



DIVISIÓN DE ESTUDIOS POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Opción 1.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**Desarrollo de un simulador de pendiente horizontal e inclinación lateral
de una bicicleta estática**

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

PRESENTA:

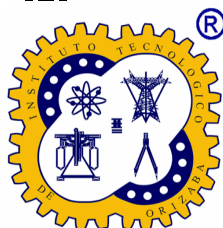
Marvin Fernando Nepomuceno Rojas

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. Enrique Alejandro Cuellar Cortés

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Rubén Posada Gómez





Instituto Tecnológico de Orizaba
Departamento de División de Estudios de Posgrado e Investigación

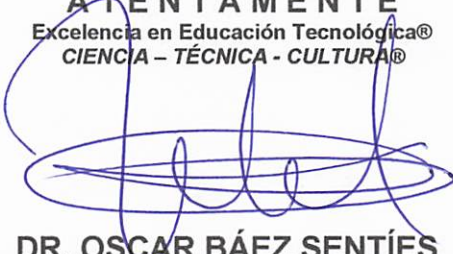
Orizaba, Veracruz, **26/marzo/2026**
Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**
Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: I

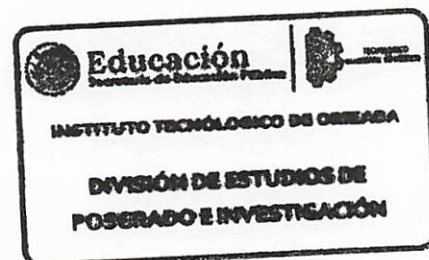
C. MARVIN FERNANDO NEPOMUCENO ROJAS
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**" DESARROLLO DE UN SIMULADOR DE PENDIENTE HORIZONTAL E INCLINACIÓN
LATERAL DE UNA BICICLETA ESTÁTICA".**

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

DR. OSCAR BÁEZ SENTÍES
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



OG-13-F06



2026
año de
**Margarita
Maza**





Instituto Tecnológico de Orizaba
Departamento de División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **23/marzo/2026**
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. DR. OSCAR BÁEZ SENTÍES
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

MARVIN FERNANDO NEPOMUCENO ROJAS

La cual lleva el título de:

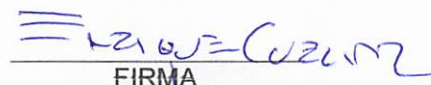
“DESARROLLO DE UN SIMULADOR DE PENDIENTE HORIZONTAL E INCLINACIÓN LATERAL DE UNA BICICLETA ESTÁTICA”

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: M.C. ENRIQUE ALEJANDRO CUELLAR
CORTÉS


FIRMA

SECRETARIO: DR. IGNACIO HERRERA AGUILAR


FIRMA

VOCAL: DR. OSCAR OSVALDO SANDOVAL
GONZÁLEZ


FIRMA

VOCAL SUP.: DR. RUBÉN POSADA GÓMEZ


FIRMA

TA-09-18



2026
año de
Margarita
Maza



CONTENIDO

RESUMEN	15
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN	17
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
JUSTIFICACIÓN	24
LIMITES Y ALCANCES	27
0.1 Alcances.....	27
0.2 Limites.....	27
HIPÓTESIS	29
OBJETIVOS	30
0.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	30
CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE Y ESTADO DEL CAMPO.....	31
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	33
2.0.1 Cinética y dinámica del pedaleo.	33
2.0.2 Telemetría y monitorización de datos en tiempo real.....	33
2.0.3 Interfaz hombre-máquina (HMI) y experiencia de usuario.	33
2.0.4 Sinergia mecatrónica y latencia de control.	33
2.1 Concepto de mecatrónica.	34
2.2 Diseño y validación asistidos por computadora para la estructura mecánica.	34
2.2.1 Panorama de herramientas CAD y criterios de selección.....	34
2.2.2 Justificación de la selección de AUTODESK INVENTOR como plataforma de diseño.	35
2.2.3 Concepción estructural y materiales.	35

2.2.4	Validación estructural mediante análisis por elemento finito. (FEA).....	36
2.3	Sistema de control y actuación electromecánica.....	36
2.3.1	Principio de funcionamiento de la unidad de resistencia.	36
2.3.2	Sistema de actuación y modulación.....	36
2.3.2.1	Análisis y justificación del actuador seleccionado.....	36
2.3.3	Arquitectura del sistema de control electrónico.....	37
2.3.3.1	Unidad central de procesamiento: ESP32	37
2.3.4	El microcontrolador ESP32.	37
2.3.4.1	Arquitectura del servidor web asíncrono.....	38
2.3.5	Desarrollo de la interfaz web. (front-end)	38
2.3.6	Lógica de comunicación.	38
2.3.6.1	Controladores de potencia: etapa experimental y selección final.....	39
2.3.6.2	Fuente de alimentación de 24 V 7 A	41
2.3.6.3	Gestión de energía y regulación.	42
2.3.6.4	Interruptores de límite y monitoreo experimental de corriente.....	44
2.3.7	Dispositivos de seguridad y monitoreo.....	46
2.3.8	Elementos de lubricación: grasa multiusos de base litio.....	47
2.4	Mantenimiento y confiabilidad del sistema electromecánico.	47
2.4.1	Lubricación y tribología: grasa de base litio.	48
2.4.2	Vida útil y criterios de confiabilidad.	48
2.4.2.1	Actuadores y gestión de ciclos de Trabajo.....	48
2.4.2.2	Confiabilidad del sistema.	48
2.4.2.3	Fatiga estructural.	49

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	50
3.1 Metodología.....	50
3.2 Descripción de las etapas.	51
CAPÍTULO 4: MÉTODO.....	52
CAPÍTULO 5: DESARROLLO	54
5.1 Diseño de modelo a implementar. (Re-diseño de modelo).....	54
5.2 Simulación de esfuerzos.	68
5.3 Construcción de prototipo (Etapa de mejoras).	94
5.3.1 Mecanizado del prototipo.	95
5.3.2 Experimentación con el modelo principal y su modificación.	97
5.3.3 Modificación de prototipo (base delantera).	100
5.3.4 Montaje de los actuadores y experimentacion.....	102
5.3.5 Experimentación con la base delantera.....	104
5.3.6 Prueba de base delantera con usuario.....	108
5.3.7 Modificación y diseño de base trasera.....	110
5.3.8 Uso de pintura para evitar corrosión.....	112
5.3.9 Ensamblaje y traslado.....	114
5.4 Pruebas mecatronicas.	116
5.5 Desarrollo del Sistema de Control.....	116
5.5.1 Algoritmo de control de posición.....	116
5.5.2 Cálculos Cinemáticos.....	117
5.5.3 Implementación del Firmware.....	117
5.5.4 Seguridad del Sistema.	130
5.5.5 Pruebas experimentales para el sistema de control.....	131

5.6	Prototipo final.....	133
5.7	Validación final y documentación.....	137
5.7.1	Prueba de rango y repetibilidad del actuador.....	137
5.7.2	Integración final.....	137
5.7.3	Experimentación del prototipo con usuarios.....	144
5.7.4	Creación de placa para simplificar el diseño con los sensores de corriente.....	147
5.7.5	Modificación de la placa para el uso de sensores ultrasonicos.....	150
5.7.6	Generación de Documentación Técnica.....	153
CAPÍTULO 6: RESULTADOS.....		154
6.1	Análisis del modelo final creado en Inventor Autodesk.....	154
6.1.1	Modelo final.....	154
6.1.2	Análisis de la base delantera.....	156
6.1.3	Análisis de base delantera con ensambles.....	162
6.1.4	Análisis de la base trasera.....	172
6.2	Caracterización de los actuadores.....	177
6.3	Pruebas y experimentación con usuarios.....	177
6.3.1	Base final del sistema de control.....	181
6.4	Plan de mantenimiento preventivo del sistema.....	182
6.4.1	Protocolo de inspección y frecuencias.....	183
6.4.2	Procedimientos específicos.....	183
6.4.2.1	Mantenimiento tribológico.....	183
6.4.2.2	Sincronización de carrera por software.....	184
6.4.2.3	Gestión de la robustez electrónica.....	184

6.5	Análisis y descripción de la interfaz de control digital.....	184
6.5.1	Arquitectura del dashboard y protocolo de comunicación.	184
6.5.2	Instrumentación y telemetría angular.....	185
6.5.3	Gestión de actuadores y control de potencia.....	185
6.5.4	Panel superior: indicadores de orientación.....	186
6.5.5	Paneles de control de actuadores.....	186
6.5.6	Algoritmos de seguridad y protección de hardware.....	186
CONCLUSIONES		188
RECOMENDACIONES.....		190
6.6	Recomendaciones y Trabajos Futuros.....	190
6.6.1	Mejoras en el hardware y sensado.....	190
6.6.2	Optimización del control de Software.....	190
6.6.3	Seguridad Mecánica.....	190
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		191
PRODUCTOS ACADÉMICOS		196
CAPÍTULO A: MANUAL DE OPERACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL WEB (ESP32)		197
A.1	Introducción	197
A.2	Arquitectura de Conexiones.....	197
A.3	Configuración de la Interfaz Web.....	197
A.4	Lógica de control de seguridad.....	197
A.4.1	Cálculos geométricos implementados	198
A.5	Guía de usuario de la pantalla de control	198

A.6	Manual de Mantenimiento y Operación.....	199
A.6.1	Protocolo de encendido y operación segura.....	199
A.6.2	Plan de Mantenimiento Preventivo	200
A.6.3	Calibración de Sensores	200
A.6.4	Resolución de Problemas (Troubleshooting)	200
A.7	Manual de usuario: Interfaz gráfica de control (GUI)	200
A.7.1	Descripción de componentes de la pantalla	201
A.7.2	Procedimiento de Operación Estándar.....	202
CAPÍTULO B: PLANOS ESTRUCTURALES		203

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Número de accidentes, personas heridas y defunciones, 2015-2020. [3].....	20
Figura 2.	Distribución de las defunciones por tipo de persona usuaria entre los años 2015 y 2020. [5]	21
Figura 3.	Imagen representativa de los actuadores usados para este proyecto.	37
Figura 4.	Imagen representativa del ESP32 con 30 pines utilizado para este proyecto.	38
Figura 5.	Imagen representativa del puente H L298 N de 2A	39
Figura 6.	Imagen representativa del puente h l298n 7A.....	40
Figura 7.	Imagen representativa del puente H BTS 7960 43A usado en este proyecto.	41
Figura 8.	Imagen representativa de la fuente conmutada de 24 V 7 A usada en este proyecto.	42
Figura 9.	Imagen representativa del regulador de voltaje step-down LM2596.....	43
Figura 10.	Imagen representativa del regulador de voltaje LM2576HV usado para este proyecto.	44
Figura 11.	Imagen representativa de limit swich.....	45
Figura 12.	Imagen representativa del sensor ACS712 utilizado para las pruebas experimentales de corriente.	46
Figura 13.	Imagen representativa del sensor ultrasónico HC-SR04 utilizado para la retroalimentación de posición.	47
Figura 14.	Metodología de desarrollo.....	50
Figura 15.	Flujo de control de lazo cerrado con monitoreo de límites de seguridad.....	52
Figura 16.	En la colección de imágenes se demuestra una de las primeras ideas descartadas para una base fija de la bicicleta, teniendo previa documentación de campo.	
	55	
Figura 17.	La colección de imágenes muestra modelos propuestos descartados para la idea de inclinación natural.....	57
Figura 18.	En la colección de imágenes se muestra el modelo descartado, siendo solo una base delantera que presenta problemas con recargar cargas internas y un mecanismo que requiere mejoras.	59
Figura 19.	En la colección de imágenes se demuestra el modelo descartado de la base delantera y su idea de usar actuadores para describir las inclinaciones desde la parte delantera.....	61
Figura 20.	En la colección de imágenes se describe una idea de modificación para usar	

guías de apoyo para fuerzas resultantes, siendo inspiración de una base de entrenamiento y su simplicidad para describir desplazamientos.	63
Figura 21. La colección de imágenes describe el modelo descartado previsto y con mayor libertad para modificaciones, sin la mayoría de problemas antes vistos.	65
Figura 22. En la colección de imágenes se describen soluciones posibles a las modificaciones de posición en los actuadores para mejorar el desplazamiento.	67
Figura 23. En la colección de imágenes se analizan los modelos propuestos previamente con cargas de 150 kg, considerando que la persona promedio pese menos que este valor y un promedio de 1500 N de fuerza para esta carga.	69
Figura 24. En la colección de imágenes se analiza la segunda estructura propuesta y se establecen los mismos parámetros, siendo el análisis mecánico un poco mejor que la tubería con espesor grueso, recordando que piezas sólidas son difíciles de conseguir y manipular.	71
Figura 25. En la colección de imágenes se muestran los análisis subsecuentes de la mayoría de cargas, solo relacionando acciones de carga con reacciones finales para el acero.	73
Figura 26. Para la colección de figuras, se analiza la figura de modelos previos para determinar su utilidad; en este caso se describe la carga uniforme sobre la superficie de la cara superior.	75
Figura 27. La colección de figuras analiza el resto de la estructura, desde su deformación hasta la consecuencia de someterlo a cargas parecidas.	77
Figura 28. En la colección de imágenes se analiza la estructura modificada, reduciendo espesor del PTR, tratando de entender problemas internos del problema anterior, logrando descartar el modelo.	79
Figura 29. En la colección de imágenes se puede observar el resto de análisis para entender cargas indeseables en el modelo.	80
Figura 30. En la colección de imágenes se observa el análisis por cargas y por tensión del modelo rediseñado de la parte delantera.	81
Figura 31. En la colección de figuras se muestran los estudios de la pieza para comprender comportamientos en su estructura.	83
Figura 32. En la colección de imágenes se analizan partes cruciales del modelo descartado.	85
Figura 33. En la colección de imágenes se rediseña la parte delantera de la estructu-	

ra, apoyando la parte media de la bicicleta, pero se intenta introducir actuadores en la estructura para apoyar las inclinaciones.	87
Figura 34. En la colección de imágenes se analiza el modelo entendiendo que es inviable, siendo así el análisis de sus fallas.	89
Figura 35. En la colección de imágenes se analiza la estructura rediseñada desde un banco de trabajo para repartir cargas en guías, al igual que su análisis nos demostrará maneras realistas de realizar un diseño mucho mejor.	91
Figura 36. En la colección de imágenes se enseña el análisis determinado por cuerdas para encontrar cargas internas y mejorar el diseño.....	92
Figura 37. En la colección de imágenes, se encuentra el análisis de cargas del modelo propuesto a mecanizar, siendo inspirado por sus mejoras estructurales, guías de apoyo en cargas, base amplia para recargar mayor carga solo delantera y parte de su transmisión de cargas.	94
Figura 38. En la colección de imágenes se pueden observar los trabajos más complejos que fueron detallados.	96
Figura 39. En la colección de imágenes se observa el primer modelo diseñado probando primeras pruebas experimentales para su validación.	98
Figura 40. En las imágenes se observa el problema con el PTR cuadrado, ya que las guías se traban en un punto de la estructura, haciendo un problema.	100
Figura 41. En la colección de imágenes se observan las modificaciones necesarias para hacer las guías circulares y evitar el pellizcar las estructuras necesarias.....	101
Figura 42. En la colección de imágenes se observa el ensamble de los actuadores en la nueva modificación y su prueba de engrasado en los tubos guía.....	103
Figura 43. En la colección de imágenes se observa el análisis experimental principal con cargas de 10 a 20 kilos, principalmente para los primeros análisis.	105
Figura 44. En la colección de imágenes se analiza experimentalmente con mayor número de cargas y el paso de corriente.	107
Figura 45. En la colección de imágenes se observan las pruebas para verificar parte del prototipo, solo de la parte delantera con carga de una persona de 80 kilos aproximadamente.	109
Figura 46. En la colección de imágenes se demuestran varias modificaciones para la parte trasera, siendo viable el uso de tuberías.	111
Figura 47. En la colección de imágenes se puso pintura en espray para detener la	

corrosión del PTR con una base neutra y azul en el caso de los 2 modelos y piezas ensambladas.....	113
Figura 48. En la colección de imágenes se enseña el proceso de ensamblaje completo....	115
Figura 49. En la siguiente colección de imágenes se enseñan las pruebas realizadas y la programación del esp 32.....	132
Figura 50. En la colección de imágenes fueron las primeras pruebas para caracterizar los actuadores.....	134
Figura 51. En la colección de imágenes se enseñan las pruebas experimentales para caracterizar los actuadores.	136
Figura 52. Prueba experimental de la nueva conexión con los actuadores y modificaciones del modelo de control.	137
Figura 53. En la colección de imágenes se puede observar el armado y pruebas con la pieza ensamblada y montada con los actuadores.	138
Figura 54. En la colección de imágenes podemos observar comparativamente lo calculado con lo real detectado por el angulómetro.....	139
Figura 55. En la colección de imágenes podemos observar la posición máxima alcanzada previa para soportar, dejando un punto de seguridad.....	140
Figura 56. En la colección de imágenes podemos observar las diferentes posiciones, alcanzando ángulos anteriores.....	142
Figura 57. En la colección de imágenes podemos observar el análisis y observación de los ángulos máximos repetidos en la estructura.	143
Figura 58. En la colección de imágenes podemos observar las primeras pruebas experimentales para calibrar el sistema y la estructura.....	145
Figura 59. En la colección de imágenes podemos observar las posiciones de prueba final para la experimentación final y captura de resultados.....	147
Figura 60. En la colección de imágenes podemos ver un modelo de placa descartado para un modelo de sensores de corriente que fueron cambiados.....	149
Figura 61. En la colección de imágenes podemos observar la placa modificada para el uso de sensores ultrasonidos en la placa realizada para imprimir e implementarla en una placa fenólica.	150
Figura 62. Prueba experimental de la nueva conexión con los actuadores y modificaciones del modelo de control.	151
Figura 63. Esquemático realizado para el sistema de control del ESP32 y el regulador de voltaje, así como los divisores de voltaje y los pines de salida.	152

Figura 64. Esquema del funcionamiento del sistema con esquemático para ilustrar partes físicas de los componentes.	153
Figura 65. En las imágenes 'a', 'b', 'c' y 'd' se observa el modelo diseñado para ser delantero, el modelo así como su ensamble con la bicicleta; en las imágenes 'e' y 'f' se observa el modelo de la base trasera para el desplazamiento lateral que se busca realizar, así como su ensamble.....	155
Figura 66. En las imágenes 'a' y 'b' se puede analizar, por cargas, la mayoría del reparto dado en un punto, siendo de 9.176 Mpa repartidos en solo la base.....	157
Figura 67. En las imágenes 'a', 'b', 'c', 'd', 'e' y 'f' se observa la mayoría de los problemas en la base, pero en el análisis lineal se observa la distribución de cargas en todos los lugares, siendo difícil de visualizar.....	159
Figura 68. En las imágenes 'a', 'b' y 'c' se observa el análisis por estado sólido en la estructura interna con un máximo de 3.21e8 en el esfuerzo, distribuyendo en varias partes de la estructura; en las imágenes 'd', 'e' y 'f' se observa el análisis de tensión en las estructuras tubulares, donde la mayor parte se recarga en la base, aun siendo de 3.787e-5, siendo poco para el acero.	161
Figura 69. En las figuras 'a', 'b' y 'c' se encuentra el factor común de la estructura ensamblada, demostrando cargas máximas en las conexiones donde recae la carga, siendo de 8.7732e13, siendo algo alto, pero requerido tornillo de acero al carbono u otro material más resistente.	163
Figura 70. En las imágenes 'a', 'b', 'c' y 'd' se observa el análisis por esfuerzos en la posición del actuador y la base donde recae carga, y demostrando en gran medida la distribución estructural que cae sobre la guía.	164
Figura 71. En la imagen 'a' se observan las cargas por tensión en la mayoría de la base; en las imágenes 'b', 'c', 'd', 'e' y 'f' se observa la concentración de cargas, siendo figurativas las figuras por colores, dando a entender la distribución de cargas, llegando a su máximo de 5 en los ensambles de las guías, siendo lógico reforzar estos puntos críticos.	165
Figura 72. En las imágenes 'a', 'b', 'c' y 'd' podemos observar la carga en reacción a la fuerza ejercida en la conexión del actuador; en las imágenes 'e' y 'f' se observa el análisis de concentración de fuerzas de manera sólida.	167
Figura 73. En las imágenes 'a', 'b' y 'c' se observa el análisis por cargas, siendo de	

478.4 MPa en parte media de la estructura donde recae la mayoría de carga; en la imagen 'd' se observa el análisis de estado sólido, siendo lógica la concentración de cargas por cada ensamble.	168
Figura 74. En las imágenes 'a', 'b', 'c', 'd' y 'e' se observa el análisis de estado sólido por líneas, demostrando de gran manera la distribución de cargas por todo el control de la estructura en los actuadores y los ensambles.	169
Figura 75. En la colección de imágenes podemos observar el análisis de tensión, fuerza reactiva y momento.	171
Figura 76. En las imágenes 'a' y 'b' se observa el análisis en líneas por desplazamiento, lo cual es mínimo; en 'c' y 'd' se analizan las estructuras por factor de seguridad, siendo de 42, usando tubería de acero y PTR.	172
Figura 77. En la colección de imágenes podemos observar el análisis por cargas en líneas, siendo más demostrativo en el reparto de cargas, el análisis de convergencia de cargas y de desplazamiento predictivo en el caso de tubería de acero.	174
Figura 78. En la colección de imágenes podemos observar el análisis del estado sólido de la parte trasera de la estructura, demostrando la predicción del comportamiento por líneas y subsecciones.	176
Figura 79. En la colección de imágenes podemos observar la interfaz que se utiliza, al igual que la base.	179
Figura 80. En la colección de imágenes podemos observar la prueba experimental con usuarios de varios pesos visualizando la operación de la base.	180
Figura 81. En la colección de imágenes podemos observar pruebas experimentales con usuarios.	181
Figura 82. En la colección de imágenes podemos observar las diferentes perspectivas del sistema de control en sus bases.	182
Figura 83. Interfaz de usuario descrito.	187
Figura 84. Diagrama de bloques de control para este sistema.	199
Figura 85. Plano de la base delantera de estructura propuesta.	203
Figura 86. Plano de guías cilíndricas donde se efectúa el desplazamiento en las tuberías soldadas de la base delantera.	204
Figura 87. Plano representativo de pernos y tornillos usados para ajustar ciertas partes de la estructura, siendo utilizados tipos de variaciones normalizadas y tornillos de diferentes medidas en la realidad.	205

Figura 88. Plano de guía de acción del actuador a las partes de los cilindros centrales. ...	206
Figura 89. Plano representativo de parte interna de un actuador, ya que generaba conflicto estructuras cilíndricas.....	207
Figura 90. Plano representativo de parte externa de un actuador, ya que generaba conflicto con estructuras cilíndricas.	208
Figura 91. Plano de tubería de sujeción.	209
Figura 92. Plano de tubería desplazable.....	210
Figura 93. Plano de la base trasera.....	211
Figura 94. Plano general de la estructura evitando cotas, siendo ilustrativa la representación.	212

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Tabla de caracterización del actuador A.	177
Tabla 2.	Perfil de caracterización del actuador B.	177
Tabla 3.	Perfil de usuario, recalcando varias condiciones físicas y morfológicas.	178
Tabla 4.	Cronograma de mantenimiento preventivo del simulador.	183
Tabla 5.	Límites de operación de seguridad	198
Tabla 6.	Cronograma de Mantenimiento	200

RESUMEN

El presente proyecto de investigación presenta la integración de un sistema mecatrónico diseñado para transformar la experiencia del ciclismo estático en una plataforma de entrenamiento dinámica. El enfoque principal no fue solo el movimiento, sino la creación de un entorno seguro y técnicamente coherente donde la electrónica y la mecánica trabajen en sincronía para responder a las exigencias de un usuario real.

La estructura, fabricada en acero PTR, fue proyectada para priorizar la estabilidad absoluta. Mediante análisis de elemento finito (FEA), se confirmó que el chasis gestiona esfuerzos. Este valor, intencionalmente conservador, asegura que la plataforma absorba las cargas dinámicas de un usuario de hasta 130 kg sin presentar fatiga material, permitiendo que la electrónica de control opere sobre una base mecánicamente predecible.

La lógica de operación reside en un microcontrolador **ESP32**, que coordina la potencia a través de puentes H **BTS7960**.

Al prescindir de sensores de parada físicos, el diseño integra una capa de **seguridad lógica** mediante límites virtuales. Esta solución de software, junto con una banda muerta de ± 0.7 cm, previene bloqueos mecánicos y protege los componentes internos de los actuadores ante posibles errores de rango, asegurando un funcionamiento suave mediante señales PWM a 5 kHz.

Se implementó un servidor web asíncrono que actúa como el puente entre la máquina y el usuario. Mediante el procesamiento de datos trigonométricos, el sistema traduce en tiempo real las lecturas de distancia en ángulos de inclinación y elevación ($\pm 30^\circ$), ofreciendo una monitorización constante del estado espacial del prototipo.

El resultado es un prototipo donde la robustez mecánica se encuentra con un control digital preciso. Más que buscar una comparativa de rendimiento, el proyecto valida que la integración de componentes estándar, bajo una lógica de programación sólida y un diseño estructural consciente, permite alcanzar los rangos de movilidad y seguridad necesarios para la simulación deportiva profesional.

Palabras clave: ESP32, PUENTE H, CICLISMO, ACTUADOR LINEAL, INTERFAZ GRÁFICA

ABSTRACT

This research project presents the integration of a mechatronic system designed to transform the stationary cycling experience into a dynamic training platform. The main focus was not only on movement, but also on creating a safe and technically coherent environment where electronics and mechanics work in sync to respond to the demands of a real user.

The structure, made of PTR steel, was designed to prioritize absolute stability. Finite element analysis (FEA) confirmed that the chassis can handle stress. This intentionally conservative value ensures that the platform can absorb the dynamic loads of a user weighing up to 130 kg without material fatigue, allowing the control electronics to operate on a mechanically predictable basis.

The operating logic resides in an ESP32 microcontroller, which coordinates power through BTS7960 H-bridges.

By dispensing with physical limit sensors, the design integrates a layer of logical safety through virtual limits. This software solution, together with a dead band of ± 0.7 cm, prevents mechanical blockages and protects the internal components of the actuators from possible range errors, ensuring smooth operation through 5 kHz PWM signals.

An asynchronous web server was implemented to act as a bridge between the machine and the user. By processing trigonometric data, the system translates distance readings into angles of inclination and elevation ($\pm 30^\circ$) in real time, providing constant monitoring of the prototype's spatial status.

The result is a prototype where mechanical robustness meets precise digital control. Rather than seeking a performance comparison, the project validates that the integration of standard components, under solid programming logic and conscious structural design, allows the ranges of mobility and safety necessary for professional sports simulation to be achieved.

Keywords: ESP32, H-BRIDGE, CYCLING, LINEAR ACTUATOR, GRAPHICAL INTERFACE

INTRODUCCIÓN

Frente al alarmante incremento global de la obesidad y las enfermedades cardiovasculares derivadas del sedentarismo, este trabajo analiza datos estadísticos e informes clínicos que subrayan la urgencia de promover la actividad física.

Como respuesta, se propone una solución mecatrónica basada en el desarrollo de un modelo avanzado para bicicletas estáticas, diseñado para emular condiciones de resistencia y entorno realistas que optimicen la experiencia del usuario y combatan los factores de riesgo internos y externos del ciclismo.

Por parte de un ejercicio práctico, pero seguro, las bicicletas estáticas marcan una mejora en las condiciones de vida, mejoras biomecánicas en su funcionamiento y su estudio, su uso en realidad virtual como medio recreativo ya visto en el mercado.

Esta investigación trata de dar una solución mecatrónica, juntando el ejercicio que produce una bicicleta estática y una condición realista del desplazamiento lateral y horizontal de un camino, combinando así condiciones aeróbicas y de esfuerzo para el ciclista.

El ciclismo estacionario ha dejado de ser una simple alternativa para los días de lluvia, convirtiéndose en una disciplina tecnológica de alta demanda impulsada por el auge de los ecosistemas de entrenamiento virtual. Sin embargo, a pesar de los avances en la resistencia electrónica de los rodillos, existe una brecha significativa en la experiencia física: la mayoría de los sistemas actuales son estáticos. Esta rigidez no solo limita la inmersión del usuario, sino que ignora la biomecánica natural del pedaleo, donde las variaciones de inclinación y los balanceos laterales son fundamentales para la activación muscular y el equilibrio dinámico.

El presente proyecto nace con el propósito de cerrar esa brecha, transitando desde una idea conceptual en software CAD hasta la creación de un prototipo mecatrónico funcional capaz de emular con precisión las pendientes y giros de una ruta real. A través de este documento, se detalla el desarrollo de un soporte dinámico que no solo resiste el esfuerzo físico del ciclista, sino que responde de manera inteligente a sus necesidades de entrenamiento.

Se presenta el diseño y validación de una estructura en acero PTR y perfiles circulares. Mediante el análisis de elementos finitos (FEA) presentado extensamente en el capítulo 5, capaz de soportar usuarios de hasta 130 kg sin comprometer la estabilidad ni la integridad de los materiales.

Se describe la integración del microcontrolador ESP32 y puentes H BTS7960 para la gestión de actuadores lineales. Esta sección destaca cómo se transformó el movimiento mecánico en un sistema controlado por software, implementando límites virtuales y una gestión eficiente de potencia para movimientos fluidos y seguros.

Se detalla el desarrollo de una interfaz web nativa que permite la telemetría en tiempo real. Mediante cálculos trigonométricos asíncronos, se ofrece al usuario un control absoluto y visual sobre su posicionamiento angular y pivotal.

Al final, este proyecto no solo busca entregar un dispositivo funcional, sino proponer una solución mecatrónica. Los resultados obtenidos validan que es posible construir herramientas de alto rendimiento que mejoren la experiencia deportiva mediante el uso estratégico de la tecnología mecatrónica actual.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los grandes problemas de practicar el ciclismo tiene que ver con los accidentes y decesos que, en la mayoría de las veces, es por falta de educación vial. La OMS y la ONU registraron que entre 2010 y 2021, se registró una disminución del 5 % en las fatalidades a nivel mundial por accidentes de tráfico, llegando a 1.19 millones de muertes en el último año examinado; sin embargo, durante este lapso, el informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) reveló un aumento del 20 % en los fallecimientos de ciclistas y un 5 % en los decesos de peatones. Las muertes anuales de ciclistas (71,000) suponen en todo caso solo un 6 % del total. [1]

El estudio señala que en los 11 años estudiados se registró una caída en las muertes en carretera en 108 países, que fueron de más del 50 % en 10 de ellos (por ejemplo: Rusia, Japón, Venezuela, Dinamarca o Noruega).

Por regiones, Europa es la que menos muertes en carretera sufre actualmente en relación al total (5 %), seguida de Oriente Medio (11 %), América (12 %), África (19 %) y Asia-Pacífico (25 %), mientras que el sudeste asiático y el subcontinente indio concentran un 28 % de los fallecimientos por accidentes de tráfico.

Nueve de cada 10 muertes ocurren en países en desarrollo, y en las economías de bajos ingresos el riesgo de morir en un accidente es tres veces mayor que en los países desarrollados, según el informe de la OMS.

El estudio advierte, ante el creciente número de víctimas entre ciclistas y peatones, que un 80 % de las carreteras en el mundo carecen de estándares de seguridad para los peatones y apenas un 0.2 % tienen carriles especiales para las bicicletas.

Apenas la cuarta parte de los países del planeta tienen políticas para promocionar el transporte público, el uso de bicicletas o de los trayectos a pie.

Dando a entender que el uso de bicicleta es un riesgo vial en países sin políticas avanzadas en el uso y promoción de vialidad alterna; parte del problema va en aumento, siendo solo un registro lo recabado por la OMS en su informe.

En México, [2] en 2020, fallecieron 13 mil 630 personas por siniestros viales; con ello, se calcula una tasa de 11 muertos por cada 100 mil habitantes, lo que representa una disminución de 18.9 % en comparación con 2015, cuando se registró una tasa de 13.2. Como podemos observar en la

Figura 1, si trazamos una línea de 2015 a 2020 en la gráfica de accidentes, heridos y defunciones, podemos observar una tendencia a la baja en el número de accidentes, con una reducción de 17.7 %, el número de heridos, con 19.8 %, y defunciones, con 11.2 %.

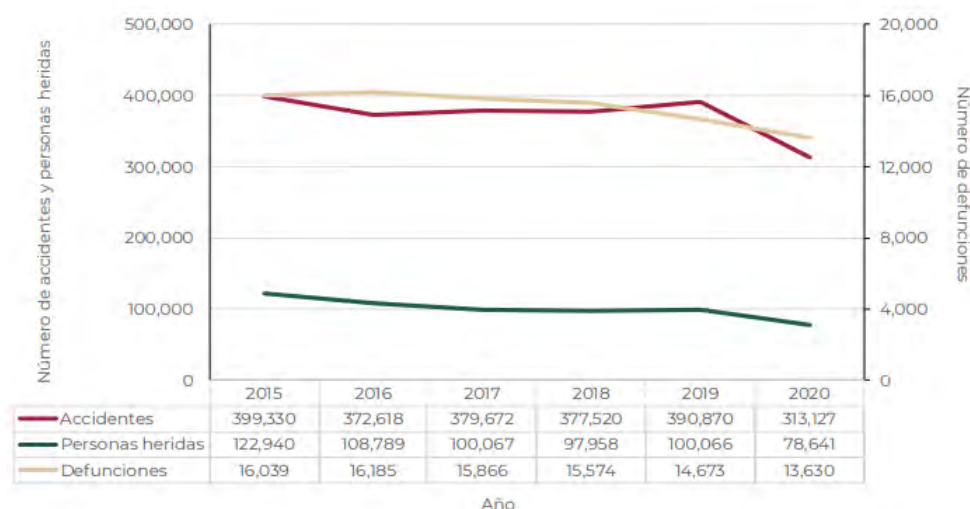


Figura 1: Número de accidentes, personas heridas y defunciones, 2015-2020. [3]

Defunciones por tipo de persona usuaria del total de defunciones por siniestros viales en México en 2020 (13,630) [4]: las y los peatones son quienes concentran el mayor porcentaje de fallecimientos: 2,536 atropellamientos fatales (18.6 %); le siguen las y los ocupantes de vehículo con 1,981 fallecimientos (14.5 %), las y los motociclistas con 1,982 (14.5 %), las y los ciclistas con 111 (0.8 %) y otras con 27 (0.2 %). Se desconoce el tipo de persona usuaria en el 51.3 % de los decesos (6,993 personas). En comparación con 2015, el número de defunciones de peatones disminuyó un 44.5 %, y el de ocupantes de vehículos y ciclistas, un 36.6 %. Por el contrario, en el caso de motociclistas, el número de decesos aumentó un 28.6 %. Considerando los datos de 2020 en la Figura 2 correspondientes a motociclistas y a las personas más vulnerables de la vía, es decir, peatones y ciclistas, el porcentaje de las defunciones asciende al 34 %.

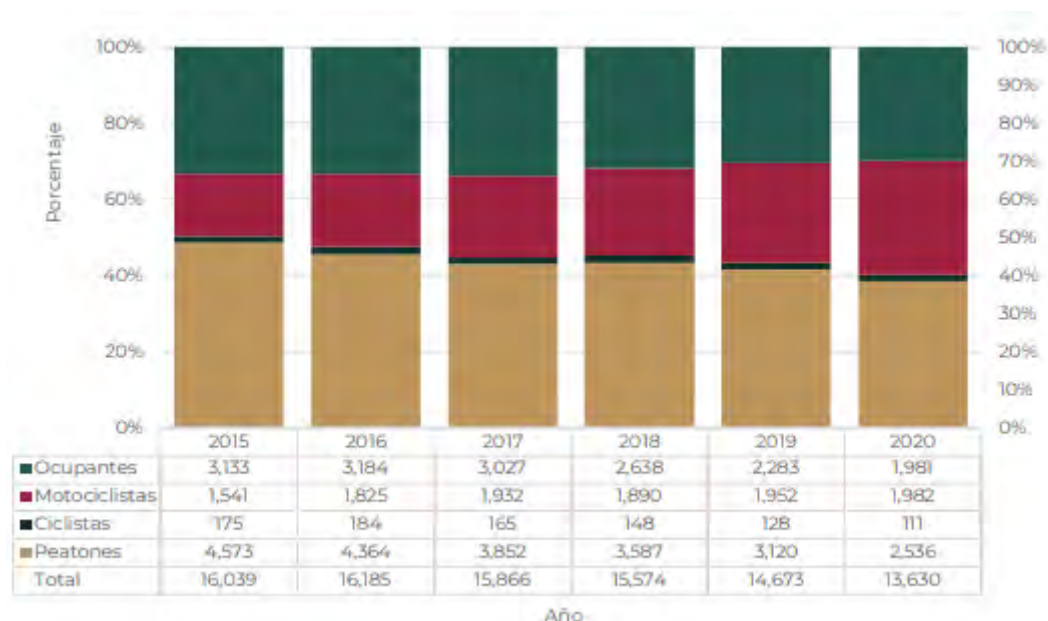


Figura 2: Distribución de las defunciones por tipo de persona usuaria entre los años 2015 y 2020. [5]

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), aproximadamente un 60 % de la población a nivel mundial no realiza suficiente actividad física, lo que se denomina sedentarismo. [6]

Lo anterior resulta preocupante debido a que el sedentarismo se considera uno de los principales factores de riesgo de mortalidad debido a su asociación con enfermedades crónicas no transmisibles tales como diabetes, hipertensión, osteoporosis o cáncer.

El sedentarismo ocurre por diversos factores como la falta de áreas verdes (espacio recreativo), poco tiempo libre, tráfico vehicular y contaminación, además de cambios tecnológicos como el uso de videojuegos, mayor tiempo frente al televisor o a la computadora. [7]

Datos de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2012 indican que en México alrededor del 59 % de los niños y adolescentes de 10 a 18 años no realizan actividad física. [8]

La recomendación de la OMS para realizar actividad física es de 60 minutos diarios de actividad moderada o intensa para niños y adolescentes, mientras que para los mayores de 18 años es de 150 minutos semanales de actividad moderada.

La actividad física moderada representa un esfuerzo que acelera de forma perceptible el ritmo cardiaco e incluye actividades como bailar, tareas domésticas y caminar a paso rápido; la

actividad física intensa requiere una gran cantidad de esfuerzo y provoca respiración rápida y aumento sustancial de la frecuencia cardíaca, como en el caso de practicar fútbol, basquetbol, voleibol o aeróbicos.

Es importante señalar que la actividad física tiene diferentes beneficios: mejora la salud ósea, disminuye el riesgo de enfermedades crónicas transmisibles, ayuda en el control del peso corporal, mejora el estado muscular y cardiorrespiratorio.

En México, la falta de actividad física desencadena enfermedades que provocan el 77 % de los fallecimientos. [9]

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), este problema de salud pública es responsable de 41 millones de muertes anuales, 97 por ciento del total registrado en el orbe, y es la principal causa de fallecimientos por Enfermedades Crónicas No Transmisibles (ECNT), por lo que la dependencia estableció acciones preventivas vía plataformas digitales para enfrentar este padecimiento.

En México, las ECNT son el principal factor de riesgo desencadenante de la obesidad y constituyen el 77 por ciento de las causas de muerte. Entre ellas están la diabetes, hipertensión, enfermedades cardiovasculares y algunos tipos de cáncer. [10]

La obesidad es el principal problema de salud en el país, ya que provoca muertes prematuras y es el principal factor de riesgo para desarrollar enfermedades que son las causas de muerte y pérdida de años de vida saludable y productiva, señala la subsecretaría de Prevención y Promoción de la Salud.

La obesidad es un problema que está prácticamente en todos lados, incluso en comunidades rurales, donde ya se observa el ascenso en la prevalencia de esta enfermedad, debido a que existen ambientes parecidos a los urbanos, contaminados con publicidad y fácil acceso a productos ultraprocesados, y con poco consumo de alimentos naturales; estos entornos se denominan “ambientes obeso-génicos”.

En México, 36.9 por ciento de personas adultas vive con obesidad y en 2030 podría llegar a 45 por ciento.

El Centro de Investigación en Salud Poblacional del INSP hace notar que tener obesidad aumenta el riesgo de complicaciones graves y fallecimiento por enfermedades infecciosas como COVID-

19.

A medida que envejecemos, nuestras habilidades motoras finas y gruesas comienzan a deteriorarse. Esto puede conducir a una disminución de nuestra calidad de vida, ya que nos resulta más difícil efectuar las actividades cotidianas. [11]

Por ejemplo, a medida que las personas envejecen, sus habilidades motoras finas disminuyen. Mientras que sus habilidades motoras gruesas permanecen igual o incluso aumentan ligeramente.

Entonces, a medida que envejecemos, nuestro cerebro comienza a perder su plasticidad, lo que significa que su estructura se vuelve menos flexible y más rígida.

Por tal razón, los adultos mayores tienden a tener más dificultades para realizar las tareas diarias, como cocinar o lavar la ropa. Desde luego, debido a la disminución de las habilidades en la motricidad fina y gruesa en personas mayores, pero aún pueden hacerlo si se esfuerzan lo suficiente.

Los adultos mayores también tienden a experimentar dificultades para realizar tareas complejas como conducir o practicar deportes debido a la disminución de las habilidades motoras gruesas. Las personas mayores tienen más probabilidades de experimentar debilidad muscular y falta de equilibrio, problemas relacionados con la edad. Pero esto no siempre es cierto, ya que a veces los adultos mayores pueden mejorar sus habilidades motoras gruesas a través del ejercicio y la práctica. Por supuesto, el ejercicio regular beneficia tanto la función física como la cognitiva en los adultos mayores. Además, les ayuda a mantener un peso saludable y a reducir el riesgo de desarrollar enfermedades crónicas.

JUSTIFICACIÓN

El uso de bicicletas estáticas podemos decir que, con la vida sedentaria que solemos llevar, los profesionales de la salud nos recomienden hacer ejercicio físico en nuestro tiempo libre si nuestra profesión nos obliga a estar quietos mucho rato y en posiciones forzadas. Ahora bien, el formato deportivo va a depender mucho de nuestras condiciones físicas, nuestra edad y nuestra disponibilidad. No es lo mismo ser una persona joven con problemas de sobrepeso que otra mayor con alguna lesión de espalda o rodilla. [12]

Le podemos responder que la equivalencia entre andar una hora rápido o bien hacer bicicleta estática es difícil de calibrar, aunque dependerá sobre todo de las resistencias que se marque en el programador de circuitos del aparato. A mayor resistencia, más esfuerzo y por tanto más gasto calórico. Pero, no todo en la salud es gastar calorías y en general hay unas ventajas de andar que la bici estática no contempla, aunque a su vez presenta unos valores añadidos que son interesantes y que le pueden hacer un sustituto válido e incluso mejor del paseo diario.

A favor de las bicicletas estáticas.

Su amplitud de opciones: estas máquinas suelen tener distintos tipos de circuitos o programas pensados para las diferentes necesidades de cada persona. Desde los y las que desean quemar calorías con programas aeróbicos a los que precisan ganar musculatura en piernas y glúteos con altas resistencias.

Su independencia del clima: al estar encerrado y a cubierto, la bici estática permite hacer ejercicio sin necesidad de pasar frío o calor, algo que en climas externos puede ser fundamental si las condiciones exteriores son impracticables. También nos protege de la lluvia y por supuesto de las emisiones contaminantes en ciudad.

Respeto más las articulaciones: al no haber impacto con el suelo las articulaciones sufren mucho menos en la rotación, a no ser que forcemos en exceso las resistencias, con lo que podríamos poner en riesgo las rodillas.

Menor riesgo de lesiones: es un deporte basado en una rotación circular, sin impactos, en el que se puede modular el esfuerzo y en el que no nos encontramos con firmes irregulares. Si hablamos de personas de una cierta edad que no emplean programas extremos, la bicicleta estática es una garantía contra las lesiones.

Mayor tonificación muscular: A no ser que andemos en campo abierto y con pendientes, el paseo diario es trabajo aeróbico, pero no de refuerzo muscular modulable, como sí nos permite fijar la bicicleta estática.

Todos los músculos trabajan cuando te ejercitas en una bicicleta fija. No obstante, se puede señalar que el tren inferior es el más implicado en el pedaleo: cuádriceps, glúteos, isquiotibiales y gemelos son los que activan directamente con cada pedaleo. La presión sobre el pedal en dirección al piso y la resistencia que se genera son lo que hace que los músculos de las piernas trabajen intensamente desde que subes a la bici. [13]

Afortunadamente, hay maneras de mejorar estas habilidades en personas mayores. En esta guía, exploraremos las diferentes técnicas que se pueden utilizar para ayudar a mejorar las habilidades y motricidad fina y gruesa en personas mayores

Las habilidades motoras finas son la capacidad de realizar tareas con movimientos pequeños y delicados de la mano, la muñeca y los dedos. Por otra parte, las habilidades motoras gruesas son la capacidad de mover objetos grandes usando movimientos de todo el cuerpo. [11]

Ciertamente, el ejercicio regular puede ayudar a los adultos mayores a mejorar la función motora, que es uno de los aspectos más importantes de su salud. También, les ayuda a mantener un peso saludable y reducir el riesgo de desarrollar enfermedades crónicas. Hay algunas cosas que puede hacer para ayudar a las personas mayores a desarrollar sus habilidades motoras. Éstos incluyen:

1. Animarlos a realizar actividad física especialmente actividades de bajo impacto como caminar y nadar.
2. Proporcionar oportunidades de socialización a través de actividades grupales o trabajo voluntario.
3. Ofrecer oportunidades para la autoexpresión a través de manualidades u otros proyectos creativos.
4. Ofrecer oportunidades para el ejercicio físico a través de juegos u otras actividades que requieran la coordinación de los movimientos del cuerpo.

Por todo lo anterior, esta investigación está enfocada a desarrollar un sistema que emule una bicicleta estática y que simule las fuerzas externas en una estructura (en una bicicleta común)

con un sistema electromecánico, que permita al usuario realizar recorridos de entrenamientos, proporcionando así al usuario un ejercicio aeróbico y ejercicio de refuerzo muscular en el tren inferior con una quema de calorías y aumento de resistencia muscular. Modificando así la vida sedentaria y la obesidad, además de que una persona de la tercera edad podría rehabilitarse y ejercitarse para una mayor movilidad utilizando una bicicleta estática

LIMITES Y ALCANCES

0.1 Alcances

El proyecto consiste en :

El desarrollo de un prototipo de base fija construido con materiales de alta maquinabilidad que, mediante una estructura optimizada por FEA para soportar hasta 150 kg, replica grados de libertad de inclinación y elevación sincronizados con un entorno virtual para ofrecer una experiencia inmersiva versátil y segura en bicicletas estandarizadas.

0.2 Limites

1. El prototipo y sus simulaciones están limitados a una carga máxima de 150 kg. Los resultados de seguridad y factor de servicio no son válidos para pesos superiores a este límite, de acuerdo con los análisis de elemento finito (FEA) realizados.
2. El análisis estructural se limita al uso de acero al carbono comercial y perfiles PTR. No se contemplan comportamientos de fatiga o corrosión a largo plazo ni el uso de materiales compuestos o aleaciones ligeras debido a la restricción de bajo costo establecida.
3. Los resultados obtenidos en *Autodesk Inventor Nastran* son aproximaciones numéricas basadas en un modelo estático lineal. No se consideran fenómenos no lineales complejos ni vibraciones mecánicas avanzadas que podrían ocurrir en condiciones de uso real intensivo.
4. Las pruebas de operación se restringen a superficies planas, niveladas y ambientes interiores. No se evalúa el desempeño del sistema ante irregularidades del terreno o condiciones climáticas adversas (humedad, lluvia o temperaturas extremas).
5. El diseño de la base está optimizado para modelos de bicicleta estándar. El uso de geometrías especiales, como bicicletas de carga (*cargo bikes*) o de dimensiones fuera de los rangos comerciales promedio, podría requerir ajustes mecánicos no contemplados.
6. La investigación se centra en la estabilidad mecánica y la distribución de cargas. La respuesta de los actuadores se asume ideal según las especificaciones del fabricante, sin profundizar en el diseño de algoritmos de control robusto o compensación de errores por histéresis.

7. El modelo construido es un prototipo funcional de etapa inicial (*Alpha*) destinado a pruebas técnicas. Por lo tanto, no se incluyen acabados estéticos industriales, ergonomía avanzada de interfaz de usuario ni certificaciones de seguridad bajo normas internacionales específicas.
8. Debido a restricciones de tiempo y logística, las pruebas con carga externa (sujetos de prueba) se limitan a un grupo reducido de usuarios, por lo que los datos recopilados tienen un carácter descriptivo y no estadísticamente representativo de toda la población de ciclistas.

HIPÓTESIS

La implementación de una base cinética, caracterizada por un eje pivotante y la capacidad de accionarse mediante una interfaz interactiva, permite replicar de forma inmersiva el comportamiento dinámico de una bicicleta, simulando tanto la pendiente ascendente como las inclinaciones laterales del ciclista.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un modelo mecatrónico de base cinética que permita inclinaciones angulares para emular giros. Además, el modelo deberá emular pendientes variando su desnivel. Todo esto se evaluará mediante simulaciones CAD y la construcción de un prototipo inicial.

0.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dominar el lenguaje Python y conceptos de electrónica avanzada para el control de servomotores con Arduino.
- Desarrollar la estructura de la bicicleta en software CAD (Autodesk Inventor) optimizando su geometría y cinemática.
- Validar la integridad del diseño mediante análisis de elemento finito (FEA) bajo cargas de 150 kg.
- Generar planos de fabricación 2D con cotas, tolerancias mecánicas y especificaciones de soldadura.
- Fabricar la estructura principal en perfiles PTR e integrar carcasas protectoras mediante impresión 3D.
- Sustituir guías cuadradas por tubería circular y aplicar lubricación industrial para eliminar la fricción.
- Implementar un sistema basado en ESP32 con etapas de potencia para el manejo de actuadores con una interfaz gráfica.
- Configurar un Web Server para el monitoreo en tiempo real del consumo eléctrico y estado de los motores.
- Instalar interruptores de límite o sensores de proximidad para restringir el movimiento a rangos seguros.
- Evaluar el prototipo final mediante pruebas de carga real, precisión angular y estabilidad de conexión WiFi.

CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE Y ESTADO DEL CAMPO

De acuerdo al estado del arte y al estado del campo, se encontró la referencia a una bicicleta estática de rehabilitación para pacientes con trauma raquímedular (TRM) del Centro Medical Group [14] muestra un diseño de bicicleta como apoyo médico para pacientes específicos con lesiones de rodilla. Otro autor presenta la comparación de diferentes métodos de ajuste de la bicicleta en ciclistas entrenados: Influencia de Factores Biomecánicos y Energéticos [15] el cual nos habla sobre los factores que pueden afectar a un individuo, como la distancia de la silla de la bicicleta, la altura del sillín y la geometría de la bicicleta; otro caso similar podemos hablar de [16]: Simulación y análisis de la Dinámica de una bicicleta que conduce al estudio teórico y simulación de una bicicleta en un entorno virtual, donde demuestra un análisis virtual de la dinámica y mecánica de la bicicleta estática; con las investigaciones anteriores como las más destacadas se desprende esta investigación: Desarrollo de sistema de inmersión 3D en realidad virtual para el entrenamiento de ciclismo en interiores, [17] que junta el uso de una bicicleta estática con el uso de una aplicación (Unity) para simular el entorno virtual y aprovechar el ejercicio como medio recreativo y de actividad, sea para personas mayores.

