

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UNA IMPRESORA 3D DE MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN, TRANSPORTABLE Y MODULAR**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Armando Arturo Custodio Díaz

ASESOR:

Diego Martín Arce Cigüeñas


Lima, noviembre, 2024

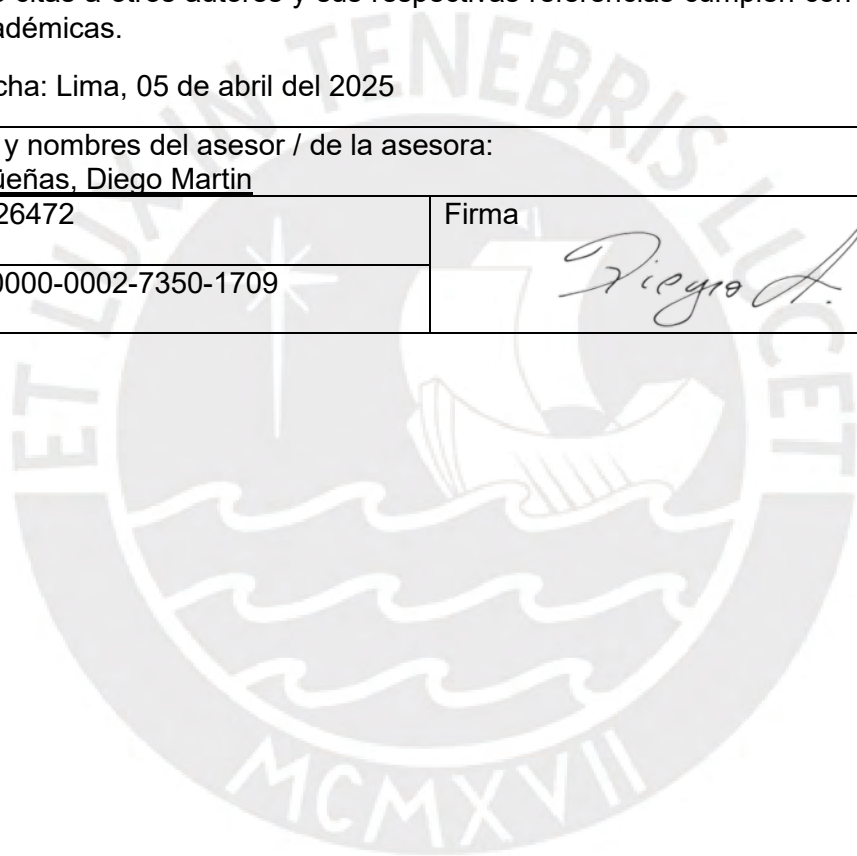
Informe de Similitud

Yo, Diego Martin Arce Cigüeñas, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) del trabajo de tesis titulado “Diseño de una impresora 3D de materiales de construcción, transportable y modular”, del/de la autor(a) Armando Arturo Custodio Díaz, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 10%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 04/04/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y el trabajo de tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 05 de abril del 2025

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Arce Cigüeñas, Diego Martin	
DNI: 46726472	Firma 
ORCID: 0000-0002-7350-1709	



RESUMEN

Los sistemas de impresión 3D de construcción han demostrado ser una solución innovadora para la *reconstrucción* de áreas afectadas por *desastres naturales*, especialmente en regiones sísmicas como Perú. Por lo tanto, se debe abordar la necesidad urgente de métodos eficientes para la reconstrucción de infraestructuras en zonas remotas tras eventos sísmicos devastadores. Para ello, se propone el diseño de una impresora 3D *transportable* y *modular*, adaptada a materiales de construcción. Se evaluaron diferentes modelos de impresoras 3D, incluyendo sistemas cartesianos, delta y con brazo robótico, considerando sus ventajas y limitaciones en términos de eficiencia, precisión y robustez.

El objetivo principal del estudio es diseñar un sistema de impresión 3D modular y transportable para materiales de construcción, que incluya monitoreo a distancia, con el fin de facilitar su implementación en áreas remotas para la recuperación post-desastres naturales. Para ello, se llevó a cabo un diseño conceptual basado en una estructura mecatrónica integral, incluyendo un análisis detallado de motores, controladores, guías lineales y sensores para seleccionar las mejores opciones a nivel de tecnología. Además, se realizó una evaluación técnica y económica exhaustiva para demostrar la viabilidad de su implementación. El diseño se ha realizado inicialmente para un entorno controlado de laboratorio, con el objetivo de analizar y validar su funcionamiento antes de adaptarlo a condiciones extremas que podrían encontrarse en zonas rurales o afectadas por desastres.

Los resultados del estudio incluyen el diseño a nivel de ingeniería de todos los subsistemas, abarcando principalmente la mecánica de movimiento y la selección de electrónica. Se llevaron a cabo cálculos en el subsistema estructural, de movimiento lineal y del efector, así como la revisión de documentación y datasheets para la selección de componentes en el sistema de control e interfaz. Este minucioso proceso aseguró que cada parte del sistema cumpla con los requisitos técnicos, facilitando un diseño robusto y eficiente. El diseño ingenieril involucró validaciones críticas, como el análisis de elementos finitos (FEA) para validación estructural y de acoples, y simulaciones en Matlab para cálculos de velocidad de movimiento lineal, potencia y torque del motor, evaluando el rendimiento del sistema en condiciones extremas. Estas validaciones garantizaron que el sistema sea funcional y capaz de operar bajo las exigencias propuestas en la lista de requerimiento junto a Fabcore, el laboratorio con el cual se está desarrollando esta tesis.


Finalmente, se realizó un cálculo detallado del presupuesto por subsistemas y la implementación total del sistema de impresión 3D. Este análisis incluyó tanto los costos de los componentes como los materiales necesarios, evaluando las tasas de cambio y costos adicionales por importación. Se determinó que el costo total de implementación del sistema de impresión 3D asciende a S/. 36 582 soles peruanos, proporcionando una estimación de los costos involucrados en la implementación del proyecto.

DEDICATORIA



*A mi papá Hermes Arturo Díaz Vásquez y mi
hermana menor, Sofía Carolina Custodio Díaz*

AGRADECIMIENTOS



Siempre agradecido con mi madre, Lady Díaz por haber estado pendiente de mi educación, depositar su confianza en mí y darme la fuerza de voluntad que me conduce a cumplir mis metas. Además, el haberme inculcado que una persona debe ser completa y siempre dar un esfuerzo más. A mi padre Armando Custodio por inculcarme el valor del trabajo, curiosidad por la tecnología y la importancia de aprender a resolver problemas.

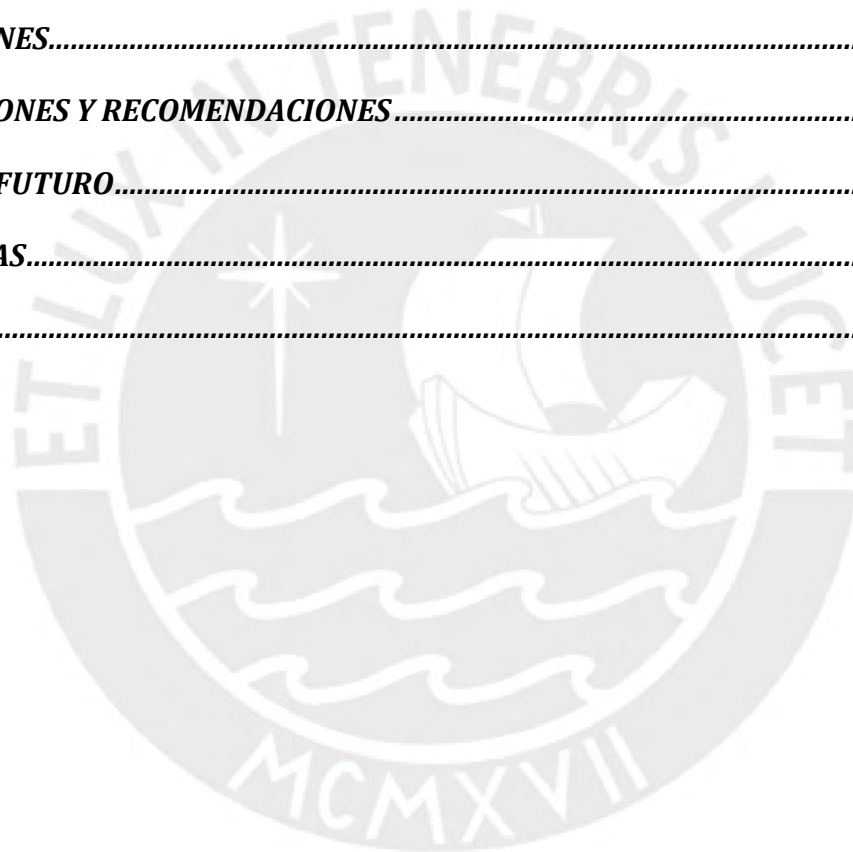
ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	<i>i</i>
DEDICATORIA	<i>ii</i>
AGRADECIMIENTOS	<i>iii</i>
ÍNDICE DE CONTENIDO	<i>iv</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>viii</i>
ÍNDICE DE TABLAS	<i>xi</i>
INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES AL DISEÑO	2
1.1. Problemática	2
1.2. Propuesta de solución	4
1.3. Objetivo general y específicos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Alcance	6
1.5. Metodología	7
2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1. Modelos comerciales	9
2.1.1. Sistemas cartesianos	9
2.1.2. Sistemas delta.....	10
2.1.3. Sistemas con brazo robótico	10
2.2. Artículos académicos	11
2.2.1. Análisis de las propuestas de valor de los Artículos Académicos	11
2.3. Patentes relacionadas	13
2.3.1. Análisis de las propuestas de valor de las Patentes	13
3. DISEÑO CONCEPTUAL	14
3.1. Lista de requerimientos	14
3.2. Black Blox Diagram [Diagrama de Caja Negra]	17
3.3. Estructura de funciones	18

3.4. Matriz Morfológica	18
3.5. Evaluación técnica económica	21
3.5.1. Criterios técnicos	22
3.5.2. Criterios económicos	22
3.5.3. Elección de la alternativa óptima	23
3.6. Concepto de solución óptima	23
3.7. Diagrama de operaciones	25
4. SISTEMA MECATRÓNICO INTEGRAL	27
4.1. Modelo 3D general	27
4.2. Arquitectura de hardware	32
4.3. Planos mecánicos del sistema	32
4.3.1. Planos de despiece	32
4.3.2. Planos de sub-ensamble	33
4.3.3. Planos de ensamble general	34
4.4. Esquemático general	35
4.5. Cálculos de potencia	35
4.5.1. Cálculo de potencia total consumida	35
4.5.2. Selección de convertor AC-DC	36
4.6. Transportabilidad y Modularidad	37
5. SUBSISTEMA DE SOPORTE ESTRUCTURAL	39
5.1. Diseño del boceto del módulo estructural	39
5.2. Cálculo de diámetros de la base de impresión	42
5.3. Análisis de esfuerzos de la estructura	43
5.3.1. Cálculo de esfuerzos por el cabezal extrusor	43
5.3.2. Esfuerzos por el peso de material	47
5.4. Simulación estructural	48
5.5. Diseño de acoples estructurales	50
5.5.1. Diseño de acople central:	50
5.5.2. Diseño de acoples laterales:	51
5.5.3. Diseño de acople lateral central	52
5.5.4. Selección de material de acoples:	53
5.5.5. Validación de acoples mediante simulaciones:	54

5.6.	Modelo 3D del subsistema de soporte estructural.....	54
6.	<i>SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO LINEAL VERTICAL.....</i>	56
6.1.	Volumen de impresión.....	56
6.2.	Selección de guías lineales y cálculos de cargas.....	57
6.2.1.	Cálculo de velocidad vertical.....	57
6.2.2.	Selección de guía lineal.....	59
6.3.	Selección de correas y poleas.....	60
6.4.	Selección del servomotor.....	62
6.5.	Diseño de acople de guía lineal.....	64
6.5.1.	Validación de acople de guía lineal.....	66
6.6.	Modelo 3D del subsistema de movimiento vertical.....	67
7.	<i>SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO DE EFECTOR.....</i>	68
7.1.	Cálculo de dimensiones de brazos delta.....	68
7.1.1.	Longitud de brazos Delta.....	68
7.1.2.	Diámetro de brazos Delta.....	69
7.2.	Diseño de efector y cálculo de cargas.....	71
7.2.1.	Diseño de efector.....	71
7.2.2.	Selección de material del efector principal.....	73
7.2.3.	Validación de diseño de efector.....	73
7.3.	Modelo 3D del subsistema de movimiento de efector.....	75
8.	<i>SUBSISTEMA DE CONTROL DE MOVIMIENTO.....</i>	77
8.1.	Diagramas de flujo.....	77
8.2.	Selección de controlador.....	77
8.3.	Selección de Limit Switch.....	79
8.4.	Detección de error de impresión.....	80
8.5.	Simulación de código.....	83
8.5.1.	Resultados.....	83
8.6.	Diagrama de bloques del subsistema de control.....	83
9.	<i>SUBSISTEMA DE INTERFAZ.....</i>	85
9.1.	Panel de usuario.....	85

9.1.1.	Indicadores LED	85
9.1.2.	Pantalla LED	86
9.1.3.	Encendido y botón de emergencia	87
9.1.4.	Visualización de panel	89
9.2.	Interfaz Web remota.....	89
10.	ESTIMACIÓN DE COSTOS TOTALES.....	90
10.1.	Adquisición de materiales y componentes.....	90
10.2.	Costos de fabricación.....	91
10.3.	Presupuesto total.....	92
	CONCLUSIONES.....	93
	OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
	TRABAJO A FUTURO.....	95
	REFERENCIAS.....	96
	ANEXOS.....	97



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa sísmico del Perú (Fuente: Minam 2017)	2
Figura 1.2 - Ubicación del sistema de impresión (Fuente: Elaboración Propia).....	5
Figura 1.3 - Directiva VDI 2221 (Fuente: Jansch & Birkhofer, 2006)	8
Figura 3.1 - Black Box Diagram del sistema de impresión avanzado	17
Figura 3.2 - Diagrama de la estructura de funciones	18
Figura 3.3 - Grafico técnico-económico de las propuestas de solución.....	23
Figura 3.4 - CS óptimo, módulo estructural (a), de movimiento lineal (b) y de movimiento de cabezal (c).....	24
Figura 3.5 - CS óptimo, módulo de electrónica (a) y módulo de interfaz (b).....	24
Figura 3.6 - Concepto de solución óptimo	25
Figura 3.7 - Diagrama de operaciones del sistema.....	26
Figura 4.1 - Modelo 3D general del sistema de impresión	27
Figura 4.2 - Modelo 3D general del sistema de impresión sin cobertura.....	28
Figura 4.3 - Detalle del movimiento lineal mediante fajas	29
Figura 4.4 - Efecto del sistema de impresión.....	29
Figura 4.5 - Ubicación de motores en el sistema.....	30
Figura 4.6 - Electrónica del sistema ubicada en la base.....	30
Figura 4.7 - Interfaz de usuario del sistema.....	31
Figura 4.8 - Interfaz del sistema sin cobertura	31
Figura 4.9 - Diagrama de arquitectura de hardware.....	32
Figura 4.10 - Diagrama esquemático general.....	35
Figura 4.11 - Fuentes Switching Peptel seleccionadas (Fuente: Peptel)	36
Figura 4.12 - Modelo Step Down XL4015	36
Figura 4.13 - Módulos (EPS) de transporte y caja de transporte (Fuente: Elaboración Propia)	37
Figura 5.1 - Dimensiones principales del sistema de impresión	39
Figura 5.2 - Dimensiones del área de trabajo del sistema de impresión	40
Figura 5.3 - Boceto de estructura de subsistema estructural.....	40
Figura 5.4 - Boceto del subsistema estructural con apoyos laterales	41
Figura 5.5 - Boceto completa de la estructura	42
Figura 5.6 - Diámetros de la superficie de impresión	42
Figura 5.7 - Diámetros definidos de la superficie de impresión.....	43
Figura 5.8 - Posiciones de efector para análisis de esfuerzos.....	44
Figura 5.9 - Sistema de coordenadas Impresora Delta	45
Figura 5.10 - Visualización 3D de vectores de fuerza	46
Figura 5.11 - Caso máximo de estructura impresa	47
Figura 5.12 - Designación de perfiles de aluminio extruidos.....	48
Figura 5.13 - Modelación de perfiles de aluminio para FEA.....	49
Figura 5.14 - Designación de acoples (Fuente: Elaboración Propia)	50
Figura 5.15 - Sketch principal del acople central.....	51

Figura 5.16 - Proceso de diseño de acople central.....	51
Figura 5.17 - Sketch principal del acople lateral.....	52
Figura 5.18 - Proceso de diseño de acople lateral.....	52
Figura 5.19 - Sketch principal, acople lateral central.....	53
Figura 5.20 - Proceso de diseño de acople lateral.....	53
Figura 5.21 - Modelo 3D del subsistema estructural.....	55
Figura 5.22 - (a) acople lateral, (b) acople lateral central, (c) acople central.....	55
Figura 6.1 - Dimensiones para el cálculo de desplazamiento vertical L_H	56
Figura 6.2 - Relación entre la velocidad del efector y guía lineal.....	57
Figura 6.3 - Cálculo de ángulo máximo (Fuente López et al., 2022).....	58
Figura 6.4 - Gráfico, relación de Factor de velocidad vs. Alpha.....	58
Figura 6.5 - Tensión, torque y velocidad lineal en la correa.....	60
Figura 6.6 - Diagrama de fuerzas, guía y acople.....	61
Figura 6.7 - Servomotor Clearpath CPM-SDSK-3441S-RLN.....	63
Figura 6.8 - (a) Base de acople a guía lineal, (b) Estructura de acople completa.....	64
Figura 6.9 - Parámetros de diseño para el acople de guía vertical.....	65
Figura 6.10 - Parámetros del perfil de correa 3M HP.....	65
Figura 6.11 - (a) Acople con elementos añadidos (b) Acople completo por delante (c) acople completo por atrás.....	65
Figura 6.12 - (a) Ubicación de fuerzas, (b) Von Mises, (c) Deflexión, (c) Factor.....	66
Figura 6.13 - Guía lineal y acople del subsistema de movimiento lineal.....	67
Figura 6.14 - Poleas y servomotor del subsistema de movimiento vertical.....	67
Figura 7.1 - (a) ángulo centro y (b) ángulo mínimo.....	68
Figura 7.2 - Gráfico esfuerzo vs. esbeltez, según el método europeo.....	70
Figura 7.3 - Casos a analizar (a) ángulo mínimo, (b) ángulo central, (c) ángulo máximo).....	71
Figura 7.4 - Sketch principal del efector (Fuente: Elaboración Propia).....	71
Figura 7.5 - (a) Forma del efector (b) Optimización de peso.....	72
Figura 7.6 - Acoples para el efector, PHS, acople esférico y bracket SK12.....	72
Figura 7.7 - Efector con acoples para mayor modularidad.....	73
Figura 7.8 - Distribución de fuerzas para validación del efector.....	74
Figura 7.9 - Factor de seguridad mínimo para el análisis de efector.....	75
Figura 7.10 - Subsistema de movimiento de efector.....	76
Figura 8.1 - Limit Switch (a) ME-8111, (b) ME-8104, (c) ME-8112.....	79
Figura 8.2 - (a) acople de limit switch seleccionado, (b) acople y limit switch montados.....	80
Figura 8.3 - Interfaz móvil, Obic.....	80
Figura 8.4 - Pieza a imprimir para prueba de error de Obico.....	81
Figura 8.5 - Validación de detección de error de impresión (a) impresión con error, (b) detección de error.....	82
Figura 8.6 - Impresión con error detectada.....	82
Figura 8.7 - Diagrama esquemático del subsistema de alimentación y control.....	84
Figura 9.1 - Pinout BTT SKR 3 Ez.....	86

<i>Figura 9.2 - Diagrama WS281B</i>	86
<i>Figura 9.3 - Conexión a Interfaz del del controlador</i>	87
<i>Figura 9.4 - Touch Screen TFT70 V3.0</i>	87
<i>Figura 9.5 - Diagrama de conexiones de botón de encendido y parada de emergencia</i>	88
<i>Figura 9.6 - Visualización de panel (Fuente: Elaboración propia)</i>	89



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 - Comparación de modelos comerciales de configuración cartesiana (Fuente: Elaboración Propia)	10
Tabla 2.2 - Comparación de modelos comerciales de configuración Delta (Fuente: Elaboración Propia)	10
Tabla 2.3 - Comparación de modelos comerciales de configuración brazo robótico (Fuente: Elaboración Propia)	11
Tabla 2.4 - Análisis de la propuesta de valor de cada artículo académico analizado (Fuente: Elaboración Propia)	12
Tabla 2.5 - Resumen de las patentes propuestas (Fuente: Elaboración propia)	13
Tabla 3.1 - Indicadores de los conceptos de solución en la Matriz Morfológica	19
Tabla 3.2 - Conceptos de solución para el dominio de Interfaz (Fuente: Elaboración Propia)	19
Tabla 3.3 - Conceptos de solución para el dominio de Energía (Fuente: Elaboración Propia)	19
Tabla 3.4 - Conceptos de solución para el dominio de Sensores (Fuente: Elaboración Propia)	20
Tabla 3.5 - Conceptos de solución para el dominio de Control (Fuente: Elaboración Propia)	20
Tabla 3.6 - Conceptos de solución para el dominio de Actuadores (Fuente: Elaboración Propia)	21
Tabla 3.7 - Conceptos de solución para el dominio Mecánico (Fuente: Elaboración Propia)	21
Tabla 3.8 - Pesos relativos y puntaje de las soluciones (Fuente: Elaboración Propia)	22
Tabla 3.9 - Evaluación técnica de los conceptos de solución (Fuente: Elaboración Propia)	22
Tabla 3.10 - Evaluación económica de los conceptos de solución (Fuente: Elaboración Propia)	23
Tabla 4.1 - Tabla de acoples de despiece (Fuente: Elaboración Propia)	33
Tabla 4.2 - Tabla de planos de sub-ensamble (Fuente: Elaboración Propia)	34
Tabla 4.3 - Planos de ensamble general (Fuente: Elaboración Propia)	34
Tabla 4.4 - Cálculo de potencia total consumida del sistema de impresión	36
Tabla 4.5 - Cálculo del peso total del sistema	38
Tabla 5.1 - Dimensiones principales de la geometría del sistema de impresión	39
Tabla 5.2 - Justificación de desfase de base y desfase superior	41
Tabla 5.3 - Posiciones X e Y para cálculos de cargas de efector (Fuente: Elaboración Propia)	45
Tabla 5.4 - Magnitudes de las fuerzas ejercidas a la estructura (Fuente: Elaboración Propia)	46
Tabla 5.5 - Componentes cartesianos de las fuerzas actuantes sobre la estructura (Fuente: Elaboración Propia)	46
Tabla 5.6 - Parámetros del perfil cilíndrico estructural (Fuente: Elaboración Propia)	47
Tabla 5.7 - Designación de perfiles extruidos para subsistema estructural (Fuente: Elaboración Propia)	49
Tabla 5.8 - Momentos de inercia de perfiles originales y modelos propuestos (Fuente: Elaboración Propia)	49
Tabla 5.9 - Resumen de simulación (Fuente: Elaboración Propia)	50
Tabla 5.10 - Materiales de los acoples estructurales (Fuente: Elaboración Propia)	53
Tabla 5.11 - Resumen de análisis de elementos finitos de acoples (Fuente: Elaboración Propia)	54
Tabla 6.1 - Selección de tipo de servomotor (Fuente: Elaboración Propia)	62
Tabla 6.2 - Modelos de servomotor Clearpath (Fuente: Elaboración Propia)	62
Tabla 7.1 - Selección de material para el efector principal (Fuente: Elaboración Propia)	73

<i>Tabla 7.2 - Componentes cartesianos de las fuerzas actuantes sobre el efector.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 7.3 - Resumen de análisis FEA, efector (Fuente: Elaboración Propia).....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 8.1 – Controladores para sistemas de impresión 3D comerciales (Fuente: Elaboración Propia).....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 8.2 - Parámetros a validar mediante simulación (Fuente: Elaboración Propia).....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 8.3 - Validación de parámetros mediante simulación (Fuente: Elaboración Propia).....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 9.1 - Selección de componentes para el encendido y parada de emergencia.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 10.1 - Consideraciones para compras extranjeras.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 10.2 – Costos de componentes y software del sistema de impresión.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 10.3 - Costo de materiales (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 10.4 - Presupuesto total de implementación del sistema de impresión.....</i>	<i>92</i>



INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los sistemas de impresión 3D han emergido como una solución innovadora para diversas aplicaciones, especialmente en la **reconstrucción** de infraestructuras en áreas afectadas por **desastres naturales**. En regiones sísmicas como Perú, existe la necesidad de desarrollo e investigación de métodos eficientes y rápidos para la reconstrucción. Este estudio se enfoca en el diseño de una impresora 3D **modular** y **transportable**, adaptada para materiales de construcción, y destinada a facilitar la reconstrucción en zonas remotas tras eventos sísmicos. Además, para garantizar la robustez del sistema en condiciones desafiantes y su escalabilidad en zonas rurales, se propone diseñar y validar la impresora 3D en un entorno de laboratorio controlado, con miras a su implementación futura en contextos remotos y de difícil acceso.

La justificación de este proyecto se basa en varios factores clave: ahorro de tiempo y aumento de productividad, eficiencia en costos, beneficios medioambientales, y mejoras en transporte y logística. El objetivo principal es diseñar un sistema de impresión 3D para materiales de construcción, que incluya monitoreo a distancia, con el propósito de posibilitar su implementación en áreas remotas para la recuperación post-desastres naturales. Para alcanzar este objetivo, se sigue la directiva VDI 2221, realizando un diseño conceptual, un diseño completo a nivel de ingeniería y por subsistemas, y un análisis exhaustivo de costos.

El documento está estructurado en capítulos que abarcan: el estado del arte, donde se revisa la literatura existente sobre sistemas de impresión 3D y sus aplicaciones en la construcción; el diseño conceptual, que describe el proceso de selección de tecnologías y componentes clave; el diseño integral del sistema; el diseño detallado de subsistemas, incluyendo el subsistema estructural, de movimiento lineal, de movimiento de efector, de control de movimiento, y de interfaces in situ y web; y finalmente, un análisis exhaustivo de los costos involucrados. Las conclusiones y recomendaciones subrayan la importancia de la impresión 3D en la industria de la construcción, como una herramienta para la reconstrucción post-desastres, y como una tecnología capaz de revolucionar los métodos constructivos actuales.

1. ANTECEDENTES AL DISEÑO

En el capítulo presente se describe la problemática, justificación, propuesta de solución, el objetivo general y los objetivos específicos; así como el alcance y la metodología. La problemática radica en que el Perú se encuentra en una zona altamente sísmica conocida como el cinturón de fuego del Pacífico, lo que hace a nuestro país vulnerable a desastres naturales. Por lo tanto, se plantea la necesidad de enfocarse en la reconstrucción de áreas remotas después de eventos sísmicos devastadores para proteger la infraestructura y las comunidades afectadas, mediante un sistema avanzado de impresión 3D, transportable y modular. El alcance del diseño será detallado y se usará la metodología VDI 2221.

1.1. Problemática

El Perú es un país ubicado en el cinturón de fuego del Pacífico, una región caracterizada por una actividad sísmica significativa y una alta propensión a desastres naturales. La geodinámica y geomorfología del territorio peruano se origina en el fenómeno de convergencia entre las placas de Nazca (oceánica) y Sudamericana (continental), con velocidades de aproximadamente 7-8 centímetros por año (Norabuena et al., 1998). La convergencia entre el margen de la placa Nazca y la placa Sudamericana se caracteriza por una subducción de tipo océano-continente. Este proceso continuo de subducción de la placa Nazca impulsa su penetración en la Placa Sudamericana, lo que constituye la principal causa de la ocurrencia constante de eventos sísmicos desde la línea de costa hasta la fosa peruano-chilena (ver Figura 1.1).

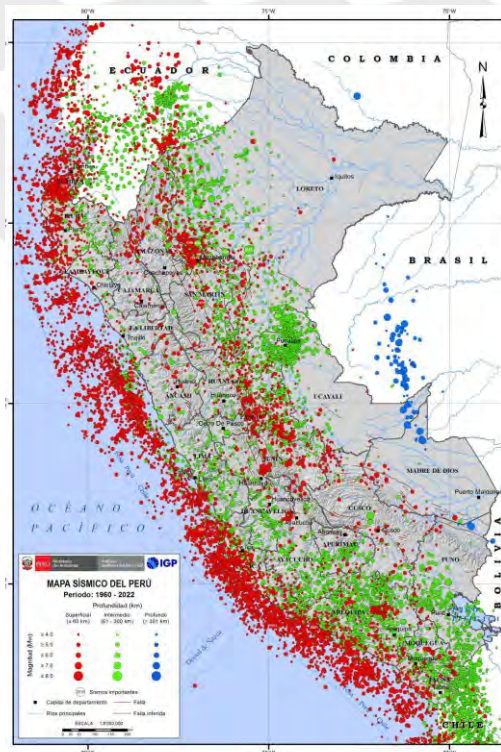


Figura 1.1 - Mapa sísmico del Perú (Fuente: Minam 2017)

La frecuencia de terremotos en Perú es significativamente mayor y muchos de ellos han alcanzado magnitudes que superan los 8,0 Mw (Magnitud de momento), causando destrucción y pérdida de vidas en las ciudades costeras. En las áreas interiores del país, se destaca la zona subandina situada entre las localidades de Moyobamba y Satipo. Al avanzar hacia el sur, se resaltan las zonas de Ayacucho, Cusco y Arequipa. Aunque en estas áreas los terremotos han presentado magnitudes menores, los daños ocasionados, en zonas relativamente limitadas, han sido comparables a los observados en las regiones costeras (Tavera, 2014).

La ocurrencia de sismos de diversas magnitudes en nuestro país, es responsable de causar daños estructurales y la pérdida de vidas humanas en zonas urbanas y ciudades. Esto además representa un peligro constante para muchas personas, especialmente para aquellos que residen en áreas rurales y habitan viviendas construidas con adobe. Tras los desastres naturales en Perú, se evidencia una marcada falta de acción para brindar ayuda a las personas afectadas. Por ejemplo, en el caso del terremoto en Alto Mayo, a pesar de la activa participación de organizaciones locales en evaluar los daños y presentar listas de necesidades a las autoridades, muchas agencias optaron por establecer nuevos comités de ayuda, excluyendo a las organizaciones existentes. Esto resultó en una asistencia que no siempre satisfacía las necesidades de las personas de bajos recursos. Además, se tiene el caso de la preparación para las inundaciones, como las causadas por el ciclo de El Niño, la cual sigue siendo deficiente, como explicado por Ferradas (2000). Las debilidades en la definición de responsabilidades, falta de una visión integral de los valles que fomente la colaboración entre municipios y agencias, incapacidad gubernamental para prevenir desastres y las dudas sobre la utilidad y difusión de los planes de prevención de las últimas décadas, contribuyen a esta problemática de falta de acción ante desastres naturales en nuestro país (Schilderman, 2004).

A nivel global el número de desastres naturales ha aumentado en las últimas décadas. A pesar de los avances tecnológicos más recientes y las previsiones meteorológicas precisas, los desastres naturales son peligros inevitables para los seres. Aproximadamente, desde 2008, unos 23 millones de personas han sido desplazadas de sus hogares cada año, y se proyecta que las cifras serán aún mayores en el futuro debido al aumento al cambio climático y la densidad poblacional (Subramanya & Kermanshachi, 2022). Algunos investigadores sugieren que existen tres razones para este aumento: una creciente frecuencia de fenómenos naturales debido al cambio climático, la destrucción del equilibrio ecológico y el calentamiento global. Como se ha mencionado, los desastres naturales suelen resultar en daños y destrucción de viviendas, dejando a las personas sin refugio adecuado, siendo desplazadas temporalmente o sin hogar. Por ejemplo, el aumento de la frecuencia de desastres naturales entre 2005 y 2010 significó que alrededor de veinte millones de personas perdieron sus casas durante ese período, lo que resultó en la necesidad de aproximadamente cinco millones de viviendas, según la Base de Datos Internacional de Desastres EM-DAT (Wagemann, 2017). De acuerdo a datos proporcionado por el

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú, 2008; el número de casas destruidas y alojamiento post-desastre construido después del terremoto en del 2007 en Ica, es de 52150 y 15000 respectivamente. Estos datos subrayan la necesidad de una gestión de desastres y la importancia de la reconstrucción para garantizar la seguridad y el bienestar de las comunidades afectadas por eventos catastróficos.

Después de un desastre, el acceso a un refugio adecuado puede ser crucial para la supervivencia, así como para brindar seguridad, seguridad personal, protección contra los elementos y enfermedades, y dignidad humana. Sin embargo, el proceso de proporcionar refugio es complejo debido a que se deben considerar muchos aspectos, como la disponibilidad de terrenos, la propiedad de la tierra, la adquisición de materiales, la limpieza de escombros, la participación de las comunidades afectadas y el gobierno, y la coordinación. Proporcionar un refugio adecuado después de un desastre puede considerarse uno de los mayores desafíos enfrentados por la comunidad humanitaria internacional (Burnell & Sanderson, 2011). Los efectos de los desastres en la vivienda tienen, a su vez, un impacto económico y social más amplio significativo, ya que afectan muchos aspectos de la vida diaria, como los negocios locales y la asistencia escolar, y también tienen impactos psicológicos. Los grupos afectados estarán preocupados, en shock y traumatizados debido a la pérdida de familiares, amigos y pertenencias. En este sentido, la pérdida de la vivienda es una de las fuentes de estrés más significativas. Además, la insuficiencia de la solución puede generar estrés psicológico. Un estudio que compara diseños importados con diseños locales muestra que las formas y materiales utilizados para que coincidan con el prototipo de la vivienda tradicional permiten la conexión con la casa y respaldan el bienestar psicológico en las familias afectadas (Caia et al., 2010). Después de tales eventos, se necesitan soluciones de vivienda a corto plazo a gran escala para albergar a las comunidades afectadas, y la industria local de la construcción regular puede no cubrir el déficit (Wagemann, 2017).

En este contexto, la presente tesis busca abordar la cuestión de proporcionar una solución para la reconstrucción post-desastre natural en áreas remotas de Perú. Para lograrlo, se enfoca en la impresión 3D de materiales de construcción modular y transportable como una vía innovadora para superar los desafíos en la respuesta a desastres.

1.2. Propuesta de solución

La propuesta de solución se centra en diseñar un sistema de impresión 3D de materiales de construcción modular y transportable, con capacidad de monitoreo a distancia, con el propósito de facilitar su implementación en áreas remotas para la recuperación post-desastres naturales en Perú. Esta iniciativa responde a la problemática constante de desastres naturales en el país debido a su ubicación en el cinturón de fuego del Pacífico y la variabilidad climática, que amenazan a las comunidades

desfavorecidas con la falta de infraestructura. La tecnología de impresión 3D promete proporcionar viviendas resistentes de manera más eficiente respecto a los procesos de construcción convencionales, destacando beneficios en ahorro de tiempo y productividad, eficiencia en costos, cuidado del medio ambiente y mejora en transporte y logística (Subramanya & Kermanshachi, 2022). Agilizando la respuesta a desastres y mejorando la resiliencia de las comunidades afectadas. La capacidad de monitoreo a distancia permitirá una supervisión continua y la adaptación en tiempo real, optimizando aún más la respuesta ante emergencias. Esta solución innovadora tiene el potencial reducir el sufrimiento humano y promover el desarrollo tecnológico y social en Perú. Durante el periodo de prueba y exhibición, el sistema de impresión se planea ubicar en los ambientes de Core Facilities en el Fab01. Como se puede observar junto a sus dimensiones aproximadas en la Figura 1.2.



Figura 1.2 - Ubicación del sistema de impresión (Fuente: Elaboración Propia)

1.3. Objetivo general y específicos

En este segmento, se exponen el objetivo general y los objetivos específicos, los cuales guardan vinculación con las especificaciones y demandas establecidas por Laboratorios Fabcore, así como con la problemática previamente identificada. La justificación del proyecto a mayor detalle se tiene en el Anexo A

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de impresión 3D de materiales de construcción con un diseño modular y transportable, que incluya monitoreo a distancia, con el propósito de posibilitar su implementación en áreas remotas para la recuperación post-desastres naturales. El diseño del cabezal extrusor no pertenece al alcance del presente estudio.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar el diseño conceptual de un sistema de impresión 3D de materiales de construcción con un diseño modular y transportable considerando la metodología VDI 2221, garantizando una planificación detallada de cada etapa del proceso. Para ello se debe realizar una investigación

exhaustiva de las tecnologías existentes relacionadas a los sistemas de impresión 3D de materiales de construcción, reconocer y establecer los requerimientos necesarios para el diseño conceptual del sistema, elaborar el diagrama de estructura de funciones y a partir del planteamiento de la matriz morfológica y evaluación técnica – económica, obtener el diseño conceptual óptimo.

- Realizar el diseño mecánico a nivel de ingeniería, de modo que se cumpla con los requerimientos de modularidad y transportabilidad de la impresora 3D.
- Realizar el diseño eléctrico y electrónico a nivel de ingeniería, teniendo en cuenta sensores, actuadores y componentes necesarios para realizar el control y funcionamiento en conjunto del sistema.
- Realizar validaciones del diseño de ingeniería a nivel de simulación mediante el análisis de elementos finitos, control de movimiento mediante código y validación de interfaz web.
- Elaborar un análisis de costos de componentes, tecnologías, materiales y procesos de fabricación asociados a los subsistemas de la impresora 3D.

1.4. Alcance

El alcance de esta tesis se centra en el diseño de un sistema de impresión 3D de materiales de construcción con características específicas, definiendo en qué medida se llevará a cabo este proceso. Se enfatizan los siguientes aspectos cruciales:

- Se debe destacar que el diseño de la impresora 3D, abordado en esta tesis, se trata como un sistema independiente del cabezal extrusor. Por lo tanto, el enfoque principal se centra en la configuración y funcionamiento del sistema de impresión, no perteneciente al alcance de esta tesis, la futura integración con un sistema de bombeo de material de construcción, que a su vez está conectado al cabezal de impresión. Sin embargo, el acople entre el sistema de impresión y cabezal debe ser tomado en consideración durante el diseño conceptual.
- El objetivo de este sistema es la fabricación de patrones estructurales en materiales de construcción, mediante una impresora cuyas dimensiones generales son de 2×2×3 m y que cuenta con un volumen efectivo de impresión de 1.25×1.25×1.2 m. No se contempla la construcción completa de viviendas ni la creación de piezas con grandes voladizos, ya que se trabaja principalmente con secciones huecas, a las cuales se les pueden añadir refuerzos y brindar la posibilidad de ensamblarlas para conformar estructuras de mayor tamaño.
- Para asegurar una comunicación efectiva con el sistema del cabezal extrusor, se tienen las siguientes señales específicas. Una señal de entrada indicará el caudal de material de impresión requerido, mientras que una señal de salida permitirá controlar dicho caudal. Esta estrategia

garantiza la coordinación fluida entre ambos sistemas. a las cuales se les pueden añadir refuerzos y brindar la posibilidad de ensamblarlas para conformar estructuras de mayor tamaño.

- El proceso de diseño, prototipado y desarrollo se llevará a cabo en los laboratorios de la Pontificia Universidad Católica del Perú, aprovechando la red de laboratorios disponibles en Core Facilities. Esta plataforma facilita el intercambio de experiencias, equipos y tecnologías entre diversos laboratorios, promoviendo la colaboración y brindando acceso a recursos avanzados para el presente proyecto de investigación.
- Se debe alcanzar la modularidad del sistema de impresión 3D. Esto implica que los distintos componentes y subsistemas que componen la impresora serán diseñados de manera independiente y podrán ensamblarse. Con esto, además, se conseguirá transportabilidad. Esto significa que la impresora 3D podrá ser desmontada y trasladada con facilidad a áreas remotas, lo que resulta fundamental para su implementación en situaciones de recuperación post-desastres naturales en ubicaciones de difícil acceso.
- El sistema incluirá una interfaz de impresión remota que permitirá la comunicación con la impresora 3D a distancia. Esta interfaz se diseñará para recibir instrucciones en formato Código G, comandos de control de impresión, calibración y brindar la posibilidad de monitoreo en tiempo real.
- El sistema mecatrónico de impresión 3D alcanzará su pleno desarrollo cuando logre un control total sobre la velocidad y la posición del cabezal de extrusor. Además, será capaz de realizar impresiones a partir de instrucciones en formato Código G.

1.5. Metodología

La investigación propuesta se orienta hacia el desarrollo y diseño de un sistema de gran relevancia, y para llevar a cabo este proceso, se ha adoptado la metodología VDI 2221 (Jänsch & Birkhofer, 2006). Esta metodología se destaca por su flexibilidad intrínseca y la capacidad de proporcionar retroalimentación continua a lo largo de las diversas etapas secuenciales que conforman el proceso. En este contexto, es fundamental comprender en detalle las siete etapas esenciales que constituyen la base del proceso de desarrollo:

- **Aclarar y definir la tarea:** Especificaciones
- **Determinar Funciones y su estructura:** Estructura de funciones
- **Búsqueda de soluciones principales y combinaciones:** Solución óptima
- **Dividir en módulos realizables:** Estructura de módulos
- **Desarrollo de diseño de módulos clave:** Diseños preliminares
- **Diseño general completo:** Diseños definitivos
- **Preparar producción y operación de instrucciones:** Documentación

Para un mejor entendimiento, se tiene la directiva de la metodología en la Figura 1.3. El resultado final de este enfoque incluye las especificaciones del sistema, la estructura de sus funciones, las soluciones primarias identificadas, la estructura modular detallada, los diseños preliminares y definitivos, así como la documentación.

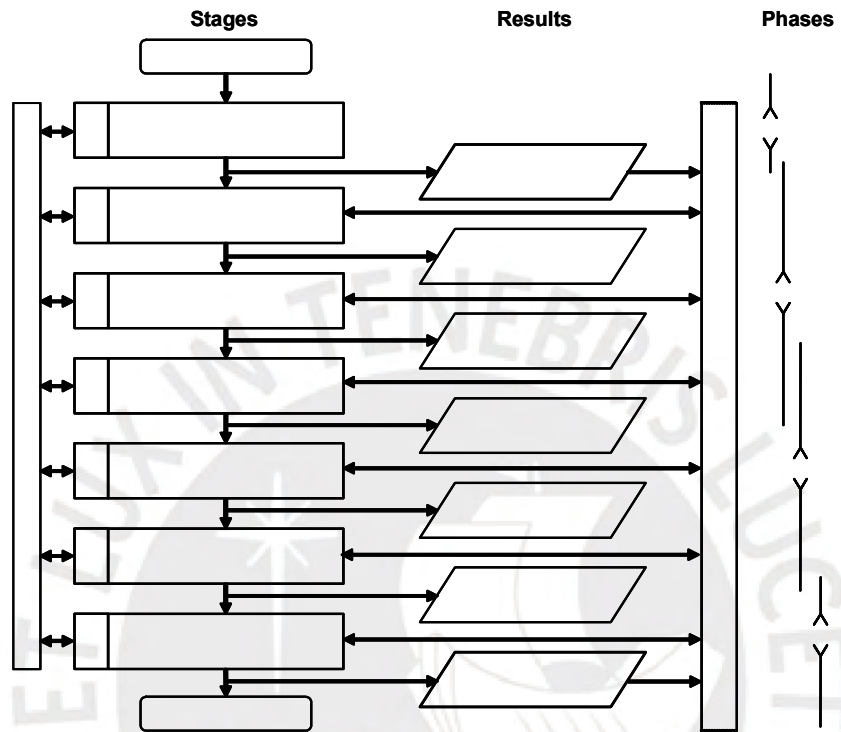


Figura 1.3 - Directiva VDI 2221 (Fuente: Jänsch & Birkhofer, 2006)

2. ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo, se llevará a cabo un análisis detallado del estado actual de la tecnología en el ámbito de la impresión 3D aplicada a la construcción e Impresoras 3D a escala de laboratorio. En un primer plano, se abordará una revisión minuciosa de los productos comerciales actualmente disponibles en el campo de la impresión 3D para la construcción. Esta revisión se enfocará en identificar las características clave y distintivas de los modelos existentes. A continuación, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de la literatura académica, centrándose en los trabajos de investigación que se enfoquen en propuestas de tecnología innovadora o estudios. Esta revisión permitirá establecer el estado del arte en cuanto a las metodologías y avances más recientes en esta área en constante evolución. Además, se procederá a una revisión de patentes relacionadas con la impresión 3D en construcción, explorando las distintas soluciones y enfoques, que serán de utilidad en el desarrollo conceptual del proyecto de tesis. Para el análisis del estado del arte a mayor detalle y especificaciones de productos comerciales, artículos, patentes y tecnologías de manera individual, se tiene el Anexo B

2.1. Modelos comerciales

En esta sección se enfoca en los modelos comerciales existentes, tanto aquellos dedicados específicamente a la construcción como los utilizados en laboratorios. Se realiza una comparativa de las características más importantes de las compañías Bemore 3D, Wasp, Constructions 3D y Apis Cor. Los modelos se presentarán en base a su configuración, cartesiana, delta o brazo robótico. Finalmente se presentará por tipo de configuración, donde se pueda contrastar las diferentes características más importantes de los modelos analizados.

2.1.1. Sistemas cartesianos

Los modelos comerciales de impresoras 3D de construcción basados en sistema cartesiano utilizan un sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) para guiar el movimiento del cabezal de impresión. Estas impresoras crean modelos tridimensionales mediante la deposición de material capa por capa, desplazando el cabezal en líneas rectas en los ejes X, Y y Z para construir la forma deseada. Este enfoque ofrece precisión en la impresión y es la configuración más usada en impresoras de construcción y de escritorio. Se analizan modelos ofrecidos por las empresas Bemore3D y Constructions3D.

