban a acomodar para que cumplieran con los requerimientos cualitativos.

No obstante, una de las complicaciones más significativas de la implementación de este módulo fue el diseño para ensamble. El diseño para ensamble es un procedimiento en el que los productos se diseñan teniendo en cuenta la facilidad de ensamblaje durante su montaje. La disminución de la cantidad de piezas en un conjunto presenta la ventaja adicional de reducir el costo total de las partes en el producto [41]. Durante el diseño e implementación de la solución de la estructura vertical, se establecieron principalmente como métodos para ensamble tornillos, y algunos de ellos (como el ensamble de los postes con el travesaño) son complicados de montar, quizá para la etapa actual del producto y considerando las limitantes del proyecto, no se trate de un aspecto sumamente grave, sin embargo, definitivamente es una oportunidad de mejora para versiones posteriores.

- ***Diseñar, fabricar e integrar la carcasa del robot.***

El objetivo se cumplió; se logró rediseñar, fabricar e implementar los elementos que conforman la carcasa del robot. Desarrollar este objetivo permitió interactuar con los diseñadores industriales, conociendo sus metodologías y conocimientos referentes al diseño estético, principalmente. Se aprendió cómo es que ellos consideran no solo las características técnicas del producto (como la masa, resistencia, volumen, etc.), sino también aspectos que impactan en las sensaciones del usuario.

Por otro lado, una vez más la capacidad de adaptación y la explotación de la creatividad permitieron llevar a cabo este objetivo. Se consiguió mantener la forma y geometría deseadas del robot utilizando diferentes métodos de manufactura que no estaban previstos en las etapas iniciales del desarrollo.

- ***Determinar y proponer pruebas para el prototipo final del robot.***

A lo largo del desarrollo del proyecto, se priorizó la consciencia y el pensamiento crítico en las decisiones tomadas. Es decir, entender por qué se tomaron ciertas decisiones, y en caso de que algunas decisiones se hayan tomado por otros miembros del equipo, cuestionarlas lo suficiente para generar retroalimentación e identificar oportunidades de mejora.

Dicho lo anterior, el capítulo 8 *Identificación de vulnerabilidades, escenarios de riesgo y propuestas para pruebas futuras* se generó con la finalidad de expresar dichos aspectos, y así cuando otro equipo continúe con el desarrollo del robot, pueda comprender las principales debilidades técnicas del modelo conceptual fabricado. Además de transmitir e impulsar la consciencia, proactividad y pensamiento crítico en el desarrollo de un proyecto profesional.

Por otro lado, como se mencionó con anterioridad, la documentación de propuestas de pruebas es importante para generar un repositorio que pueda evaluar y validar el progreso de forma objetiva.

Por último, se comentarán las conclusiones generadas a partir de aspectos no técnicos ingenieriles, que, de igual manera son indispensables en el desarrollo de proyectos profesionales; tales como la administración de proyectos, la capacidad de adaptación, la explotación de la creatividad, la conjunción de conocimientos multidisciplinarios para implementar soluciones, y la adquisición y desarrollo de habilidades blandas.

La administración se define como la acción de coordinar los recursos de una empresa o proyecto para el cumplimiento de sus objetivos y alcanzar su evolución. El proceso administrativo universalmente cuenta con las fases de planeación, organización, dirección y control. En las grandes compañías y en los macroproyectos profesionales se suele establecer una estructura que permita llevar a cabo cada una de las fases de dicho proceso, ya que de ellos dependerá el cumplimiento de los objetivos y su evolución. Es irrefutable que un proceso administrativo formalmente aplicado influye de manera determinante en la evolución de una empresa o proyecto.

En ocasiones (como sucedió en el proyecto *Ayúdame*), los procesos administrativos se dejan en segundo plano con la finalidad de priorizar los aspectos técnicos del proyecto. Esta situación conflictúa el desarrollo del proyecto a largo plazo. Es por ello que en el actual trabajo se hace hincapié en este aspecto, es necesario aplicar las metodologías del proceso administrativo para eficientar el trabajo de todas las partes que conforman el proyecto.