Bajo esta misma premisa de integración tecnológica, [18] expande la frontera de los entornos virtuales al proponer un sistema de evaluación de movilidad mediante una bicicleta horizontal asistida conectada a "juegos serios", permitiendo que el ejercicio no sea solo recreativo, sino un método de diagnóstico preciso para pacientes con amputaciones. No obstante, la efectividad de estas herramientas digitales depende de una base física robusta; por ello, resulta fundamental el aporte de [19], quien desde la ingeniería mecánica asegura la viabilidad del dispositivo mediante un análisis de fatiga por elementos finitos, garantizando que el cuadro de la bicicleta soporte las exigencias del uso terapéutico prolongado.

Esta convergencia entre lo mecánico y lo digital se complementa con la necesidad de una ergonomía de precisión. Mientras que [20] establece los estándares de la biomecánica aplicada para optimizar la postura y prevenir lesiones por sobreuso —principios críticos tanto en el alto rendimiento como en la rehabilitación—, el impacto clínico final de estas tecnologías se ve validado por la investigación de [21]. Este último estudio cierra el ciclo del estado del arte demostrando cómo el uso sistemático de la bicicleta estática tiene una incidencia directa en la reducción del dolor y la recuperación funcional en pacientes con artrosis de rodilla, consolidando

a la bicicleta como un eje central en la fisioterapia moderna.

Por otro lado, en el estado del campo se encontraron 4 dispositivos funcionales: 2 patentes que utilizan rodillos y funcionan como bicicletas estáticas y 2 que simulan, por medio de aplicaciones, ascensos y descensos pequeños de no más de 20 grados de inclinación que necesitan rodillos de bicicletas o soportes para su funcionamiento.

Patente de bicicleta estática en el mercado con emergente aceptación encontrada en varias páginas para entrenamiento indoor de ciclismo adaptada a señales de simuladores BKOOL y otros softwares parecidos. [22]

Patente de base de bicicleta para entrenamiento en interiores con soporte de movimiento en la parte delantera, el cual fue descontinuado; se encuentran variantes en países como en AMAZON Venezuela. [23]

Producto referido en [24], soporte para bicicleta existente en AMAZON donde se describe que puede inclinar cargas menores de carga de 120 kg con pendientes de subida y bajada de 10 grados.

Producto referido [25], simulador de pendientes en el mercado que carga 120 kg y tiene conectividad a varios simuladores de ciclismo virtual; requiere un rodillo de bicicleta para completar su funcionamiento.

Producto referido [26], base para bicicleta en el mercado que consigue un pequeño desplazamiento e inclinación leve; requiere un rodillo de bicicleta y un sistema amortiguador como pelotas inflables para completar su función.

Con lo anterior se propone esta investigación, que pretende mejorar los diseños anteriores, incorporando otras funciones, como permitir inclinaciones angulares para emular giros en este nuevo modelo de bicicleta estática, además de emular pendientes variando su desnivel.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.0.1 Cinética y dinámica del pedaleo.

Para el diseño de un simulador de ciclismo, es imperativo distinguir entre la cinemática (estudio del movimiento) y la **cinética**, la cual se ocupa de las fuerzas que producen dicho movimiento [27]. En el contexto de un rodillo inteligente, la cinética se centra en el análisis de los momentos de torsión (torque) aplicados al eje trasero y las fuerzas de reacción en el soporte delantero durante los cambios de inclinación. La capacidad del sistema para replicar la resistencia al avance depende de modelar correctamente la inercia rotacional y las fuerzas disipativas [28].

2.0.2 Telemetría y monitorización de datos en tiempo real.

La **telemetría** se define como la tecnología que permite la medición remota de magnitudes físicas y el envío de dicha información a un operador o sistema de control [29]. En este proyecto, la telemetría abarca la captura de datos provenientes del sensor ultrasónico (posición del actuador) y su transmisión vía protocolos de red hacia la interfaz de usuario. Según [30], la integración de telemetría sobre redes inalámbricas permite un diagnóstico constante del estado del hardware sin interrumpir la experiencia del usuario.

2.0.3 Interfaz hombre-máquina (HMI) y experiencia de usuario.

El éxito de un sistema mecatrónico interactivo reside en su **HMI (Human-Machine Interface)**. Una HMI eficiente debe presentar los datos de telemetría de forma intuitiva, permitiendo al usuario modificar parámetros del sistema (como la resistencia o inclinación) con una latencia mínima [31]. En este sistema, el servidor web asíncrono actúa como el puente HMI, eliminando la necesidad de controles físicos complejos.

2.0.4 Sinergia mecatrónica y latencia de control.

Como se mencionó anteriormente, la **sinergia** es el pilar de la mecatrónica. En el simulador, esto se manifiesta en la sincronización entre el software de entrenamiento (como Zwift), el procesamiento en el ESP32 y la respuesta mecánica de los actuadores. Un factor crítico en esta sinergia es la **latencia**: el retraso temporal entre la generación de una instrucción y la ejecución del movimiento físico. Reducir la latencia mediante el uso de servidores asíncronos y

controladores de alta potencia es vital para mantener el realismo" de la simulación [32].

2.1 Concepto de mecatrónica.

La mecatrónica se define como la integración sinérgica de la ingeniería mecánica, la electrónica, el control computacional y la ingeniería de sistemas en el diseño y manufactura de productos y procesos industriales [33]. A diferencia de un diseño tradicional donde los componentes se añaden de forma secuencial, la mecatrónica propone un enfoque interdisciplinario desde las etapas iniciales del diseño.

De acuerdo con [34], un sistema mecatrónico se caracteriza por su capacidad de procesar información de su entorno mediante sensores, tomar decisiones a través de unidades de control y ejecutar acciones físicas mediante actuadores. Esta evolución ha permitido pasar de sistemas puramente mecánicos a sistemas inteligentes y autónomos.

- **Sinergia:** La interacción coordinada de las disciplinas para lograr un rendimiento superior al de la suma de sus partes.
- **Integración:** La fusión de hardware (sensores/actuadores) con software (algoritmos de control).

2.2 Diseño y validación asistidos por computadora para la estructura mecánica.

El desarrollo de productos de ingeniería modernos depende de la simbiosis entre el **Diseño Asistido por Computadora (CAD)** y la **Fabricación Asistida por Computadora (CAM)**. Mientras que el CAD facilita la creación y optimización de modelos geométricos complejos en un entorno virtual, el CAM traduce dicha geometría en instrucciones precisas para la manufactura [35]. Esta integración digital no solo minimiza el margen de error humano, sino que permite una transición fluida desde la idea conceptual hasta el prototipo físico, optimizando los tiempos de desarrollo [36].

2.2.1 Panorama de herramientas CAD y criterios de selección.

La elección de una herramienta CAD es determinante para el éxito del proyecto. Existen soluciones de alta gama como Siemens NX, enfocadas en la gestión integral del ciclo de vida

del producto (PLM), y herramientas como Autodesk Inventor, que destacan por su robustez en el diseño de maquinaria y sistemas mecánicos complejos [37], [38]. Para este proyecto, se priorizaron los siguientes criterios:

- **Modelado paramétrico:** Permite efectuar cambios dimensionales en la estructura tubular que se reflejan automáticamente en todo el ensamblaje.
- **Simulación integrada:** La capacidad de efectuar pruebas de resistencia sin salir del entorno de diseño.
- **Documentación técnica:** Generación automatizada de planos y listas de materiales (BOM) para fabricación.

2.2.2 Justificación de la selección de AUTODESK INVENTOR como plataforma de diseño.

Se optó por AUTODESK INVENTOR debido a su potente motor de modelado y, fundamentalmente, por la integración del motor de análisis **NASTRAN** [38]. Esta combinación permitió un flujo de trabajo iterativo: diseñar, simular bajo carga y rediseñar en cuestión de minutos. La posibilidad de usar su biblioteca de componentes normalizados facilitó la selección de elementos de sujeción, reduciendo el tiempo de modelado de partes genéricas.

2.2.3 Concepción estructural y materiales.

El sistema se concibe como una estación integral de entrenamiento indoor dividida en dos módulos funcionales: 1. **Soporte delantero (simulador de pendiente):** Un mecanismo activo que ajusta la inclinación de la bicicleta para replicar gradientes reales de ascenso y descenso [24]. 2. **Soporte trasero (rodillo):** Una base estática que eleva el eje trasero, permitiendo el giro libre de la rueda y proporcionando estabilidad durante esfuerzos de alta intensidad [39].

Para la construcción, se seleccionaron **Perfiles Tubulares Rectangulares (PTR)** de acero al carbono. Este material es el estándar en aplicaciones estructurales de este tipo por su alta rigidez (Módulo de Elasticidad de 200 GPa) y su excelente relación entre peso y resistencia, permitiendo que la estructura soporte el peso del usuario y las fuerzas dinámicas del pedaleo sin deformaciones permanentes [27].

2.2.4 Validación estructural mediante análisis por elemento finito. (FEA)

Para garantizar la seguridad del usuario, se empleó el **Análisis por Elemento Finito (FEA)**, un método que subdivide la estructura en una "malla" de elementos pequeños para predecir su comportamiento físico [40], [41].

En este proyecto se aplicó un **Análisis Estático Lineal (SOL 101)** en NASTRAN para verificar que los esfuerzos generados no superaran el límite elástico del acero. Las métricas clave evaluadas incluyeron:

- **Esfuerzo de Von Mises (σ_{vm}):** Utilizado para comparar el estrés multiaxial contra el límite de fluencia del material.
- **Factor de seguridad (FoS):** Garantizando que el diseño opere siempre dentro de un margen de seguridad cómodo ($FoS > 1$).

2.3 Sistema de control y actuación electromecánica.

2.3.1 Principio de funcionamiento de la unidad de resistencia.

La resistencia se genera mediante un freno de **corrientes de Foucault**. Al girar un disco conductor cerca de un campo magnético, se inducen corrientes eléctricas que generan un campo opuesto (ley de Lenz), creando una fuerza de frenado sin fricción mecánica [28]. Este sistema es ideal por ser silencioso y permitir un ajuste dinámico de la dureza del pedaleo mediante el control de la distancia entre los imanes y el disco [42].

2.3.2 Sistema de actuación y modulación.

Para automatizar la inclinación y la resistencia, se requiere un movimiento lineal preciso.

2.3.2.1 Análisis y justificación del actuador seleccionado.

Se descartaron sistemas hidráulicos y neumáticos por su complejidad y necesidad de mantenimiento [43], [44].

En su lugar, se seleccionó un **actuador lineal eléctrico** Figura 3 de 30 cm de carrera. Este dispositivo integra un motor DC y una caja reductora que proporciona el torque necesario para

elevar el peso del conjunto bicicleta-ciclista, operando a un voltaje de 24 V y consumiendo hasta 2 A bajo carga máxima.



Figura 3: Imagen representativa de los actuadores usados para este proyecto.

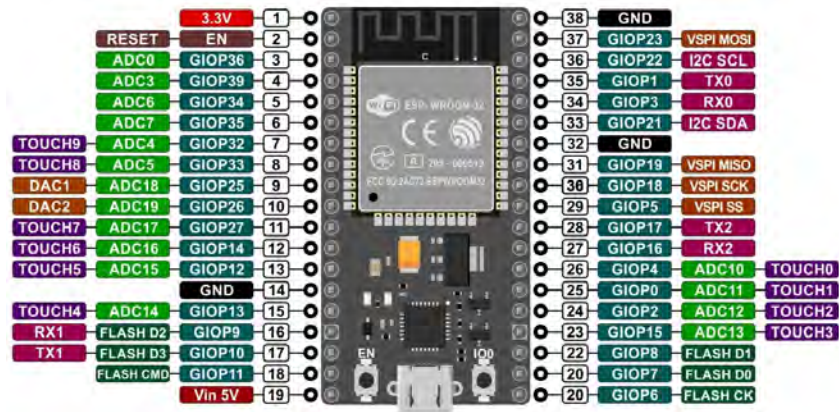
2.3.3 Arquitectura del sistema de control electrónico.

2.3.3.1 Unidad central de procesamiento: ESP32

El cerebro del sistema es el microcontrolador **ESP32**, elegido por su arquitectura de doble núcleo y su conectividad dual Wi-Fi/Bluetooth Low Energy (BLE), permitiendo la interacción con aplicaciones como Zwift [29], [30].

2.3.4 El microcontrolador ESP32.

El ESP32 [Figura 4](#) es un sistema en chip (SoC) de alto rendimiento. Su arquitectura de doble núcleo permite gestionar tareas de control y conectividad de forma independiente, lo que resulta ideal para la implementación de nodos en el Internet de las Cosas (IoT) [29].



2.3.6.1 Controladores de potencia: etapa experimental y selección final.

Durante las fases iniciales de desarrollo, se experimentó con el puente H **L298N** [Figura 5](#) estándar, el cual permite gestionar dirección y velocidad mediante señales PWM para corrientes de hasta 2 A [\[46\]](#).



Figura 5: Imagen representativa del puente H L298 N de 2A

Debido a que algunos componentes del simulador operan bajo cargas mecánicas significativas, se evaluó un **Puente H Dual de 7A** [Figura 6](#). A diferencia del L298N convencional, que utiliza transistores de unión bipolar (BJT) con altas caídas de tensión, la versión de 7A emplea tecnología **MOSFET**, lo que reduce la resistencia en conducción ($R_{DS(on)}$) y permite manejar corrientes más elevadas con una generación de calor mínima, garantizando la estabilidad térmica del sistema durante el uso prolongado.

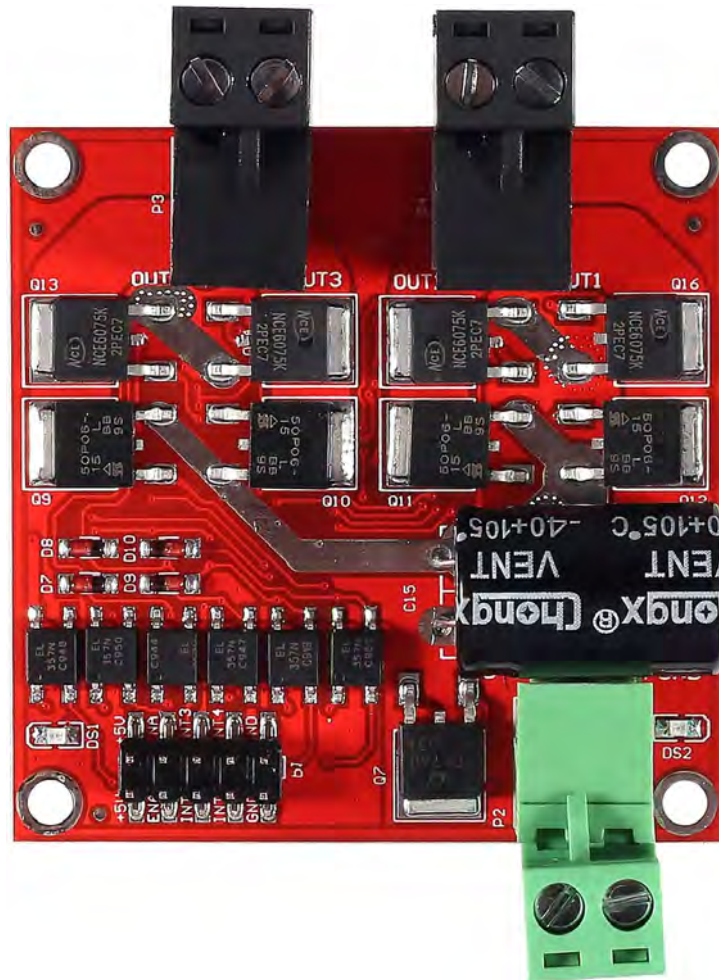


Figura 6: Imagen representativa del puente h l298n 7A.

Sin embargo, debido a las altas demandas de corriente del actuador bajo carga real, se seleccionó finalmente el puente H **BTS7960 43A** [Figura 7](#). Este controlador de alta potencia utiliza MOSFETs que soportan hasta **43 A** con caída de tensión mínima e integra protección contra sobrecorriente y, además, un aislamiento mediante optoacopladores que protege la lógica del microcontrolador ESP32 de los ruidos eléctricos generados por el motor de corriente continua del actuador, garantizando la integridad del ESP32 [\[47\]](#).

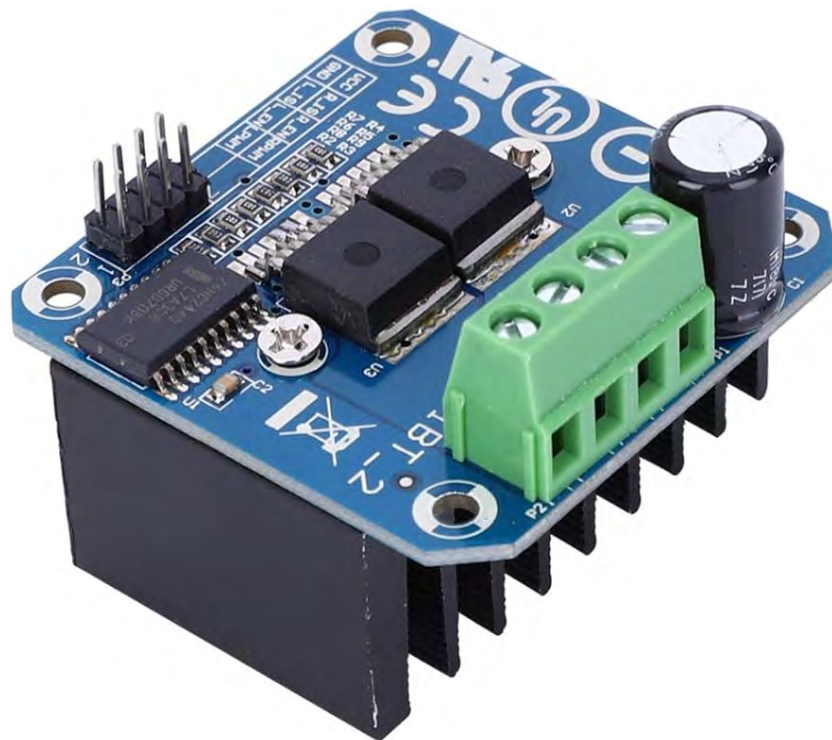


Figura 7: Imagen representativa del puente H BTS 7960 43A usado en este proyecto.

2.3.6.2 Fuente de alimentación de 24 V 7 A

El sistema requiere una fuente de energía capaz de suministrar picos de corriente durante el movimiento de los actuadores bajo carga pesada. Se seleccionó una fuente conmutada de **24 V a 7 A** [Figura 8](#), lo que proporciona una potencia de 168 W, suficiente para alimentar los motores simultáneamente con un margen de seguridad para evitar caídas de tensión que puedan reiniciar el microcontrolador [\[48\]](#).



Figura 8: Imagen representativa de la fuente conmutada de 24 V 7 A usada en este proyecto.

2.3.6.3 Gestión de energía y regulación.

El sistema se alimenta de una fuente conmutada de **24V 7A** (168W) [48]. Para los niveles lógicos, se utilizan reguladores de tipo *Buck*:

- **LM2596:** Regulador ajustable para periféricos adicionales, con eficiencia de hasta el 92 % y capacidad de 3A [49].
- **LM2576HV:** Versión de alto voltaje para reducir los 24 V de forma segura hacia el microcontrolador, minimizando el calor [50].

En un principio, se implementó el regulador de voltaje Step-Down **LM2596** Figura 9. Este dispositivo es un convertidor DC-DC de tipo reductor (*Buck*) que opera a una frecuencia de conmutación de 150 kHz, lo que permite el uso de componentes de filtrado más pequeños en comparación con reguladores de baja frecuencia [49].



Figura 9: Imagen representativa del regulador de voltaje step-down LM2596.

Se emplea para proporcionar una línea de alimentación estabilizada y ajustable para periféricos adicionales. Su eficiencia, que puede alcanzar hasta el 92 %, es crítica para evitar el sobrecalentamiento dentro del gabinete de control, siendo capaz de suministrar una corriente de carga de hasta **3A** con una excelente regulación de línea y carga [51].

Al final se optó por usar un regulador de voltaje LM2576HV [Figura 10](#). Dado que el ESP32 y los sensores operan a niveles lógicos de 3.3V o 5V, es imperativo reducir los 24V de la fuente principal de manera eficiente. Se emplea el regulador **LM2576HV**, un convertidor reductor (step-down) tipo conmutado. A diferencia de los reguladores lineales, este minimiza el desperdicio de energía en forma de calor, siendo la versión "HV"(High Voltage) capaz de manejar voltajes de entrada de hasta 60 V, asegurando la integridad del circuito ante cualquier fluctuación [50].



Figura 10: Imagen representativa del regulador de voltaje LM2576HV usado para este proyecto.

2.3.6.4 Interruptores de límite y monitoreo experimental de corriente.

En un principio, se implementaron interruptores de límite [Figura 11](#), que son dispositivos electromecánicos diseñados para detectar la presencia o ausencia de un objeto mediante el contacto físico. En este proyecto, se utilizan para establecer los límites operativos del actuador lineal, siendo un mecanismo de seguridad crítico que interrumpe la alimentación del motor o envía una señal de parada al microcontrolador al alcanzar los extremos de la carrera [52]. Su implementación previene daños estructurales por sobreextensión o compresión excesiva.



Figura 11: Imagen representativa de limit swich.

Adicionalmente, se experimentó con el sensor de efecto Hall ACS712 [Figura 12](#) (variante de 5A) este sensor funciona haciendo pasar la corriente a medir por una ruta de conducción interna de cobre que genera un campo magnético proporcional. El circuito integrado convierte este campo en un voltaje analógico que el ESP32 interpreta para determinar el consumo en tiempo real [53]. Esta medición es vital para implementar funciones de protección contra sobrecorriente y para estimar el torque aplicado por los motores de resistencia.



Figura 12: Imagen representativa del sensor ACS712 utilizado para las pruebas experimentales de corriente.

2.3.7 Dispositivos de seguridad y monitoreo.

En un cambio general de monitoreo, se descartaron los interruptores de límite y los sensores de corriente. Para la medición precisa de la posición y la detección de proximidad en el sistema, se integra el sensor ultrasónico **HC-SR04**.

El sensor ultrasónico HC-SR04 [Figura 13](#) consta de un transductor emisor y uno receptor. El proceso de medición se inicia mediante un pulso de disparo (*trigger*) de $10\mu s$, tras el cual el dispositivo emite una ráfaga ultrasónica. El pin de respuesta (*Echo*) genera un pulso cuyo ancho temporal es proporcional a la distancia recorrida por la onda, permitiendo calcular la separación mediante la constante de la velocidad del sonido ($\approx 343m/s$) [\[54\]](#). Este dispositivo basa su funcionamiento en la emisión de ráfagas de ondas sonoras de alta frecuencia (40 kHz; este sensor es fundamental) para monitorear el desplazamiento del actuador en tiempo real y el cálculo del tiempo de vuelo transcurrido hasta recibir el eco tras colisionar con un objeto [\[55\]](#), ofreciendo un rango de operación de 2 cm a 400 cm con una resolución de 3 mm.



Figura 13: Imagen representativa del sensor ultrasónico HC-SR04 utilizado para la retro-alimentación de posición.

2.3.8 Elementos de lubricación: grasa multiusos de base litio.

Para el mantenimiento preventivo y la reducción de fricción en las articulaciones mecánicas del prototipo, se emplea una **grasa multiusos de color amarillo traslúcido**. Este lubricante, comúnmente distribuido en entornos de ferretería técnica, corresponde a una grasa con espesante de **jabón de litio**, clasificada bajo la consistencia **NLGI 2**.

Su selección se justifica por su versatilidad y capacidad de adherencia en superficies metálicas sometidas a movimientos oscilatorios. El aspecto traslúcido es un indicador de una base de aceite mineral refinado, lo que garantiza una lubricación hidrofóbica eficaz, protegiendo los componentes de acero contra la oxidación y el desgaste prematuro sin necesidad de aditivos industriales complejos [56]

2.4 Mantenimiento y confiabilidad del sistema electromecánico.

La integridad del simulador a largo plazo se fundamenta en la selección de componentes con alta tolerancia operativa y una estrategia de mantenimiento preventivo. Al prescindir de sensores

de parada física o monitoreo de corriente, la confiabilidad se traslada al sobredimensionamiento de la electrónica y la lubricación de las partes móviles.

2.4.1 Lubricación y tribología: grasa de base litio.

Para las articulaciones de la estructura y los pernos de pivotaje, se emplea una **grasa multiusos de base jabón de litio** con consistencia **NLGI 2**. Según [56], este lubricante es esencial en sistemas mecánicos con movimientos oscilatorios lentos pero cargados, debido a su estabilidad mecánica.

La aplicación periódica de esta grasa garantiza:

- **Reducción de desgaste:** Evita el contacto metal-metal en los pernos de la estructura tubular, reduciendo el ruido y la fricción.
- **Barrera contra la oxidación:** Protege el acero al carbono de los perfiles PTR contra la corrosión generada por la humedad y el sudor del usuario, actuando como un sello hidrofóbico [56].

2.4.2 Vida útil y criterios de confiabilidad.

2.4.2.1 Actuadores y gestión de ciclos de Trabajo.

La vida útil del actuador lineal eléctrico se define por su **ciclo de trabajo (duty cycle)**. Dado que el sistema no cuenta con interruptores de límite físicos, el control de la vida útil depende de la operación del usuario y la programación de los tiempos de desplazamiento. Según [57], operar el actuador dentro de un ciclo del 10 % al 20 % es crítico para evitar que el calor acumulado en el motor DC degrade el aislamiento de los devanados o deforme los engranajes internos de polímero o metal.

2.4.2.2 Confiabilidad del sistema.

La confiabilidad se asegura mediante el sobredimensionamiento de potencia; una decisión clave para la vida útil electrónica fue la selección del puente H **BTS7960**. Aunque el actuador lineal demanda corrientes moderadas, el driver está diseñado para manejar hasta **43 A**. Este margen de seguridad masivo permite que los MOSFETs operen a temperaturas mínimas, eliminando

prácticamente el riesgo de falla por fatiga térmica que ocurre en controladores más pequeños como el L298N [58].

2.4.2.3 Fatiga estructural.

La estructura metálica, sometida a las cargas dinámicas del pedaleo, se rige por los principios de fatiga de materiales. Según el diseño de *Shigley* [59], la durabilidad de las soldaduras y uniones depende de que los esfuerzos cíclicos se mantengan por debajo del límite de resistencia a la fatiga. Se recomienda una inspección visual semestral para asegurar que no existan microfisuras en los puntos críticos de soporte de carga del simulador.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Metodología.

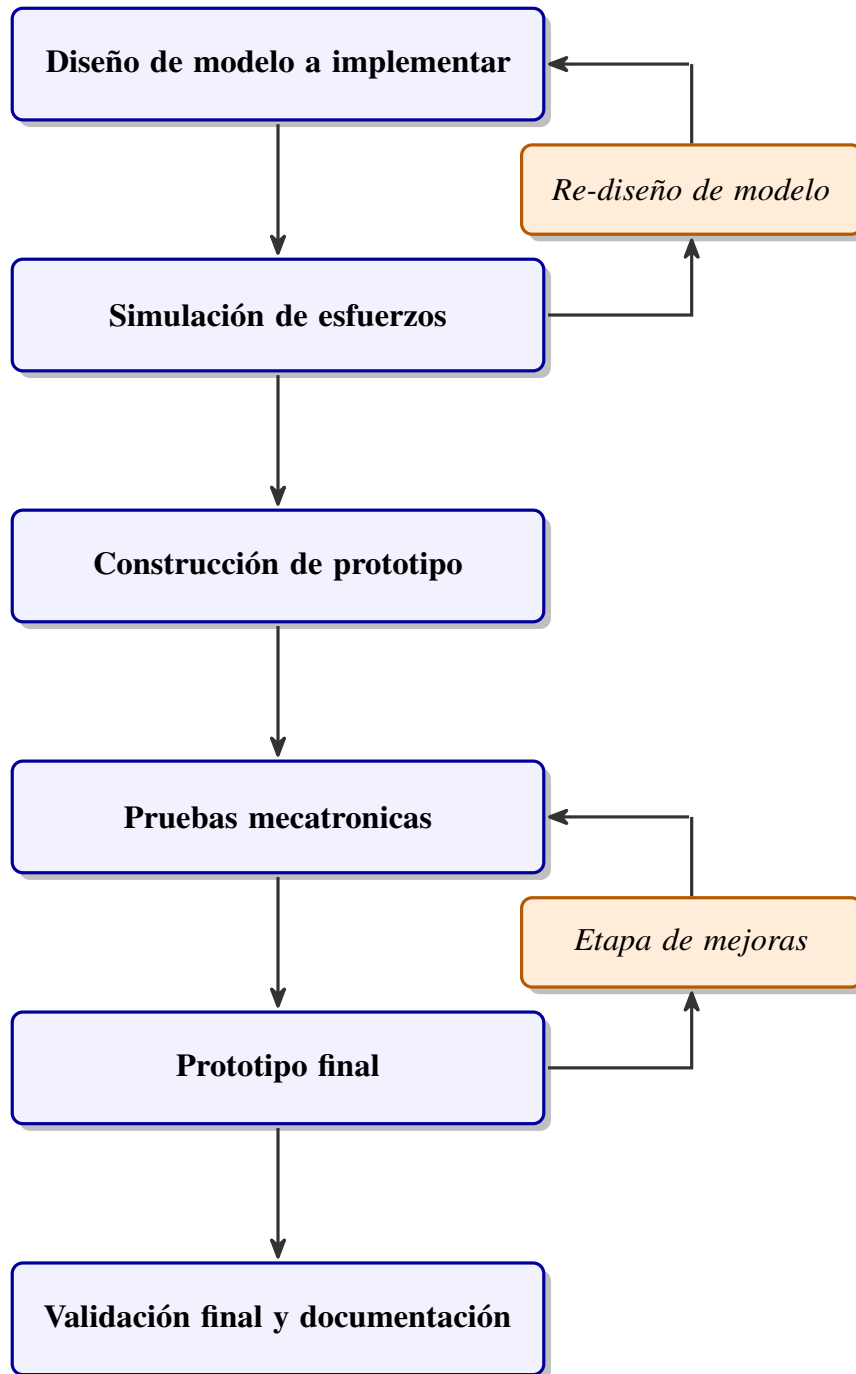


Figura 14: Metodología de desarrollo.

3.2 Descripción de las etapas.

Diseño de modelo a implementar: Diseñar el modelo utilizando el software de diseño asistido por computadora (CAD) **Autodesk Inventor**, definiendo las geometrías, ensambles y la selección de materiales preliminares para establecer la arquitectura digital del sistema.

Simulación de esfuerzos: Someter el modelo a simulaciones de elementos finitos (FEA) utilizando el entorno de análisis de estrés **NASTRAN** en **Autodesk Inventor**, con el fin de verificar que la estructura soporte las cargas de trabajo previstas y recurrir al bloque de *rediseño de modelo* en caso de detectar fallos estructurales.

Construcción de prototipo: Mecanizar el PTR y los componentes una vez validado el diseño CAD y sus posibles rediseños, utilizando los planos y modelos generados para precisar medidas dimensionales.

Pruebas mecatronicas: Realizar experimentos prácticos sobre el prototipo construido para evaluar la respuesta de los componentes mecánicos y eléctricos bajo condiciones reales de operación con usuarios.

Prototipo final: Consolidar la versión final del sistema tras superar las pruebas e ingresar a una *etapa de mejoras* para rediseñar o cambiar el funcionamiento antes de la entrega definitiva si se identifican oportunidades de mejoras.

Validación final y documentación: Verificar el cumplimiento de los requerimientos iniciales y proceder a la redacción de informes técnicos, manuales, planos finales y el archivo final del proyecto.

CAPÍTULO 4: MÉTODO

El sistema contriene un sistema de control de lazo cerrado on/off basado en la posición. En el diagrama de bloques técnico 15 se detalla el flujo de señales, y describe la interdependencia entre el hardware de procesamiento (ESP32 y sensores ultrasonicos), la etapa de potencia (puente H) y los elementos de respuesta mecánica (actuadores).

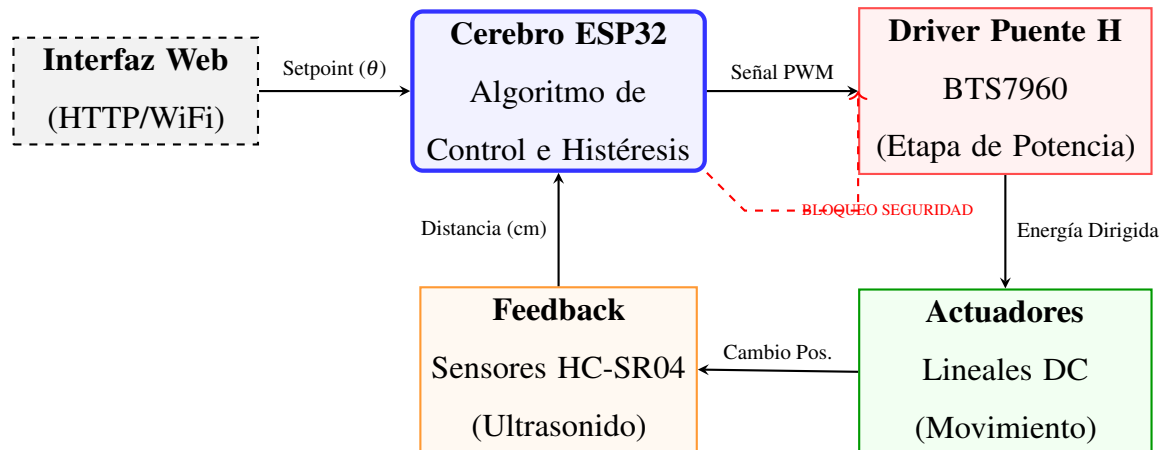


Figura 15: Flujo de control de lazo cerrado con monitoreo de límites de seguridad.

El funcionamiento se describe en 5 etapas mostradas en la Figura 15 que describen su funcionamiento en el sistema mecatrónico:

1. **Interfaz web:** El proceso inicia cuando el usuario define un ángulo objetivo (θ) en la **Interfaz Web**. Esta instrucción se transmite vía WiFi al **ESP32**, estableciendo el punto de referencia o *setpoint*.
2. **Esp 32 (Control e histéresis):** El **ESP32** es el cerebro del sistema tomando decisiones por código. Compara el valor deseado con la lectura actual de los sensores. Si la diferencia excede la zona muerta de **0.7 cm**, el algoritmo de control activa los actuadores.
3. **Puente H (Etapa de potencia):** Para controlar el puente H el microcontrolador envía señales de **PWM (Modulación por Ancho de Pulso)** al **driver BTS7960**. Este componente gestiona la corriente necesaria para mover los **actuadores lineales DC**, permitiendo la extensión o retracción física.
4. **Feedback (Ultrasonido):** Los sensores **HC-SR04** miden constantemente la distancia real mediante ultrasonido. Esta información cierra el lazo al regresar al ESP32, permitiendo

ajustes en tiempo real hasta alcanzar la posición exacta.

5. **Actuadores (Movimiento):** Transformar las señales de control en desplazamiento mecánico mediante el accionamiento de actuadores lineales DC y, en conjunción con el feedback se puede determinar su posición, controlándolo.

Como etapa de protección extra en el sistema, incluye un **bloqueo de seguridad** (flecha roja discontinua). Si el firmware detecta que los actuadores intentan sobrepasar los límites físicos (3 cm o 30 cm), interrumpe inmediatamente la señal hacia el puente H para proteger la integridad del prototipo.

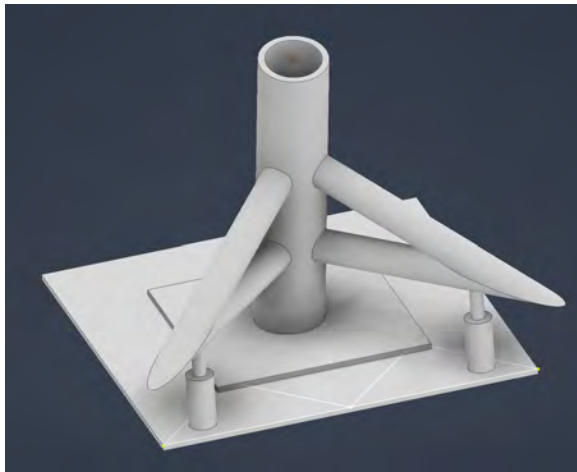
CAPÍTULO 5: DESARROLLO

5.1 Diseño de modelo a implementar. (Re-diseño de modelo)

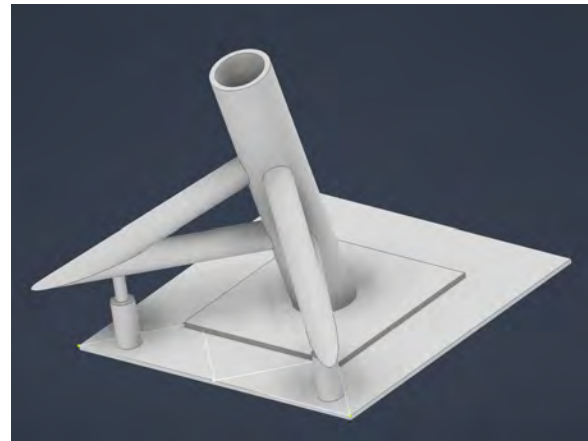
De acuerdo al estado de arte y estado de campo vistos en el capítulo 1, se pensó en hacer una base siguiendo la premisa del trabajo 'Desarrollo de sistema de inmersión 3D en realidad virtual para el entrenamiento de ciclismo en interiores.' [17] El cual describe la realización de un sistema inmersivo de inclinación de una bicicleta estática; de acuerdo a ello, era necesario pensar en una bicicleta que pudiera realizar estos movimientos para simularlos y tener inmersión realista para ayudar al usuario de forma plausible a este tipo de fuerzas y esfuerzos. Por ello, se tomó la idea del trabajo realizado 'Bicicleta estática de rehabilitación para pacientes con trauma raquímedular (TRM) del centro médico BIOMEDICAL GROUP.' [14] La cual es una bicicleta modificada para que el usuario pueda tener un ambiente más cómodo, solo siendo simulado y estudiado desde la ergonomía del usuario; desde este punto se pensó en hacer una base de sujeción desde la parte media de la bicicleta para simular el ladeo, siendo una tubería con conexiones de actuadores muy inestables, modificando con sus grosores.

El proceso de diseño se llevó a cabo utilizando el software de Diseño Asistido por Computadora (CAD) Autodesk Inventor para el modelado y sus re-diseños.

En la [Figura 16](#), podemos ver las imágenes 'a' y 'b'; se muestra una idea con una tubería de grosor grande y con alas reforzadas para su desplazamiento con actuadores colocados en la base. En las figuras 'c' y 'd' se modifica la figura para hacerla sólida, considerando que es difícil mecanizar algo de ese calibre; de igual manera, las alas se ponen de manera excéntrica para resolver problemas de las primeras figuras



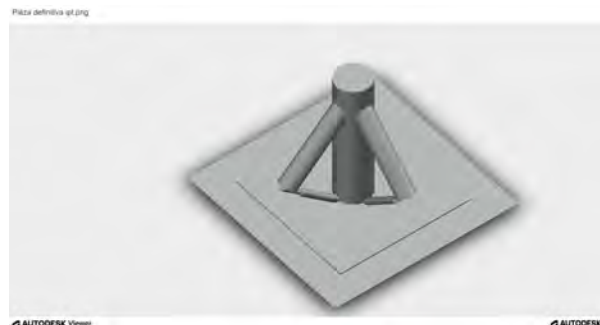
(a)



(b)



(c)



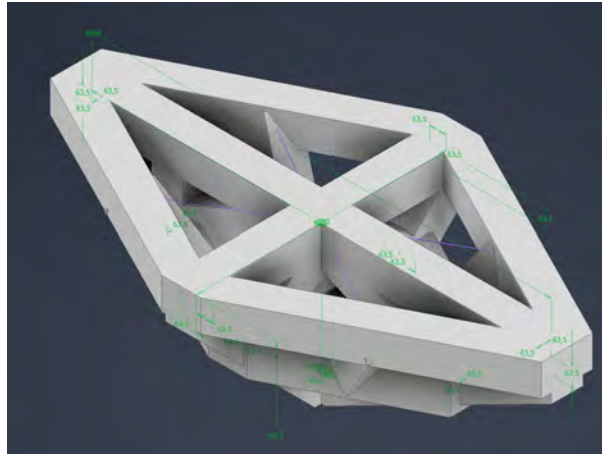
(d)

Figura 16: En la colección de imágenes se demuestra una de las primeras ideas descartadas para una base fija de la bicicleta, teniendo previa documentación de campo.

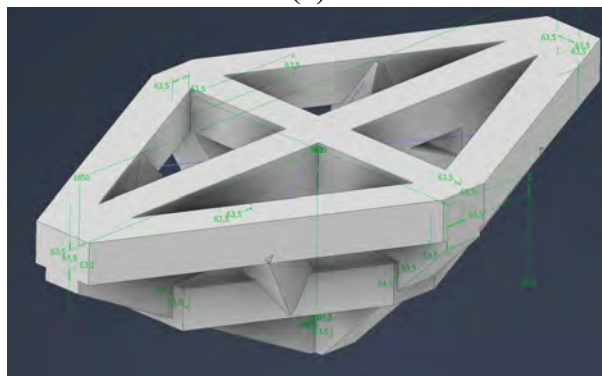
Del diseño anterior se idealiza un tipo de base más amplia; de acuerdo a la patente [26] se idealiza una idea de un tipo de 'canoa' para sostener la bicicleta, cumpliendo la misma premisa que la patente puede inspirar.

En la [Figura 17](#), podemos ver las imágenes 'a' y 'b'; se demuestra el modelo propuesto descartado

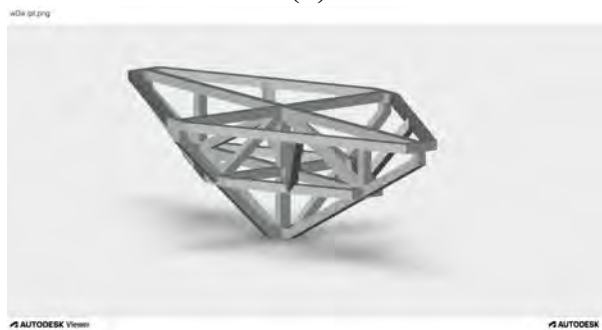
con estructura de PTR, siendo esto una idealización, pero no es viable realizarlo fácilmente. En las figuras 'c' y 'd' se muestra la modificación de los modelos para distribuir cargas y liberar peso, pero tiene más problemas a la hora de inclinarse y generar fuerzas internas indeseables.



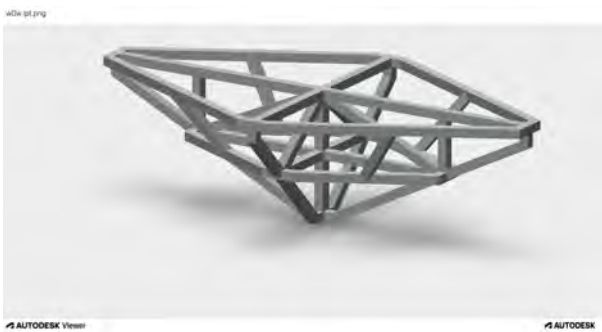
(a)



(b)



(c)

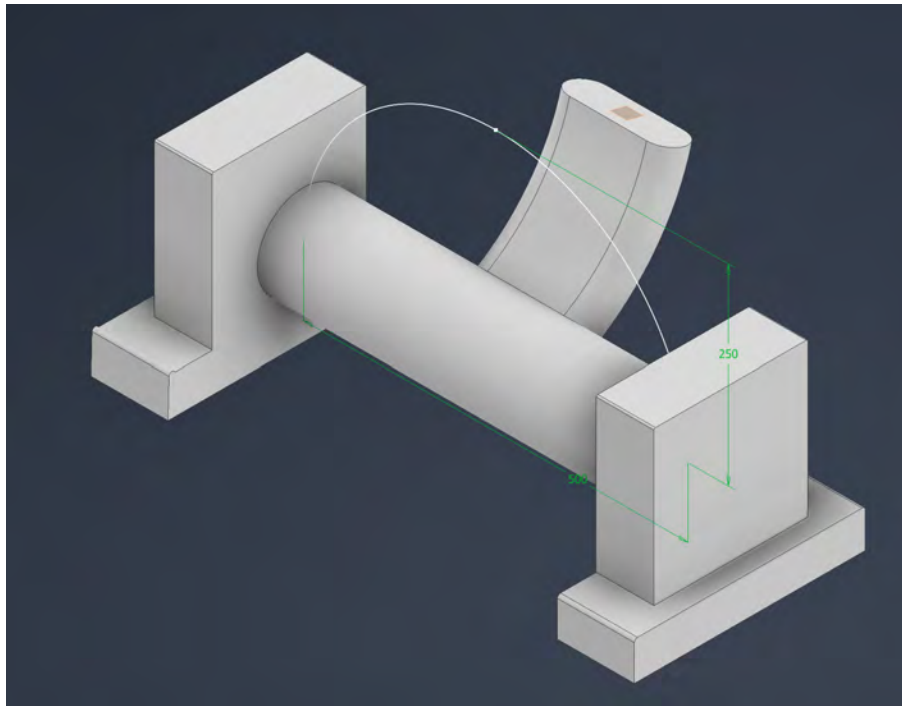


(d)

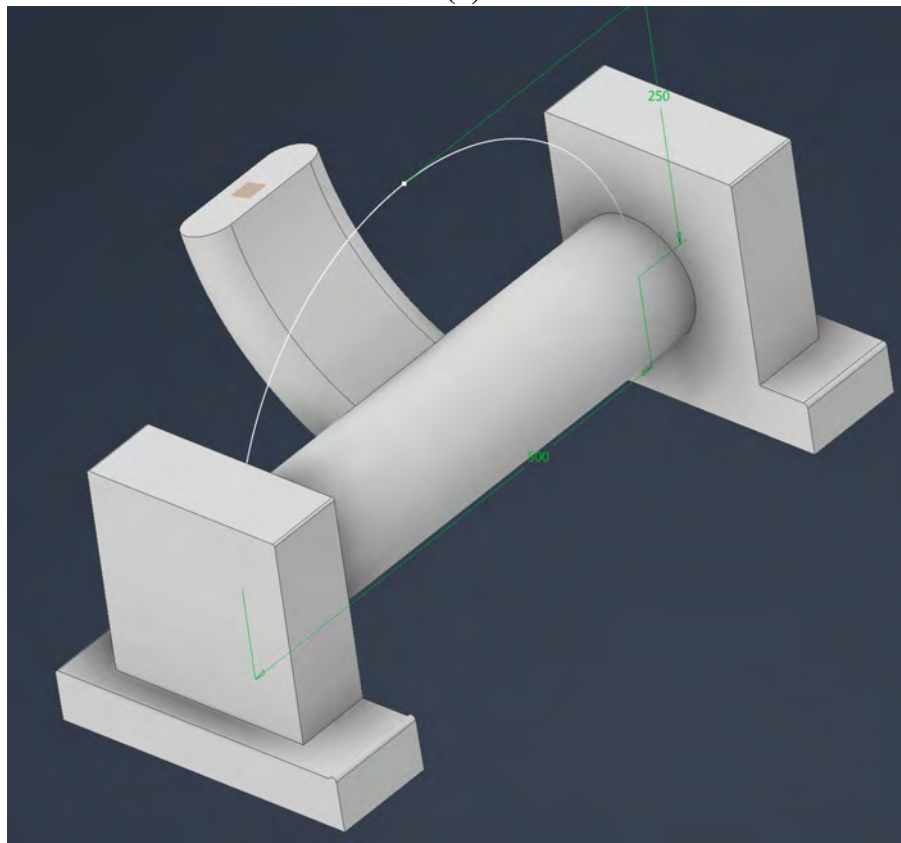
Figura 17: La colección de imágenes muestra modelos propuestos descartados para la idea de inclinación natural.

De acuerdo a las dos figuras previas, se plantea una solución a la mayoría de cargas internas en las inclinaciones; la mayoría de estructuras previas tienen problemas con la restricción de cargas en la estructura. De acuerdo a esto, se pensó en las patentes previas, siendo de gran inspiración [23], [24] y [25] los cuales muestran una base de bicicleta delantera y podemos modificar el diseño inspirados bajo la idea de recargar cargas desde la parte delantera.

En la [Figura 18](#), podemos ver las siguientes imágenes: 'a' y 'b'. Se describe una tubería con una paleta que se sostiene con 2 puntos de apoyo, siendo solo para tomar la parte delantera de la bicicleta; se descarta este modelo por sus cargas internas y muchas mejoras necesarias para su aplicación.



(a)

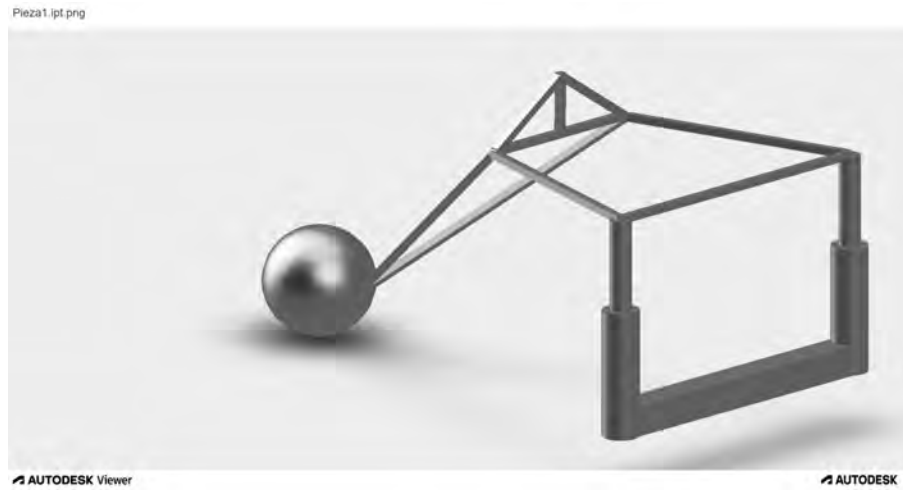


(b)

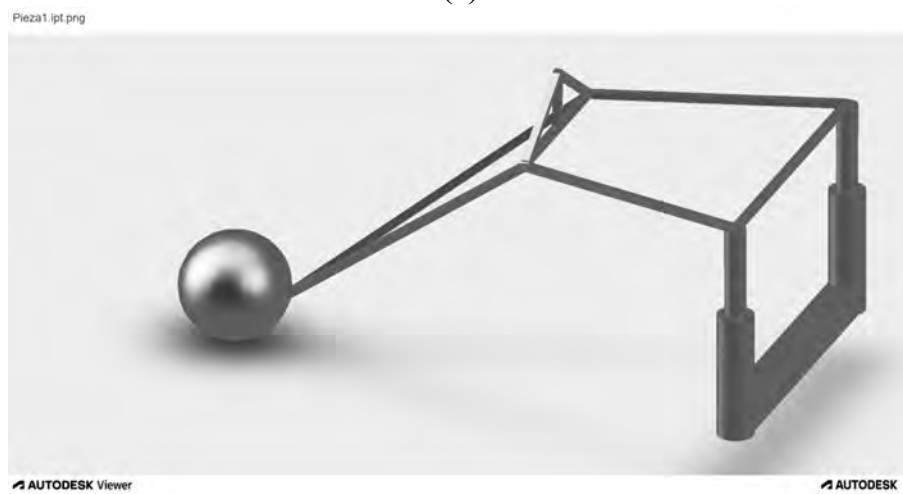
Figura 18: En la colección de imágenes se muestra el modelo descartado, siendo solo una base delantera que presenta problemas con recargar cargas internas y un mecanismo que requiere mejoras.