Comparación de los modelos comerciales de configuración cartesiana

Se muestra en la Tabla 2.1, una comparación entre las características más relevantes entre los modelos comerciales de la empresa Bemore 3D analizados. Se comparan características como dimensión de la impresora, volumen efectivo de impresión, tolva de material. Las medidas de las máquinas son personalizables. Finalmente, todas cuentan con marcado CE [cumple con los requisitos de seguridad, salud y protección ambiental establecidos por la Unión Europea], doble seta de emergencia [dispositivo

de parada de emergencia comúnmente utilizado en maquinaria], vallado perimetral de seguridad y varios dispositivos de final de carrera.

Tabla 2.1 - Comparación de modelos comerciales de configuración cartesiana (Fuente: Elaboración Propia)

Modelo:	Bem Pro	Bem Pro Bigger	Cube	Smart	MiniPrinter EDU	MiniPrinter PRO
Volumen de impresión (X, Z, Y)	9.5 m x 3.5 m x 20 m	9.5m x 7 x 20m	3 m x 5 m x 4 m	9.5 m x 3.5 m x 20 m	0.6 m x 0.5 m x 0.6 m	1.2 m x 1.2 m x 1.2 m
Dimensiones	12.3 m x 5 m x 22 m	-	-	12.3 m x 5 m x 22 m	-	2.1 m x 2.1 m x 1.8 m
Rango de velocidades	2 cm/s - 20 cm/s	2 cm/s - 20 cm/s	2 cm/s - 15 cm/s	2 cm/s - 20 cm/s	15 cm/s	hasta 25 cm/s
Espesor de muros	4 cm - 18 cm	6 cm - 21 cm	2cm - 6cm	2cm - 6cm	-	-
Tolva de material	45 L	45 L	30 L	45 L	5 L/min	5L/min
Alimentación	-	-	-	-	220V	230V, 1.5 kW
Precio	-	-	-	-	70 000 €	110 000 €

2.1.2. Sistemas delta

Los modelos comerciales de impresoras 3D de materiales de construcción de sistema delta son diseñados para imprimir estructuras de concreto mediante un sistema de brazos móviles en forma de un robot delta. Estas impresoras utilizan una boquilla para depositar capas de concreto de manera precisa y controlada, lo que permite la construcción de objetos y estructuras de gran tamaño de forma rápida. En este apartado se analizan modelos ofrecidos por la empresa 3DWasp, que se especializa en impresoras de configuración delta.

Comparación de los modelos comerciales de configuración delta

En la

Tabla 2.2, se tiene una comparación entre las características de las impresoras analizadas. La característica más importante es la velocidad de impresión, dada la configuración Delta. Se comparan características como dimensión de la impresora, fuente de alimentación, velocidades y precios.

Tabla 2.2 - Comparación de modelos comerciales de configuración Delta (Fuente: Elaboración Propia)

Modelo:	BigDelta WASP 12MT	Delta WASP 3MT Concrete
Dimensiones	12 m [Altura], 7 m [Amplitud], con base hexagonal	2.15 m [Largo], 2.35 m [Ancho], 3.05 m [Alto]
Volumen de impresión	-	1 m [Diámetro], 1 m [Altura]
Alimentación	220VAC, 60VAC	220/240 VAC 50/60 Hz
Velocidades	Velocidad máxima de hasta 40 cm/s	20 cm/s [Velocidad de impresión], 20 cm/s [Velocidad de desplazamiento]
Precio Base	-	60.335 €

2.1.3. Sistemas con brazo robótico

Estos sistemas utilizan un brazo robótico o una estructura tipo grúa para depositar capas de concreto de manera precisa y controlada. Los sistemas de construcción con brazo robótico presentan dimensiones

compactas, además son fáciles de transportar, lo que hace que los costes de implementación sean casi nulos. A comparación de los sistemas de construcción cartesiano y delta son enormes y voluminosos

Comparación de los modelos comerciales de configuración con brazo robótico

Los modelos ofrecidos por Constructions 3D son analizados en la Tabla 2.3. Se considera especial énfasis en el precio, acorde al tamaño, características y funcionamiento de cada impresora. Los ejemplos de impresión fueron extraídos de la página web de Constructions 3D.

Tabla 2.3 - Comparación de modelos comerciales de configuración brazo robótico (Fuente: Elaboración Propia)

Modelo:	Crane Wasp	MaxiPrinter	Frank Apis Corr
Dimensiones de la impresora	6.3 m [Diámetro], 4 m [Altura]	0.85 m [Ancho] x 3.0 m [Largo] x 1.9 m [Alto], en modo compacto	-
Volumen de impresión [XYZ]	50m ² o 100m ² dependiendo de las configuraciones. A una altura de 3m	Diámetro interno de 6 m, diámetro externo de 13.5 m a una altura máxima de 3.3	3.2m [Altura máxima de impresión], 5.5m [alcance máximo de brazo]
Velocidad de impresión	30 cm/s [Velocidad de impresión], 50 cm/s [Velocidad de desplazamiento]	20 cm/s	2 m/min o 3.3 cm/s
Alimentación	220/240 VAC 50/60 Hz	380 V [Trifásico]	120 a 220 VAC (monofásico, 50 o 60 Hz)
Precio aproximado	132.000 €	495 000 €	

2.2. Artículos académicos

Se realiza un análisis detallado de los artículos académicos e investigaciones relacionadas con la impresión 3D a diferentes escalas: escritorio, laboratorio y construcción. El objetivo es obtener un sustento académico sólido para basar las decisiones de diseño, teniendo en cuenta la lista de requerimientos. Se presenta una tabla comparativa resumiendo la propuesta de valor de cada artículo académico.

2.2.1. Análisis de las propuestas de valor de los Artículos Académicos

Dadas la amplia cantidad de artículos académicos analizados, se realiza un resumen y comparación en la Tabla 2.4 para analizar la propuesta de valor de cada uno. Esta tabla se utiliza para sintetizar la relevancia y considerar su posible incorporación proyecto de tesis.

Tabla 2.4 - Análisis de la propuesta de valor de cada artículo académico analizado (Fuente: Elaboración Propia)

Nombre del artículo	Año	Propuesta de valor
Development of a Novel 3D Spherical Printer	2019	Se propone una estructura mecánica esférica, con el objetivo de lograr una impresión más precisa y eficiente en superficies esféricas. Cuenta con un plato giratorio y una estructura superior
A Comparative Study of Cartesian and Delta 3D Printers on Producing PLA Parts	2017	Se analizan los parámetros: acabado, tiempo de producción, masa y dimensiones de piezas de prueba, impresas utilizando una impresora de configuración cartesiana y una delta. Con el fin de incrementar el entendimiento acerca de la manufactura aditiva en estas distintas configuraciones y dirigir el diseño del proyecto de tesis en base a los requerimientos
Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities	2021	Se realiza una clasificación en tres categorías de la impresión 3D orientada a la construcción, con ello se analizará según la lista de requerimientos, a cuál de estas categorías se debe dirigir el diseño. Además, se presentan aplicaciones prácticas de impresión 3D a gran escala.
Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory testing of Cementitious Materials	2020	Se desarrolla una impresora a escala de laboratorio (1m x 1m x 1m). Destaca la interfaz desarrollada para la impresora. Integrada a un programa de software para controlar el movimiento, similar a los utilizados en dispositivos CNC y con código G. Se muestran todas las variables necesarias para el control, como la velocidad de movimiento, las coordenadas y velocidad de la boquilla.
Design and Construction of a 3D Printer Auto Controller Wirelessly	2015	Demuestra que es posible desarrollar impresoras 3D asequibles utilizando recursos y tecnologías disponibles. En especial la posibilidad de la implementación de un sistema de control y monitoreo inalámbrico
Approach to an optimised printing path for additive manufacturing in construction utilising FEM modelling	2021	Se propone una metodología para minimizar las desviaciones y superposiciones previstas de la estructura impresa. Para esto, se consideran las propiedades del material dependientes del tiempo. El algoritmo tiene como objetivo crear una ruta de impresión continua sin superposición utilizando el archivo STL como entrada.
Characteristics of Hydraulic and Electric Servo Motors	2022	Se llevó a cabo una investigación que compara el rendimiento de los servomotores eléctricos e hidráulicos, con el objetivo de proporcionar datos cuantitativos útiles para seleccionar los motores más adecuados según las especificaciones de diseño requeridas
3D Printer State Prediction: A Deep Learning Model Approach	2021	Se aborda la necesidad de supervisar constantemente la impresora 3D mediante una aplicación web, de manera remota. Se desarrolla un script que recolecta la temperatura de la cama y la extrusora de una impresora 3D cada 5 segundos y la analiza usando Deep learning. Se desarrolla, además, otro script que realiza las siguientes funciones: <ul style="list-style-type: none"> ● Establecer la temperatura de la impresora 3D ● Iniciar proceso de impresión ● Pausar proceso de impresión ● Cancelar proceso de impresión ● Descargar datos de registro de la impresora 3D

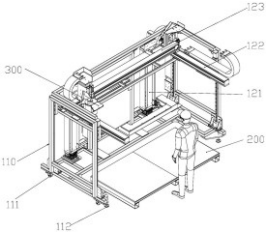
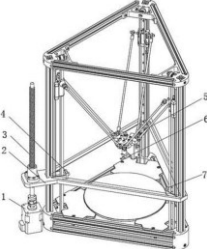
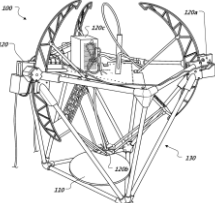
2.3. Patentes relacionadas

En esta sección se presentan las patentes relacionadas a modernas invenciones relacionadas a la impresión 3D. En este caso, las tecnologías presentadas son innovadoras, finalmente se realiza una tabla comparativa, donde se resumen las propuestas de valor de cada patente analizada.

2.3.1. Análisis de las propuestas de valor de las Patentes

Dadas las patentes propuestas, se realiza a modo de resumen y comparación la Tabla 2.5. Se considera en especial la propuesta de valor que ofrece cada patente al desarrollo del documento presente.

Tabla 2.5 – Resumen de las patentes propuestas (Fuente: Elaboración propia)

Patente	Frame type concrete 3D printer	Monitoring device for delta 3D printer based on binocular vision	Three-dimensional (3D) delta printer frame structure
			
País	China	China	Estados Unidos
Año	2020	2018	2016
Número de Patente	CN111251411A	CN109514847A	US20160332378A1
Propuesta de valor	Se describe una configuración de impresora 3D de tipo cartesiano que proporciona diversas ventajas, como la capacidad de imprimir objetos de grandes dimensiones, un posicionamiento preciso y un flujo continuo de material.	Se propone un dispositivo y método que emplea visión binocular para <i>monitorear en tiempo real una impresora 3D de tipo delta. Este sistema establece un límite de alarma ajustado según los criterios de precisión</i> requeridos.	Resalta la incorporación de un <i>marco estructural</i> que proporciona soporte al sistema de movimiento delta de la impresora 3D, lo que resulta en un <i>mayor control, estabilidad y reducción de vibraciones y distorsiones.</i>

3. DISEÑO CONCEPTUAL

En el presente capítulo, se lleva al cabo el análisis necesario para obtener el diseño conceptual del sistema mecatrónico que solucionará la problemática. A continuación, se presenta la lista de requerimientos, black box del sistema, diagrama de estructura de funciones, matriz morfológica, conceptos de solución propuestos y análisis técnico – económico, con el cual al final de este capítulo, se determinará el proyecto preliminar óptimo

3.1. Lista de requerimientos

A continuación, se presenta de manera descriptiva y detallada los requerimientos que debe cumplir el sistema. De acuerdo con lo establecido junto a Fabcore Facilities, se presentan las exigencias. Se tiene un resumen de esta lista en el Anexo C.1

- **Función principal:** El sistema debe ser diseñado con un enfoque modular, de tal forma que puede ser montable y desmontable de manera sencilla. Esto con el objetivo de que pueda ser transportado hacia ambientes remotos. Además, el sistema debe ser capaz de funcionar sin supervisión de un operario. Por otro lado, habrá una interfaz de monitoreo remoto, donde se puede visualizar el estado de la impresión, pausarlo y detenerlo en caso de un error de impresión. Se tendrá además en la interfaz in situ o remota, un modo de “Home 3D Printer”, donde se ubicarán posiciones por defecto de ciertos componentes de la impresora. Debe contar con función de monitoreo de impresión, envío de notificaciones al usuario y deseable registro de time-lapse
- **Geometría:** Dada la ubicación y escala del proyecto, en función de los requerimientos de Fabcore y tomando como referencia la impresora Cólíbrí, no debe exceder las dimensiones de [2.0 m largo] x [2.0 m ancho] x [3.0 m alto]. Y un volumen de impresión efectivo [1.25 m largo] x [1.25 m ancho] x [1.2 m alto].
- **Cinémática:** Las velocidades máximas del cabezal extrusor deben alcanzar velocidades de hasta 25cm/s en desplazamiento y 20cm/s durante impresión.
- **Carga:** El extrusor debe soportar cargas de material y cabezal extrusor de hasta 22.5 kg.
- **Energía:** Al sistema ingresa un único suministro energético monofásico de 220VAC, 60Hz. Proveniente de corriente AC.
- **Materiales:** El sistema requiere materiales que soporten el marco y la estructura mecánica de la impresora 3D, con características de resistencia a la corrosión y a la brisa marina, y con un peso adecuado para facilitar su transporte. De acuerdo con Fabcore, se contemplan diversos materiales de construcción que garanticen estabilidad.

- **Comunicación:** La comunicación entre la impresora e interfaz remota, se debe dar a través de la conexión inalámbrica. Útil para cuando se necesiten piezas de repuesto impresos, prototipos o probetas de testeo de materiales en ubicaciones distantes.
- **Señales de entrada:** Se tendrá una interfaz remota y una in situ, donde las señales de entrada son las siguientes:
 - a) Dispositivo USB con el modelo 3D a imprimir. Se puede dar preferencia a un dispositivo USB debido a que es más resistente y menos propenso a pérdida que una tarjeta SD.
 - b) Debe existir la posibilidad de manipular los parámetros de impresión de manera remota e in situ, para el envío y recepción del modelo 3D a imprimir.
 - c) Señal de encendido del sistema y parada de emergencia.
 - d) Se tiene además, una señal de caudal de material de impresión.
- **Señales de salida:**
 - a) Ruido del sistema menor a 50.8 dB, fondo de ruido típico en aulas universitarias según (Hodgson et al., 1999).
 - b) Señal cuando la impresión termina
 - c) Señal visual de error en la interfaz, en caso de detección.
 - d) Señal de control de caudal de impresión.
- **Control:** Para el nivel de control se manejan las siguientes variables: Posición del cabezal extrusor [X, Y, Z], velocidad de impresión, velocidad de desplazamiento. Todas estas variables tendrán un error estable de 3.0%. Finalmente, se debe tener en cuenta el control caudal de material de impresión, cuya dinámica funciona como lo explicado en las entradas y salidas, se tiene una entrada donde se obtenga información del caudal actual de material de impresión en el extrusor y se envía una señal de control para dicho caudal.
- **Electrónica:** Se tienen los requerimientos de electrónica, que involucran a los actuadores, que vendrán representados por motores y sus drivers, sensores y controlador. El cual se encargará de procesar las señales de instrumentación. Finalmente, es deseable que se tenga en cuenta la inclusión de una cámara de monitoreo remoto y time-lapse.
- **Seguridad:** Se debe incluir la señalización perimétrica de seguridad para el sistema. No es prioritario, la inclusión de un sistema de seguridad de jaulas. Sin embargo, la impresora debe tener acceso a al menos 2 caras visibles para que el proceso de impresión pueda ser visto a la lejanía, pues el sistema será parte de exhibición del laboratorio cuando se implemente por primera vez.
- **Ergonomía:** A nivel de ergonómico, se tienen las siguientes consideraciones

- a) La ubicación de la interfaz in situ, debe seguir el standard ISO 9241-210, para el diseño ergonómico de interfaces hombre-computadora. Se debe tener en cuenta la altura de la interfaz, distancias de visualización, ángulos para promover una buena postura.
- **Mantenimiento:** Se deberá realizar un mantenimiento de precisión y calibración con una frecuencia trimestral, ya que la exposición a suciedad, materiales de impresión y zonas de actividad sísmica exige revisiones frecuentes para garantizar un funcionamiento.
 - **Área de trabajo:** El sistema tendrá en un inicio como principal área de operación, el laboratorio Fabcore (Fab01, pabellón K en la PUCP). Así pues, cuando se tenga que operar en ambientes remotos, el área de trabajo será variable, sin embargo, debe ser ubicado en un piso llano.
 - **Fabricación:** Se emplea los recursos de los laboratorios Fabcore y el taller de mecánica de la PUCP, donde se busca integrar los recursos que tiene la Universidad.
 - **Plazo:** 12 meses de plazo para el diseño y ejecución del sistema mecatrónico en caso se de la implementación



3.2. Black Blox Diagram [Diagrama de Caja Negra]

El diagrama Black Box [Caja Negra] se utiliza para tener un entendimiento de todas las entradas, salidas y variables relacionadas al sistema. Aquellas que se tienen en cuenta conforme a la lista de requerimientos y la secuencia de funciones que se debe cumplir. En este diagrama se identifica la función principal y las entradas y salidas del sistema, se observa en la Figura 3.1 el diagrama Black Box, junto a sus entradas y salidas de materia, energía y señales. Mayor detalle en el Anexo C.2

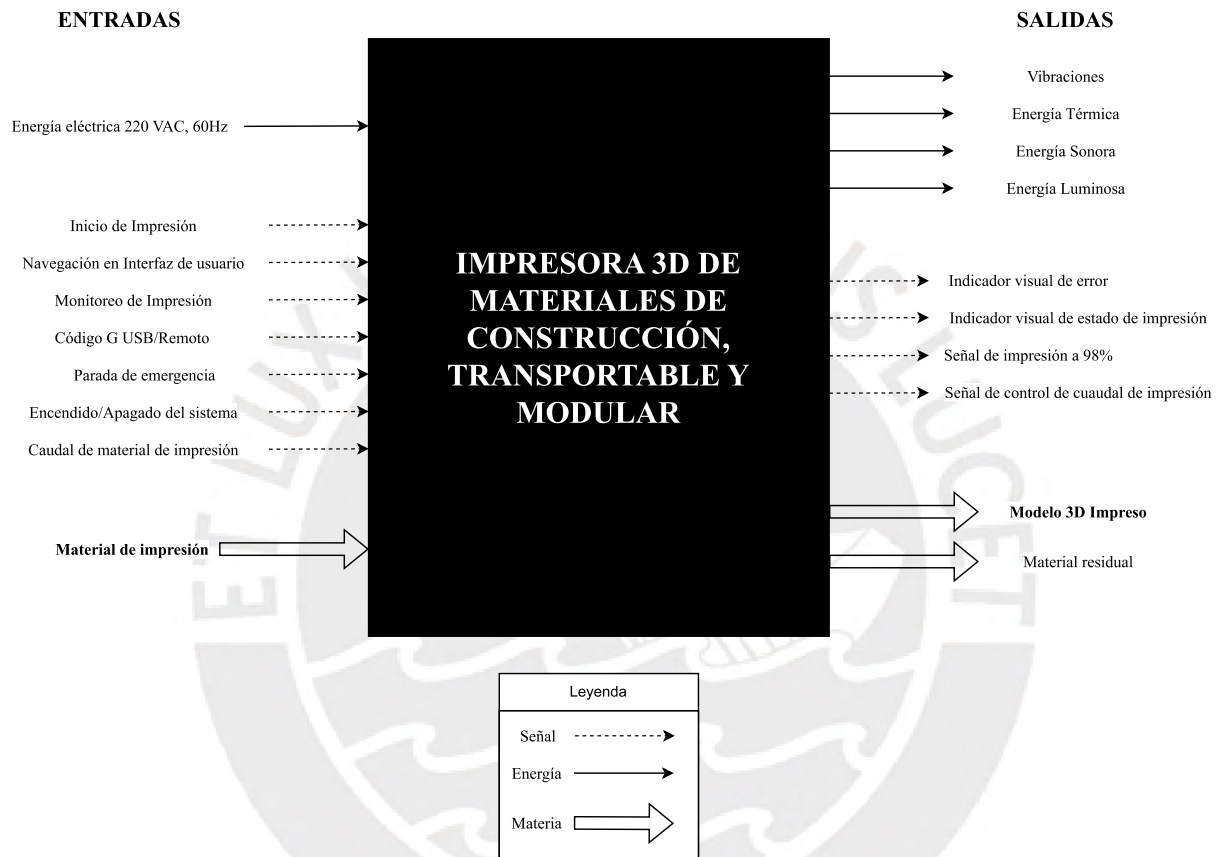


Figura 3.1 - Black Box Diagram del sistema de impresión avanzado
(Fuente: Elaboración Propia)

3.3. Estructura de funciones

En el diagrama de estructura de funciones se detallan los dominios en los que se puede dividir el sistema y la forma en la que estos interactúan. Además, se procede a analizar el proceso mediante el cual las entradas son sometidas a diversas funciones y experimentan transformaciones que culminan en la obtención de las salidas correspondientes. Se cuenta en el sistema con seis dominios: Interfaz, Energía, Sensores, Control, Actuadores y Mecánica. Todos estos, trabajan en conjunto para el funcionamiento integral del sistema de impresión. En la Figura 3.2 se muestra la estructura de funciones y se puede observar a mejor detalle en el Anexo C.3, finalmente, se explicará cada una de las funciones a detalle según cada dominio.

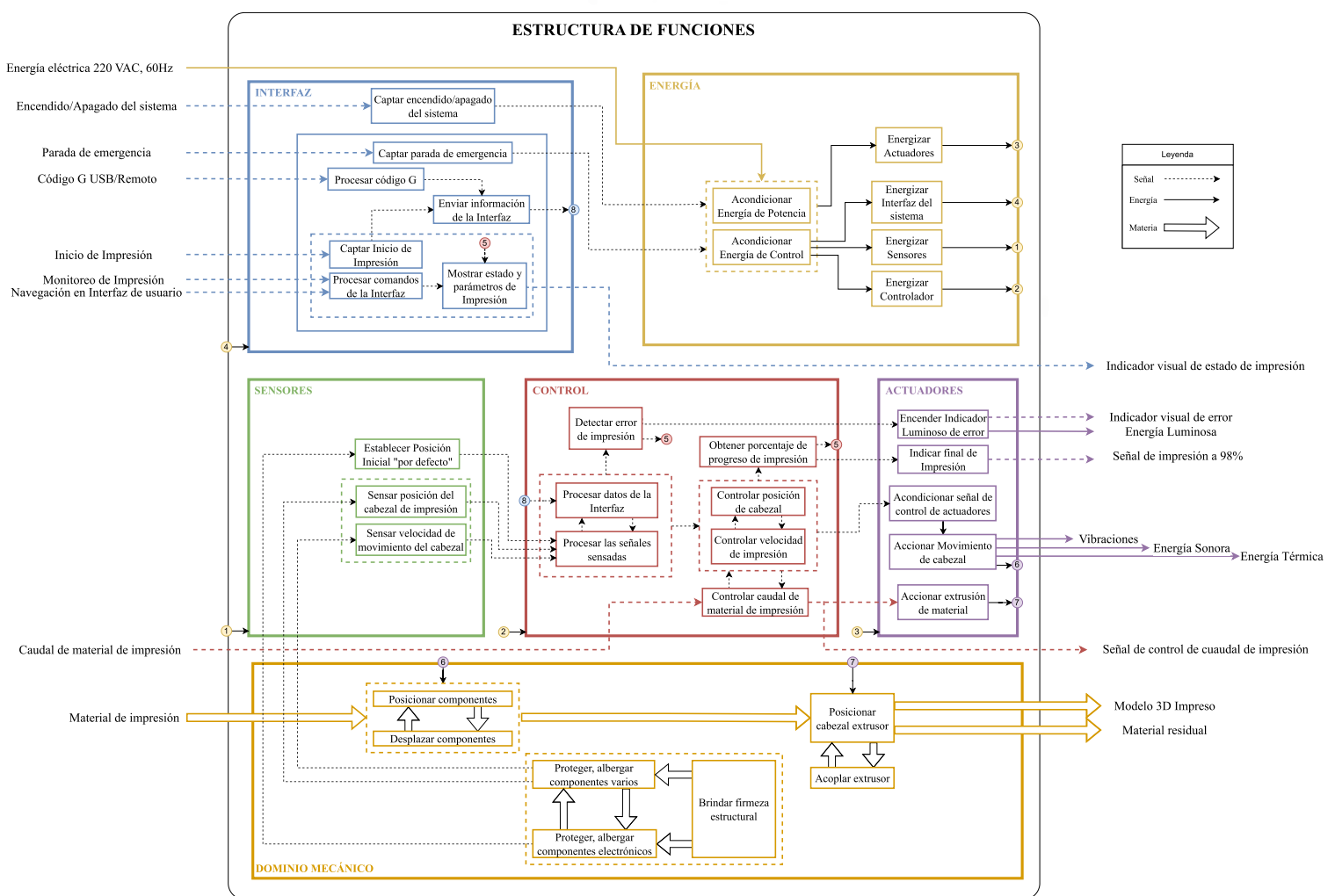


Figura 3.2 - Diagrama de la estructura de funciones (Fuente: Elaboración Propia)

3.4. Matriz Morfológica

Se procede a elaborar una matriz morfológica de componentes tecnológicos adecuados para las funciones del sistema de impresión 3D, así como a desarrollar tres posibles soluciones completas basadas en esta matriz. La Tabla 3.1 muestra las flechas de referencia para la siguiente sección, mientras

que en el Anexo C.4 se enumeran las alternativas de solución para cada función o proceso de la matriz morfológica.

Tabla 3.1 - Indicadores de los conceptos de solución en la Matriz Morfológica
(Fuente: Elaboración Propia)

Concepto de solución	Indicador
Solución 1	
Solución 2	
Solución 3	

Además, se presenta la matriz morfológica con tres conceptos de solución dividido en los dominios presentados en la estructura de funciones. En la Tabla 3.2 se muestran las alternativas de solución para el dominio de interfaz, donde se muestran componentes con los cuales el usuario va a interactuar durante el funcionamiento.

Tabla 3.2 - Conceptos de solución para el dominio de Interfaz (Fuente: Elaboración Propia)

Función	Concepto de solución 1	Concepto de solución 2	Concepto de solución 3
Captar encendido/apagado del sistema	Key Switch	Botón pulsador	Switch
Captar parada de emergencia	E-Stop Switch	E-Stop Switch	E-Stop Switch
Enviar información de la Interfaz	Fluidid	Mainsail	OctoPrintt
Captar Inicio de Impresión	HMI	Pantalla táctil	Pantalla táctil
Procesar código G	USB	USB	USB

En la Tabla 3.3, se muestran los portadores de funciones para el dominio de energía. Dado el suministro de energía 220VAC, 60Hz como entrada del sistema, se tienen en cuenta las alternativas de componentes para almacenar y acondicionar energía eléctrica para suministrar a los demás dominios. Tanto el dominio de sensores, control, actuadores e interfaz, dependen de la energía suministrada.

Tabla 3.3 - Conceptos de solución para el dominio de Energía (Fuente: Elaboración Propia)

	Concepto de solución 1	Concepto de solución 2	Concepto de solución 3
Acondicionar Energía de Potencia	Fuente Switching	Fuente Switching	Rectificador
Acondicionar Energía de Control			

El dominio de sensores se muestra en la Tabla 3.4. Desde el funcionamiento del sistema, movimiento del cabezal extrusor y los componentes necesarios para ello, se debe medir la velocidad y posición

angular de los actuadores para procesarlos y obtener la velocidad y posición del cabezal extrusor. Las alternativas mostradas, influyen directamente en la repetibilidad y robustez del sistema.

Tabla 3.4 - Conceptos de solución para el dominio de Sensores (Fuente: Elaboración Propia)

Función	Concepto de solución 1	Concepto de solución 2	Concepto de solución 3
Sensar posición del cabezal de impresión	Encoder Rotativo	Encoder Rotativo	Encoder Rotativo
Sensar velocidad de movimiento del cabezal			
Establecer Posición Inicial "por defecto"	Limit Switch Inductivo	Limit Switch Mecánico	Limit Switch Capacitivo

Para el dominio de control en la Tabla 3.5, se pueden apreciar las alternativas de portadores de funciones para la detección de error de impresión y control de los procesos de impresión en general. Se tiene principalmente el procesamiento de datos de interfaz, procesar las señales obtenidas desde los sensores, el control de la posición y velocidad del cabezal extrusor y finalmente, una señal de entrada de caudal de extrusión para su control mediante una señal de salida. Las alternativas propuestas, tienen relación directa con la robustez del sistema general.

Tabla 3.5 - Conceptos de solución para el dominio de Control (Fuente: Elaboración Propia)

Función	Concepto de solución 1	Concepto de solución 2	Concepto de solución 3
Detectar error de impresión	Redes Neuronales	Algoritmos	Cálculos directos
Procesar datos de la Interfaz	Controlador CNC	CPU	Placa controladora
Procesar las señales sensadas			
Controlar posición de cabezal			
Controlar velocidad de desplazamiento / impresión			
Controlar caudal de material de impresión			

Las alternativas de solución y portadores de función para el dominio de actuadores, se muestran en la Tabla 3.6. Dada las señales procesadas en el dominio de control, desde el dominio de actuadores se accionan los componentes necesarios para el movimiento del cabezal extrusor e indicadores de estado de impresión.

Tabla 3.6 - Conceptos de solución para el dominio de Actuadores (Fuente: Elaboración Propia)

Función	Concepto de solución 1	Concepto de solución 2	Concepto de solución 3
Encender Indicador Luminoso de error	Indicador LED	Indicador LED	Indicador LED
Indicar final de Impresión	Indicador LED	Mensaje a celular	Buzzer
Acondicionar señal de control de actuadores	Driver de motor	Driver de motor	Driver de motor
Accionar Movimiento de cabezal	Servomotor Industrial	Servomotor Industrial	Stepper Motor
Accionar extrusión de material	Cabezal extrusor	Cabezal extrusor	Cabezal extrusor

Finalmente se muestran las alternativas de solución para el dominio mecánico en la Tabla 3.7. Donde se muestran opciones de estructura del sistema de impresión, acople al sistema de extrusión y alternativas de desplazamiento de componentes. Las decisiones a tomar desde el diseño de este dominio tendrán influencia directa en la transportabilidad, modularidad y precisión del sistema general.

Tabla 3.7 - Conceptos de solución para el dominio Mecánico (Fuente: Elaboración Propia)

Función	Concepto de solución 1	Concepto de solución 2	Concepto de solución 3
Posicionar componentes	Bloque deslizante	Bloque deslizante	Guía con ruedas
Desplazar componentes	Husillo de bolas	Correa	Cremallera
Acoplar extrusor	Soldadura	Acople	Uniones atornilladas
Posicionar cabezal extrusor	Brazo Robótico	Configuración Delta	Configuración Cartesiana
Proteger, albergar componentes electrónicos	Caja de control industrial	Caja de control industrial	Caja de control industrial
Proteger, albergar componentes varios	Estructura cubierta	Estructura cubierta	Estructura abierta

3.5. Evaluación técnica económica

Los conceptos de solución son evaluados, a nivel de desempeño técnico y costos. La evaluación técnica-económica, se realiza con la finalidad de seleccionar la solución óptima. En base a esto, se realizará el diseño preliminar. Se considerarán criterios mediante los cuales se asignará un peso relativo "g". Según estos, se otorgará un puntaje "p" a cada concepto de solución, de acuerdo con el criterio correspondiente. En la Tabla 3.8 se muestra a mayor detalle los valores que tomarán los pesos relativos para los criterios y puntajes para los conceptos de solución [CSx]. Mayor justificación en el Anexo C.6

Tabla 3.8 - Pesos relativos y puntaje de las soluciones (Fuente: Elaboración Propia)

Valor	Significado	
	Peso relativo "g"	Efectividad o puntaje "p"
1	Poco importante	Mínimamente aceptable
2	Medianamente importante	Aceptable
3	Importante	Bueno
4	Muy importante	Solución Ideal

3.5.1. Criterios técnicos

Para llevar a cabo una evaluación técnica, se establecen criterios que se centra en el desempeño de los componentes que conforman el sistema y su rendimiento general, utilizando los criterios técnicos descritos a continuación: **Precisión, repetibilidad, robustez, velocidad y facilidad montaje y desmontaje**. Por lo tanto, se realiza un análisis para so relativo de los criterios técnicos y evaluación de las alternativas de solución. Finalmente, después de haber realizado un análisis de los criterios técnicos y su evaluación en relación con los conceptos de solución, se ha elaborado una tabla que proporciona un resumen claro de los pesos relativos asignados a cada uno de estos criterios. La Tabla 3.9 se presenta a continuación, con el propósito de ofrecer una visión general de cómo se valoran los aspectos técnicos en el contexto de los conceptos de solución evaluados.

Tabla 3.9 - Evaluación técnica de los conceptos de solución (Fuente: Elaboración Propia)

Técnico		CS1			CS2		CS3		CS Ideal	
Nro	Criterio	g	p	p*g	p	p*g	p	p*g	p	p*g
1	Precisión	2	3	6	2	4	2	4	4	8
2	Repetibilidad	1	3	3	2	2	2	2	4	4
3	Robustez	3	3	9	2	6	1	3	4	12
4	Velocidad	4	3	12	3	12	2	8	4	16
4	Modularidad	4	2	8	2	8	3	12	4	16
5	Transportabilidad	3	3	9	3	9	2	6	4	12
Suma total		17	47	14	41	12	35	24	68	
Valor técnico		0.69			0.60		0.51		1.00	

3.5.2. Criterios económicos

Se establecen los criterios económicos para realizar una evaluación económica que se concentra en los costos presentes en la implementación del sistema, utilizando los criterios económicos descritos a continuación para comparar los conceptos de solución: **Costo de componentes, facilidad de adquisición de componentes, costo de la implementación, cantidad de componentes estructurales, cantidad de componentes electrónicos**. Por lo tanto, se realiza un análisis para cada peso relativo de los criterios económicos y evaluación de las alternativas de solución. Finalmente, después de haber realizado un análisis exhaustivo de los criterios técnicos y su evaluación en relación con los conceptos de solución, se ha elaborado una tabla que proporciona un resumen claro de los pesos relativos

asignados a cada uno de estos criterios. La Tabla 3.10 se presenta a continuación, con el propósito de ofrecer una visión general de cómo se valoran los aspectos técnicos en el contexto de los conceptos de solución evaluados.

Tabla 3.10 - Evaluación económica de los conceptos de solución (Fuente: Elaboración Propia)

Económico			CS1		CS2		CS3		CS Ideal	
Nro	Criterio	g	p	p*g	p	p*g	p	p*g	p	p*g
1	Costo de componentes	4	1	4	3	12	3	12	4	16
2	Facilidad de adquisición de componentes	3	2	6	3	9	3	9	4	12
3	Costo de la implementación	2	1	2	2	4	3	6	4	8
4	Cantidad de componentes estructurales	4	3	12	2	8	2	8	4	16
Suma total			7	24	10	33	11	35	16	52
Valor económico			0.46		0.63		0.67		1.00	

3.5.3. Elección de la alternativa óptima

Con los criterios desarrollados, importancia y pesos relativos asignados. Se ha realizado un análisis en cuanto a aspectos técnicos y económicos, tenemos el gráfico de dispersión mostrado en la Figura 3.3. Que nos permite evaluar los conceptos de solución y seleccionar uno como ganador.

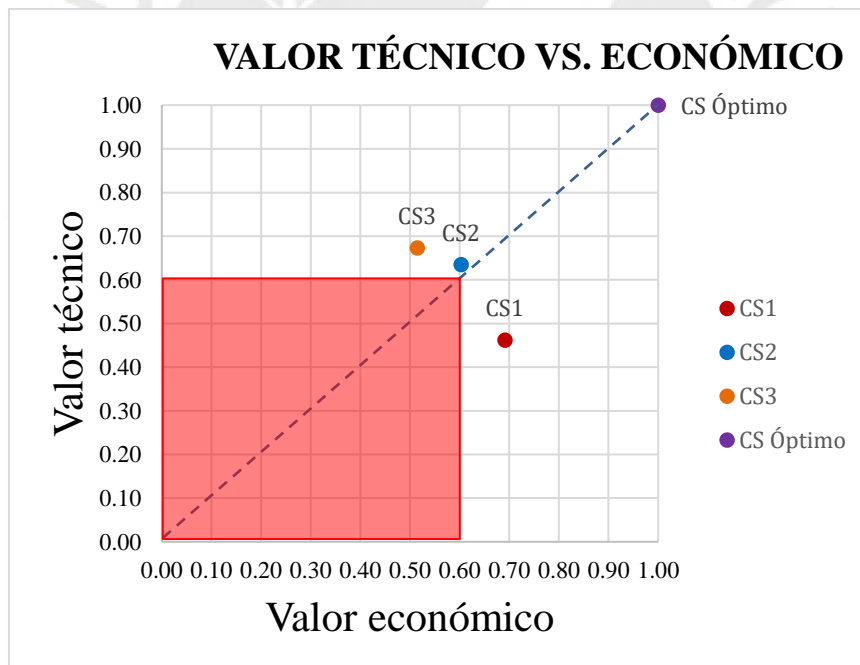


Figura 3.3 - Gráfico técnico-económico de las propuestas de solución (Fuente: Elaboración Propia)

3.6. Concepto de solución óptima

Analizando los conceptos de solución y la evaluación técnica económica descritos. Se concluye que el concepto de solución 3 es la solución ganadora. Teniendo en cuenta los requisitos de diseño, económicos y técnicos, se pueden considerar mejoras de las demás soluciones. Para ello, el cambio que se realizará es omitir el uso de carcasa e incorporar al módulo estructural una modificación, de tal forma

que la electrónica y el sistema general esté cubierto en la parte superior. Por otro lado, se puede considerar el albergar toda la electrónica en la parte baja en lugar de la parte superior, esto se definirá en el desarrollo del sistema mecatrónico general y teniendo en cuenta la retroalimentación de Fabcore después de presentar concepto de solución óptimo. Los módulos ahora serán 5, módulo estructural, de movimiento lineal, de movimiento de cabezal, electrónica e interfaz. Cuyos tres primeros módulos se muestra en la Figura 3.4. Cabe resaltar que en los incisos (b) y (c) se ha removido la parte frontal del módulo estructural para observar los componentes con mayor facilidad. Las alternativas de concepto de solución se tienen en el Anexo C.5.

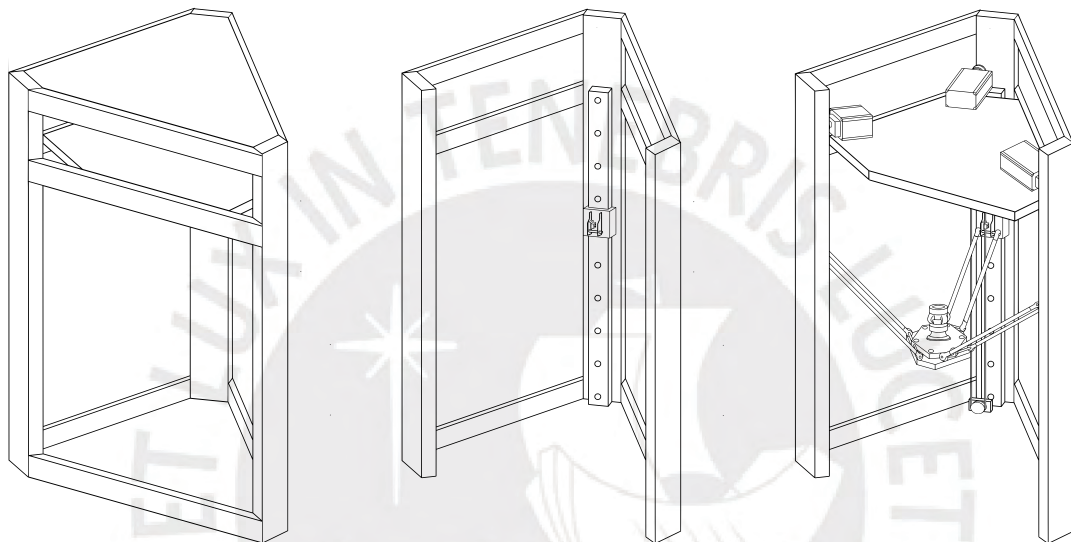


Figura 3.4 - CS óptimo, módulo estructural (a), de movimiento lineal (b) y de movimiento de cabezal (c)
(Fuente: Elaboración Propia)

Conforme a ello, se tiene el módulo de electrónica en la Figura 3.5 (a) y la incorporación del módulo interfaz en la Figura 3.5 (b), en este último se vuelve a mostrar la vista frontal del módulo estructural.

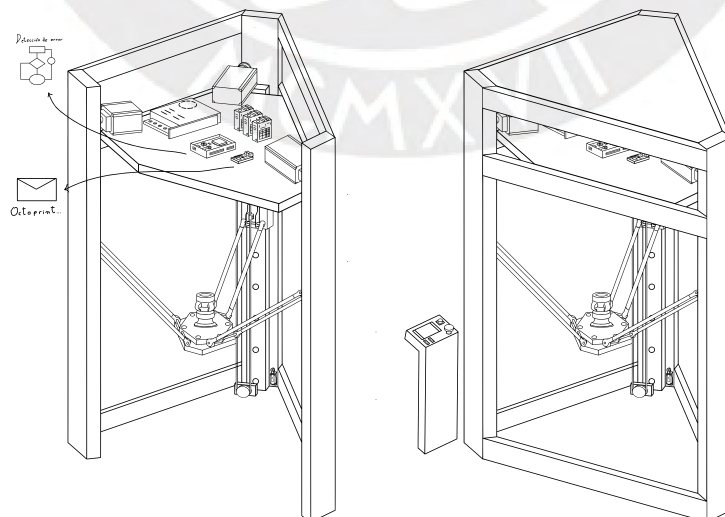


Figura 3.5 – CS óptimo, módulo de electrónica (a) y módulo de interfaz (b)
(Fuente: Elaboración Propia)

Finalmente, se muestra el concepto de solución óptimo junto a sus dimensiones aproximadas en la Figura 3.6. Con esto se tiene el concepto de solución óptimo, el cual se obtuvo a partir de mejorar el concepto de solución 3 mediante la evaluación técnica – económica.

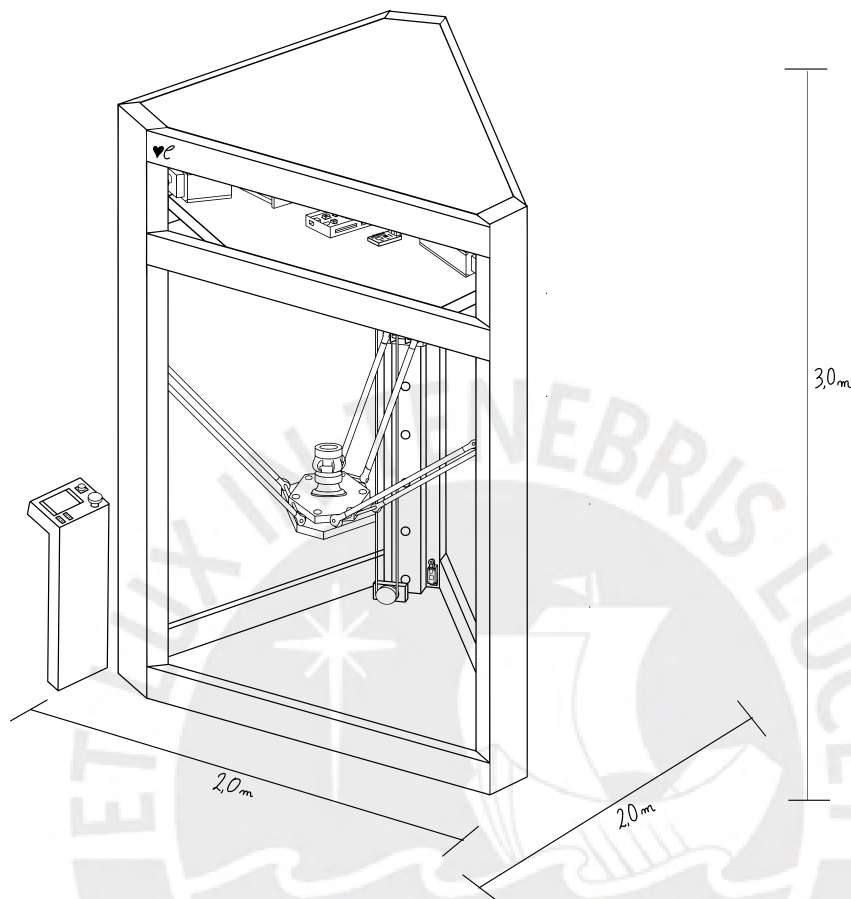


Figura 3.6 - Concepto de solución óptimo
(Fuente: Elaboración Propia)

3.7. Diagrama de operaciones

Durante el funcionamiento de la impresora 3D, el operario debe llevar a cabo una serie de pasos. Los cuales quedan descritos en el diagrama de operaciones. En un inicio se debe energizar el sistema y presionar el botón de encendido. Con ello, esperar la señal indicadora de encendido. Con ello, el operario puede navegar en la interfaz y mover el efector en el espacio tridimensional o realizar la operación “homing”. Luego, se ingresa el código G mediante USB. Una vez, se desea iniciar la impresión, se debe presionar el botón que de inicio a la impresión. Con ello, el operario puede monitorear la impresión, mientras que en el sistema de impresión ingresa el material y se deposita en capas para obtener el modelo 3D. En el caso se presente error y se detecte, se mostrará una señal de error de impresión en le interfaz. En el caso de que se presente un error y no se detecte, el sistema continuará realizando la impresión hasta que el operario presione el botón de parada de emergencia y retirará el modelo 3D impreso con error. En caso de ocurrir un accidente, el operario debe presionar el botón de parada de emergencia y retirará el modelo 3D impreso. En caso no ocurra error alguno, cuando

la impresión finalice, se enviará una notificación al celular del operario para que, al culminar el proceso de impresión, la posición de los componentes irá a posición por defecto “homing”, se debe retirar el modelo 3D impreso y apagar el sistema.