Por otro lado, como se ha mencionado en las conclusiones de los objetivos específicos del proyecto, la capacidad de adaptación y la explotación de la creatividad fueron dos factores determinantes para cumplir satisfactoriamente los objetivos establecidos. Usualmente, en las asignaturas de ingeniería aprendes la parte técnica de diferentes procesos de diseño, análisis, manufactura, etc., sin embargo, difícilmente se aprende ni se enfatiza en los escenarios reales que suceden en la industria y en la vida profesional. Es

decir, en muchos proyectos de ingeniería se evalúan las mejores decisiones en base a las características o propiedades ingenieriles, no obstante, en adición a esto, se deberían también evaluar parámetros de costo-beneficio, viabilidad económica, alternativas en base a costos, etc., ya que estos parámetros suelen valorarse en la industria. En el desarrollo del proyecto, se aprendieron a aplicar estos parámetros, ya que las decisiones de diseño estuvieron condicionadas principalmente por limitantes: económicas, de recursos humanos y de producción; a esto se refiere con la capacidad de adaptación, que aunque no se contaba con recursos o con las mejores condiciones de manufactura, se lograron desarrollar soluciones que cumplieron con los requerimientos establecidos, de igual forma, en ello se vio reflejada la explotación de la creatividad, ya que usualmente las primeras ideas y propuestas se modificaban en base a las limitantes del proyecto, se buscaban alternativas de diseño que se adaptaran a las herramientas y capacidades del equipo.

Por último, a pesar de que el título del trabajo sea *Rediseño y fabricación del sistema estructural de un robot de servicio para el sector hospitalario*, la multidisciplinariedad de conocimientos fue indispensable para llevar a cabo el modelo conceptual. No solo se aplicaron los conocimientos que aporta la mecatrónica, sino que se aplicaron conocimientos relacionados con el diseño gráfico e industrial. Sin esta conjunción de disciplinas el resultado hubiese sido diferente. Frecuentemente, en todas las carreras profesionales se crea un sesgo fundamentado en la formación profesional; si no se adquieren y desarrollan habilidades blandas como la apertura hacia los demás, la tolerancia, la comunicación efectiva, la capacidad de escucha, etc., no solo se crea un deficiente ambiente de trabajo, sino que el resultado del proyecto también resultará deficiente. Para este caso, se identificó cómo se relacionan las habilidades blandas con la conjunción de conocimientos multidisciplinarios para desarrollar soluciones, que se tradujo en resultados satisfactorios y en un fructífero grupo y ambiente de trabajo.

10 Referencias

- [1] Laboratorio de Electrónica y Automatización para la Industria 4.0, IIMAS, UNAM, «AYUDAME 1.0,» CDMX, 2020.

- [2] Asociación Española para la Calidad (AEC), «Diseño Robusto,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/disenio-robusto>. [Último acceso: 26 Octubre 2022].

- [3] B. Regader, «Tecnofobia: ¿qué impacto tienen las nuevas tecnologías en nuestra mente?,» *Gestión*, 27 Enero 2019.

- [4] S. G. Sotomayor, «IEBS Digital School,» 24 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.iebschool.com/blog/design-thinking-agile-scrum/>. [Último acceso: 28 Octubre 2022].

- [5] Mine Energy Design, «Design Thinking para ingenieros,» 11 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://blogs.upm.es/minenergydesign/empatizar/#:~:text=Empatizar%20es%20la%20capacidad%20de,deseos%20para%20poder%20aportarles%20soluciones..>. [Último acceso: 28 Octubre 2022].

- [6] M. Alcaraz, «¿Qué es y para qué sirve un Moodboard?,» Baética, 1 Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://baetica.com/que-es-moodboard/>. [Último acceso: 29 Octubre 2022].

- [7] Carbone, «Láminas de acrílico: qué son y usos que puedes darle,» 2022. [En línea]. Available: <https://carbonestore.com/blogs/news/laminas-de-acrilico-que-son-y-usos-que-puedes-darle#:~:text=Las%20l%C3%A1minas%20de%20acr%C3%ADlico%20tienen%20calidades%20similares%20a%20las%20del,veces%20m%C3%A1s%20resistencia%20al%20impacto..>. [Último acceso: 30 Noviembre 2022].