De acuerdo a lo planteado en las figuras previas, el diseño intenta separar parte estructural de la base y se requiere el uso de actuadores para el desplazamiento, encontrando el siguiente modelo para solucionar lo previo y así rediseñar la estructura.

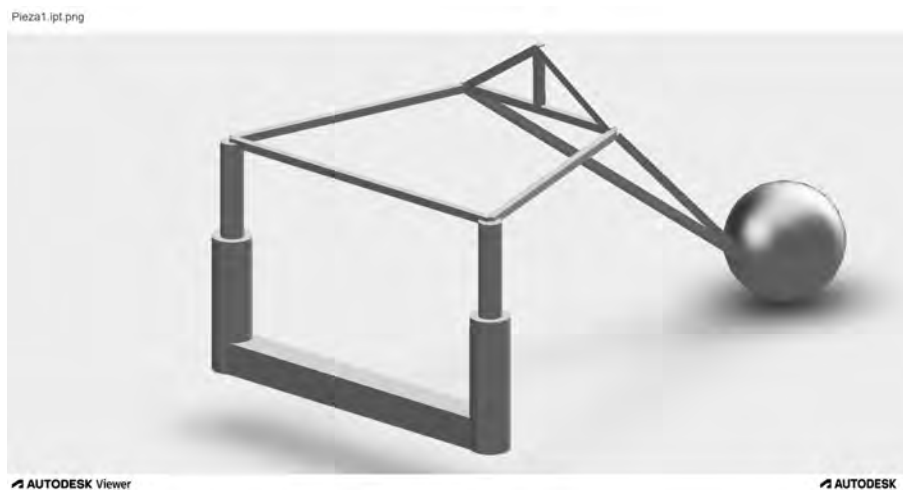
En la [Figura 19](#), podemos ver las figuras 'a', 'b' y 'c' se muestra el modelo descartado por sus cargas resultantes y cortantes al aplicar cargas de 150 kg en los actuadores, siendo el primer problema la distribución de cargas originada en la parte delantera de la estructura.



(a)



(b)



(c)

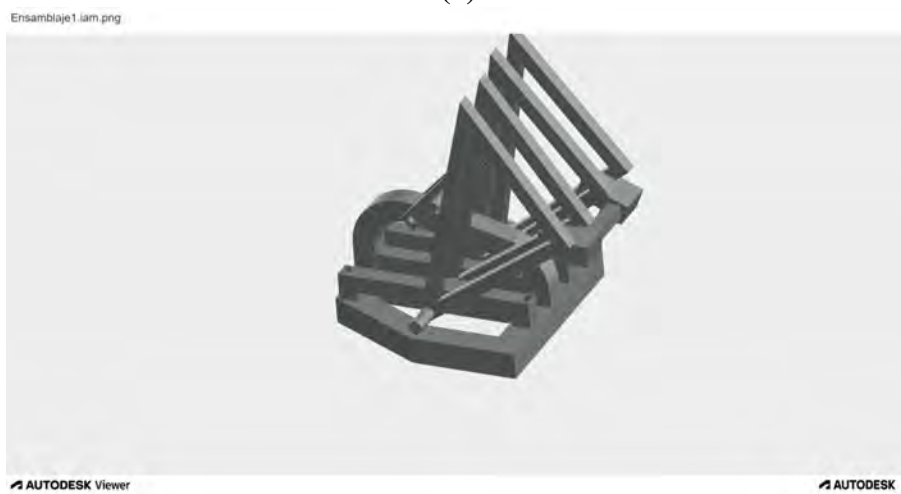
Figura 19: En la colección de imágenes se demuestra el modelo descartado de la base delantera y su idea de usar actuadores para describir las inclinaciones desde la parte delantera.

De acuerdo a lo previo visto, se realizó una mejora a la parte delantera, recargando las cargas en guías de apoyo de manera básica en un banco de trabajo de gimnasio y de ello aplicando la idea en recargar la mayoría de la carga de manera casi uniforme a la estructura, teniendo problemas de dimensionamiento.

En la [Figura 20](#), podemos ver las figuras 'a', 'b' y 'c'; se demuestra este modelo descartado, siendo robusto pero con fallas internas en la estructura, parte de inspiración por el banco de trabajo y su idea para solucionar cargas generadas posteriormente.



(a)



(b)



(c)

Figura 20: En la colección de imágenes se describe una idea de modificación para usar guías de apoyo para fuerzas resultantes, siendo inspiración de una base de entrenamiento y su simplicidad para describir desplazamientos.

Con las previas imágenes descritas, se puede llegar a una solución para este problema; con guías se pueden distribuir las cargas resultantes y cortantes que tuvimos problemas y se puede escalar, siendo una base delantera con actuadores la mejor solución a este problema, inspirándose en las bases anteriores y mejorándolas al unir ideas básicas y enfocarlas a llevar la guía de cargas de manera vertical.

En la [Figura 21](#), podemos ver las imágenes 'a' y 'b'; se muestra el modelo idealizado para recargar cargas con mayor libertad de movimiento, uniendo parte de los modelos previos.

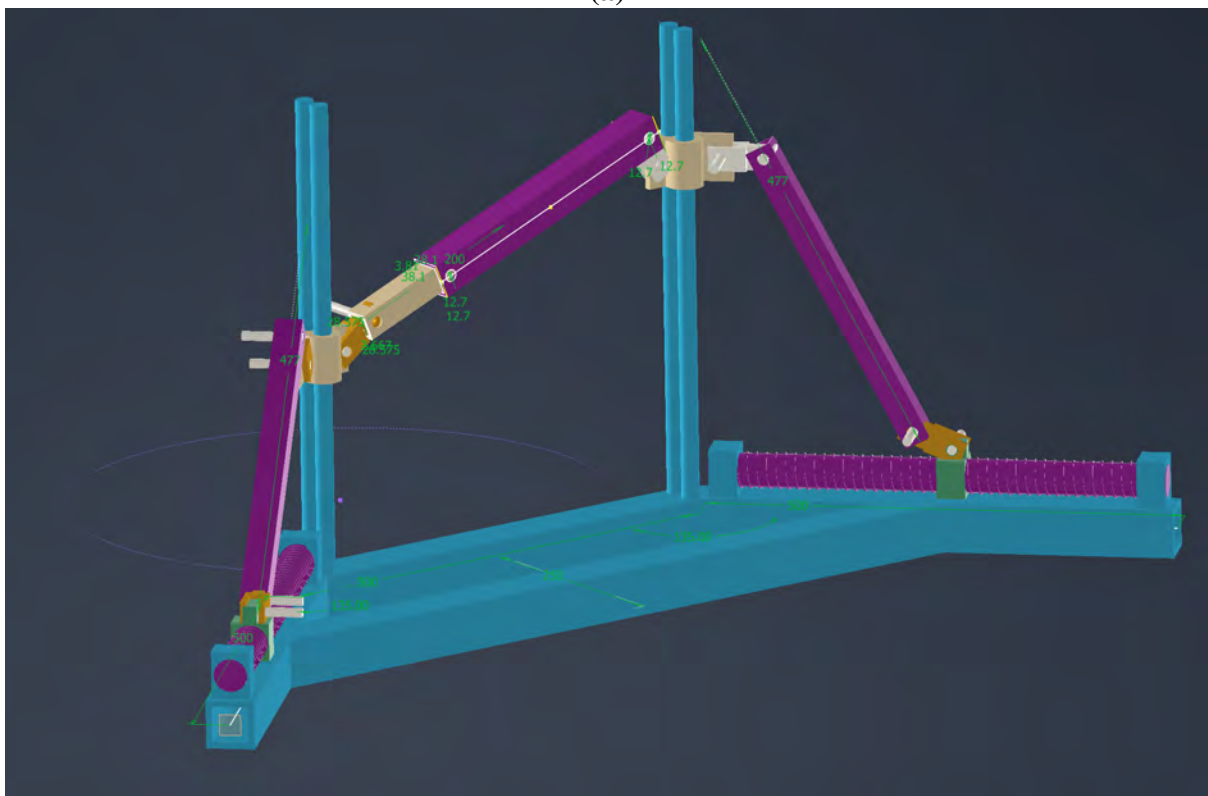
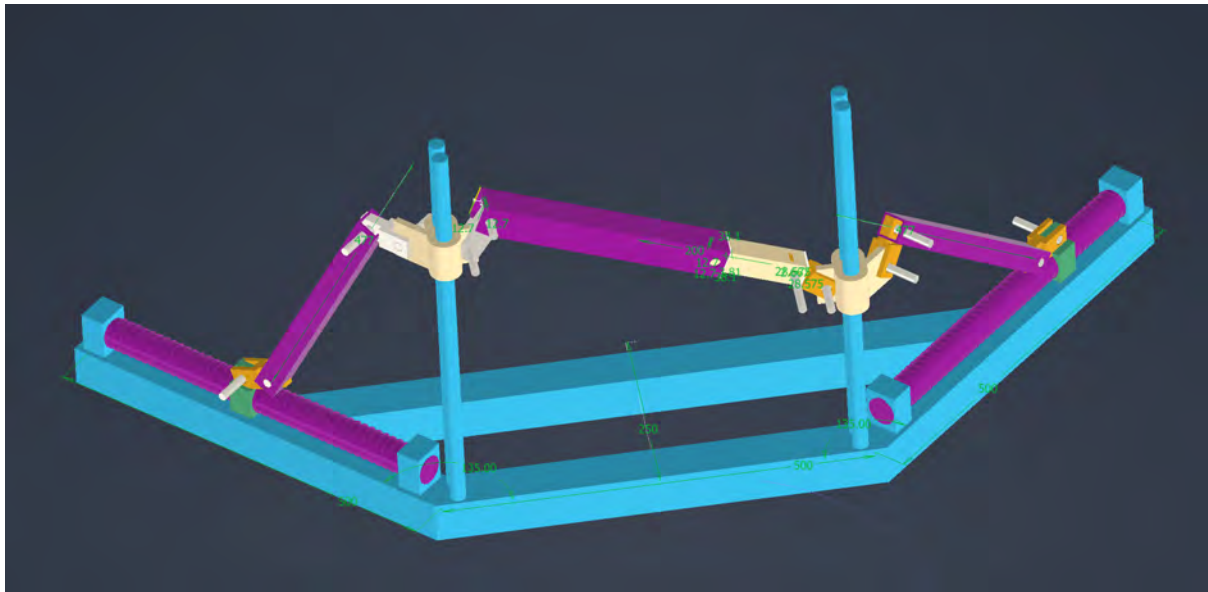
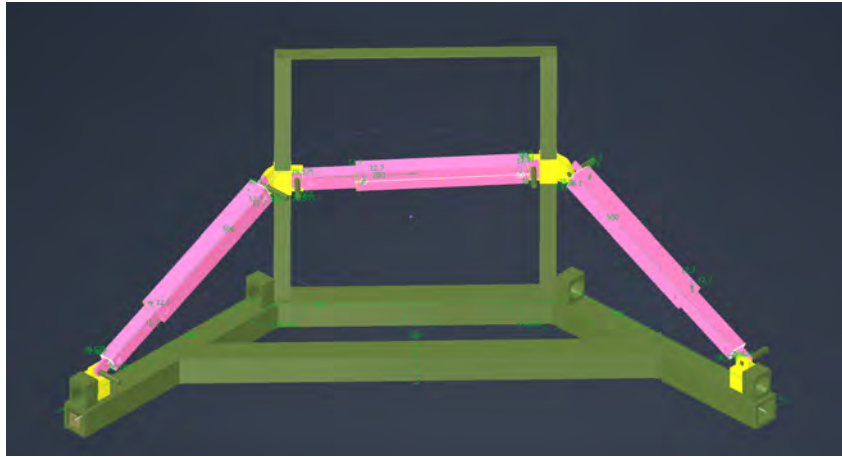


Figura 21: La colección de imágenes describe el modelo descartado previsto y con mayor libertad para modificaciones, sin la mayoría de problemas antes vistos.

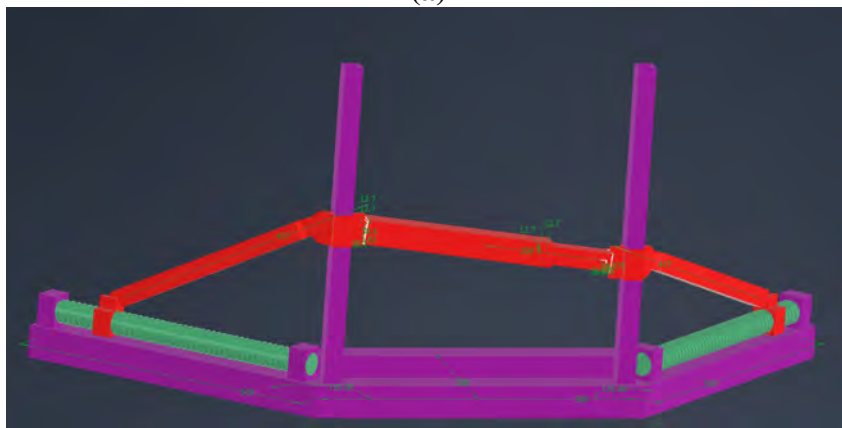
Para mejorar el sistema y pasar de ser idea, se buscó la mejor manera de posicionar los actuadores, buscando quitar fuerzas resultantes y que la mayoría de la carga quedara en las guías y el

desplazamiento pudiera realizarse de mejor manera.

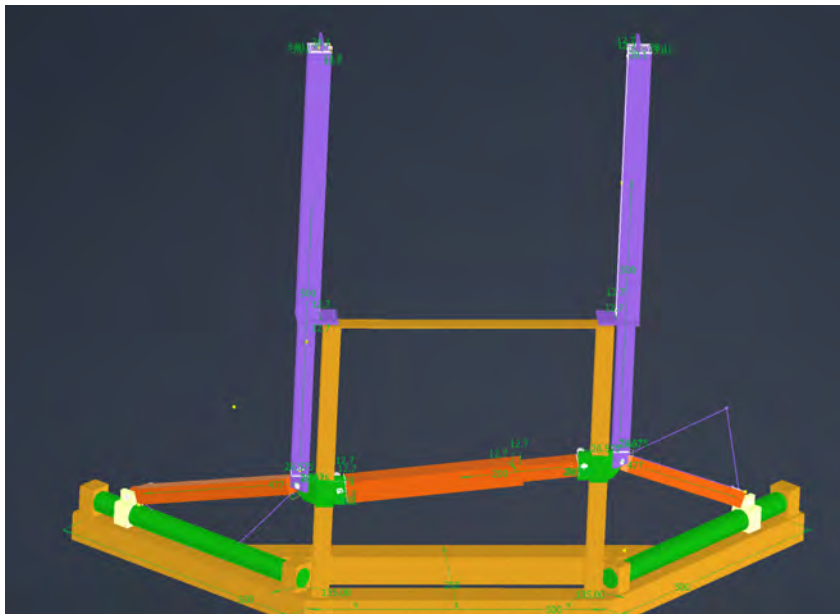
En la [Figura 22](#), podemos ver las siguientes imágenes: 'a', 'b' y 'c' se muestran los modelos con cambios de posición de actuadores para mejorar el modelo.



(a)



(b)



(c)

Figura 22: En la colección de imágenes se describen soluciones posibles a las modificaciones de posición en los actuadores para mejorar el desplazamiento.

5.2 Simulación de esfuerzos.

Para garantizar la seguridad y durabilidad de la estructura, se llevó a cabo un análisis de elemento finito (FEA) utilizando el módulo NASTRAN. Este análisis estático lineal se configuró de la siguiente manera:

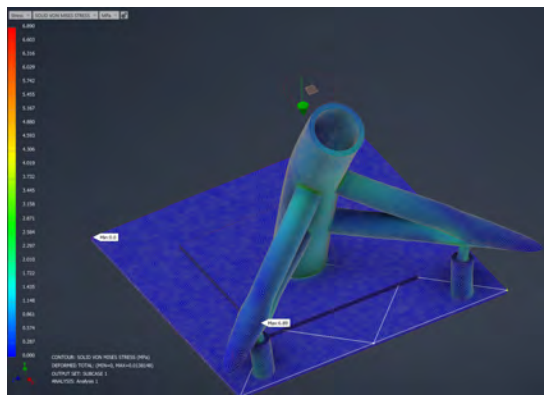
Se asignaron las propiedades mecánicas del acero al carbono a todos los componentes estructurales del modelo, incluyendo el límite elástico y el módulo de Young (200 GPa) citados en el marco teórico.

Se generó una malla de elementos finitos sobre la geometría del ensamblaje, refinando el tamaño de los elementos en zonas de alta concentración de esfuerzos para asegurar la precisión de los resultados.

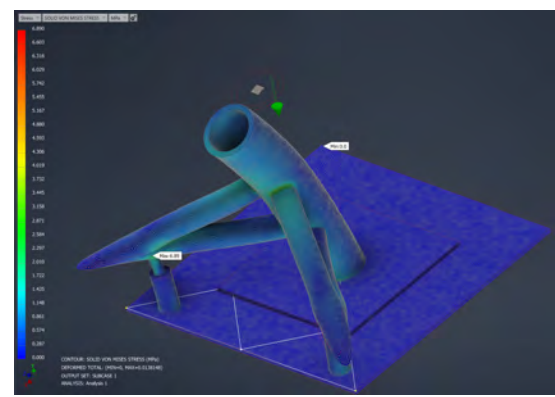
Se ejecutó el estudio para obtener los mapas de distribución de esfuerzos de Von Mises y los desplazamientos.

El criterio de validación fue verificar que el esfuerzo máximo en cualquier punto de la estructura no superara el límite elástico del acero, y que la deformación máxima fuera despreciable para no comprometer la estabilidad del conjunto.

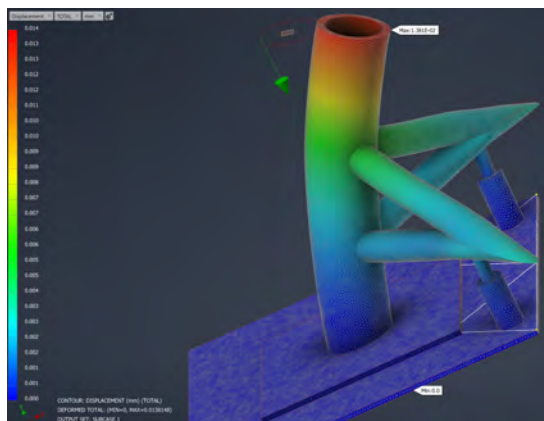
En la [Figura 23](#), podemos ver la figura; 'a' y 'b' describen las cargas internas de 6.89 MPa en los actuadores con una carga de 150 kg en las alas de la estructura reforzada, encontrando problemas en la tubería; en las figuras 'c' y 'd' se ve el desplazamiento que se realizó en la estructura, logrando ser casi despreciable, de 1.381×10^{-2} mm. Aun a pesar de ese desplazamiento, puede intervenir la estructura de manera no requerida.



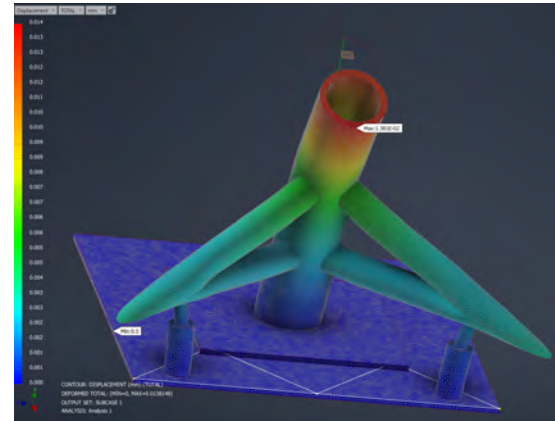
(a)



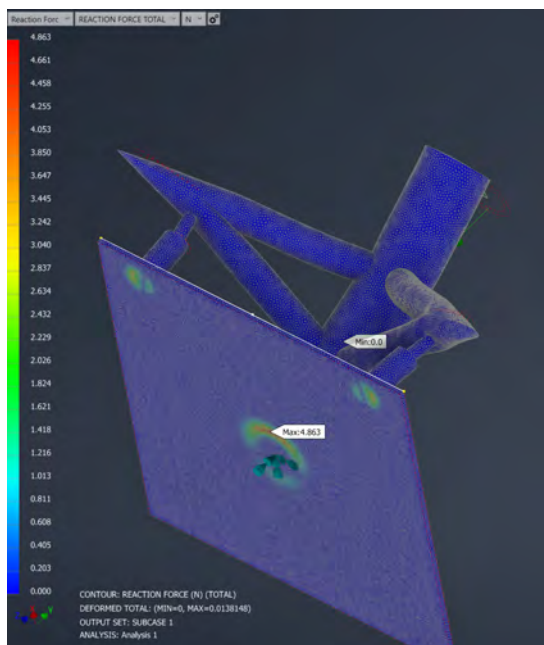
(b)



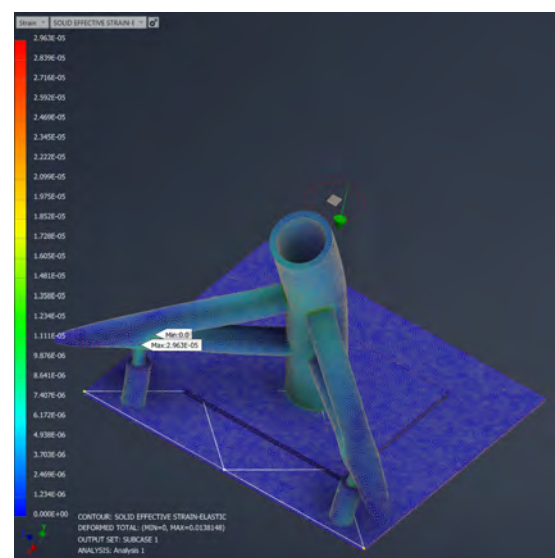
(c)



(d)



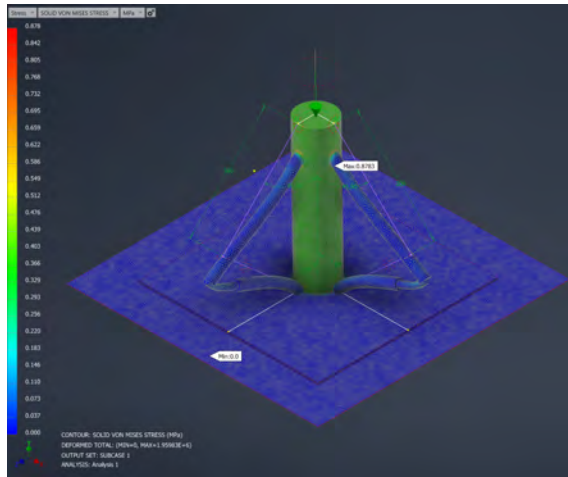
(e)



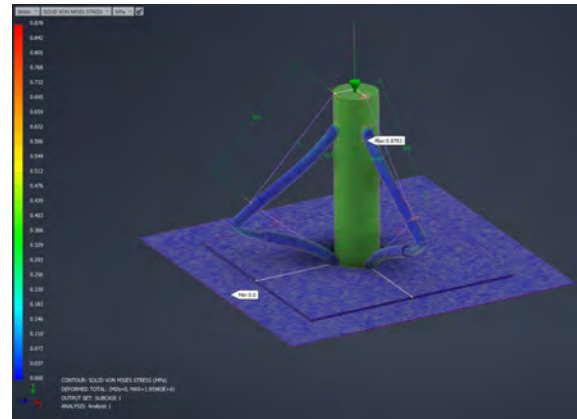
(f)

Figura 23: En la colección de imágenes se analizan los modelos propuestos previamente con cargas de 150 kg, considerando que la persona promedio pese menos que este valor y un promedio de 1500 N de fuerza para esta carga.

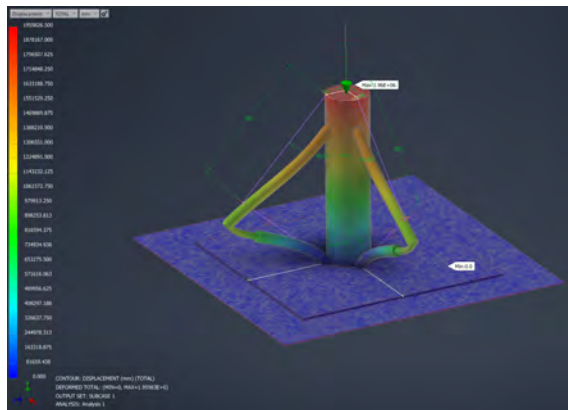
En la [Figura 24](#), podemos ver la imagen ' a ' y ' b ' se puede mostrar las distribución de cargas principalmente en su centro de 0.8783 MPa de carga haciendo que las alas queden comprometidas con cargas mayores; en las figuras ' c ' y ' d ' se muestra el desplazamiento promedio y predicción del programa hacia la dirección que recarga la mayoría de la carga , siendo de 1.96e6 siendo muy probable su desplazamiento con acero o materiales mas blandos , al igual los actuadores estarían comprometidos seriamente; en la figura ' e ' se demuestran las tensiones efectivas alcanzando 5855 en los brazos siendo peligroso para el usuario ; en la figura ' f ' se demuestra la fuerza reactiva dentro del sistema siendo de 3.82N siendo poca pero llevada a ese extremo por involucrar cargas elevadas en los demás análisis realizados.



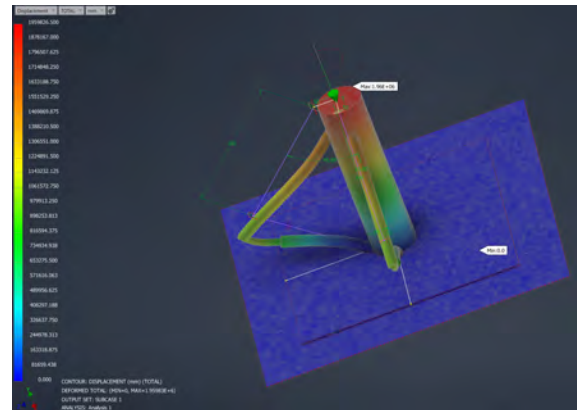
(a)



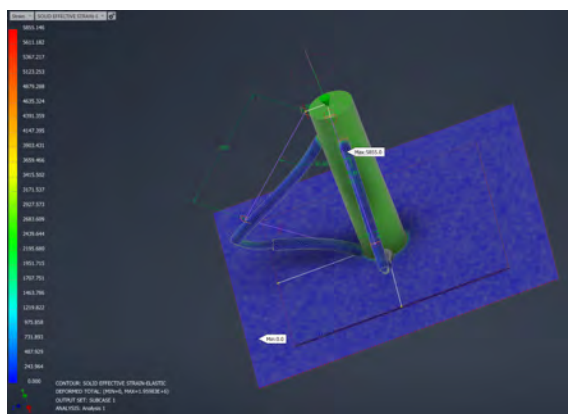
(b)



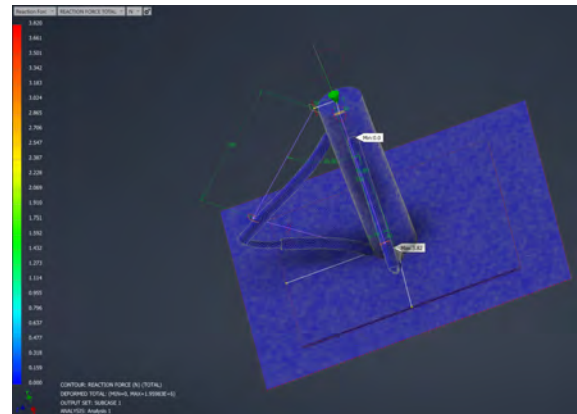
(c)



(d)



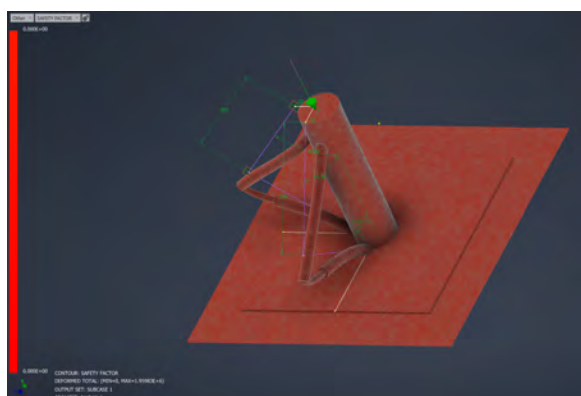
(e)



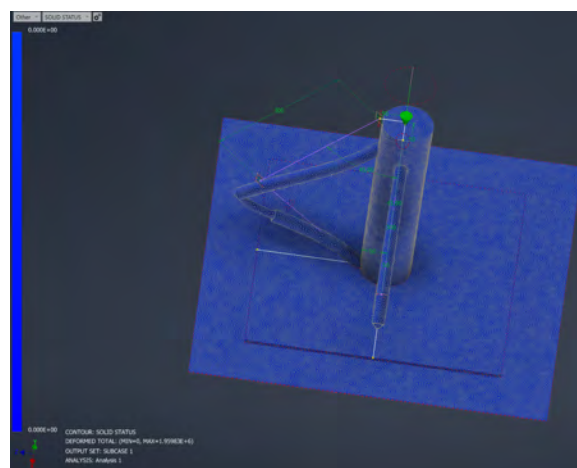
(f)

Figura 24: En la colección de imágenes se analiza la segunda estructura propuesta y se establecen los mismos parámetros, siendo el análisis mecánico un poco mejor que la tubería con espesor grueso, recordando que piezas sólidas son difíciles de conseguir y manipular.

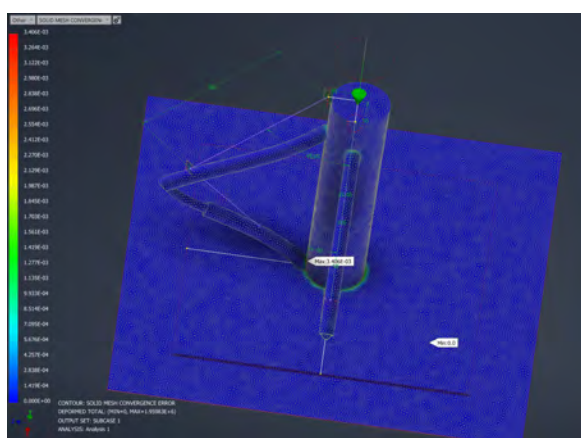
En la [Figura 25](#), podemos ver la figura 'a' se demuestra la figura del estado solido el cual no predice ninguna afectación en caso de ser acero; en la figura 'b' en el estado solido la figura no presenta mayor modificación puesto que la figura llega a deformarse y desde ese punto ya no afecta el resto de la estructura; en la figura 'c' , 'd' y 'e' se demuestran las cargas en la convergencia de las cargas , acumulándose la mayoría en al base y en las alas conectadas a los actuadores mostrando aparente afección de $3.406e-3$ siendo evidente el esfuerzo en zonas de criticas y ángulos pronunciados.



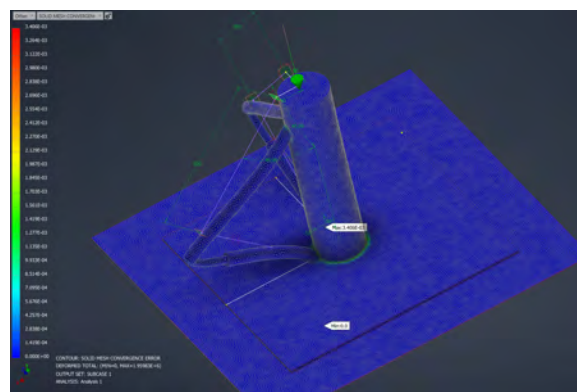
(a) Primer paso.



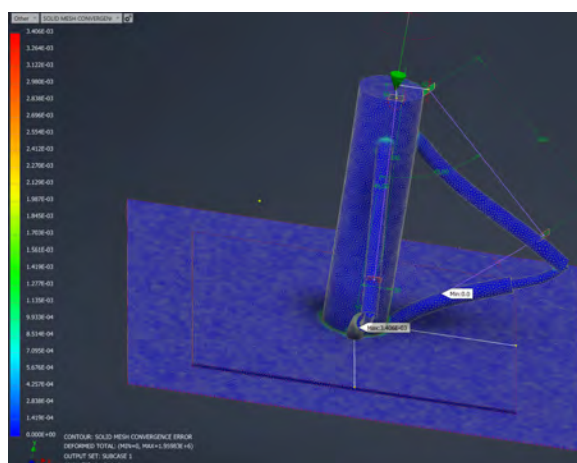
(b) Segundo paso.



(c) Tercer paso.



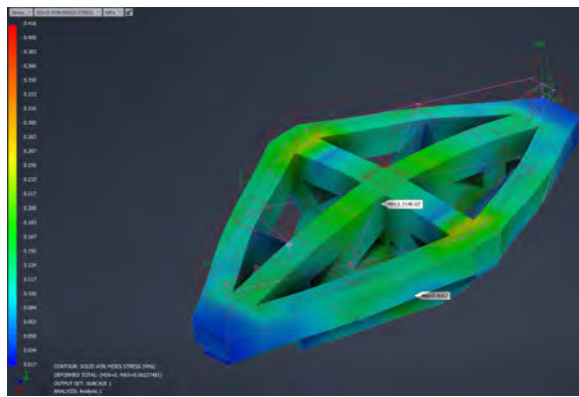
(d) Cuarto paso.



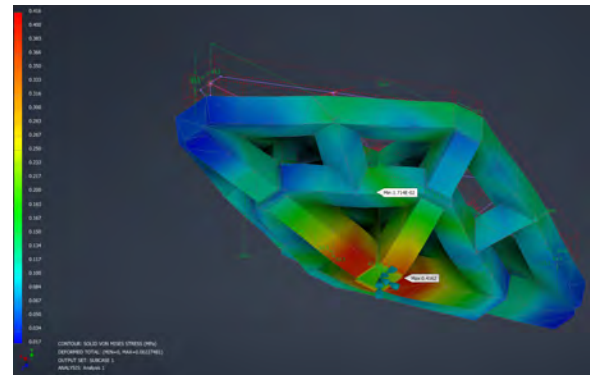
(e) Quinto paso.

Figura 25: En la colección de imágenes se muestran los análisis subsecuentes de la mayoría de cargas, solo relacionando acciones de carga con reacciones finales para el acero.

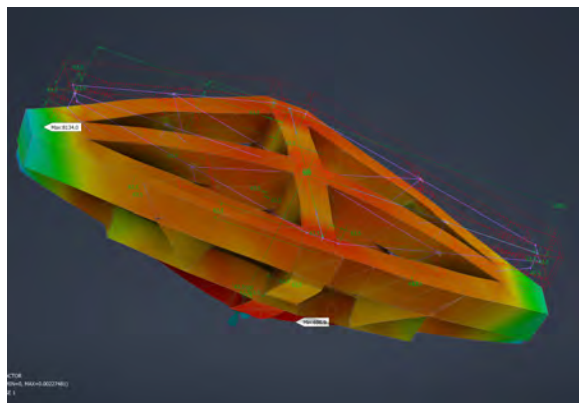
De acuerdo al previo análisis anterior, se realizó con la siguiente figura descartada, siendo la forma de 'canoa'. En la [Figura 26](#), podemos ver las figuras 'a' y 'b' se analizan las cargas, llegando a registrar un máximo de 0.4162 MPa en su estructura interna y un mínimo despreciable. En las figuras 'c' y 'd' se demuestra el factor de seguridad, ya que se encuentran en alto riesgo, llegando a un factor de 8134, siendo visible su inviabilidad en el uso futuro de este modelo. En las figuras 'e' y 'f' se ve su estado sólido, denotando la mayor doblez en $1.99e4$, siendo exagerado en una estructura de acero PTR.



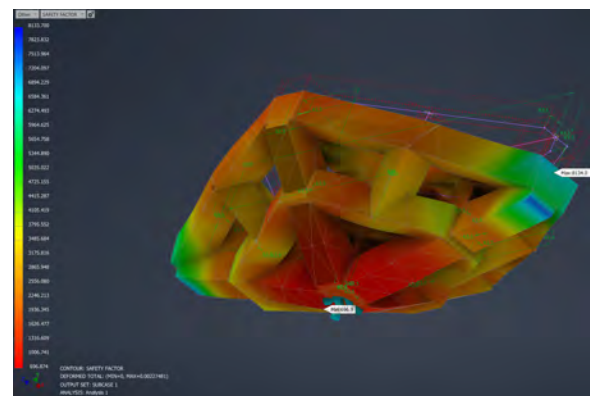
(a)



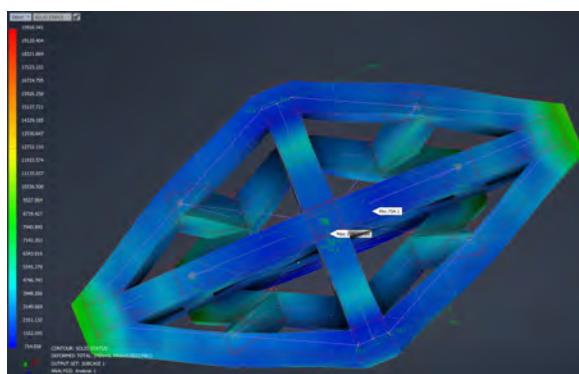
(b)



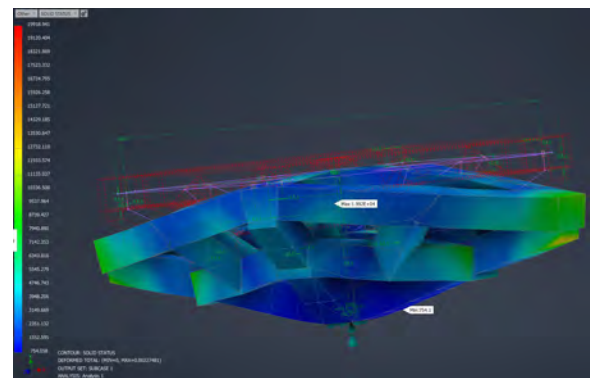
(c)



(d)



(e)

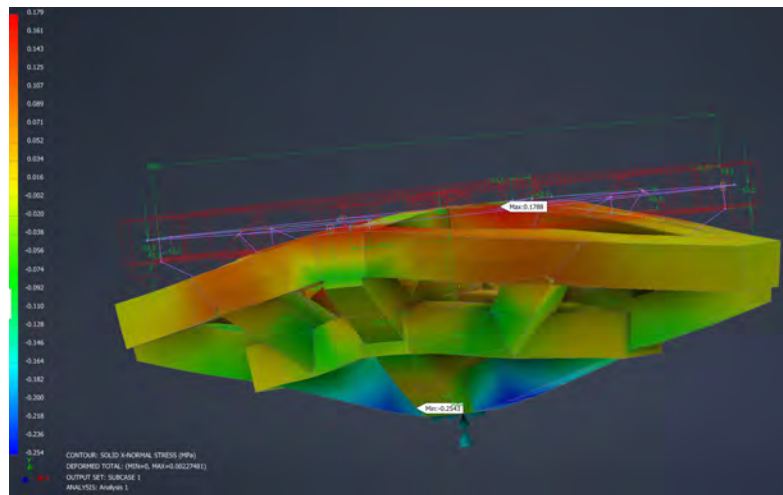


(f)

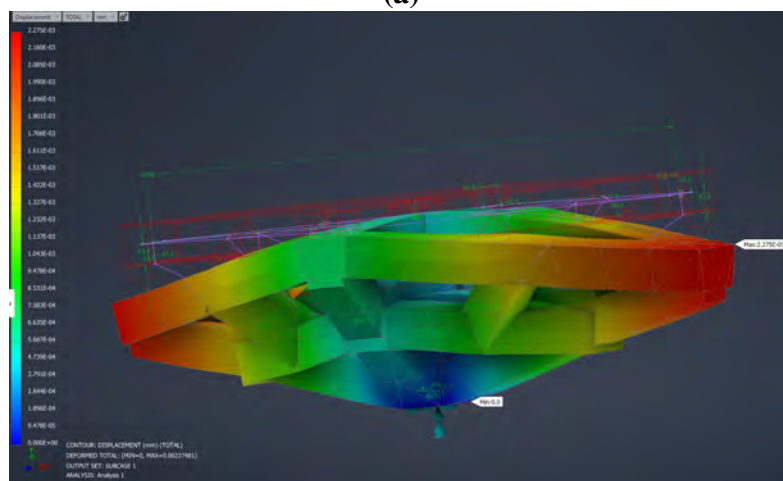
Figura 26: Para la colección de figuras, se analiza la figura de modelos previos para determinar su utilidad; en este caso se describe la carga uniforme sobre la superficie de la cara superior.

En la [Figura 27](#), podemos ver la figura 'a' se puede denostar cargas por tensión en la estructura por lo que estamos llegando a la máxima tensión en la parte en contacto con la carga lo que causa 0.1788Mpa reaccionando así la base; en la figura 'b' podemos ver el desplazamiento

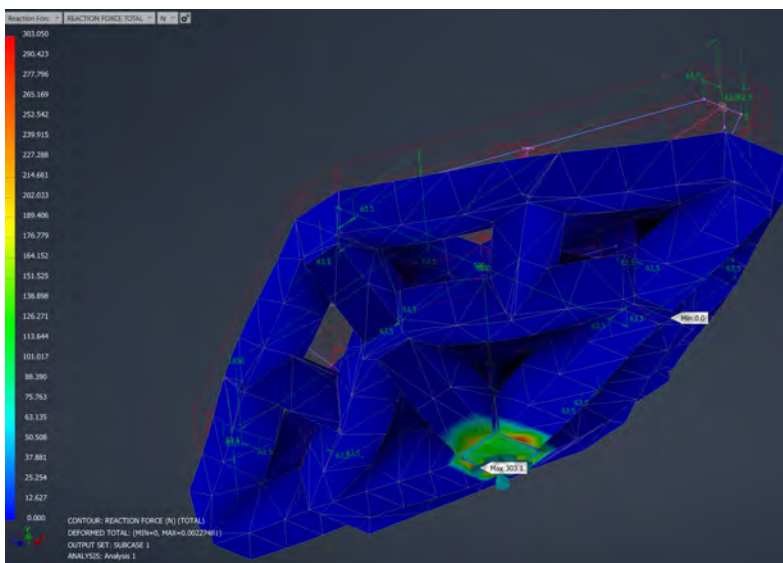
máximo de 2.2775×10^{-3} siendo esto mínimo pero la colección de desplazamientos puede causar el resto de problemas internos; en la figura ' c ' se puede ver por reacción a la carga que la mayor parte está comprometida en la base, siendo un problema a la hora de desplazar 45° a 30° cuando se reparte la carga siendo esta de 303.1 N esto siendo una carga menor pero compromete la acción de desplazamiento en todo el resto del análisis.



(a)



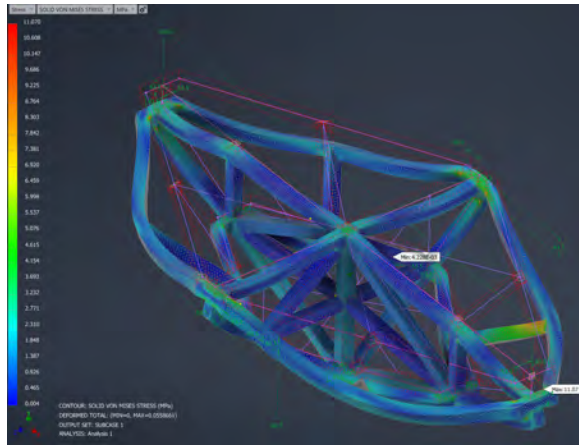
(b)



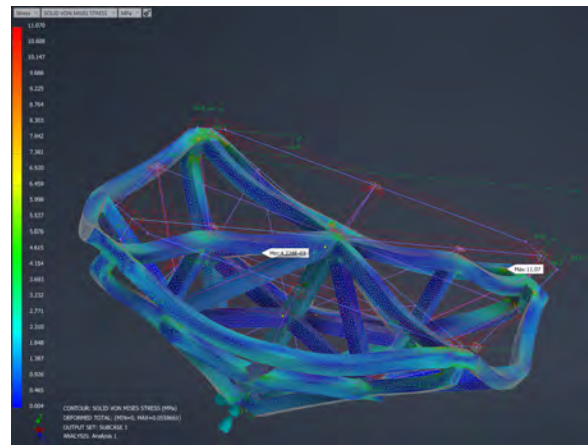
(c)

Figura 27: La colección de figuras analiza el resto de la estructura, desde su deformación hasta la consecuencia de someterlo a cargas parecidas.

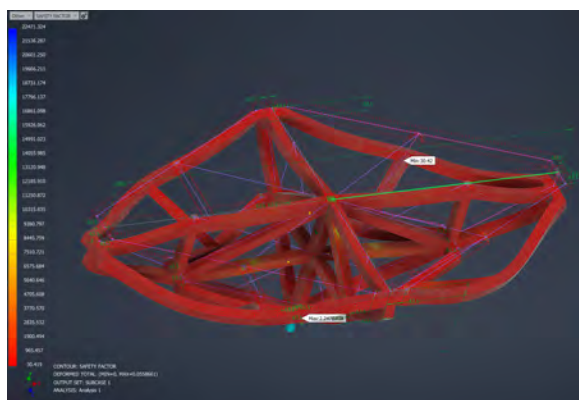
En la [Figura 28](#), podemos ver la figura 'a' y 'b' se pueden ver la mayor parte de cargas siendo la máxima de 11.07Mpa y una mínima en la parte interior cerca del centro; en la figura 'c' y 'd' se encuentra el factor de seguridad de 2.2477e siendo peligroso en la parte de la base interpretando deformación segura en la base ; en la figura 'e' se puede observar gran parte de la fuerza reactiva en la parte de la base de la estructura siendo la de mayor carga ,lo que lleva a no distribuir la carga de manera uniforme ; en la figura 'f' se muestran las fuerzas en tensión dentro del sistema siendo de 4.568e-5 siendo las partes externas las que aguantan cargas pero reaccionando la mayor parte en ángulos.



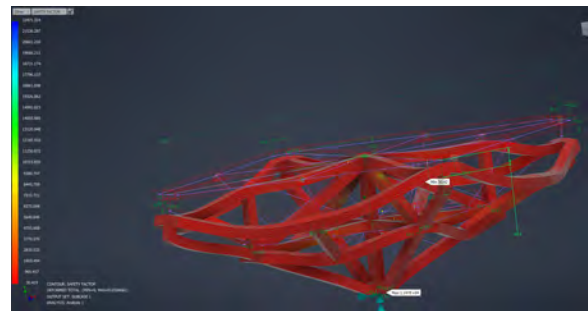
(a)



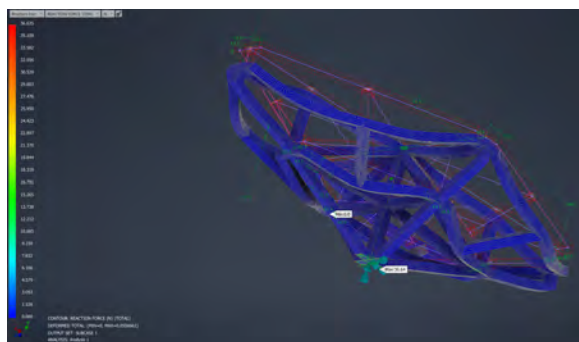
(b)



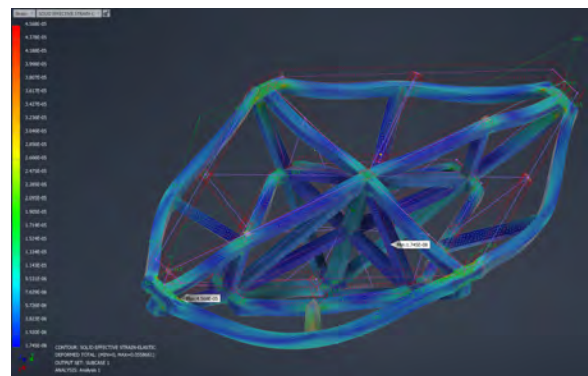
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 28: En la colección de imágenes se analiza la estructura modificada, reduciendo espesor del PTR, tratando de entender problemas internos del problema anterior, logrando descartar el modelo.

En la [Figura 29](#), podemos ver las imágenes 'a' y 'b'; se demuestra el estrés en diferente posición, siendo la máxima de 9.112 Mpa, algo que internamente afecta al modelo; en las imágenes 'c' y

'd' se muestra el desplazamiento idealizado del modelo, siendo en la parte exterior el máximo desplazamiento de 5.5877×10^{-2} despreciable, pero afecta parte de la estructura externa.