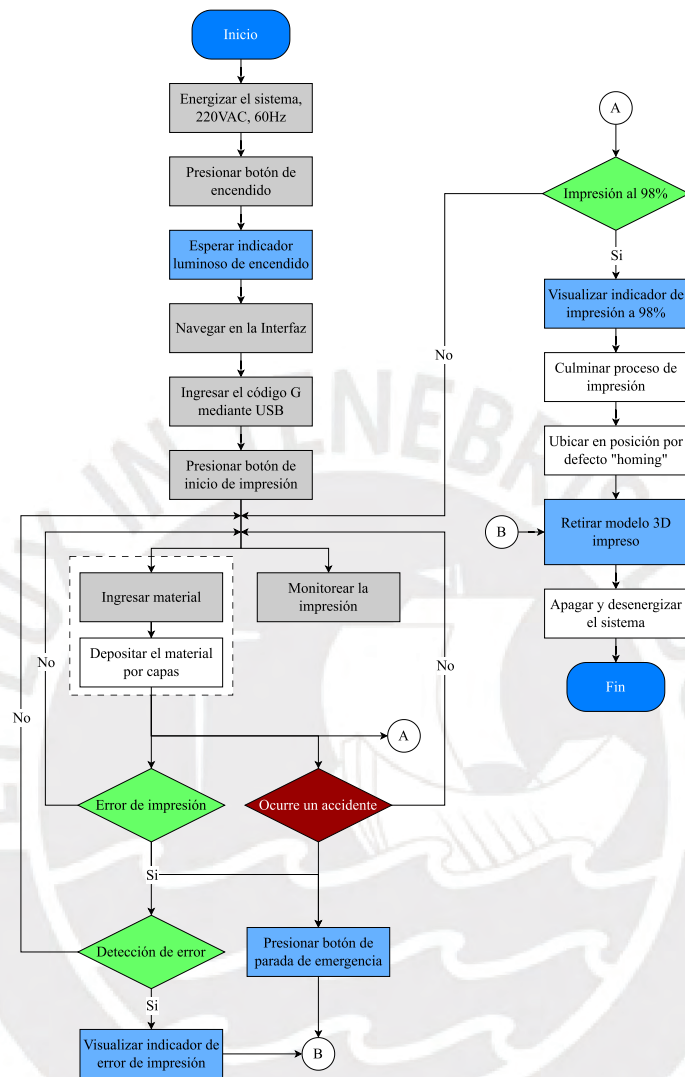


Figura 3.7 - Diagrama de operaciones del sistema
(Fuente: Elaboración Propia)

4. SISTEMA MECATRÓNICO INTEGRAL

A continuación, se presenta el sistema mecatrónico integral en el cual se detallan los materiales a utilizar para el módulo estructural, componentes y dispositivos electrónicos e interfaz. Se tiene la potencia que consume el sistema completo, así como el diagrama esquemático de conexiones. Finalmente se muestra de manera general el modelo 3D con todos los subsistemas integrados en un CAD detallado.

4.1. Modelo 3D general

El sistema mecatrónico integral se divide en subsistemas, los cuales se analizan en los capítulos posteriores. El propósito de esta subsección es presentar a nivel general el hardware del sistema de impresión mediante el modelo 3D. Para un mayor detalle, se debe visitar cada subsistema y los anexos donde se encuentran los planos mecánicos (Anexo K). El sistema general, en su versión final se muestra en la Figura 4.1.

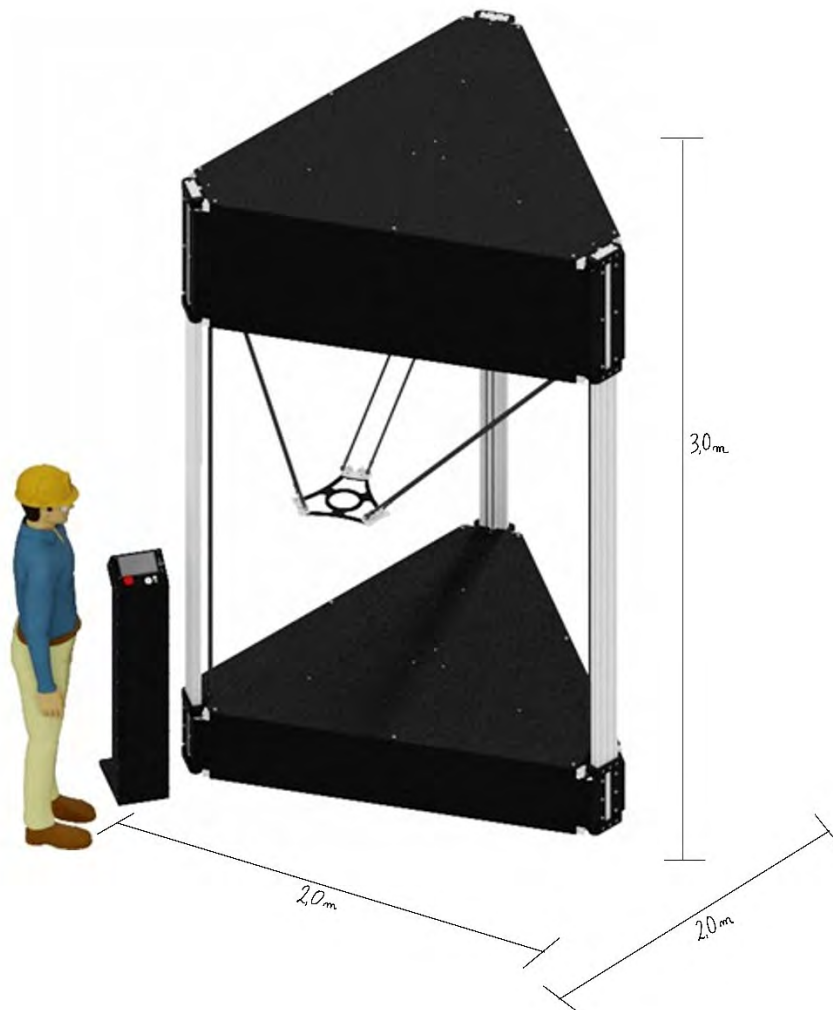


Figura 4.1 - Modelo 3D general del sistema de impresión
(Fuente: Elaboración Propia)

A nivel de presentación, se tienen las coberturas hechas de chapa negra de 3mm. Para poder cubrir la base y con ellos los motores y componentes electrónicos, además de la parte superior con los refuerzos laterales superiores. El subsistema de interfaz, también depende de una carcasa de chapa. Por lo tanto, se muestra el sistema sin cobertura de chapa en la Figura 4.2.

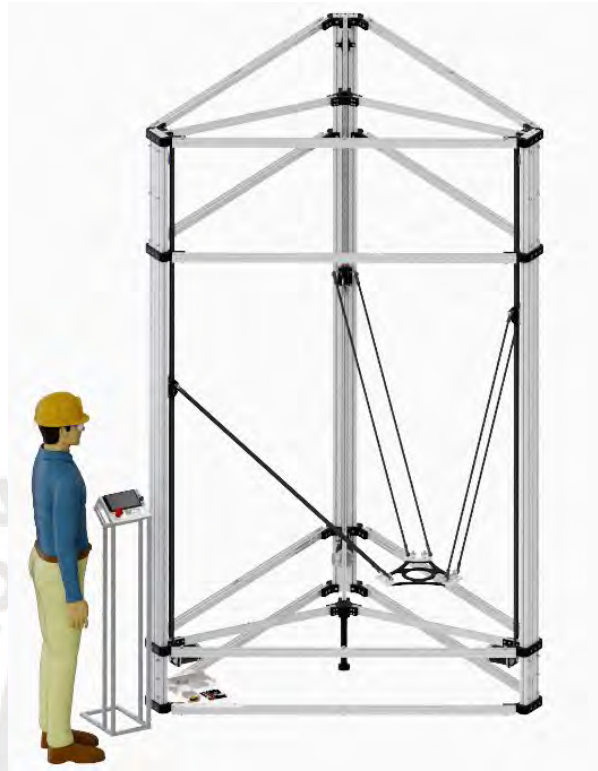


Figura 4.2 - Modelo 3D general del sistema de impresión sin cobertura
(Fuente: Elaboración Propia)

Dada la naturaleza de la configuración del sistema de impresión Delta, se tiene el movimiento de efector gobernado por el movimiento vertical de las guías, el cual está delimitado de manera superior por un limit switch. Esta configuración de muestra en la Figura 4.3.



Figura 4.3 - Detalle del movimiento lineal mediante fajas
(Fuente: Elaboración Propia)

Del mismo modo, se muestra el efector en la Figura 4.4, donde se aprecia a detalle la conexión con los brazos delta mediante acoples esféricos. La longitud de los brazos del efector se calculan a partir del área y volumen de impresión requeridos. Estos cálculos geométricos se analizan a profundidad en el capítulo del subsistema de movimiento de efector



Figura 4.4 - Efector del sistema de impresión
(Fuente: Elaboración Propia)

Del mismo modo, en la parte baja de la base se ubica el motor y la segunda polea para la transmisión de potencia y ejecución de movimiento lineal. Esto se muestra en la Figura 4.5.



Figura 4.5 - Ubicación de motores en el sistema
(Fuente: Elaboración Propia)

Del mismo modo, en la Figura 4.6 se muestra el arreglo de la electrónica que irá albergada en la base, el cual se constituye de las fuentes conmutadas de potencia y control, así como el controlador principal del sistema.



Figura 4.6 - Electrónica del sistema ubicada en la base
(Fuente: Elaboración Propia)

Finalmente, se muestra el subsistema de interfaz de manera externa, donde aprecia la interfaz general con la que puede interactuar el operador, como el display LED, botón de encendido, emergencia, USB y luces LED. Esto se muestra en la Figura 4.7.

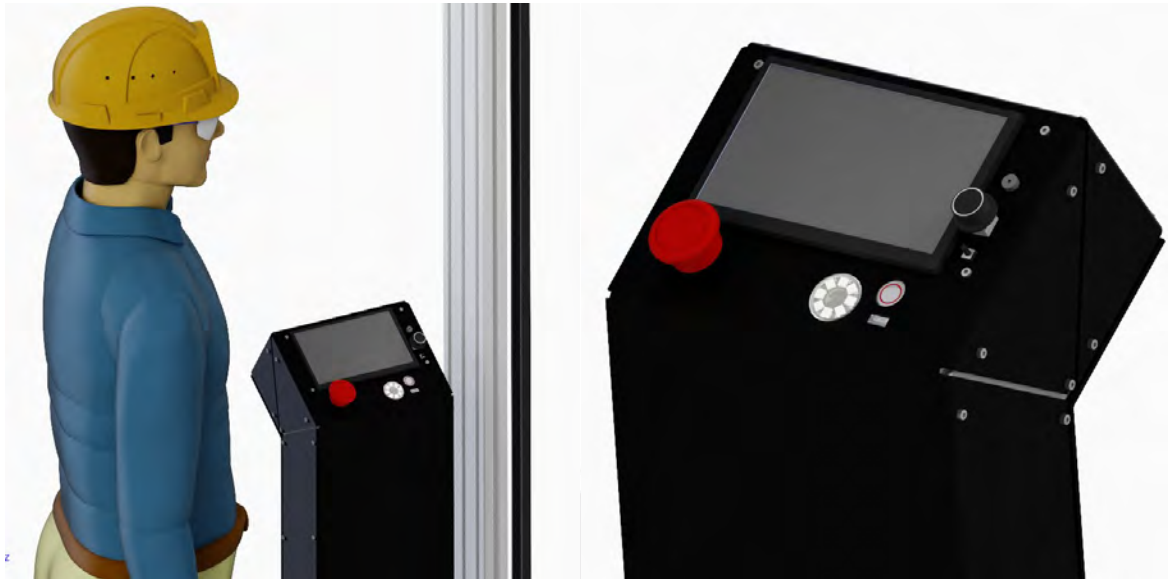


Figura 4.7 - Interfaz de usuario del sistema
(Fuente: Elaboración Propia)

Finalmente, se muestra en la Figura 4.8, a mayor detalle el subsistema de interfaz sin chapa, donde se ubican los relés de potencia y control.

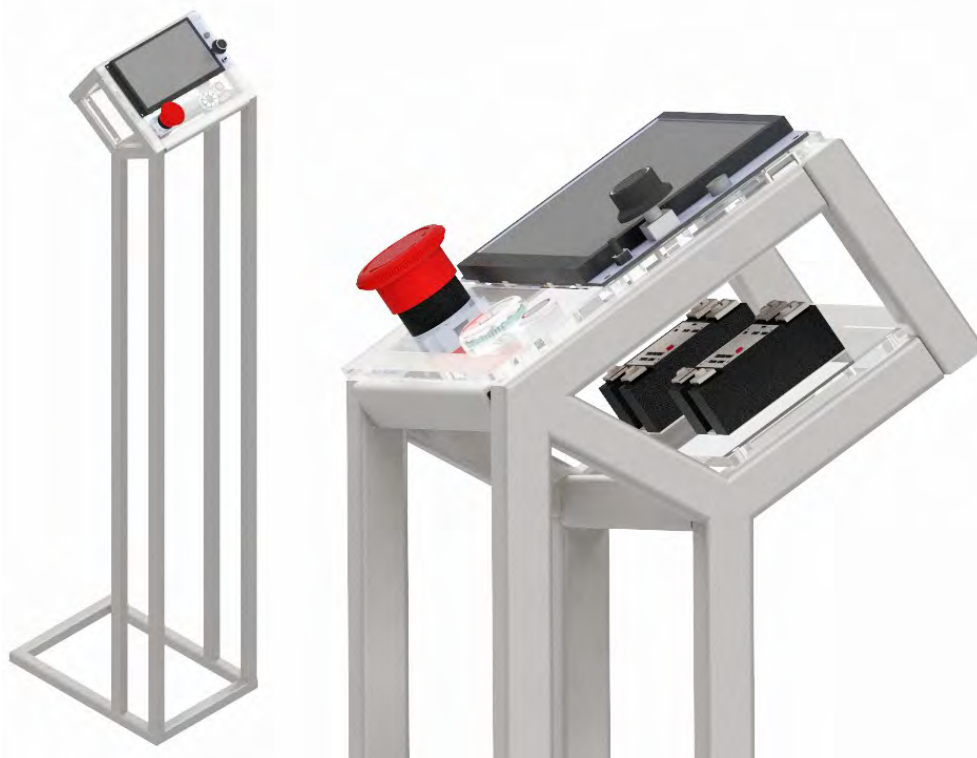


Figura 4.8 - Interfaz del sistema sin cobertura
(Fuente: Elaboración Propia)

4.2. Arquitectura de hardware

La arquitectura de hardware del sistema presenta la relación entre sensores, actuadores y controladores del sistema de impresión general. Está compuesto por un controlador, el cual está conectado a una Raspberry Pi para el control remoto. Desde la interfaz, se tiene el switch para encendido y apagado, el E-stop switch para el apagado de emergencia, el puerto USB para el ingreso del código G y la interfaz LCD para procesar los comandos desde la navegación en interfaz. Para el funcionamiento del sistema, se tiene la conexión entre el controlador y drivers de los servomotores, además de la conexión entre el controlador, limit switch y drivers para la posición “home”. El encoder y servomotor industrial son parte de un solo componente comercial. Finalmente, se separa las fuentes de alimentación DC de potencia y de control para alimentar todos los componentes necesarios. En la Figura 4.9 se muestra a mayor detalle el diagrama de arquitectura de hardware.

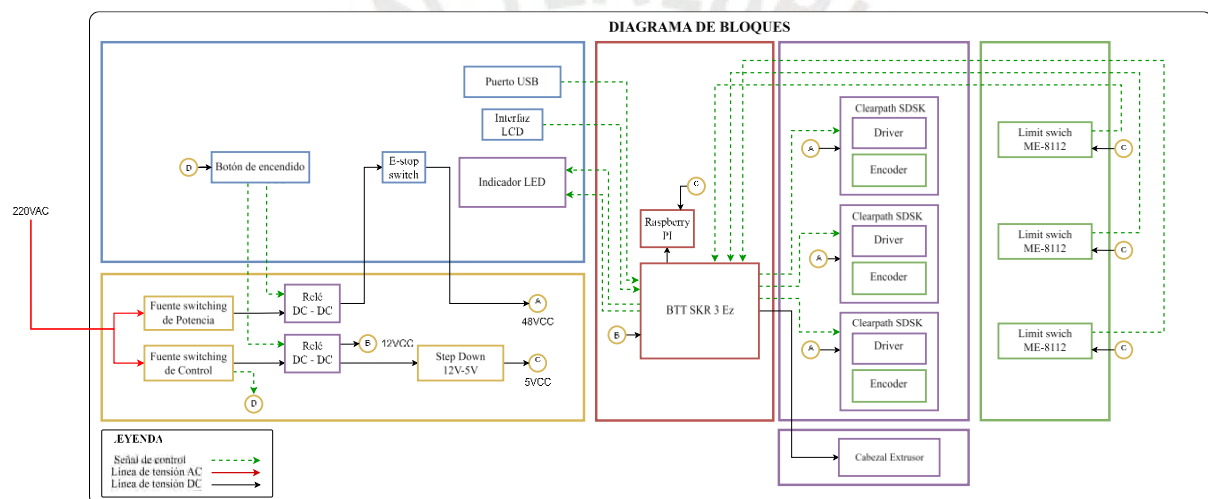
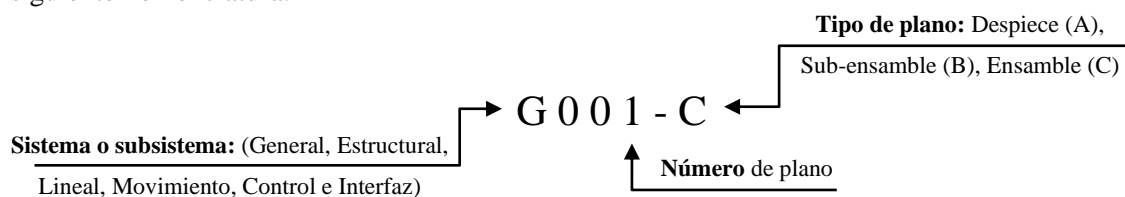


Figura 4.9 - Diagrama de arquitectura de hardware
(Fuente: Elaboración Propia)

4.3. Planos mecánicos del sistema

Se tienen los planos del sistema general. Cada plano posee un código relacionado con el subsistema al que pertenece. Los cuales se muestran detalladamente en el Anexo K. El código de los planos sigue la siguiente nomenclatura:



4.3.1. Planos de despiece

En la Tabla 4.1, se muestra la tabla de planos de despiece y el subsistema al cual pertenece. Durante el diseño a nivel de ingeniería, se ha realizado el diseño de acoples y soportes que permiten la conexión de hardware, y componentes comerciales.

Tabla 4.1 - Tabla de acoples de despiece (Fuente: Elaboración Propia)

Nombre de pieza de plano	Código de plano	Tamaño	Subsistema
Acople lateral	E001-A	A3	Estructural
Acople lateral central	E002-A	A3	
Acople central	E003-A	A3	
Pedestal de soporte	E004-A	A4	
Cobertor superior	E005-A	A2	
Cobertor inferior	E006-A	A2	
Acople de guía lineal	L001-A	A4	Movimiento Lineal
Acople auxiliar de guía lineal derecho	L002-A	A4	
Acople auxiliar de guía lineal izquierdo	L003-A	A4	
Acople de polea	L004-A	A4	
Acople de motor a estructura	L005-A	A4	
Acople de motor	L006-A	A4	
Efector	M001-A	A2	Movimiento de Efector
Acople efector	M002-A	A4	
Acople limit switch	C001-A	A4	Control de Movimiento
Soporte para electrónica	C002-A	A2	
Estructura de interfaz	I001-A	A4	Interfaz
Cobertor de interfaz	I002-A	A3	
Soporte de interfaz	I003-A	A3	
Soporte de relés	I004-A	A4	

4.3.2. Planos de sub-ensamble

En los planos de sub-ensamble se tienen los subsistemas o sub-ensambles necesarios pertenecientes a subsistemas. En la Tabla 4.2 se muestran a detalle.

Tabla 4.2 - Tabla de planos de sub-ensamble (Fuente: Elaboración Propia)

Nombre de pieza de plano	Código de plano	Tamaño	Subsistema
Esquinas laterales	E001-B	A2	Estructural
Esquinas centrales	E002-B	A2	
Bloque lineal	L001-B	A3	Movimiento Lineal
Motores	L002-B	A3	
Poleas y acoples	L003-B	A4	
Efecto y acoples	M001-B	A2	Movimiento de Efecto
Brazos delta	M002-B	A4	
Soporte y electrónica	C001-B	A3	Control de Movimiento
Limit switch y acoples	C002-B	A4	
Componentes de interfaz	I001-B	A3	Interfaz
Relés y soporte	I002-B	A3	

4.3.3. Planos de ensamble general

Se tiene finalmente, los planos de ensamble de los subsistemas y sistema general en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 - Planos de ensamble general (Fuente: Elaboración Propia)

Nombre de pieza de plano	Código de plano	Tamaño
Subsistema estructural	E001-C	A2
Subsistema de interfaz	I001-C	A3
Sistema general	G001-C	A1

4.4. Esquemático general

En los planos esquemáticos se detalla en el Anexo L. Donde se aprecian la conexión detallada de pines de componentes de la interfaz, electrónica de control y potencia. Adicionalmente, se tiene la tabla de componentes donde se detallan la ubicación en el plano esquemático, tipo de componente, cantidad y código de producto. En la Figura 4.10 se observa el diagrama esquemático general del sistema de impresión

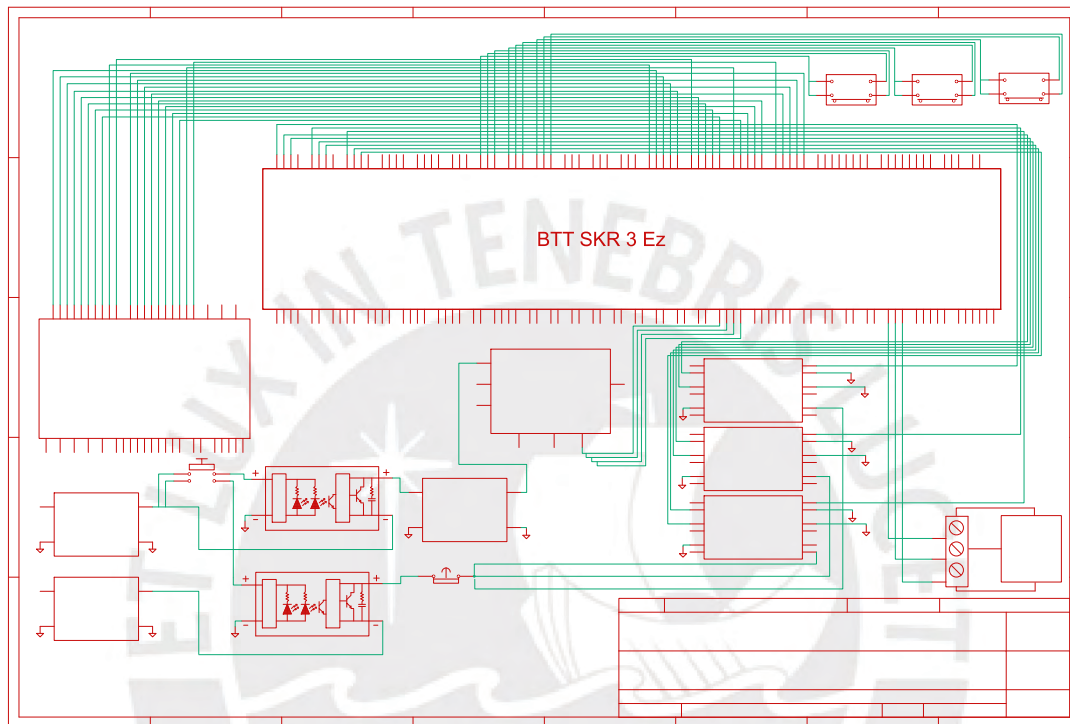


Figura 4.10 - Diagrama esquemático general
(Fuente: Elaboración Propia)

4.5. Cálculos de potencia

Para la presente sección, se hará el cálculo de la potencia total consumida por el sistema general y con esto, la selección de convertor AC-DC.

4.5.1. Cálculo de potencia total consumida

La impresora 3D a diseñar tiene como componentes consumidores de potencia, a tres servomotores Clearpath seleccionados, cuyo voltaje de alimentación y amperaje de funcionamiento se dan según las especificaciones técnicas del mismo. El proceso de selección y el cálculo de los motores se desarrolla en el **Capítulo 6, Subsistema de movimiento lineal vertical**, dentro de la **Sección 6.4**. Por otro lado, la placa controladora BTT SRK 3 Ez, es consumidora de potencia, llegando a tener una corriente máxima de chip de 3.8A, finalmente se tiene la corriente máxima de 1.2A y voltaje de alimentación de una Raspberry Pi, el cual se encuentra dentro de la potencia que utiliza el controlador. Por lo tanto, se tiene la Tabla 4.4, donde se tiene el cálculo de potencia total consumida

Tabla 4.4 - Cálculo de potencia total consumida del sistema de impresión
(Fuente: Elaboración Propia)

Ítem	Voltaje	Amperaje	Cantidad	Potencia
Motores Clearpath SD	48 V	3.1 A	3	445 W
Controlador BTT SKR 3 EZ y Raspberry Pi	12 V	5	1	45.6 W
Total				496.6 W

En base a este análisis se procede a realizar la selección del conversor AC – DC, el cual, por motivos de robustez del sistema y la matriz morfológica, serán dos fuentes switching, una de control y una de potencia.

4.5.2. Selección de conversor AC-DC

Teniendo en cuenta un voltaje de alimentación de 48V y 12V, que operan a un amperaje máximo de 9.3A y 5A para la potencia y control respectivamente, Se opta por seleccionar una Fuente de poder switching de 12V-5A y una Fuente de poder switching de 48V-10A. Esta elección se basó en el análisis de los casos extremos presentados en la Tabla 4.4 de cálculos de potencia, desde el cual se concluye que estas fuentes switching son suficientes para las necesidades del sistema. Se escogen fuentes switching Peptel y se muestran en la Figura 4.11.



Figura 4.11 - Fuentes Switching Peptel seleccionadas (Fuente: Peptel)

Para la fuente de alimentación de la Raspberry, se utiliza un step-down cuya entrada es 12V y consumo de corriente máxima es 1.2A. Teniendo en cuenta ello y los módulos Step Down disponibles en el mercado peruano, se utilizará el modelo XL4015, mostrado en la Figura 4.12, cuyo voltaje de entrada es de 4 a 38V, voltaje de salida es de 1.23 a 36V y la corriente de salida es de 0 a 5A.



Figura 4.12 - Modelo Step Down XL4015
(Fuente: SAISAC)

4.6. Transportabilidad y Modularidad

La transportabilidad y modularidad son dos características clave en el diseño del sistema de impresión 3D. La transportabilidad hace referencia a la capacidad de transportar la máquina y sus componentes de forma eficiente. En este diseño, se propone que todos los módulos de la impresora sean semi ensamblados y que encajen perfectamente en una caja de transporte. Esta caja debe ser de un tamaño adecuado para contener los módulos, además de tener un peso total específico, incluyendo los componentes y la caja misma, lo que facilita su desplazamiento. Modularidad, por otro lado, permite que cada componente de la impresora sea independiente o de fácil reemplazo, lo que mejora la eficiencia en el mantenimiento. Para garantizar la protección durante el transporte, se utilizará **Expanded Polystyrene (EPS)**, un material ligero y resistente que ofrece soporte para los componentes de la impresora. Este material será utilizado para proteger a los módulos a transportar. Además, los módulos de EPS se fabricarán con la ayuda de proveedores como **Universal Foam** (<https://univfoam.com/>), especializados en soluciones personalizadas para embalaje. Ello, se puede apreciar en la Figura 4.13.

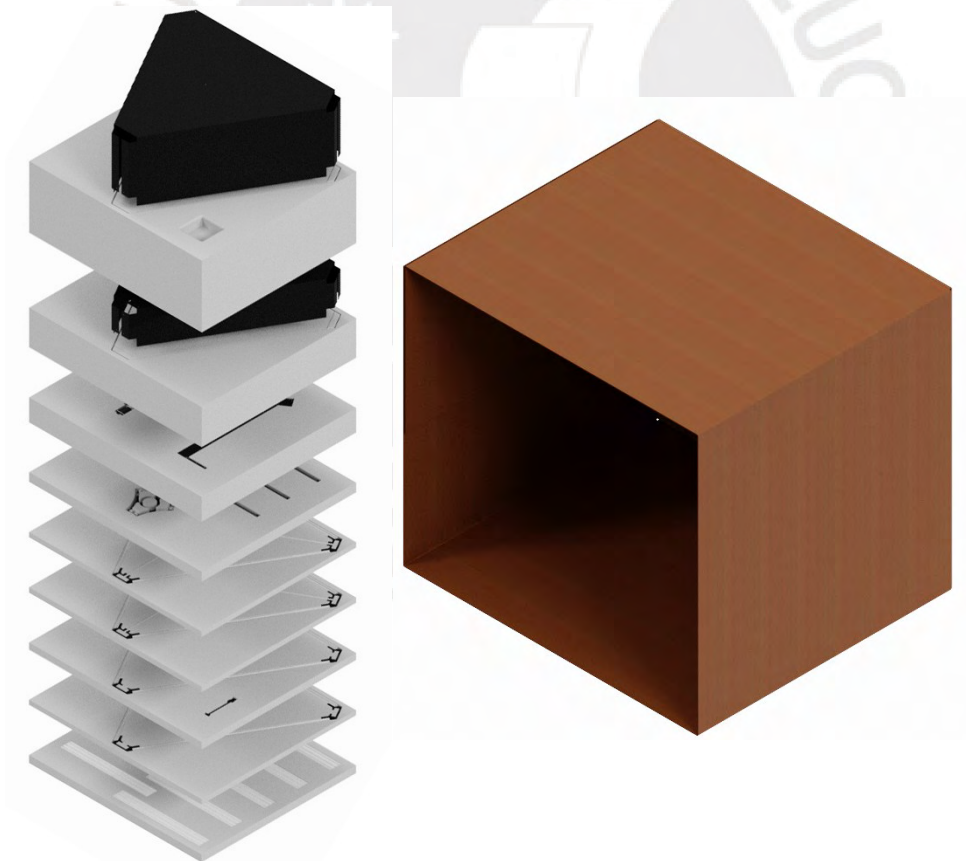


Figura 4.13 – Módulos (EPS) de transporte y caja de transporte (Fuente: Elaboración Propia)

La caja de transporte y mayor detalle en cuanto a las dimensiones, se puede apreciar en el Anexo O, donde se tiene un plano de distribución a detalle. Finalmente, se tiene el cálculo del peso total del

sistema en la Tabla 4.5, el cual da un total de 172.6 kg, menor a los 200 kg establecidos en la lista de requerimientos.

Tabla 4.5 - Cálculo del peso total del sistema
(Fuente: Elaboración Propia)

Nombre de componente	Cantidad	Peso por unidad (kg)	Peso total (kg)
V-Slot 2040, 3.2m	10	4.68	46.78
T-Slot 40120 1.0m	9	4.29	38.59
Rieles tipo Hiwin HG20 3.0m	2	2.79	5.59
Bloque Hiwin HG20 CGH20HA	3	0.50	1.50
Chumacera D8mm-KFL08	6	0.03	0.16
Motor Clearpath CPM-SDSK-3441S-RLN	3	3.30	9.90
Varilla roscada 12mm x 1.0m	6	1.24	7.46
Tubo fibra de carbón 12mm	6	0.10	0.60
Fuente Switching 48V, 10A	1	0.80	0.80
Fuente Switching 12V, 5A	1	0.22	0.22
Limit Switch ME-8112	3	0.20	0.60
Relé SSR-05DD	1	0.20	0.20
Relé SSR-10DD	1	0.20	0.20
Acople Lateral	3	0.34	1.01
Acople Lateral Central	3	0.40	1.20
Acople Central	3	3.18	9.53
Pedestal de Soporte	1	2.27	2.27
Cobertor Superior	1	13.36	13.36
Cobertor Inferior	1	9.32	9.32
Acople Guía	3	0.07	0.21
Acople Aux Derecho	3	0.04	0.12
Acople Aux Izquierdo	3	0.04	0.13
Soporte Polea	3	0.07	0.22
Acople motor a estructura	3	0.06	0.18
Acople auxiliar de motor	3	0.02	0.06
Efector principal	1	0.61	0.61
Acople de brazo a efector	3	0.16	0.48
Soporte Limit Switch	3	0.03	0.08
Soporte de electrónica	1	0.84	0.84
Cobertor Interfaz	1	20.18	20.18
Soporte Componentes Interfaz	1	0.09	0.09
Soporte Relés	1	0.10	0.10
PESO TOTAL:			172.6 kg

5. SUBSISTEMA DE SOPORTE ESTRUCTURAL

El subsistema de soporte estructural es el esqueleto de la impresora 3D, diseñado para asegurar estabilidad, resistencia y precisión durante el proceso de impresión. Debe soportar las cargas generadas por el movimiento de los demás subsistemas y el material depositado, manteniendo la precisión en condiciones óptimas. Durante el diseño se utilizará la nomenclatura mostrada en la Tabla 5.1, de las cuales, algunos parámetros son tomados de (López et al., 2022). Además, en la Figura 5.1 se muestran estas dimensiones establecidas a mayor detalle.

Tabla 5.1 - Dimensiones principales de la geometría del sistema de impresión
(Fuente: Elaboración Propia)

Símbolo	Significado	Dimensión establecida
D_I	Diámetro de impresión	1420 mm
D_M	Diámetro de máquina	1900 mm
l	Longitud de brazos	1500 mm
O_E	Desfase de efector	180 mm
O_C	Desfase de guías lineales	90 mm
O_P	Desfase de polea	180 mm
O_B	Desfase de brazos	100 mm

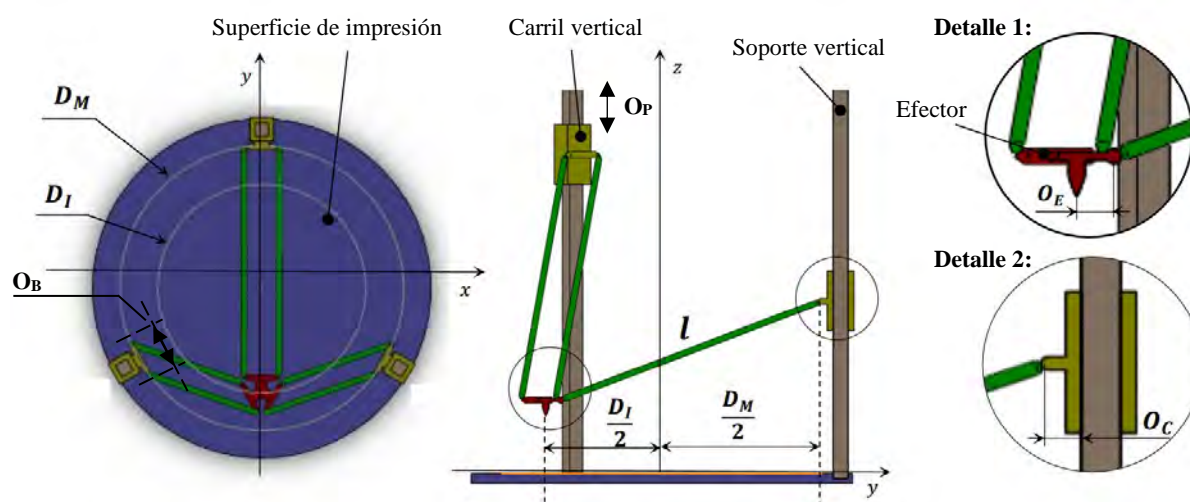


Figura 5.1 - Dimensiones principales del sistema de impresión
(Fuente: López et al., 2022)

5.1. Diseño del boceto del módulo estructural

Para el diseño del módulo estructural, tenemos en cuenta los requerimientos del sistema dados en el Anexo C.1 Se tiene inicialmente un área de trabajo 2.0 m x 2.0 m. Sobre la cual irá la impresora 3D Delta, dado el diseño conceptual, se tiene un primer bosquejo sobre el diseño de la base triangular mostrada en la Figura 5.2.

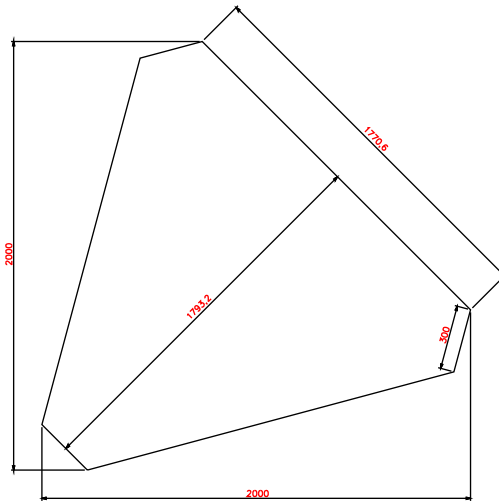


Figura 5.2 – Dimensiones del área de trabajo del sistema de impresión
(Fuente: Elaboración Propia)

Es sobre esta base de trabajo y con las medidas mostradas que estará ubicada el módulo estructural. Por otro lado, es importante tener en cuenta la altura de la estructura, que según los requerimientos es máximo 3.0 m. Por la lista de requerimientos, una cara debe estar descubierta. Por lo tanto, tenemos ahora las dimensiones generales de la estructura. Para un mejor entendimiento, se tiene la Figura 5.3 donde se muestra un primer boceto del subsistema estructural.

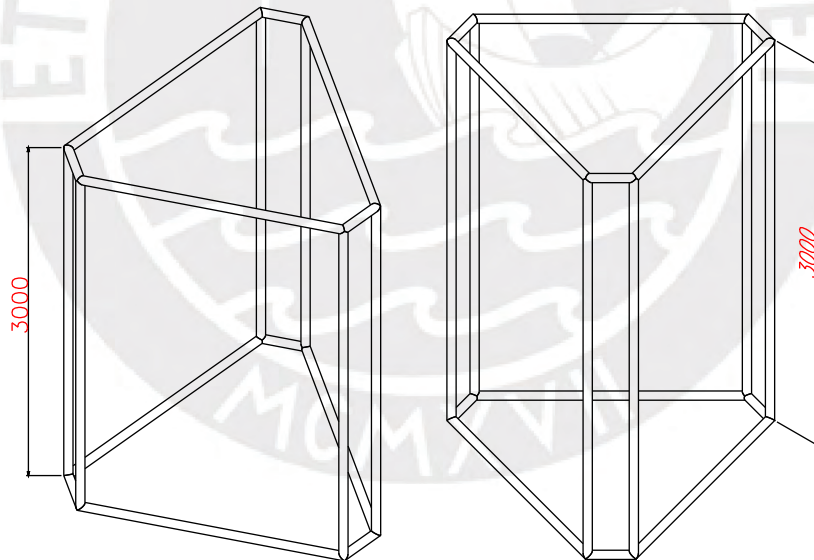


Figura 5.3 - Boceto de estructura de subsistema estructural
(Fuente: Elaboración Propia)

A continuación, se, tienen soportes adicionales a una distancia desde la base y una distancia desde la parte superior. Para ello, se introducen los parámetros auxiliares desfase de base y desfase superior O_{Base} y $O_{Superior}$ respectivamente. Cuyos valores se definen y justifican en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 - Justificación de desfase de base y desfase superior

Nombre	Símbolo	Valor	Justificación
Desfase de base	O _{Base}	300 mm	Es un décimo de la altura total y se define así para tener suficiente espacio para albergar toda la electrónica en el espacio definido entre la base y el desfase de base.
Desfase superior	O _{Superior}	600 mm	Es un quinto de la altura total y se define así, para que, en la posición máxima de las guías verticales, es decir, cuando el efector esté en la parte superior, aún se pueda ver la impresión, pues el espacio delimitado entre el techo y el desfase superior, estará tapado

Por lo tanto, se tiene la Figura 5.4, donde se muestra la ubicación de estos soportes adicionales para una mayor estabilidad y para poder albergar la electrónica. Como se puede observar, la parte baja estará cubierta en la parte superior y albergará la electrónica y los motores, mientras que la parte superior está cubierta de manera lateral y albergará los limit switches, poleas y guías de movimiento lineal.

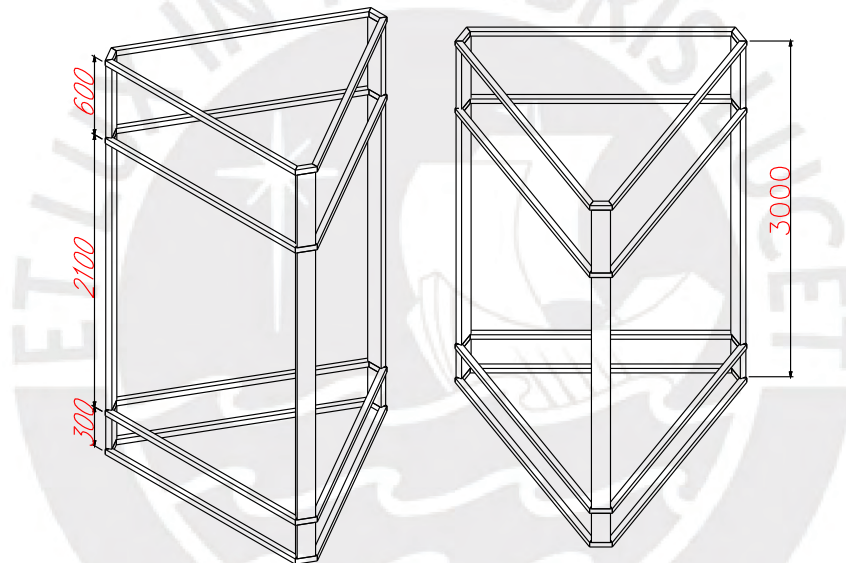


Figura 5.4 - Boceto del subsistema estructural con apoyos laterales
(Fuente: Elaboración Propia)

Finalmente, para poder tener una base de impresión estable, se deben colocar refuerzos que soporten la impresión en la base y que mantengan la estructura en la parte superior. Para ello se añadirán estos soportes y un soporte de base adicional como se puede apreciar en la Figura 5.5, para este soporte adicional se validarán sus dimensiones para que no falle por pandeo.

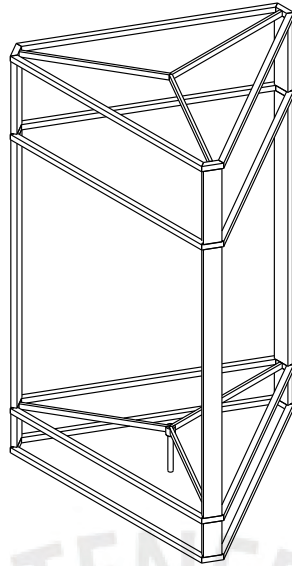


Figura 5.5 - Boceto completa de la estructura
(Fuente: Elaboración Propia)

Con esto, se tiene la forma de la estructura y sus dimensiones. A partir de ellas se realizarán cálculos y validaciones para determinar las dimensiones de los perfiles que conformarán el subsistema estructural. El cual, con finalidad de diseñar una estructura modular, se realizará con perfiles de aluminio V-Slot y T-Slot con acoples.

5.2. Cálculo de diámetros de la base de impresión

Como ha sido establecido en la Tabla 5.1. Se tiene el diámetro de máquina (D_M) y diámetro de impresión (D_I). Este último es útil para diseñar la longitud de brazos delta. Dado el área de impresión definida en la Figura 5.2. Se establecerá estos parámetros en base a dicha área definida. Para un mejor entendimiento, se tiene la Figura 5.6.

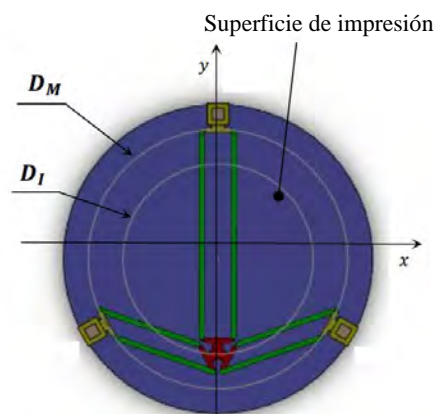


Figura 5.6 - Diámetros de la superficie de impresión
(Fuente López et al., 2022)

El **diámetro de máquina** se refiere al diámetro externo delimitado por las guías móviles el cual se establecerá sobre el bosquejo y diseño preliminar del sistema de impresión. Por otro lado, el **diámetro de impresión** delimita el máximo alcance que se dan desde los brazos delta. El área efectiva de impresión, que se muestra en la Figura 5.7 dada a partir de un diámetro de impresión de 1420 mm, es de 1.58 m², mayor a los 1.56 m² (1.25 m x 1.25 m dados en los requisitos). El diámetro de máquina se ha escogido a 240 mm de distancia del D_I, teniendo en cuenta el desfase de efector (O_E) de 180 mm y la holgura suficiente para tener perfiles de aluminio del grosor necesario de tal manera que se tenga una estructura estable.