- [8] PLANO: Plásticos y Láminas del Norte S.A. de C.V., «Plásticos Uso General: Estireno,» [En línea]. Available: <https://plano.mx/product/estireno/>. [Último acceso: 30 Noviembre 2022].
- [9] COSMOS - Plataforma Digital B2B, «Lámina de estireno,» Tecnología en Lámina Plástica, S.A. de C.V. TLP, [En línea]. Available: <https://www.cosmos.com.mx/producto/lamina-de-estireno-gglm/lamina-de-estireno-4hsqu4444.html#:~:text=L%C3%A1mina%20de%20estireno%20antibacterial%3A%20se,a%20los%20rayos%20del%20sol.> [Último acceso: 30 Noviembre 2022].
- [10] formlabs, «Guía de termoformado,» [En línea]. Available: <https://formlabs.com/latam/blog/termoformado/>. [Último acceso: 30 Noviembre 2022].
- [11] M. Reyes Castillo, A. J. Fonseca Murillo y C. R. Cruz Mendoza, «Consideraciones en el diseño de robots para la atención médica en el mundo post COVID-19,» *CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA*, vol. 19, n° 1, pp. 31-47, Enero - Abril 2022.
- [12] alberto lacalle, «¿Quién es usuario?,» Julio 2007. [En línea]. Available: <https://albertolacalle.com/hci/usuario.htm>. [Último acceso: 28 Diciembre 2022].
- [13] Tecnosoluciones, «¿Qué son pruebas de extraíbles y lixiviables? Enfoque en la Industria de Dispositivos Médicos,» 6 Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://tecnosolucionescr.net/blog/42-que-son-pruebas-de-extraibles-y-lixiviables-enfoque-en-la-industria-de-dispositivos-medicos>. [Último acceso: 28 Diciembre 2022].
- [14] E. Lupton, *El Diseño como Storytelling*, Barcelona: GG, 2022.
- [15] A. Raeburn, «Análisis FODA: qué es y cómo usarlo (con ejemplos),» asana, 1 Julio 2021. [En línea]. Available: <https://asana.com/es/resources/swot-analysis>. [Último acceso: 20 Diciembre 2022].

- [16] Lifeder, «Factores internos y externos de una empresa,» 14 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/factores-internos-externos-empresa/>. [Último acceso: 21 Diciembre 2022].
- [17] R. De La O Ramos, B. R. V., M. López Parra y R. R. A. C., «Método de diseño para variedad de productos basado en el análisis de su modularidad,» *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 11, n° 1, 2010.
- [18] Aluminios Bean, «¿Qué tipo de soldadura se utiliza para el aluminio?,» 29 Julio 2019. [En línea]. Available: <http://www.aluminiosbean.es/blog/2019/07/29/que-tipo-de-soldadura-se-utiliza-para-aluminio/>. [Último acceso: 24 Enero 2023].
- [19] Andy Mark, «Productos,» [En línea]. Available: <https://www.andymark.com/>. [Último acceso: 09 Febrero 2023].
- [20] Gelson Luz, «4140 Propiedades (Mecánicas, Químicas y Clasificación),» *Blog Materiales*, 3 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.materiales.gelsonluz.com/2020/12/sae-4140-propiedades-mecanicas-quimicas.html#:~:text=M%C3%B3dulo%20de%20Elasticidad,informaci%C3%B3n%20sobre%20M%C3%B3dulo%20de%20Elasticidad%20..> [Último acceso: 11 Febrero 2023].
- [21] J. C. Rodríguez Hidalgo, Artist, *Diseño y construcción de una plataforma omnidireccional para evaluar controladores modernos en el seguimiento de trayectoria utilizando visión artificial.* [Art]. ESPE. Universidad de las Fuerzas Armadas., 2021.
- [22] Wikipedia, «Rueda Mecanum,» 3 Diciembre 2022. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Mecanum_wheel. [Último acceso: 09 Febrero 2023].
- [23] ECAM Robotics, «Ruedas Mecanum,» GitHub, 2018. [En línea]. Available: <https://ecam-eurobot.github.io/Tutorials/mechanical/mecanum.html?highlight=kinema#forward-kinematics>. [Último acceso: 10 Febrero 2023].