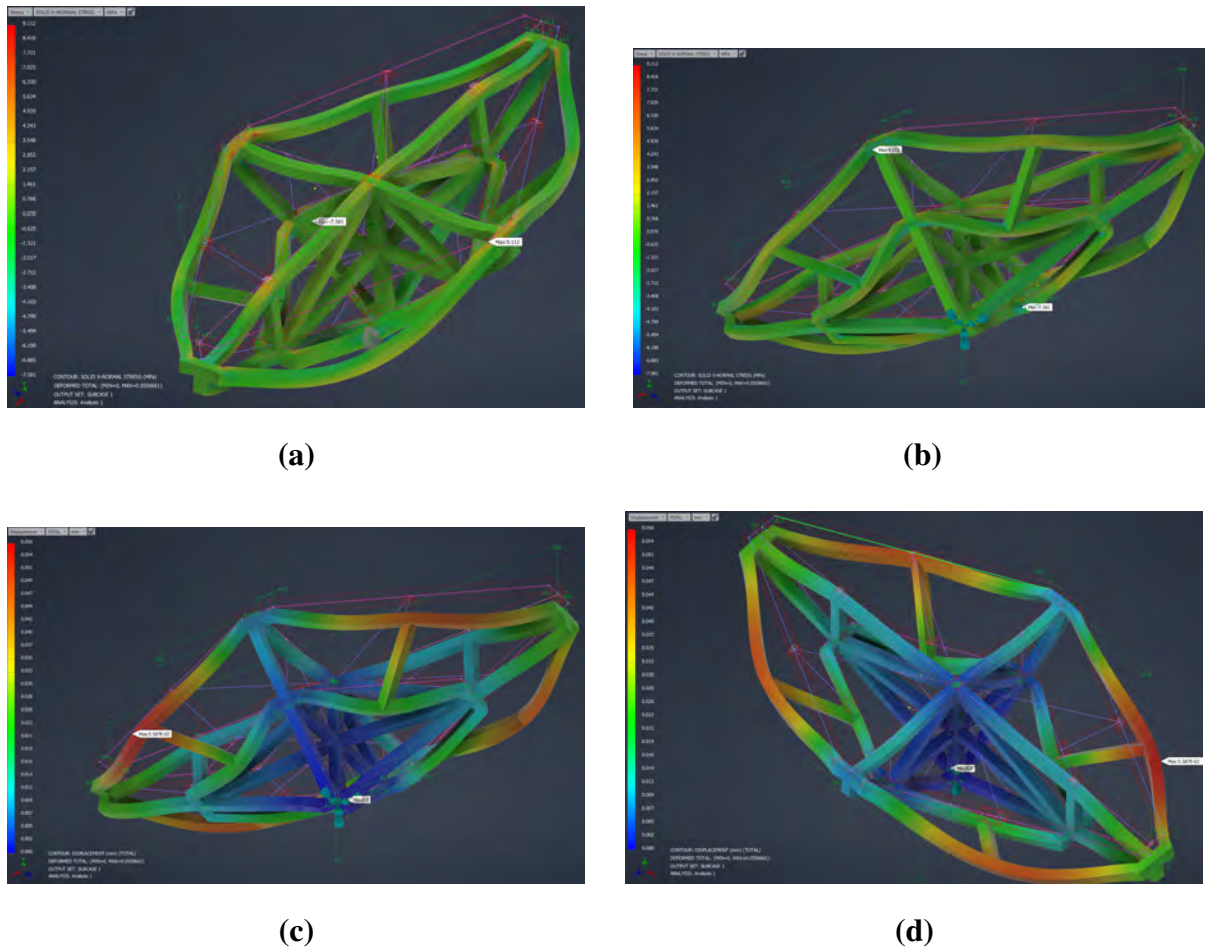
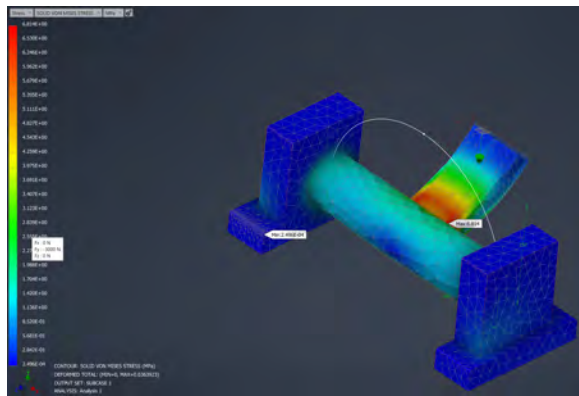


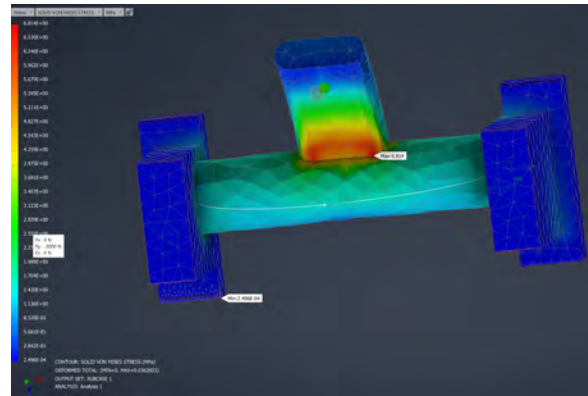
Figura 29: En la colección de imágenes se puede observar el resto de análisis para entender cargas indeseables en el modelo.

Del análisis anterior, se realizó con la siguiente figura descartada, siendo la forma de las bases delanteras vistas la mayoría en las patentes del capítulo 1.

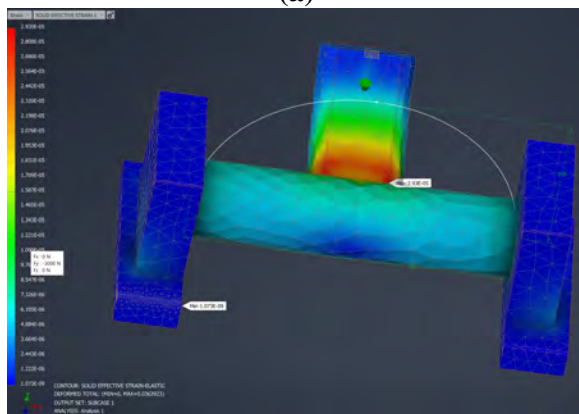
En la [Figura 30](#), podemos ver la imagen 'a' y 'b' se muestran las cargas efectivas en el modelo propuesto re diseñado para solo cargar parte delantera del sistema siendo un máximo de 6.814Mpa una carga muy grande para la paleta y el cilindro que sostienen el modelo; en las imágenes 'c' , 'd' y 'e' se muestran las cargas por tensión que se efectúan siendo de 2.93×10^{-5} la máxima tensión a la carga con el acero involucrado; en la imagen 'f' se muestra la carga efectiva del ejemplo siendo de 126.7 N lo que empujaría al modelo desde la base siendo esta inestable.



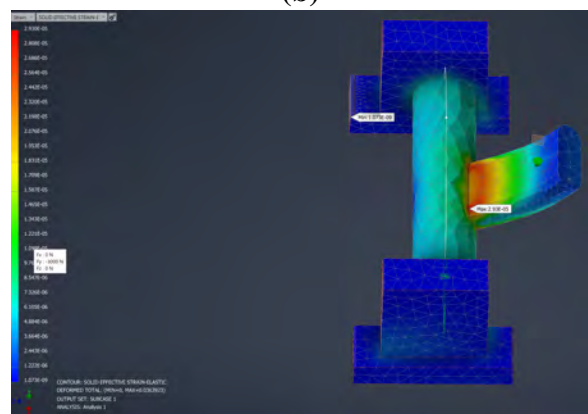
(a)



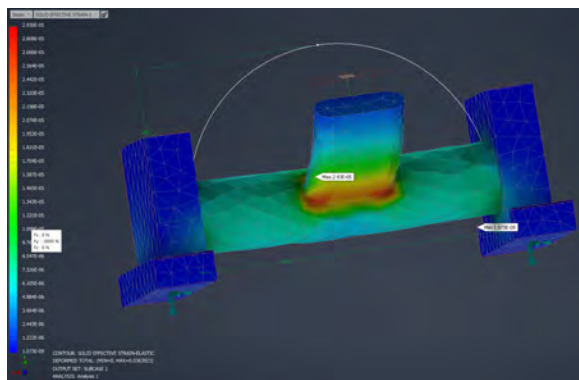
(b)



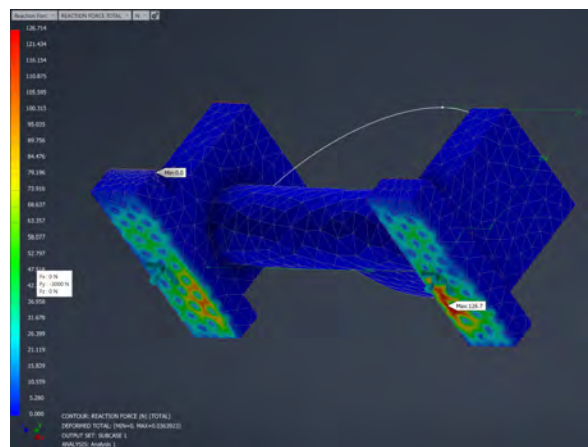
(c)



(d)



(e)

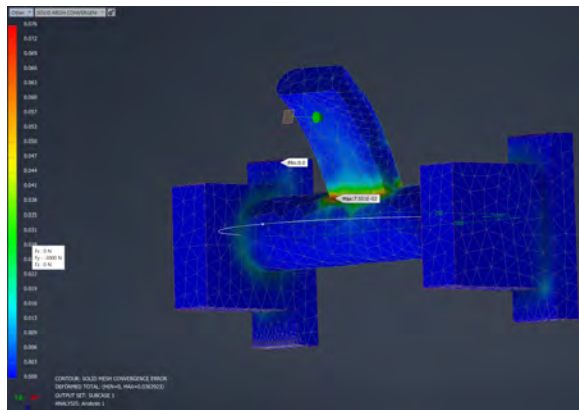


(f)

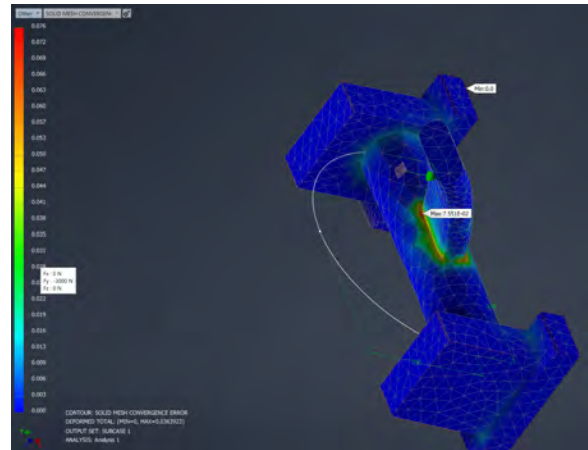
Figura 30: En la colección de imágenes se observa el análisis por cargas y por tensión del modelo rediseñado de la parte delantera.

En la [Figura 31](#), podemos ver las imágenes 'a', 'b' y 'c'; podemos observar la convergencia de las cargas, siendo reactiva la paleta y el cilindro con mayor espesura de cargas de más de

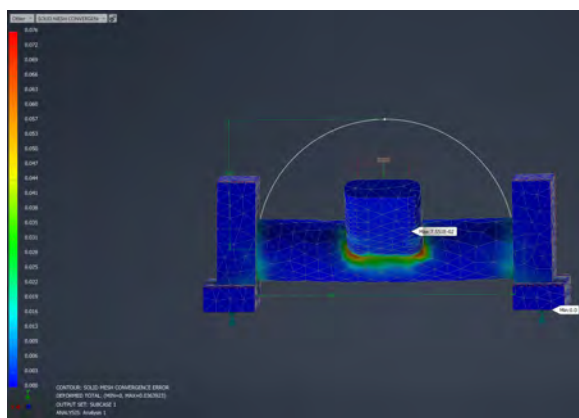
7.55e-2, siendo alto en la mayor parte de su unión. En las imágenes 'd', 'e' y 'f' se observan los desplazamientos de la estructura, prediciendo elongaciones máximas de 3.639e-2, pero reaccionando a parte de la paleta.



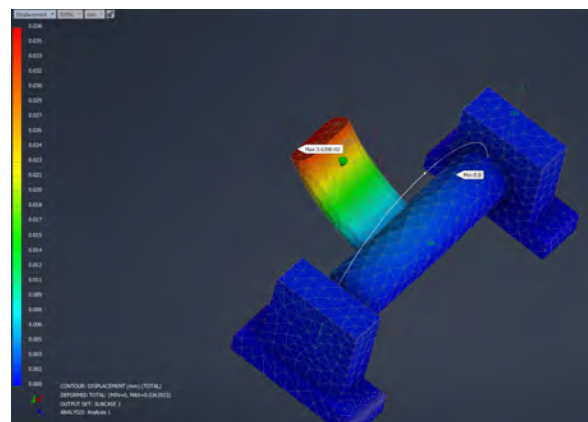
(a)



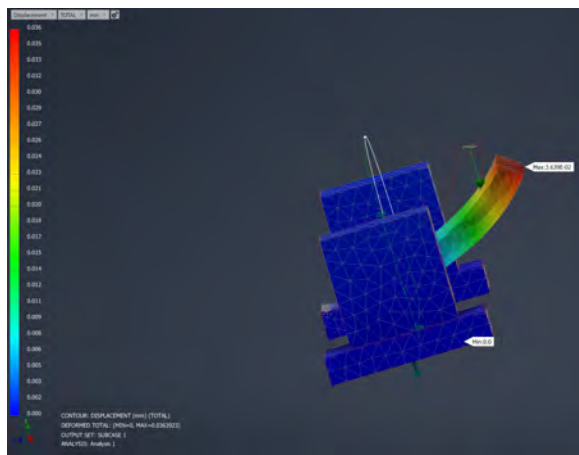
(b)



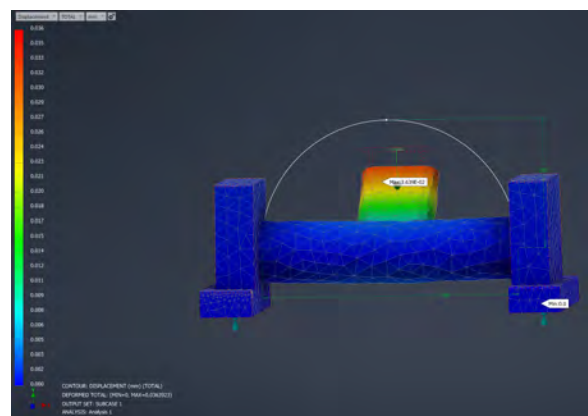
(c)



(d)



(e)

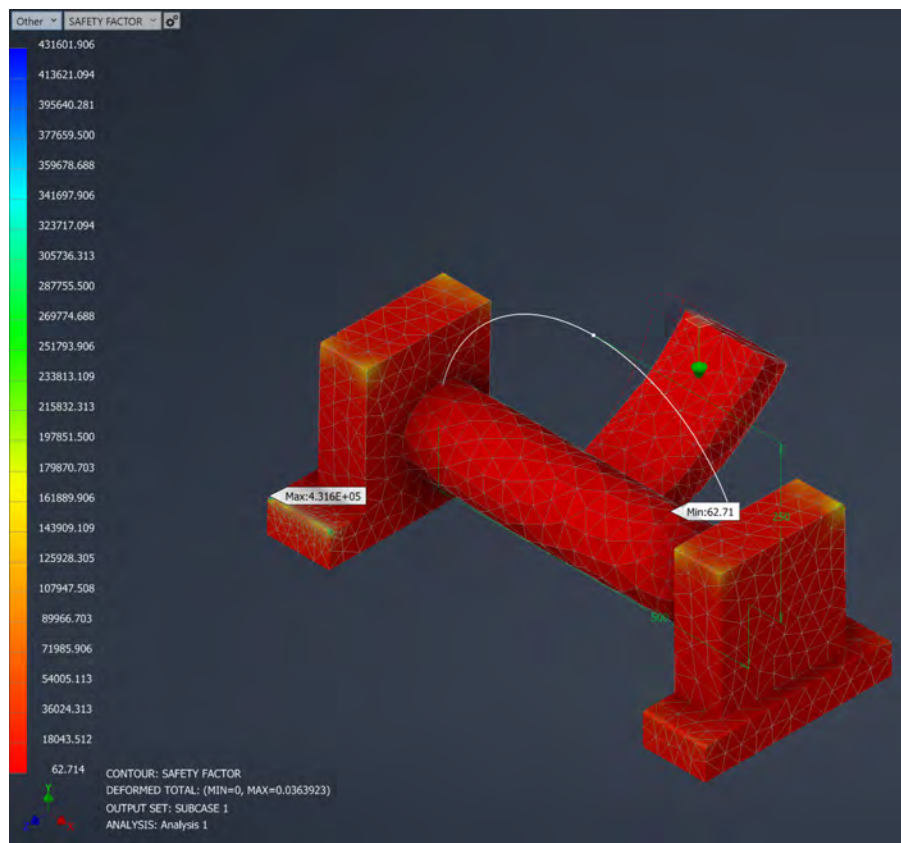


(f)

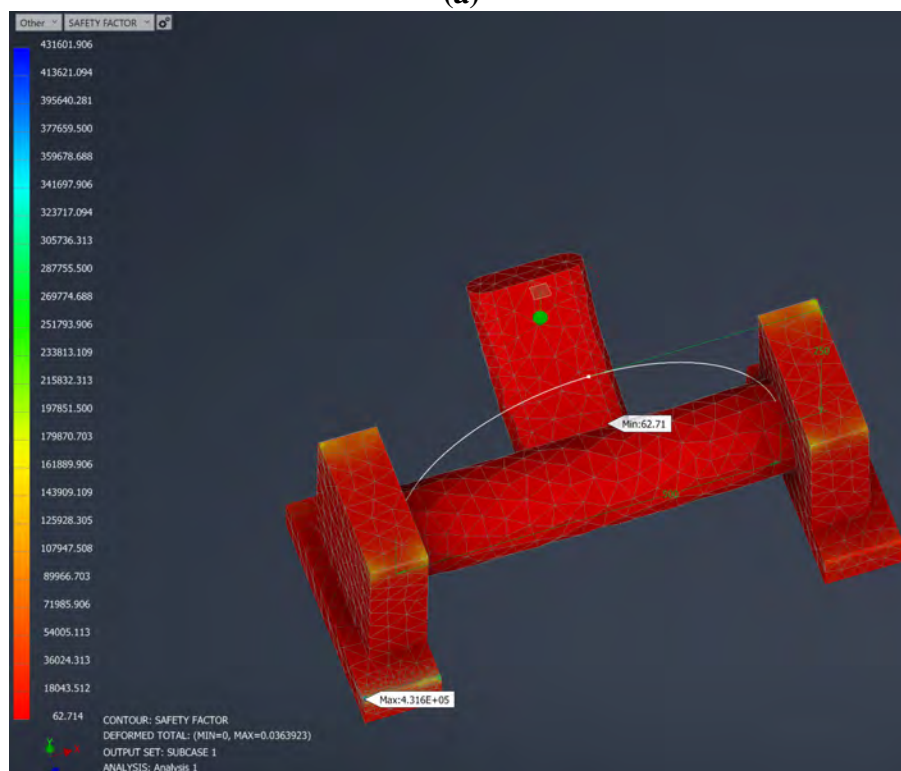
Figura 31: En la colección de figuras se muestran los estudios de la pieza para comprender comportamientos en su estructura.

En la [Figura 32](#), podemos ver las imágenes 'a' y 'b'; se observa el factor de seguridad, el cual

describe cargas máximas de $4.316e5$, siendo algo peligroso en las bases de la estructura, a pesar de que se idealiza el modelo con acero y no se percibe gran deformación, pero se requieren varias mejoras en la estructura.



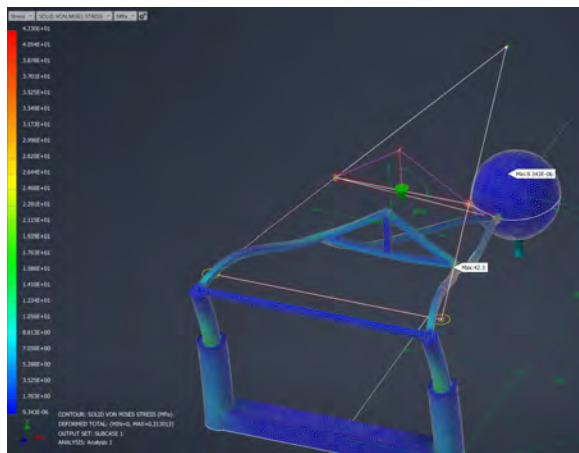
(a)



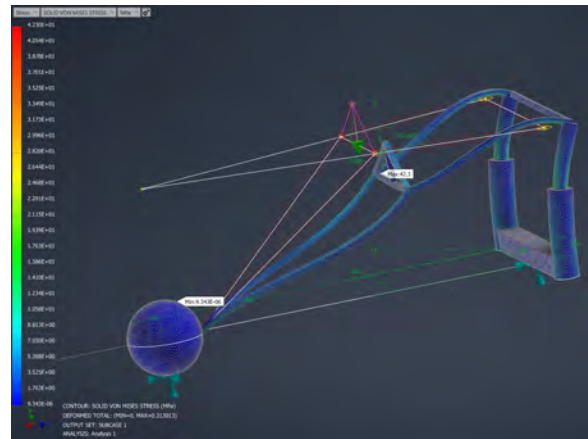
(b)

Figura 32: En la colección de imágenes se analizan partes cruciales del modelo descartado.

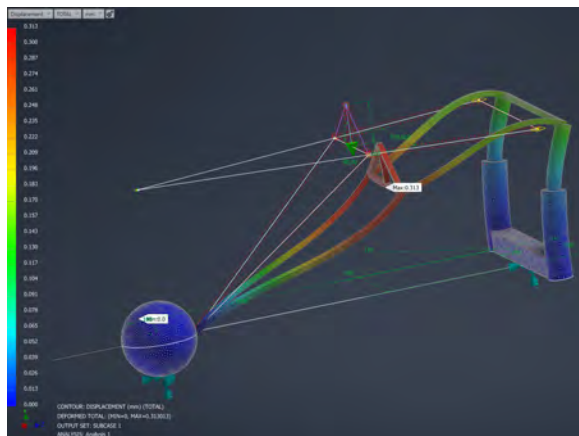
De acuerdo al previo análisis, se realizó con la siguiente figura descartada, siendo mejorada la base delantera y la unión de esta con actuadores. En la [Figura 33](#), podemos ver las imágenes ' a ' y ' b ' se muestran las cargas efectivas de a las que somete la estructura , a primera vista podemos notar una carga máxima de 42.3MPa siendo pequeña pero las cargas intentan doblar parte de los actuadores; En las imágenes ' c ' y ' d ' se demuestra el desplazamiento de 0.313mm siendo esta cantidad alta en la estructura , ya que el soporte no es viable en aplicación; en las imágenes ' e ' y ' f ' se observa la tensión a la que es sometida siendo máximo de 1.746×10^{-4} algo bajo entendiendo que la carga se desliza en la deformación de la estructura de acero.



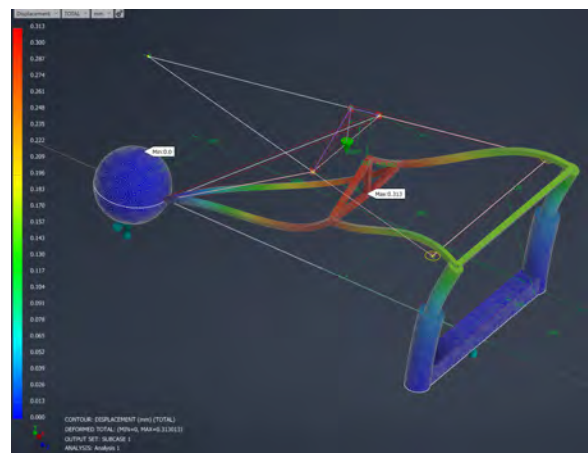
(a)



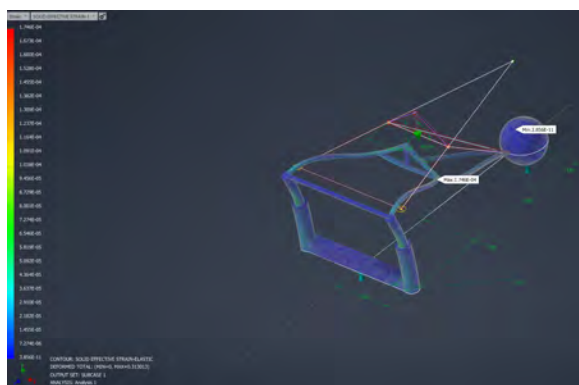
(b)



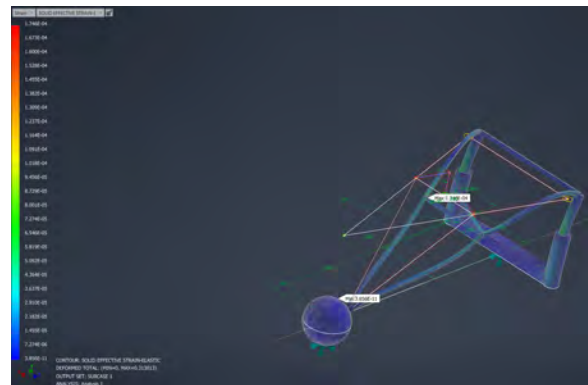
(c)



(d)



(e)

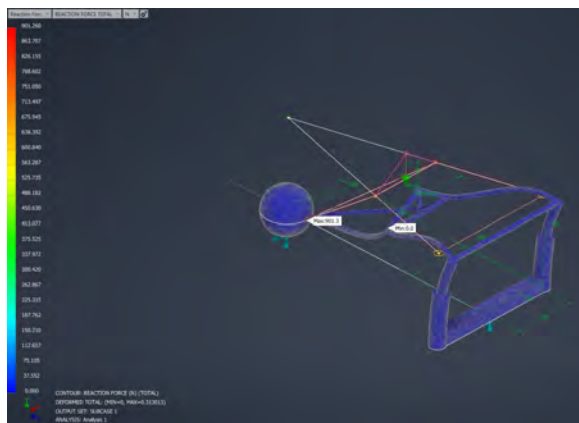


(f)

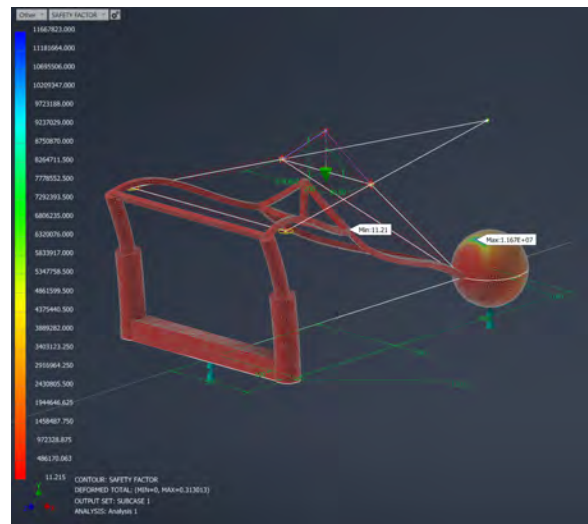
Figura 33: En la colección de imágenes se rediseña la parte delantera de la estructura, apoyando la parte media de la bicicleta, pero se intenta introducir actuadores en la estructura para apoyar las inclinaciones.

En la [Figura 34](#), podemos ver la imagen 'a' se observa la carga de 901.3 N siendo la reacción a

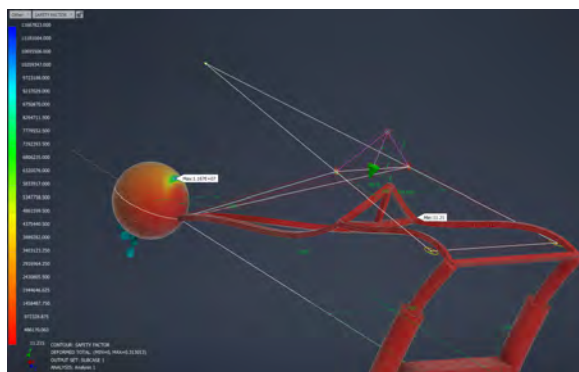
la carga desde la base así entendiendo que la parte afectada viene de repartir cargas entre los ángulos y nodos de la estructura; En la imagen 'b' y 'c' se demuestra el análisis por factor de seguridad siendo algo elevado en la base trasera de la estructura de $1.0167e7$ y mínima interna en la estructura , dando paso a encontrar fallas grandes al usar estructura para repartir cargas desde la base; en la figura 'd' y 'e' se enseña la deformación importante de la base o parte de esta deformación de $3.213e7$ siendo igual de grande y dejando de ser solido para la característica de este problema poniendo en riesgo el modelo y al usuario.



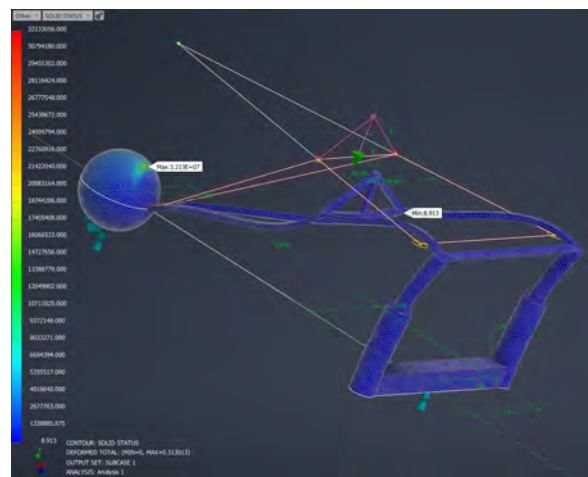
(a)



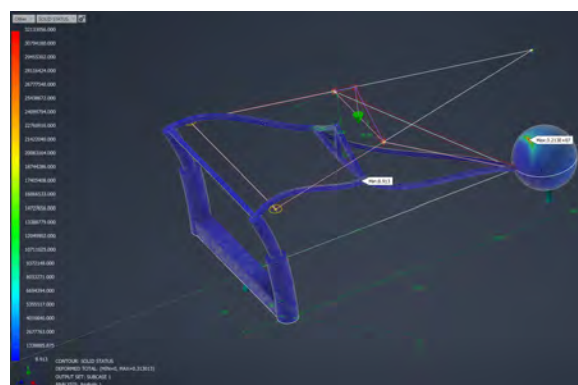
(b)



(c)



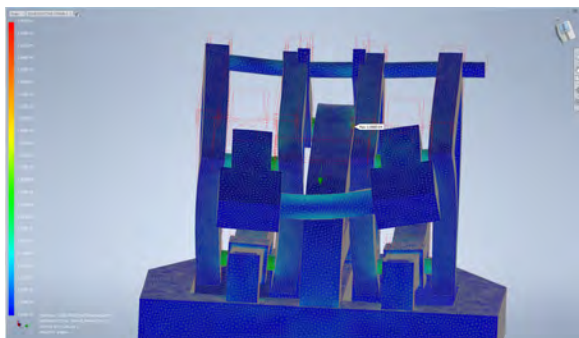
(d)



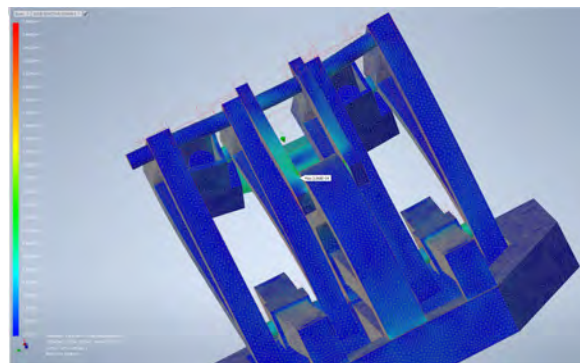
(e)

Figura 34: En la colección de imágenes se analiza el modelo entendiendo que es inviable, siendo así el análisis de sus fallas.

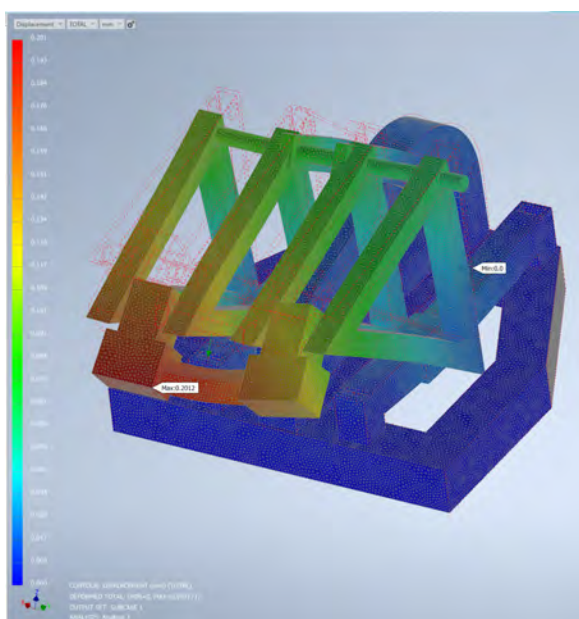
De acuerdo al previo análisis, se realizó con la siguiente figura descartada, siendo la forma inspirada de un banco de trabajo de un gimnasio. En la [Figura 35](#), podemos ver la imagen ' a ' y ' b ' se demuestran las cargas máximas de 3.068×10^{-4} MPa distribuyendo la mayoría de la carga en las guías y las direcciones de corredera del mecanismo; en las figuras ' c ' y ' d ' se demuestra el desplazamiento de 0.2012 mm que demuestran una gran deformación en donde iría la parte delantera de la bicicleta; en las figuras ' e ' y ' f ' se encuentra el factor de seguridad que se determina la mayor cantidad de concentración de esfuerzos en la base , produciendo un valor de 3.524×10^6 .



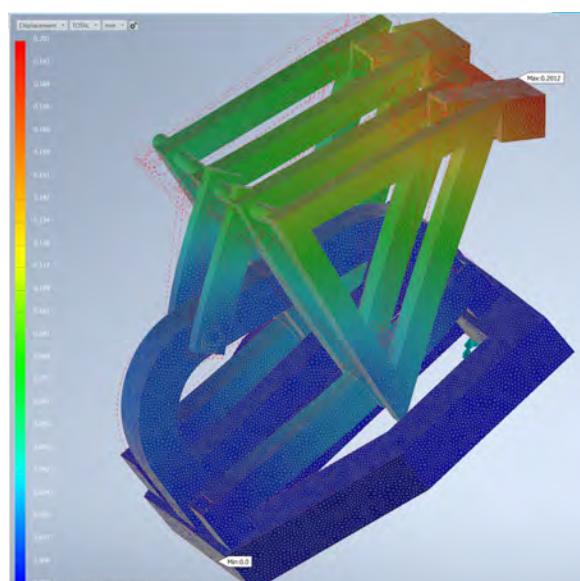
(a)



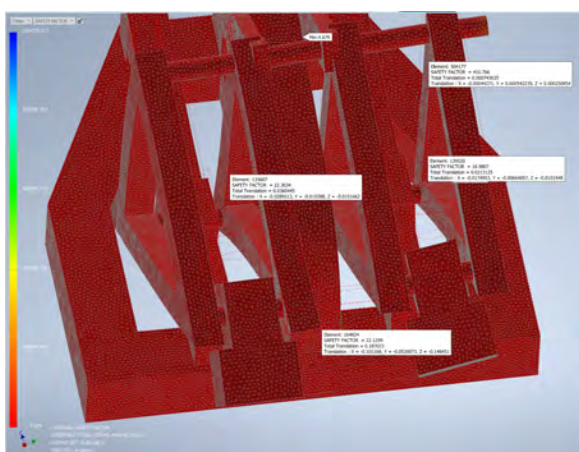
(b)



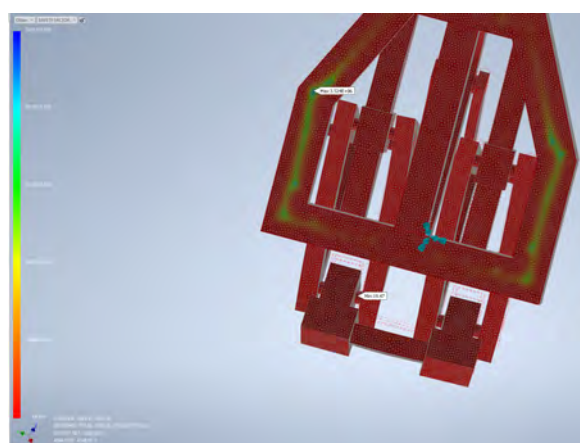
(c)



(d)



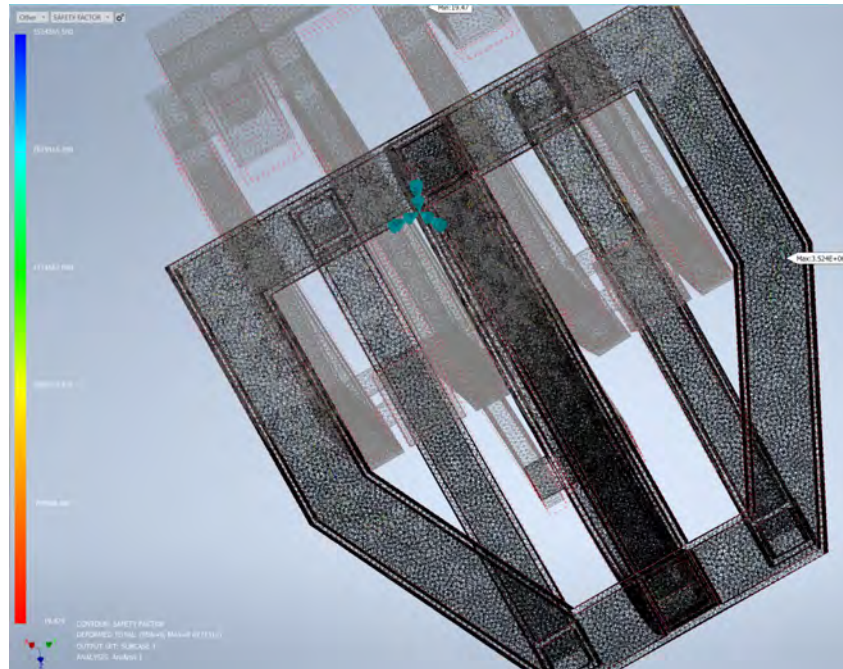
(e)



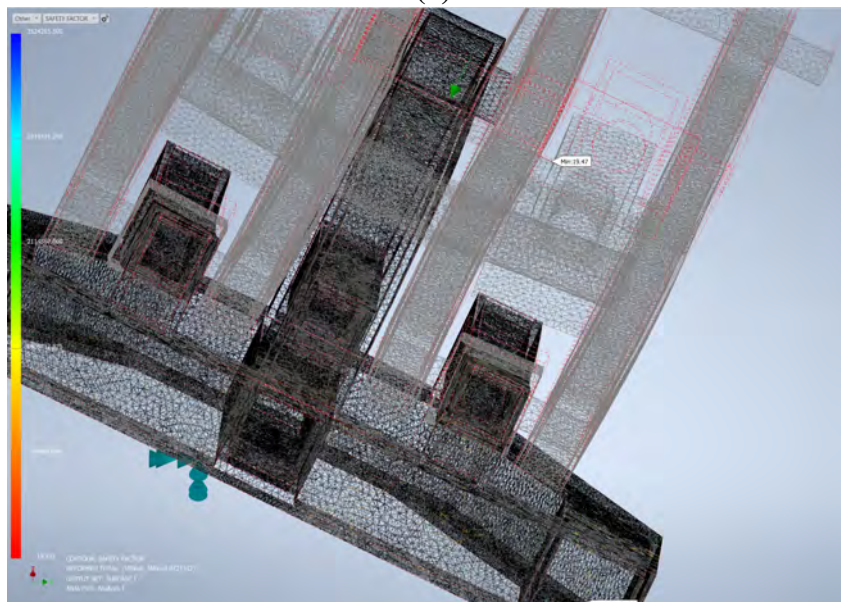
(f)

Figura 35: En la colección de imágenes se analiza la estructura rediseñada desde un banco de trabajo para repartir cargas en guías, al igual que su análisis nos demostrará maneras realistas de realizar un diseño mucho mejor.

En la [Figura 36](#), podemos ver las figuras 'a' y 'b'; se enseñan los análisis desde el factor de seguridad que internamente se pasan por alto. Dentro de las limitaciones del programa, se pueden determinar cargas grandes y peligrosas a lo largo de cada punto pequeño pero importante a la hora de repartir nodos y ángulos estrechos.



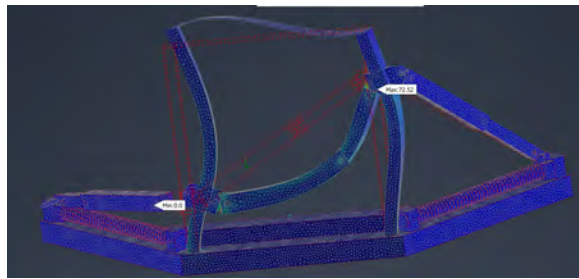
(a)



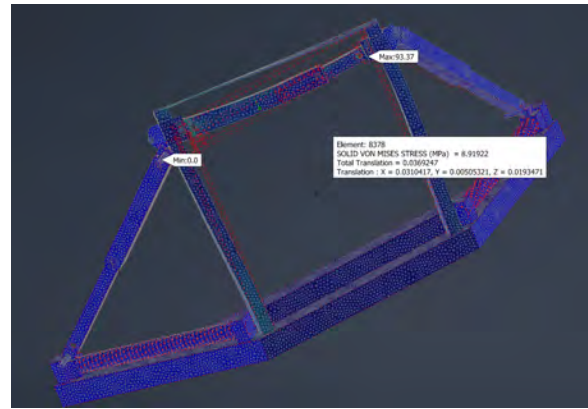
(b)

Figura 36: En la colección de imágenes se enseña el análisis determinado por cuerdas para encontrar cargas internas y mejorar el diseño.

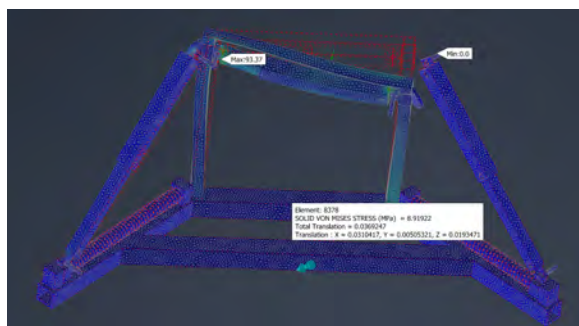
De acuerdo al previo análisis, se realizó con la siguiente figura más aceptable para conseguir validarla y dimensionarla para crear un prototipo. En la [Figura 37](#), podemos ver las figuras 'a', 'b', 'c', 'd' y 'e' se analizan solo las cargas en diferentes posiciones, alcanzando un máximo de 45°, y se alcanza a notar las diferentes cargas involucradas en la estructura en varias posiciones, siendo de 72 MPa, 93 MPa, 81 MPa y 88 MPa las cargas más importantes en los tres puntos sin poder flexionar realmente al acero.



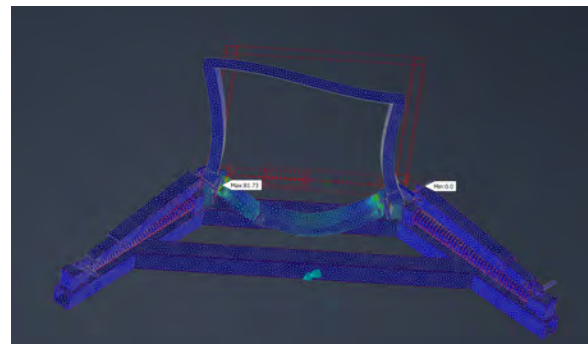
(a)



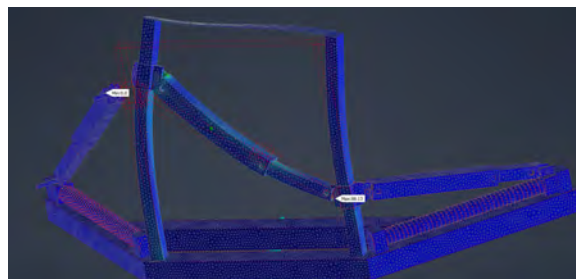
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 37: En la colección de imágenes, se encuentra el análisis de cargas del modelo propuesto a mecanizar, siendo inspirado por sus mejoras estructurales, guías de apoyo en cargas, base amplia para recargar mayor carga solo delantera y parte de su transmisión de cargas.

5.3 Construcción de prototipo (Etapa de mejoras).

La estructura de PTR se mecanizó mediante procesos de corte, taladrado y soldadura, siguiendo las especificaciones de los planos.

5.3.1 Mecanizado del prototipo.

De acuerdo a los planos, se realizó la creación de la base con PTR cuadrado; al principio se pensó en hacerlo de puro PTR. Siendo que el maquinazo fue exitoso, se presentaron problemas en su experimentación. A continuación se demuestra el mecanizado.

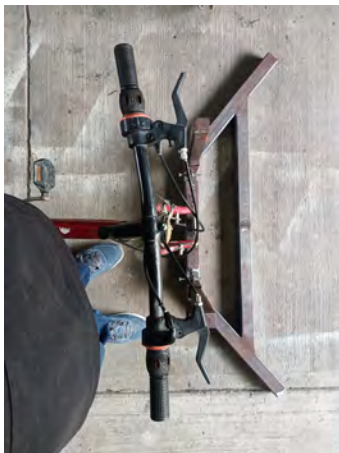
En la [Figura 38](#), podemos ver las imágenes 'a', 'b' y 'c'; se observa la creación de la base, así como la elección de la bicicleta estándar de medidas promedio estandarizadas sin modificar su estructura. En las imágenes 'd' y 'e' se observa el previo problema con el manubrio y su mejora.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 38: En la colección de imágenes se pueden observar los trabajos más complejos que fueron detallados.

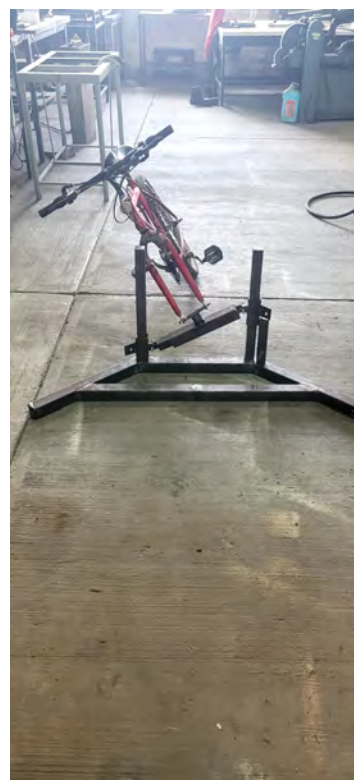
5.3.2 Experimentación con el modelo principal y su modificación.

Detallando más las primeras pruebas, se encontró que las guías de PTR conseguían hacer los ángulos correctamente, pero se tenían los primeros problemas con la fuerza resultante cortante en las guías. Otros problemas, como la posición de los actuadores en sus pestañas para sujetarlos y la base trasera, fueron cubiertos para sus modificaciones futuras.

En la [Figura 39](#), podemos ver las imágenes 'a' y 'b' se observa la pieza delantera probada en inclinación sin actuadores. En las imágenes 'c' y 'd' se observan las inclinaciones y su ángulo soportado con la modificación delantera para el manubrio; en las imágenes 'e' y 'f' se observa la creación de la base trasera y el acomodo de actuadores previo a esas pruebas.



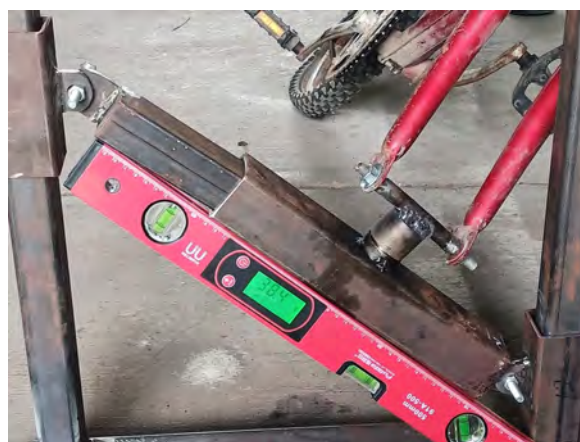
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 39: En la colección de imágenes se observa el primer modelo diseñado probando primeras pruebas experimentales para su validación.

Se puede observar a continuación los diferentes ángulos y problemas presentados, analizando maneras de modificar la estructura y presentarlo en respuesta para mejorar la estructura.

En la [Figura 40](#), podemos ver la imágenes 'a' y 'b' se observa el acomodo de los actuadores y el problema con la resultante de las cargas siendo peligroso y no viable este modelo quitando también la posición de los actuadores ; en la imagen 'c' se observa el problema de traba en la primera base trasera ya que se traba y es difícil modificar esta base para un uso posterior; en la imagen 'd' se observa el el acomodo de los actuadores pero su modificación requiere ser operada en tubería o mejorar la posición de los actuadores.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 40: En las imágenes se observa el problema con el PTR cuadrado, ya que las guías se traban en un punto de la estructura, haciendo un problema.

5.3.3 Modificación de prototipo (base delantera).

Se realizó la modificación de las guías por tuberías de acero para mejorar el desplazamiento; la modificación nos ayudó a evitar fuerzas resultantes.

En la [Figura 41](#), podemos ver en las imágenes 'a', 'b' y 'c' se observan las modificaciones

hechas con el uso de tubería en las guías; en las imágenes 'd', 'e' y 'f' se observa el uso de los actuadores y su posterior ensamblaje.



(a)



(b)



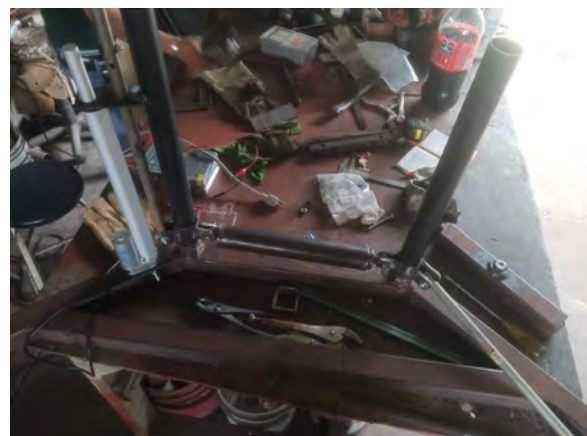
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 41: En la colección de imágenes se observan las modificaciones necesarias para hacer las guías circulares y evitar el pellizcar las estructuras necesarias.

5.3.4 Montaje de los actuadores y experimentacion.

Se llevaron a cabo las pruebas con los actuadores para montarlos y experimentar con ellos, ayudando a dar apoyo y validación al prototipo y demostrar que mecánicamente eran viables las guías por tuberías.

En la [Figura 42](#), podemos ver las imágenes 'a', 'b', 'c', 'd', 'e' y 'f'; se observa el ensamblaje de piezas con los actuadores en funcionamiento.



(a)



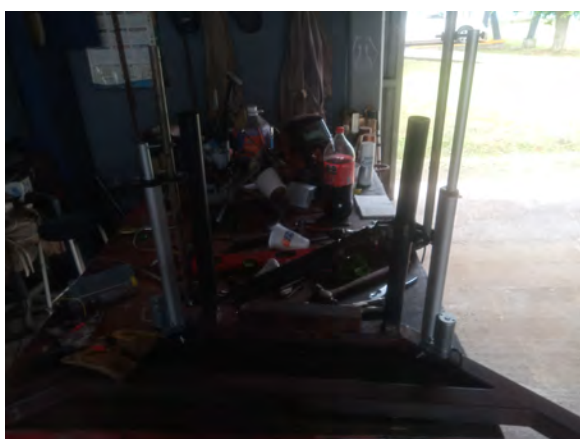
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 42: En la colección de imágenes se observa el ensamble de los actuadores en la nueva modificación y su prueba de engrasado en los tubos guía.

5.3.5 Experimentación con la base delantera.

Pruebas de validación con cargas para determinar fallas mecánicas. Con el uso del multímetro se hicieron mediciones para determinar la corriente de los actuadores, así como su repetitibilidad a posterior uso de ellos en pruebas con usuarios.

En la [Figura 43](#), podemos ver las imágenes 'a', 'b', 'c', 'd', 'e' y 'f' son las primeras pruebas de guía y cargas de los actuadores para su validación.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 43: En la colección de imágenes se observa el análisis experimental principal con cargas de 10 a 20 kilos, principalmente para los primeros análisis.

Experimentación con cargas mayores y siguiendo el uso de los multímetros para validar su repetitividad sin deformaciones aparentes.

En la [Figura 44](#), podemos ver las imágenes 'a', 'b', 'c', 'd', 'e' y 'f'; se observan previo análisis experimental con cargas variables, siendo lo principal el analizar el paso de corriente con los multímetros.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 44: En la colección de imágenes se analiza experimentalmente con mayor número de cargas y el paso de corriente.

5.3.6 Prueba de base delantera con usuario.

Se usó a un usuario de mayor carga aproximada de 90 kg para determinar la validación mecánica con los actuadores y su aparente estabilidad.