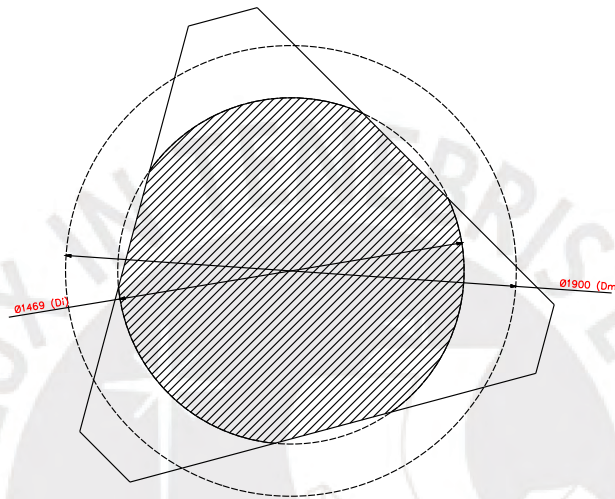


Figura 5.7 - Diámetros definidos de la superficie de impresión

5.3. Análisis de esfuerzos de la estructura

Para realizar un análisis de esfuerzo de la estructura, se tiene en cuenta dos cargas principales, la carga que ejerce el cabezal extrusor y el material de impresión sobre este y el material impreso de materiales de construcción cuyo peso es significativo para la estructura. Por lo tanto, se analizarán ambos casos y se obtendrán estos esfuerzos para realizar las validaciones en mediante la simulación estructural.

5.3.1. Cálculo de esfuerzos por el cabezal extrusor

El esfuerzo realizado por el cabezal extrusor y el material de construcción que viene por la manguera sobre este, es considerado en tres casos de posición de efector, para cuando el ángulo Alpha es mínimo, central y máximo. Mostrado a detalle en vistas superior y frontal en la Figura 5.8, en los apartados (a), (b) y (c) respectivamente.

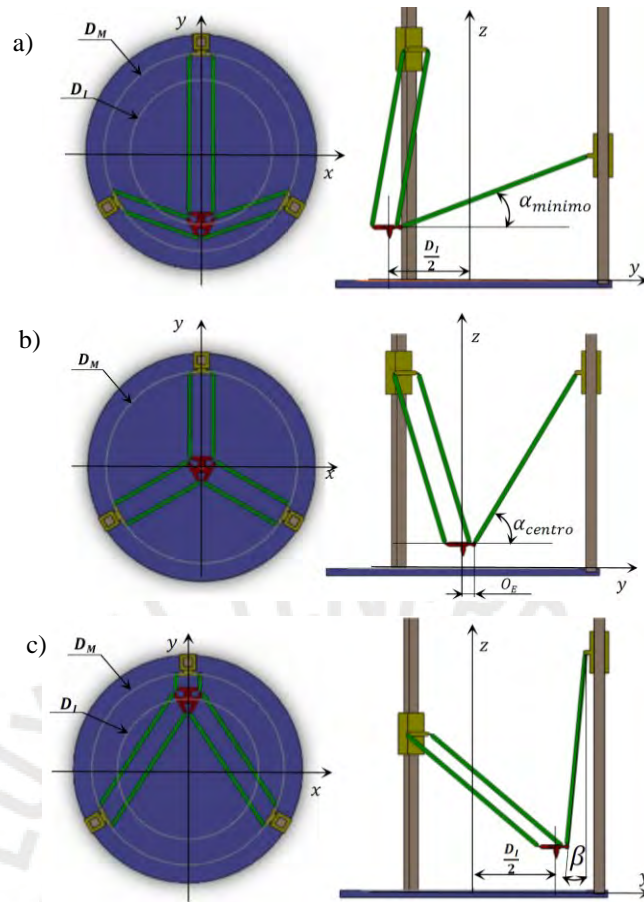


Figura 5.8 - Posiciones de efector para análisis de esfuerzos
(Fuente López et al., 2022)

Con estos tres casos, se extraen los valores X, Y, y Z para obtener los valores de las fuerzas que ejercen los brazos delta sobre la estructura y en dos casos clave, cuando el efector está en la posición más baja posible y cuando está en la posición más alta posible. Además, dichas posiciones se darán a partir del sistema de coordenadas mostrado en la Figura 5.9. Del mismo modo, este análisis se dará desde la fuerza del peso del cabezal extrusor F_{known} .

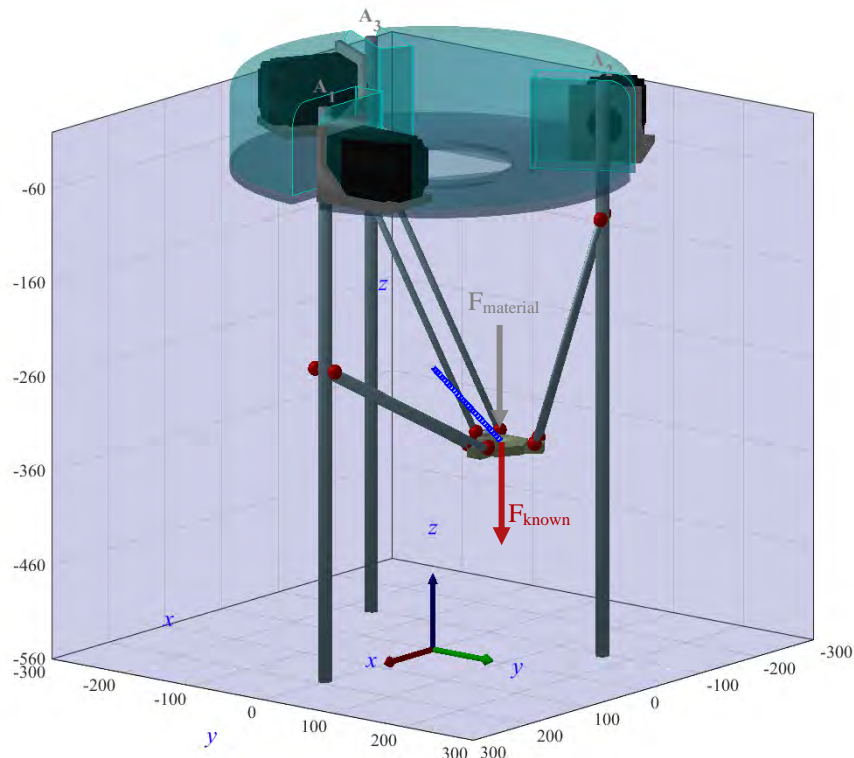


Figura 5.9 - Sistema de coordenadas Impresora Delta
(Fuente: Elaboración Propia)

Desde la lista de requerimientos, se tiene el valor de $F_{\text{known}} = 220.7 \text{ N}$ y la fuerza del peso del material y manguera, la cual va desde la parte superior se reparte en varios puntos de la estructura, así que se la considera vertical. Por lo tanto, se calculará este peso a partir de la densidad del cemento húmedo, el cual es el caso de mayor sollicitación. Se tiene, además, una manguera de 26 mm de diámetro y 1800 mm de longitud, por lo tanto, el cálculo de la masa del material es como sigue:

$$\rho_{\text{concrete}} = 2.6 \text{ g/cm}^3$$

$$V_{\text{material}} = 1800\text{mm} * \frac{\pi}{4} * (26\text{mm})^2$$

$$M_{\text{material}} = \rho_{\text{concrete}} * V_{\text{material}}$$

$$M_{\text{material}} = 2.5 \text{ Kg}$$

Con esto, se tiene una resultante final, de $F_{\text{material}} + F_{\text{known}} = 245.1 \text{ N}$. Del mismo modo, sin importar la posición en Z, las cargas dadas se mantendrán constantes, por lo tanto, se tienen los valores X e Y en la Tabla 5.3, calculados a partir del diámetro de impresión. Además, es importante tener en cuenta que se está teniendo en cuenta el caso más extremo para el cálculo.

Tabla 5.3 - Posiciones X e Y para cálculos de cargas de efector (Fuente: Elaboración Propia)

Caso	Posición X	Posición Y	Posición Z (Caso 1)	Posición Z (Caso 2)
$\alpha_{\text{mínimo}}$	-710 mm	0 mm	10 mm	1230 mm
α_{central}	0 mm	0 mm		

$\alpha_{\text{máximo}}$	710 mm	0 mm		
--------------------------	--------	------	--	--

Se tiene código en Matlab para el cálculo de las fuerzas de efectores, los cuales se observan con mucho más detalle en Figura 5.10. Para cualquier de las posiciones escogidas, se tiene el código que realiza el análisis de fuerzas, teniendo en cuenta la primera Ley de Newton para equilibrio de fuerzas y momentos.

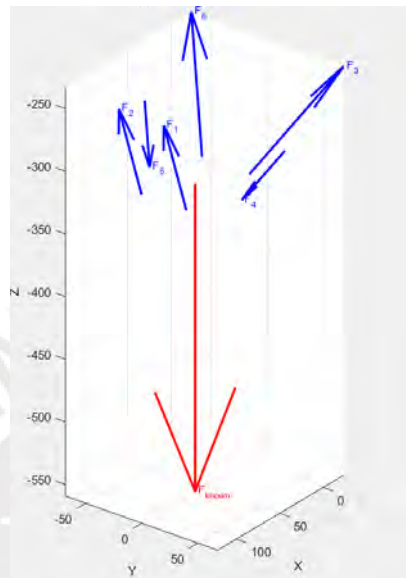


Figura 5.10 - Visualización 3D de vectores de fuerza
(Fuente: Elaboración Propia)

Estos valores para los tres casos, se detallan en la tabla Tabla 5.4, a partir del peso de cabezal de 22.5 kg, el cual implica una fuerza F_{known} de 220.7 N. Teniendo en cuenta que el signo positivo implica que la fuerza está en dirección al efector.

Tabla 5.4 - Magnitudes de las fuerzas ejercidas a la estructura (Fuente: Elaboración Propia)

Caso	F1	F2	F3	F4	F5	F6
$\alpha_{\text{mínimo}}$	-32.32	-32.32	-91.93	239.10	239.10	-91.93
α_{central}	47.64	47.64	47.64	47.64	47.64	47.64
$\alpha_{\text{máximo}}$	119.35	119.35	473.96	-467.43	-467.43	473.96

Del mismo modo se tiene los componentes de estas fuerzas en la Figura 5.5 para cada caso. Estos componentes se definen siguiendo el sistema de ejes coordenados de la Figura 5.9.

Tabla 5.5 - Componentes cartesianos de las fuerzas actuantes sobre la estructura (Fuente: Elaboración Propia)

Caso	Componente	F1	F2	F3	F4	F5	F6
$\alpha_{\text{mínimo}}$	X	31.88	31.88	19.92	-51.80	-51.80	19.92
	Y	0.00	0.00	40.87	-106.29	106.29	-40.87
	Z	5.26	5.25	79.90	-207.81	-207.81	79.90
α_{central}	X	-24.45	-24.45	12.22	12.22	12.22	12.22
	Y	0.00	0.00	-21.18	-21.18	21.18	21.18

	Z	-40.88	-40.88	-40.88	-40.88	-40.88	-40.88
$\sigma_{\text{máximo}}$	X	-4.77	-4.77	346.00	-341.22	-341.22	346.00
	Y	0.00	0.00	-210.70	207.80	-207.80	210.70
	Z	-119.26	-119.26	-246.04	242.64	242.64	-246.04

5.3.2. Esfuerzos por el peso de material

La naturaleza de las impresiones y los materiales de construcción como arcilla y concreto, no permitirán la impresión de estructuras con voladizos, como en las impresiones con PLA. El uso de materiales de soporte se ven descartado, por lo que se tiene mayormente impresiones de patrones estructurales huecos. Por lo tanto, dado el volumen de impresión efectivo de 1.9 m^3 . Se tiene una aproximación al caso más crítico de impresión, siguiendo la Figura 5.11. Se aproxima el caso de mayor sollicitación de pieza impresa, para un caso donde se ocupan los 1.9 m^3 de volumen efectivo de impresión, con lo que se aproxima a un cubo de 1240 mm de lado. Con esto se aproxima una pieza de 54 mm de espesor, igual a tres veces el espesor que sale del extrusor, el cual es 18 mm. Con esto se tiene un volumen de 0.32 m^3 .

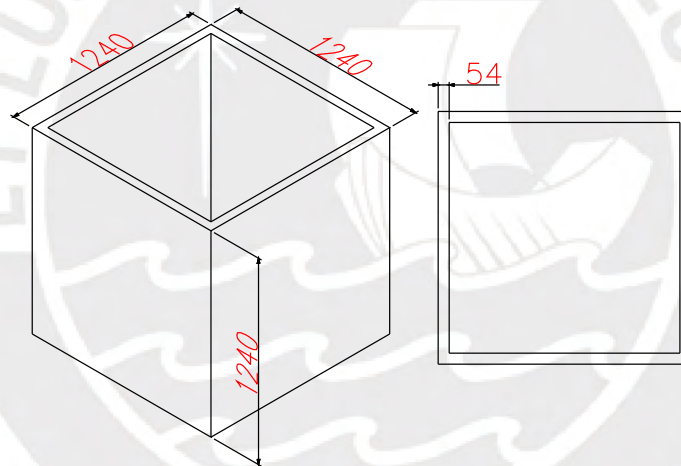


Figura 5.11 - Caso máximo de estructura impresa
(Fuente: Elaboración Propia)

Con esto, se debe realizar el cálculo de esfuerzo admisible y pandeo de la estructura cilíndrica que servirá de apoyo para sostener la pieza impresa, que ejerce una fuerza de 8100 N. Se escoge el tubo de acero, de 33.7 mm y 3 mm de espesor. Se debe validar si cumple con los requisitos de tracción y pandeo. Por lo tanto, se realizan los cálculos de esfuerzo a compresión, esbeltez y esfuerzo de pandeo según la teoría de Euler. Se tienen los parámetros de este perfil en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 - Parámetros del perfil cilíndrico estructural (Fuente: Elaboración Propia)

Nombre	Símbolo	Valor
Área	A	290 mm^2
Momento de Inercia	I	34420 mm^4
Carga sometida	$F_{\text{máx}}$	8100 N

Longitud	L	300 mm
----------	---	--------

$$\sigma_{sometido} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A}$$

$$\sigma_{sometido} = 28 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sometido} < \sigma_{adm}$$

$$\sigma_{sometido} = 28 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 235 \text{ MPa}$$

Se tiene un esfuerzo sometido mucho menor al esfuerzo admisible del acero de 235 MPa. Por otro lado, se tiene el cálculo por **pandeo**, se calcula la esbeltez del perfil.

$$\lambda = \frac{L}{\sqrt{I/A}}$$

$$\lambda = 27.5$$

Con esto y desde el método europeo donde, para el caso de esbeltez menor a 60, solo es necesario verificar que el esfuerzo sometido del perfil es menor al admisible, lo cual se acaba de confirmar.

5.4. Simulación estructural

Como se analizó en la sección anterior, se tienen tres casos de análisis, por lo tanto, se someterá la estructura una simulación mediante análisis de elementos finitos. Dado el boceto mostrado en la Figura 5.5. Se han realizado pruebas y distintas combinaciones entre perfiles extruidos de aluminio V-Slots y T-Slots para los elementos enumerados en la Figura 5.12, de los cuales se compone todo el subsistema estructural. En el Anexo D se tienen los casos de simulación detallados.

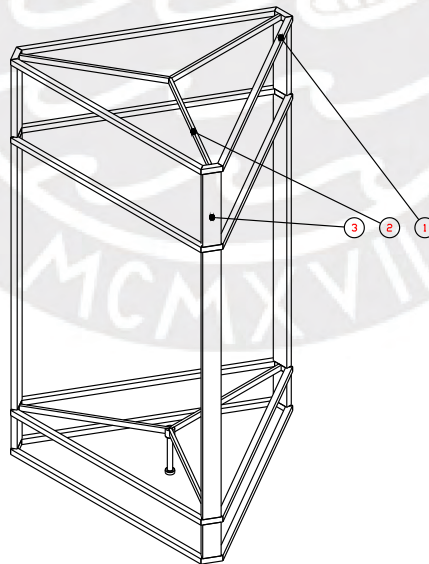


Figura 5.12 - Designación de perfiles de aluminio extruidos
(Fuente: Elaboración Propia)

Después de un análisis iterativo se tiene en la Tabla 5.7 el resumen de los perfiles extruidos a utilizar y parámetros importantes obtenidos desde la página oficial del proveedor Cnaluprofile.

Tabla 5.7 - Designación de perfiles extruidos para subsistema estructural (Fuente: Elaboración Propia)

Número designado	Perfil extruido	Momento de Inercia I _x	Momento de Inercia I _y	Densidad de masa
1	T-Slot 4040	7.32 cm ⁴	7.32 cm ⁴	1.296 Kg/m
2	V-Slot 2040	1.28 cm ⁴	4.84 cm ⁴	0.808 Kg/m
3	T-Slot 40120	25.52 cm ⁴	219.79 cm ⁴	4.297 Kg/m

Sin embargo, por motivos de simplificación de modelo, para las pruebas se han aproximado los perfiles de aluminio extruido a perfiles simples, teniendo en cuenta el momento de inercia I_x e I_y para calcular sus dimensiones y cuya justificación se tiene a continuación. La Figura 5.13 muestra las dimensiones generales de los perfiles originales y el modelo en cuestión.

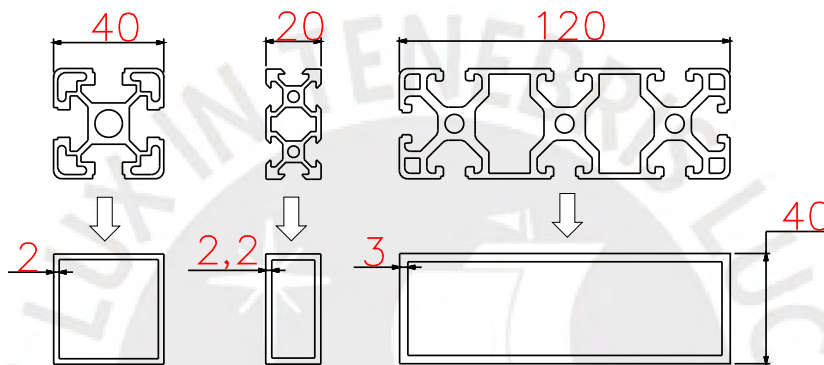


Figura 5.13 - Modelación de perfiles de aluminio para FEA (Fuente: Elaboración Propia)

Dada las dimensiones mostradas, los espesores para cada perfil ha sido escogido de tal manera que se asemeje con mayor fidelidad al momento de inercia de área de los perfiles originales, cuyos valores se muestran en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8 - Momentos de inercia de perfiles originales y modelos propuestos (Fuente: Elaboración Propia)

Número designado	Perfil extruido	Momento de Inercia I _x	Momento de Inercia I _x (Modelo)	Momento de Inercia I _y	Momento de Inercia I _y (Modelo)
1	T-Slot 4040	7.34 cm ⁴	7.33 cm ⁴	7.34 cm ⁴	7.33 cm ⁴
2	V-Slot 2040	1.82 cm ⁴	1.54 cm ⁴	4.84 cm ⁴	4.80 cm ⁴
3	T-Slot 40120	25.52 cm ⁴	24.66 cm ⁴	219.79 cm ⁴	196.23 cm ⁴

Teniendo en cuenta estas aproximaciones, se procede a analizar tres casos claves de máxima sollicitación, en todos ellos se considera máximo peso de impresión y se tienen los casos de la ubicación del ángulo Alpha analizados anteriormente. En base a este análisis para los tres casos explicados, se tiene la Figura 5.9Tabla 5.9, donde se tiene un resumen del análisis estructural y los valores críticos de esfuerzo equivalente, flexión y factor de seguridad.

Tabla 5.9 - Resumen de simulación (Fuente: Elaboración Propia)

Alpha	Máximo esfuerzo equivalente	Máxima deflexión	Mínimo factor de seguridad
Mínimo	119.8 MPa	2.489 mm	2.29
Central	119.9 MPa	2.490 mm	2.20
Máximo	119.7 MPa	2.491 mm	2.30

Cabe mencionar, que este proceso, ha sido iterativo, seleccionado los perfiles de aluminio y simulándolos en la estructura con diferente disposición hasta obtener los resultados mostrados en la tabla anterior. Finalmente, de este análisis, se valida la elección de perfiles extruidos para cada lugar de la estructura y a partir de esto, se diseñan los acoples estructurales que permitirán la unión de estos perfiles para formar la estructura.

5.5. Diseño de acoples estructurales

Mediante las pruebas realizadas se han validado las dimensiones de los perfiles extruidos de aluminio V-Slot y T-Slot. En esta sección se mostrará el proceso de diseño de los acoples que permitirán la unión de estos perfiles y con ello, el subsistema estructural en su totalidad. Como se puede observar en la Figura 5.14, se deben diseñar tres tipos de acoples y se denominarán acoples centrales (1), acople lateral (2) y acople lateral central (3), cuya explicación individual se dará a continuación. Finalmente se procede a realizar una validación mediante análisis de elementos finitos.

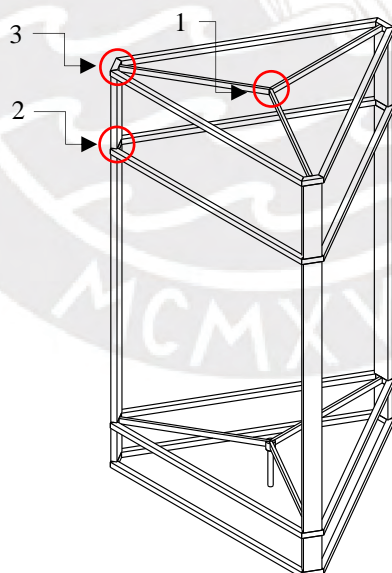


Figura 5.14 - Designación de acoples (Fuente: Elaboración Propia)

5.5.1. Diseño de acople central:

El acople central se da en las uniones de la base para soportar el peso del material impreso y cerrar la estructural en la parte superior. Une tres perfiles de aluminio V-Slot 2040. Esta unión tendrá un agujero central el cual debe ser mayor a 25 mm, el cual es el diámetro de la manguera que irá conectado desde

la parte superior de la estructura y debe ser mayor a 33.7 mm, el cual es el diámetro del tubo cilíndrico que estará ubicado en la base, en la Figura 5.9 se muestra el Sketch sobre el cual se diseña el acople central. El diámetro del círculo interno es de 40 mm y el exterior es diseñado de tal manera que los perfiles V-Slot 2040 entren con facilidad. Se está considerando una tolerancia de 0.3 mm para esto.

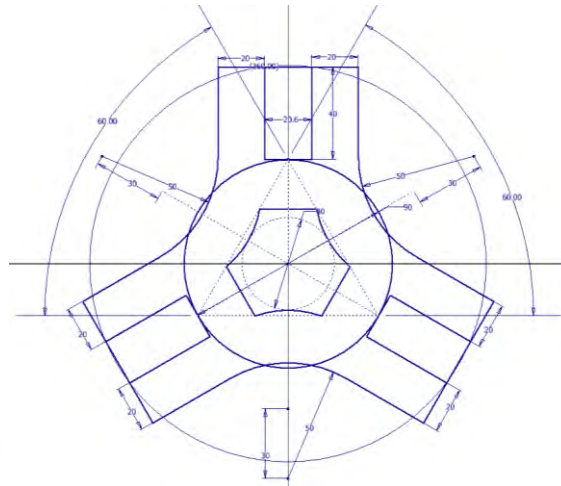


Figura 5.15 - Sketch principal del acople central
(Fuente: Elaboración Propia)

El Sketch se extruye 42 mm, para dejar 1 mm de holgura a cada lado del perfil de aluminio. Luego se agregan los redondeos y se colocan agujeros para las uniones atornilladas como se puede ver en la Figura 5.16. Los agujeros mostrados y encerrados en un círculo rojo son diseñados de esa manera por motivos del V-Slot 2040 permite dos ranuras de uniones atornilladas cuando es colocado en esa posición. En total, por lado se tienen cuatro uniones atornilladas de pernos M5 para asegurar el acople. Los agujeros se diseñan con tolerancias y teniendo en cuentas las dimensiones de los pernos M5 de tipo Socket de acero inoxidable.

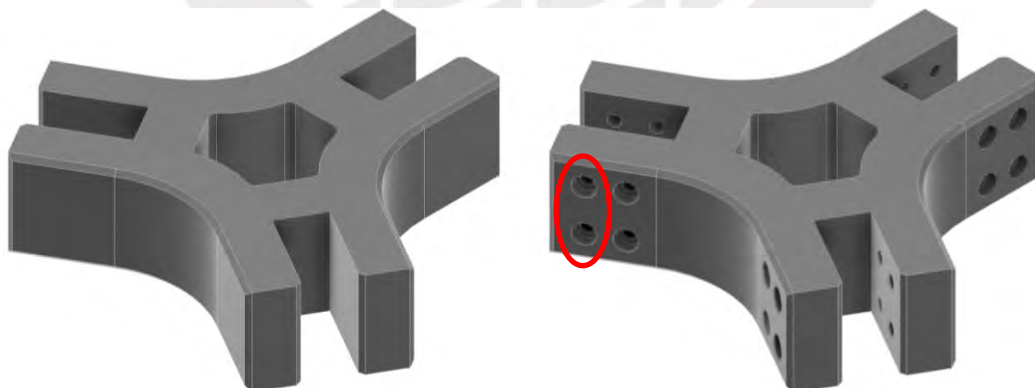


Figura 5.16 - Proceso de diseño de acople central
(Fuente: Elaboración Propia)

5.5.2. Diseño de acoples laterales:

El acople lateral es muy útil para la unión de la estructura en la base y brindar firmeza en la parte superior, donde se ubica a un quinto de toda la altura del techo de la estructura. Este acople debe permitir la unión entre el perfil T-Slot 40120 con dos perfiles T-Slot 4040. Se tiene el Sketch de este acople en la Figura 5.17. El diseño fue inspirado en los acoples para impresoras 3D Delta de escritorio. Se tiene en cuenta una tolerancia de 0.3 mm para la ubicación del perfil T-Slot 40120.

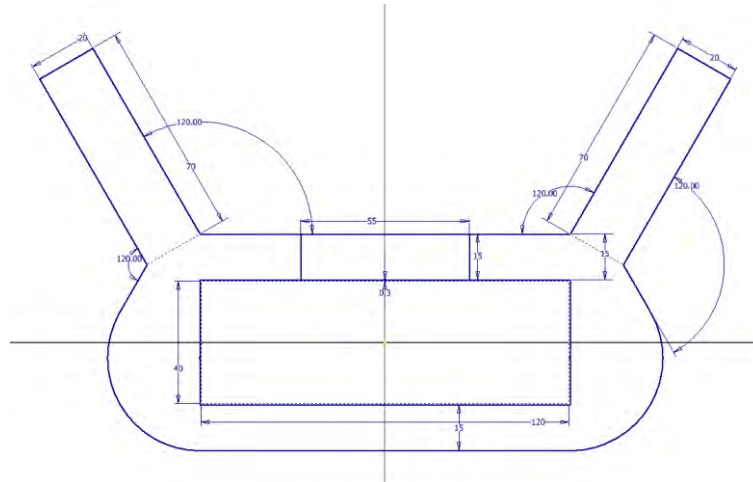


Figura 5.17 - Sketch principal del acople lateral
(Fuente: Elaboración Propia)

Del mismo modo que en el acople central, se extruye 42 mm, dejando 1 mm de holgura a cada lado. Los agujeros son colocados para seguir la geometría del T-Slot 40120 y los T-Slot 4040, los cuales serán asegurados con pernos M8 del tipo socket y de acero inoxidable. Esto se muestra en la Figura 5.18.

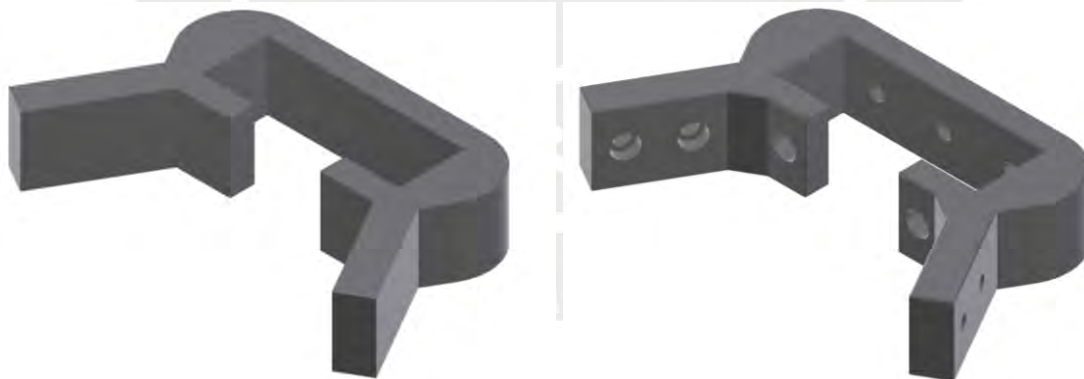


Figura 5.18 - Proceso de diseño de acople lateral
(Fuente: Elaboración Propia)

5.5.3. Diseño de acople lateral central

El acople lateral central es exactamente igual que el acople lateral, tiene una modificación para que en el centro se coloque un perfil extruido V-Slot 2040, el cual va al acople central y con esto tenemos el diseño de todos los acoples. En este diseño se utilizan los mismos criterios que en el diseño de los acoples anteriores. Se muestra el Sketch en la Figura 5.19, donde se puede apreciar la modificación

mencionada. La tolerancia es del mismo modo, 0.3 mm para que el perfil T-Slot 40120 pueda encajar en el acople sin complicaciones.

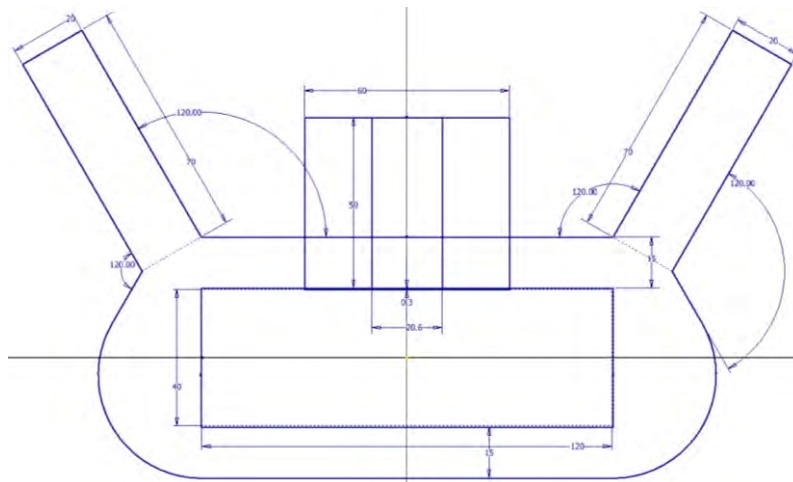


Figura 5.19 - Sketch principal, acople lateral central
(Fuente: Elaboración Propia)

Del mismo modo que analizado en los acoples anteriores, se siguen los mismos criterios para los agujeros y dimensiones de pernos, se puede apreciar el Sketch extruido en Figura 5.20 y la ubicación de los agujeros para pernos M8 y M5 del tipo socket de acero inoxidable.

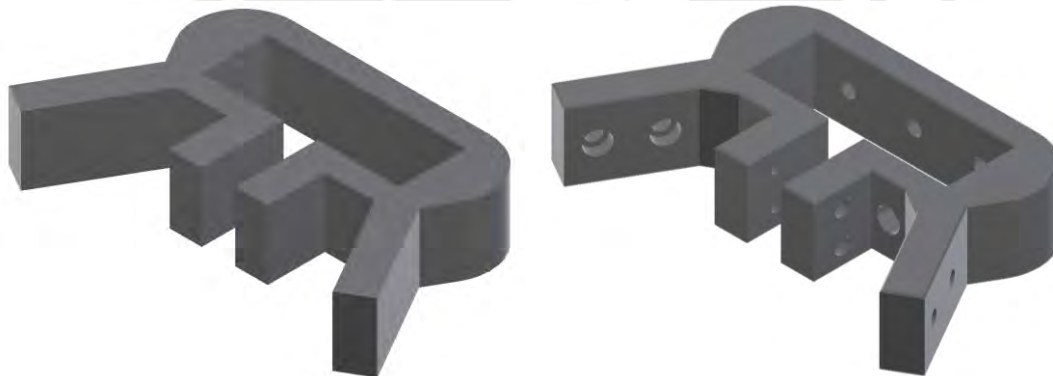


Figura 5.20 - Proceso de diseño de acople lateral
(Fuente: Elaboración Propia)

5.5.4. Selección de material de acoples:

Las dimensiones de grosor y cantidad de agujeros se validan mediante el análisis de métodos finitos. Mediante este proceso se validan las dimensiones escogidas en el diseño y la cantidad de uniones atornilladas. Se debe seleccionar el material de los de los acoples laterales y acoples laterales centrales y para ello se tiene la Tabla 5.10.

Tabla 5.10 - Materiales de los acoples estructurales (Fuente: Elaboración Propia)

Material	HDPE	Polycarbonato compacto	Aluminio 6061	ABS-M30
Precio (\$/kg)	9.4	24.1	12.6	9.4

Densidad(kg/m ³)	952	1200	2700	1020
Resistencia a la fluencia (Mpa)	21	65.5	300	30

El aluminio 6061 es el que tiene mayor resistencia a la fluencia y el Policarbonato compacto tiene también una muy buena resistencia a la fluencia, sin embargo, se descartan estas dos alternativas por su alto precio. Se escoge el HDPE, pues en comparación al ABS-M30, es más fácil de someter a un proceso de maquinado y ofrece mayor ligereza. Es importante tener en cuenta que el acople central, el cual está es el elemento de unión de los perfiles extruidos con mayor carga, será fabricado de acero, del mismo modo que el soporte cilíndrico analizado anteriormente.

5.5.5. Validación de acoples mediante simulaciones:

La validación del **acople central** y el **acople lateral central** se realiza a la vez, con los perfiles extruidos colocados, igual que las uniones atornilladas correspondientes. Se evalúa el caso de máxima sollicitación, cuando el acople central y los V-Slot 2040 sostienen la carga máxima de material impreso y cuando los brazos ejercen una fuerza en contra de la estructura de 500 N (mayor al valor máximo de 473N analizado). Mayor detalle, en el Anexo D. Finalmente, se presenta la Tabla 5.11, donde se tiene un resumen de los valores críticos de la validación mediante simulación. Se puede apreciar un factor de seguridad mayor a 2.0 en todos los casos y una deflexión máxima de 2.05 mm. Con esto se valida el diseño de acoples y el diseño del subsistema de soporte estructural en su totalidad. Se tienen a continuación el modelo 3D del subsistema y los planos mecánicos respectivos.

Tabla 5.11 - Resumen de análisis de elementos finitos de acoples (Fuente: Elaboración Propia)

Acople	Material	Máximo esfuerzo Von Mises (MPa)	Máxima deflexión (mm)	Mínimo factor de seguridad
Lateral central	HDPE	9.76	2.05	2.12
Central	Acero	57.10	0.05	3.63
Lateral	HDPE	4.70	0.60	4.40

5.6. Modelo 3D del subsistema de soporte estructural

Después de todo el análisis planteado, el modelo 3D del subsistema de soporte estructural se muestra a continuación la Figura 5.21, donde se puede observar una gran similitud al modelo utilizado para las validaciones estructurales, pues es en base a este que se diseñaron los acoples. El subsistema de soporte estructural por su parte es modular, pues se puede dividir en 3 vigas y cuatro estaciones, los cuales están colocados según su diseño.



Figura 5.21 - Modelo 3D del subsistema estructural
(Fuente: Elaboración Propia)

Del mismo modo, se muestra a mayores detalles los acoples diseñados, en la Figura 5.22 (a), se tiene el acople lateral, en (b) el acople lateral central y en (c) el acople central con pedestal.



Figura 5.22 - (a) acople lateral, (b) acople lateral central, (c) acople central
(Fuente: Elaboración Propia)

6. SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO LINEAL VERTICAL

El apartado describe la selección de guía lineal, correa y servomotor, además del diseño de acoples para el subsistema de movimiento vertical. Se determina un volumen de impresión y velocidad de desplazamiento máxima vertical. Se seleccionan guías lineales Hiwin por su compatibilidad con el diseño, y correas dentadas Optibelt para la transmisión de movimiento. Además, se elige el servomotor ClearPath por su potencia y facilidad de integración.

6.1. Volumen de impresión

El volumen de impresión efectivo debe ser mayor a 2.2 m^3 según los requerimientos de diseño. Se tiene al área de impresión actual mostrada en la Figura 4.5. Por lo tanto, para calcular el volumen de impresión actual, se debe calcular el desplazamiento vertical. En la figura se observa la equivalencia de este desplazamiento L_H .

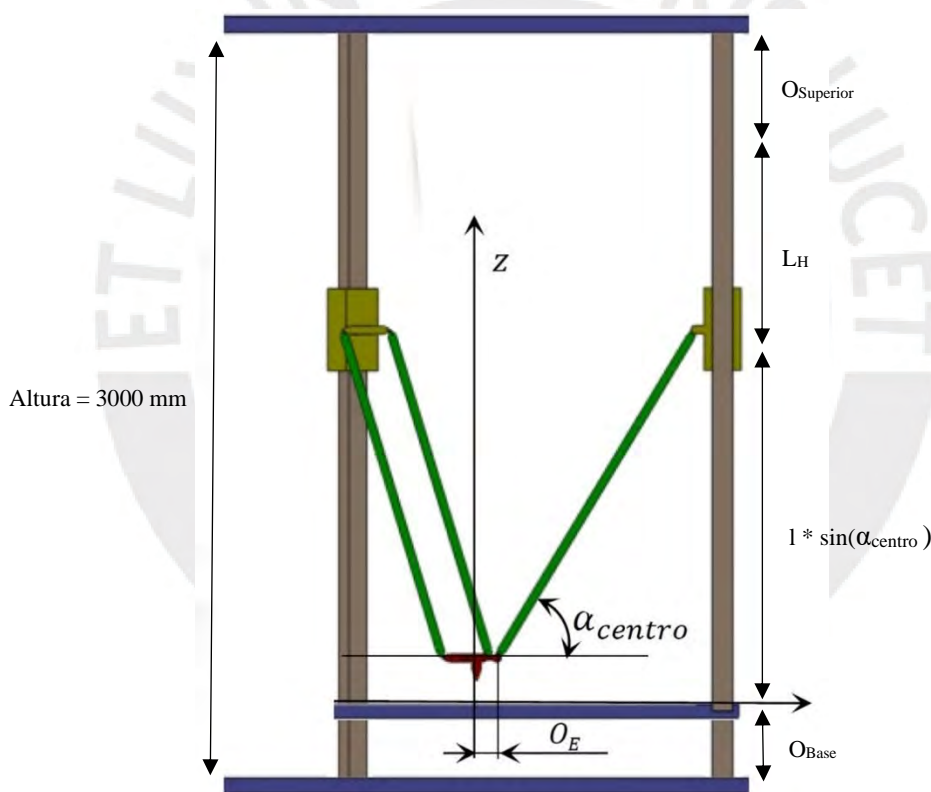


Figura 6.1 - Dimensiones para el cálculo de desplazamiento vertical L_H
(Fuente López et al., 2022)

$$L_H = \text{Altura} - O_{Superior} - l * \sin(\alpha_{centro}) - O_{Base}$$

$$L_H = 1220$$

Con este cálculo se tiene la longitud de desplazamiento vertical L_H el cual será la longitud de las guías lineales a seleccionar. Por otro lado, se tiene el cálculo del volumen de impresión actual, recordando de que el área de impresión es de 1.58 m^2 .

$$V_{\text{impresión}} = 1.58 \text{ m}^2 * 1.52 \text{ m}$$

$$V_{\text{impresión}} = 1.92 \text{ m}^3$$

6.2. Selección de guías lineales y cálculos de cargas

Se tiene un desfase de guías lineales de 82 mm, escogido en base a los diámetros de impresión y diámetros de máquina. Se redondeará a un desfase de guías lineales O_C de 90 mm. Además, es importante tener en cuenta el desplazamiento de guías lineales L_H de 1220 mm.

6.2.1. Cálculo de velocidad vertical

Dados los requerimientos de diseño, se tiene una velocidad de desplazamiento de 30 cm/s, por lo que el desplazamiento del efector a lo largo del plano XY horizontal, generará un movimiento vertical de las guías lineales. Por ello, es importante calcular este parámetro para la selección de guía lineal. A través de las relaciones trigonométricas de la cinemática inversa, es posible calcular la relación entre la velocidad del efector y la velocidad de la guía, según la nomenclatura de la Figura 6.2.

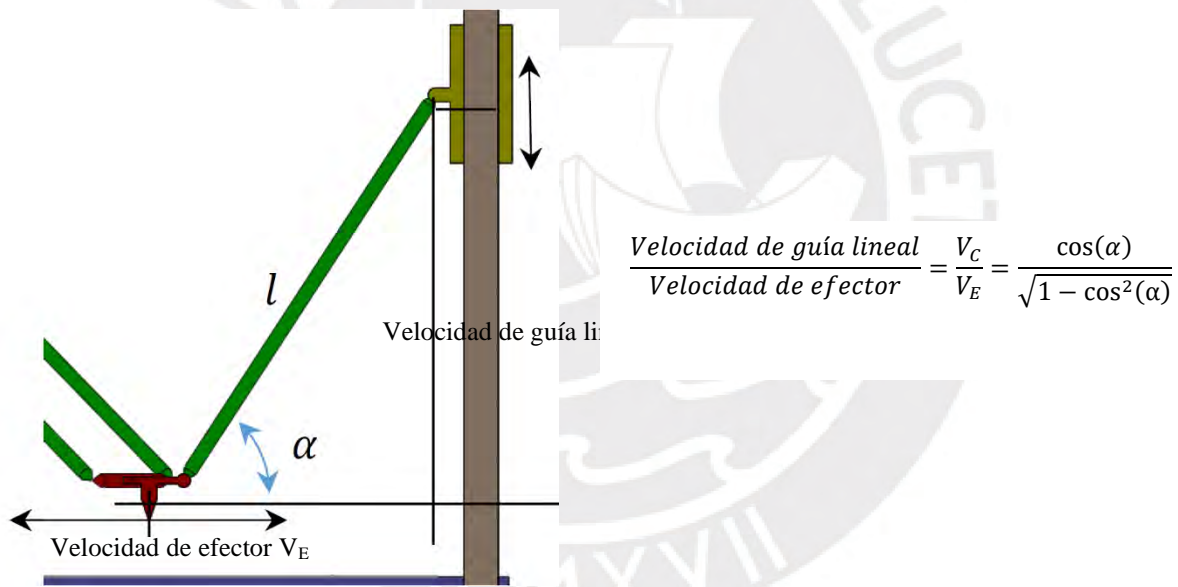
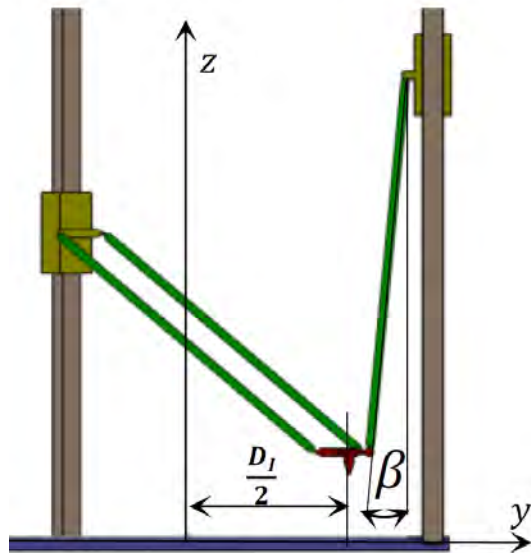


Figura 6.2 - Relación entre la velocidad del efector y guía lineal
(Fuente López et al., 2022)

Dado, el ángulo Alpha (α), se calcula su valor máximo y a partir de ello, se tiene un intervalo de valores del ángulo Alpha, seguiremos la Figura 6.3 para mayor referencia.



$$\alpha_{\text{máx}} = 90^\circ - \beta = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{D_M - D_I - O_E}{l}\right)$$

$$\alpha_{\text{máx}} = 87.7^\circ$$

$$12^\circ < \alpha < 87.7^\circ$$

Figura 6.3 - Cálculo de ángulo máximo (Fuente López et al., 2022)

Con esto, se tiene un rango de Alpha definido. La relación entre la velocidad de guía lineal V_C y velocidad de efector V_E , se le llamará factor de velocidad y su valor dependiendo del rango de Alpha, se muestra en la Figura 6.4.