- [24] Villalaminados. Sólidos por todos lados., «Diferencias entre lámina de acero o aluminio,» 2017. [En línea]. Available: <https://villalaminados.com/diferencias-lamina-acero/>. [Último acceso: 15 Febrero 2023].
- [25] Wikipedia, «Aluminio 6061,» Wikipedia.org, 29 Septiembre 2022. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio_6061. [Último acceso: 16 Febrero 2023].
- [26] H. Muratalla, «¿Por qué el aluminio 3003 es la aleación más utilizada?,» Ulbrinox, 15 Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://www.ulbrinox.com.mx/blog/por-que-el-aluminio-3003-es-la-aleacion-mas-utilizada>. [Último acceso: 16 Febrero 2023].
- [27] Blechzulieferer, «Gerver GVZ - 4 Schwenkbiegemaschine,» [En línea]. Available: <https://www.blechzulieferer.com/schwenkbiegemaschine-gerver-gvz-4-used+15253/offer>. [Último acceso: 9 Marzo 2023].
- [28] AnunciosYa, «TALADRO FRESADOR DE BANCO MARCA MC. LANE (USA) MOD. ZX40A,» 12 Marzo 2012. [En línea]. Available: <https://tlalnepantladebaz.anunciosya.com.mx/taladro-fresador-de-banco-marca-mc-lane-usa-mod-zx40a-en-tlalnepantladebaz-n4Io>. [Último acceso: 10 Abril 2023].
- [29] J. Andrés, «Coeficiente de seguridad,» Mecapedia, 28 Julio 2022. [En línea]. Available: http://www.mecapedia.uji.es/pages/coeficiente_de_seguridad.html. [Último acceso: 4 Abril 2023].
- [30] J. M. Pereiras, «¿Qué es y para qué sirve la tensión de von Mises,» 7 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/qu%C3%A9-es-y-para-sirve-la-tensi%C3%B3n-de-von-mises-jose-manuel-pereiras/?originalSubdomain=es>. [Último acceso: 12 Abril 2023].
- [31] Safety Culture, «Factor de seguridad: Coeficiente de seguridad en el diseño y el uso,» 3 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://safetyculture.com/es/temas/factor-de-seguridad/>. [Último acceso: 12 Abril 2023].

- [32] HAOMEI ALUMINIO, «1100 Placa De Aluminio,» [En línea]. Available: <http://www.alu-hm.com/1100-placa-de-aluminio.html>. [Último acceso: 12 Abril 2023].
- [33] 3DS - 3Dassault Systemes, «Impresión 3D,» 3DEXPERIENCE Make, 2018. [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/3d-printing>. [Último acceso: 17 Abril 2023].
- [34] L. Contreras, «Guía completa: El filamento de PLA en la impresión 3D,» 3Dnatives, 11 Febrero 2023. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/guia-filamento-pla-en-la-impresion-3d-190820192/#!>. [Último acceso: 20 Abril 2023].
- [35] S. Bozquez, «Uso y aplicaciones del aluminio,» ies - installux extrusión services, [En línea]. Available: <https://www.installux-es.com/es/blog/ventajas-de-trabajar-con-perfiles-de-aluminio-extruido>. [Último acceso: 11 Mayo 2023].
- [36] PANEL Y ACANALADOS MONTERREY, «¿Qué es el acero galvanizado? conoce los tipos, usos y ventajas,» [En línea]. Available: <https://panelyacanalados.com/blog/acero-galvanizado-ventajas-y-usos/>. [Último acceso: 11 Mayo 2023].
- [37] C. Martínez, «Diferencias entre brocas de titanio y de cobalto,» TECNITOOL, 24 Enero 2022. [En línea]. Available: <https://tecnitool.es/diferencias-brocas-titanio-y-cobalto/>. [Último acceso: 8 Mayo 2023].
- [38] ACRYPOLMX, «Imagine las posibilidades de aplicación con las láminas de PETG,» [En línea]. Available: https://www.acrypolmx.com/laminas-de-petg/?gclid=CjwKCAjw67ajBhAVEiwA2g_jEP9Laz19yApdUtpA0jzKuat8iUPFMR97QM8Sc41z60S8fGL6LoEzOB0CKIMQAvD_BwE. [Último acceso: 24 Mayo 2023].
- [39] Arteplástica, «¿Qué es el PVC espumado y qué aplicaciones tiene?,» [En línea]. Available: <https://arteplastica.es/que-es-el-pvc-espumado-y-que-aplicaciones-tiene/>. [Último acceso: 26 Mayo 2023].

- [40] CIIFEN, «Definición de Riesgo,» [En línea]. Available: <https://ciifen.org/definicion-de-riesgo/>. [Último acceso: 8 Junio 2023].
- [41] Wikipedia, «Diseño para ensamble,» 9 Septiembre 2019. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Dise%C3%B1o_para_ensamble. [Último acceso: 26 Junio 2023].