En la [Figura 45](#), podemos ver las imágenes 'a', 'b' y 'c'; se enseñan las pruebas por cargas realistas de solo la parte delantera, siendo viable el uso sin deformaciones.



(a)



(b)



(c)

Figura 45: En la colección de imágenes se observan las pruebas para verificar parte del prototipo, solo de la parte delantera con carga de una persona de 80 kilos aproximadamente.

5.3.7 Modificación y diseño de base trasera.

Se diseñó y realizó una base trasera para el uso de esta base, modificando así una tubería gruesa. Asimismo, se hicieron pruebas de estabilidad, pero se optó por mejorar el diseño con dos tuberías dobladas para mejorar el agarre del usuario, evitando la deformación de los agarres de sujeción vistos por experimentación de esta.

En la [Figura 46](#), podemos ver las imágenes 'a', 'b' y 'c' que enseñan la primera modificación con una tubería, encontrando problemas con la recarga de peso; en la imagen 'd' se modifica la estructura por problemas de cargas para replantear la parte trasera; en las imágenes 'e' y 'f' se observa la prueba de las 2 tuberías dobladas y sus pruebas para recargar peso.



(a)



(b)



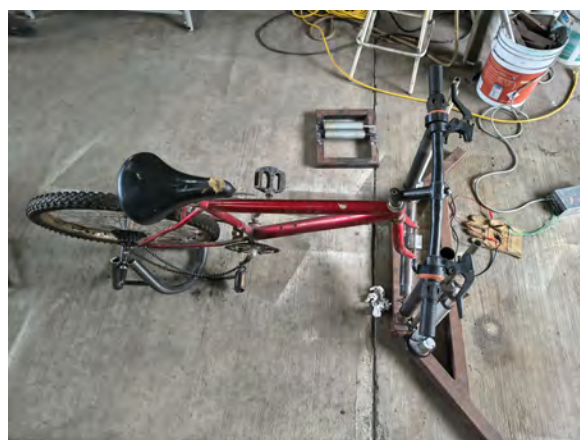
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 46: En la colección de imágenes se demuestran varias modificaciones para la parte trasera, siendo viable el uso de tuberías.

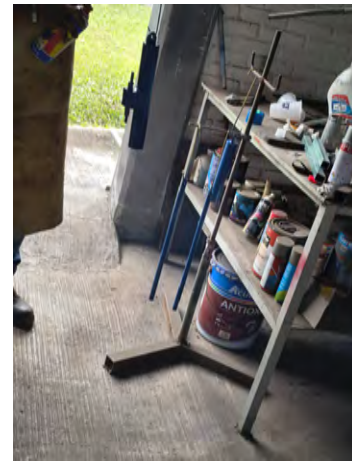
5.3.8 Uso de pintura para evitar corrosión.

Se aplicaron capas base y un color azul para la base delantera y trasera para evitar corrosión en estos componentes.

En la [Figura 47](#), podemos ver las imágenes 'a', 'b', 'c', 'd' y 'e' se observa el aplicado de pintura y su posterior ensamblaje para evitar problemas por corrosión.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 47: En la colección de imágenes se puso pintura en espray para detener la corrosión del PTR con una base neutra y azul en el caso de los 2 modelos y piezas ensambladas.

5.3.9 Ensamblaje y traslado.

En la colección de imágenes siguiente se enseña el proceso de ensamblaje completo después de pintar las piezas y modificar partes de la bicicleta, como el asiento, usando uno de espuma gel deformable para mayor comodidad, condicionando que se puede modificar. Además, tenía problemas con la rueda trasera y el mecanismo de transmisión, teniéndose que reparar y modificar para que fuera de 1 sola velocidad y modificar parte de la maza trasera de la rueda para que fuera mejor la transmisión.

En la [Figura 48](#), podemos ver las imágenes 'a', 'b' y 'c'; se muestran las modificaciones realizadas y el ensamble previo; en las imágenes 'd' y 'e' se trasladó la estructura y la bicicleta al laboratorio ABS de maestría en ingeniería electrónica para sus modificaciones posteriores.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 48: En la colección de imágenes se enseña el proceso de ensamblaje completo.

5.4 Pruebas mecatronicas.

El cerebro del sistema se diseñó en torno al microcontrolador ESP32. El desarrollo de la electrónica y el software se llevó a cabo siguiendo estos pasos:

Diseño del circuito de control: Se diseñó el sistema desde la conexión de una fuente conmutada de 24 V a 7 A, todo esto conectado a un regulador de voltaje de control desde el ESP32. Se elaboró un diagrama de circuito esquemático detallando la conexión entre los componentes. El pin de señal del servomotor se conectó directamente a un pin de salida digital del ESP32 con capacidad PWM (Modulación por Ancho de Pulso). La alimentación del servomotor (VCC y GND) se gestionó a través de una fuente de alimentación externa de 5V, ya que el regulador de voltaje del ESP32 no suministra la corriente necesaria, compartiendo una tierra común (GND) con el microcontrolador para asegurar la integridad de la señal.

Programación del microcontrolador: Se utilizó el entorno de desarrollo Arduino IDE con el paquete de soporte para placas ESP32. El código fuente se estructuró para: Inicializar la comunicación serial para depuración. Configurar el pin GPIO como salida PWM para el control del actuador. Implementar una función con botones switch para detener los actuadores en posiciones límites finales (tope arriba y tope abajo). Establecer la comunicación WIFI con el ESP32, creando un servidor y una característica que permita recibir comandos de forma inalámbrica desde una aplicación externa en una página independiente para ajustar el nivel de resistencia. En la conexión se establecieron sensores de corriente para analizar la corriente.

5.5 Desarrollo del Sistema de Control.

El sistema de control está basado en un microcontrolador ESP32, el cual gestiona la posición de dos actuadores lineales mediante retroalimentación ultrasónica y una interfaz de control web.

5.5.1 Algoritmo de control de posición.

El control se implementa mediante un lazo cerrado con histéresis. El error de posición $e(t)$ se define como:

$$e(t) = d_{actual}(t) - d_{objetivo} \quad (5.1)$$

Para evitar oscilaciones mecánicas debidas a la inercia del actuador, se establece una zona muerta

de ± 0.7 cm. El comportamiento del sistema sigue la lógica:

- $Síe(t) > 0.7$, el actuador se retrae.
- $Síe(t) < -0.7$, el actuador se extiende.
- $Sí|e(t)| \leq 0.7$, el actuador se detiene.

5.5.2 Cálculos Cinemáticos.

El sistema calcula en tiempo real dos variables críticas para la orientación de la plataforma: el ángulo lateral (α) y el ángulo de elevación perpendicular (β).

$$\alpha = \arctan\left(\frac{d_1 - d_2}{L_{base}}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (5.2)$$

Donde $L_{base} = 45.0$ cm. Asimismo, el ángulo perpendicular se obtiene mediante el promedio de las distancias respecto al eje de giro:

$$\beta = \arctan\left(\frac{(d_1 + d_2)/2}{L_{eje}}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (5.3)$$

5.5.3 Implementación del Firmware.

A continuación se presenta el código fuente [Subsección 5.5.3](#) desarrollado en el entorno de Arduino IDE para el ESP32. El cual se encuentra comentado para un mayor entendimiento.

```

1  /**
2   * SISTEMA DE CONTROL DE ACTUADORES LINEALES CON ESP32
3   *
4   * Este código implementa un servidor web en un ESP32 para controlar dos actuadores
5   * equipados con sensores ultrasónicos HC-SR04. El sistema permite:
6   * - Control manual de extensión/retracción de cada actuador
7   * - Establecimiento de posiciones objetivo mediante sliders en la interfaz web
8   * - Cálculo en tiempo real de ángulos de inclinación basados en las posiciones
9   * - Visualización de datos mediante una interfaz web responsive
10  */

```

```

11
12 // =====
13 // LIBRERÍAS NECESARIAS
14 // =====
15 #include <WiFi.h>           // Para conectividad WiFi del ESP32
16 #include <WebServer.h>      // Para crear el servidor web HTTP
17 #include <Arduino.h>        // Librería estándar de Arduino para ESP32
18 #include <math.h>           // Para funciones matemáticas (atan, PI, etc.)
19
20 // =====
21 // CONFIGURACIÓN DE RED WiFi
22 // =====
23 // Credenciales de la red a la que se conectará el ESP32
24 const char* ssid = "Laboratorio MIA";
25 const char* password = "L@boratorio.1#";
26
27 // =====
28 // CONFIGURACIÓN DE PINES PARA LOS ACTUADORES (BTS7960)
29 // =====
30 // El BTS7960 es un driver de puente H para motores DC de alta potencia.
31 // Cada actuador requiere 3 pines de control:
32 // - EN: Enable (habilita el driver)
33 // - RPWM: Señal PWM para movimiento en dirección horaria (extensión)
34 // - LPWM: Señal PWM para movimiento en dirección antihoraria (retracción)
35
36 // Actuador 1 (Izquierdo)
37 const int pinEN1 = 25; // Pin de enable para el driver del actuador 1
38 const int pinRPWM1 = 26; // Pin PWM para extensión del actuador 1
39 const int pinLPWM1 = 27; // Pin PWM para retracción del actuador 1
40
41 // Actuador 2 (Derecho)
42 const int pinEN2 = 19; // Pin de enable para el driver del actuador 2

```

```

43  const int pinRPWM2 = 18;    // Pin PWM para extensión del actuador 2
44  const int pinLPWM2 = 4;     // Pin PWM para retracción del actuador 2
45
46  // =====
47  // CONFIGURACIÓN DE PINES PARA SENSORES ULTRASÓNICOS HC-SR04
48  // =====
49  // Cada sensor ultrasónico requiere:
50  // - TRIG: Pin de disparo (salida) - Envía pulso ultrasónico
51  // - ECHO: Pin de eco (entrada) - Recibe el pulso reflejado
52
53  // Sensor 1 (Actuador Izquierdo)
54  const int trig1 = 32;       // Pin TRIG del sensor 1
55  const int echo1 = 34;       // Pin ECHO del sensor 1
56
57  // Sensor 2 (Actuador Derecho)
58  const int trig2 = 33;       // Pin TRIG del sensor 2
59  const int echo2 = 35;       // Pin ECHO del sensor 2
60
61  // =====
62  // CONSTANTES GEOMÉTRICAS DEL SISTEMA
63  // =====
64  const float DIST_BASE = 45.0; // Distancia entre ejes de actuadores (cm) - base del
65  const float DIST_EJE  = 102.0; // Distancia desde el eje de pivotaje al punto de med
66  const float DIST_MAX  = 30.0; // Extensión máxima permitida (cm) - límite físico
67  const float DIST_MIN  = 3.0;  // Extensión mínima permitida (cm) - límite físico
68  const int  velocidadPWM = 200; // Velocidad de movimiento (0-255) - 200 es ~78% de
69
70  // =====
71  // VARIABLES GLOBALES
72  // =====
73  WebServer server(80); // Servidor web en puerto 80 (HTTP estándar)
74  String estadoActual[2] = {"IDLE", "IDLE"}; // Estado de cada actuador: IDLE, Extendie

```

```

75 float distancias[2] = {0.0, 0.0};           // Lecturas actuales de distancia de cada se
76 float distanciaObjetivo[2] = {-1.0, -1.0}; // Posición objetivo para cada actuador (-
77
78 // =====
79 // FUNCIÓN: leerDistancia
80 // PROPÓSITO: Realiza una medición con sensor ultrasónico HC-SR04
81 // PARÁMETROS:
82 //   - tPin: Pin TRIG del sensor
83 //   - ePin: Pin ECHO del sensor
84 // RETORNO: Distancia medida en centímetros (0 si hay error)
85 // =====
86 float leerDistancia(int tPin, int ePin) {
87     // Generar pulso de disparo de 10µs en el pin TRIG
88     digitalWrite(tPin, LOW);      // Asegurar pin en bajo
89     delayMicroseconds(2);          // Esperar 2µs según especificación
90     digitalWrite(tPin, HIGH);      // Enviar pulso alto
91     delayMicroseconds(10);         // Mantener alto por 10µs
92     digitalWrite(tPin, LOW);       // Finalizar pulso
93
94     // Medir duración del pulso de ECO con timeout de 25000µs
95     // pulseIn espera un pulso HIGH y retorna su duración en microsegundos
96     long dur = pulseIn(ePin, HIGH, 25000);
97
98     // Calcular distancia: velocidad del sonido = 340 m/s = 0.034 cm/µs
99     // La onda viaja ida y vuelta, por eso se divide entre 2
100    float d = dur * 0.034 / 2;
101
102    // Validar medición: si es <=0 o >400cm (fuera de rango), retornar 0
103    return (d <= 0 || d > 400) ? 0 : d;
104 }
105
106 // =====

```

```

107 // FUNCIÓN: detener
108 // PROPÓSITO: Detiene el movimiento de un actuador específico
109 // PARÁMETROS: m - Número de actuador (1 o 2)
110 // =====
111 void detener(int m) {
112     distanciaObjetivo[m-1] = -1.0; // Cancelar cualquier objetivo pendiente
113
114     if(m==1) { // Actuador 1
115         digitalWrite(pinEN1, LOW); // Deshabilitar driver
116         ledcWrite(pinRPWM1, 0); // Señal PWM a 0 en dirección extensión
117         ledcWrite(pinLPWM1, 0); // Señal PWM a 0 en dirección retracción
118     } else { // Actuador 2
119         digitalWrite(pinEN2, LOW); // Deshabilitar driver
120         ledcWrite(pinRPWM2, 0); // Señal PWM a 0 en dirección extensión
121         ledcWrite(pinLPWM2, 0); // Señal PWM a 0 en dirección retracción
122     }
123
124     estadoActual[m-1] = "Detenido"; // Actualizar estado
125 }
126
127 // =====
128 // FUNCIÓN: extender
129 // PROPÓSITO: Inicia movimiento de extensión de un actuador
130 // PARÁMETROS: m - Número de actuador (1 o 2)
131 // NOTA: La extensión hace que el actuador empuje la plataforma hacia arriba
132 // =====
133 void extender(int m) {
134     if(m==1) { // Actuador 1
135         digitalWrite(pinEN1, HIGH); // Habilitar driver
136         ledcWrite(pinLPWM1, 0); // Asegurar que LPWM esté en 0
137         ledcWrite(pinRPWM1, velocidadPWM); // Activar extensión con PWM especificado
138     } else { // Actuador 2

```

```

139     digitalWrite(pinEN2, HIGH);      // Habilitar driver
140     ledcWrite(pinRPWM2, 0);          // Asegurar que RPWM esté en 0
141     ledcWrite(pinLPWM2, 0);          // Asegurar que LPWM esté en 0
142     ledcWrite(pinRPWM2, velocidadPWM); // Activar extensión con PWM especificado
143 }
144
145 estadoActual[m-1] = "Extendiendo"; // Actualizar estado
146 }
147
148 // =====
149 // FUNCIÓN: retraer
150 // PROPÓSITO: Inicia movimiento de retracción de un actuador
151 // PARÁMETROS: m - Número de actuador (1 o 2)
152 // NOTA: La retracción hace que el actuador baje la plataforma
153 // =====
154 void retraer(int m) {
155     if(m==1) { // Actuador 1
156         digitalWrite(pinEN1, HIGH);      // Habilitar driver
157         ledcWrite(pinRPWM1, 0);          // Asegurar que RPWM esté en 0
158         ledcWrite(pinLPWM1, velocidadPWM); // Activar retracción con PWM especificado
159     } else { // Actuador 2
160         digitalWrite(pinEN2, HIGH);      // Habilitar driver
161         ledcWrite(pinRPWM2, 0);          // Asegurar que RPWM esté en 0
162         ledcWrite(pinLPWM2, 0);          // Asegurar que LPWM esté en 0
163         ledcWrite(pinLPWM2, velocidadPWM); // Activar retracción con PWM especificado
164     }
165
166     estadoActual[m-1] = "Retrayendo"; // Actualizar estado
167 }
168
169 // =====
170 // FUNCIÓN: handleData

```

```

171 // PROPÓSITO: Maneja la petición GET /data desde el cliente web
172 //           Calcula ángulos y envía datos en formato JSON
173 // =====
174 void handleData() {
175     // Calcular diferencia de alturas entre actuadores
176     float dif = distancias[0] - distancias[1];
177
178     // Calcular ángulo de inclinación lateral (respecto a la base de 45cm)
179     // atan(opuesto/adyacente) convierte a radianes, luego a grados
180     float angL = atan(dif / DIST_BASE) * (180.0 / PI);
181
182     // Calcular altura promedio de los actuadores
183     float altProm = (distancias[0] + distancias[1]) / 2.0;
184
185     // Calcular ángulo de elevación perpendicular (respecto al eje de 102cm)
186     float angP = atan(altProm / DIST_EJE) * (180.0 / PI);
187
188     // Construir objeto JSON con todos los datos
189     String json = "{\"d1\":\"" + String(distancias[0], 1) + "\",\"d2\":\"" + String(distancia
190         "\",\"e1\":\"" + estadoActual[0] + "\",\"e2\":\"" + estadoActual[1] + "
191         "\",\"angL\":\"" + String(angL, 1) + "\",\"angP\":\"" + String(angP, 1) + "
192
193     // Enviar respuesta JSON al cliente
194     server.send(200, "application/json", json);
195 }
196
197 // =====
198 // FUNCIÓN: handleRoot
199 // PROPÓSITO: Maneja la petición GET / (página principal)
200 //           Genera y envía la interfaz web HTML al cliente
201 // =====
202 void handleRoot() {

```

```

203 // R"rawliteral( ... )rawliteral" es una sintaxis de C++ para cadenas multilínea
204 // Permite escribir HTML directamente sin necesidad de escapes
205 String html = R"rawliteral(
206 <!DOCTYPE html>
207 <html>
208 <head>
209     <meta charset="UTF-8">
210     <title>Control Pro 45-102</title>
211     <style>
212         /* Estilos CSS para una interfaz moderna y responsive */
213         body { font-family: sans-serif; text-align: center; background: #0f172a; color:
214         .card { background: #1e293b; padding: 20px; border-radius: 15px; margin: 10px;
215         .val { font-size: 2em; color: #38bdf8; font-weight: bold; margin: 10px 0; }
216         .progress-container { background: #334155; border-radius: 10px; height: 20px; w
217         .progress-bar { background: #38bdf8; height: 100%; width: 0%; transition: width
218         .btn { padding: 12px; margin: 5px; border: none; border-radius: 5px; cursor: po
219         .btn-ext { background: #10b981; } .btn-ret { background: #3b82f6; } .btn-stop {
220         input[type=range] { width: 90%; margin: 15px 0; }
221         h4 { margin: 5px 0; color: #94a3b8; }
222     </style>
223 </head>
224 <body>
225     <h2> Panel de Control de Actuadores</h2>
226
227     <!-- Tarjeta de ángulos calculados -->
228     <div class="card" style="width: 92%; max-width: 700px;">
229         <div style="display: flex; justify-content: space-around;">
230             <div><h4>Inclinación Lat. (45cm)</h4><span class="val" id="angL">0.0</span>°<
231             <div><h4>Elevación Perp. (102cm)</h4><span class="val" id="angP">0.0</span>°<
232         </div>
233     </div><br>
234

```

235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266

```
<!-- Tarjeta de control para Actuador Izquierdo (1) -->
<div class="card">
    <h3>Actuador Izquierdo (1)</h3>
    <p id="st1">IDLE</p>
    <!-- Barra de progreso visual de la posición -->
    <div class="progress-container"><div id="pb1" class="progress-bar"></div></div>
    <div class="val"><span id="dist1">0</span> cm</div>
    <!-- Slider para establecer posición objetivo -->
    <input type="range" min="3" max="30" step="0.5" onchange="fetch('/setDist?act=1'>
    <!-- Botones de control manual -->
    <div>
        <button class="btn btn-ext" onclick="fetch('/ext1')">EXT</button>
        <button class="btn btn-ret" onclick="fetch('/ret1')">RET</button>
        <button class="btn btn-stop" onclick="fetch('/stop1')">PARAR</button>
    </div>
</div>

<!-- Tarjeta de control para Actuador Derecho (2) -->
<div class="card">
    <h3>Actuador Derecho (2)</h3>
    <p id="st2">IDLE</p>
    <!-- Barra de progreso visual de la posición -->
    <div class="progress-container"><div id="pb2" class="progress-bar"></div></div>
    <div class="val"><span id="dist2">0</span> cm</div>
    <!-- Slider para establecer posición objetivo -->
    <input type="range" min="3" max="30" step="0.5" onchange="fetch('/setDist?act=2'>
    <!-- Botones de control manual -->
    <div>
        <button class="btn btn-ext" onclick="fetch('/ext2')">EXT</button>
        <button class="btn btn-ret" onclick="fetch('/ret2')">RET</button>
        <button class="btn btn-stop" onclick="fetch('/stop2')">PARAR</button>
    </div>
```

```

267     </div>
268
269     <script>
270         // Función para actualizar las barras de progreso según las distancias
271         function updateBars(d1, d2) {
272             // Convertir distancia a porcentaje (3cm = 0%, 30cm = 100%)
273             let p1 = ((d1 - 3) / (30 - 3)) * 100;
274             let p2 = ((d2 - 3) / (30 - 3)) * 100;
275             // Aplicar el ancho a las barras de progreso (limitando entre 0% y 100%)
276             document.getElementById('pb1').style.width = Math.min(Math.max(p1, 0), 100) +
277             document.getElementById('pb2').style.width = Math.min(Math.max(p2, 0), 100) +
278             }
279
280             // Actualización periódica cada 500ms mediante AJAX
281             setInterval(() => {
282                 fetch('/data') // Petición GET al endpoint /data
283                 .then(r => r.json()) // Parsear respuesta como JSON
284                 .then(d => {
285                     // Actualizar todos los elementos de la interfaz con los datos recibidos
286                     document.getElementById('dist1').innerText = d.d1;
287                     document.getElementById('dist2').innerText = d.d2;
288                     document.getElementById('st1').innerText = d.e1;
289                     document.getElementById('st2').innerText = d.e2;
290                     document.getElementById('angL').innerText = d.angL;
291                     document.getElementById('angP').innerText = d.angP;
292                     updateBars(d.d1, d.d2); // Actualizar barras de progreso
293                 });
294             }, 500); // Intervalo de 500 milisegundos
295     </script>
296 </body>
297 </html>
298 )rawliteral";

```

```

299
300 // Enviar página HTML al cliente
301 server.send(200, "text/html", html);
302 }
303
304 // =====
305 // FUNCIÓN: setup
306 // PROPÓSITO: Configuración inicial del sistema (se ejecuta una vez al inicio)
307 // =====
308 void setup() {
309 // Inicializar comunicación serial para depuración
310 Serial.begin(115200);
311
312 // ===== CONFIGURACIÓN DE PINES =====
313 // Configurar pines de enable como salidas
314 pinMode(pinEN1, OUTPUT);
315 pinMode(pinEN2, OUTPUT);
316
317 // Configurar pines de sensores ultrasónicos
318 pinMode(trig1, OUTPUT); // TRIG es salida (envía pulso)
319 pinMode(echo1, INPUT); // ECHO es entrada (recibe eco)
320 pinMode(trig2, OUTPUT);
321 pinMode(echo2, INPUT);
322
323 // ===== CONFIGURACIÓN PWM PARA DRIVERS BTS7960 =====
324 // ledcAttach asigna un pin a un canal PWM del ESP32
325 // Parámetros: pin, frecuencia (Hz), resolución (bits)
326 // 5000 Hz y 8 bits (0-255) es configuración típica para motores DC
327 ledcAttach(pinRPWM1, 5000, 8); // Canal PWM para extensión actuador 1
328 ledcAttach(pinLPWM1, 5000, 8); // Canal PWM para retracción actuador 1
329 ledcAttach(pinRPWM2, 5000, 8); // Canal PWM para extensión actuador 2
330 ledcAttach(pinLPWM2, 5000, 8); // Canal PWM para retracción actuador 2

```

```

331
332 // ===== CONEXIÓN A RED WiFi =====
333 WiFi.begin(ssid, password);
334 // Esperar hasta que se establezca la conexión
335 while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
336     delay(500);
337     Serial.print("."); // Mostrar progreso en monitor serial
338 }
339 // Mostrar dirección IP asignada
340 Serial.println("\nIP: " + WiFi.localIP().toString());
341
342 // ===== CONFIGURACIÓN DE RUTAS DEL SERVIDOR WEB =====
343 // Cada ruta tiene un manejador (handler) asociado
344 server.on("/", handleRoot); // Página principal
345 server.on("/data", handleData); // Endpoint para datos JSON
346
347 // Ruta para establecer distancia objetivo
348 server.on("/setDist", [](){
349     int act = server.arg("act").toInt() - 1; // Obtener actuador (1→0, 2→1)
350     distanciaObjetivo[act] = server.arg("val").toFloat(); // Obtener valor objetivo
351     server.send(200); // Confirmar recepción
352 });
353
354 // Rutas para control manual del actuador 1
355 server.on("/ext1", [](){ extender(1); server.send(200); });
356 server.on("/ret1", [](){ retraer(1); server.send(200); });
357 server.on("/stop1", [](){ detener(1); server.send(200); });
358
359 // Rutas para control manual del actuador 2
360 server.on("/ext2", [](){ extender(2); server.send(200); });
361 server.on("/ret2", [](){ retraer(2); server.send(200); });
362 server.on("/stop2", [](){ detener(2); server.send(200); });

```

363

364 *// Iniciar servidor web*

365 server.begin();

366 }

367

368 *// =====*

369 *// FUNCIÓN: loop*

370 *// PROPÓSITO: Bucle principal del programa (se ejecuta continuamente)*

371 *// =====*

372 void loop() {

373 *// Atender peticiones de clientes web*

374 server.handleClient();

375

376 *// Control de tiempo para lecturas de sensores (evitar lecturas continuas)*

377 static unsigned long t = 0; *// Variable estática para mantener el tiempo entre cic*

378

379 *// Ejecutar cada 100ms (10 veces por segundo)*

380 if (millis() - t > 100) {

381

382 *// Leer sensores de ambos actuadores*

383 for (int i = 0; i < 2; i++) {

384 *// Leer distancia del sensor correspondiente*

385 distancias[i] = leerDistancia((i == 0 ? trig1 : trig2), (i == 0 ? echo1 : echo2

386

387 *// ===== SISTEMA DE SEGURIDAD AUTOMÁTICO =====*

388 *// Detener si se alcanza el límite máximo durante extensión*

389 if (distancias[i] >= DIST_MAX && estadoActual[i] == "Extendiendo") {

390 detener(i + 1);

391 }

392

393 *// Detener si se alcanza el límite mínimo durante retracción*

394 if (distancias[i] <= DIST_MIN && distancias[i] > 0 && estadoActual[i] == "Retra

```

395         detener(i + 1);
396     }
397
398     // ===== CONTROL DE POSICIÓN OBJETIVO =====
399     // Si hay una distancia objetivo establecida (>0)
400     if (distanciaObjetivo[i] > 0) {
401         // Calcular error: diferencia entre posición actual y objetivo
402         float error = distancias[i] - distanciaObjetivo[i];
403
404         // Si el error es menor a 0.7cm, considerar que se alcanzó el objetivo
405         if (abs(error) <= 0.7) {
406             detener(i + 1); // Detener actuador
407         }
408         // Si el error es negativo (posición actual < objetivo), necesita extender
409         else if (error < 0) {
410             extender(i + 1);
411         }
412         // Si el error es positivo (posición actual > objetivo), necesita retraer
413         else {
414             retraer(i + 1);
415         }
416     }
417 }
418
419 // Actualizar tiempo para próximo ciclo
420 t = millis();
421 }
422 }

```

5.5.4 Seguridad del Sistema.

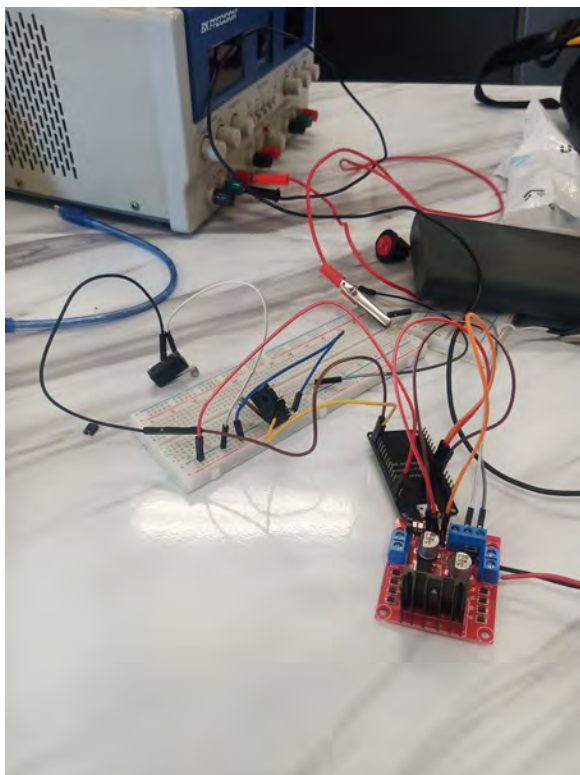
El firmware integra una capa de seguridad física por software que monitorea las lecturas de los sensores ultrasónicos. Si un actuador alcanza la distancia máxima (30cm) durante la extensión

o la distancia mínima (3cm) durante la retracción, el sistema invoca la función `detener()` de forma inmediata, ignorando cualquier comando externo para proteger la integridad mecánica.

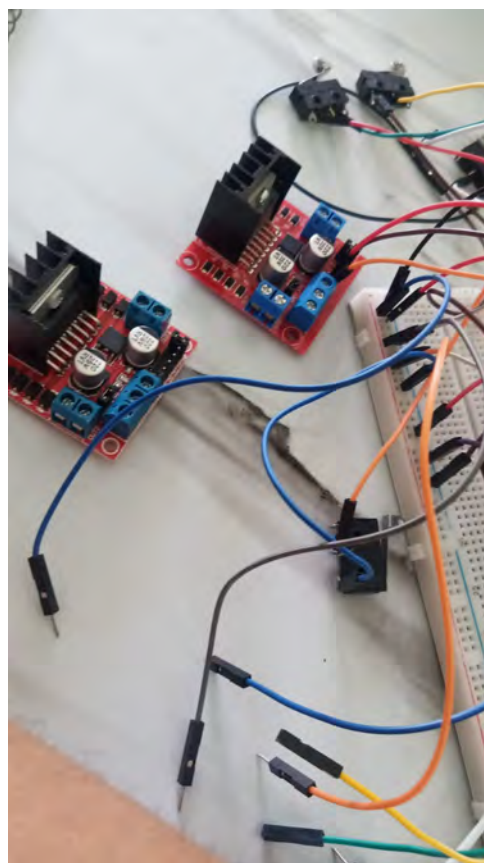
5.5.5 Pruebas experimentales para el sistema de control.

Se efectuaron pruebas experimentales con diferentes configuraciones para el control de puentes H L298N que se llegaron a quemar por el pico alto que exigían los actuadores, así como quemar un regulador de voltaje LM2596 que en un principio se tenía la intención de usar.

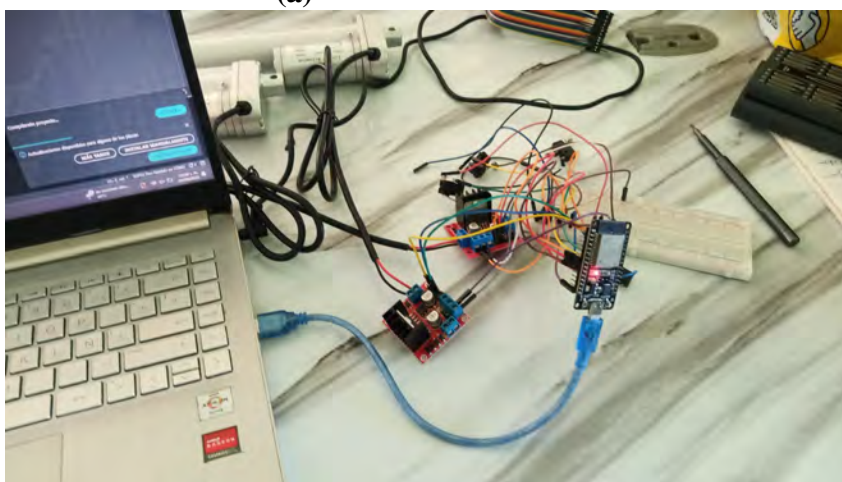
En la [Figura 49](#), podemos ver las imágenes 'a', 'b' y 'c' que enseñan el proceso de montaje y la programación que se empezó a realizar probando los pines y el ESP32 con la fuente de poder para mover los actuadores.



(a)



(b)



(c)

Figura 49: En la siguiente colección de imágenes se enseñan las pruebas realizadas y la programación del esp 32.

5.6 Prototipo final.

Se llevaron a cabo pruebas de carga en los actuadores: se montó una carga de 20 kg, 15 kg, 10 kg y 5 kg amarrada con una cuerda resistente. Se colocó el actuador en posición horizontal; para realizar esta prueba, se determinó el pico de corriente en cada etapa de la carga con un multímetro, requiriendo una fuente conmutada para tener el voltaje correspondiente.

En la [Figura 50](#), podemos ver las imágenes 'a' y 'b.' Se realizaron mediciones de amperaje en un actuador con varias cargas para caracterizar sus propiedades. En las primeras pruebas se logró tener pequeñas variaciones, pero no eran exactas.



(a)



(b)

Figura 50: En la colección de imágenes fueron las primeras pruebas para caracterizar los actuadores.

Se pidió ayuda al taller de mecánica para llevar a cabo las pruebas de caracterización, eligiendo una cubeta para varias cargas y con un multímetro para registrar variaciones.

En la [Figura 51](#), podemos ver las imágenes 'a' , 'b' , 'c' , 'd' , 'e' y 'f' se observan las pruebas experimentales para la caracterización completa de los actuadores en una polea en el taller de mecánica, el actuador conectado en serie con el multímetro para la caracterización de sus cargas junto con una fuente de alimentación de 24V, Desplazamiento en la cubeta con cargas de 5, 10, 15 y 20 kilos con el actuador, la prueba experimental de la carga que se levanta desde la polea con la captura de datos con el multímetro para verificar variaciones en el amperaje.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 51: En la colección de imágenes se enseñan las pruebas experimentales para caracterizar los actuadores.

5.7 Validación final y documentación.

5.7.1 Prueba de rango y repetibilidad del actuador.

Se enviaron comandos al ESP32 para mover los actuadores a sus posiciones mínima y máxima, verificando que el mecanismo se desplace sin obstrucciones en todo su rango. Se midió la precisión y reproducción del posicionamiento, así como se muestra en la [Figura 52](#); podemos ver la etapa de pruebas, llevando al problema de quemar puente H L298N dual usado en la imagen.

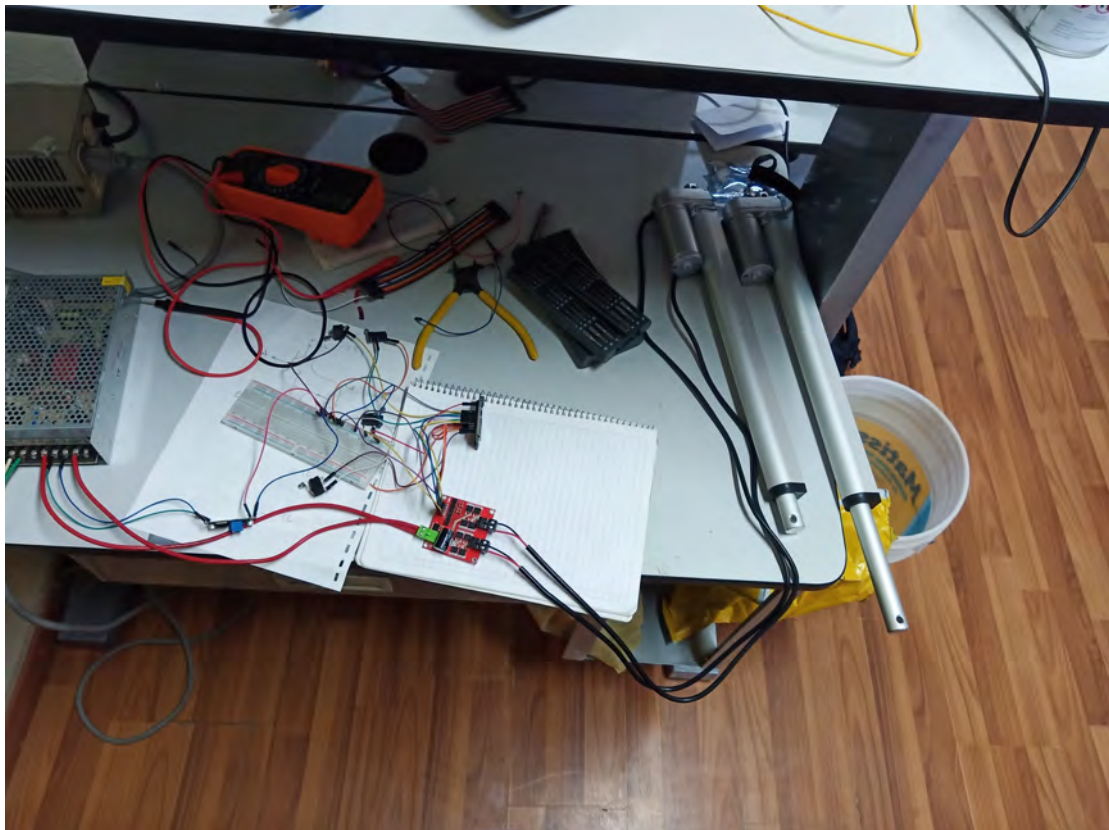


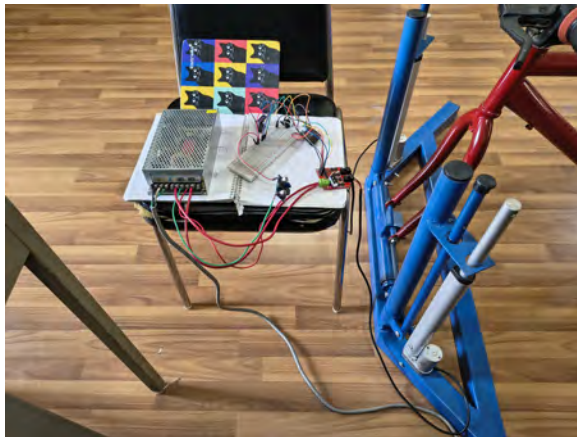
Figura 52: Prueba experimental de la nueva conexión con los actuadores y modificaciones del modelo de control.

5.7.2 Integración final.

Se ensamblaron todos los componentes mecánicos. Posteriormente, se montaron los actuadores lineales, el sistema de freno magnético, el servomotor y la caja de control electrónico en la estructura principal, realizando las conexiones finales.

En la [Figura 53](#), podemos ver las imágenes 'a' y 'b' se hicieron las conexiones y pruebas correspondientes con protoboard para hacer pruebas de conexión final y últimos detalles del

programa; en las imágenes 'c' y 'd' se observan las cajas creadas por impresión 3D.



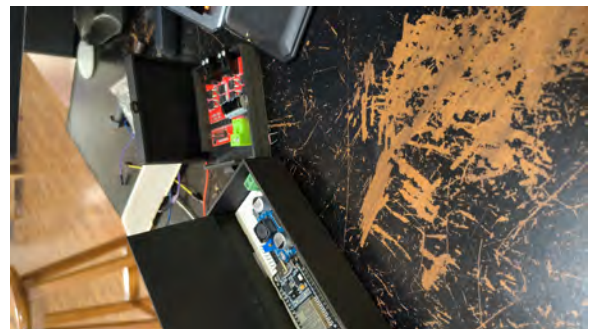
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 53: En la colección de imágenes se puede observar el armado y pruebas con la pieza ensamblada y montada con los actuadores.

Creación del Ensamblaje General:

Las piezas individuales se integraron en un modelo de ensamblaje principal. En esta etapa se definieron las relaciones de posición (concéntricas, coincidentes, de distancia) para simular el acoplamiento real de los componentes, el mecanismo de sujeción de la bicicleta y el movimiento del actuador.

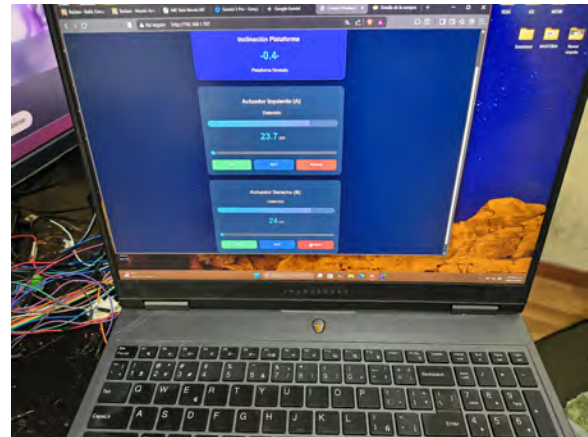
Prueba de ángulos detectados con respecto a la realidad del mecanismo, alcanzando y delimitando límites físicos con el control de barras de indicación y de progreso para identificar lo que se pide al sistema.

En la [Figura 54](#), podemos ver las imágenes 'a', 'b', 'c', 'd', 'e' y 'f' se pueden analizar los dife-

rentes ángulos alcanzados con respecto a lo que detectan los sensores y los ángulos calculados.



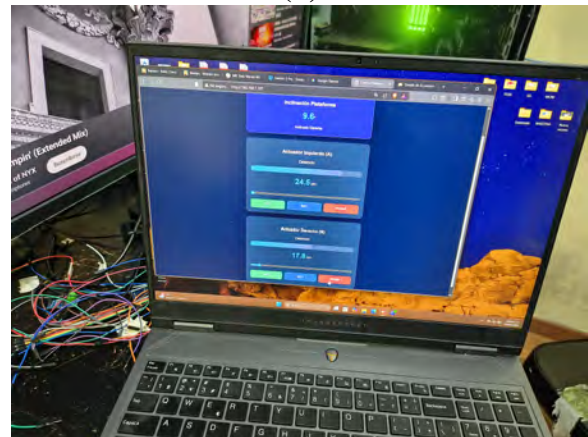
(a)



(b)



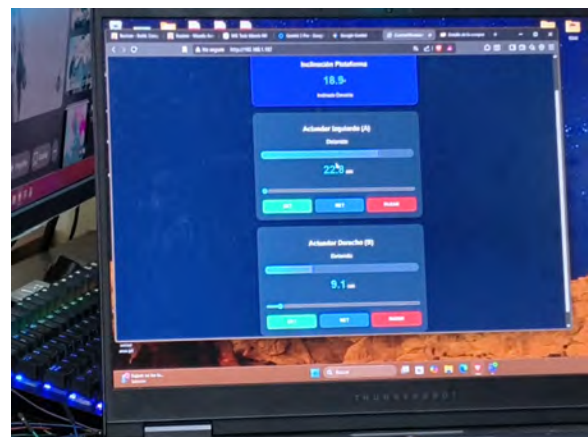
(c)



(d)



(e)



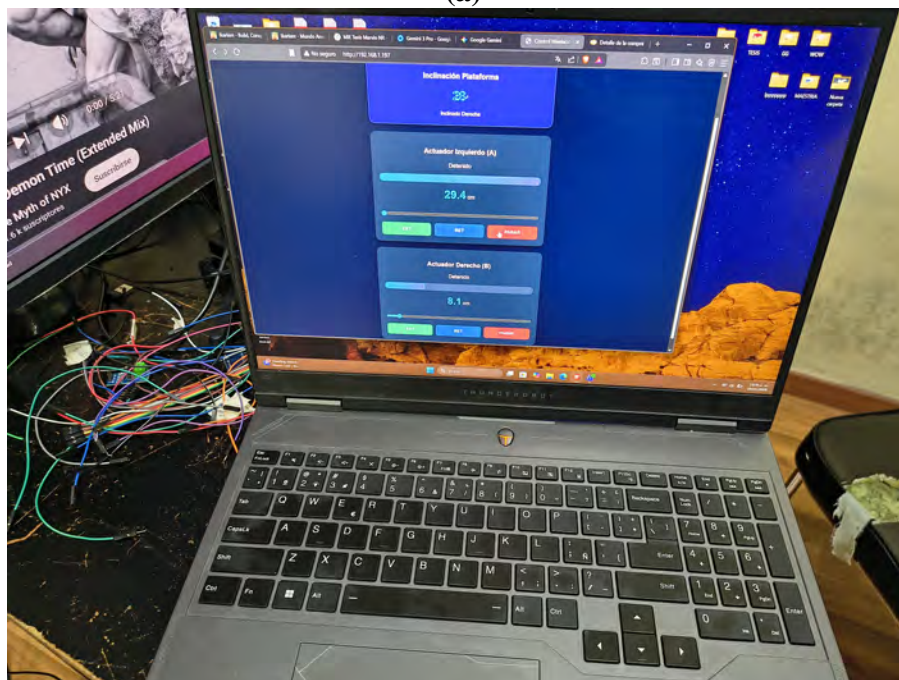
(f)

Figura 54: En la colección de imágenes podemos observar comparativamente lo calculado con lo real detectado por el angulómetro.

En la [Figura 55](#), podemos ver las imágenes 'a' y 'b' se muestran los ángulos máximos alcanzados con respecto a lo detectado con el sistema, siendo satisfactorio el límite físico que tiene la base.



(a)



(b)

Figura 55: En la colección de imágenes podemos observar la posición máxima alcanzada previa para soportar, dejando un punto de seguridad.

Se realiza la prueba de repetitividad del sistema volviendo a capturar los ángulos previos, observando su validación experimental en las imágenes.

En la [Figura 56](#), podemos ver las imágenes 'a', 'b', 'c', 'd', 'e' y 'f' se puede observar la repetitividad de las pruebas analizando parte del comportamiento de los sensores.



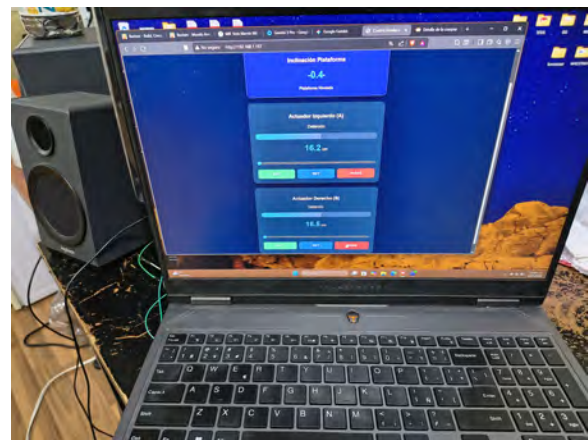
(a)



(b)



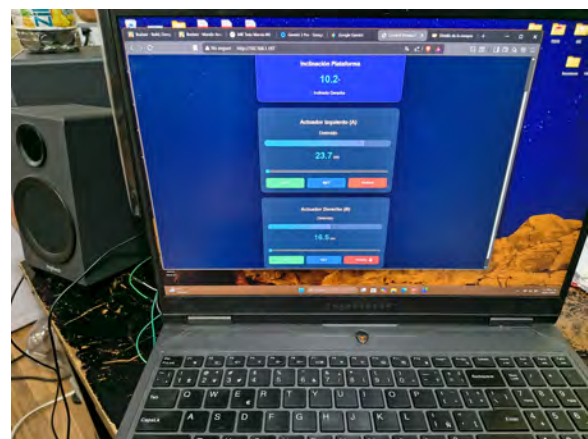
(c)



(d)



(e)



(f)

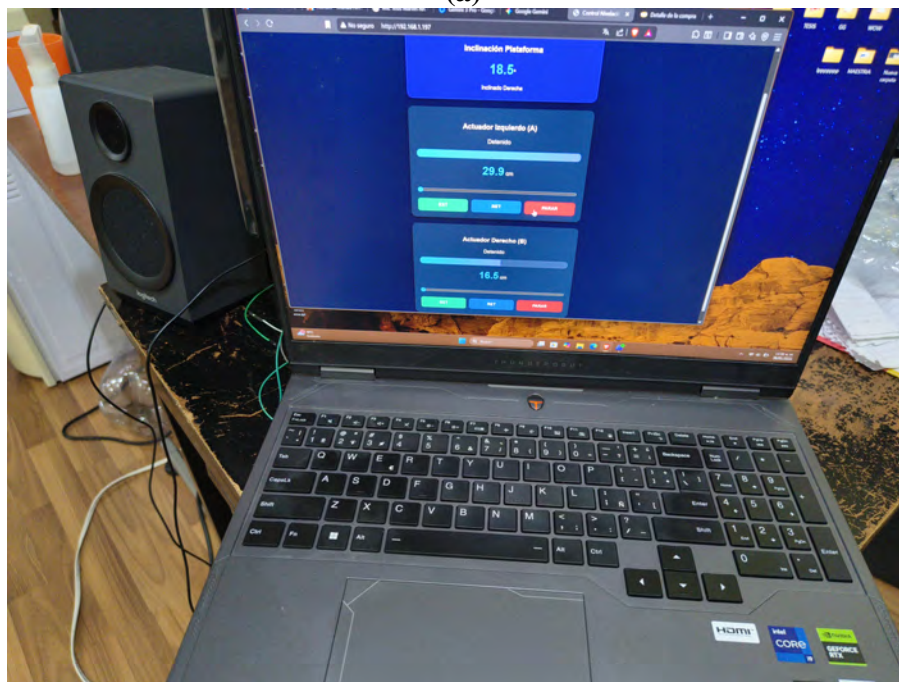
Figura 56: En la colección de imágenes podemos observar las diferentes posiciones, alcanzando ángulos anteriores.

En la [Figura 57](#), podemos ver las imágenes 'a' y 'b'; se observa el ángulo máximo alcanzado y

su repetición en la medida con respecto a las imágenes anteriores.



(a)



(b)

Figura 57: En la colección de imágenes podemos observar el análisis y observación de los ángulos máximos repetidos en la estructura.

5.7.3 Experimentación del prototipo con usuarios.

Se llevaron a cabo varias pruebas experimentales con varios usuarios para calibrar de una manera óptima el sistema.

En la [Figura 58](#), podemos ver las imágenes 'a', 'b', 'c', 'd', 'e' y 'f' se pueden apreciar a usuarios y el dispositivo en varias posiciones para calibrar finalmente el sistema.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 58: En la colección de imágenes podemos observar las primeras pruebas experimentales para calibrar el sistema y la estructura.

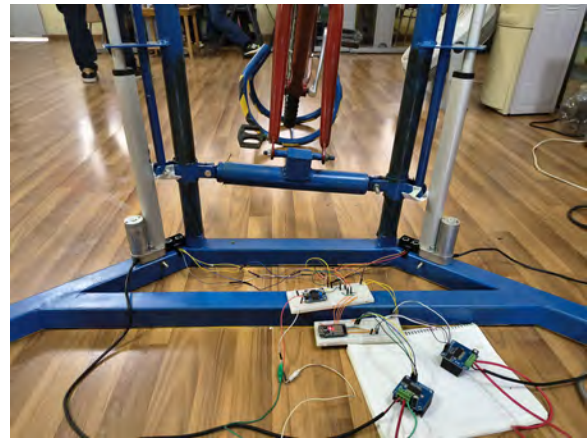
Se hizo un análisis previo a las pruebas finales para terminar de analizar la señal de los sensores

y la respuesta de los actuadores.