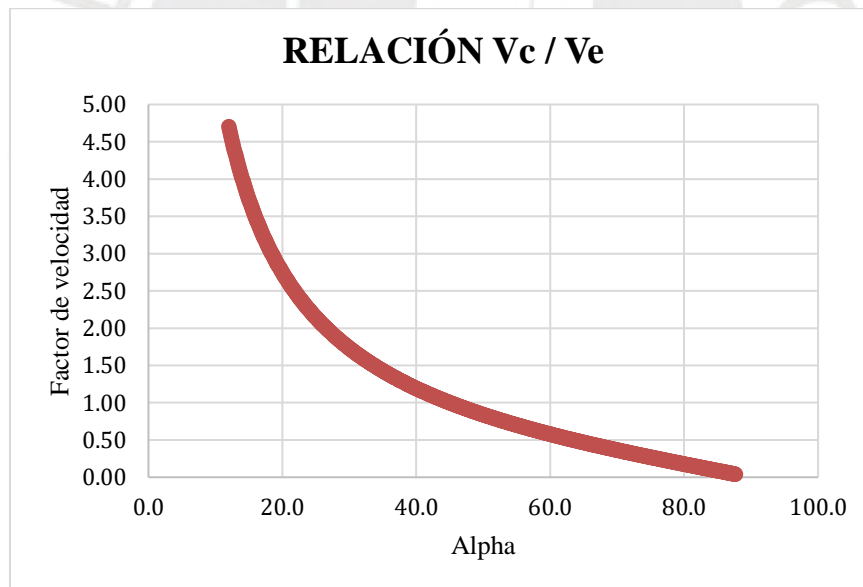


Figura 6.4 - Gráfico, relación de Factor de velocidad vs. Alpha (Fuente: Elaboración Propia)

Teniendo en cuenta este factor, se calcula inicialmente los rangos de impresión en los cuales la velocidad máxima de desplazamiento es constante, para ello se define el diámetro de desplazamiento D_D de 1020 mm, sobre el cual el efector se desplazará con velocidad constante, esto implica una longitud de aceleración y desaceleración l_{acc} de:

$$l_{acc} = \frac{D_I - D_D}{2}$$

$$l_{acc} = 200 \text{ mm}$$

Con esto, se calcula el tiempo de aceleración t_{acc} y la aceleración, con una velocidad máxima de efector V_E , se tienen los valores calculados desde la cinemática de movimiento rectilíneo uniforme variado.

$$t_{acc} = 1.3 \text{ s}$$

$$acc = 225 \text{ mm/s}^2$$

Finalmente, con el diámetro de desplazamiento, se calcula el ángulo Alpha, desde el cual debe empezar la desaceleración, desde un extremo de este diámetro, cuando el efector tiene una velocidad de 30 m/s, hasta cuando llega al extremo del diámetro de impresión, cuando el efector tiene una velocidad de 0 m/s. Como se mencionó, esto se realiza en un tramo de 200 mm. Este caso es también válido para la aceleración del efector.

$$\alpha_{Desplazamiento} = \frac{(D_M + D_D) - O_E}{l}$$

$$\alpha_{Desplazamiento} = 32.2^\circ$$

Con esto, se toma el caso máximo para el ángulo Alpha de 32.2° , con el cual se tiene un factor de multiplicación máximo y con ello velocidad máxima al cual las guías lineales se moverán. Además, para un ángulo Alpha de 59.4° (central), se tiene un factor de multiplicación promedio y cerca al centro del área de impresión.

$$Factor(\alpha = 32.2^\circ) = 1.6$$

$$Factor(\alpha = 59.4^\circ) = 0.6$$

$$V_C (\text{máx}) = 47.6 \text{ cm/s}$$

$$V_C (\text{average}) = 17.7 \text{ cm/s}$$

Se tomará la velocidad máxima y se redondea a 50 cm/s.

6.2.2. Selección de guía lineal

La guía lineal escogida mediante el análisis técnico – económico es una guía lineal del tipo bloque. Lo que permite el movimiento vertical de las guías que estarán acopladas a los brazos delta y permitirán mediante la cinemática inversa, que el efector se mueva en el espacio tridimensional de su volumen de impresión. Se utilizará la herramienta “sizing tool” de Hiwin, para escoger con precisión el modelo de guía lineal a utilizar para esta aplicación. Entre los modelos CGH20HA y CHW20HC, se escoge el modelo CGH20HA del tipo “high”, el que a diferencia del tipo “flange”, es necesario que el ancho del bloque de la guía sea el menor posible, por lo tanto, se escoge este modelo. Se tienen características y

mayor detalle de la selección en el Anexo E, donde se explican los parámetros de entrada para la herramienta de selección del sitio web de Hiwin. Finalmente, se tiene el reporte de selección detallado en el Anexo M.

6.3. Selección de correas y poleas

El mecanismo para la transmisión de movimiento rotacional del motor a movimiento vertical se da mediante correas como se escogió en el concepto de solución ganador. Para su selección se necesita calcular la potencia del motor, tener en cuenta condiciones de funcionamiento y la potencia necesaria para el movimiento.

Los cálculos de la máquina de trabajo se tienen a partir de las fuerzas que actúan en las guías lineales en dirección vertical y la velocidad máxima de movimiento. Como se calculó anteriormente, la velocidad máxima de movimiento vertical es de 500 mm/s. Además, desde el análisis de esfuerzos de la estructura, se tiene en la Tabla 5.5 los componentes verticales de las fuerzas y de ello se calcula la resultante máxima de fuerza vertical ejercida en las guías F_z . Esta fuerza máxima denominada " F_T " en la Figura 6.5, se puede apreciar junto al par de fuerzas, que este mismo genera, denominado T_c , por otro lado, la velocidad vertical, denominada V_z , es también mostrada.

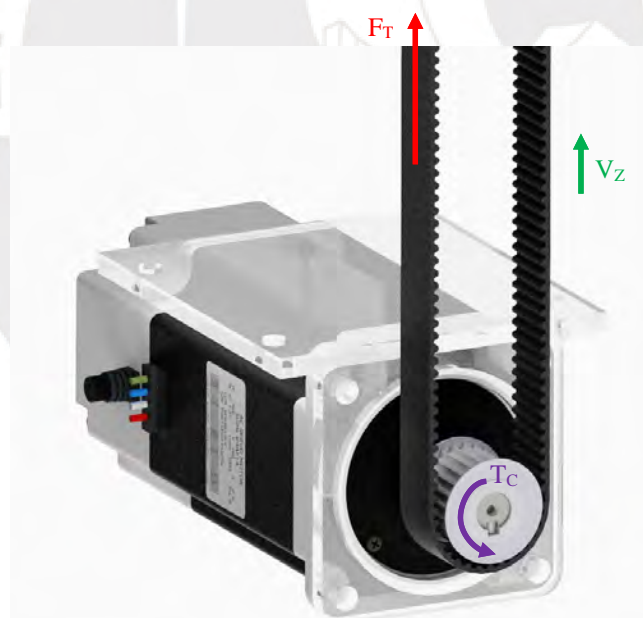


Figura 6.5 - Tensión, torque y velocidad lineal en la correa
(Fuente: Elaboración Propia)

El cálculo de F_T , se realiza teniendo en cuenta la aceleración máxima a la que las guías lineales estarán sometidas, para ello se utiliza la segunda ley de Newton. El diagrama de fuerzas, donde el cuerpo en movimiento es el acople de guía lineal de aproximadamente 2kg y el bloque hiwin de modelo seleccionado CGH20HA, de 330g. Se tiene el diagrama de fuerzas en la Figura 6.6, al realizar el cálculo, la diferencia entre F_T y F_z despreciable, por lo tanto, se trabaja con F_T igual F_z .

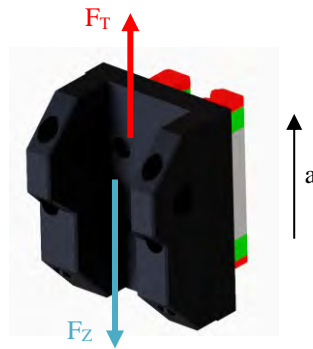


Figura 6.6 - Diagrama de fuerzas, guía y acople
(Fuente: Elaboración Propia)

$$F_T = 250 \text{ N}$$

Teniendo esto en consideración, solo es necesario obtener el diámetro de las poleas mediante las cuales se tendrá la transmisión de potencia. En base a la dimensión de 55 mm de la Figura 5.17, se obtiene la restricción a la que el diámetro de la polea debe estar sujeta. Siguiendo el estándar de poleas dentadas de Optibelt, se selecciona una polea de alrededor 25 mm de diámetro de manera provisional para estimar las revoluciones por minuto. Se tienen a continuación las ecuaciones en base al diámetro inicial, torque y potencia.

$$N_{r.p.m.} = \frac{V_Z * 60}{\pi * d_p}$$

$$N_{r.p.m.} = 380 \text{ r.p.m.}$$

$$\omega = \frac{V_Z}{\frac{d_p}{2}}$$

$$\omega = 40 \text{ rad/s}$$

$$T_C = F * \frac{d_p}{2}$$

$$T_C = 3.13 \text{ N.m.}$$

$$\text{Potencia} = T_C * \omega = F * V_Z = 125 \text{ W}$$

En base a los cálculos geométricos y requerimientos de funcionamiento de la impresora 3D Colibri del Fabcore, se detalla el Anexo F, donde se tienen las condiciones de funcionamiento del sistema de impresión para la selección de correa a utilizar.


Resultados:

- 5 correas dentadas Optibelt OMEGA HP denominación **1062 3M HP 24**
- 2 poleas síncronas Optibelt ZRS denominación **15 3M 24**

6.4. Selección del servomotor

Para la selección del servomotor del sistema de alimentación nos basaremos en primera instancia en la selección del modelo de servomotor, el cual tiene como propósito transmitir potencia a través de la correa seleccionada y accionar el movimiento de las guías verticales, las cuales, mediante la cinemática inversa, se traduce en movimiento y velocidad controlada del efector. Se debe superar una potencia de 125 W. En la Tabla 6.1, se visualiza una lista de modelos de servomotores DC y AC.

Tabla 6.1 - Selección de tipo de servomotor (Fuente: Elaboración Propia)

Características	Requerimientos mínimos	Servomotor DC		
		ACL Series Low-Voltage	SGM7P, Medium Inertia	Clearpath Servomotors
				
Potencia máxima	125 W	100 W – 400 W	100 W – 1500 W	267 W
Alimentación	-	220 VAC	100 – 200 VDC	24VDC - 75 VDC
R.P.M.	380 r.p.m.	4500 r.p.m.	6000 r.p.m.	1420 r.p.m.
Marca	-	ADTECH	Yaskawa	Clearpath
Accesibilidad	-	China	China	U.S.A.
Precio	-	\$ 150	\$ 600	\$ 432

Todas las opciones propuestas cumplen con los requerimientos mínimos necesarios. Sin embargo, se tiene una reciente crecida en popularidad de los motores Clearpath dada su facilidad de implementar con controladores existentes para impresoras con aplicaciones a motores a paso. Además, la documentación y aplicaciones están disponibles en inglés y ya han sido probadas en aplicaciones con impresoras 3D cartesianas. Es por ello que se escoge el modelo de impresoras Clearpath, entre ellas se tienen tres series cuya comparación se muestra en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 - Modelos de servomotor Clearpath (Fuente: Elaboración Propia)

Serie:	SD	MC	SC
Tipo de control	Control con Step & Direction	Control con Digital I/O	Control con Software API
Característica principal	Encoder, servomotor y driver en un solo producto	Encoder, servomotor, driver y controlador en un solo producto	Encoder, servomotor, driver y controlador altamente flexible en un solo producto
Protocolo de comunicación	Step & direction, quadrature A/B	Entradas digitales	Step & direction, quadrature A/B, RS-232

Aplicaciones	controlador CNC con salidas de paso y dirección (o cuadratura A/B)	Aplicaciones de control con interruptores simples, sensores o dispositivos programables como microcontroladores o PLCs	Control mediante software, interconectado a más módulos y control de múltiples ejes.
Precio inicial	\$ 257	\$ 254	\$ 299

Se escoge el modelo SD debido a su versatilidad de integración con cualquier controlador comercial de impresión 3D dado su protocolo de comunicación. Se toma la señal de Step & Direction desde el controlador y se alimenta al ClearPath. Por otro lado, el modelo MC, que opera con entradas digitales, no sería apropiado para una impresora 3D donde se requiere un control específico que las señales digitales podrían no proporcionar eficientemente. Además, el modelo SC, diseñado para control a través de una API de software y que requiere una programación más compleja, es generalmente más adecuado para aplicaciones de gran escala que buscan una personalización y control exhaustivo.

En base a esto, se considera al torque de 3.13 N.m como valor de torque mínimo para realizar el cálculo, además se trabajará con la potencia mínima de 125 W, para la selección del servomotor ClearPath SD con entrada de voltaje DC. Durante la selección se tiene los modelos SDSK y SDHP, los cuales significan “Steper Killer” y “High Power” respectivamente. Se escogen los modelos SDSK, pues los valores de torque y potencia caen en esta categoría y los precios son más accesibles. Por lo tanto, se selecciona el siguiente motor mostrado en la Figura 6.7.



Figura 6.7 - Servomotor Clearpath CPM-SDSK-3441S-RLN
(Fuente: Teknic)

Características:

- Marca: ClearPath
- Modelo: CPM-SDSK-3441S-RLN
- Alimentación: 48VDC y 2.8A
- Torque máximo: 9.6 N.m.

- Torque RMS: 3.4 N.m.
- Máximo r.p.m.: 540
- Potencia máxima: 148 W
- Potencia RMS: 136 W

6.5. Diseño de acople de guía lineal

El diseño del acople de guía lineal se divide en tres partes, la base acoplada a la guía como se muestra en Figura 6.8 (a) y los dos acoples auxiliares restantes que se colocarán mediante uniones atornilladas, y se diseñan los agujeros necesarios para lograr esta unión en (b).

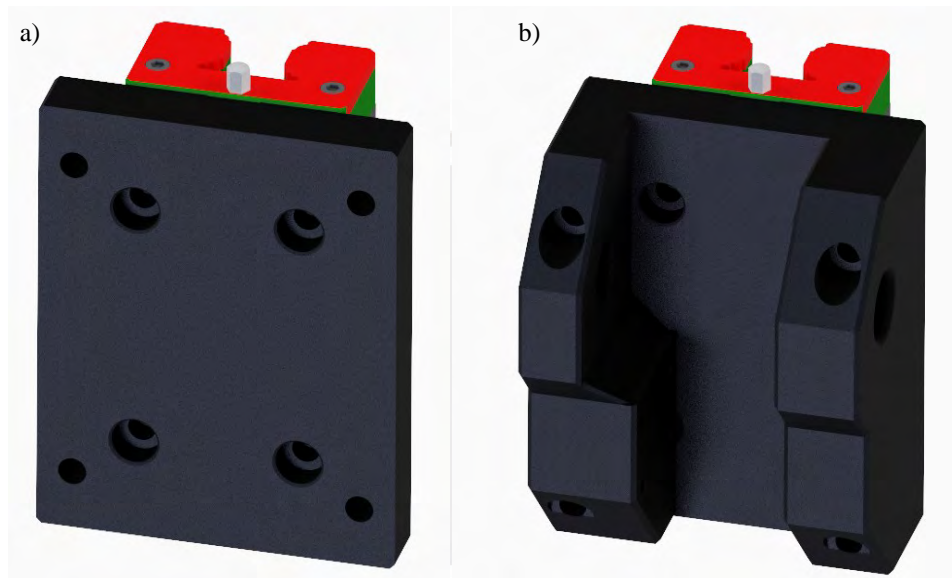


Figura 6.8 – (a) Base de acople a guía lineal, (b) Estructura de acople completa
(Fuente: Elaboración Propia)

Se proceden a colocar los acoples PSH, acoples esféricos y la placa de sujeción de correa. Es importante tener en cuenta que las dimensiones de estos componentes son basadas en el diámetro de los brazos delta, cuyo cálculo se realiza en la siguiente sección. Sin embargo, es importante para este diseño, por lo que este diámetro se tiene de antemano y es 12 mm. Finalmente, las dimensiones de grosor mostrados en Figura 6.9 se escogen de la siguiente manera, Th_1 es igual a 13 mm dado al acople PHS comercial encontrado. Th_2 se calcula con un simple cálculo teniendo en cuenta la base de 70 mm de la base del acople, el diámetro de la polea y el ancho de la correa, de tal manera que se asegure que la correa estará correctamente ajustada.

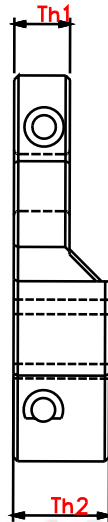


Figura 6.9 - Parámetros de diseño para el acople de guía vertical
(Fuente: Elaboración Propia)

Se tiene para la correa perfil 3M HP las dimensiones mostradas en la Figura 6.10

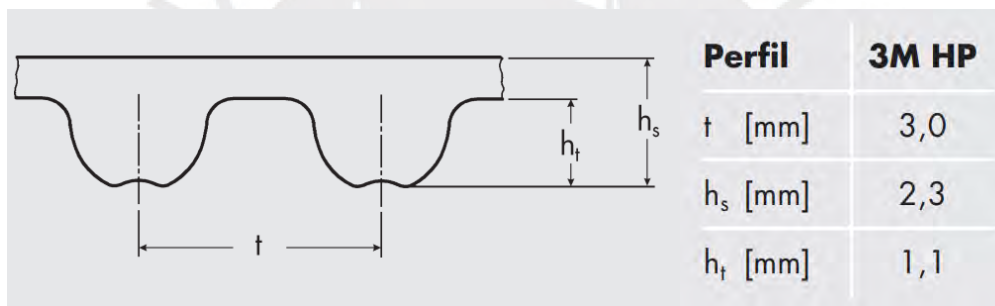


Figura 6.10 - Parámetros del perfil de correa 3M HP
(Fuente: Manual Optibelt)

$$Th_2 = \frac{\text{Ancho}}{2} - \left(\frac{D_{\text{polea}}}{2} + (h_s - h_t) \right)$$

$$Th_2 = 22.34 \text{ mm}$$

En la Figura 6.11 los acoples esféricos, acople PHS y placa de sujeción en la (a), las uniones atornilladas en (b) y una vista por la parte trasera del acople completo en (c).

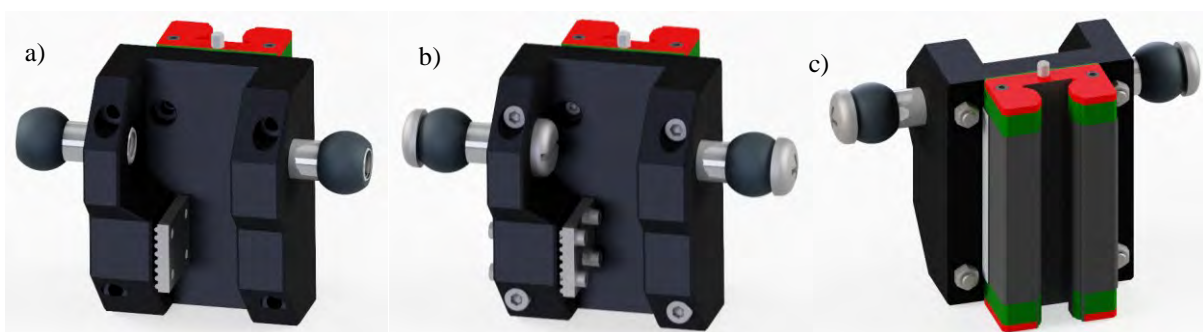


Figura 6.11 - (a) Acople con elementos añadidos (b) Acople completo por delante (c) acople completo por atrás
(Fuente: Elaboración Propia)

6.5.1. Validación de acople de guía lineal

Se analiza el caso extremo de fuerzas de la Tabla 5.5, donde se tiene la ubicación de fuerzas en la Figura 6.12 (a), se tiene el análisis de esfuerzo equivalente Von Mises en (b), el análisis de deflexión en (c) y el análisis de factor de seguridad en (d), cada uno de estos casos acompañado con el valor extremo para cada uno. Es importante tener en cuenta que el material de este acople será en HDPE de alta densidad por las mismas razones por las cuales los acoples laterales serán fabricados de este material.

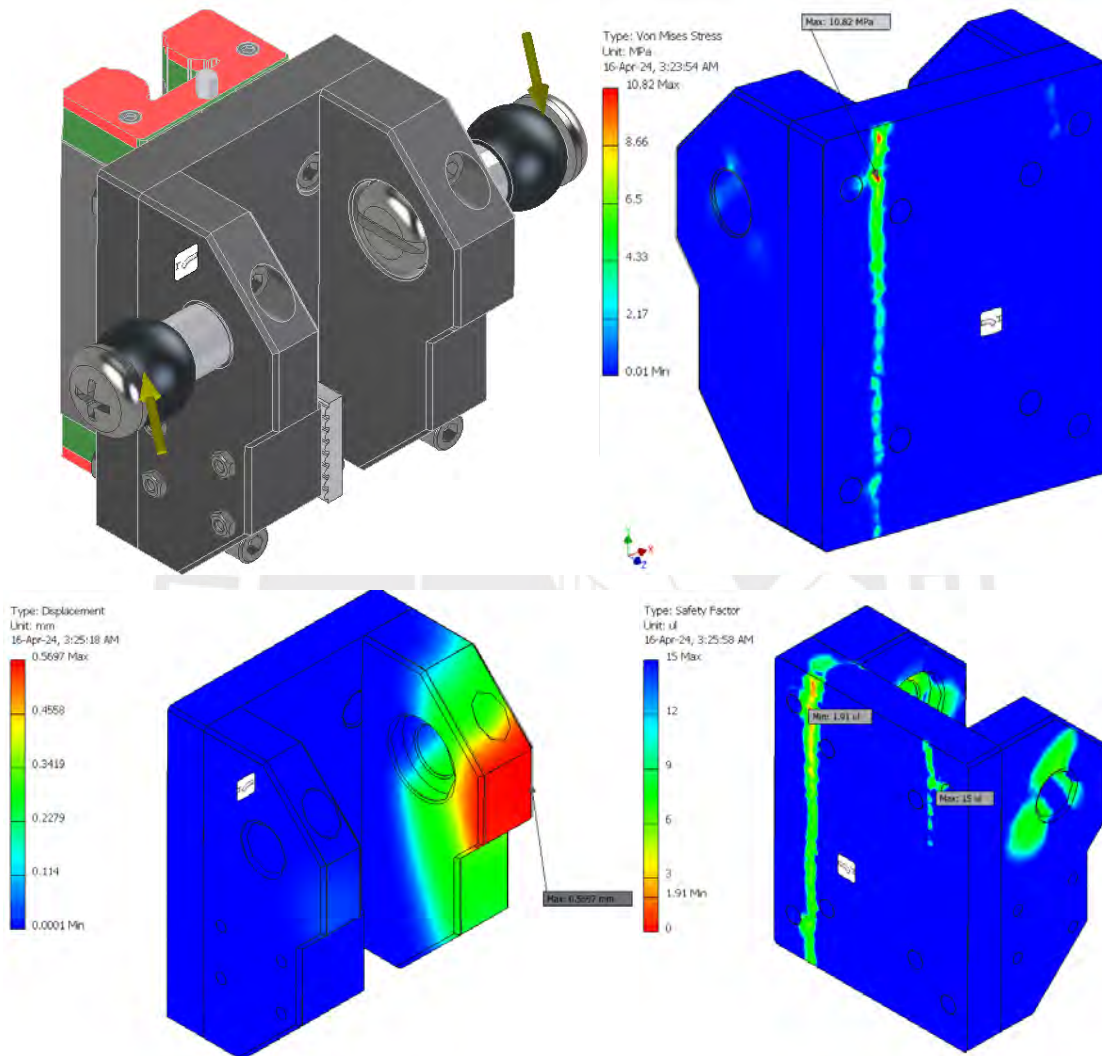


Figura 6.12 - (a) Ubicación de fuerzas, (b) Von Mises, (c) Deflexión, (c) Factor de seguridad, acople de guía lineal (Fuente: Elaboración Propia)

Con este análisis, se tiene un factor de seguridad mínimo mayor a 1.9 y una deflexión máxima menor a 0,6 mm, con esto queda validado el acople de guía vertical, sometido al caso extremo de sollicitación.

6.6. Modelo 3D del subsistema de movimiento vertical

El subsistema de movimiento vertical se constituye de los rieles y guía Hiwin, del acople, correa, poleas y servomotores seleccionados. Se muestran la configuración de guías lineales y acople en la Figura 6.13



Figura 6.13 - Guía lineal y acople del subsistema de movimiento lineal
(Fuente: Elaboración Propia)

Del mismo modo, se muestran las poleas superior e inferior, junto al servomotor Clearpath. En la Figura 6.14 se muestra a mayor detalle.



Figura 6.14 - Poleas y servomotor del subsistema de movimiento vertical
(Fuente: Elaboración Propia)

7. SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO DE EFECTOR

Se describe el diseño del subsistema de movimiento del efector del sistema de impresión Delta, enfocándose en la longitud y el diámetro de los brazos unidos al efector. La longitud de los brazos se calcula en base a los requerimientos de volumen de sistema y de impresión. Para el diámetro de los brazos, además, se considera el esfuerzo por tracción y pandeo, eligiéndose una varilla roscada M12 por disponibilidad comercial. También se diseña el efector, componente clave que soportará el extrusor y unirá los brazos delta. Se selecciona fibra de carbono reforzada como material debido a su resistencia y ligereza. El diseño es validado mediante análisis de elementos finitos, asegurando que el efector y los brazos delta soporten las cargas sometidas.

7.1. Cálculo de dimensiones de brazos delta

En el diseño y desarrollo de los brazos delta, es crucial calcular con precisión sus dimensiones para garantizar un rendimiento óptimo y una durabilidad adecuada. En este subcapítulo, se da el cálculo de dimensiones de brazos delta, abordando dos aspectos fundamentales: la determinación de la longitud de los brazos a través de consideraciones geométricas y requisitos específicos de área y volumen de impresión, y el análisis del diámetro de los brazos delta, que se deriva del estudio del esfuerzo máximo de tracción y pandeo bajo las cargas esperadas sobre el efector.

7.1.1. Longitud de brazos Delta

Para el cálculo de los brazos delta, se utilizan los parámetros α_{centro} y $\alpha_{\text{mínimo}}$. Los ángulos que se generan entre los brazos delta y plano horizontal XY. Ambos parámetros están relacionados entre sí y dependen de la longitud de brazos delta l , diámetro de máquina D_M , diámetro de impresión D_I y desfase de efector O_E . En la figura Figura 7.1 (a) se muestra la configuración de los brazos delta, cuando el efector se encuentra en el centro para formar α_{centro} y en la Figura 7.1 se muestra el posicionamiento límite del efector respecto a las guías lineales para formar $\alpha_{\text{mínimo}}$.

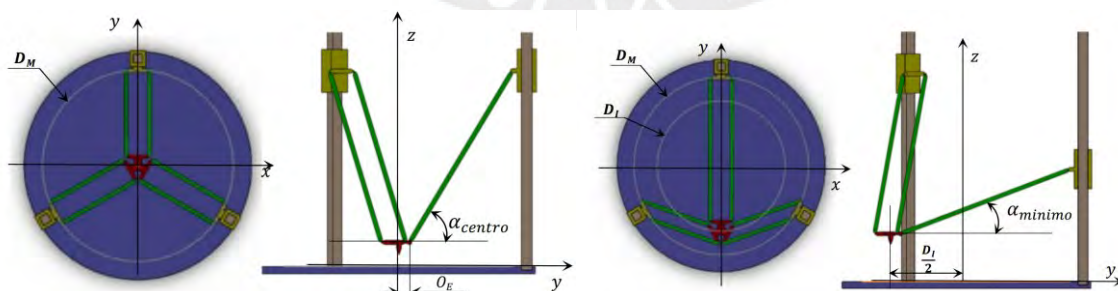


Figura 7.1 - (a) ángulo centro y (b) ángulo mínimo
(Fuente: López et al., 2022)

$$\cos(\alpha_{\text{mínimo}}) = \frac{\frac{D_M + D_I}{2} - O_E}{l}$$

$$\cos(\alpha_{\text{centro}}) = \frac{\frac{D_M}{2} - O_E}{l}$$

Dada la primera relación, a partir de $\alpha_{\text{mínimo}}$ se procederá a calcular la longitud de los brazos delta. Luego, se calculará α_{centro} . Los valores más comunes y recomendados para $\alpha_{\text{mínimo}}$ es de 12° , según RepRap en geometría Delta (reprap community, 2019) y (López et al., 2022). Con ello se obtiene la longitud de brazo delta.

$$l = 1513.1 \text{ mm}$$

Por motivos de compra y corte, se redondea a $l = 1500 \text{ mm}$. Del mismo modo, se calcula α_{centro} y con esto tenemos los parámetros necesarios para definir la longitud de los brazos delta.

$$\alpha_{\text{centro}} = 59.4 \text{ mm}$$

7.1.2. Diámetro de brazos Delta

Para el cálculo del diámetro de brazos delta se consideran dos aspectos, el esfuerzo admisible del acero y su esbeltez al estar sometido a pandeo. Como se ha analizado en la Tabla 5.3 la sollicitación máxima de los brazos delta ocurre en el caso de $\alpha_{\text{máximo}}$. Cuando el efector está lo más cerca a la viga vertical donde se encuentra las guías. Para la carga a la que el efector está sometido, se tienen los casos de 474N a tracción y 467N a compresión. Por efectos de estudio, se analizará pandeo y tracción para una fuerza de 500N. Por **tracción**, el esfuerzo admisible del acero según la norma ASTM A36, es de 235 MPa. Según (Cynthia J. Duncan et al., 2005) el factor de seguridad para los elementos estructurales de conexión es de 1.5, según lo establecido en la especificación AISC (p. 268):

$$\sigma_F \geq FS * \frac{F_{\text{máx}}}{\frac{\pi * d^2}{4}}$$

$$d \geq \sqrt{\frac{4 * F_{\text{máx}}}{\pi * \frac{\sigma_F}{FS}}}$$

$$d \geq 2.02 \text{ mm}$$

Por **pandeo**, se calcula la esbeltez a partir de ello el esfuerzo de pandeo según el análisis de Euler, con un factor de seguridad de 1.5. Por otro lado, se calculará el esfuerzo a compresión y como primera aproximación, se intersecarán estas dos relaciones que dependen del diámetro. Se tiene en la Figura 7.2 el diagrama de esfuerzo vs esbeltez según el método europeo. Por lo tanto, si al hacer el cálculo, obtenemos una esbeltez mayor a 100, significa que nos encontramos en la región 3 y no es necesario realizar mayor análisis.

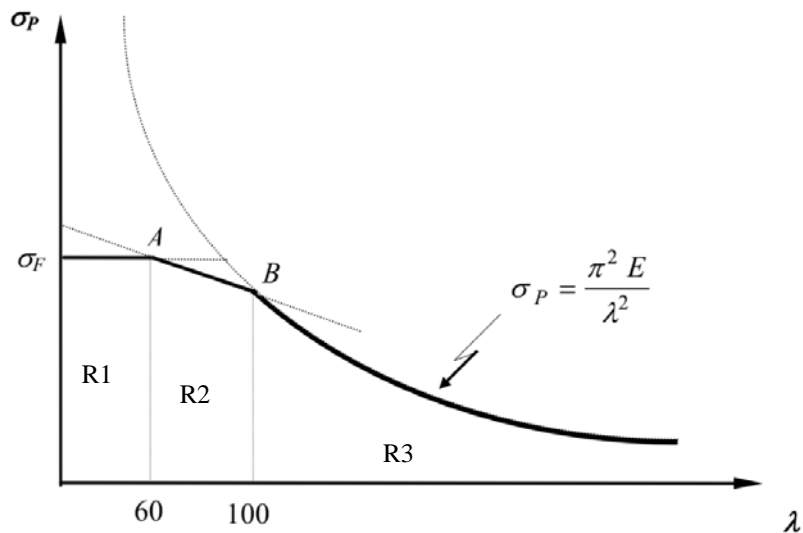


Figura 7.2 - Gráfico esfuerzo vs. esbeltez, según el método europeo
(Fuente: Sección Ingeniería Mecánica – Área diseño PUCP)

Se tienen las ecuaciones de esbeltez, esfuerzo de pandeo con factor de seguridad y esfuerzo de compresión:

$$\lambda = \frac{l}{\sqrt{I/A}} = \frac{l}{\sqrt{\frac{\pi * d^4}{64}} / \sqrt{\pi * \frac{d^2}{4}}} = \frac{4 * l}{d}$$

Por lo tanto, el esfuerzo de pandeo, según la teoría de Euler y con factor de seguridad 1.5 y módulo de elasticidad de 190 GPa según la norma ASTM, se tiene a continuación:

$$\sigma_P = \frac{d^2 * \pi^2 * E}{FS * 16 * l^2}$$

Del mismo modo, el esfuerzo por tracción al cual están sometidos los brazos delta se calcula a continuación:

$$\sigma_P = \frac{F_{m\acute{a}x}}{\pi * (\frac{d^2}{4})}$$

Combinando estas dos ecuaciones, tenemos el valor final del diámetro de los brazos delta.

$$d = 11.64 \text{ mm}$$

$$\lambda = 515.6$$

Por motivos de redondeo y disponibilidad comercial, se escogerá una varilla roscada M12, se observa una esbeltez mayor a 100, por lo que el análisis es el correcto.

7.2. Diseño de efector y cálculo de cargas

Para el diseño de efector y en base a un diseño preliminar, se tendrá un desfase de efector de (O_E) 180 mm, el cual será el radio principal sobre el cual se diseñará el efector, el cual será un disco de radio 180 mm, de espesor a designar según el cálculo de cargas. Otro parámetro importante es el desfase de brazos (O_B) 100 mm, el cual denota la separación entre los brazos delta. Además, para este cálculo se tienen tres casos a analizar, los cuales se muestran en la Figura 7.3, con los tres casos (a) para ángulo mínimo, (b) para ángulo central y (c) para ángulo máximo.

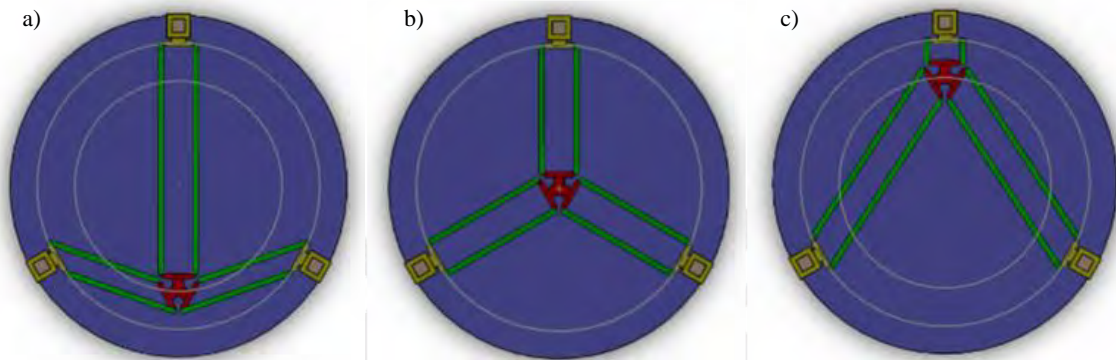


Figura 7.3 – Casos a analizar (a) ángulo mínimo, (b) ángulo central, (c) ángulo máximo)
(Fuente: López et al., 2022)

7.2.1. Diseño de efector

Dado el parámetro definido al inicio del presente capítulo, se tiene el desfase de efector de 180 mm. El efector tendrá una forma triangular como la base de impresión. El punto más alejado del efector a su centro, será igual a la magnitud del desfase de efector. Se tiene en la Figura 7.4, el Sketch sobre el cual se tiene el efector.

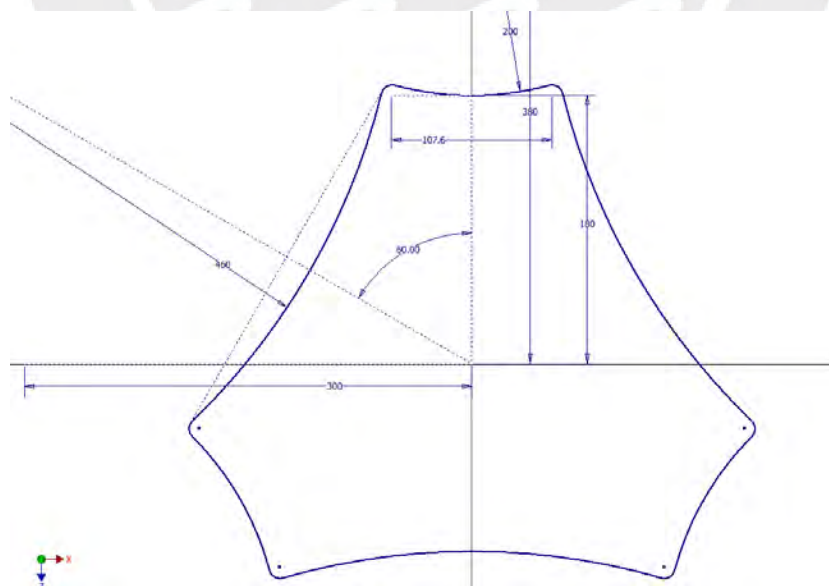


Figura 7.4 - Sketch principal del efector (Fuente: Elaboración Propia)

Posterior a esto, se extruye un grosor que será determinado en la sección de validación, además, para optimizar el peso del componente, se extrae material y se tienen secciones huecas, cuyas dimensiones

deben ser escogidas de tal manera que el acople con sistema extrusor de material se pueda dar sin complicaciones. Esto se muestra en la Figura 7.5 (a) y después de remover el material en (b).



Figura 7.5 – (a) Forma del efector (b) Optimización de peso
(Fuente: Elaboración Propia)

Es necesario que el efector cuente con los acoples PHS y acoples esféricos que unirán ambos lados de los brazos delta. Se añade un acople extra, que es al bracket SK12, pues como se ha visto anteriormente, el diámetro de los brazos delta es de 12 mm. El ensamble de estos acoples con sus uniones atornilladas se muestra en la Figura 7.6.

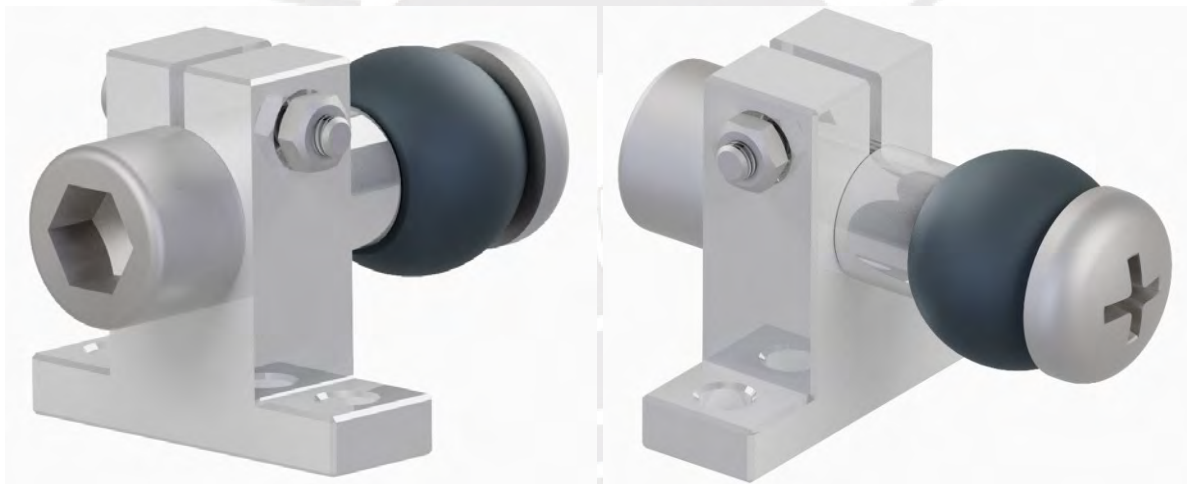


Figura 7.6 - Acoples para el efector, PHS, acople esférico y bracket SK12.
(Fuente: Elaboración Propia)

Por otro lado, el efector no irá directamente unido al bracket SK12, pues es necesario separar el efector que tendrá el extrusor de manera que no se tenga que desatornillar el bracket para su desmontaje. Por lo tanto, se diseña un nuevo acople de aluminio, el cual se puede observar en la Figura 7.7.



Figura 7.7 - Efector con acoples para mayor modularidad
(Fuente: Elaboración Propia)

7.2.2. Selección de material del efector principal

Se debe escoger el material del cual estará fabricado el efector principal, teniendo en cuenta que es el componente que soportará las cargas de peso del extrusor y los esfuerzos de los brazos delta para su movimiento. Por lo tanto, se presenta la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 - Selección de material para el efector principal (Fuente: Elaboración Propia)

Material	Aluminio 6063-T5	Fibra de carbono reforzada	Acero inoxidable 316L
Características	Ligero y resistente	Tiene propiedades mecánicas similares o mejores al acero y es tan ligera como la madera	Alta resistencia a la corrosión y durabilidad
Densidad	2700 kg/m	1750 kg/m ³	8000 kg/m ³
Resistencia a la tracción	430 MPa	3000 MPa	515 MPa

En base a esto, se descarta el acero por su alta densidad, siendo que se necesita un material con el menor peso posible. Es por ello que se elige la fibra de carbono reforzada como material para el efector, que a diferencia del aluminio es mucho más resistente ante la tracción. Con esto, además, se tiene la posibilidad de imprimir este componente.

7.2.3. Validación de diseño de efector

Después de una validación iterativa, se tiene como seleccionado, 10 mm de espesor. Además, se tiene en la Tabla 5.5, las fuerzas a analizar en el efector, pero en dirección contraria, por ello, en la Tabla 7.2, se mostrarán las fuerzas sobre las cuales se tendrá la validación de las dimensiones del efector.

Tabla 7.2 - Componentes cartesianos de las fuerzas actuantes sobre el efector

Caso	Componente	F1	F2	F3	F4	F5	F6
$\alpha_{\text{mínimo}}$	X	4.77	4.77	-346.00	341.22	341.22	-346.00
	Y	0.00	0.00	210.70	-207.80	207.80	-210.70
	Z	119.26	119.26	246.04	-242.64	-242.64	246.04
α_{central}	X	24.45	24.45	-12.22	-12.22	-12.22	-12.22
	Y	0.00	0.00	21.18	21.18	-21.18	-21.18

	Z	40.88	40.88	40.88	40.88	40.88	40.88
$\alpha_{\text{máximo}}$	X	-31.88	-31.88	-19.92	51.80	51.80	-19.92
	Y	0.00	0.00	-40.87	106.29	-106.29	40.87
	Z	-5.26	-5.25	-79.90	207.81	207.81	79.90

A continuación, se muestran los 3 casos de ubicación de fuerzas en el efector en la Figura 7.8 (a) para el caso de Alpha mínimo, (b) para el caso de Alpha central y (c) para el caso de Alpha máximo.

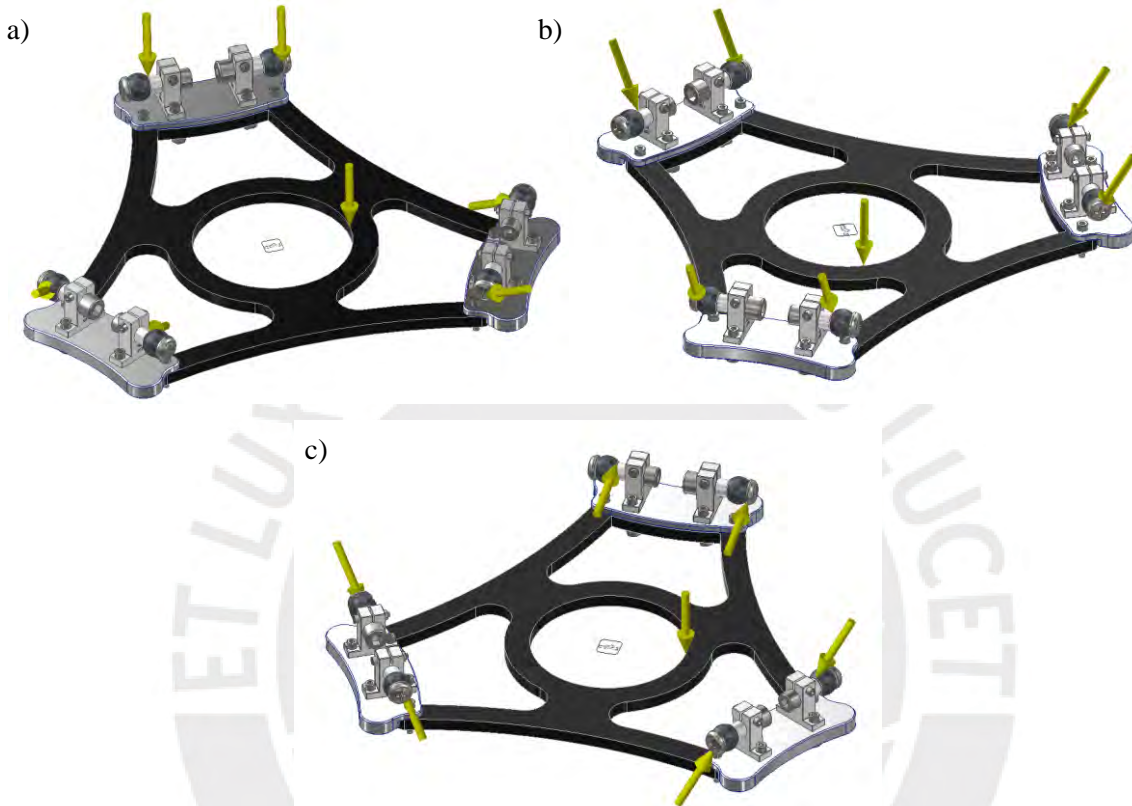
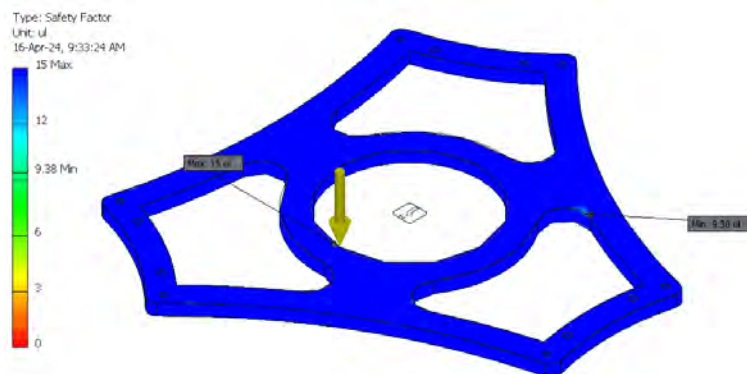


Figura 7.8 - Distribución de fuerzas para validación del efector
(Fuente: Elaboración Propia)

Del mismo modo que en la figura anterior, se muestran en tres apartados la Figura 7.9, donde se tienen los valores mínimos de factor de seguridad.