En la [Figura 59](#), podemos ver las figuras 'a', 'b', 'c', 'd' y 'e' se pueden observar las modificaciones finales para la experimentación: se aplicó grasa en los tubos guía de los actuadores, se puso cinta antiderrapante en la base trasera y delantera, se apretaron pernos en las uniones y se calibró el sistema de control ESP32.



(a)



(b)



(c)



(d)



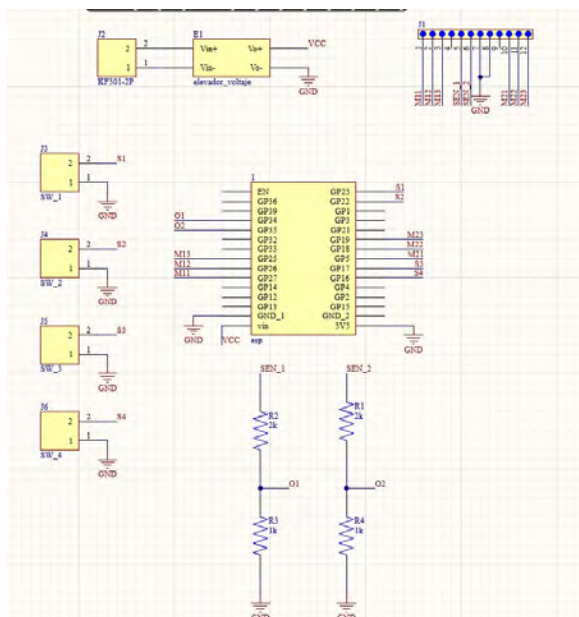
(e)

Figura 59: En la colección de imágenes podemos observar las posiciones de prueba final para la experimentación final y captura de resultados.

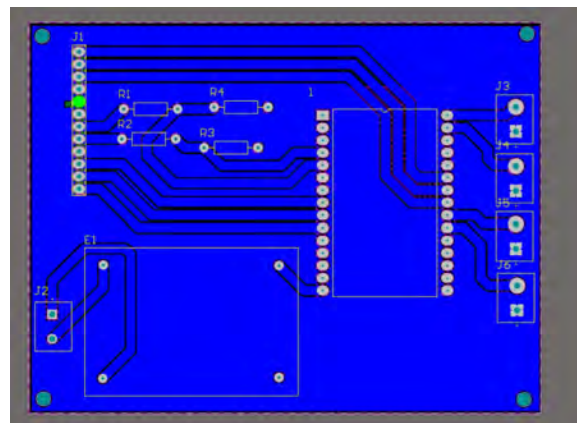
5.7.4 Creación de placa para simplificar el diseño con los sensores de corriente.

Se realizó un diseño para placa fenólica para montar los dispositivos previo a modificarla por el uso de sensores ultrasonicos.

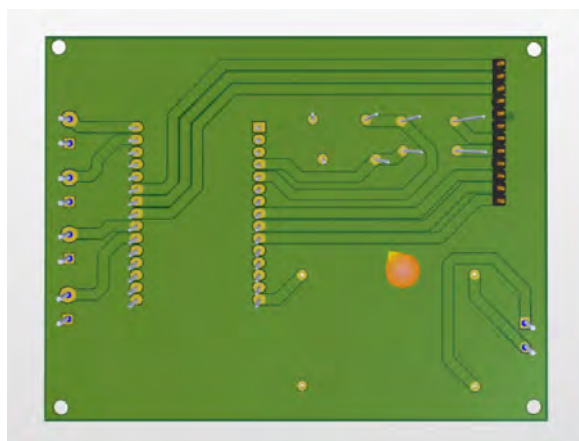
El modelo para el sistema de control electrónico se realizó en una placa [Figura 60](#) y se llevaron a cabo pruebas posteriores del modelo con sensores de corriente que fueron cambiados posteriormente. En la imagen 'a' podemos observar el esquemático del sistema con entradas y salidas definidas e identificadas fácilmente en el circuito para conectarlo por pines de salida. En la imagen 'b' podemos observar el modelo que será impreso en una placa fenólica. En las imágenes 'c', 'd' y 'e' se pueden observar las dimensiones en 3D que deberían poder realizarse en la placa fenólica terminada.



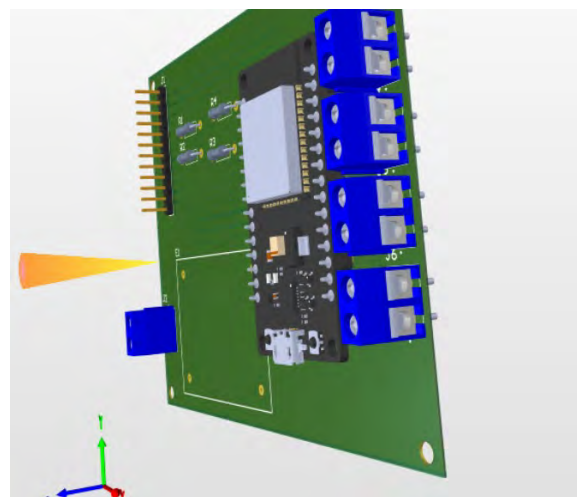
(a)



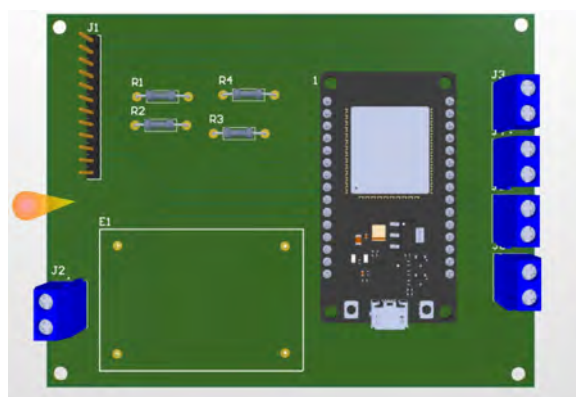
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 60: En la colección de imágenes podemos ver un modelo de placa descartado para un modelo de sensores de corriente que fueron cambiados.

5.7.5 Modificación de la placa para el uso de sensores ultrasonicos.

En la imagen podemos ver la [Figura 61](#), la cual es la placa usada en este proyecto, modificada para el uso de los sensores ultrasonicos y modificaciones para el regulador del voltaje.

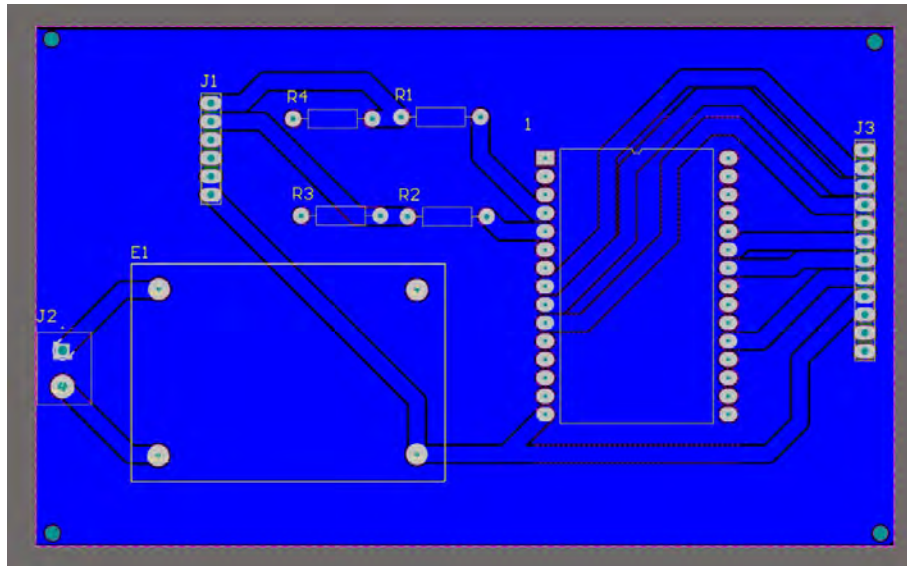


Figura 61: En la colección de imágenes podemos observar la placa modificada para el uso de sensores ultrasonidos en la placa realizada para imprimir e implementarla en una placa fenólica.

En la imagen [Figura 62](#) se observa la placa realizada en 3D para su entendimiento previo al trabajo realizado en ella y el montaje de piezas idealizado en esta figura, siendo parte de pines de sensores y pines de los puentes H diferenciados para fácil modificación de estos, la ubicación del regulador de voltaje para el ESP32 y las modificaciones realizadas con respecto a la placa anterior.

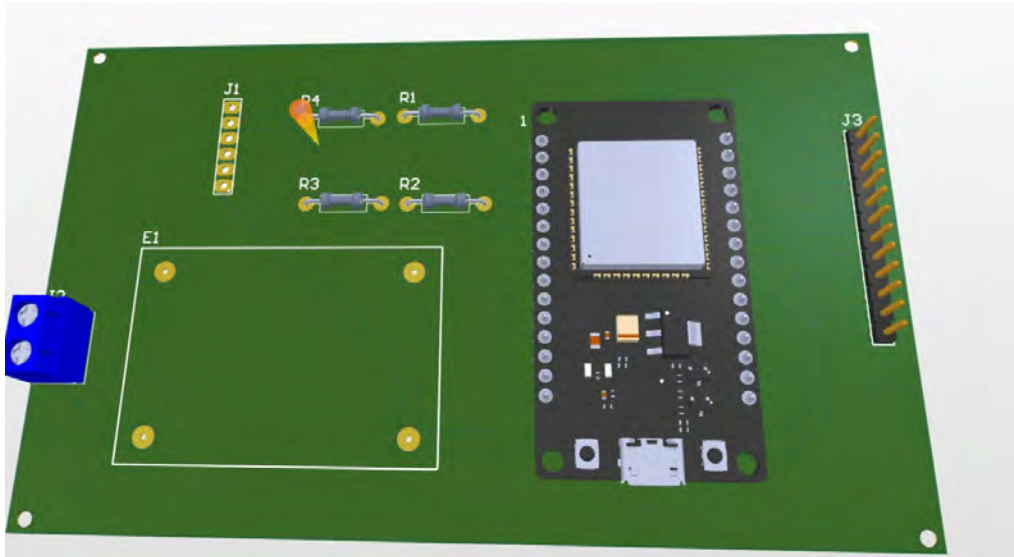


Figura 62: Prueba experimental de la nueva conexión con los actuadores y modificaciones del modelo de control.

En la figura [Figura 64](#) podemos observar la modificación realizada en la placa esquematizada con sus salidas, considerando un regulador de voltaje LM2576 HV puesto para regular su voltaje de 24 V a 5 V, ayudando al sistema con un divisor de voltaje para las entradas de los sensores ultrasónicos, así como pines de salida, haciendo el diseño fácil de manipular a la hora de implementar todos los dispositivos.

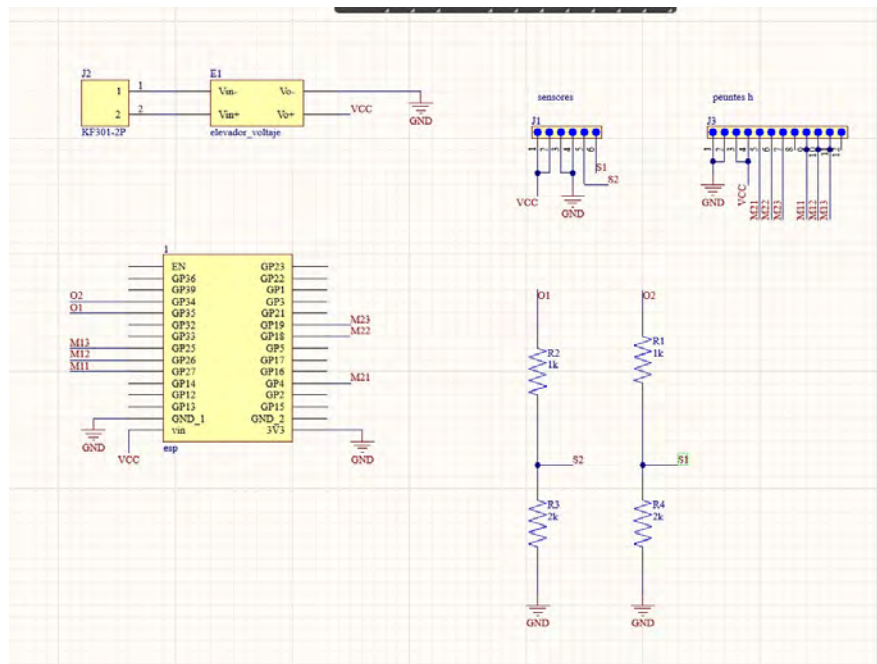


Figura 63: Esquemático realizado para el sistema de control del ESP32 y el regulador de voltaje, así como los divisores de voltaje y los pines de salida.

En la figura [Figura 64](#) podemos observar el esquema final de funcionamiento del sistema, demostrando así el uso de la placa diseñada previamente para conectar el sistema de control esp32 con los diferentes dispositivos aquí de manera mas figurativa pordemos observar las conexiones realizadas de los puentes H (fungiendo como los bts7960 bajo la misma logica) , los sensores ultrasonicos que fueron conectados con el divisor de voltaje para proteger al esp32 de recibir 5 V ; podemos denotar las conecciones a los motores a controlar puestos en los puente H. La interfaz se carga desde el ESP32, haciendo fácil el control y el acceso para hacer su función desde la placa, todo esto llevado a cabo en el programa Proteus para su fácil acceso en el ilustrativo de este sistema.

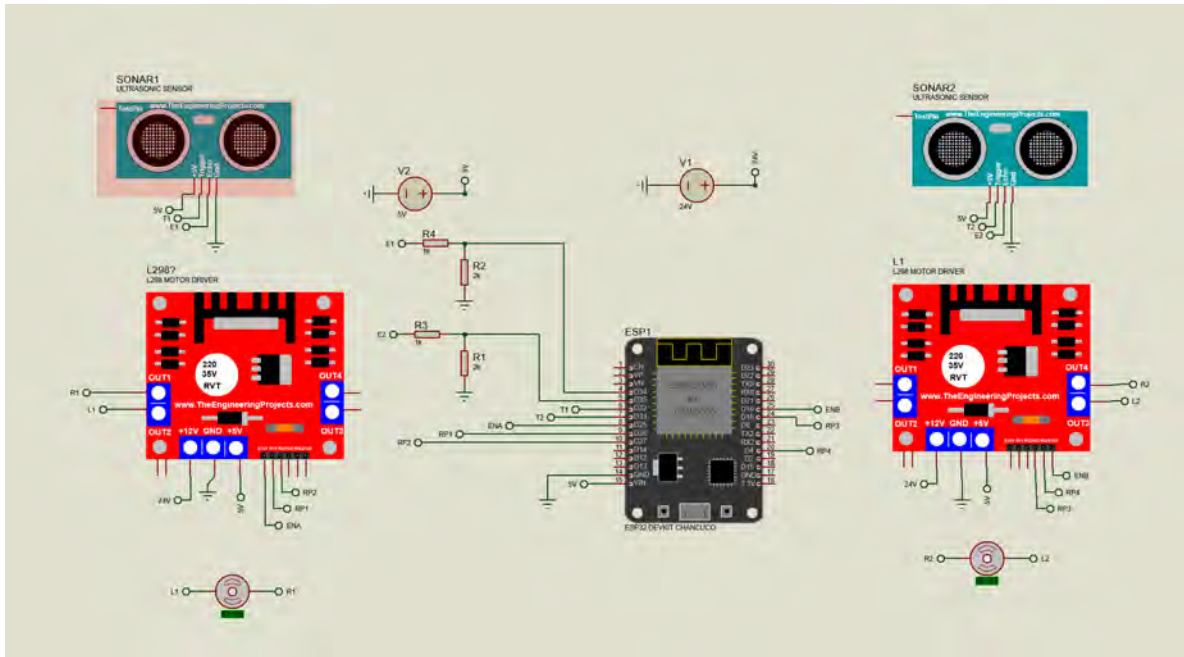


Figura 64: Esquema del funcionamiento del sistema con esquemático para ilustrar partes físicas de los componentes.

5.7.6 Generación de Documentación Técnica.

A partir del modelo de ensamblaje 3D validado, se generaron los planos de fabricación 2D para cada componente no estandarizado. Estos planos incluyen todas las cotas, tolerancias y especificaciones de material (por ejemplo, tipo de soldadura para las uniones de los perfiles PTR) necesarias para la fase de manufactura. [Anexo B](#) [Figura 85](#) [Figura 86](#) [Figura 87](#) [Figura 88](#) [Figura 89](#) [Figura 90](#) [Figura 91](#) [Figura 92](#) [Figura 93](#) [Figura 94](#)

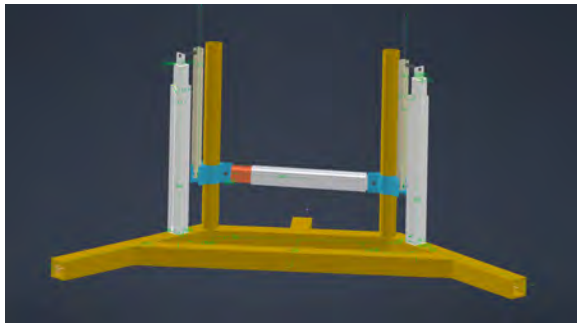
CAPÍTULO 6: RESULTADOS

6.1 Análisis del modelo final creado en Inventor Autodesk.

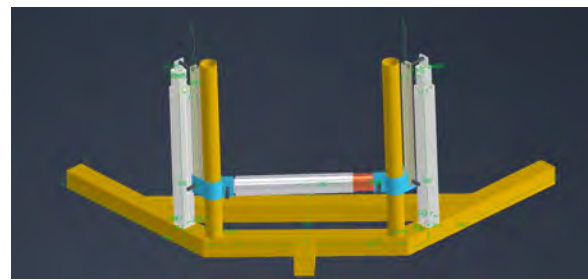
6.1.1 Modelo final.

El modelo de software CAD demuestra satisfactoriamente sus esfuerzos y cargas esperados sin deformarse y cumple con la carga esperada.

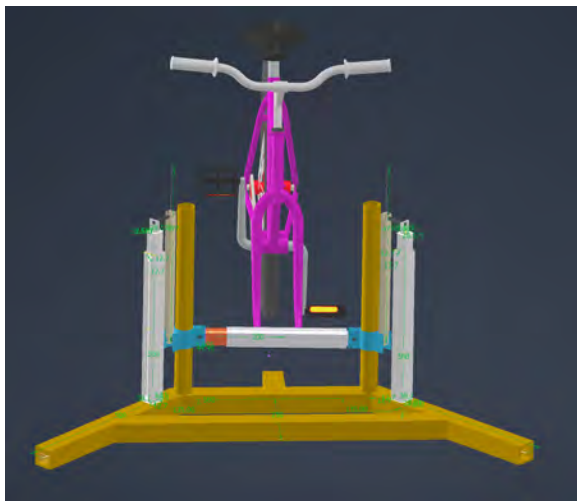
En la siguiente colección de imágenes se observa [Figura 65](#) el modelo propuesto modificado para las guías de los actuadores, así como la modificación de guías circulares para hacer el desplazamiento vertical, al igual que el diseño de la estructura trasera montada en la bicicleta y su inclinación esperada.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

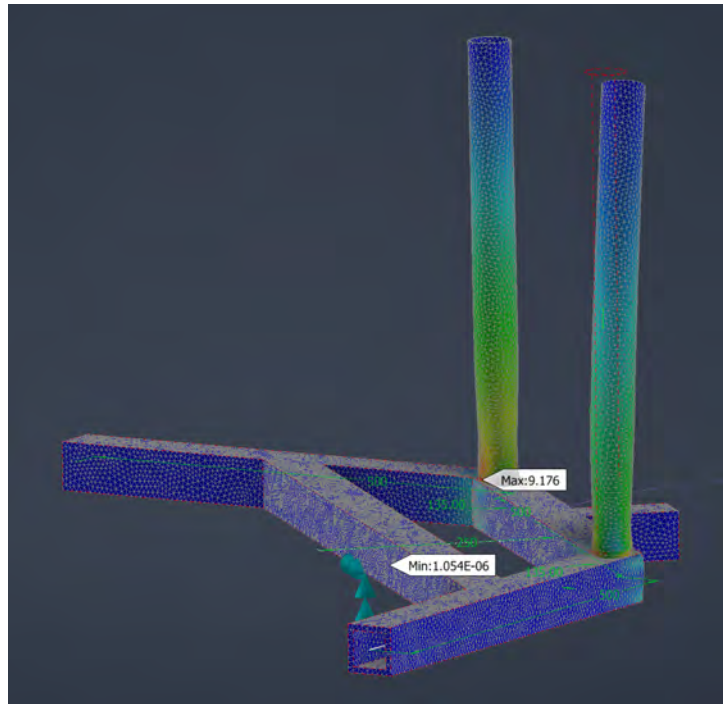


(f)

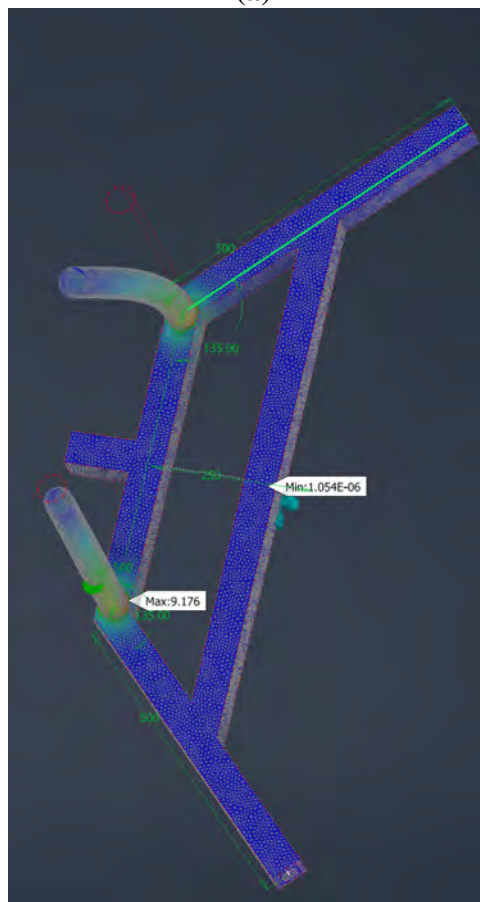
Figura 65: En las imágenes 'a', 'b', 'c' y 'd' se observa el modelo diseñado para ser delantero, el modelo así como su ensamble con la bicicleta; en las imágenes 'e' y 'f' se observa el modelo de la base trasera para el desplazamiento lateral que se busca realizar, así como su ensamble.

6.1.2 Análisis de la base delantera.

En la colección de imágenes siguiente [Figura 66](#) se puede observar el análisis de cargas y factor de seguridad realizado en la pieza individual sin ensamblaje.



(a)



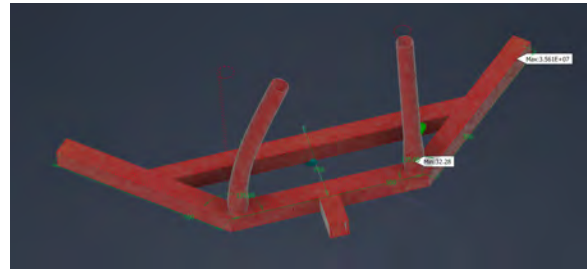
(b)

Figura 66: En las imágenes 'a' y 'b' se puede analizar, por cargas, la mayoría del reparto dado en un punto, siendo de 9.176 Mpa repartidos en solo la base.

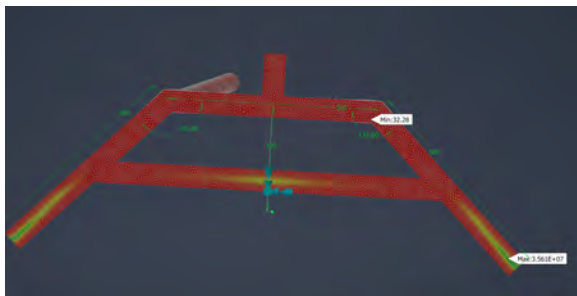
En la siguiente colección de imágenes [Figura 67](#) se puede observar el análisis por factor de seguridad interno para mejor visualización del modelo y sus cargas.



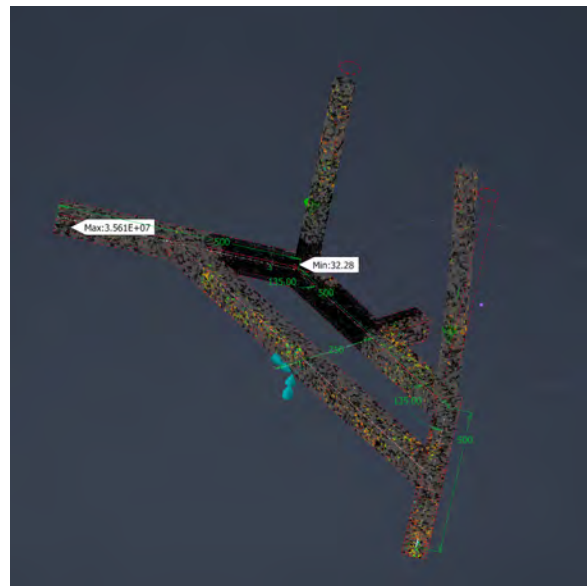
(a)



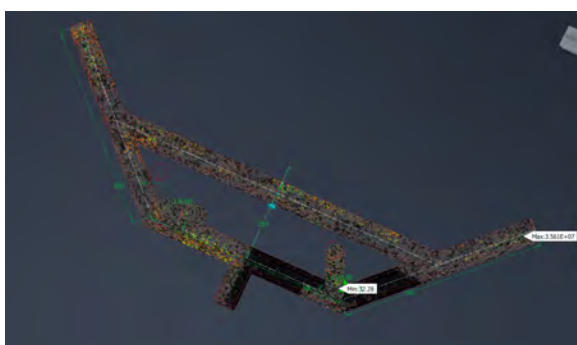
(b)



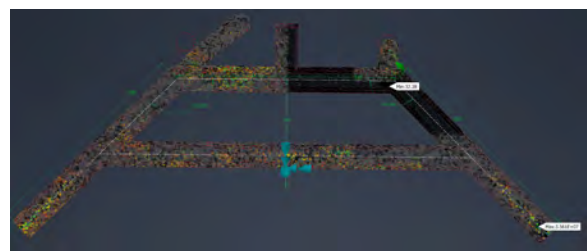
(c)



(d)



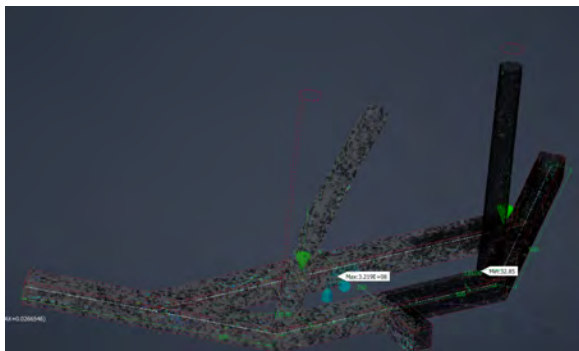
(e)



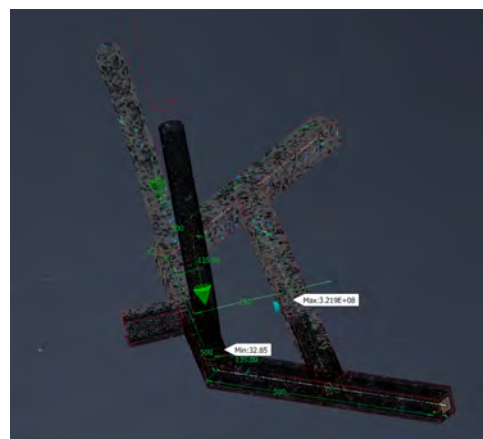
(f)

Figura 67: En las imágenes 'a', 'b', 'c', 'd', 'e' y 'f' se observa la mayoría de los problemas en la base, pero en el análisis lineal se observa la distribución de cargas en todos los lugares, siendo difícil de visualizar.

En la siguiente colección de imágenes [Figura 68](#) se puede observar el análisis de estado sólido y, visualizado por líneas, se pueden determinar más cosas internas



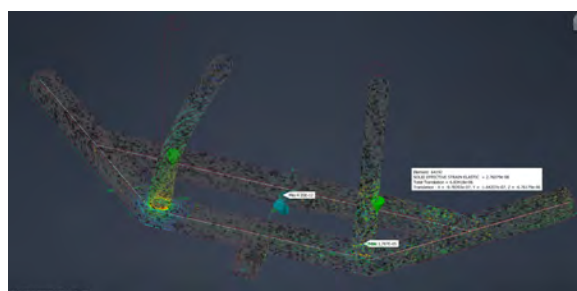
(a)



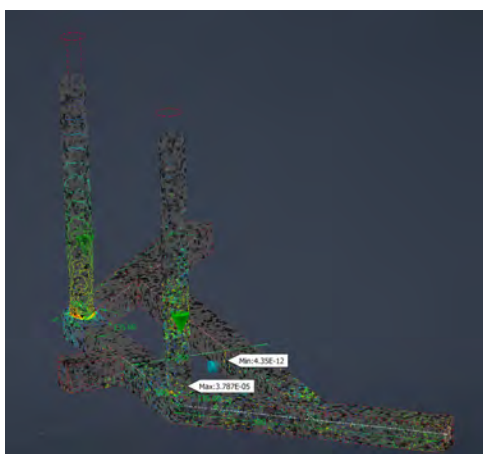
(b)



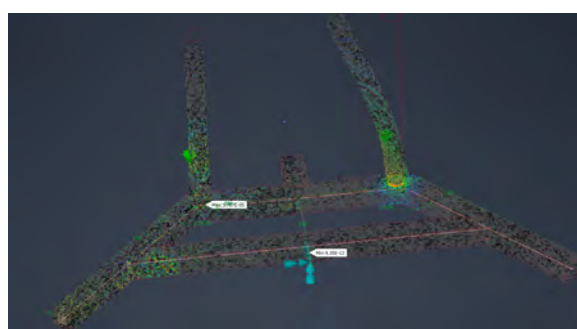
(c)



(d)



(e)

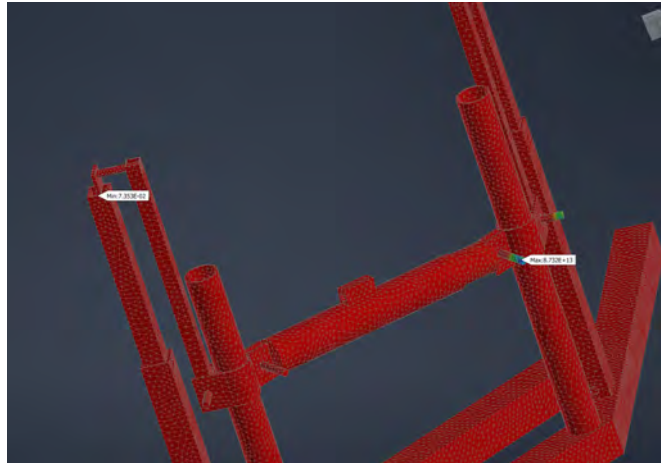


(f)

Figura 68: En las imágenes 'a', 'b' y 'c' se observa el análisis por estado sólido en la estructura interna con un máximo de $3.21e8$ en el esfuerzo, distribuyendo en varias partes de la estructura; en las imágenes 'd', 'e' y 'f' se observa el análisis de tensión en las estructuras tubulares, donde la mayor parte se recarga en la base, aun siendo de $3.787e-5$, siendo poco para el acero.

6.1.3 Análisis de base delantera con ensambles.

En la siguiente colección de imágenes [Figura 69](#) se observa el análisis por factor común de la estructura con ensamble y los actuadores.



(a)



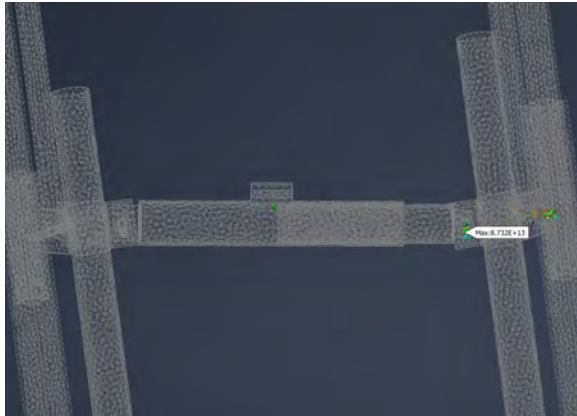
(b)



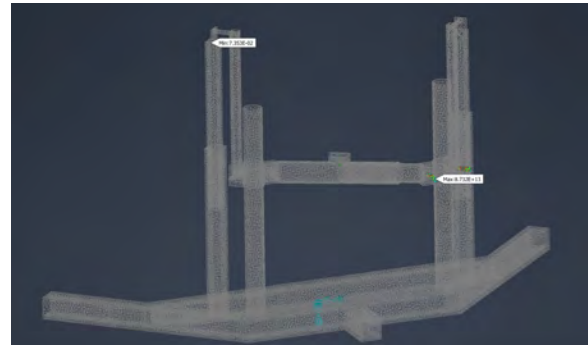
(c)

Figura 69: En las figuras a', 'b' y 'c' se encuentra el factor común de la estructura ensamblada, demostrando cargas máximas en las conexiones donde recae la carga, siendo de $8.7732e13$, siendo algo alto, pero requerido tornillo de acero al carbono u otro material más resistente.

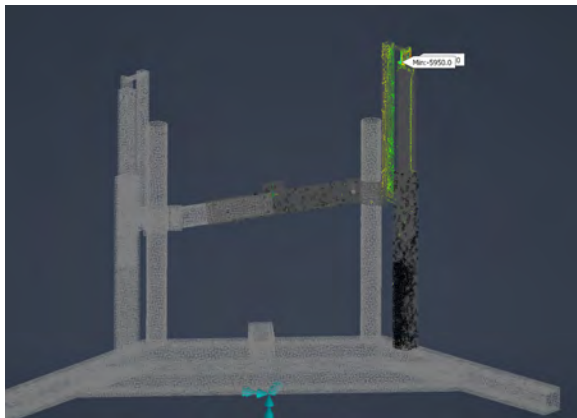
En la siguiente colección de imágenes [Figura 70](#) se observa el análisis por cargas y distribución estructural en la posición de los actuadores, demostrando distribución estructural en las guías que sirven a los actuadores.



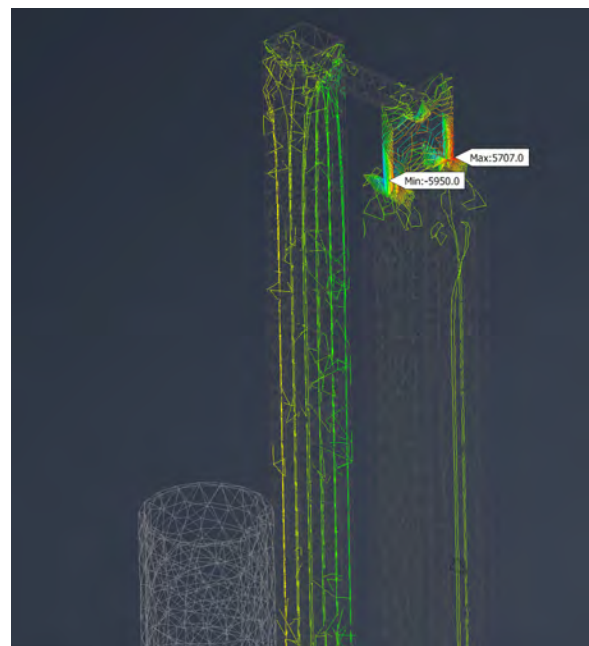
(a)



(b)



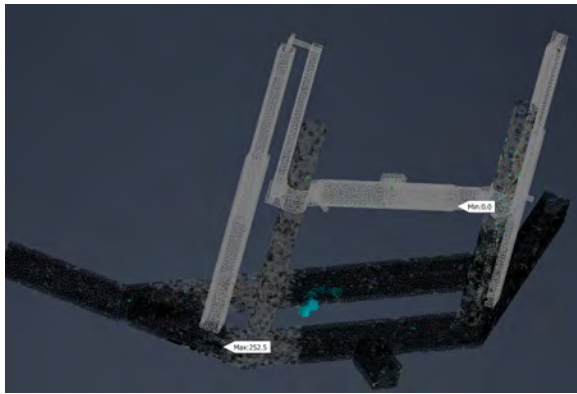
(c)



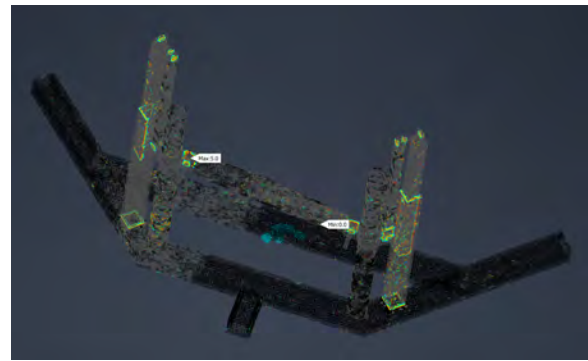
(d)

Figura 70: En las imágenes 'a', 'b', 'c' y 'd' se observa el análisis por esfuerzos en la posición del actuador y la base donde recae carga, y demostrando en gran medida la distribución estructural que cae sobre la guía.

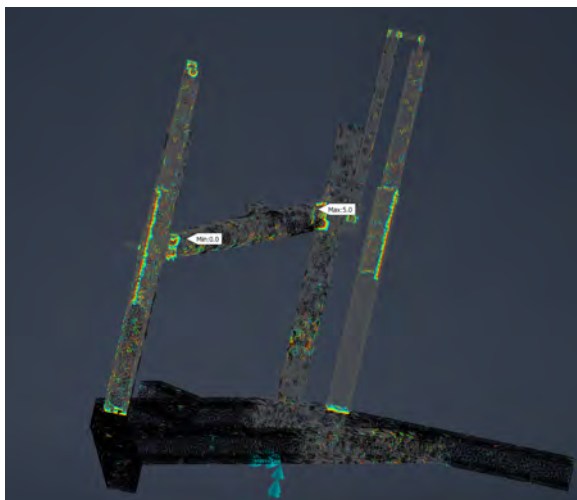
En la siguiente colección de imágenes [Figura 71](#) se observa el análisis por cargas, tensión y concentración de cargas.



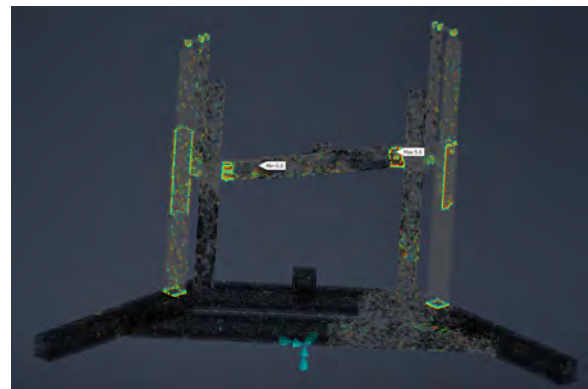
(a)



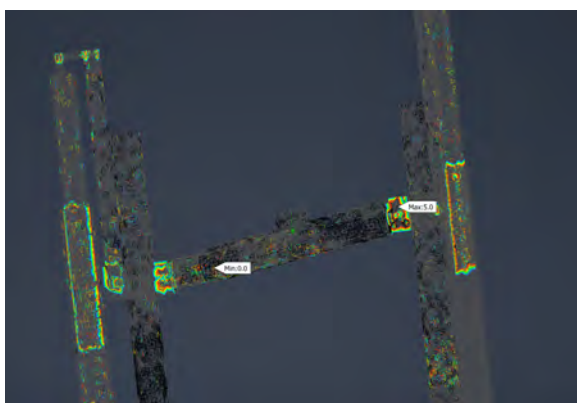
(b)



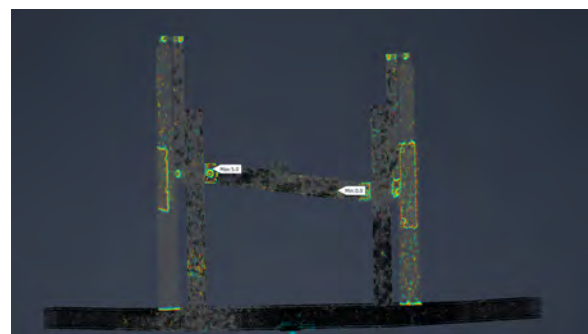
(c)



(d)



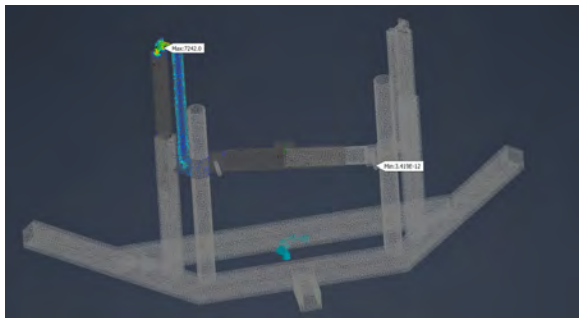
(e)



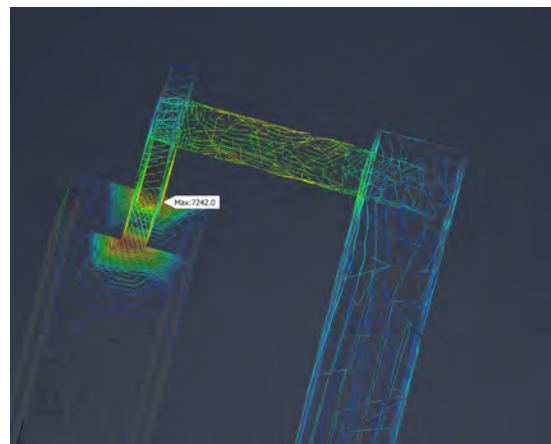
(f)

Figura 71: En la imagen 'a' se observan las cargas por tensión en la mayoría de la base; en las imágenes 'b', 'c', 'd', 'e' y 'f' se observa la concentración de cargas, siendo figurativas las figuras por colores, dando a entender la distribución de cargas, llegando a su máximo de 5 en los ensambles de las guías, siendo lógico reforzar estos puntos críticos.

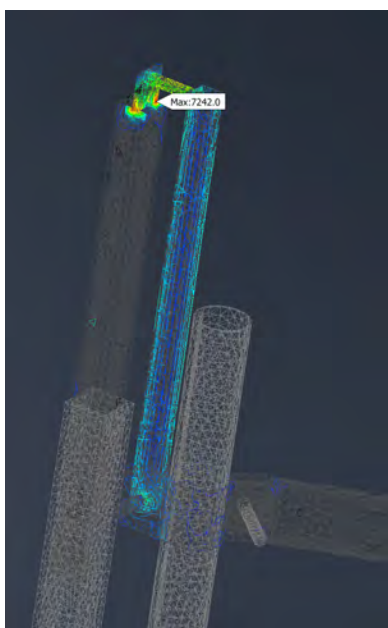
En la siguiente colección de imágenes [Figura 72](#) se observa el análisis de estado sólido y su descripción figurativa de cargas mínimas repartidas por todas las conexiones realizadas en su estructura, siendo encontrada la carga de 7242 N en la conexión de los actuadores y la guía.



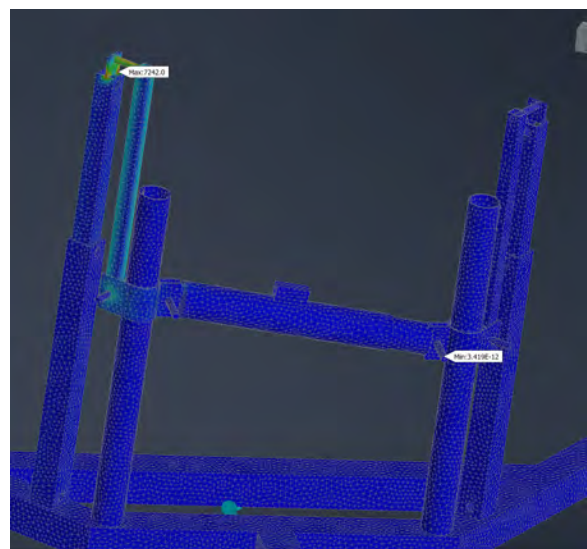
(a)



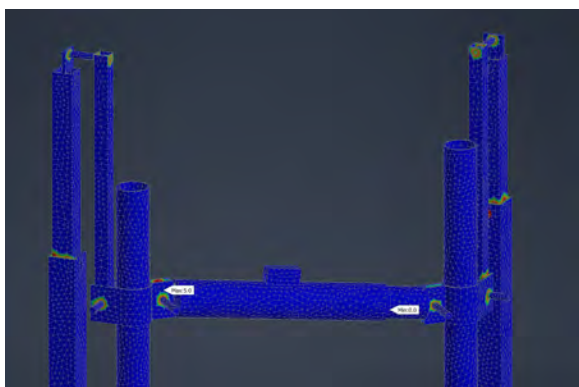
(b)



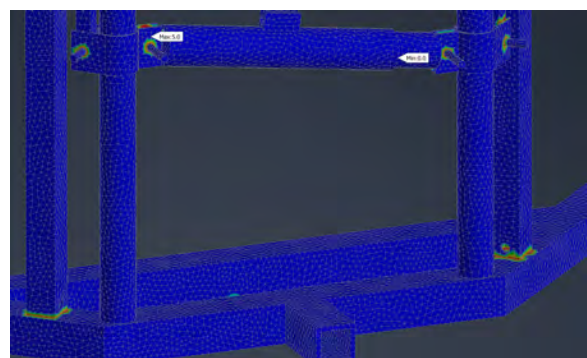
(c)



(d)



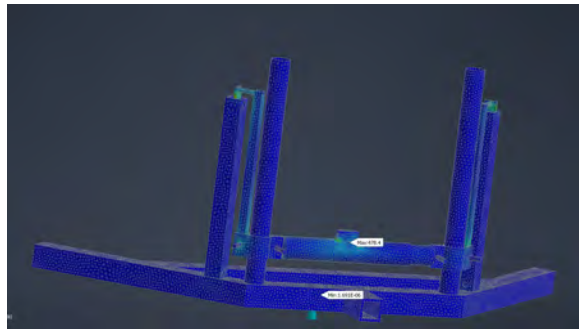
(e)



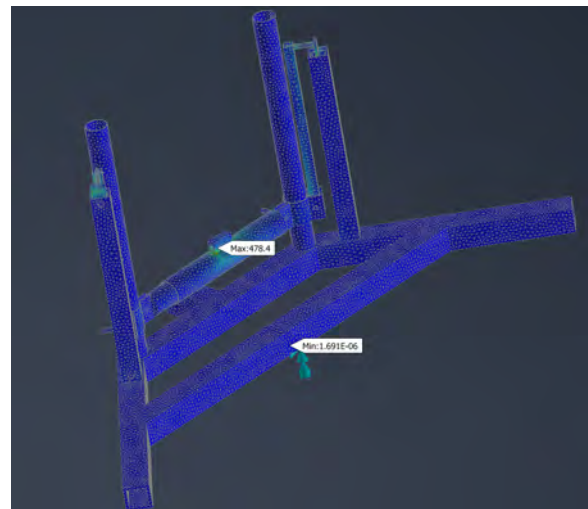
(f)

Figura 72: En las imágenes 'a', 'b', 'c' y 'd' podemos observar la carga en reacción a la fuerza ejercida en la conexión del actuador; en las imágenes 'e' y 'f' se observa el análisis de concentración de fuerzas de manera sólida.

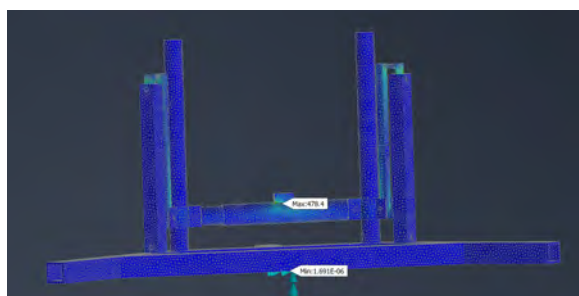
En la siguiente colección de imágenes [Figura 73](#) se observa el análisis por cargas y estado sólido en otra posición.



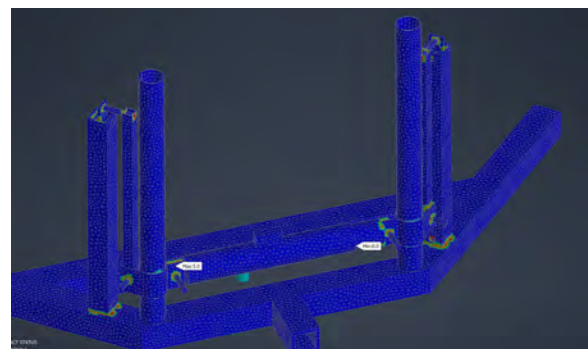
(a)



(b)



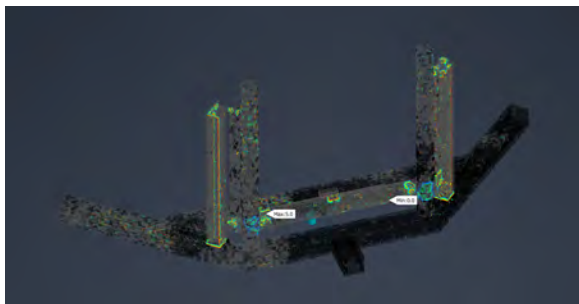
(c)



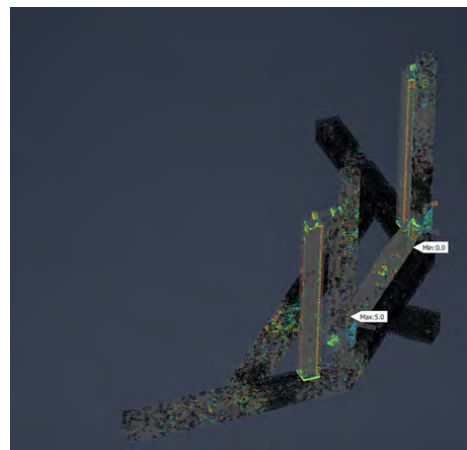
(d)

Figura 73: En las imágenes 'a', 'b' y 'c' se observa el análisis por cargas, siendo de 478.4 MPa en parte media de la estructura donde recae la mayoría de carga; en la imagen 'd' se observa el análisis de estado sólido, siendo lógica la concentración de cargas por cada ensamble.

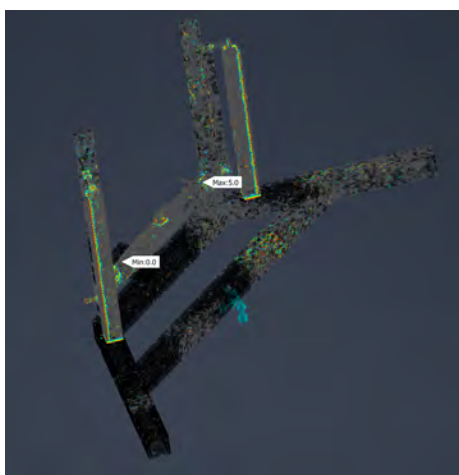
En la colección de imágenes [Figura 74](#) siguientes se observa el análisis de estado sólido por líneas en mayor perspectiva.