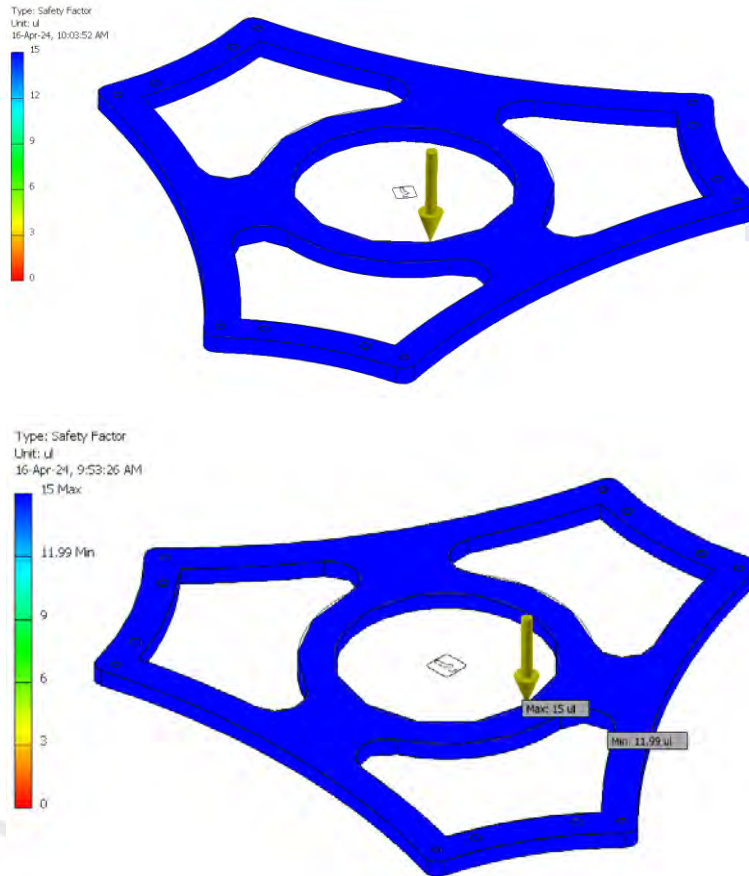


Figura 7.9 - Factor de seguridad mínimo para el análisis de efector
(Fuente: Elaboración Propia)

Finalmente, se muestra la Tabla 7.3 donde se tiene un resumen del esfuerzo equivalente máximo Von Mises, deflexión máxima y factor de seguridad mínimo para cada uno de los casos. De este análisis se concluye que el efector soportará las cargas sometidas.

Tabla 7.3 - Resumen de análisis FEA, efector (Fuente: Elaboración Propia)

Caso	Esfuerzo equivalente Von Mises (MPa)	Deflexión (mm)	Factor de seguridad
$\alpha_{\text{mínimo}}$	31.97	0.285	9.38
α_{central}	11.14	0.092	15
$\alpha_{\text{máximo}}$	25.03	0.202	11.9

7.3. Modelo 3D del subsistema de movimiento de efector

El modelo 3D de este subsistema muestra una representación detallada de sus componentes, incluidos los brazos delta y efector. Se muestra en la Figura 7.10.



Figura 7.10 - Subsistema de movimiento de efector
(Fuente: Elaboración Propia)



8. SUBSISTEMA DE CONTROL DE MOVIMIENTO

Se describe el subsistema de control de movimiento de cabezal del sistema de impresión, abordando proceso de selección de controlador y limit switch. Se incluyen diagramas de flujo que detallan el funcionamiento general y específico del sistema. Además, se realizan pruebas de detección de errores mediante el plugin Obico, basado en visión por computadora, que permite la supervisión remota. Finalmente, se valida el rendimiento del sistema a través de simulaciones y comparaciones de parámetros críticos como velocidad angular de motor, torque y potencia

8.1. Diagramas de flujo

Se presentará el diagrama de flujo general y los diagramas flujos específicos que detallan las operaciones fundamentales en el proceso de funcionamiento de la impresora. El diagrama de flujo general proporciona una visión panorámica de la lógica de control del sistema, mientras que los flujos específicos detallan las operaciones clave, incluyendo homing, movimiento manual y el proceso de impresión. Estos diagramas ofrecen una comprensión completa de cómo el sistema dirige el efector y ejecuta las tareas necesarias durante el proceso de impresión. Los diagramas de flujo general y específicos se encuentran en el Anexo G.

8.2. Selección de controlador




El controlador es el cerebro de la impresora 3D, donde se realiza el control del movimiento de los motores para que el movimiento del efector sea posible. Además, es aquí donde se interpreta el código G y se traduce en movimiento de los motores a través del firmware. Además, el controlador procesa datos del sensor limit switch, señal de caudal de material y parámetros de entrada de la interfaz para pausar, parar impresión, hacer calibración, etc. Se tienen los requerimientos del controlador a continuación:

- Capacidad para controlar al menos 4 motores de manera independiente
- Puertos para al menos tres sensores limit switch
- Compatibilidad con la interfaz Web Octoprint.

Dado a que uno de los requerimientos dado por Fabcore es la posibilidad de envío de notificación a celular una vez la impresión esté inminente a terminar, la interfaz web a utilizar debe ser Octoprint. Por ello, se debe garantizar su compatibilidad con el controlador a seleccionar. Desde la página de Octoprint, se tiene el foro oficial donde se analizan los modelos de impresoras 3D compatibles con esta interfaz web. Donde usuarios de confianza y rankeados comparten los modelos de impresoras que han

sido probadas y funcionan perfectamente (Octoprint Community, 2020). Teniendo en cuenta este foro, se seleccionan tres controladores principales, que se muestran en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1 – Controladores para sistemas de impresión 3D comerciales (Fuente: Elaboración Propia)

Controlador	Smoothierboard 5X	BTT SKR 3 EZ	Duet 2 WiFi
			
Procesador	ARM-Cortex M3 LPC1769	32-bit ARM Cortex-M7 series STM32H723VIT6	ARM Cortex M4F - ATSAM4E8E
Frecuencia de procesador	120MHz	480MHz	120MHz
Interfaz de PC	USB	USB	-
Compatibilidad de firmware	Smoothieware	Marlin, Klipper	RepRapFirmware
Conexión a internet	-	ESP-12S, ESP-07S, ESP32	ESP8266, 2.4GHz WiFi, WPA-2 y conexión Ethernet
Tamaño	150 mm x 150 mm	110 mm x 85 mm	100 mm x 123 mm
Regulador de voltaje interno	Regulador de voltaje opcioanl	TPS5450, 5 ^a	Regulador 5V AP64200
Expansión de interfaz o extensiones	SPI, I2C, PWM, DAC	I2C, PS-ON, PWR-DET, Fil-DET, RGB, BL	PanelDue colour touch screen; 12864 display using ST7567 controller chip
Voltaje de entrada por driver	Para motores a paso hasta 2A	48V Máximo por motor	25V por driver
Cantidad de motores a conectar	5 motores y 6 limit swtich	5 motores y 5 limit switch	5 motores
Alimentación	12V – 24V	12V – 24V	11V – 25V
Precio	\$ 175	\$ 90	\$ 120

En base a las características de cada controlador, se tiene en cuenta la potencia de procesador y precio para la selección de la mejor opción. Con ello, el controlador SKR BTT 3 EZ, con el procesador con la arquitectura más reciente y con mayor potencia dada su frecuencia de trabajo. Del mismo modo es el más económico en el mercado actual, por lo tanto, se escoge dicho controlador para el sistema de impresión Delta.

8.3. Selección de Limit Switch

Al iniciar una impresión 3D es necesario definir la posición por defecto, origen o home. El cual consiste en mover las guías lineales hasta un punto de referencia limitado por el sensor fin de carrera o limit switch. Se puede también realizar este proceso al medir picos de voltaje de los motores al chocar con la base o alguna parte de la estructura. En la matriz morfológica se había escogido el sensor del tipo mecánico, con el cual se tiene tres presentaciones. Como se puede mostrar en la Figura 8.1 (a) el modelo ME-8111, en (b) el modelo más reconocido y comercial ME-8104 y en (c) el modelo ME-8112.

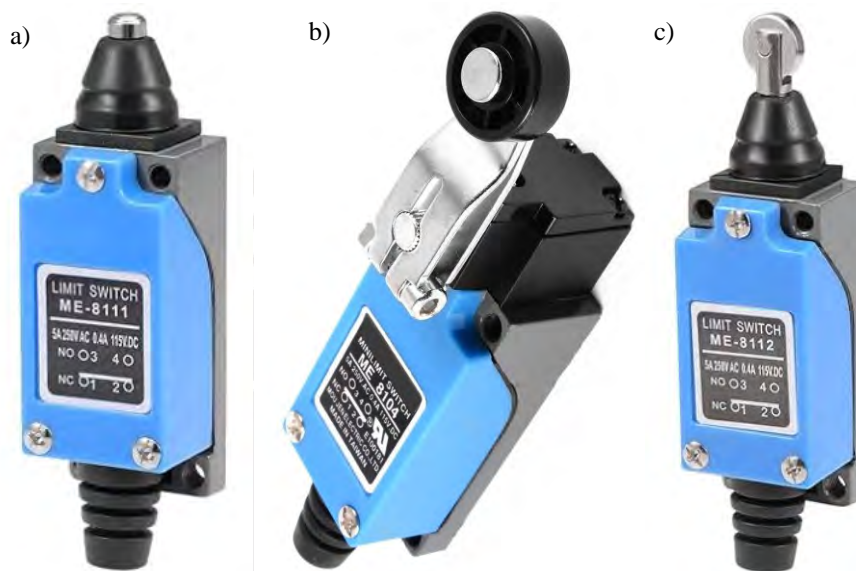


Figura 8.1 - Limit Switch (a) ME-8111, (b) ME-8104, (c) ME-8112
(Fuente: Elaboración Propia)

Para la aplicación con bloque Hiwin, se selecciona el modelo ME-8112, dado a que no se necesita el alcance del modelo ME-8104 que serviría para el límite de cargas mayores. El modelo ME-8111 tiene por otro lado un alcance reducido. Con esto, se debe diseñar el acople para poder colocar este componente sobre el riel Hiwin HG20 y solidaria al perfil de aluminio extruido T-Slot 40120 como se muestra en Figura 8.2 (a) el acople, con medidas seleccionadas a partir de las ranuras del perfil extruido de aluminio y los agujeros del limit switch seleccionado. En (b) se puede observar las tuercas M3 y su ubicación en el acople junto al limit switch.

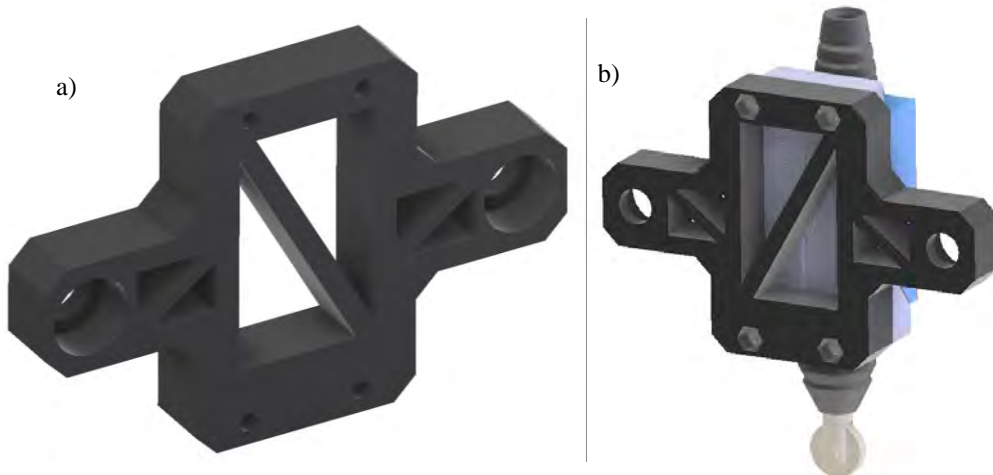


Figura 8.2 – (a) acople de limit switch seleccionado, (b) acople y limit switch montados
(Fuente: Elaboración Propia)

8.4. Detección de error de impresión

La detección de error de impresión, es un componente esencial para asegurar la calidad y la eficacia de este proceso. Particularmente en aplicaciones de gran escala, como la impresión 3D de materiales de construcción, la implementación de sistemas de detección de fallos se vuelve indispensable para mitigar el riesgo de errores costosos y mejorar la confiabilidad del proceso, para casos en los que se deje la impresión sin supervisión alguna. Es por ello, que la mejor forma de realizar esta detección de errores es mediante los algoritmos de inteligencia artificial existentes en los plugins de Octoprint. Como se había analizado en el estado del arte, se utilizará Obico, anteriormente conocido como Spaghetti Detective, un Plugin que utiliza algoritmos de inteligencia artificial de visión por computadora para detectar problemas en tiempo real durante la impresión 3D. El cual ofrece detección de error, monitoreo, control a tiempo real y acceso de forma remota a través de Wi-Fi como se muestra en la Figura 8.3.

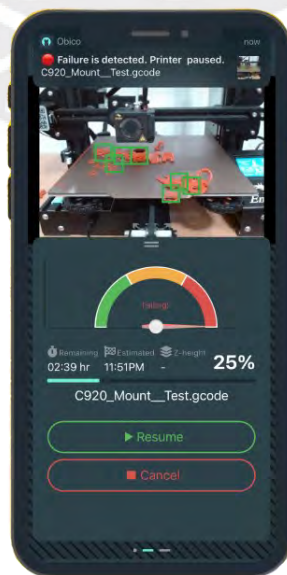


Figura 8.3 - Interfaz móvil, Obico

(Fuente: Obico.io)

El método propuesto para la detección de errores se basa en la monitorización continua del proceso de impresión, mediante una cámara alimenta datos a Obico. En caso el plugin detecta anomalías, como movimientos inesperados del extrusor o la falta de material, el sistema puede pausar automáticamente la impresión y alertar al usuario para una intervención rápida, minimizando el desperdicio de material y tiempo. El uso del controlador BTT SKR 3 Ez, cuya compatibilidad con Octoprint es posible, representa una solución integral para la gestión y control de la impresión 3D.

Como validación, se implementa la interfaz Web Octoprint y el plugin Obico en una impresora Prusa i3 y utilizando una Raspberry, donde la conexión de controlador Prusa i3 a Raspberry es igual a la conexión de controlador BTT SKR 3 Ez y Raspberry. En ambos casos, mediante un cable USB – USB A. Se realiza la impresión de un elemento esférico como se muestra en la Figura 8.4.

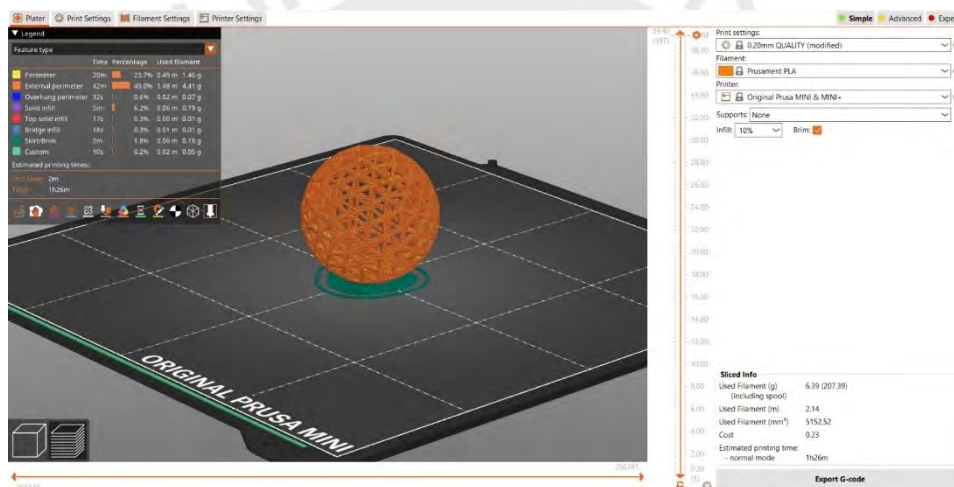


Figura 8.4 - Pieza a imprimir para prueba de error de Obico
(Fuente: Elaboración Propia)

Durante la impresión y monitoreo remoto, se tuvo un error de impresión alrededor del 80%, el cual se puede apreciar en la Figura 8.5 (a), del mismo modo, este error fue detectado desde la aplicación Obico, como se puede ver en (b).

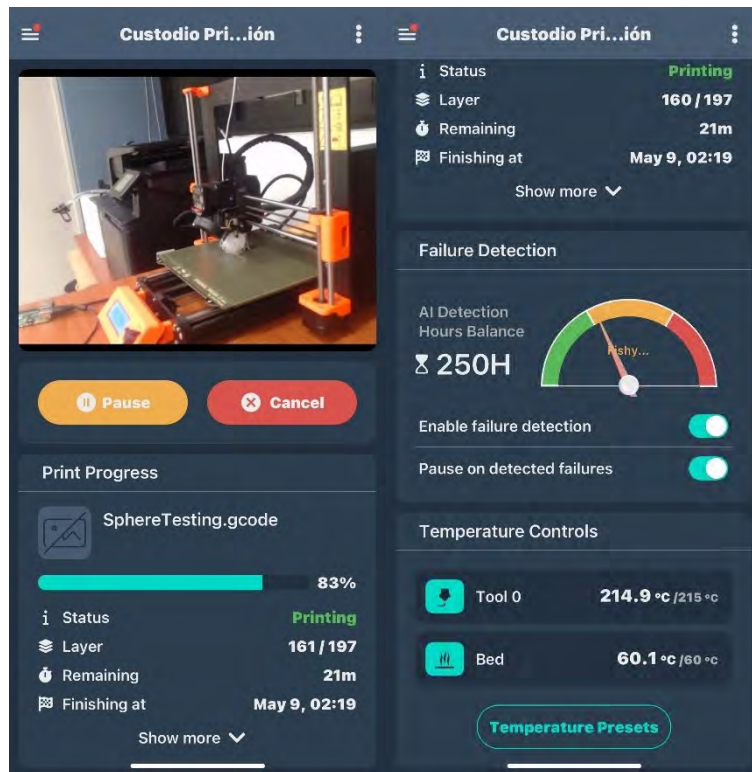


Figura 8.5 - Validación de detección de error de impresión (a) impresión con error, (b) detección de error.
(Fuente: Elaboración Propia – Obico App)

Finalmente, se muestra en la Figura 8.6 la impresión con error después de detener la impresión desde la aplicación. Con esto, se valida la detección de error de impresión para el sistema mecatrónico, el cual utilizará el mismo Hardware para la detección de error mediante interfaz Web.



Figura 8.6 - Impresión con error detectada
(Fuente: Elaboración Propia)

8.5. Simulación de código

El objetivo de esta sección es realizar la validación de los parámetros calculados anteriormente. En la Tabla 8.2 se tienen los tres parámetros más importantes a validar mediante simulación. Es importante tener en cuenta que las revoluciones por minuto de los motores y velocidad angular tienen una relación directamente proporcional con la velocidad vertical a las cuales están sometidas las guías, por lo tanto, bastará con realizar la validación de este parámetro.

Tabla 8.2 - Parámetros a validar mediante simulación (Fuente: Elaboración Propia)

Parámetro	Símbolo	Unidad
Velocidad vertical de guías lineales	V_z	mm/s
Torque de motores	T_M	N.m.
Potencia de motores	P_M	W

8.5.1. Resultados

Se puede apreciar una tendencia sinusoidal en el comportamiento de velocidad, torque y potencia de motores. Esto es congruente al comportamiento de una impresora 3D de materiales de construcción, cuyas piezas a imprimir tendrán mayormente la forma de una estructura circular o cuadrada. Todos estos parámetros tienden a llegar a un máximo en cierto punto de la impresión y es parte de esta validación, comparar si estos valores obtenidos mediante simulación, son congruentes con los cálculos. Para ello se presenta la Tabla 8.3, donde se tiene dicha comparación. El desarrollo del código se muestra en el Anexo H.

Tabla 8.3 - Validación de parámetros mediante simulación (Fuente: Elaboración Propia)

Parámetro	Valor crítico (cálculos)	Valor crítico (simulación)	Unidad
Velocidad vertical	500	469.40	mm/s
Torque de motores	3.13	3.04	N.m.
Potencia	125	117.19	W
R.P.M.	380	369.44	r.p.m.
Velocidad angular	40	40.96	rad/s

Como se puede apreciar, los parámetros obtenidos mediante simulación son similares a los valores calculados en el caso de solicitud máxima. Con esta validación se confirma que los parámetros de velocidad vertical, torque de motores y potencia han sido los correctos para la selección de servomotor, correa y guía lineal.

8.6. Diagrama de bloques del subsistema de control

Los dispositivos electrónicos escogidos para el subsistema de alimentación y control son los servomotores Clearpath SD, el controlador BTT SKR 3 Ez, limit switch y luces led. Además de la

alimentación necesaria para cada componente. Las luces led se tendrán en cuenta para el subsistema de interfaz. Se tiene el esquemático de dispositivos electrónicos a mayor detalle en la Figura 8.7.

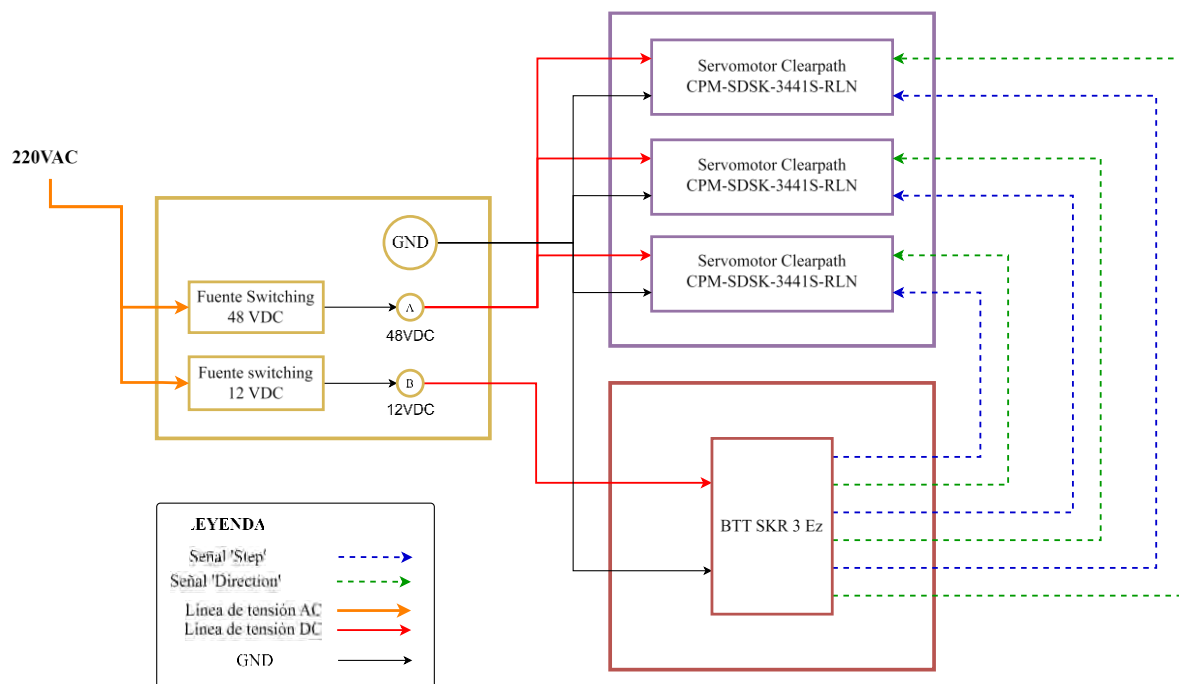


Figura 8.7 - Diagrama esquemático del subsistema de alimentación y control
(Fuente: Elaboración Propia)

9. SUBSISTEMA DE INTERFAZ

En el presente capítulo se realiza la selección del display LED más adecuado para el controlador BTT SKR 3 Ez, así como en la integración de indicadores LED, botones de encendido y emergencia, y relés de potencia y control. Este capítulo aborda la selección de componentes, y las validaciones necesarias para asegurar el correcto funcionamiento de la interfaz web.

9.1. Panel de usuario

En la subsección de panel de usuario, se seleccionan cuidadosamente los indicadores LED más apropiados para proporcionar una retroalimentación clara del estado del sistema. La pantalla LED elegida ofrece una interfaz intuitiva como la de impresoras 3D comerciales. Además, se incorporaron botones de encendido y emergencia para facilitar el control del sistema, junto a relés de potencia y control para garantizar una operación segura y eficiente en todo momento.

9.1.1. Indicadores LED

Existe una amplia posibilidad de uso de indicadores LED para la aplicación de una impresora 3D a la escala a la cual se trabaja en el presente documento. Se busca un diseño semi-industrial, con indicadores LED llamativos que muestren el estado actual de la impresora. Con esto, además, se debe tener en cuenta la posibilidad del controlador, para manejar la lógica de estos indicadores, por lo tanto, se escogerán los indicadores en base a la salida del controlador. Es por ello que se muestra el pinout del controlador BTT SKR 3 Ez en la Figura 9.1 y a mayor detalle en el Anexo N.

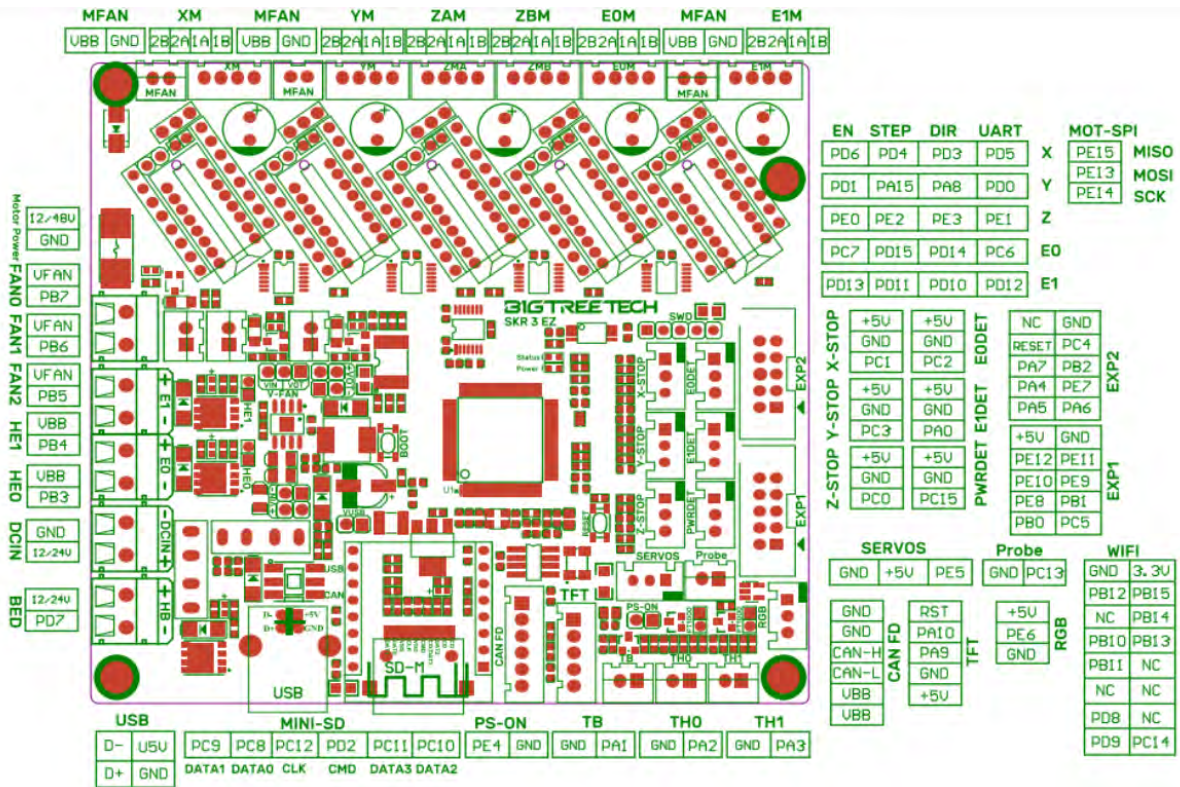


Figura 9.1 - Pinout BTT SKR 3 Ez
(Fuente: BTT SKR 3 Ez Manual)

Como se puede observar, se tiene la entrada RGB, la cual funciona con la salida digital “PE6” y 5V de salida. Por lo tanto, la mejor opción es los leds strip WS2812B, mostrados en la Figura 9.2. La corriente de entrada es despreciable.

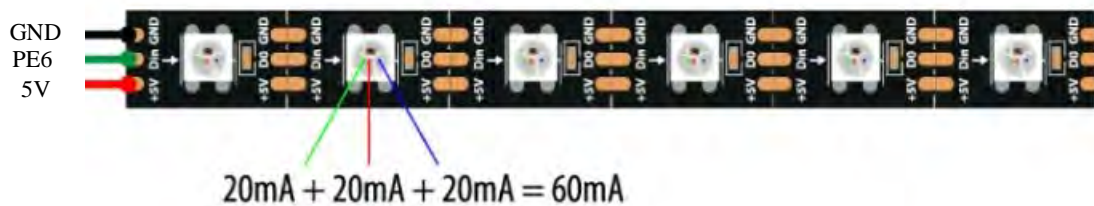


Figura 9.2 - Diagrama WS281B
(Fuente: Amazon)

9.1.2. Pantalla LED

Para la selección de la pantalla LED, se debe tener en cuenta la posibilidad de conexión al controlador. Es por ello, que se analiza el manual del controlador seleccionado. En la Figura 9.3, se observa que el periférico de interfaz LED debe tener conexión a puertos de expansión EXP-1 y EXP-2 y puerto de alimentación 5V, GND; Además de tres pines de comunicación serial.

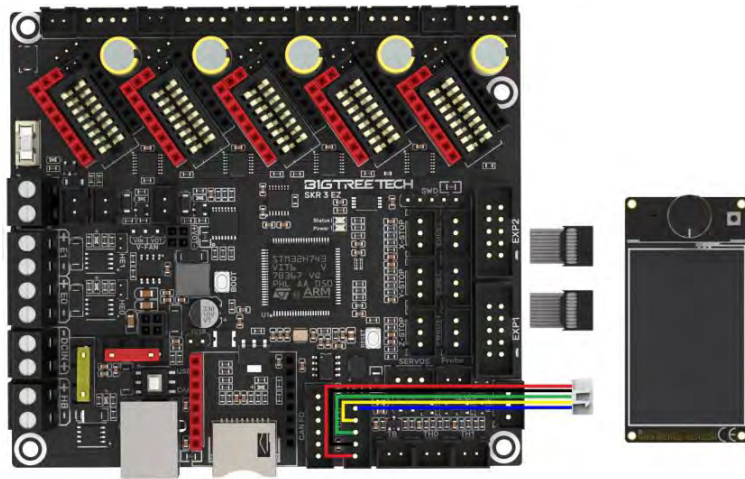


Figura 9.3 - Conexión a Interfaz del del controlador
(Fuente: Amazon)

Teniendo en cuenta ello, se tienen los modelos touch screen compatibles con el controlador, TFT43 V3.0 &TFT50 V3.0 & TFT70 V3.0. Dado a que se busca un diseño semi-industrial, se escoge el de mayor resolución, el modelo TFT70 V3.0, el cual se muestra en la Figura 9.4.



Figura 9.4 - Touch Screen TFT70 V3.0
(Fuente: Amazon)

9.1.3. Encendido y botón de emergencia

Para el encendido total del sistema y la implementación de un botón parada de emergencia se deben seleccionar un botón de encendido, un relé del tipo AC-AC y un E-stop de acuerdo a los requerimientos de corriente a suministrar para los servomotores y controlador. Es por ello que, en un primer lugar se muestra el diagrama de conexiones de estos componentes en la Figura 9.5.

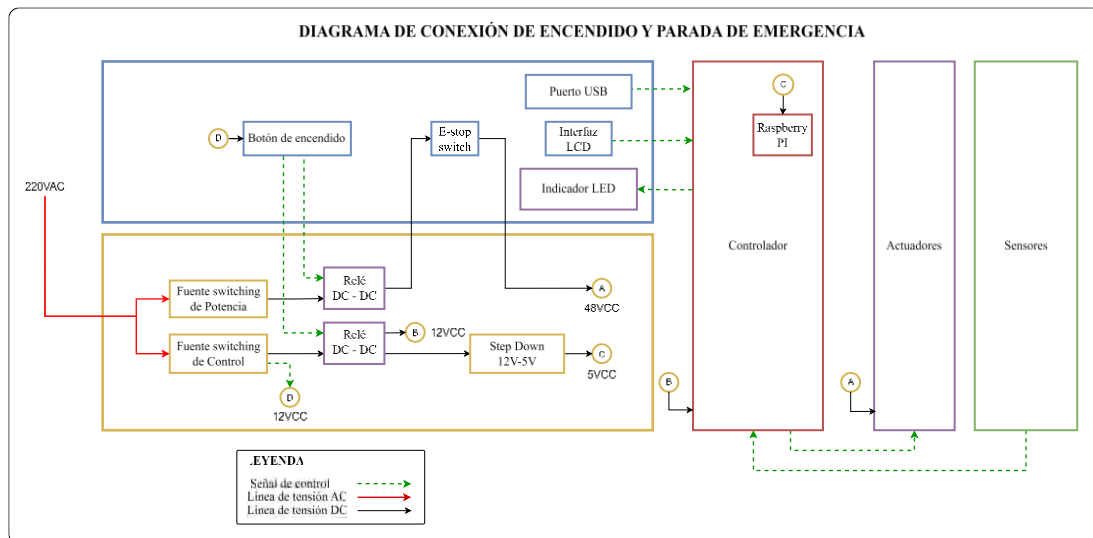


Figura 9.5 - Diagrama de conexiones de botón de encendido y parada de emergencia
(Fuente: Elaboración propia)

La lógica del botón de encendido y parada de emergencia radica en que el botón de encendido es de mayor jerarquía y mediante la conexión a dos relés, permite la conexión de voltaje DC de potencia y control. El botón de parada de emergencia está conectado únicamente a la potencia, es decir, cuando se presione, los motores se desactivarán. Por lo tanto, se presenta la Tabla 9.1 donde se tiene la selección de los componentes necesarios para el encendido y botón de emergencia.

Tabla 9.1 - Selección de componentes para el encendido y parada de emergencia
(Fuente: Elaboración propia)

	Botón de encendido	Botón de parada de emergencia	Relé de potencia	Relé de control
Componente				
Modelo	PVA3F2B0SS304	XB2-01ZS	SSR-05DD	SSR-10DD
Disponibilidad	A importar	Disponibilidad en el mercado peruano	Disponibilidad en el mercado peruano	Disponibilidad en el mercado peruano
Amperaje requerido	Amp < 1 A	Amp > 9.3 A	Amp > 9.3 A	Amp < 5A
Amperaje actual	0 – 2 A	10 A	10 A	5 A
Voltaje requerido	12 VDC	48 VDC	48 VDC	12 VDC
Voltaje actual	0 – 36 A	0 – 600 VDC	5 – 60 VDC	5 – 60 VDC
Voltaje de control requerido	-	-	12 VDC	12 VDC
Voltaje de control actual	-	-	4 – 32 VDC	4 – 32 VDC

9.1.4. Visualización de panel

La visualización del panel ofrece una representación del modelo 3D del subsistema de interfaz in situ, destacando la ubicación de cada componente para garantizar una disposición ergonómica. Los relés de potencia y control se encuentran ubicados dentro del panel. Este se divide en frame de soporte, componentes y carcasa. Los cuales se muestran en la Figura 9.6 (a), (b), y (c) respectivamente. Es importante tener en cuenta que la ubicación de los componentes es realizada mediante un panel de acrílico.



Figura 9.6 - Visualización de panel (Fuente: Elaboración propia)

9.2. Interfaz Web remota

En el desarrollo del proyecto se considera fundamental incorporar una interfaz web que permita controlar y monitorizar la impresión 3D de manera remota. Para ello, se optó por utilizar Octoprint, una plataforma de código abierto ampliamente reconocida por su compatibilidad y facilidad de uso. La implementación utilizó una Raspberry Pi como servidor. Aunque el diseño original del proyecto contempla el uso del controlador BTT SKR 3 Ez, para las pruebas se utilizó una impresora Prusa i3 MK3, que está equipada con un controlador Rambo versión 1.3. Esta elección se justifica porque la conexión de la Raspberry Pi con el controlador Rambo es idéntica a la conexión que se establece con el controlador BTT SKR 3 Ez. Las validaciones y pruebas realizadas con la interfaz Web se detalla en el Anexo I

10. ESTIMACIÓN DE COSTOS TOTALES

En este capítulo se presenta una evaluación detallada de los costos asociados con la implementación del sistema de impresión 3D. La estimación incluye la adquisición de materiales y componentes específicos, así como los costos de fabricación necesarios para la construcción de la impresora. A través de un análisis exhaustivo de los precios de los componentes y materiales, considerando factores como el tipo de cambio y los costos de importación, se ofrece una visión completa de los gastos involucrados. Finalmente, se proporciona un presupuesto total que abarca todos los gastos necesarios para la implementación del sistema, asegurando una evaluación completa de los recursos económicos requeridos para el proyecto.

10.1. Adquisición de materiales y componentes

El precio de los materiales en general incluye los componentes específicos y los materiales necesarios para trabajar en ellos. La Tabla 10.1 describe cómo cambian los precios con el cambio moneda, se trabaja con soles (S/.), dólares (\$) y euros (€) y un factor que estima cuánto puede costar el componente al incluir el importe, si se compra en el extranjero.

Tabla 10.1 - Consideraciones para compras extranjeras
(Fuente: Elaboración propia)

Valor del euro	Valor
Euros	1€ = 4.10
Dólares	1\$ = 3.80
Factor de compra incluido el importe	1.5

Según esto, la Tabla 10.2 se detallan los precios de los componentes y el total acumulado de estos costos. En el Anexo J de costos de componentes se puede ver el precio de venta, ya sea a través de catálogo o página web, brindando así una visión completa de las opciones disponibles para adquirir los materiales necesarios.

Tabla 10.2 – Costos de componentes y software del sistema de impresión
(Fuente: Elaboración propia)

Subsistema	Nombre	Cantidad	Costo original por unidad	Costo total en (S/.)
Estructural	V-Slot 2040, 3.2m	10	S/. 165.00	1650.00
	T-Slot 40120 1.0m	9	42.40 €	2346.84
Movimiento lineal	Rieles tipo Hiwin HG20 3.0m	3	S/. 515.00	1545.00
	Bloque Hiwin HG20 CGH20HA	3	S/. 400.00	1200.00
	Placa de sujeción T5-10mm	3	7.60 \$	129.96
	Acople PHS12 hembra	6	11.20 \$	383.04
	Tuerca de acoplamiento de varilla redonda M10x40mm	6	15.40/5 \$	526.85
	Correa dentada HTD 3M-15mm x 1.0m	1	S/. 30.00	30.00
	Polea dentada HDT 3M – 15mm 24T	6	S/. 38.00	228.00
	Varilla lisa 8mm x 300 cm	1	S/. 80.00	80.00
	Chumacera D8mm-KFL08	6	S/. 15.00	90.00
	Motor Clearpath CPM-SDSK-3441S-RLN	3	\$ 432.00	7970.40
Movimiento de efector	Extremo de varilla PHS12	6	11.20 \$	383.04
	Varilla roscada 12mm x 1.0m	6	S/. 20.00	120.00
	Tubo fibra de carbón 12mm	6	115 €	4243.50
	Soporte SK12	6	S/. 8.00	48.00
Control de movimiento	Controlador BTT SKR 3 Ez	1	80.00 \$	456.00
	Fuente Switching 48V, 10A	1	S/. 60	60.00
	Fuente Switching 12V, 5A	1	S/. 250	250.00
	Limit Switch ME-8112	3	40.00 \$	684.00
Interfaz	Display LED TFT70 3.0	1	42.00 \$	239.40
	Botón de emergencia XB2-01ZS	1	S/. 15.00	15.00
	Botón de encendido PVA3F2B0SS304	1	S/. 66.4	66.40
	Led strip circular WS2812B	1	3.00 \$	17.10
	Puerto USB	1	S/. 0.50	0.50
	Relé SSR-05DD	1	S/. 40.00	40.00
	Relé SSR-10DD	1	S/. 40.00	40.00
	Obico Plugin	12	4.00 \$	273.60
Total				23116.63

10.2. Costos de fabricación

En la 1, se detallan los costos estimados de manufactura y materiales necesarios para los acoples y soporte. El subsistema estructural es el que requiere mayor cantidad de componentes a fabricar, dado el diseño exclusivo para este sistema. El cobertor superior, inferior y de interfaz son chapa de 3mm cuyo costo depende del área que ocupan. Finalmente, se tienen soportes de acrílico que serán sometidos a corte laser.

Tabla 10.3 - Costo de materiales (Fuente: Elaboración propia)

Subsistema	Nombre	Cantidad	Material	Costo original por unidad (S/.)	Costo en (S/.)
Estructural	Acople lateral	3	Poliuretano de alta densidad	141.46	424.37
	Acople lateral central	3	Poliuretano de alta densidad	168.14	504.41
	Acople central	3	Acero AISI 4140	1168.51	3505.52
	Pedestal de soporte	1	Acero AISI 4140	834.41	834.41
	Cobertor superior	1	Plancha de acero laminado en caliente ASTM A36	1746.64	1746.64
	Cobertor inferior	1	Plancha de acero laminado en caliente ASTM A36	1217.48	1217.48
Movimiento lineal	Acople de guía lineal	3	Poliuretano de alta densidad	62.83	188.49
	Acople de polea	3	Poliuretano de alta densidad	30.82	92.47
	Acoples de motor	3	Poliuretano de alta densidad	33.32	99.95
Movimiento de efector	Acople de brazo a efector	3	Aluminio 6061	49.79	149.36
	Efector principal	1	Fibra de carbono reforzada	659.32	659.32
Control de movimiento	Acople de limit switch	3	Poliuretano de alta densidad	11.01	33.02
	Soporte de electrónica	1	Polimetilmetacrilato	547.21	547.21
Interfaz	Estructura de interfaz	1	Perfil de acero inoxidable AISI/SAE304	695.00	695.00
	Cobertor de interfaz	1	Acero galvanizado	2636.89	2636.89
	Soporte de interfaz	1	Polimetilmetacrilato	62.03	62.03
	Soporte de relés	1	Polimetilmetacrilato	68.62	68.62
Total					13465.22

10.3. Presupuesto total

El presupuesto y costo de cálculos totales abarcan todos los gastos que se realizarán para la implementación del sistema. En la Tabla 10.4, se tiene como resumen el precio de componentes y materiales de cada subsistema y finalmente el costo final total.

Tabla 10.4 - Presupuesto total de implementación del sistema de impresión

Subsistema	Costo en (S/.)
Subsistema de estructural	12229.67
Subsistema de movimiento lineal vertical	12564.17
Subsistema de movimiento de efector	5603.23
Subsistema de control de movimiento	2030.24
Subsistema de interfaz in situ y remota	4154.55
Costo total de implementación:	36581.85

CONCLUSIONES

El sistema de impresión Delta fue seleccionado como concepto ganador tras una evaluación técnico-económica exhaustiva, a nivel técnico se consideraron criterios como precisión, repetibilidad, robustez, velocidad, modularidad y transportabilidad, desde la perspectiva económica se evaluaron aspectos como costo de componentes, facilidad de adquisición, costo de implementación y cantidad de componentes estructurales. Esta configuración garantiza una velocidad de impresión de al menos 30 cm/s, siendo esto, una mejora del 25% ante los productos comerciales actuales, con 300% mayor potencia y 52% de ahorro energético gracias al uso de los servomotores Clearpath.

Se realizó el diseño a nivel de ingeniería de todos los subsistemas, se llevaron a cabo cálculos en el subsistema estructural, de movimiento lineal y del efector, así como la revisión de documentación y hojas técnicas para la selección de componentes en el sistema de control e interfaz. Este proceso aseguró que cada parte del sistema cumpla con la lista de requerimientos en cuanto a modularidad y diseño mediante subsistemas, posibilidad de una interfaz remota, velocidad máxima de impresión y desplazamiento, volumen de sistema y de impresión, carga máxima de cabezal, suministro de energía y señales de entrada y de salida.

Este diseño ingenieril involucró validaciones importantes, se realizó una validación estructural mediante análisis de elementos finitos (FEA) en Inventor, obteniendo un factor de seguridad estructural mínimo, mayor a 2.1, lo que garantiza que el diseño a nivel mecánico es estable y no fallará en ninguno de los casos extremos. Además, se llevaron a cabo validaciones con el software Matlab para cálculos de velocidad de movimiento lineal, potencia y torque del motor mediante la cinemática inversa, estas simulaciones se realizaron en un entorno de impresión de una pieza esférica de diámetro máximo, obteniendo parámetros de simulación de una velocidad vertical máximo de 470 mm/s, un torque de motores máximo de 3.04 N.m. y una potencia máxima de 117.2 W.

Se realizó un cálculo detallado del presupuesto por subsistemas y la implementación total, este análisis incluyó tanto los costos de los componentes como los materiales necesarios, inicialmente, se determinó el costo de cada componente individual, seguido por los costos de los materiales utilizados en la fabricación, los costos fueron evaluados considerando las tasas de cambio y los costos adicionales por importación, brindando una visión completa de las opciones disponibles para adquirir los materiales necesarios, destacando que el subsistema estructural requiere la mayor cantidad de componentes a fabricar. Finalmente, el costo total de implementación del sistema de impresión 3D asciende a S/. 36 600 soles peruanos, lo que lo hace más económico frente a otros modelos, como el modelo industrial y robusto Delta WASP 3MT Concrete (60 335 €) y la impresora 3D Colibri (S/. 48 000). De este modo, se garantiza una estimación precisa de la inversión necesaria para el desarrollo del proyecto, resaltando su competitividad en términos de costo.

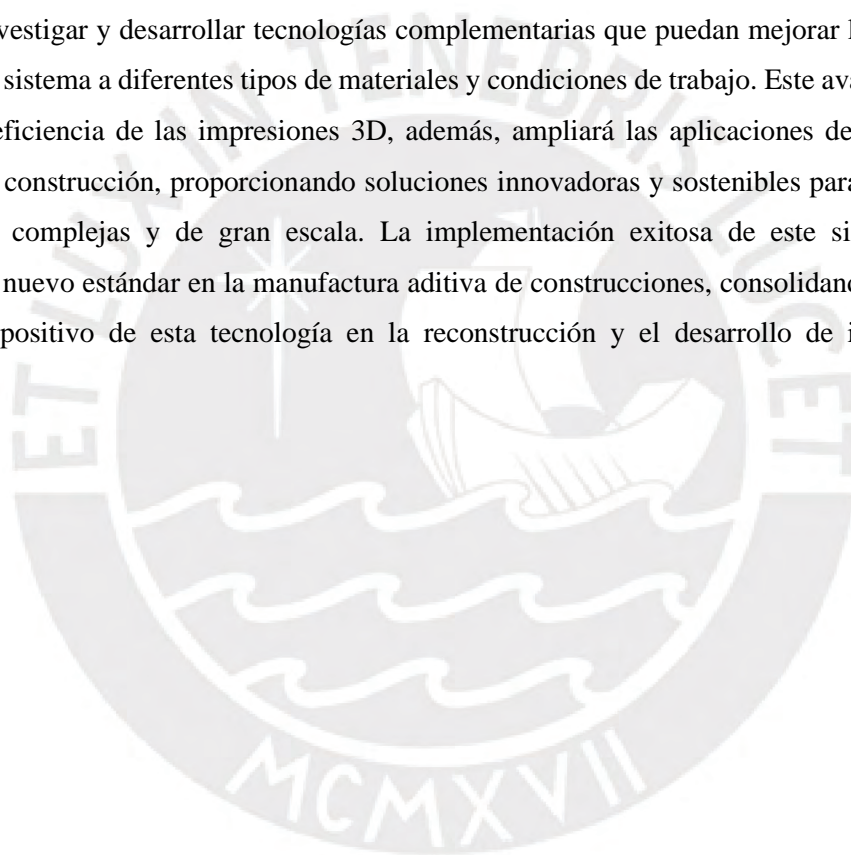
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizó una investigación de las tecnologías vinculadas a la impresión 3D en el contexto de la construcción, enfocándonos especialmente en los persistentes desafíos de la reconstrucción post-desastre en áreas remotas de Perú. Este análisis resalta la posibilidad de que la implementación de sistemas de impresión 3D transportables se convierta en una alternativa de solución como respuesta ante situación de desastres y contribuir al progreso social y tecnológico. Los avances, especialmente en la manufactura aditiva de construcción, ofrecen beneficios notables, como la rápida construcción de estructuras, generando ahorros significativos en tiempo y costos.

En el desarrollo del diseño del sistema de impresión 3D de materiales de construcción, se ha logrado un avance significativo en la conceptualización y especificación de los subsistemas integrados. No obstante, es crucial tener en cuenta ciertos aspectos observados a lo largo del proceso de diseño. En primer lugar, se destaca la importancia de una calibración meticulosa de los sensores de carga y desplazamiento, ya que una mayor precisión en estas mediciones puede optimizar el rendimiento y la exactitud del sistema completo. Asimismo, se recomienda realizar una revisión exhaustiva de los materiales seleccionados para la estructura y los componentes mecánicos, con el objetivo de garantizar su durabilidad y resistencia ante las condiciones operativas previstas. Otra observación relevante es la necesidad de simplificar y mejorar la interfaz de usuario para la operación remota y el monitoreo en tiempo real, incorporando indicadores visuales más intuitivos y sistemas de alerta que permitan una respuesta rápida ante cualquier eventualidad. Adicionalmente, se sugiere establecer protocolos de mantenimiento preventivo detallados y capacitar al personal técnico en la operación y diagnóstico del sistema para asegurar una gestión eficiente y segura del mismo. Finalmente, es esencial considerar la adaptación del diseño a posibles variaciones en los entornos de aplicación, asegurando así la versatilidad y funcionalidad del sistema en diversas condiciones geográficas y climáticas.

TRABAJO A FUTURO

El siguiente paso fundamental en el desarrollo de este proyecto es la realización del diseño conceptual y a nivel de ingeniería del sistema extrusor, el cual desempeñará un papel crítico en la deposición del material de construcción. Este sistema extrusor debe ser diseñado con un enfoque en la precisión y la consistencia del flujo de material, garantizando una extrusión controlada y continua que se adapte a los requerimientos específicos de cada proyecto de construcción. Dado que el sistema actual ya contempla la emisión de una señal de control para el caudal del material de construcción, el diseño del extrusor se beneficiará significativamente de esta característica, facilitando su integración y operación. Este diseño debe incluir un análisis detallado de los materiales compatibles, la mecánica de extrusión y los parámetros de operación óptimos para asegurar un rendimiento eficiente y confiable. Además, se recomienda investigar y desarrollar tecnologías complementarias que puedan mejorar la capacidad de adaptación del sistema a diferentes tipos de materiales y condiciones de trabajo. Este avance aporta a la mejora de la eficiencia de las impresiones 3D, además, ampliará las aplicaciones del sistema en la industria de la construcción, proporcionando soluciones innovadoras y sostenibles para la fabricación de estructuras complejas y de gran escala. La implementación exitosa de este sistema extrusor establecerá un nuevo estándar en la manufactura aditiva de construcciones, consolidando la viabilidad y el impacto positivo de esta tecnología en la reconstrucción y el desarrollo de infraestructuras resilientes.



REFERENCIAS

- Burnell, J., & Sanderson, D. (2011). Whose reality counts?: Shelter after disaster. *Environmental Hazards*, 10(3-4), 189-192. <https://doi.org/10.1080/17477891.2011.595581>
- Caia, G., Ventimiglia, F., & Maass, A. (2010). Container vs. dacha: The psychological effects of temporary housing characteristics on earthquake survivors. *Journal of Environmental Psychology*, 30(1), 60-66. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2009.09.005>
- Cynthia J. Duncan, Steven J. Fenves, & Nestor Iwankiw. (2005). *Determination of Allowable Strength Design Safety Factors in the 2005 AISC Specification*.
- Hodgson, M., Rempel, R., & Kennedy, S. (1999). Measurement and prediction of typical speech and background-noise levels in university classrooms during lectures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(1), 226-233. <https://doi.org/10.1121/1.424600>
- Jansch, J., & Birkhofer, H. (2006). The development of the guideline VDI 2221 - The change of direction. *9th International Design Conference, DESIGN 2006*, 45-52.
- López, N., Alexander, J., Guerra, Y., Alexander, D., Castellanos Villa, I., & David, S. (2022). *Diseño y construcción de una impresora 3D tipo delta de gran volumen de trabajo para impresión multicolor FDM [ESPE]*. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/32021>
- Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., Mao, A., Dixon, T., Stein, S., Sacks, I. S., Ocola, L., & Ellis, M. (1998). Space Geodetic Observations of Nazca-South America Convergence Across the Central Andes. *Science*, 279(5349), 358-362. <https://doi.org/10.1126/science.279.5349.358>
- Octoprint Community. (2020, junio). *Printers known to work/not work*. Tested and works. <https://community.octoprint.org/t/printers-known-to-work-not-work/21147>
- reprap community. (2019, enero 25). https://reprap.org/wiki/Delta_geometry#What_is_effector_stability_.3F. https://reprap.org/wiki/Delta_geometry
- Schilderman, T. (2004). Adapting traditional shelter for disaster mitigation and reconstruction: experiences with community-based approaches. *Building Research & Information*, 32(5), 414-426. <https://doi.org/10.1080/0961321042000250979>
- Subramanya, K., & Kermanshachi, S. (2022). Exploring Utilization of the 3D Printed Housing as Post-Disaster Temporary Shelter for Displaced People. *Construction Research Congress 2022*, 594-605. <https://doi.org/10.1061/9780784483978.061>
- Tavera, H. (2014). *Evaluación del peligro asociado a los sismos y efectos secundarios en Perú*.
- Wagemann, E. (2017). *From Shelter to Home: Flexibility in Post-Disaster Accommodation*. <https://doi.org/10.17863/CAM.43234>



ÍNDICE DE ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS.....	98
ÍNDICE DE FIGURAS - ANEXOS.....	101
ÍNDICE DE TABLAS - ANEXOS.....	104
ANEXO A: ANTECEDENTES AL DISEÑO.....	105
A.1. Justificación.....	105
ANEXO B: ESTADO DEL ARTE.....	108
B.1. Sistemas de impresión desarrollados en la PUCP.....	108
B.1.1. Colibri.....	108
B.1.2. Wasitek.....	108
B.2. Modelos comerciales.....	109
B.2.1. Sistemas cartesianos.....	109
B.2.2. Sistemas delta.....	113
B.2.3. Sistemas con brazo robótico.....	115
B.3. Artículos académicos.....	118
B.3.1. Development of a Novel 3D Spherical Printer.....	118
B.3.2. Comparative Study of Cartesian and Delta 3D Printers on PLA Parts.....	119
B.3.3. Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities.....	121
B.3.4. Development of a 3D Printer for Concrete Structures.....	124
B.3.5. Design and Construction of a 3D Printer Auto Controller Wirelessly.....	124
B.3.6. Approach to an optimised printing path for additive manufacturing in construction.....	126
B.3.7. Characteristics of Hydraulic and Electric Servo Motors.....	127
B.3.8. 3D Printer State Prediction: A Deep Learning Model Approach.....	129
B.4. Patentes relacionadas.....	130
B.4.1. Frame type concrete 3D printer.....	130
B.4.2. Real-time monitoring device and method for delta 3D printer based on binocular vision.....	132
B.4.3. Three-dimensional (3D) delta printer frame structure.....	132
B.5. Tecnologías Existentes.....	133
B.5.1. Motores.....	134
B.5.2. Controladores.....	137
B.5.3. Guías Lineales.....	139
B.5.4. Firmware.....	141
B.5.5. Interfaces Web.....	144
B.5.6. Configuraciones de impresoras 3D.....	148

ANEXO C: DISEÑO CONCEPTUAL.....	151
C.1. Lista de requerimientos	151
C.2. Black Blox Diagram [Diagrama de Caja Negra].....	152
C.3. Estructura de funciones	155
i. Dominio de Interfaz.....	155
ii. Dominio de Energía	156
iii. Dominio de Sensores.....	157
iv. Dominio de Control.....	157
v. Dominio de Actuadores.....	159
vi. Dominio Mecánico.....	160
C.4. Matriz Morfológica.....	162
C.5. Conceptos de solución.....	166
C.5.1. Concepto de Solución 1	166
C.5.2. Concepto de Solución 2	170
C.5.3. Concepto de Solución 3	174
C.6. Evaluación técnica económica	178
C.6.1. Concepto de Solución 3	178
C.6.2. Criterios económicos.....	182
ANEXO D: SIMULACIÓN ESTRUCTURAL.....	185
D.1. Simulación estructural	185
D.2. Simulación de acoples estructurales	188
ANEXO E: SELECCIÓN DE GUÍA LINEAL.....	191
ANEXO F: SELECCIÓN DE CORREA.....	193
ANEXO G: SUBSISTEMA DE CONTROL DE MOVIMIENTO	195
G.1. Diagrama de flujo general	195
G.2. Diagramas de flujo específico	195
ANEXO H: SIMULACIÓN DE CÓDIGO	199
ANEXO I: INTERFAZ WEB REMOTA.....	204
I.1. Instalación de Octorpint.....	204
I.2. Conexión de Raspberry Pi con impresora de prueba.....	206

I.3. Validación de la interfaz Web con Obico.....	207
<i>ANEXO J: COSTOS DE COMPONENTES.....</i>	<i>210</i>
<i>ANEXO K: PLANOS MECÁNICOS DEL SISTEMA.....</i>	<i>236</i>
<i>ANEXO L: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO GENERAL</i>	<i>271</i>
<i>ANEXO M: HIWIN HERRAMIENTA DE SELECCIÓN</i>	<i>273</i>
<i>ANEXO N: PINOUT BTT SKR 3 Ez.....</i>	<i>279</i>
<i>ANEXO O: PLANO DE DISTRIBUCIÓN DE MÓDULO DE TRANSPORTE.....</i>	<i>281</i>



ÍNDICE DE FIGURAS - ANEXOS

<i>Figura B.1 - Impresora COLIBRI (Fuente: Departamento-Ingeniería PUPC)</i>	108
<i>Figura B.2 - Impresora Wasitek (Fuente: Departamento-Ingeniería PUPC)</i>	109
<i>Figura B.3 - Modelo Bem Pro (Fuente: Bemore 3D)</i>	110
<i>Figura B.4 - Modelo Bem Pro Bigger (Fuente: Bemore 3D)</i>	110
<i>Figura B.5 - Modelo Cube (Fuente: Bemore 3D)</i>	111
<i>Figura B.6 - Modelo Smart (Fuente: Bemore 3D)</i>	112
<i>Figura B.7 - MiniPrinter EDU (Fuente: Constructions 3D)</i>	112
<i>Figura B.8 - MiniPrinter PRO (Fuente: Constructions 3D)</i>	113
<i>Figura B.9 - Modelo BigDelta WASP 12MT (Fuente: 3dWasp)</i>	114
<i>Figura B.10 - Modelo Delta Wasp 3MT concrete (Fuente: Constructions 3D)</i>	115
<i>Figura B.11 - Modelo Crane WASP (Fuente: 3dWasp)</i>	116
<i>Figura B.12 - MaxiPrinter (Fuente: Constructions 3D)</i>	117
<i>Figura B.13 - Frank 3D Printer (Fuente: Apis Cor)</i>	117
<i>Figura B.14 - (a) Modelo CAD de la impresora esférica, (b) modelo cinemático de la impresora (Fuente: Tivadar Demjen et al.)</i>	118
<i>Figura B.15 - Configuración cartesiana y delta (Fuente: Betina et al.)</i>	119
<i>Figura B.16 - Cloner DH Printer y Rostock Max V2 Printer (Fuente: Betina et al.)</i>	119
<i>Figura B.17 - Modelo de pieza a evaluar (Fuente: Betina et al.)</i>	120
<i>Figura B.18 (a) Impresión de elementos, (b) Impresión de encofrados, (c) Impresión in situ (Fuente: Xiao Jji GZhang Y et al.)</i>	122
<i>Figura B.19 - Interfaz desarrollada para la impresora 3D (Fuente: Jo et al.)</i>	124
<i>Figura B.20 - Flujograma del programa de Control de la impresora (Fuente: Acuna et al.)</i>	125
<i>Figura B.21 - Configuración de la comunicación Inalámbrica (Fuente: Acuna et al.)</i>	125
<i>Figura B.22 - (a) Muro de muestra (b) Ruta de impresión (c) Eliminación de la superposición (Fuente: Lachmayer et al.)</i>	126
<i>Figura B.23 - Planificación de rutas, construcción de modelos y simulación en MATLAB (Fuente: Lachmayer et al.)</i>	127
<i>Figura B.24 - Densidad de potencia de motores eléctricos e hidráulicos (Fuente: Sakama et al.)</i>	127
<i>Figura B.25 - Correlación entre Torque Nominal y Velocidad Angular Nominal (Fuente: Sakama et al.)</i>	128
<i>Figura B.26 - Configuraciones de sistemas de accionamiento de motores (Fuente: Sakama et al.)</i>	128
<i>Figura B.27 - Resumen de las características de los motores estudiados (Fuente: Sakama et al.)</i>	129
<i>Figura B.28 - Diferentes funcionalidades de la aplación de monitoreo (Fuente: Sampedro et al.)</i>	129
<i>Figura B.29 - Flujo de datos de la impresora 3D al cliente (Fuente: Sampedro et al.)</i>	130
<i>Figura B.30 - Vista en perspectiva de una impresora 3D de marco concreto (Fuente: China, Patente CN111251411A)</i>	131
<i>Figura B.31 - Vista en perspectiva del cabezal de impresión (Fuente: China, Patente CN111251411A)</i>	131
<i>Figura B.32 - Vista isométrica de la impresora Delta con sistema de monitoreo (Fuente: China, Patente CN109514847A)</i>	132

Figura B.33 - Vista en perspectiva de impresora 3D FDM tipo delta con marco espacial (Fuente: U.S.A. Patente US20160332378A1)	133
Figura B.34 - Conjunto de accionamiento de perímetro circular Fuente: U.S.A. Patente US20160332378A1	133
Figura B.35 - Motor a pasos (Fuente: Amazon)	134
Figura B.36 - Control de posición de lazo abierto usando motor a paso (Fuente: Hughes & Drury - b)	135
Figura B.37 - Servomotor (Fuente: Alibaba)	135
Figura B.38 - Control a lazo cerrado de un Servomotor (Fuente: Hughes & Drury - a)	135
Figura B.39 - MKS GenZ (Fuente: Github)	137
Figura B.40 - PLC Siemens (Fuente: autycom.com)	138
Figura B.41 - FANUC Series 0i-MODEL F (Fuente: FANUC)	138
Figura B.42 - Funcionamiento de un rodamiento lineal de bolas (Fuente: Iigus.eu)	139
Figura B.43 - Guía lineal del tipo rueda (Fuente: directindustry.es)	140
Figura B.44 - Guía de bloque deslizante (Fuente: nsk.com)	140
Figura B.45 - Intefaz Fluidd (Fuente: Github)	145
Figura B.46 - Interfaz MainSail (Fuente: Github)	145
Figura B.47 - Interfaz Octoprint (Fuente: Github)	146
Figura B.48 - Herramienta Obico para impresión 3D remota (Fuente: Github)	148
Figura B.49 - Configuraciones de Impresoras 3D (Fuente: Sun et al.)	148
Figura B.50 - (a) eje XY cerrado y eje Z abierto y (b) ejes XYZ cerrado (Fuente: Kopets et al)	149
Figura B.51 - Configuración Delta (Fuente GrabCAD)	149
Figura B.52 - Configuración SCARA (Fuente: blogs.solidworks)	150
Figura C.1 - Dominio de Interfaz del sistema de impresión 3D (Fuente: Elaboración propia)	155
Figura C.2 - Dominio de Energía del sistema de impresión 3D (Fuente: Elaboración propia)	156
Figura C.3 - Dominio de Sensores del sistema de impresión 3D (Fuente: Elaboración propia)	157
Figura C.4 - Dominio de Control del sistema de impresión 3D (Fuente: Elaboración propia)	158
Figura C.5 - Dominio de Actuadores del sistema de impresión 3D (Fuente: Elaboración propia)	159
Figura C.6 - Dominio Mecánico del sistema de impresión 3D (Fuente: Elaboración propia)	160
Figura C.7 - Interacción entre el sistema de impresión y el sistema de extrusión de material (Fuente: Elaboración propia)	161
Figura C.8 - Concepto de solución 1, sistema con brazo robótico (Fuente: Elaboración propia)	167
Figura C.9 - CS1, módulo estructural (Fuente: Elaboración propia)	167
Figura C.10 - CS1, módulo theta (Fuente: Elaboración propia)	168
Figura C.11 - CS1, módulo radio (Fuente: Elaboración propia)	168
Figura C.12 - CS1, Montaje entre módulos (Fuente: Elaboración propia)	169
Figura C.13 - CS1, módulo interfaz (Fuente: Elaboración propia)	170
Figura C.14 - Concepto de solución 2, sistema delta (Fuente: Elaboración propia)	171
Figura C.15 - CS2, módulo estructural y módulo de movimiento lineal (Fuente: Elaboración propia)	172
Figura C.16 - CS2, módulo de movimiento de cabezal (Fuente: Elaboración propia)	172
Figura C.17 - CS2, módulo de electrónica (Fuente: Elaboración propia)	173

Figura C.18 – CS2, módulo carcasa y módulo interfaz (Fuente: Elaboración propia).....	174
Figura C.19 - Concepto de solución 3, sistema cartesiano (Fuente: Elaboración propia).....	175
Figura C.20 – CS3, módulo eje X (Fuente: Elaboración propia).....	176
Figura C.21 – CS3, módulos eje Z y eje Y (Fuente: Elaboración propia).....	176
Figura C.22 – CS3, detalle de funcionamiento de encoder (Fuente: Elaboración propia).....	177
Figura C.23 – CS3, cabezal extrusor (Fuente: Elaboración propia).....	177
Figura C.24 – CS3, módulo de Interfaz (Fuente: Elaboración propia).....	178
Figura D.1 – Caso 1: (a) Ubicación de esfuerzos (b) Von Mises (c) Deflexión (d) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia).....	185
Figura D.2 - Valores críticos caso 1: (a) Ubicación de esfuerzos (b) Von Mises (c) Deflexión (d) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia).....	186
Figura D.3 – Caso 2: (a) Ubicación de esfuerzos (b) Von Mises (c) Deflexión (d) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia).....	187
Figura D.4 - Valores críticos caso 2: (a) Ubicación de esfuerzos (b) Von Mises (c) Deflexión (d) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia).....	187
Figura D.5 - Distribución de fuerzas análisis de acople central y acople lateral central (Fuente: Elaboración propia).....	188
Figura D.6 - Validación de acople lateral central (a) Von Mises (b) Deflexión (c) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia).....	189
Figura D.7 - Validación de acople central (a) Von Mises (b) Deflexión (c) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia).....	189
Figura D.8 - Distribución de fuerzas análisis de acoples laterales (Fuente: Elaboración propia).....	190
Figura D.9 - Validación de acople lateral (a) Von Mises (b) Deflexión (c) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia).....	190
Figura E.1 - Gráfica de perfil de movimiento (Fuente: Hiwin.de).....	192
Figura E.2 - Coincidencias de perfiles lineales Hiwin (Fuente: Hiwin.de).....	192
Figura E.3 - Filtro de ancho de 20 mm para selección de guía lineal (Fuente: Hiwin.de).....	192
Figura G.1 - Diagrama de flujo general (Fuente: Elaboración propia).....	195
Figura G.2 - Raspberry (DFE) (Fuente: Elaboración propia).....	196
Figura G.3 - Navegar Interfaz (DFE) (Fuente: Elaboración propia).....	196
Figura G.4 - Encoder posicionamiento y velocidad (Fuente: Elaboración propia).....	197
Figura G.5 - Impulsar motores (DFE) (Fuente: Elaboración propia).....	197
Figura G.6 - Operaciones de la impresora (DFE) (Fuente: Elaboración propia).....	198
Figura H.1 - Adaptación del trabajo del profesor Chyun a la presente tesis (Fuente: Elaboración propia)...	199
Figura H.2 - Simulación de impresión de una esfera de diámetro máximo (Fuente: Elaboración propia).....	200
Figura H.3 - Gráficos en tiempo real de parámetros a analizar (Fuente: Elaboración propia).....	201
Figura H.4 - Análisis de parámetros obtenidos mediante simulación (Fuente: Elaboración propia).....	202
Figura H.5 - Gráfica de velocidad vertical durante impresión (Fuente: Elaboración propia).....	202
Figura H.6 - Gráfica de torque de motores durante impresión (Fuente: Elaboración propia).....	203
Figura H.7 - Gráfica de potencia de motores durante impresión (Fuente: Elaboración propia).....	203

<i>Figura I.1 - Configuración de componentes para validación de interfaz Web (Fuente: Elaboración propia)</i>	204
<i>Figura I.2 - Instalación de Octoprint en al Raspberry (Fuente: Elaboración propia)</i>	205
<i>Figura I.3 - Configuración de red, Raspberry Pi (Fuente: Elaboración propia - Screenshot)</i>	205
<i>Figura I.4 - Configuración de impresora en Octoprint (Fuente: Elaboración propia - Screenshot)</i>	206
<i>Figura I.5 - Conexión física entre Raspberry e impresora de prueba (Fuente: Elaboración propia)</i>	206
<i>Figura I.6 - Interfaz Web remota Octoprint obtenida (Fuente: Elaboración propia - Screenshot)</i>	207
<i>Figura I.7 - Instalación de Obico en Octoprint (Fuente: Elaboración propia - Screenshot)</i>	207
<i>Figura I.8 - Impresión de prueba para validación de Obico (Fuente: Elaboración propia - Screenshot)</i>	208
<i>Figura I.9 - Proceso de impresión y monitoreo remoto (Fuente: Elaboración propia - Screenshot)</i>	208
<i>Figura I.10 - Resultado final de impresión mediante la interfaz Web (Fuente: Elaboración propia - Screenshot)</i>	209

ÍNDICE DE TABLAS - ANEXOS

<i>Tabla A.1 - Ejemplos de refugios tradicionales</i>	106
<i>Tabla A.2 - Comparación de costos, método de construcción tradicional e impresión 3D</i>	106
<i>Tabla B.1 - Comparación de impresiones 3D Cloner DH Printer y Rostock Max V2 Printer</i>	120
<i>Tabla B.2 - Tabla de aplicaciones prácticas [3DPC] (Fuente: Elaboración propia)</i>	123
<i>Tabla B.3 - Comparación entre características de Servomotor y Motor a paso</i>	136
<i>Tabla B.4 - Comparación entre características de tipos de Controladores</i>	138
<i>Tabla B.5 - Comparación entre tipos de guías lineales</i>	140
<i>Tabla B.6 - Comparación entre las opciones de Firmware</i>	143
<i>Tabla B.7 - Comparación entre Interfaces Web para impresión 3D remota</i>	147
<i>Tabla C.1 - Entradas del Black Box Diagram del sistema de impresión</i>	153
<i>Tabla C.2 - Salidas del Black Box Diagram del sistema de impresión</i>	154
<i>Tabla E.1 - Parámetros de entrada para la selección de guía lineal Hiwin (Fuente: Elaboración propia) ...</i>	191
<i>Tabla F.1 - Condiciones de funcionamiento, guías lineales y sistema de impresión (Fuente: Elaboración propia)</i>	193
<i>Tabla F.2 - Selección de correa síncrona Optibelt (Fuente: Elaboración propia)</i>	193
<i>Tabla H.1 - Parámetros a validar mediante simulación (Fuente: Elaboración propia)</i>	199

ANEXO A: ANTECEDENTES AL DISEÑO

A.1. Justificación

Dada la necesidad de abordar los desafíos persistentes en la reconstrucción post-desastre natural en áreas remotas de Perú, se explora el estado actual de la tecnología relacionada a la propuesta de solución de un sistema de impresión 3D transportable y mediante ello, explorar los motivos por los cuales el presente proyecto de tesis no solo es necesario, es también beneficioso en el ámbito social y desarrollo tecnológico. Los avances tecnológicos han sido identificados como una posible solución para apoyar y fortalecer las operaciones de gestión de desastres. La manufactura aditiva de construcción transformará la industria de la construcción, desde edificios de gran altura hasta refugios temporales. Se cree que la tecnología 3DP implementada proporcionará hogares resistentes a desastres de manera más eficiente que las casas tradicionales, lo que podría ser beneficioso en casos de inundaciones, incendios, huracanes y otros desastres naturales (Subramanya & Kermanshachi, 2022). Al comparar el proceso de impresión 3D de construcción con procesos de construcción convencionales, muestra ser beneficioso en las siguientes áreas:

Ahorro de tiempo y productividad:

La velocidad a la que la tecnología de impresión 3D puede crear una estructura está aumentando con investigaciones adicionales y una implementación más amplia. Si el área afectada por el desastre cuenta con una planta de impresión de gran capacidad, es posible construir casas y refugios completos en un solo día (Subramanya & Kermanshachi, 2022). Las duraciones de construcción más cortas, incluida un inicio más temprano de la fase de operaciones y generación de ingresos, menos gastos generales y más recursos disponibles para otros proyectos. La construcción avanza considerablemente más rápida que con métodos de construcción convencionales. Por ejemplo, fue demostrado que la impresión 3D permitió la producción de una estructura pared en 65 h en comparación con las 100 h del método de construcción de estructuras convencionales (Bazli et al., 2023).

Eficiencia en costos:

Reducción drástica de costos de materiales y mano de obra. Mayor eficiencia de los trabajadores in situ (Ghaffar et al., 2018). Se predice que el costo de mano de obra y materiales se puede reducir en un 80% o en un 60% según (Bazli et al., 2023). Los costos de construcción de refugios para víctimas de desastres naturales mediante impresión 3D pertenecen al rango de refugios tradicionales. Información obtenida de la empresa WinSun muestra que para la construcción de una estructura de aproximadamente 200 m² es de USD 4800, sin tener en cuenta precios de transporte al lugar de construcción o reconstrucción. En la Tabla A.1 se comparan los precios de refugios tradicionales. Información adaptada de (Gregory et al., 2016).

Tabla A.1 - Ejemplos de refugios tradicionales
(Fuente: Gregory et al.)

Refugio	Costo	Tiempo de ensamblaje	Estimado tiempo de vida
Bambú (2009)	USD 623	3 a 4 días	1 a 5 años
Madera (2009)	USD 898	2 días	6 a 12 meses
Madera (2007)	USD 597	2 días	12 meses
Acero (2010)	USD 6339	2 días	24 meses
Acero (2005)	USD 10423	3 días	5 años

La Tabla A.2 muestra una comparación de costos entre el enfoque convencional e impresión 3D para construir un muro con hormigón de 40 MPa. Emplear la impresión 3D para construir Los componentes de hormigón casi pueden eliminar la necesidad de encofrado y los costes laborales. Estimaciones aproximadas sugieren que el costo de los encofrados puede representar entre el 35 y el 60% del costo total de la construcción con concreto (Bazli et al., 2023).

Tabla A.2 - Comparación de costos, método de construcción tradicional e impresión 3D
(Fuente: Bazli et al.)

Ítem	Método tradicional			Impresión 3D		
	Costo (\$/m ³)	Cantidad (m ³)	Precio (\$)	Costo (\$/m ³)	Cantidad (m ³)	Precio (\$)
Concreto	200	150	30000	250	150	37500
Bombeo	20	150	3000	20	150	3000
Mano de obra	100	150	3000	-	-	-
Encofrado	100	1500	150000	-	-	-
Total			186000			40500

Sin embargo, en el caso de construcción de refugios; generalmente carecen de instalaciones, servicio como saneamiento, alcantarillado, carreteras, electricidad, etc. Por lo tanto, toda la infraestructura de tales refugios exige una notable cantidad de capital que los hace costosos de producir para los países menos desarrollados y en desarrollo (Subramanya & Kermanshachi, 2022).

Amigable con el medio ambiente:

Más de un tercio de los residuos en vertederos proviene de la industria de la construcción, en comparación con la cantidad mínima de residuos que deja la impresión 3D de construcción. Incluso, los materiales desperdiciados en los métodos tradicionales, como los componentes rotos, pueden ser reutilizados. Además, se puede dirigir investigación de materiales eficientes en energía, biodegradables y aislantes (Subramanya & Kermanshachi, 2022). En la manufactura aditiva, los materiales se adaptan al resultado creado, produciendo mínimo desperdicio. Además, la impresión 3D utiliza materias primas como arena, que pueden reutilizarse fácilmente. De acuerdo a estimaciones, la impresión 3D reduce los residuos de construcción entre un 30 y 60%. Además, para las comunidades que utilizan agua de

perforación es importante una gestión inadecuada de residuos podría contaminar los recursos hídricos de las comunidades (Bazli et al., 2023).

Transporte y logística:

Con esta tecnología se es capaz de imprimir secciones modulares livianas que pueden ser fácilmente instaladas en el lugar de destino. Encofrados y secciones de pared fabricadas, que luego se unen y llenan con materiales disponibles localmente para crear paredes y refugios de tamaño completo. Los componentes pueden ser transportados al lugar donde se necesitan, o impresos in situ (Subramanya & Kermanshachi, 2022).

Se tiene, además, beneficios como durabilidad, por ejemplo, se ha desarrollado una estructura de concreto impresas en 3D que pueden resistir terremotos a escala de Richter 8,0 (Clayre Scott, 2016). Flexibilidad en el diseño y eliminación de costosos encofrados. La manufactura aditiva es más relevante para las industrias donde la demanda de personalización, flexibilidad, complejidad del diseño, y recorte de los elevados costes de transporte para la entrega de productos finales, es crucial. Por lo tanto, hace de la industria de la construcción, un potencial principal beneficiario de la próxima revolución de la Industria 4.0. El concepto de construcción por capas es un proceso que ya ha sido practicados desde hace mucho tiempo en el sector de la construcción, como la convencional técnica de colocación de ladrillos. La verdadera innovación para la construcción consiste en combinar nuevos materiales altamente eficientes y sostenibles. junto con las herramientas más avanzadas de la era digital (Ghaffar et al., 2018).

ANEXO B: ESTADO DEL ARTE

B.1. Sistemas de impresión desarrollados en la PUCP

En el año 2020, la PUCP, en asociación con la UDEP y la universidad de Drexel, ganó un fondo de ProCiencia por 1 millón de soles para el desarrollo del proyecto de tecnologías de impresión 3D aplicada a la construcción (Departamento académico de Ingeniería, 2022). Se realiza la descripción de los sistemas de impresión desarrollados en la PUCP.

B.1.1. Colibri

Impresora 3D de materiales de construcción, se desarrolla para abrir el camino a la formulación de nuevos materiales para impresión combinando el uso de aglutinantes industriales con combinaciones de suelo tradicional o suelo estabilizado con aditivos orgánicos. En este contexto, se desarrolló Colibri, un prototipo de impresora para fines de construcción capaz de construir sólidos dentro de un metro cúbico de espacio (Departamento académico de Ingeniería, 2023). Impresora de dimensiones 1.5m de ancho, 1.5m de largo y 2.5m de altura y mostrada en la Figura B.1. De acuerdo a documentos de cotizaciones del proyecto, este asciende a aproximadamente S/. 48 000.



Figura B.1 - Impresora COLIBRI
(Fuente: Departamento-Ingeniería PUPC)

B.1.2. Wasitek

Entre los años 2019 y 2021 se trabajó en el desarrollo de capacidades en el control realimentado de posición del cabezal impresor y las operaciones de formado junto con la integración del código, software e interfaces de usuario a los estándares de geometría y fabricación 3D (CAD/CAM) de la industria. Este innovador proyecto, consiste en un sistema de construcción robótico para viviendas en caso de desastre. Esta es la primera impresora 3D de material de construcción a gran escala que se va a implementar en el país y la más grande desarrollada por una universidad en la región de Latinoamérica (Departamento académico de Ingeniería, 2023). En la Figura B.2, se muestra a la Wasitek, la cual ocupa un espacio de 125m² y está ubicado en el patio de materiales del Laboratorio de Estructuras de la PUCP.



Figura B.2 - Impresora Wasitek
(Fuente: Departamento-Ingeniería PUPC)

B.2. Modelos comerciales

En esta sección se enfoca en los modelos comerciales existentes, tanto aquellos dedicados específicamente a la construcción como los utilizados en laboratorios. Se realiza una comparativa de las características más importantes de las compañías Bemore 3D, Wasp, Constructions 3D y Apis Cor. Los modelos se presentarán en base a su configuración, cartesiana, delta o brazo robótico. Finalmente se presentará por tipo de configuración, donde se pueda contrastar las diferentes características más importantes de los modelos analizados.

B.2.1. Sistemas cartesianos

Los modelos comerciales de impresoras 3D de construcción basados en sistema cartesiano utilizan un sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) para guiar el movimiento del cabezal de impresión. Estas impresoras crean modelos tridimensionales mediante la deposición de material capa por capa, desplazando el cabezal en líneas rectas en los ejes X, Y y Z para construir la forma deseada. Este enfoque ofrece precisión en la impresión y es la configuración más usada en impresoras de construcción y de escritorio. Se analizan modelos ofrecidos por las empresas Bemore3D y Constructions3D.

Bem Pro

Impresora de construcción, cuyo montaje y desmontaje se realiza sin la necesidad de usar grúas [5h y tres operarios]. Es fácil de transportar [un contenedor marítimo de 40 pies] y sencillo mantenimiento. Gracias dispositivo con eje Y infinito, es decir. Para continuar imprimiendo, se puede desplazar la máquina en dirección de las guías (Bemore3D official website, 2023). En la Figura B.3 se muestra un screenshot del video "Constructive system 3D Printing by BE MORE 3D". Donde se muestra la configuración de la impresora Bem Pro (Be More 3D Community, 2020).



Figura B.3 - Modelo Bem Pro
(Fuente: Bemore 3D)

Especificaciones Técnicas:

- Dimensiones: 12.3 m x 5 m x 22 m [Largo x Alto x Ancho]
- Volumen de impresión: 9.5 m x 3.5 m x 20 m [X, Z, Y]
- Rango de velocidades: 2 cm/s - 20 cm/s
- Espesor de muros: 4 cm - 18 cm
- Tolva de almacenaje de material: 45 L

Bem Pro Bigger

Impresora 3D cartesiana de materiales de construcción, tiene una configuración tipo XYZ Cerrado, capaz de imprimir dos plantas de altura sin esfuerzo extra, pues es muy similar el modelo Bem Pro, pero con doble altura (Bemore3D oficial website, 2023). Cuenta también con la configuración de “eje Y infinito”. Hasta 22m en línea sin necesidad de desmontar la máquina. En la Figura B.4 se muestra el modelo “Bigger”.



Figura B.4 - Modelo Bem Pro Bigger
(Fuente: Bemore 3D)

Especificaciones Técnicas:

- Dimensiones: 12.3 m x 5 m x 22 m [Largo x Alto x Ancho]
- Volumen de impresión: 9.5m x 7 x 20m [X, Z, Y]
- Rango de velocidades: 2 cm/s - 20 cm/s
- Espesor de muros: 6 cm - 21 cm
- Tolva de almacenaje de material: 45 L

Modelo Cube

Impresora 3D de concreto, de configuración cartesiana. Perfecta para grandes laboratorios de investigación y experimentar con el desarrollo de nuevos materiales y el diseño de nuevos sistemas estructurales para la construcción 4.0 (Bemore3D oficial website, 2023). Se muestra la configuración del modelo en la Figura B.5.



Figura B.5 - Modelo Cube
(Fuente: Bemore 3D)

Especificaciones Técnicas:

- Volumen de impresión: 3 m x 5 m x 4 m [X, Z, Y]
- Rango de velocidades: 2 cm/s - 15 cm/s
- Espesor de muros: 2cm - 6cm
- Tolva de almacenaje de material: 30 L

Modelo Smart

Impresora 3D de materiales de construcción, cartesiana de una configuración tipo del tipo XYZ cerrado. Enfocado a uso en laboratorios de ensayos, universidades, centros tecnológicos. Útil para aplicaciones de central de fabricación y estudio de materiales (Bemore3D oficial website, 2023). Se muestra en la Figura B.6 el modelo Smart, donde se aprecia la escala de la impresora.

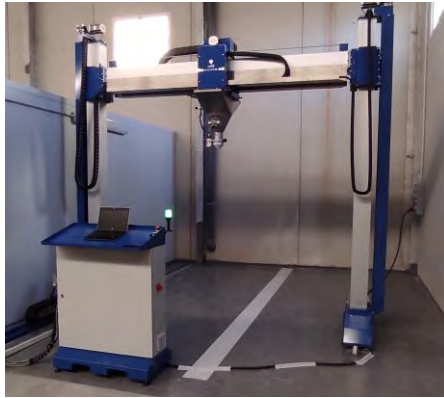


Figura B.6 - Modelo Smart
(Fuente: Bemore 3D)

Especificaciones Técnicas:

- Dimensiones: 2.5 m x 2 m x 6 m [Largo x Alto x Ancho]
- Volumen de impresión: 2 m x 1.5 m x 3 m [X, Z, Y]
- Rango de velocidades: 2 cm/s - 15 cm/s
- Espesor de muros: 2cm - 6cm
- Tolva de almacenaje de material: 30 L

MiniPrinter EDU

Impresora 3D de materiales de construcción, de configuración cartesiana. Diseñado para responder a la necesidad de los sectores de educación e investigación que buscan desarrollar las habilidades de construcción de sus estudiantes y equipos con respecto a las herramientas digitales 3D. La Mini Impresora mostrada en la Figura B.7, permite aprovechar las posibilidades de la impresión 3D de grandes estructuras dentro de la comodidad de un formato pequeño. Imagen obtenida de la web oficial de la empresa (Constructions 3D, 2023b)



Figura B.7 - MiniPrinter EDU
(Fuente: Constructions 3D)

Especificaciones Técnicas:

- Volumen de impresión [XYZ]: 0.6 m x 0.5 m x 0.6 m
- Velocidad de impresión: 15 cm/s
- Alimentación: 220V [single-phase]

- Compra de paquete: Impresora, sistema de bombeo, software, capacitación y material
- Sistema de bombeo: Bomba de pulverización, 230V

MiniPrinter PRO

Impresora 3D con configuración mecánica del tipo Gantry, mostrada en la Figura B.8. Cuenta con una boquilla de 10 a 30 mm de diámetro. Dirigido a profesionales que buscan precisión y repetibilidad. Es versátil, se adapta a las necesidades de los sectores de la construcción, la arquitectura, el diseño y la investigación. Imagen rescatada de la página web oficial de la empresa (Constructions 3D, 2023c)



Figura B.8 - MiniPrinter PRO
(Fuente: Constructions 3D)

Especificaciones Técnicas:

- Dimensiones de la impresora: 2.1 m [Ancho] x 1.8 m [Largo] x 2.1 m [Alto]
- Volumen de impresión [XYZ]: 1.2 m x 1.2 m x 1.2 m
- Velocidad de impresión: hasta 25 cm/s
- Alimentación: 230 [single-phase], 1.5 kW
- Compra de paquete: impresora, sistema de bombeo personalizado, software y material

B.2.2. Sistemas delta

Los modelos comerciales de impresoras 3D de materiales de construcción de sistema delta son diseñados para imprimir estructuras de concreto mediante un sistema de brazos móviles en forma de un robot delta. Estas impresoras utilizan una boquilla para depositar capas de concreto de manera precisa y controlada, lo que permite la construcción de objetos y estructuras de gran tamaño de forma rápida. En este apartado se analizan modelos ofrecidos por la empresa 3DWasp, que se especializa en impresoras de configuración delta.

BigDelta WASP 12MT

Impresora 3D de materiales de construcción, de configuración delta, cuya altura es de aproximadamente 12m. Con componentes de longitud menor a 3m para fácil transporte. Cuenta con pesos de contrarresto para que el sistema esté balanceado. Esto permite reducir mucho el consumo, manteniéndolos alrededor de 1 kilovatio. Las aplicaciones de este modelo son las edificaciones de viviendas y la recuperación de

restos o ruinas arqueológicas. En la Figura B.9 se puede apreciar la escala y configuración del modelo. Imagen rescatada de la web oficial de la empresa (3d Wasp, 2023a)



Figura B.9 - Modelo BigDelta WASP 12MT
(Fuente: 3dWasp)

Especificaciones Técnicas:

- Dimensiones: 12 m [Altura], 7 m [Amplitud], con base hexagonal
- Alimentación: 220VAC, 60VAC [Motor y componentes electrónicos alimentados con energía solar]
- Extrusor: Se puede mover al extrusor con una carga de 0 a 200 kg, recomendable uso de 40 a 50 kg para evitar vibraciones
- Materiales: Mezclas que contienen materiales de fibra larga. mezclas sintéticas compuestas por materiales cementosos a base de cal junto con vidrio soplado o arcilla expandida Poliestireno Añadido a una mezcla cementosa para disminuir su peso
- Velocidades: Velocidad máxima de hasta 40 cm/s, depende totalmente de la cantidad de material en el extrusor.

Delta WASP 3MT CONCRETE

Sistema de impresión de concreto, con configuración delta a escala de laboratorio, con una altura de 3m. Tiene un sistema de alimentación continua mediante una bomba de mortero para cemento, con una carga de 80L, a una presión máxima de 35 bar y un motor de 2200 W. Cuenta con una boquilla de 4, 6, 8 hasta 30 mm de diámetro. Cuenta con certificación CE [producto cumple con los estándares de salud, seguridad y medio ambiente establecidos por la Unión Europea]. De compatibilidad con los incentivos Industria 4.0. Tiene incorporada una interfaz táctil con pantalla TFT más grande y una cámara a bordo para monitoreo y time-lapse (3d Wasp, 2023c). Destinado para Universidades y centros de investigación. La Figura B.10 rescatada desde la web oficial de la empresa, muestra el modelo a escala de laboratorio.