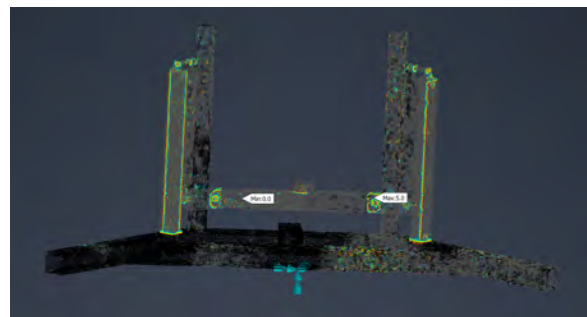
(a)



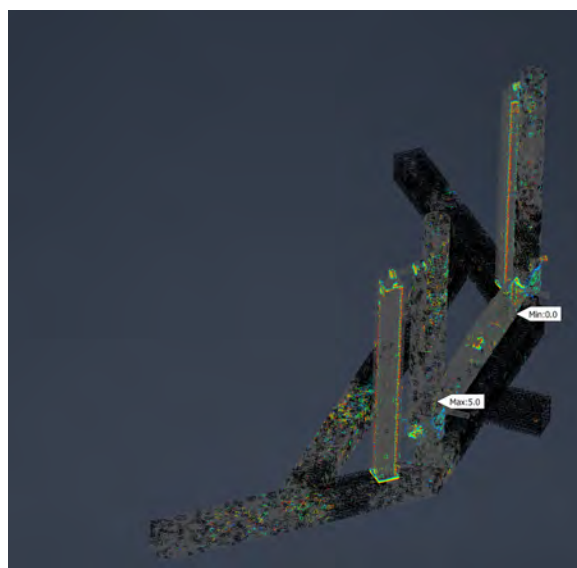
(b)



(c)



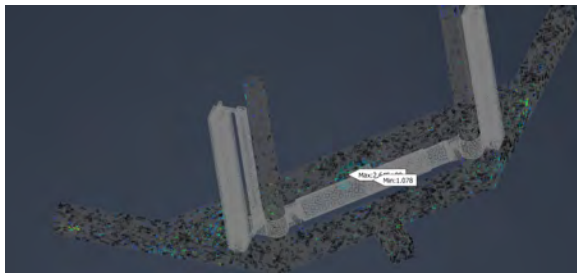
(d)



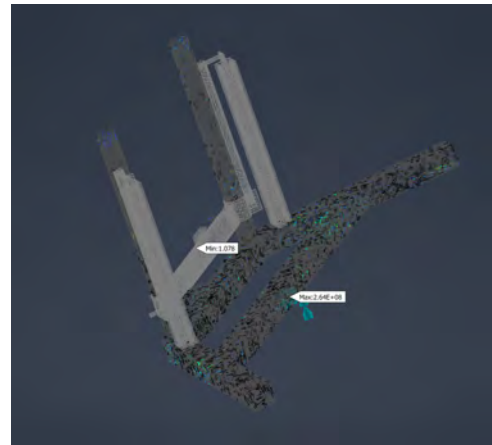
(e)

Figura 74: En las imágenes 'a', 'b', 'c', 'd' y 'e' se observa el análisis de estado sólido por líneas, demostrando de gran manera la distribución de cargas por todo el control de la estructura en los actuadores y los ensambles.

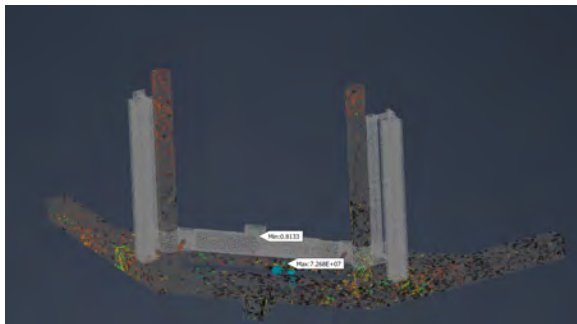
En la colección de imágenes [Figura 75](#) se observan las imágenes 'a' y 'b' se observa el análisis por tensión por líneas observando cargas de $2.64e8$ N en la base de demostrando gran refuerzo estructural sin necesidad de deformación en otras partes de la estructura (guías y actuadores); en las imágenes 'c' y 'd' se demuestra la fuerza reactiva que la mayor parte se realiza en la base de la bicicleta siendo importante la carga de $7.268e7$ N pero en la base delantera se encuentra repartido la reacción de 0.8133 N , en las guías de acero podremos observar reacción predictiva previamente de la base entendiendo su importancia; en las imágenes 'e' y 'f' se puede observar el momento ejercido en la estructura importante recalcar que la forma de cilindro y las guías hacia los actuadores consiguen distribuir cargas sin deformar o eliminar su función final.



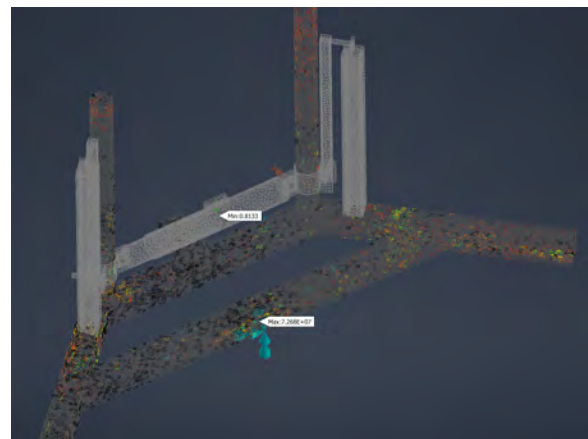
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 75: En la colección de imágenes podemos observar el análisis de tensión, fuerza reactiva y momento.

En la colección de imágenes siguiente [Figura 76](#) podemos observar el análisis por cargas en líneas; siendo más demostrativo en el reparto de cargas, el análisis de desplazamiento y de factor común en el caso de tubería de acero.

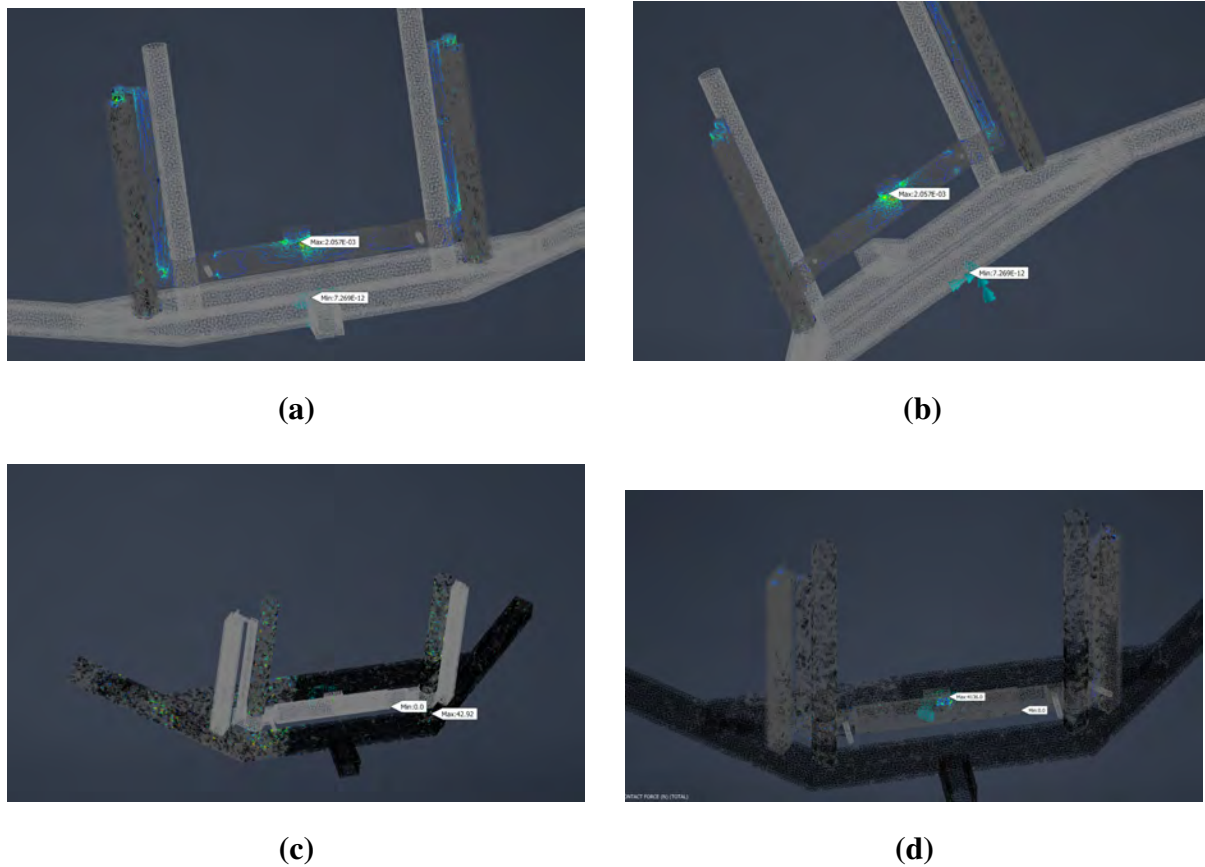
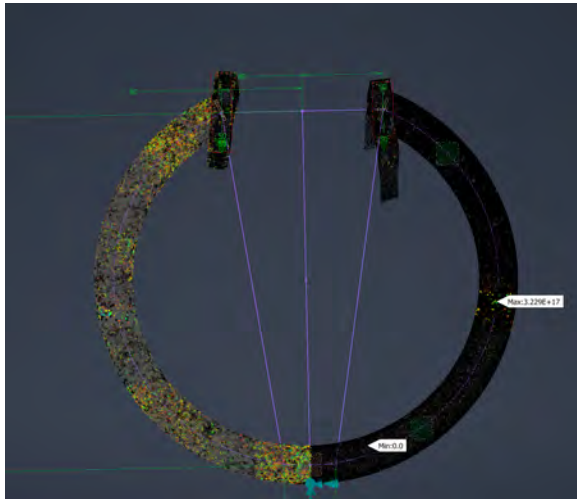


Figura 76: En las imágenes 'a' y 'b' se observa el análisis en líneas por desplazamiento, lo cual es mínimo; en 'c' y 'd' se analizan las estructuras por factor de seguridad, siendo de 42, usando tubería de acero y PTR.

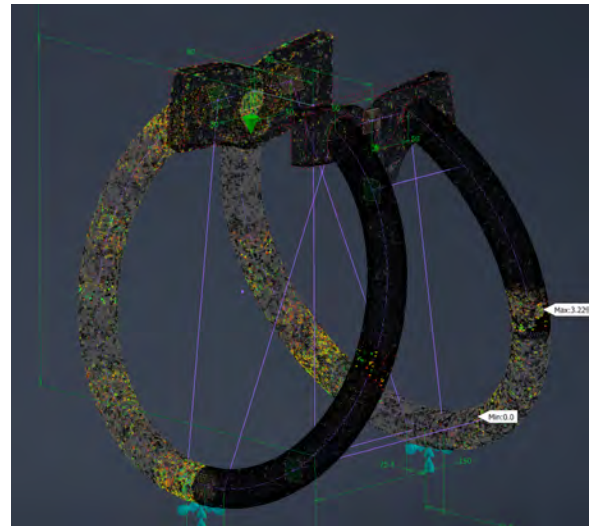
6.1.4 Análisis de la base trasera.

En la colección de imágenes siguiente [Figura 77](#) podemos observar las imágenes 'a', 'b', 'c' y 'd' se encuentran varias perspectivas de la carga efectiva en la estructura, dos tipos de escenarios posibles que suceden al repartir la carga, podemos ver una carga excesiva de $3.229e17$ causando una evidente deformación pero en el otro extremo se predice recargas en la mayoría de la estructura, apoyando repartir cargas sea casi nulo el evento crítico de cargas máximas o desplazamiento de acero de la estructura siendo viable para su uso; en las imágenes 'e' y 'f' se analizan la concentración de cargas en los puntos de colores degradados del rojo al azul demostrando la mayor cantidad de esfuerzo en esa zona a pesar de encontrar puntos

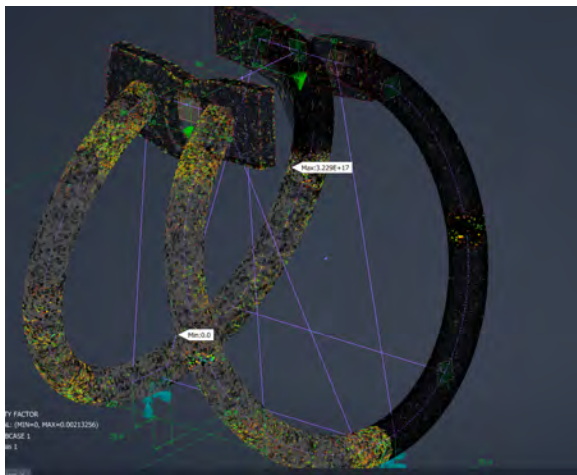
críticos excéntricos de $1e10$ en todo el perímetro de la tubería , contando esto con la necesidad de reforzar la estructura , pero llegando a demostrar que repartiría la mayor parte de cargas en el perímetro estructural, algo necesario para derivar esfuerzos sin deformar la pieza o dañar al usuario.



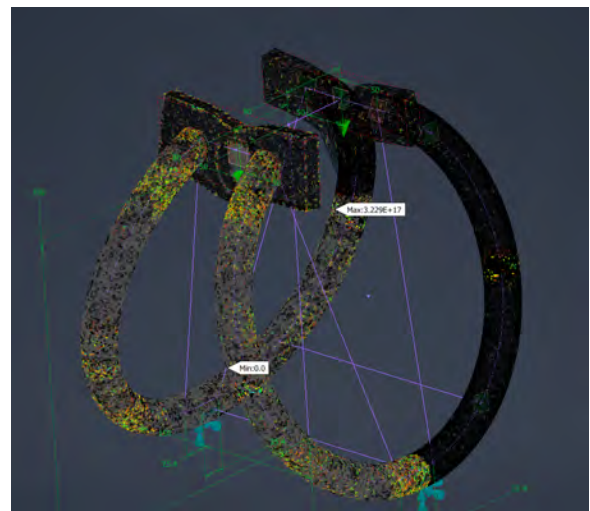
(a)



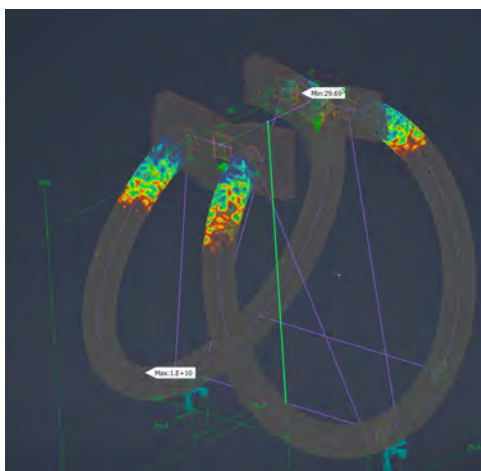
(b)



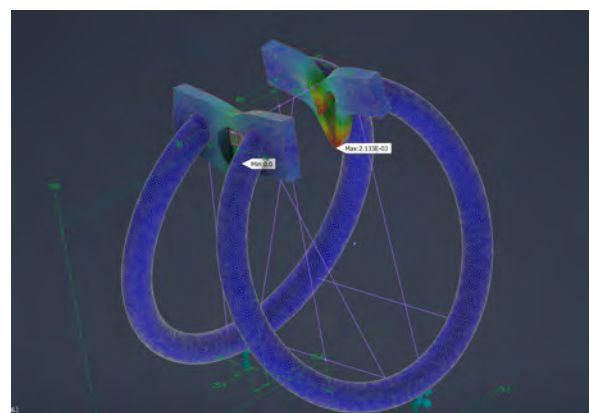
(c)



(d)



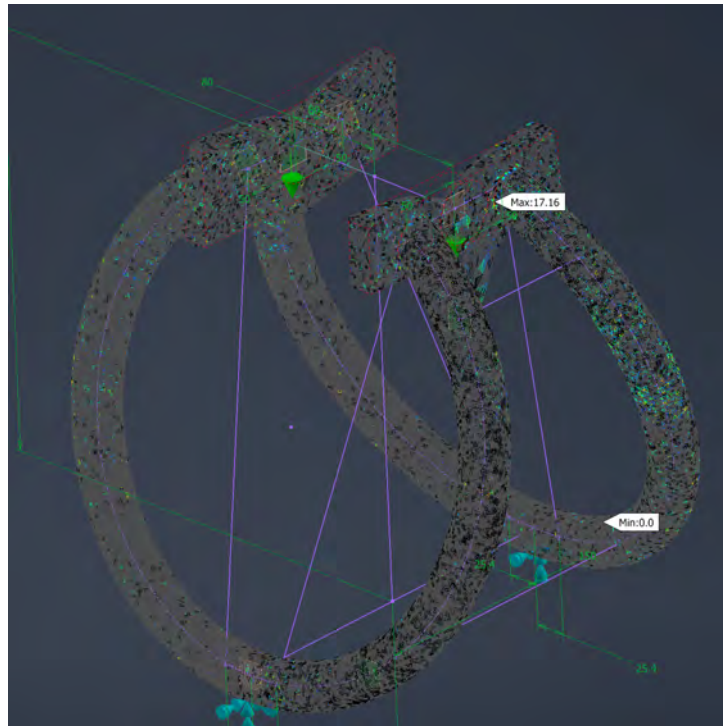
(e)



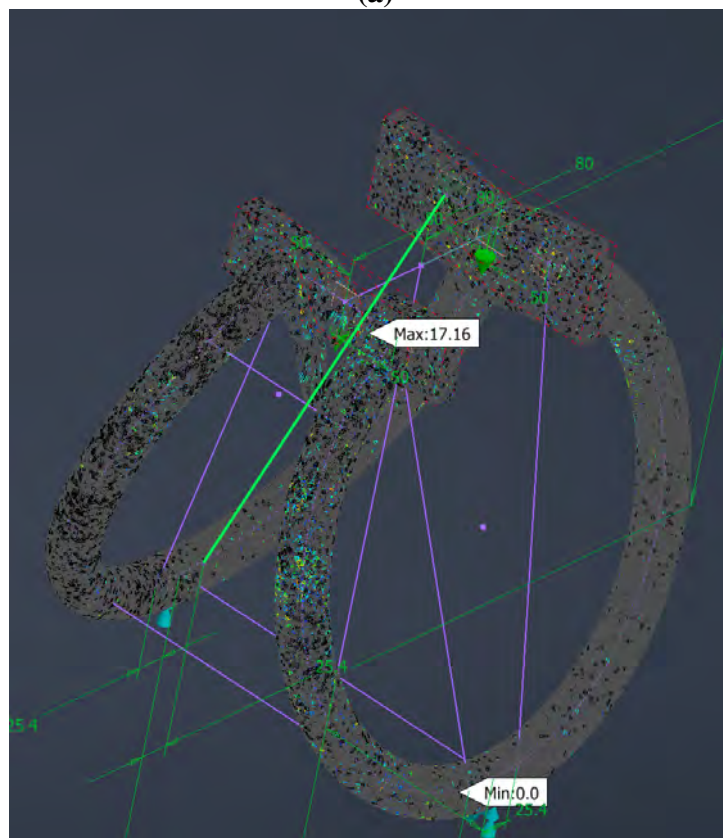
(f)

Figura 77: En la colección de imágenes podemos observar el análisis por cargas en líneas, siendo más demostrativo en el reparto de cargas, el análisis de convergencia de cargas y de desplazamiento predictivo en el caso de tubería de acero.

En la colección de imágenes siguiente [Figura 78](#) podemos observar las imágenes 'a' y 'b'; podemos visualizar el comportamiento interno de la estructura, encontrando contornos finitos en la estructura con perturbaciones con 2 escenarios, tanto deformación como deformaciones internas distribuidas en su contorno, demostrando necesidad de estructuras de refuerzo en varios puntos concretos del análisis.



(a)



(b)

Figura 78: En la colección de imágenes podemos observar el análisis del estado sólido de la parte trasera de la estructura, demostrando la predicción del comportamiento por líneas y subsecciones.

6.2 Caracterización de los actuadores.

En la caracterización de los actuadores encontramos cantidades de potencia en amperes en cada 5, 10, 15 y 20 kilos, mostrado en la [Tabla 1](#).

/Carga Distancia/	sin carga	5kg	10kg	15kg	20kg
5 cm	0.10	0.24	0.4	0.58	0.68
10 cm	0.12	0.26	0.45	0.62	0.70
15 cm	0.14	0.22	0.46	0.64	0.66
20 cm	0.15	0.39	0.57	0.66	0.68
25 cm	0.14	0.4	0.56	0.67	0.70
30 cm	0.20	0.4	0.57	0.67	0.68

Tabla 1: Tabla de caracterización del actuador A.

Y para el segundo actuador, en iguales cantidades de carga mencionadas en la anterior tabla, la caracterización entrega resultados que se muestran en la siguiente [Tabla 2](#) en unidades de potencia en amperios.

/Carga Distancia/	sin carga	5kg	10kg	15kg	20kg
5 cm	0.10	0.24	0.44	0.58	0.68
10 cm	0.12	0.24	0.45	0.64	0.68
15 cm	0.14	0.22	0.45	0.64	0.66
20 cm	0.15	0.26	0.52	0.64	0.68
25 cm	0.14	0.42	0.49	0.66	0.68
30 cm	0.20	0.44	0.52	0.67	0.68

Tabla 2: Perfil de caracterización del actuador B.

6.3 Pruebas y experimentación con usuarios.

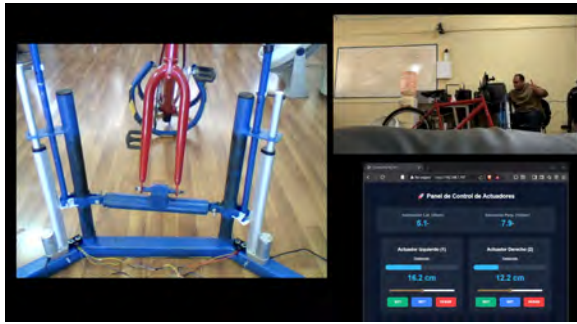
El modelo mecatrónico cumple con inclinaciones angulares de 30 grados de manera lateral y un ángulo de 30° horizontal de inclinación positiva.

Las pruebas realizadas se demuestran en la siguiente [Tabla 3](#), siendo experimentada con usuarios de diferentes pesos y tamaños, mostrando el comportamiento de la base y su operación.

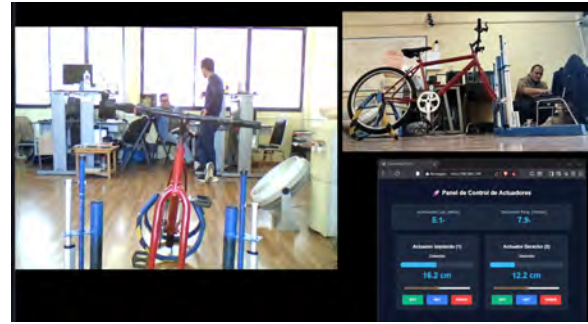
Usuario	Peso (kg)	Altura (m)
a	64.5	1.620
b	70.0	1.660
c	60.0	1.650
d	100.0	1.850
e	87.0	1.700
f	100.0	1.881

Tabla 3: Perfil de usuario, recalando varias condiciones físicas y morfológicas.

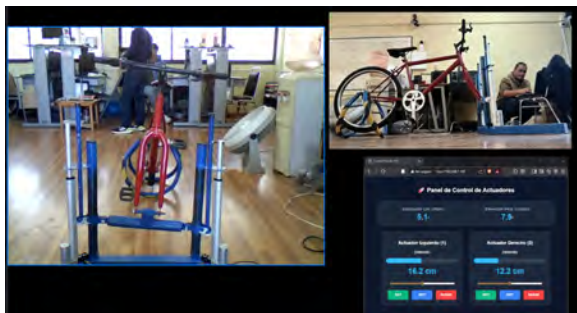
En la colección de imágenes siguiente [Figura 79](#) podemos observar las imágenes 'a', 'b' y 'c' se puede observar la calibración de la cámara, al igual que la base y su sistema para la experimentación de carga con usuarios y el uso de la interfaz. En las imágenes 'd', 'e' y 'f' se puede visualizar la prueba sin carga y su comportamiento en los sensores por parte de la interfaz.



(a)



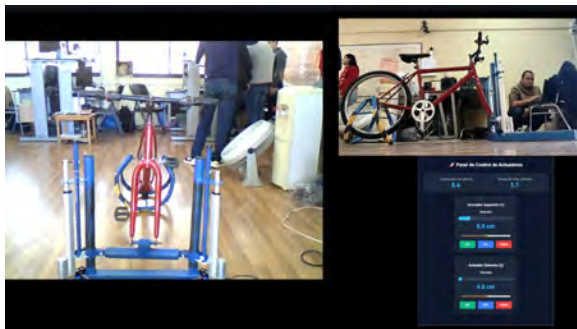
(b)



(c)



(d)



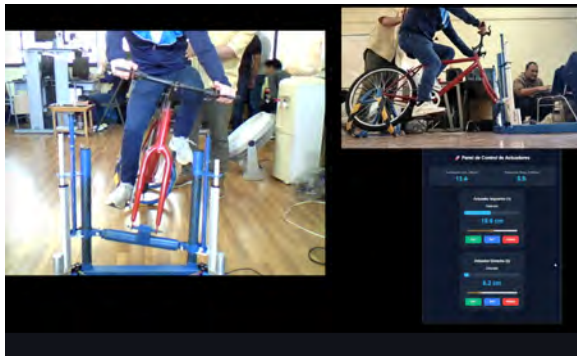
(e)



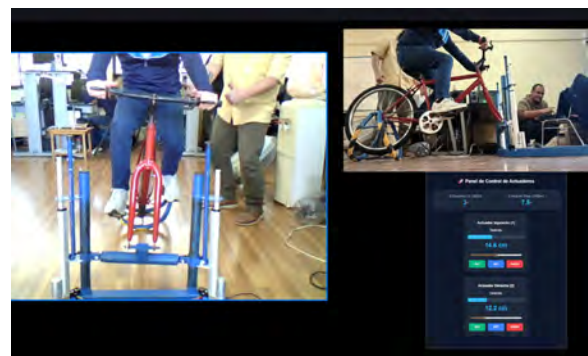
(f)

Figura 79: En la colección de imágenes podemos observar la interfaz que se utiliza, al igual que la base.

En la colección de imágenes siguiente [Figura 80](#) podemos observar las imágenes 'a', 'b', 'c', 'd', 'e' y 'f' se visualiza la operación de la base delantera y trasera con usuarios de varios pesos para demostrar la aplicación.



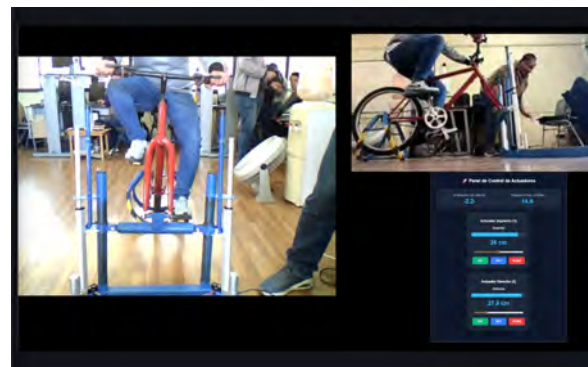
(a)



(b)



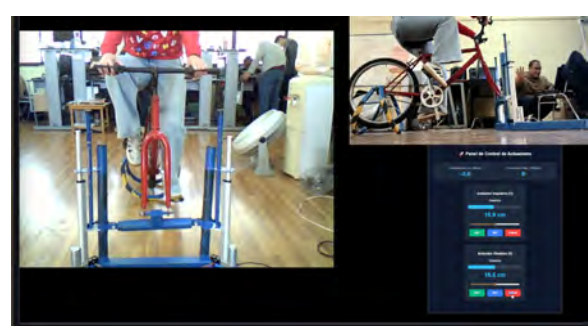
(c)



(d)



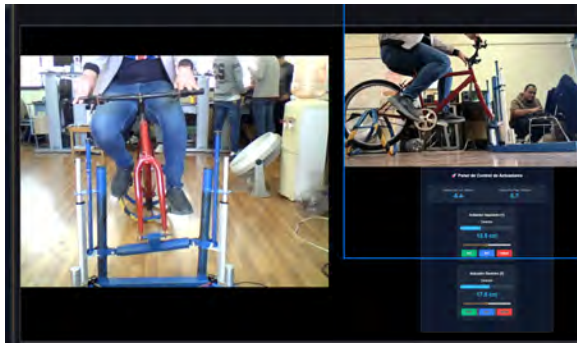
(e)



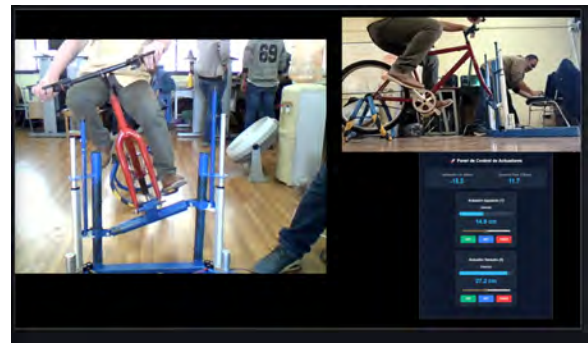
(f)

Figura 80: En la colección de imágenes podemos observar la prueba experimental con usuarios de varios pesos visualizando la operación de la base.

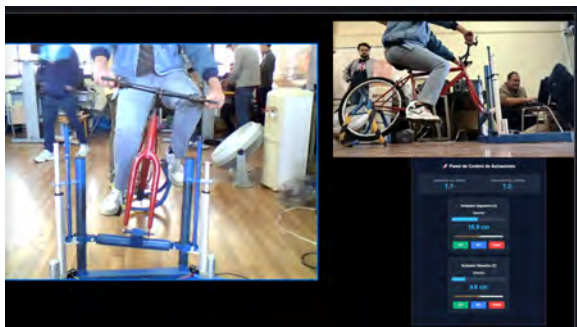
En la colección de imágenes siguiente [Figura 81](#) podemos observar las imágenes 'a', 'b', 'c' y 'd' se observan pruebas experimentales en varias inclinaciones, siendo inclinados y registrando inclinaciones laterales, así como el control desde la página que nos sirve para controlar de manera remota el sistema de actuación.



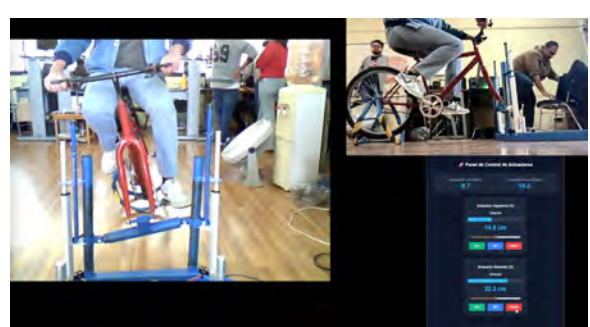
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 81: En la colección de imágenes podemos observar pruebas experimentales con usuarios.

6.3.1 Base final del sistema de control.

En la colección de imágenes siguientes se puede notar el diseño final del sistema de control on/off en la base central, al igual que los puentes H puestos en carcasas sin cerrar; en la [Figura 82](#) se puede observar a detalle diferentes perspectivas.



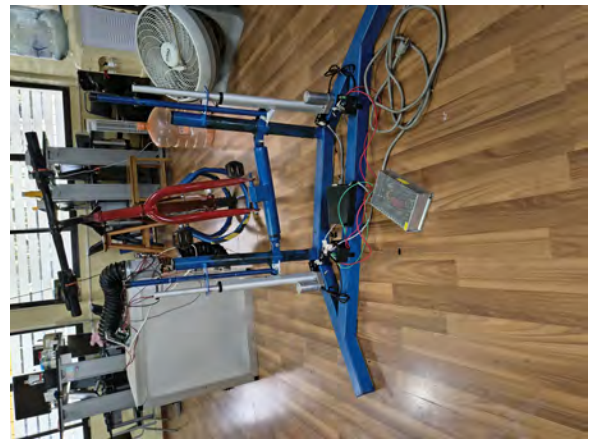
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 82: En la colección de imágenes podemos observar las diferentes perspectivas del sistema de control en sus bases.

6.4 Plan de mantenimiento preventivo del sistema.

Como parte de la validación operativa del prototipo, se diseñó un plan de mantenimiento preventivo puesto en el [Anexo A](#). Este protocolo es de vital importancia para la viabilidad del proyecto, dado que, al prescindir de sensores de parada física o de monitoreo de corriente, la integridad del hardware depende de la inspección técnica y el cumplimiento de las normas de uso.

6.4.1 Protocolo de inspección y frecuencias.

La Tabla 4 resume las acciones necesarias para garantizar que el simulador mantenga su nivel de servicio y seguridad durante su vida útil.

Tabla 4: Cronograma de mantenimiento preventivo del simulador.

Componente	Acción Requerida	Frecuencia	Justificación Técnica
Estructura PTR	Inspección visual de soldaduras y uniones.	Semestral	Prevención de fallas por fatiga de materiales ante cargas cíclicas [59].
Articulaciones	Aplicación de grasa de litio NLGI 2 en pernos y pivots.	Cada 100h de uso	Reducción de fricción y protección contra la corrosión por humedad [56].
Actuador Lineal	Limpieza del vástago y verificación de ruidos anómalos.	Mensual	Al no contar con límites físicos, se debe asegurar que el recorrido no presente obstrucciones.
Electrónica	Limpieza de polvo en disipadores del BTS7960.	Trimestral	Mantener la eficiencia térmica del driver para evitar degradación de los MOSFETs.
Conexiones	Verificación de ajuste en terminales de potencia.	Trimestral	Las vibraciones mecánicas pueden aflojar los cables en el gabinete de control.

6.4.2 Procedimientos específicos

6.4.2.1 Mantenimiento tribológico.

La aplicación de la grasa de litio NLGI 2 debe realizarse de forma manual tras una limpieza previa con desengrasante cítrico en los ejes de rotación. Este procedimiento garantiza que la película de lubricante mantenga un régimen de lubricación límite, reduciendo el par de arranque requerido por el actuador lineal y prolongando la vida útil de los pernos de acero.

6.4.2.2 Sincronización de carrera por software.

Debido a la ausencia de *limit switches*, el protocolo de mantenimiento incluye una revisión mensual de la calibración del código en el ESP32. Se debe verificar que los tiempos de encendido del actuador correspondan exactamente a los límites físicos del mecanismo de inclinación para evitar bloqueos mecánicos que pudieran sobrecalentar el motor DC.

6.4.2.3 Gestión de la robustez electrónica.

Se verificó que el uso del puente H **BTS7960** proporciona una ventaja de mantenimiento pasivo: su capacidad de manejo de corriente (**43 A**) es significativamente superior a la corriente de bloqueo del actuador ($\approx 5A$), lo que reduce la probabilidad de falla catastrófica por picos de tensión inesperados durante el uso intensivo.

6.5 Análisis y descripción de la interfaz de control digital.

La arquitectura del sistema de control se centraliza en una interfaz de usuario (UI) de alto rendimiento, diseñada bajo el paradigma de *dashboard* web dinámico. Esta interfaz reside de forma nativa en la memoria flash del microcontrolador **ESP32**, el cual actúa como un servidor asíncrono (`WebServer.h`) capaz de gestionar peticiones HTTP sin interrumpir los ciclos de lectura de los sensores.

6.5.1 Arquitectura del dashboard y protocolo de comunicación.

El diseño visual ha sido optimizado mediante el uso de estilos CSS modernos, empleando un esquema de **Dark Mode** (fondo #0f172a) que minimiza la fatiga visual y resalta los indicadores críticos en color azul cian (#38bdf8).

Desde el punto de vista técnico, la interfaz opera mediante una estructura de datos asíncrona:

- **Backend (C++):** El firmware del ESP32 empaqueta las variables de distancia, ángulos y estados en un objeto **JSON**.
- **Frontend (JavaScript):** La interfaz implementa un método `setInterval` con una frecuencia de refresco de 500 ms, el cual consume los datos del endpoint `/data` mediante la

API *fetch*, permitiendo una actualización en tiempo real sin recarga de página (tecnología AJAX).

6.5.2 Instrumentación y telemetría angular

En la parte superior del *dashboard* se ubica el módulo de telemetría cinemática. A diferencia de una lectura cruda de sensores, el sistema realiza un procesamiento trigonométrico en tiempo real (ver [Subsección 5.5.3](#)) para determinar la postura espacial del prototipo:

- **Inclinación lateral (base 45 cm):** Calcula el ángulo de desviación mediante la función arcotangente aplicada a la diferencia de extensión entre ambos actuadores. Es una métrica crítica para la estabilidad estructural.
- **Elevación perpendicular (eje 102 cm):** Representa el ángulo de elevación respecto a la base de referencia, calculado a partir del promedio aritmético de las distancias medidas por los sensores ultrasónicos HC-SR04.

6.5.3 Gestión de actuadores y control de potencia.

El control de los actuadores lineales se segmenta en dos columnas simétricas para el **Actuador Izquierdo (1)** y el **Actuador Derecho (2)**. Cada panel integra las siguientes funcionalidades avanzadas:

1. **Control de posición (setpoint):** Mediante un deslizador (*slider*) de precisión, el usuario define una distancia objetivo entre 3 cm y 30 cm. El firmware implementa un algoritmo de control con una **banda muerta** de ± 0.7 cm para evitar oscilaciones innecesarias y proteger los engranajes del actuador.
2. **Modulación por ancho de pulso (PWM):** La potencia se gestiona a través del puente H **BTS7960**. El código utiliza la función `ledcWrite` con una frecuencia de 5 kHz y una resolución de 8 bits, permitiendo una entrega de par constante y movimientos fluidos.
3. **Monitoreo de estado:** Un visualizador de texto reporta estados lógicos (*IDLE*, *Extendiendo*, *Retrayendo*, *Detenido*), sincronizado con una barra de progreso que normaliza el rango físico de los actuadores para una interpretación visual rápida.

6.5.4 Panel superior: indicadores de orientación.

En la parte superior se presentan dos métricas angulares calculadas mediante trigonometría a partir de los sensores ultrasónicos:

- **Inclinación lat. (45 cm):** Muestra el ángulo de inclinación lateral del sistema en grados ($^{\circ}$).
- **Elevación perp. (102 cm):** Indica el ángulo de elevación perpendicular respecto a la base de referencia.

6.5.5 Paneles de control de actuadores.

La interfaz se divide en dos columnas idénticas para el **Actuador Izquierdo (1)** y el **Actuador Derecho (2)**. Cada panel contiene:

- **Estado del sistema (IDLE/MOV):** Indica si el actuador está en reposo o en movimiento.
- **Visualizador de extensión:** Muestra la distancia actual en centímetros (cm) y una barra de progreso visual.
- **Botón EXT (verde):** Envía una señal al puente H BTS7960 para extender el actuador (High en pin PWM de avance).
- **Botón RET (azul):** Activa la secuencia de retracción del actuador.
- **Botón PARAR (rojo):** Envía un frenado de emergencia (Low en ambos pines de control) para detener el movimiento instantáneamente.

6.5.6 Algoritmos de seguridad y protección de hardware.

La integridad física del sistema está garantizada por una lógica de seguridad de doble capa programada en el bucle principal (loop):

- **Límites de carrera virtuales:** Si el sistema detecta una lectura ≥ 30 cm o ≤ 3 cm, el firmware ignora el comando de movimiento y ejecuta la rutina `detener()`, bloqueando los pines EN del controlador.

- **Parada de emergencia:** El botón **PARAR** (codificado en rojo) envía una señal de prioridad que coloca ambos pines de control (RPWM y LPWM) en estado bajo, deteniendo el torque de forma inmediata.

En la [Figura 83](#) podemos observar la interfaz creada para este proyecto.



Figura 83: Interfaz de usuario descrito.

CONCLUSIONES

La validación mediante el *análisis de elemento finito* (FEA) permitió identificar concentraciones de esfuerzo críticas de 9.176 MPa en la base. Aparte de eso, la selección de perfiles PTR y tubería de acero al carbono resultó en un factor de seguridad de 42. Esta robustez garantiza que el diseño soporte cargas dinámicas de hasta 130 kg sin alcanzar el límite elástico del material, asegurando una operación libre de deformaciones permanentes.

La transición de una geometría rígida a una optimizada mediante el uso de tubería circular, complementada con lubricación industrial especializada, redujo el problema de fuerzas cortantes por desplazamiento. Los resultados de las simulaciones de pendiente y giro muestran un movimiento fluido, cuya durabilidad a largo plazo queda respaldada por el plan de mantenimiento preventivo basado en grasa de litio NLGI 2.

El rediseño estructural realizado durante el proceso demostró ser acertado, logrando un equilibrio entre rigidez, eficiencia electrónica y una experiencia digital moderna. Si bien el prototipo actual cumple con los límites de precisión angular y estabilidad de conexión esperados, se ha establecido un plan de mantenimiento preventivo centrado en la lubricación con grasa de litio NLGI 2 para asegurar su durabilidad a largo plazo. Este trabajo no solo materializa un sistema funcional de emulación de pendientes e inclinaciones, sino que sienta las bases para futuras iteraciones que busquen la optimización de materiales sin comprometer la fiabilidad mecánica y electrónica demostrada en este documento.

La integración del microcontrolador ESP32 facilitó la transición de un mecanismo estático a un simulador interactivo. La caracterización de los actuadores reveló un consumo energético eficiente entre 0.68 A y 0.70 A bajo carga; al contrastar estos valores con la capacidad nominal del puente H BTS7960, se confirma una gestión térmica óptima. Asimismo, la implementación de una banda muerta de ± 0.7 cm y límites de carrera virtuales resolvió con éxito la estabilidad del control de posición.

El despliegue de un servidor web para la visualización de datos en tiempo real permitió abstraer cálculos trigonométricos complejos en una interfaz intuitiva. Esto no solo simplifica la interacción del usuario con el hardware, sino que sienta las bases tecnológicas para futuras iteraciones que busquen la optimización del prototipo sin sacrificar la fiabilidad del sistema.

Tras contrastar los resultados de la simulación CAD/FEA con la experimentación física y el comportamiento de los sistemas de control electrónicos, los datos obtenidos permiten **validar la operatividad integral del prototipo y concluir que el sistema funciona satisfactoriamente** de acuerdo con los objetivos de precisión y estabilidad planteados en la hipótesis inicial.

RECOMENDACIONES

6.6 Recomendaciones y Trabajos Futuros

Con base en la implementación y las pruebas de campo realizadas al sistema de control de actuadores, se proponen las siguientes recomendaciones para futuras iteraciones del proyecto:

6.6.1 Mejoras en el hardware y sensado

Se recomienda la implementación de un *filtro de Kalman* en el código del ESP32. Esto permitirá suavizar las lecturas de los sensores HC-SR04, eliminando los picos de ruido causados por rebotes ultrasónicos en superficies irregulares.

Para aplicaciones en entornos con alta polución o ruido acústico, se sugiere sustituir los sensores ultrasónicos por sensores láser de tiempo de vuelo (*ToF - Time of Flight*) como el VL53L1X, los cuales poseen un cono de detección más estrecho y mayor precisión.

Se recomienda el uso de optoacopladores entre el ESP32 y los puentes H BTS7960 para proteger la etapa de control de posibles picos de corriente provenientes de la etapa de potencia de 24 V.

6.6.2 Optimización del control de Software

Migrar la lógica de control actual (tipo ON/OFF con histéresis) hacia un algoritmo de control *Proporcional-Integral-Derivativo* (PID). Esto permitiría que los actuadores reduzcan su velocidad conforme se acercan al objetivo, evitando frenados bruscos y extendiendo la vida útil de los engranajes mecánicos.

Implementar un sistema de autenticación en la página web del ESP32 para restringir el acceso al panel de control únicamente a personal autorizado, aumentando la seguridad operativa.

6.6.3 Seguridad Mecánica

Aunque el sistema cuenta con límites por software, se recomienda instalar interruptores de límite físicos (*Limit Switches*) conectados a los pines de interrupción del ESP32 como una capa de seguridad redundante ante fallos en los sensores de distancia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] STCONAPRA, *Informe sobre la Situación de la Seguridad Vial, México 2018*, 2018. dirección: https://drive.google.com/file/d/1MdYJQsNmG5cm8V_CaMOM_qHKvU75eLc5/view.
- [2] *Accidentes de Tránsito Terrestre*, 2018. dirección: <https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/continuas/transporte/accidentes.asp#..>
- [3] *Bases de mortalidad 2015-2020, INEGI-SS; SEED 2015-2020, DGIS-SS; Accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas, INEGI 2015-2020; Anuario estadístico de colisiones en carreteras federales, Instituto Mexicano del Transporte*, <https://www.inegi.org.mx/temas/mortalidad/>, Accedido el día de hoy.
- [4] F. Staff, «Mortalidad en carretera disminuye un 5 %, pero crece cantidad de ciclistas y peatones fallecidos,» *Forbes Mexico*, dic. de 2023. dirección: <https://www.forbes.com.mx/mortalidad-en-carretera-disminuye-un-5-pero-crece-cantidad-de-ciclistas-y-peatones-fallecidos/>.
- [5] *Bases de mortalidad 2015-2020, INEGI-SS; SEED 2015-2020, DGIS-SS*, <https://www.inegi.org.mx/temas/mortalidad/>, Accedido el día de hoy.
- [6] I. de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado. «Sedentarismo afecta al 58.3 por ciento de los mexicanos mayores de 18 años.» (abr. de 2019), dirección: <https://www.gob.mx/issste/prensa/sedentarismo-afecta-al-58-3-por-ciento-de-los-mexicanos-mayores-de-18-anos?idiom=es>.
- [7] S. de Salud. «¿Qué es sedentarismo?» (Ago. de 2015), dirección: <https://www.gob.mx/salud/es/articulos/que-es-sedentarismo>.
- [8] S. de Salud. «Obesidad, principal problema de salud en México.» (mar. de 2024), dirección: <https://www.gob.mx/salud/prensa/095-obesidad-principal-problema-de-salud-en-mexico?idiom=es>.
- [9] I. de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado. «Mata la obesidad a 41 millones de personas cada año en el mundo.» (nov. de 2020), dirección: <https://www.gob.mx/salud/prensa/095-obesidad-principal-problema-de-salud-en-mexico?idiom=es>.

- [10] I. de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado. «Obesidad, hipertensión, diabetes, fumar y vida sedentaria, enemigos del corazón: advierte el ISSSTE.» (sep. de 2021), dirección: <https://www.gob.mx/issste/prensa/215579>.
- [11] H. D. M. Casa. «Cómo mejorar la motricidad fina y gruesa en personas mayores: una guía completa.» (ene. de 2023), dirección: <https://hogardiamicasa.com/motricidad-fina-y-gruesa-en-personas-mayores/>.
- [12] J. Sabaté, *¿Andar deprisa o bicicleta estática? Ventajas de cada alternativa en adultos*, jun. de 2023. dirección: https://www.eldiario.es/era/andar-bicicleta-estatica-ventajas-alternativa_1_1167025.html#:~:text=Su%20independencia%20del%20clima%3A%20al,las%20condiciones%20exteriores%20son%20impracticables.
- [13] *Conoce las ventajas y desventajas del rodillo frente a la bicicleta estática*, ene. de 2022. dirección: <https://www.bicimarket.com/blog/conoce-las-ventajas-y-desventajas-del-rodillo-frente-a-la-bicicleta-estatica/>.
- [14] T. A. J. David, «Bicicleta Estática de Rehabilitación para Pacientes con Trauma Raquímedular (TRM) del Centro Médico Biomedical Group,» Tesis de mtría., Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de Ingeniería, feb. de 2022.
- [15] B. F. Roca, «Comparación de Diferentes Métodos de Ajuste de la Bicicleta en Ciclistas Entrenados: Influencia de Factores Biomecánicos y Energéticos,» 2015.
- [16] M. C. Atienza, «Simulación y Análisis de la Dinámica de una Bicicleta,» 2019.
- [17] «Desarrollo de Sistema de Inmersión 3D en Realidad Virtual para el Entrenamiento de Ciclismo en Interiores,» Tesis de mtría., Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, jun. de 2021.
- [18] J. P. Escobar, «Sistema de evaluación de movilidad y complemento a un plan integral de rehabilitación en pacientes con amputación de miembro inferior,» Tesis de Maestría, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2023.
- [19] M. Á. N. Hipólito, «Estudio a fatiga de un cuadro de bicicleta mediante el método de elementos finitos,» Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2015.
- [20] J. García-López, «Biomecánica aplicada al ciclismo profesional,» en *XXXIII Congreso de la Sociedad Ibérica de Biomecánica y Biomateriales (BioValencia '10)*, Valencia, España, 2010.

- [21] M. Marchand y M. Mocaer, *Eficacia del uso de la bicicleta estática sobre la función y el dolor en pacientes con artrosis de rodilla*, Trabajo Final de Grado, Universidad Europea de Valencia, 2023.
- [22] *Indoor Training Bicycle Device*, 2021.
- [23] L. C. Papadopoulos, *Bicycle Trainer Permitting Steering and Tilting Motion*, 2019.
- [24] «Wahoo WF-BKTR5 Fitness KICKR Climb Black, One Size.» (), dirección: <https://www.amazon.com.mx/Wahoo-Fitness-KICKR-Climb-Black/dp/B07FJW6S3B>.
- [25] «Elite Simulador Pendiente Rizer Para Rodillo.» (), dirección: <https://www.tradeinn.com/bikeinn/es/elite-simulador-pendiente-rizer-para-rodillo/138319236/p>.
- [26] C. M. Fortune, S. A. Baumann, M. C. Hestilow y T. G. Lefeber, «Vehicle rack for cycle,» US10434394B2, United States Patent, oct. de 2019. dirección: <https://patents.google.com/patent/US10434394B2/en>.
- [27] J. M. Gere y B. J. Goodno, *Mechanics of Materials*, 2013.
- [28] W. R. Smythe, «Eddy currents in a cylindrical tube with a gap,» *Journal of Applied Physics*, vol. 57, n.º 4, págs. 1369-1373, 1985. DOI: [10.1063/1.334468](https://doi.org/10.1063/1.334468).
- [29] A. Rodríguez y J. García, «Implementación de servidores asíncronos en microcontroladores de bajo consumo para aplicaciones IoT,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 18, n.º 2, 2021.
- [30] Espressif Systems, *ESP32 Datasheet*, https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf, Consultado el 6 de septiembre de 2025, 2021.
- [31] D. Flanagan, *JavaScript: The Definitive Guide*, 7th. O'Reilly Media, 2020.
- [32] M.-N.-D. Hridi. «ESPAsyncWebServer: Async Web Server for ESP8266 and ESP32.» Accedido: 2024-05-20. (2023), dirección: <https://github.com/me-no-dev/ESPAsyncWebServer>.
- [33] D. Shetty y R. A. Kolk, *Mechatronics System Design*, 2nd. Cengage Learning, 2011.
- [34] D. G. Alciatore y M. B. Hiestand, *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*, 5th. McGraw-Hill Education, 2018.

- [35] P. N. Rao, *CAD/CAM: Principles and Applications*, 3rd. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 2010, Texto de referencia fundamental en el campo de CAD/CAM.
- [36] I. Zeid y R. Sivasubramanian, *CAD/CAM: Theory and Practice*, 2nd. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2009, Obra académica exhaustiva sobre los fundamentos teóricos y prácticos de CAD/CAM.
- [37] Siemens AG. «NX: La próxima generación de soluciones de diseño, simulación y fabricación.» Portal oficial de Siemens Digital Industries Software para NX. (2023), dirección: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/nx/> (visitado 27-10-2023).
- [38] Autodesk, Inc. «Software CAD 3D Inventor 2024.» Información oficial sobre características y aplicaciones de Inventor. (2023), dirección: <https://www.autodesk.es/products/inventor/overview> (visitado 27-10-2023).
- [39] T. E. Grim y M. J. Pauls, «Bicycle trainer,» pat. US5611759A, 1997.
- [40] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor y J. Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 2013.
- [41] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures*, 2006.
- [42] A. Gfrerrer, «A Novel Application of Eddy Current Braking for Functional Strength Training during Gait,» *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 44, n.º 4, págs. 1303-1312, 2016. DOI: [10.1007/s10439-015-1447-3](https://doi.org/10.1007/s10439-015-1447-3).
- [43] N. D. Manring, *Hydraulic Control Systems*, 2nd. John Wiley & Sons, 2013.
- [44] A. Parr, *Hydraulics and Pneumatics: A Technician's and Engineer's Guide*, 3rd. Butterworth-Heinemann, 2011.
- [45] Mozilla Developer Network, *AJAX - Asynchronous JavaScript and XML*, 2024. dirección: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Guide/AJAX>.
- [46] STMicroelectronics, *L298 Dual Full-Bridge Driver*, Hoja de datos original del fabricante, 2000. dirección: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>.
- [47] Infineon Technologies AG, *BTS7960 High Current PN Half Bridge Datasheet*, Technical Specification, 2004. dirección: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTS7960-DS-v01_01-en.pdf?fileId=db3a304314d51fe10114f69591410fd7.

- [48] A. I. Pressman, K. Billings y T. Morey, *Switching Power Supply Design*, 3ra. McGraw-Hill Education, 2009.
- [49] Texas Instruments, *LM2596 SIMPLE SWITCHER Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator*, Revised May 2020, Texas Instruments, 2020. dirección: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>.
- [50] Texas Instruments, *LM2576/LM2576HV SIMPLE SWITCHER 3A Step-Down Voltage Regulator*, SNVS107D, 2021.
- [51] onsemi, *LM2596: 3.0 A, Step-Down Switching Regulator*, Semiconductor Components Industries, LLC, oct. de 2021. dirección: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm2596-d.pdf>.
- [52] M. Schultz, *Grob's Basic Electronics*. McGraw-Hill Education, 2015, Fundamentos de sensores de efecto Hall e interruptores de contacto.
- [53] Allegro MicroSystems, *ACS712 Sensor IC Datasheet*, Copia de archivo técnico oficial, 2013. dirección: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>.
- [54] Cytron Technologies, «HC-SR04 User's Manual,» Cytron Technologies Sdn. Bhd., inf. téc., ver. V1.1, 2013.
- [55] Itead Studio, *HC-SR04 Ultrasonic Sensor Product User Guide*, Technical Documentation, 2010.
- [56] G. E. Totten, *Handbook of Lubrication and Tribology*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003, Section on Multi-purpose Lithium Greases (NLGI 2).
- [57] *User Manual: Electric Linear Actuators for Industrial Applications*, Technical guidelines for duty cycle and service life, LINAK A/S, 2023.
- [58] A. S. Sedra y K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press, 2018, Analysis of thermal stress in power MOSFETs.
- [59] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 10th. McGraw-Hill Education, 2014.

PRODUCTOS ACADÉMICOS

ANEXO A: MANUAL DE OPERACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL WEB (ESP32)

A.1 Introducción

Este anexo detalla el funcionamiento del software y hardware desarrollado para el control de los actuadores lineales de 24 V. El sistema utiliza una interfaz web embebida en un ESP32 para la gestión de inclinación lateral y elevación perpendicular.

A.2 Arquitectura de Conexiones

El sistema se basa en la integración de potencia y control mediante los siguientes componentes:

- **Control:** Microcontrolador ESP32 de 30 pines.
- **Potencia:** Dos puentes H BTS7960 conectados a una fuente conmutada de 24V 7A.
- **Retroalimentación:** Dos sensores ultrasónicos HC-SR04 para control de lazo cerrado.

A.3 Configuración de la Interfaz Web

Para acceder al panel de control, el usuario debe seguir estos pasos:

1. Conectar el dispositivo móvil o PC a la red WiFi: **Laboratorio MIA**.
2. Introducir la contraseña: **L@boratorio.1#**.
3. Ingresar la dirección IP del dispositivo (generada por el monitor serie) en el navegador web.

A.4 Lógica de control de seguridad

El sistema implementa límites por software para proteger la integridad mecánica de los actuadores, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Límites de operación de seguridad

Parámetro	Valor	Acción
Distancia Máxima	30.0 cm	Detención automática (Extensión)
Distancia Mínima	3.0 cm	Detención automática (Retracción)
Tolerancia de Error	0.7 cm	Histéresis de parada

A.4.1 Cálculos geométricos implementados

El sistema calcula automáticamente los ángulos de inclinación basados en la distancia medida por los sensores (d_1 y d_2):

$$Angulo_{Lat} = \arctan\left(\frac{d_1 - d_2}{45.0}\right) \times \frac{180}{\pi} \quad (A.1)$$

A.5 Guía de usuario de la pantalla de control

- **Botones EXT/RET:** Movimiento manual de los actuadores.
- **Slider de distancia:** Establece un valor objetivo; el ESP32 moverá el actuador automáticamente hasta alcanzar dicha posición.
- **Barras de progreso:** Indican visualmente el porcentaje de extensión del actuador.

En la [Figura 84](#) se describe el sistema paso a paso de su funcionamiento en un diagrama de bloques.

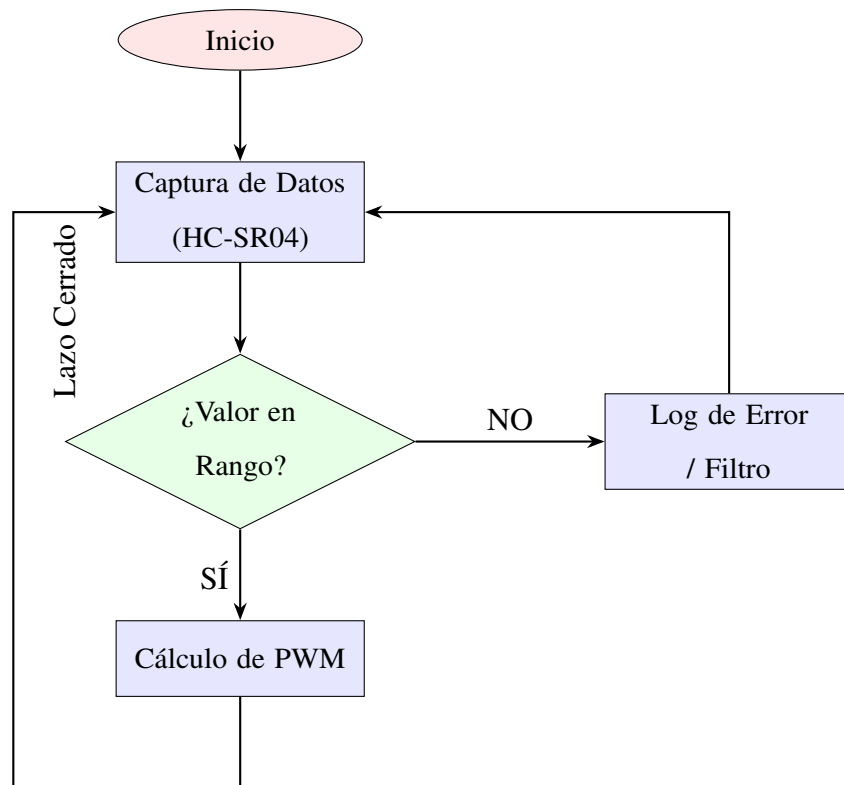


Figura 84: Diagrama de bloques de control para este sistema.

A.6 Manual de Mantenimiento y Operación

A.6.1 Protocolo de encendido y operación segura

Para garantizar la integridad de los componentes electrónicos, se debe seguir el siguiente protocolo:

1. **Verificación visual:** Comprobar que no existan cables sueltos en las terminales del puente H BTS7960.
2. **Alimentación de potencia:** Encender la fuente conmutada de 24V. El LED del regulador LM2576HV debe iluminarse.
3. **Inicialización de control:** El ESP32 tardará aproximadamente 5 segundos en estabilizar la señal WiFi.
4. **Prueba de vacío:** Realizar un movimiento de extensión y retracción breve sin carga mecánica para verificar la respuesta de los actuadores.

A.6.2 Plan de Mantenimiento Preventivo

Se recomienda realizar las siguientes acciones periódicamente para asegurar la precisión de los cálculos de ángulo:

Tabla 6: Cronograma de Mantenimiento

Componente	Acción	Frecuencia
Sensores HC-SR04	Limpieza de los transductores con aire comprimido.	Mensual
Actuadores 24 V	Lubricación de los ejes con grasa de litio.	Trimestral
Conexiones	Re-ajuste de clemas en los puentes H y fuente.	Semestral
Software	Calibración de la constante DIST_BASE.	Tras cada desmontaje

A.6.3 Calibración de Sensores

Si los ángulos $angL$ o $angP$ presentan lecturas erróneas, se debe verificar:

- **Alineación:** Los sensores deben estar a 90° respecto a la superficie de rebote.
- **Obstáculos:** Asegurar que no existan cables o estructuras en el cono de emisión de 15° del sensor ultrasónico.

A.6.4 Resolución de Problemas (Troubleshooting)

- **El sistema no responde a la interfaz:** Verificar que el ESP32 no haya cambiado de IP (revisar Monitor Serie).
- **Movimiento errático:** Revisar que el GND del regulador LM2576 sea común con el GND de la fuente de 24V.
- **Pérdida de torque:** Verificar que la fuente conmutada esté entregando los 7 A requeridos bajo carga máxima.

A.7 Manual de usuario: Interfaz gráfica de control (GUI)

La interfaz web del sistema ha sido diseñada bajo un esquema de **Dashboard Industrial**, optimizada para la visualización de datos críticos y el control de precisión mediante el microcontrolador ESP32.

A.7.1 Descripción de componentes de la pantalla

A continuación se detallan las funciones de cada sección de la interfaz [Figura 83](#)

1. Panel de Telemetría y Orientación: Ubicado en la sección superior, procesa los datos combinados de ambos actuadores para ofrecer una lectura geométrica del sistema en tiempo real.

- **Inclinación lateral:** Muestra en grados ($^{\circ}$) la desviación respecto a la horizontal (Ang_{Lat}).
- **Nivel de burbuja digital:** Indicador visual dinámico. Si el círculo azul está centrado, el sistema se encuentra perfectamente nivelado a 0° .
- **Elevación perpendicular:** Indica el ángulo de ataque general de la plataforma basado en la altura promedio.

2. Módulos de Control de Actuadores (1 y 2): Cada actuador posee un bloque independiente con los siguientes indicadores:

- **Monitor de distancia:** Display digital que indica la extensión en centímetros (cm) con resolución de un decimal.
- **Status Pill (Etiqueta de Estado):**
 - *IDLE*: Sistema en espera.
 - *EXTENDIENDO / RETRAYENDO*: Indica movimiento activo con una animación de pulso.
 - *DETENIDO*: El sistema ha bloqueado el movimiento por seguridad o por comando del usuario.
- **Barra de progreso analógica:** Representación visual del porcentaje de extensión del pistón (Escala de 3 a 30 cm).

3. Controles de Operación:

- **Slider de objetivo:** Permite al usuario definir una distancia específica. El sistema activará el control de lazo cerrado para alcanzar dicha posición automáticamente.

- **Botones EXT / RET:** Comandos manuales para movimientos rápidos.

- **Botón STOP (Paro de software):** Detiene inmediatamente cualquier operación en curso y limpia la memoria de la distancia objetivo.

Nota Técnica: [Actualización de datos]

La interfaz utiliza tecnología **AJAX (Asynchronous JavaScript and XML)**, lo que permite una tasa de refresco de **500 ms** sin necesidad de recargar el navegador. Esto garantiza que el operador vea la respuesta de los sensores ultrasónicos casi en tiempo real.

A.7.2 Procedimiento de Operación Estándar

1. **Monitoreo:** Verifique que la distancia inicial en los displays sea > 3 cm.
2. **Ajuste fino:** Utilice los *sliders* para nivelar la plataforma observando el **nivel de burbuja digital**.
3. **Seguridad:** En caso de comportamiento errático, presione el botón **STOP** de la interfaz antes de desconectar la fuente de poder.

ANEXO B: PLANOS ESTRUCTURALES

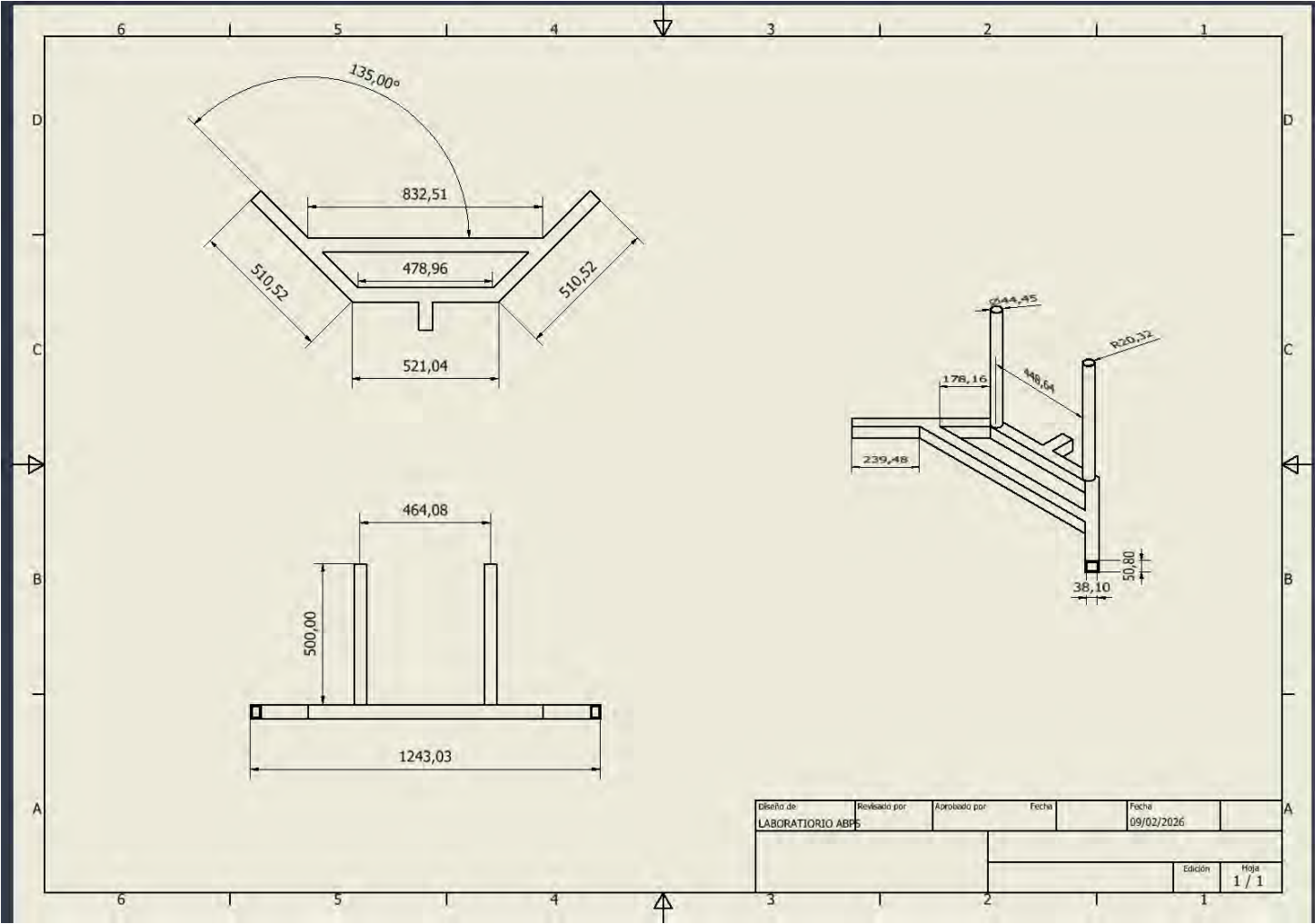


Figura 85: Plano de la base delantera de estructura propuesta.

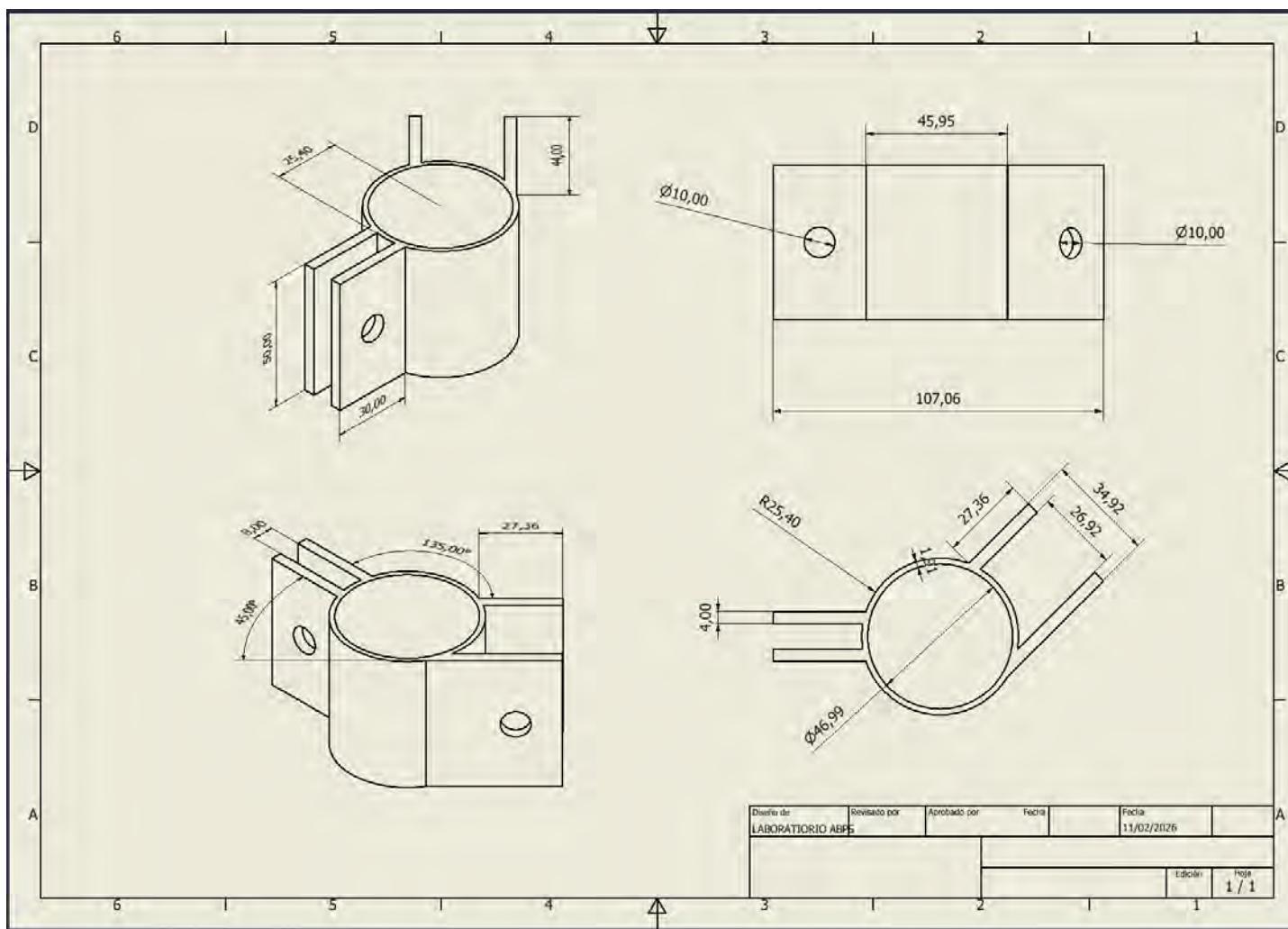


Figura 86: Plano de guías cilíndricas donde se efectúa el desplazamiento en las tuberías soldadas de la base delantera.

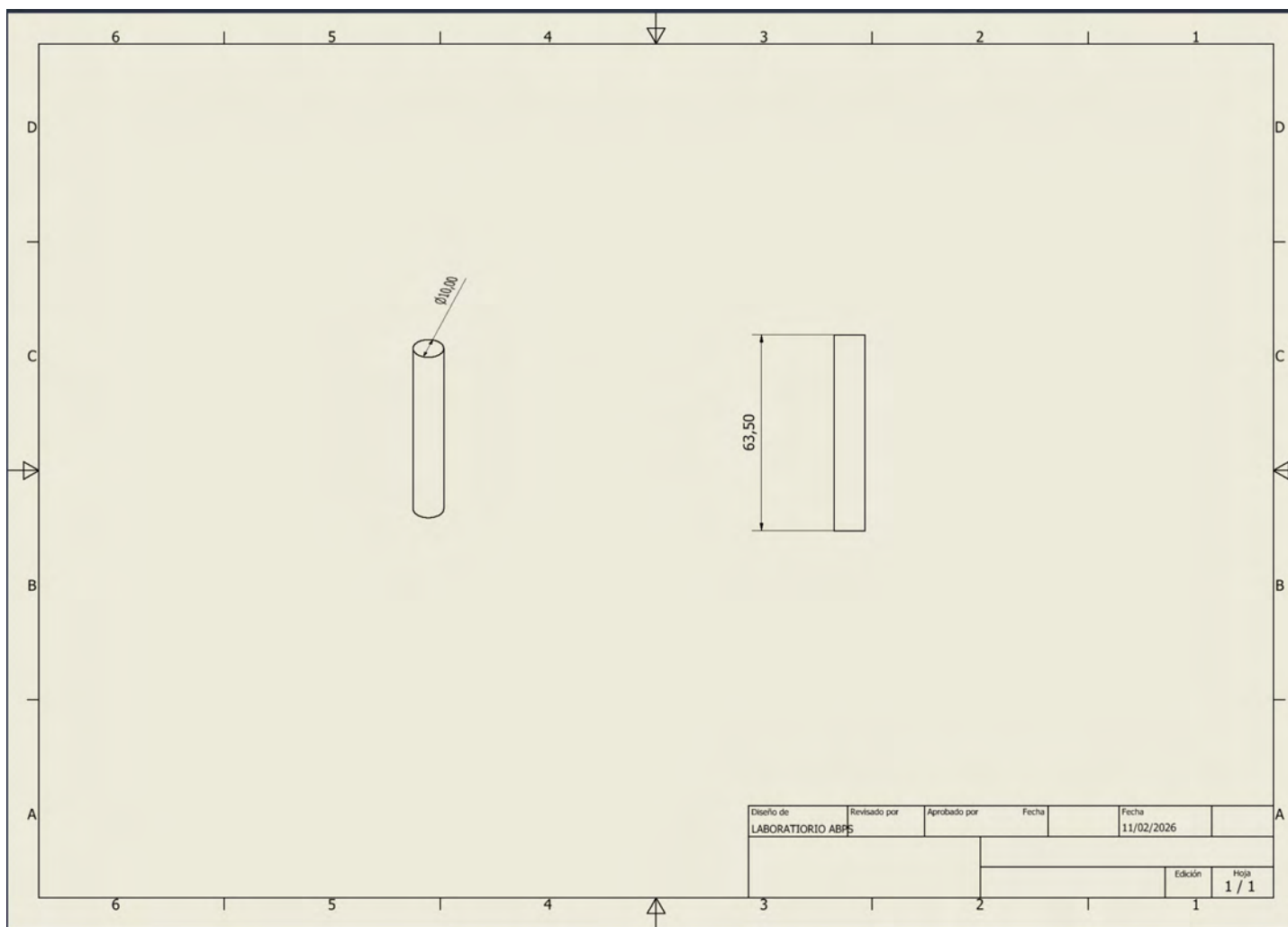


Figura 87: Plano representativo de pernos y tornillos usados para ajustar ciertas partes de la estructura, siendo utilizados tipos de variaciones normalizadas y tornillos de diferentes medidas en la realidad.

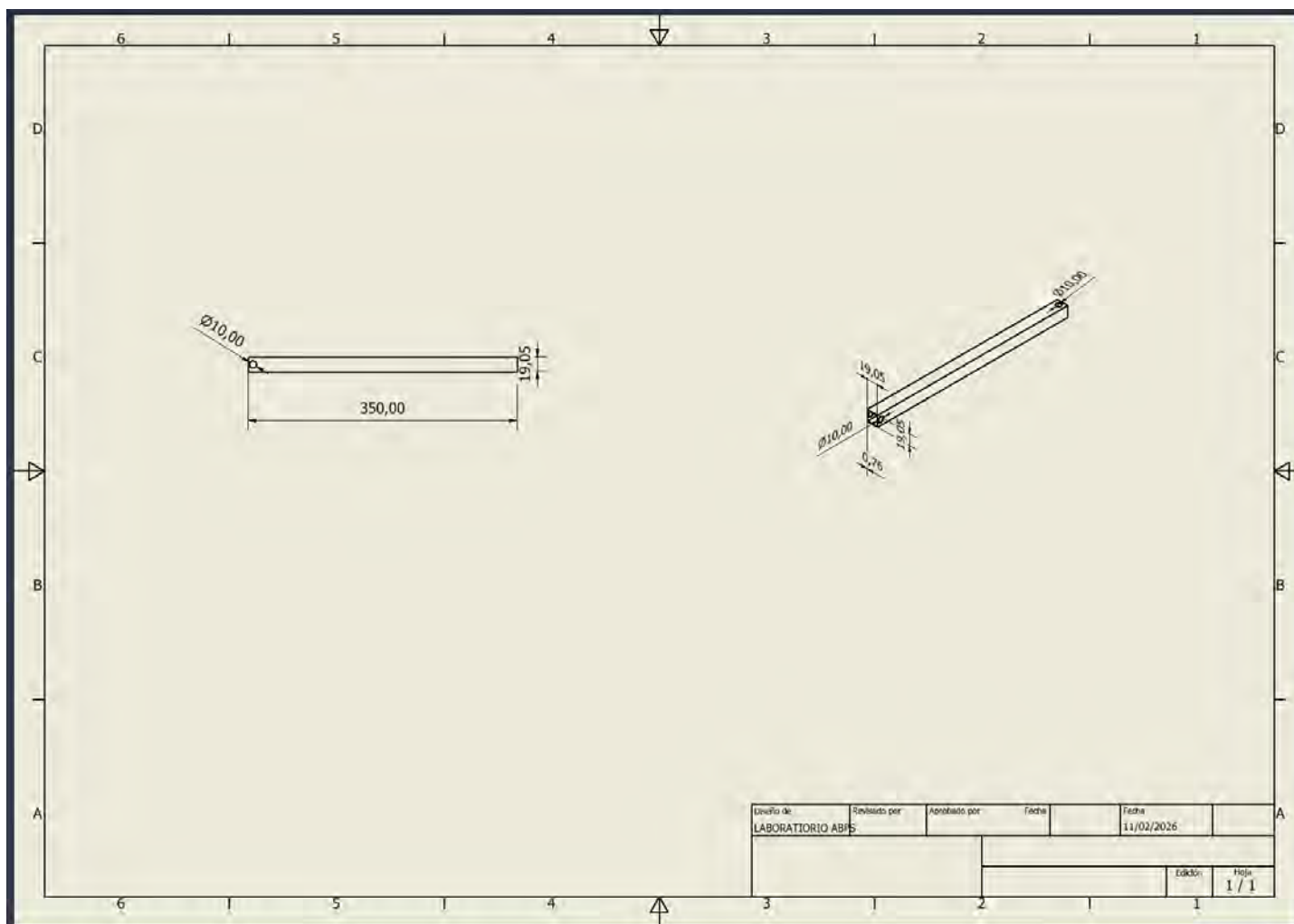


Figura 88: Plano de guía de acción del actuador a las partes de los cilindros centrales.

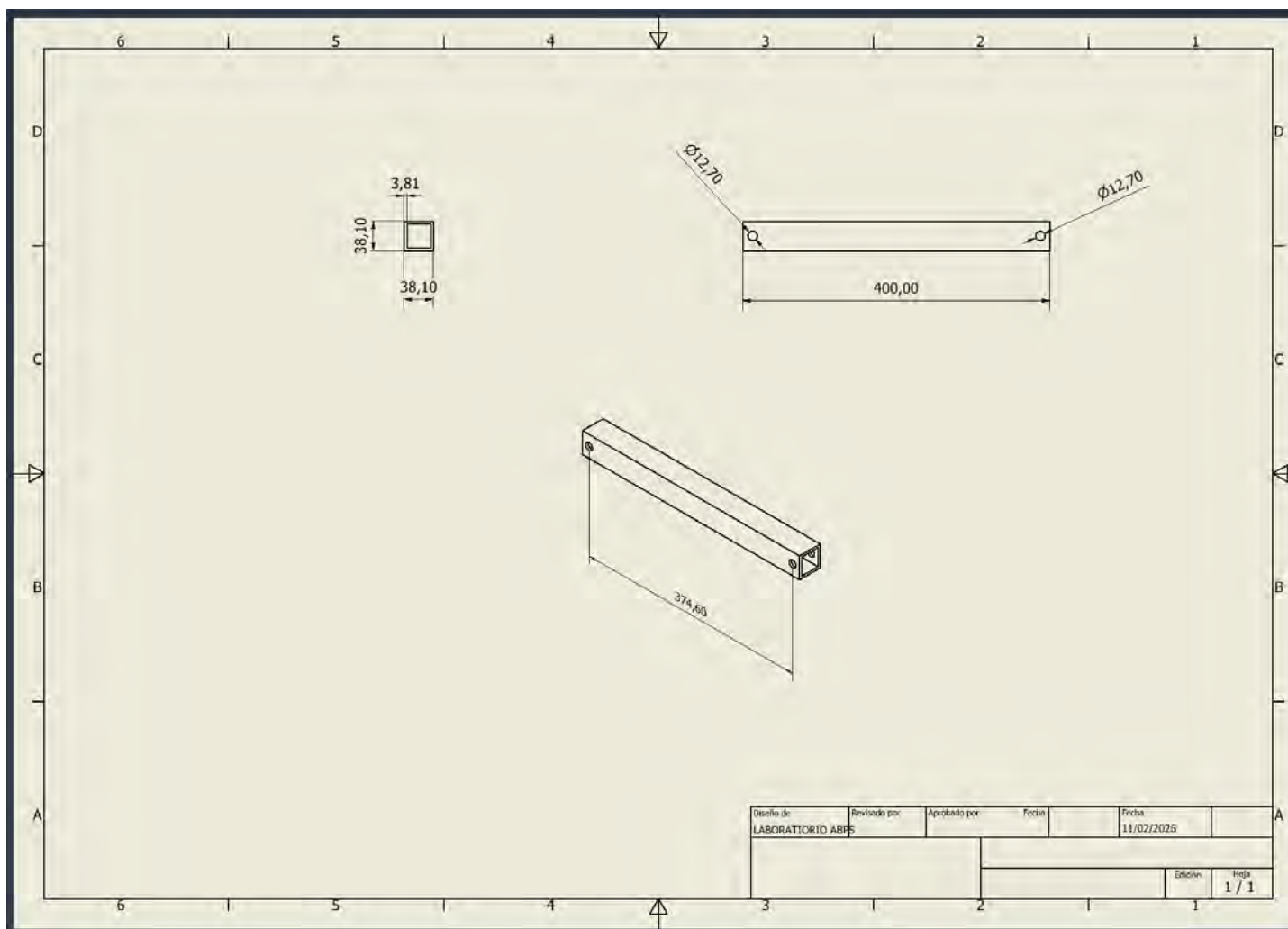


Figura 89: Plano representativo de parte interna de un actuador, ya que generaba conflicto estructuras cilíndricas.

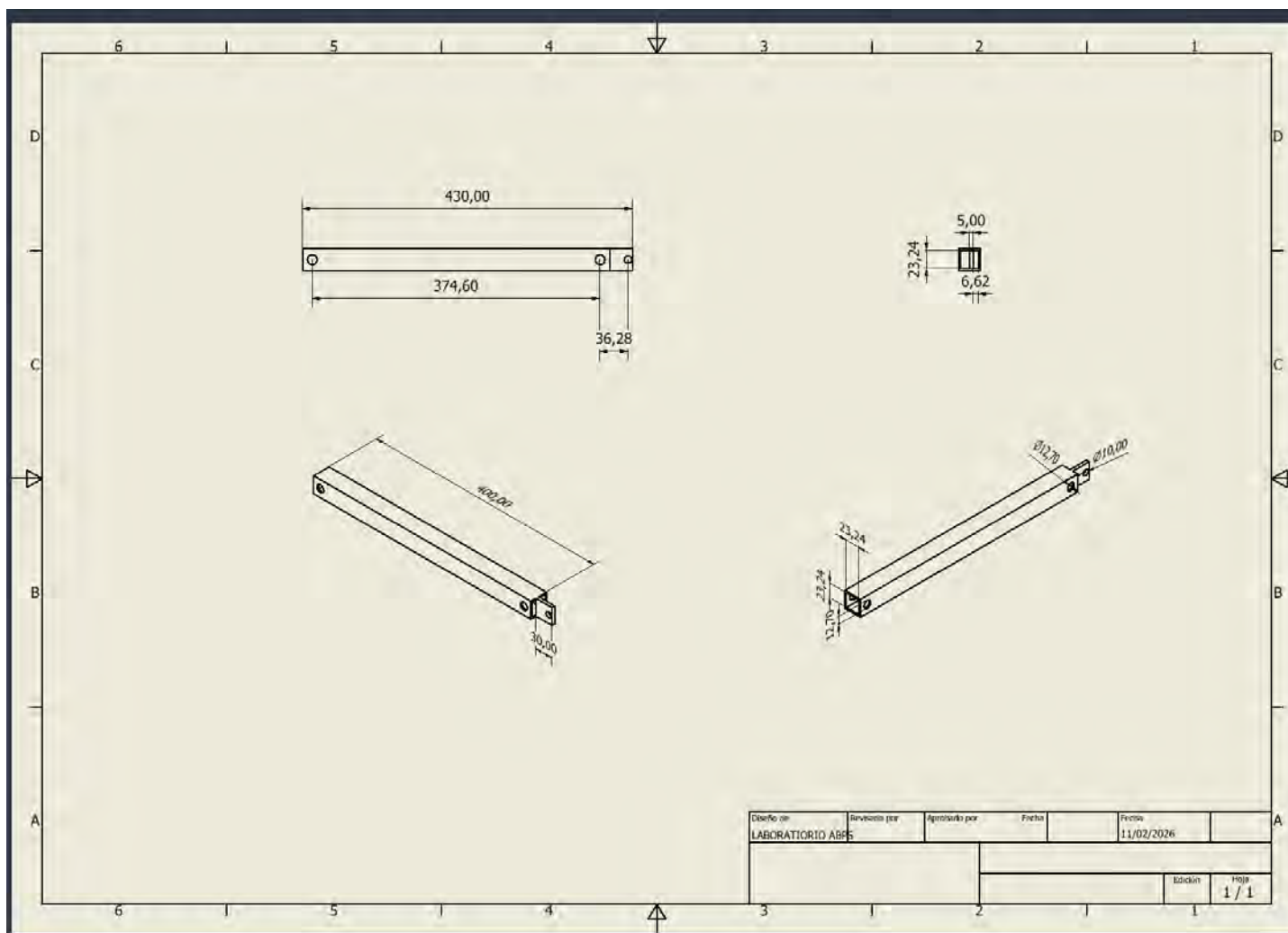


Figura 90: Plano representativo de parte externa de un actuador, ya que generaba conflicto con estructuras cilíndricas.

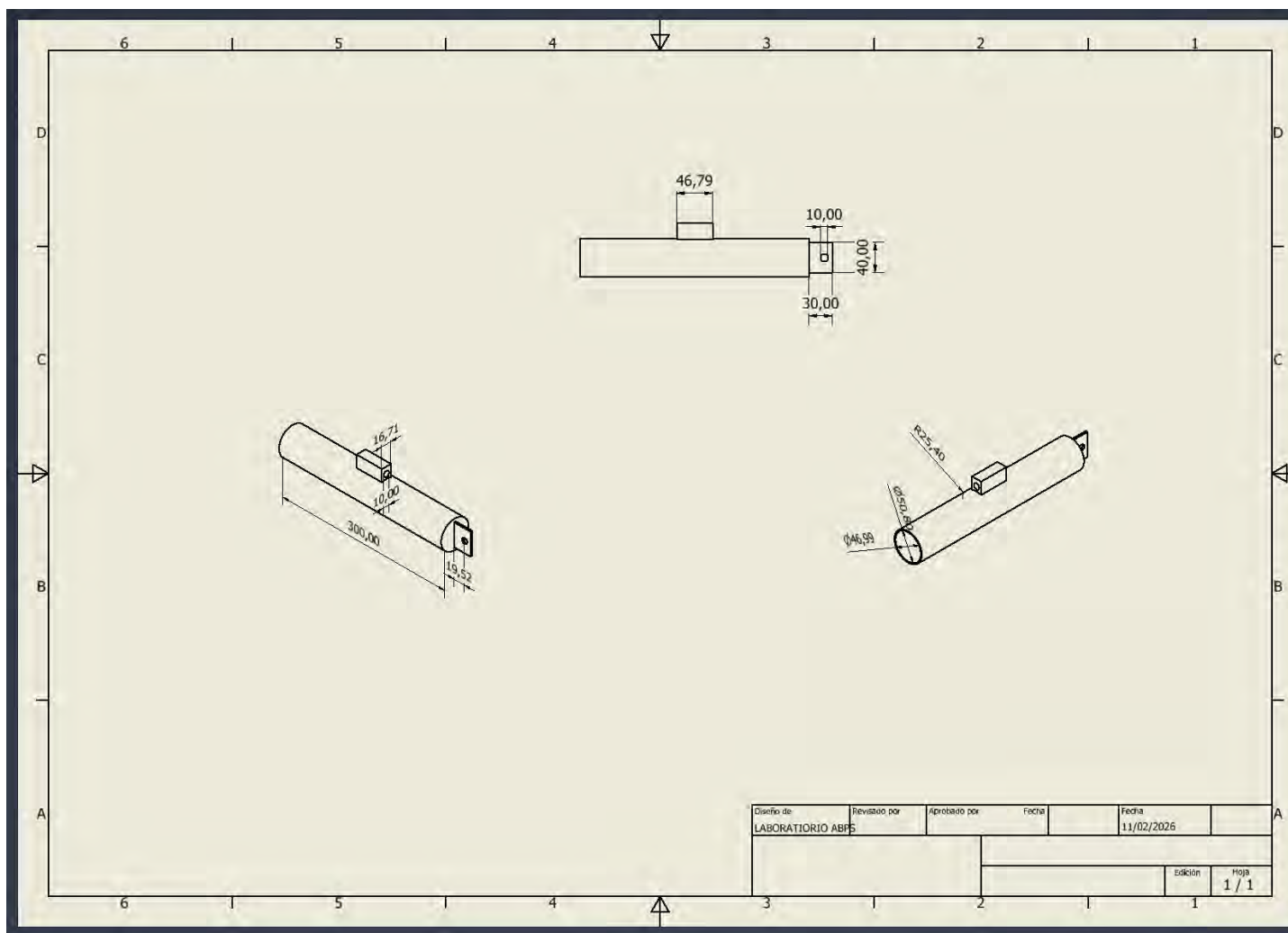


Figura 91: Plano de tubería de sujeción.

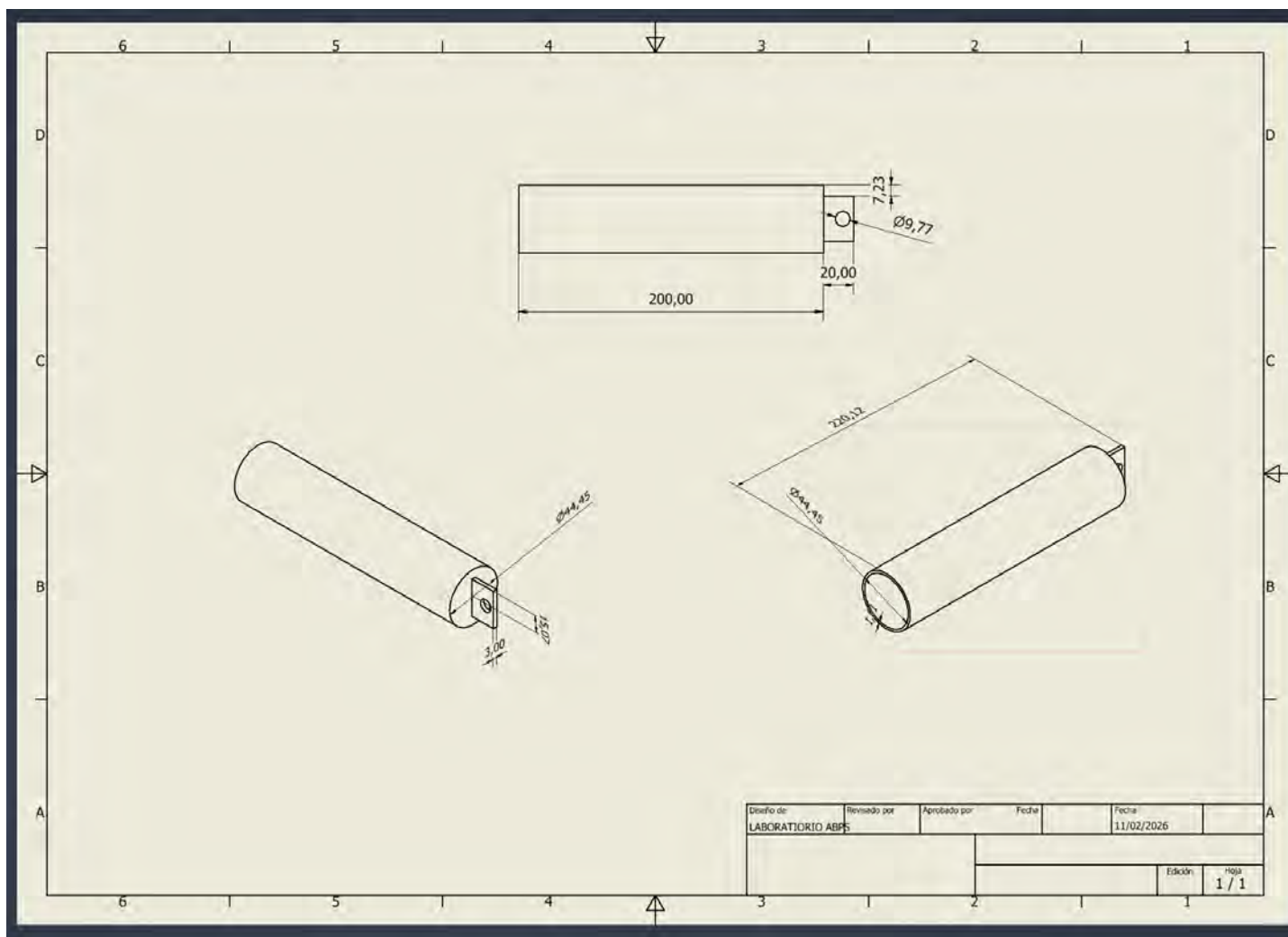


Figura 92: Plano de tubería desplazable.

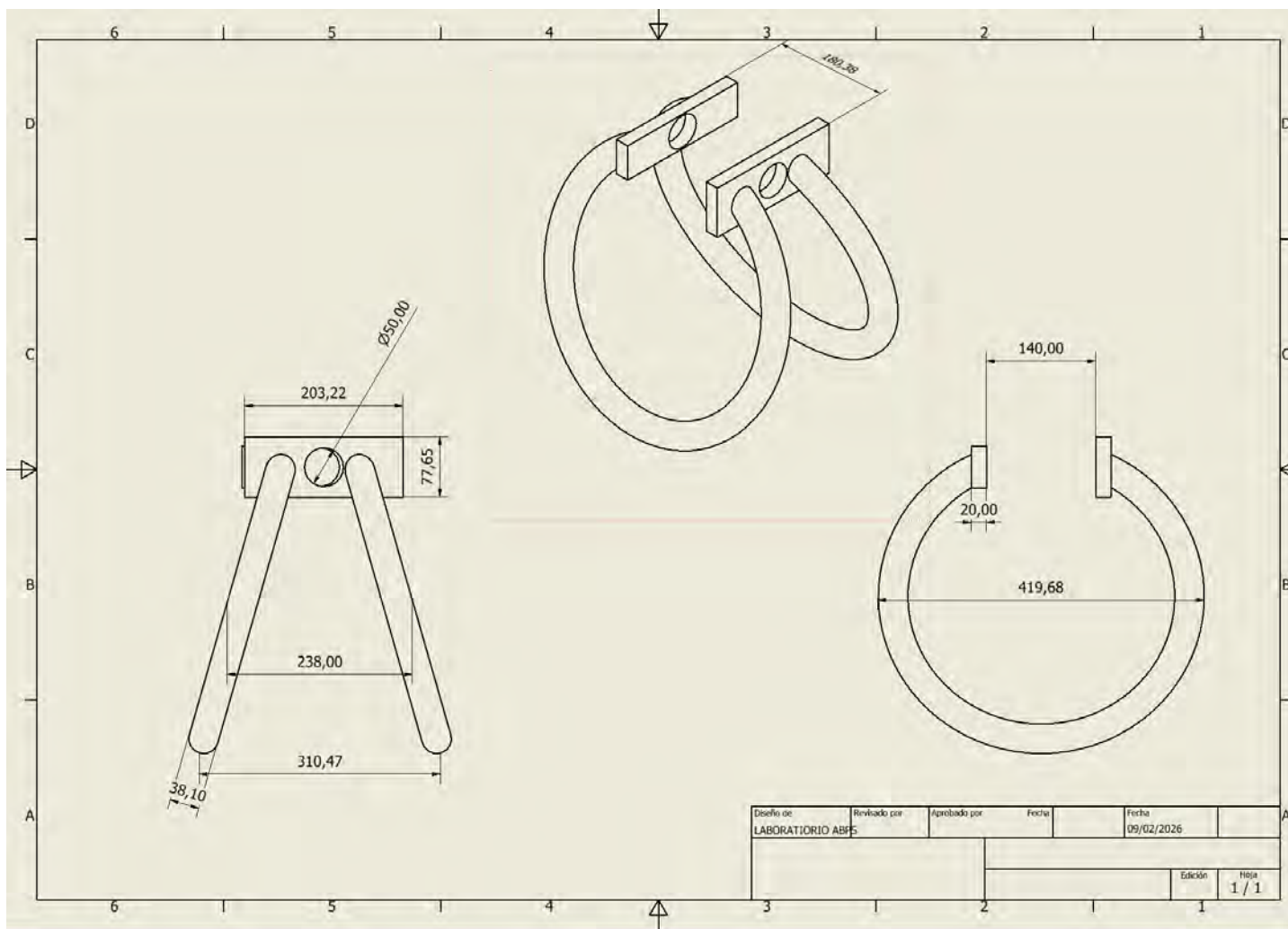


Figura 93: Plano de la base trasera.

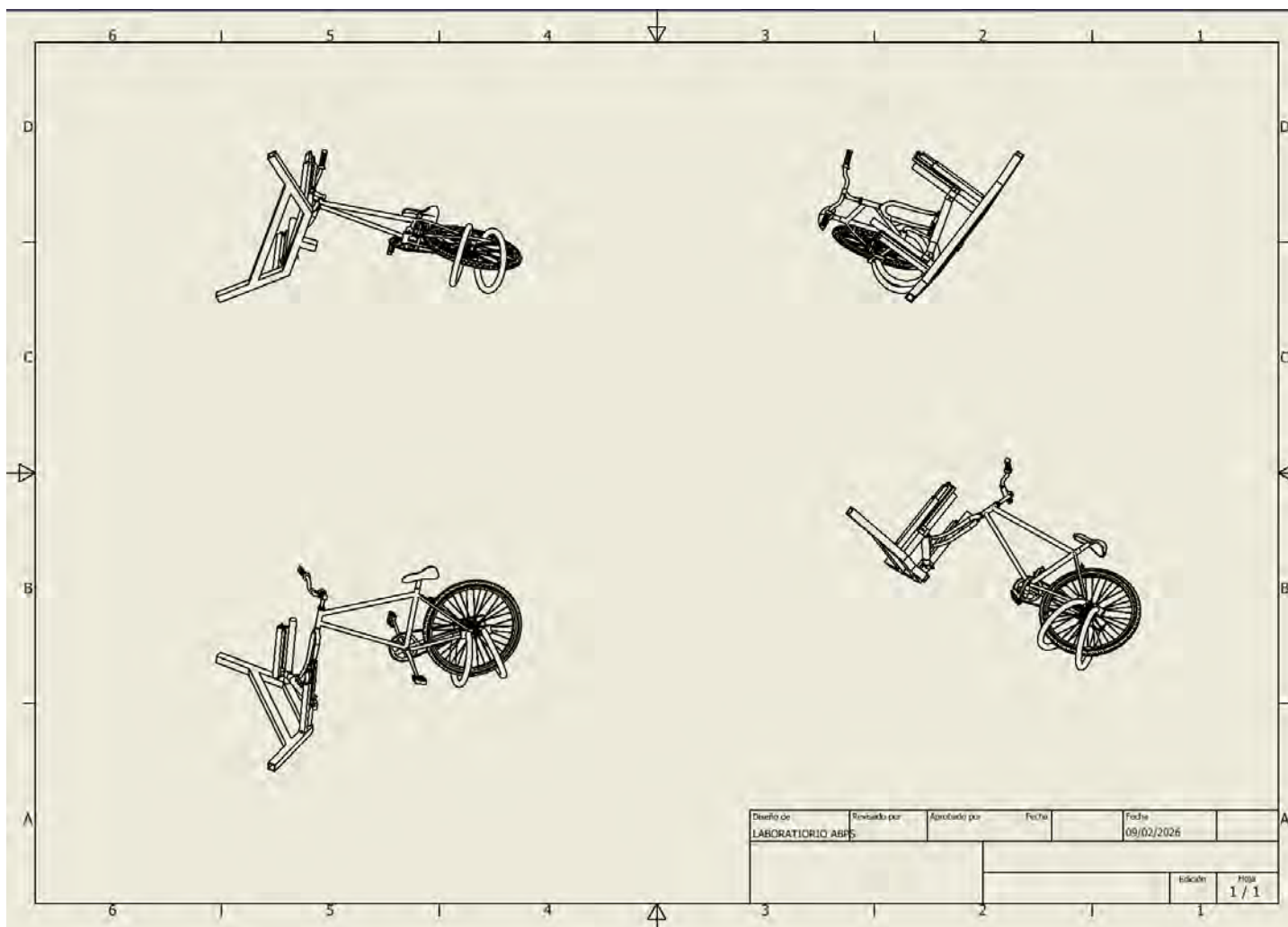


Figura 94: Plano general de la estructura evitando cotas, siendo ilustrativa la representación.