Figura B.10 - Modelo Delta Wasp 3MT concrete
(Fuente: Constructions 3D)

Especificaciones Técnicas:

- Dimensiones: 2.15 m [Largo] x 2.35 m [Ancho] x 3.05 m [Altura]. Peso de 350 kg
- Volumen de impresión: 1 m [Diámetro], 1 m [Altura]
- Alimentación: 220/240 VAC 50/60 Hz, Potencia a consumir: 1200 - 3400 W
- Materiales: Hormigón reforzado con fibras (fibras poliméricas, arcilla, porcelana, gres, mezclas de tierras con fibras naturales. Estructura y tapa de aluminio, acero pintado. Cama de placa MDF sobre la tarima. Movimientos Ruedas de nylon sobre correderas de aluminio
- Velocidades: 20 cm/s [Velocidad de impresión], 20 cm/s [Velocidad de desplazamiento]
- Ejes de motores: Motores a paso

B.2.3. Sistemas con brazo robótico

Estos sistemas utilizan un brazo robótico o una estructura tipo grúa para depositar capas de concreto de manera precisa y controlada. Los sistemas de construcción con brazo robótico presentan dimensiones compactas, además son fáciles de transportar, lo que hace que los costes de implementación sean casi nulos. A comparación de los sistemas de construcción cartesiano y delta son enormes y voluminosos-

Crane WASP

Sistema modular de impresión 3D colaborativo de materiales de construcción. Reinterpreta las clásicas grúas de construcción. Está compuesto por una unidad principal de impresión que se puede ensamblar en diferentes configuraciones dependiendo del área de impresión. Cuenta con una boquilla de 18 a 30 mm de diámetro. Permite a los artistas y diseñadores materializar sus conceptos creativos con detalles intrincados y formas únicas (3d Wasp, 2023b). Además, se puede emplear en investigación y desarrollo para explorar nuevas posibilidades de materiales y avanzar en la frontera de la fabricación aditiva. En la Figura B.11 se muestra la configuración del tipo grúa del modelo. Imagen rescatada de la web oficial de la empresa.



Figura B.11 - Modelo Crane WASP
(Fuente: 3dWasp)

Especificaciones Técnicas:

- Dimensiones: 6.3 m [Diámetro], 4 m [Altura]. Con un peso de 150 kg
- Volumen de impresión: Dependiendo a las configuraciones, se obtienen áreas de impresión mayores a 50m² y 100m² y una altura de 3m
- Alimentación: 220/240 VAC 50/60 Hz, Potencia a consumir: 1500 W
- Extrusor: Altura mínima de capa de 9 mm
- Materiales: Materiales basados en la tierra Mortero, hormigón, geo-polímeros. Marcos y perfiles de acero y aluminio
- Velocidades: 30 cm/s [Velocidad de impresión], 50 cm/s [Velocidad de desplazamiento]
- Interfaz: Control remoto inalámbrico

MaxiPrinter

Sistema de impresión 3D de materiales de construcción. Diseñado para una mayor transportabilidad. Así como la robustez de la máquina derivada de su sistema hidráulico la convierten en la herramienta de automatización de la construcción más adecuada para la impresión en un sitio. Incluye además un contenedor de 20 pies con certificado marítimo, destinado a transportar todo el equipo y a almacenarlo de las duras condiciones climáticas (Constructions 3D, 2023a). Cuenta con 5 grados de libertad y tiene la forma mostrada en la Figura B.12, la cual prioriza el movimiento del brazo extrusor. Imagen obtenida de la página web de Constructions 3D.



Figura B.12 – MaxiPrinter
(Fuente: Constructions 3D)

Especificaciones Técnicas:

- Dimensiones de la impresora: 0.85 m [Ancho] x 3.0 m [Largo] x 1.9 m [Alto], en modo compacto
- Volumen de impresión [XYZ]: Diámetro interno de 6 m, diámetro externo de 13.5 m a una altura máxima de 3.3 m
- Velocidad de impresión: 20 cm/s
- Alimentación: 380 V [Trifásico]
- Compra de paquete: Impresora Maxi + Kit Silo + Sistema de bombeo + Pantalla de control remoto + Software + Rampas de carga + Capacitación
- Sistema de bombeo: Sistema de bombeo automatizado con actualización de datos

Frank, Apis Cor

“Frank” es un sistema de impresión pequeño, móvil y fácil de operar. Si bien es convenientemente compacto, puede imprimir edificios de hasta dos pisos como se muestra en la Figura B.13. Con una cantidad ilimitada de metros cuadrados. Aún mejor, "Frank" no requiere ensamblaje adicional; listo para trabajar minutos después de su llegada al sitio de impresión (Apis Cor Official Website, 2022). Requiere de dos operadores y es necesario realizar una vigilancia continua durante su funcionamiento y está montado sobre una plataforma móvil con control remoto que permite mover la plataforma sobre cualquier superficie como suelo, arena o césped.



Figura B.13 – Frank 3D Printer
(Fuente: Apis Cor)

Especificaciones Técnicas:

- Clasificaciones IP65 e IP67 de los elementos operativos indican un alto nivel de protección contra el polvo y la humedad, y el IP67 ofrece un nivel adicional de protección contra la inmersión temporal en agua.
- Suministro eléctrico AC 120 a 220 V (monofásico, 50 o 60 Hz), potencia 4 KWatts.
- Altura máxima de impresión: 3.2m
- Alcance máximo de brazo, 5.5m
- Dimensiones plegado 4,5 m largo x 1,2 m ancho x 1,7 m alto
- Peso 1450 kg
- Velocidad de impresión: 2m/min o 3.3cm/s

B.3. Artículos académicos

Se realiza un análisis detallado de los artículos académicos e investigaciones relacionadas con la impresión 3D a diferentes escalas: escritorio, laboratorio y construcción. El objetivo es obtener un sustento académico sólido para basar las decisiones de diseño, teniendo en cuenta la lista de requerimientos. Se presenta una tabla comparativa resumiendo la propuesta de valor de cada artículo académico.

B.3.1. Development of a Novel 3D Spherical Printer

Dadas las oportunidades y áreas sin explorar en las que se puede aprovechar la tecnología de la impresión 3D. Se aprovechan los notables avances en la industria de la impresión 3D y los procesos que permiten imprimir una variedad de objetos, desde máquinas hasta prendas de vestir, alimentos y órganos vivos (Tivadar Demjen et al., 2019). El artículo propone una innovadora impresora 3D cuya configuración se puede apreciar en el modelo CAD de la Figura B.14 (a) y el modelo cinemático mostrado en la Figura B.14 (b), la cual utiliza una estructura mecánica esférica, con el objetivo de lograr una impresión más precisa y eficiente en superficies esféricas.

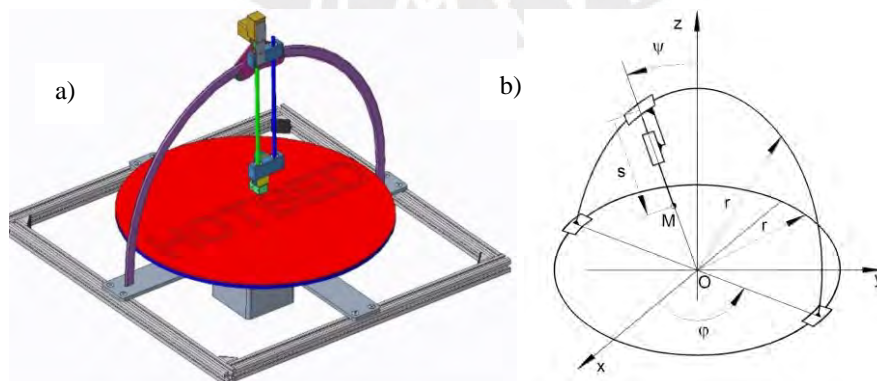


Figura B.14 – (a) Modelo CAD de la impresora esférica, (b) modelo cinemático de la impresora
(Fuente: Tivadar Demjen et al.)

Se propone además en el diseño, la incorporación de un plato giratorio con una estructura superior.

Plato giratorio: Consiste en una plataforma circular con una cama caliente. Impulsado por un motor paso a paso para un movimiento angular preciso. Está montado a la base de la estructura superior mediante tornillos de máquina.

Estructura Superior: Cuenta con un arco de acero para la traducción curvilínea, el motor paso a paso en el transportador impulsa una cuerda enrollada sobre el arco. La traslación radial de la extrusora se da a través de un control deslizante, mientras que el mecanismo deslizante con varilla roscada permite un movimiento sin obstrucciones.

B.3.2. Comparative Study of Cartesian and Delta 3D Printers on PLA Parts

Se lleva a cabo una investigación comparativa entre impresoras cartesianas y delta, mostradas en la Figura B.15. Con el fin de incrementar el entendimiento acerca de la fabricación aditiva estas distintas configuraciones. El objetivo del artículo es evaluar el desempeño de la impresión de una pieza de prueba, para lo cual se generaron tres muestras utilizando las impresoras "3D Cloner DH Printer" y "Rostock Max V2 Printer" en la Figura B.16. Posteriormente, se compararon las muestras en función de los siguientes parámetros: acabado, tiempo de producción, masa y dimensiones (Tivadar Demjen et al., 2019).

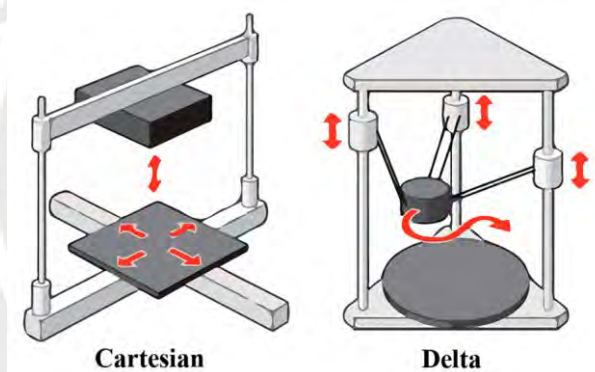


Figura B.15 - Configuración cartesiana y delta
(Fuente: Betina et al.)



Figura B.16 - Cloner DH Printer y Rostock Max V2 Printer
(Fuente: Betina et al.)

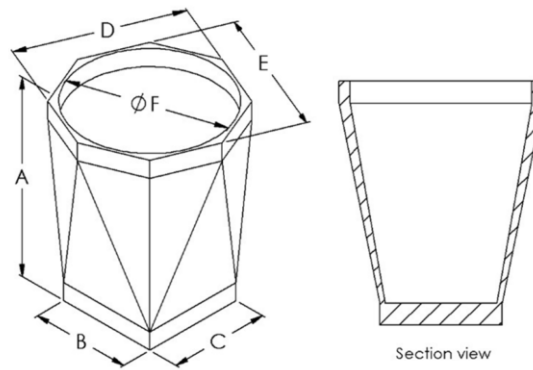
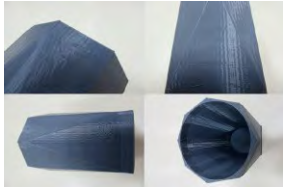
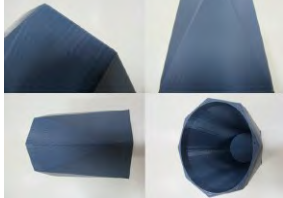


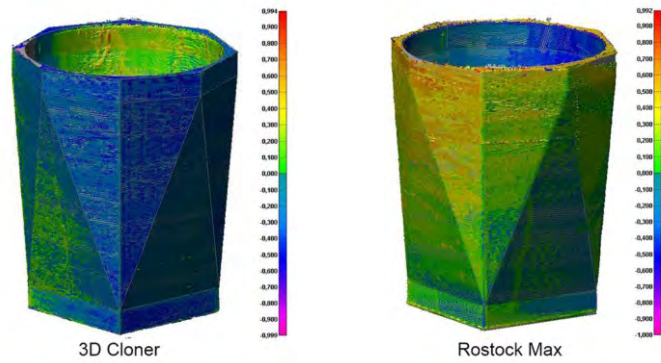
Figura B.17 - Modelo de pieza a evaluar
(Fuente: Betina et al.)

Se tienen los siguientes resultados y finalmente, se presenta la Tabla B.1 comparativa, donde se encuentran resumidos los resultados estudiados en el artículo.

- Las impresoras delta se mueven de manera más compleja y presentan algunas ventajas sobre las cartesianas, como velocidad y capacidad de construcción rápidas, mayor volumen de producción, menor inercia del ensamblaje de extrusión, menos partes móviles, cerramiento más fácil y mejor control de temperatura.
- De acuerdo con el análisis comparativo, se puede concluir que la impresora Rostock Max V2 ofrece un acabado superficial de mayor calidad. En términos de velocidad de construcción, el 3D Cloner fue aproximadamente un 10% más rápido que la primera parte en ambas impresoras.
- El 3D Cloner obtuvo una media un 5% valor de masa, sin embargo, no es un resultado significativo debido a la gran desviación estándar en las piezas fabricadas.
- Se utilizó filamento de PLA, de 1.75mm de diámetro. Boquillas de 0.4mm de diámetro, con un infill del 50%, espesor de capa de 0,3mm y velocidad de impresión 60mm/s

Tabla B.1 - Comparación de impresiones 3D Cloner DH Printer y Rostock Max V2 Printer
(Fuente: Elaboración propia)

Impresora	3D Cloner DH Printer	Rostock Max V2 Printer
Imágen		
Generación del G-Code	Slic3r Software	Matter Control Software
Tiempo [Promedio]	8h 31min	5h 50min
Exactitud de las dimensiones [Promedio]	0.5% mayor al modelo CAD	1.1% mayor al modelo CAD



B.3.3. Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities

Se analiza la impresión en 3D a gran escala en la construcción de estructuras "3D printing concrete (3DPC)". Se clasifican en tres categorías: elementos impresos en 3D, encofrados impresos en 3D y construcciones monolíticas en el lugar. Además, se abordan casos de construcción 3DPC a gran escala. Los elementos de impresión 3D implican la preparación y el transporte de hormigón, la impresión de elementos prefabricados, el transporte de elementos y el montaje de elementos en sitio (Xiao et al., 2021). El siguiente diagrama muestra la clasificación del 3DPC, que se divide en impresión de elementos estructurales cuyo proceso de fabricación se muestra en la Figura B.18 (a). La impresión de encofrados en la Figura B.18 (b). Finalmente, en la Figura B.18 (c), el proceso de impresión monolítica en el lugar de trabajo.

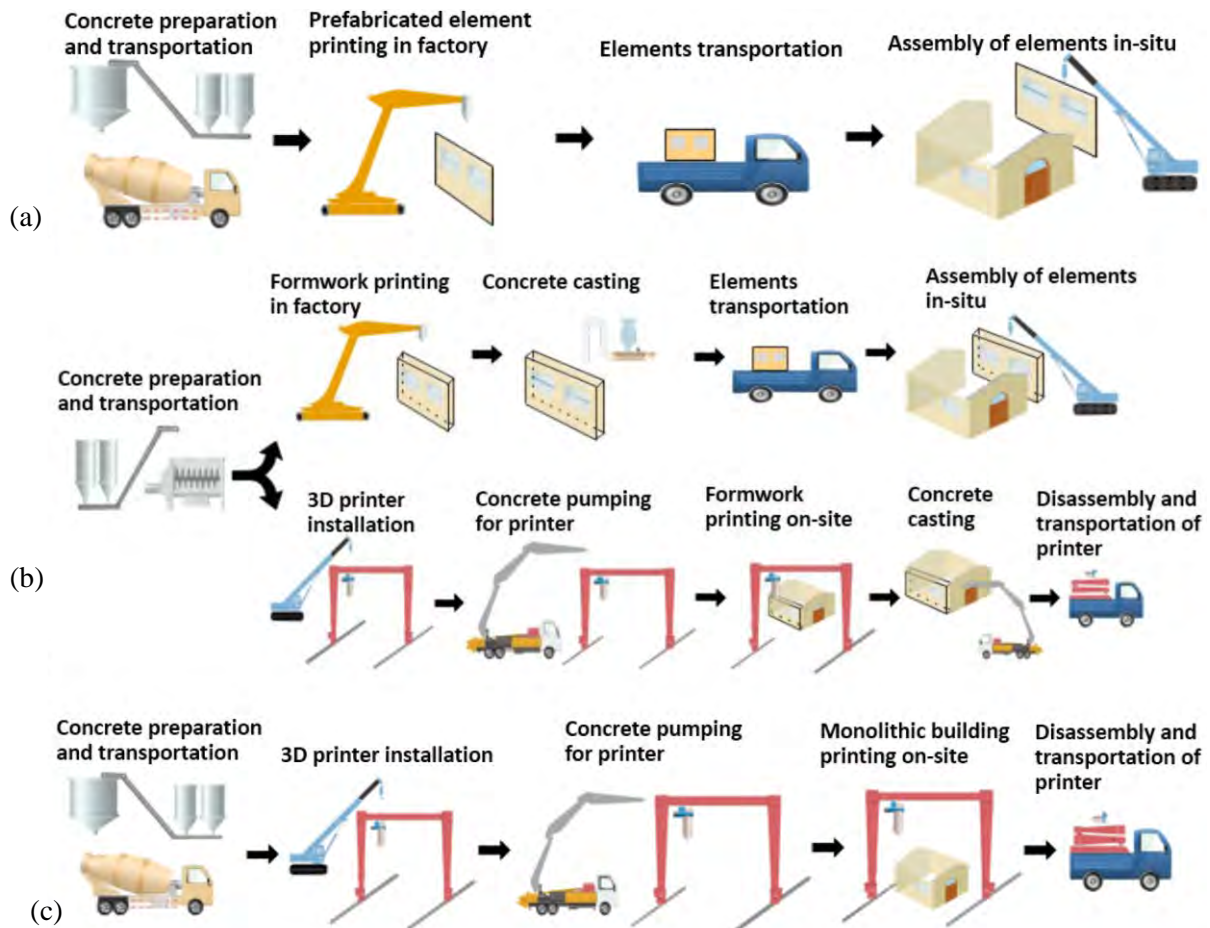


Figura B.18 (a) Impresión de elementos, (b) Impresión de encofrados, (c) Impresión in situ
(Fuente: Xiao Jji GZhang Y et al.)

Se presentan, además, aplicaciones prácticas propuestas en el artículo en la Tabla B.2, a partir de la tecnología de hormigón de impresión 3D a gran escala. Todas las imágenes y descripciones, se obtienen del artículo. Es importante tener en cuenta estas aplicaciones pues el sistema de impresión a diseñar, funcionará mediante impresión in situ. La gran variedad de aplicaciones de impresión que se le puede dar, es un enfoque importante, pues con el desarrollo de estas aplicaciones se aborda la problemática.

Tabla B.2 - Tabla de aplicaciones prácticas [3DPC] (Fuente: Elaboración propia)

Aplicación práctica	Imagen	Descripción
Viga RC [Reinforcement Concrete]		<p>Viga impresa en 3D con sección transversal variable. Cuyos segmentos fueron impresos de manera separada y luego ensamblados en un elemento único. Esto es con el fin de optimizar su producción, transporte e instalación,</p>
Edificio de hormigón impreso en 3D		<p>Fabricado terminado en Nanjing. Este edificio es una estructura de marco de hormigón armado con paredes externas impresas a 3D, prefabricadas y ensambladas en el lugar. Elementos estructurales como columnas y vigas fueron usados de manera tradicional,</p>
Segmentos de pared impresos en fábrica		<p>Segmentos de pared del Edificio de hormigón impreso en 3D. Impresos en fábrica y transportados al lugar de construcción. La instalación se realiza junto a columnas de jaula reforzada.</p>
Impresión de encofrado permanente		<p>La Universidad Tecnológica Hebei desarrolló un método de construcción para estructura con encofrado permanente. Se tiene el encofrado impreso permanente, al cual se le coloca una jaula de refuerzo a la que finalmente se le agrega concreto.</p>
Impresión de encofrado permanente		<p>Realizada por TotalKustom, se propone la impresión total del encofrado permanente en el lugar definitivo y finalmente se le añade concreto para llenar las paredes y columnas.</p>
Viga optimizada topológicamente:		<p>La imagen muestra lo siguiente</p> <ul style="list-style-type: none"> • Segmentos impresos en 3D. • Posicionamiento del refuerzo. • Viga terminada <p>Los segmentos son producidos de manera separada y posteriormente unidos, es por ello que el producto final es una viga optimizada topológicamente.</p>

B.3.4. Development of a 3D Printer for Concrete Structures

En este proyecto de investigación, se desarrolló una impresora 3D a escala de laboratorio (1m x 1m x 1m) para imprimir estructuras de hormigón. Se diseñó un sistema mecánico para controlar el movimiento del dispensador de material. Se realizó un estudio de materiales para encontrar la mezcla ideal para el sistema. Los experimentos se enfocaron en determinar la proporción eficiente de cemento y otros materiales utilizados en la producción de objetos físicos mediante la impresión 3D en capas. Se observó un gran potencial de la impresora en los campos de la construcción y la arquitectura. Con una mejora en la tecnología de impresión 3D, la automatización e incluso la construcción autónoma (Jo et al., 2020). Destaca la interfaz desarrollada para la impresora, mostrada en la Figura B.19. La cual está integrada a un programa de software para controlar el movimiento, similar a los utilizados en dispositivos CNC y con código G. En la interfaz se muestran todas las variables necesarias para el control, como la velocidad de movimiento, las coordenadas y velocidad de la boquilla.

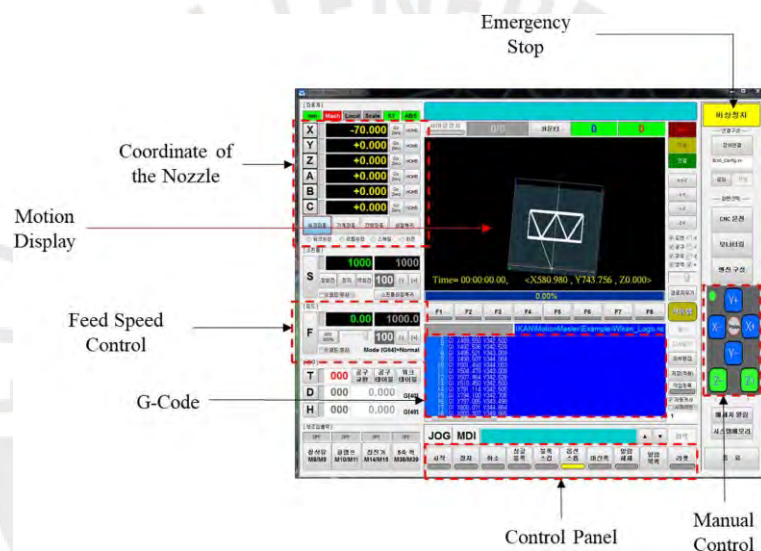


Figura B.19 - Interfaz desarrollada para la impresora 3D (Fuente: Jo et al.)

B.3.5. Design and Construction of a 3D Printer Auto Controller Wirelessly

Este artículo describe el diseño y construcción de una impresora 3D de bajo costo en Ecuador. La máquina utiliza software libre y hardware controlado por una PC para producir modelos 3D a partir de diseños virtuales en CAD. La impresora consta de cuatro ejes que permiten el movimiento de una plataforma móvil y un mecanismo extrusor para depositar material plástico capa por capa. Se muestra el diagrama de flujo en la Figura B.20, donde se aprecia la diferencia entre el uso inalámbrico y el uso con USB clásico.

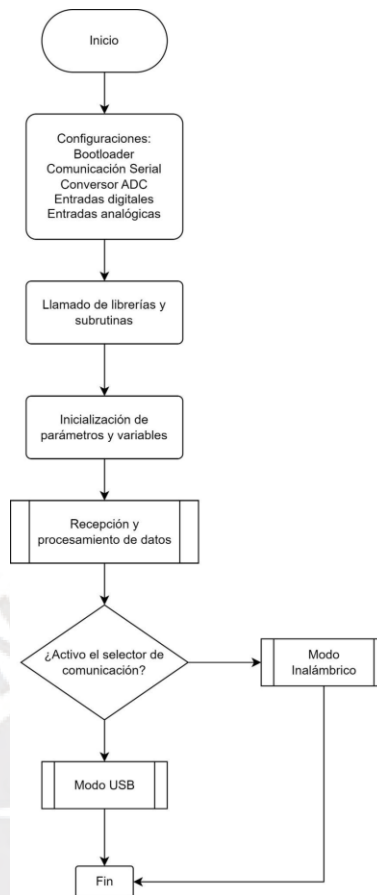


Figura B.20 - Flujograma del programa de Control de la impresora
(Fuente: Acuna et al.)

También se implementó un *sistema de control y monitoreo inalámbrico*, cuya conexión se muestra en la Figura B.21 a continuación.

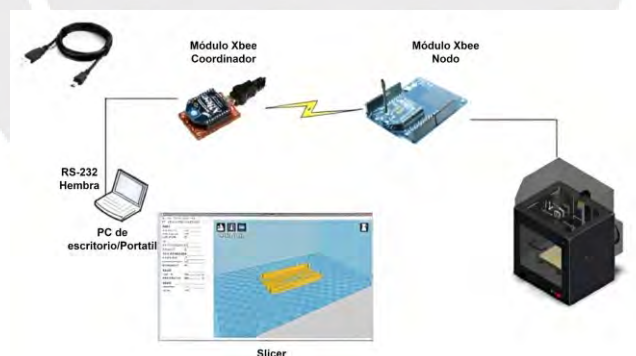


Figura B.21 – Configuración de la comunicación Inalámbrica
(Fuente: Acuna et al.)

El prototipo demostró resultados excelentes en términos de precisión y resistencia, lo que demuestra que es posible desarrollar impresoras 3D asequibles utilizando recursos y tecnologías disponibles. El desarrollo de esta impresora 3D puede ser ampliado para su implementación en entornos industriales, lo que fomentaría el uso de maquinaria y equipos asistidos por computadora en empresas de menor tamaño (Acuna et al., 2015).

B.3.6. Approach to an optimised printing path for additive manufacturing in construction

La resistencia a la fluencia dependiente del tiempo del hormigón fresco provoca deformaciones en las capas subyacentes durante el proceso de impresión, especialmente cuando se utilizan métodos convencionales de planificación de rutas en combinación con extrusión. Este artículo presenta un enfoque basado en modelos de elementos finitos (FEA: Finite Element Analysis). Utilizando parámetros del material que dependen del tiempo, como el módulo de Young, relación de Poisson, cohesión, el ángulo de fricción interna, el ángulo de dilatación y el límite elástico (Lachmayer et al., 2021).

Al considerar las propiedades del material dependientes del tiempo e incorporar bucles de retroalimentación, se propone una metodología para *minimizar las desviaciones y superposiciones previstas de la estructura impresa* como se muestra en la Figura B.22 de la geometría objetivo mediante el ajuste de las coordenadas de ruta y los parámetros de proceso relacionados.

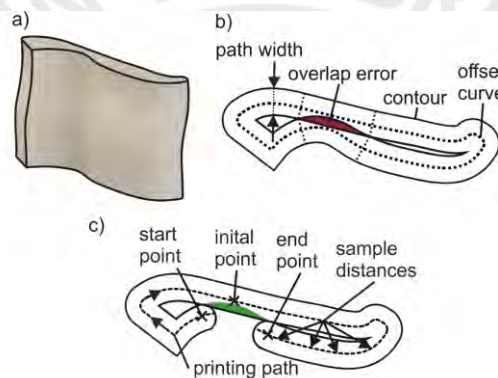


Figura B.22 - (a) Muro de muestra (b) Ruta de impresión (c) Eliminación de la superposición
(Fuente: Lachmayer et al.)

El estudio implementó un algoritmo de planificación de rutas en MATLAB para generar una ruta de herramienta para la impresión 3D. El algoritmo tiene como objetivo crear una ruta de impresión continua sin superposición utilizando el *archivo STL como entrada*.

En la Figura B.23 se observa el funcionamiento del algoritmo, con el cual se calculó secciones transversales espaciadas uniformemente en función de la altura de capa deseada, y los contornos de estas secciones transversales tenían anchos variables. El algoritmo, además, identifica áreas donde la distancia entre las secciones de la ruta era menor que el ancho de la misma, lo que indica una posible superposición. Se realiza el análisis de elementos finitos (FEA) para evaluarlo.

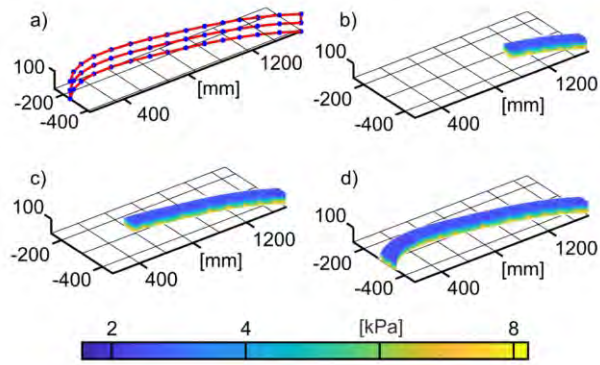


Figura B.23 - Planificación de rutas, construcción de modelos y simulación en MATLAB
(Fuente: Lachmayer et al.)

El estudio probó varias geometrías de muestra y observó casos adicionales de superposición. Con ello, se cuenta con una *solución para generar trayectorias de herramientas continuas y no superpuestas para la impresión 3D*.

B.3.7. Characteristics of Hydraulic and Electric Servo Motors

En los últimos tiempos, los motores eléctricos han ganado protagonismo debido a un mejor rendimiento, lo que ha llevado a una sustitución significativa de los motores hidráulicos en muchas aplicaciones. En el presente artículo se llevó a cabo una investigación que compara el rendimiento de los servomotores eléctricos e hidráulicos, con el objetivo de proporcionar datos cuantitativos útiles para seleccionar los motores más adecuados. La investigación incluyó una variedad de motores eléctricos, como los de corriente alterna, corriente alterna directa, de corriente continua sin escobillas y con escobillas. También se analizaron distintos tipos de motores hidráulicos, incluyendo los de pistón axial tipo plato basculante, pistón axial tipo eje doblado, pistón radial tipo manivela y pistón radial tipo multi-carrera (Sakama et al., 2022).

Se realiza una comparación entre la densidad de potencia y el año en el cuál la información de dicho motor fue publicada. [$P_d = P_r/m$], donde “ P_d ” es la densidad de potencia, “ P_r ” la potencia nominal y “ m ” la masa del motor. Dicha comparación se muestra en la Figura B.24

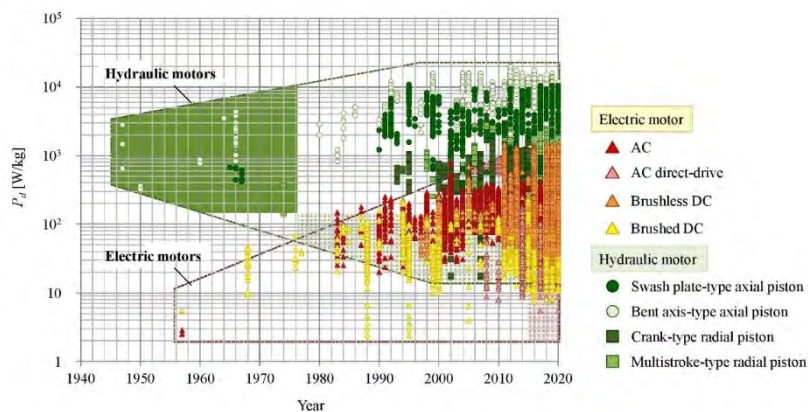


Figura B.24 - Densidad de potencia de motores eléctricos e hidráulicos
(Fuente: Sakama et al.)

Se realiza además un estudio de la correlación entre el torque nominal y velocidad angular nominal, en la Figura B.25.

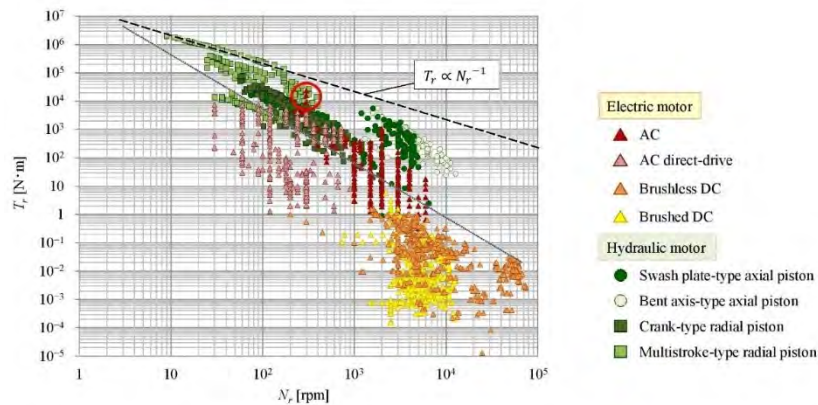


Figura B.25 - Correlación entre Torque Nominal y Velocidad Angular Nominal (Fuente: Sakama et al.)

Además, se tiene en la Figura B.26 el diagrama de conexiones, donde se muestra la diferencia entre los sistemas de accionamiento eléctrico e hidráulico

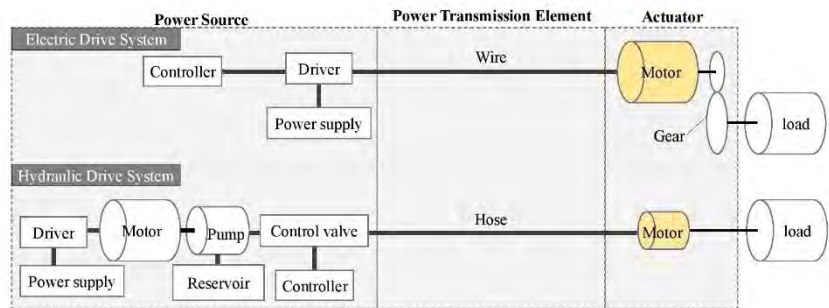


Figura B.26 - Configuraciones de sistemas de accionamiento de motores (Fuente: Sakama et al.)

Finalmente, se tiene en la Figura B.27, un resumen de los resultados obtenidos. Cabe resaltar lo siguiente, “ T_r ” es el torque nominal para cada motor, “ J_m ” es el momento de inercia del motor con ello se calcula “ Q ” [$Q = (T_r^2)/J_m$] y “ Q_d ” [$Q_d = Q/m$], que son la tasa de potencia y la densidad de tasa de potencia respectivamente.

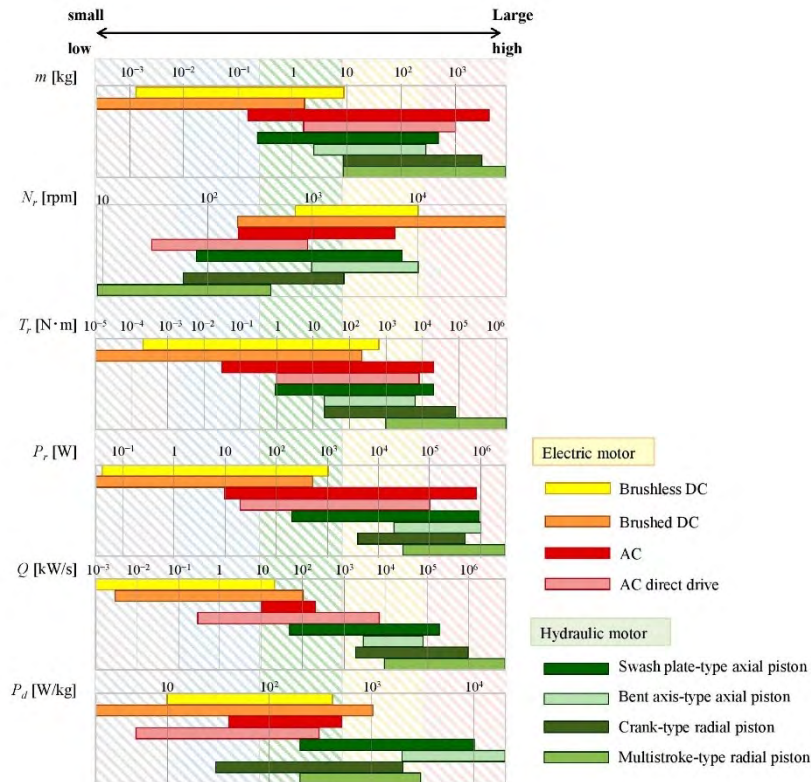


Figura B.27 - Resumen de las características de los motores estudiados (Fuente: Sakama et al.)

B.3.8. 3D Printer State Prediction: A Deep Learning Model Approach

Durante el proceso de impresión con las impresoras 3D, pueden ocurrir errores y con ello, el resultado impreso suele ser inservible. Debido a que el proceso puede llevar horas, los operadores suelen dejar la impresora funcionando sin supervisión. Esto puede resultar en daños a la impresora y desperdicio de material. Por ello, el presente artículo *aborda la necesidad de supervisar constantemente la impresora 3D mediante una aplicación web* (Figura B.28).



Figura B.28 - Diferentes funcionalidades de la aplicación de monitoreo (Fuente: Sampedro et al)

Se propone el uso de un modelo deep learning en un *sistema basado en una aplicación web*, cuya conexión se muestra en la Figura B.29. Para predecir correctamente los valores de temperatura futuros.

Con esto, los operadores pueden planificar el futuro pasos basados en la temperatura predicha y mitigar los residuos y daños a la impresora

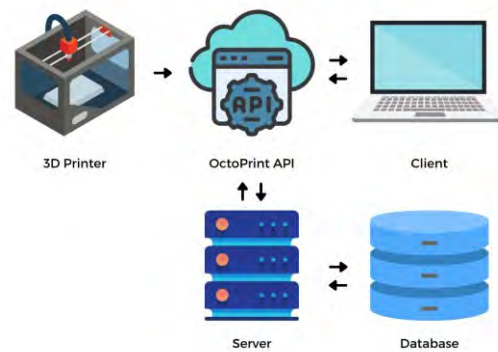


Figura B.29 - Flujo de datos de la impresora 3D al cliente
(Fuente: Sampedro et al.)

Se realizan pruebas automatizadas para verificar las diversas características de las aplicaciones, como sensores de temperatura [escalable a otra variedad de sensores], funciones de control y generación de registros. Se desarrolla un script que recolecta la temperatura de la cama y la extrusora de una impresora 3D cada 5 segundos durante 24 horas. El sistema genera un registro de temperatura cada hora. Para probar las funciones de control de la impresora, se desarrolla otro script que *inicia y pausa* el proceso de impresión cada 5 minutos durante 3 horas (Sampedro et al., 2021). Todas las pruebas se realizan con una tasa de éxito del 100% y son las siguientes.

- Establecer la temperatura de la impresora 3D
- Iniciar proceso de impresión
- Pausar proceso de impresión
- Cancelar proceso de impresión
- Descargar datos de registro de la impresora 3D

B.4. Patentes relacionadas

En esta sección se presentan las patentes relacionadas a modernas invenciones relacionadas a la impresión 3D. En este caso, las tecnologías presentadas son innovadoras, finalmente se realiza una tabla comparativa, donde se resumen las propuestas de valor de cada patente analizada.

B.4.1. Frame type concrete 3D printer

La patente describe una impresora 3D de hormigón diseñada para abordar ciertos desafíos técnicos en el campo de la impresión 3D de edificios. A 2020, la impresora 3D de tipo marco propuesta en la patente ofrece ventajas como la capacidad de imprimir grandes volúmenes, posicionamiento preciso y salida continua de material, lo que aborda las limitaciones de las impresoras 3D de construcción existentes.

La solución propuesta comprende un mecanismo de alimentación, un marco de cuerpo principal, un mecanismo de movimiento tridimensional, una boquilla de impresión y un módulo de control los cuales se aprecian en la Figura B.30.

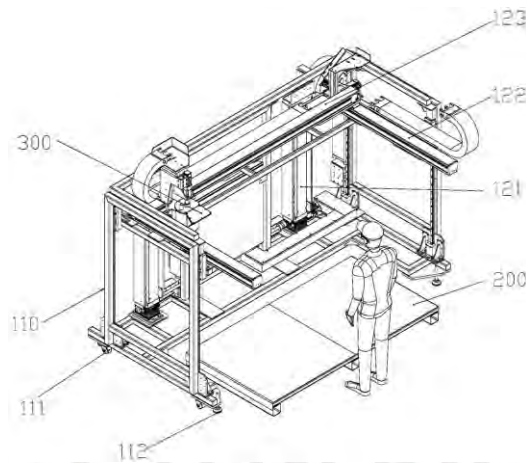


Figura B.30 - Vista en perspectiva de una impresora 3D de marco concreto
(Fuente: China, Patente CN111251411A)

El cuerpo del bastidor (Figura B.31) tiene forma de paralelepípedo rectangular y está construido con aceros soldados que se someten a un tratamiento térmico y mecanizado.

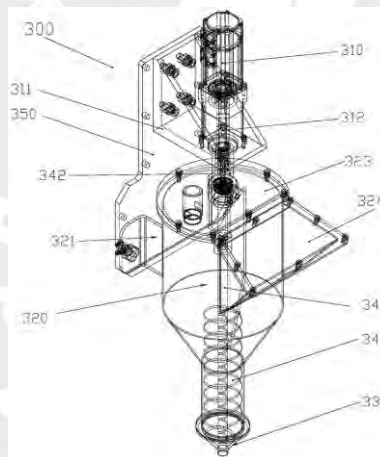


Figura B.31 - Vista en perspectiva del cabezal de impresión
(Fuente: China, Patente CN111251411A)

La estructura del marco permite la impresión de grandes componentes de construcción y proporciona una gran capacidad de carga. Los sensores de correlación de infrarrojos se utilizan para la detección de posicionamiento, lo que garantiza un movimiento preciso y evita colisiones. Los sensores de presión y nivel de material están instalados en la tolva de alimentación de la boquilla de impresión, lo que permite que el módulo de control ajuste el mecanismo de alimentación y la velocidad del motor de impresión para mantener una impresión estable y una salida de material continua (李芳 et al., 2020).

B.4.2. Real-time monitoring device and method for delta 3D printer based on binocular vision

La invención propuesta en la patente, proporciona un dispositivo y método de monitoreo en tiempo real basado en *visión binocular para una impresora 3D delta*. Cuenta con un dispositivo de transmisión y uno de accionamiento, que permiten el movimiento ascendente y descendente del soporte móvil mostrados en la Figura B.32. Además, un dispositivo de control móvil con PLC y un sensor de desplazamiento monitorean el proceso de impresión en tiempo real.

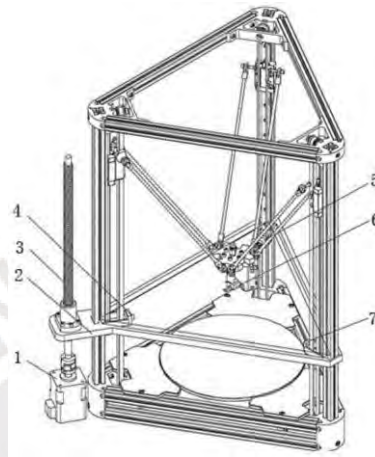


Figura B.32 - Vista isométrica de la impresora Delta con sistema de monitoreo
(Fuente: China, Patente CN109514847A)

El funcionamiento va de la siguiente manera, después de que finaliza el precalentamiento de la impresora, el controlador PLC activa un motor a paso para mover verticalmente y a lo largo de un husillo de bolas, un soporte móvil triangular donde van ubicadas tres cámaras. El PLC controla el proceso de movimiento del soporte móvil triangular de forma sincronizada con el proceso de impresión (周勇李扬 et al., 2018). *Se monitorea el grosor de la capa de impresión y el nivel de la boquilla* mediante la comparación de un archivo de modelo, estableciendo un umbral de alarma de acuerdo con los requisitos de precisión. Se envía una señal de alarma cuando se supera el umbral de error de impresión y se transmite la señal de alarma al equipo móvil a través de la red local para notificar al usuario que detenga la impresión. En general, esta invención presenta una estructura sencilla y permite un monitoreo continuo durante la impresión.

B.4.3. Three-dimensional (3D) delta printer frame structure

Esta especificación introduce sistemas y técnicas para impresoras 3D delta, específicamente las impresoras 3D delta FDM (Fused Deposition Modeling). *Se destaca la implementación de un marco espacial que brinda soporte al sistema de movimiento delta de la impresora 3D* mientras se desplaza en relación a la plataforma de construcción (James Sherwood Page et al., 2016).

En la Figura B.33 se puede apreciar el diseño. Un marco espacial que consta de múltiples unidades triangulares que rodean el volumen de construcción. La ventaja principal de este enfoque radica en la

reducción de la flexión y la resonancia durante la impresión 3D, así como en la mejora de la estabilidad y precisión de la impresión.

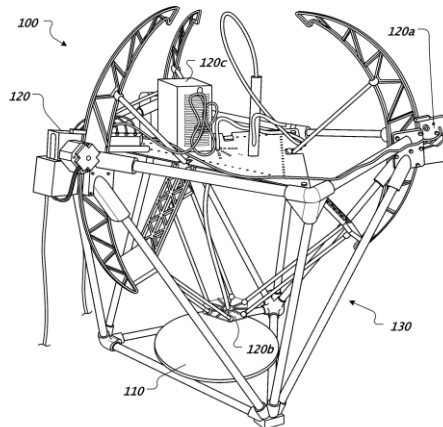


Figura B.33 - Vista en perspectiva de impresora 3D FDM tipo delta con marco espacial
(Fuente: U.S.A. Patente US20160332378A1)

El uso de una estructura de accionamiento perimetral circular en el sistema de movimiento de la impresora, brinda un mayor control, estabilidad y disminución de las vibraciones y distorsiones. Esta estructura de accionamiento se aprecia de manera más detallada en la Figura B.34.

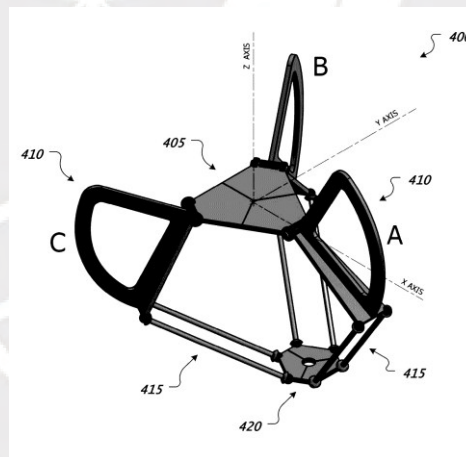


Figura B.34 - Conjunto de accionamiento de perímetro circular
Fuente: U.S.A. Patente US20160332378A1

En conjunto, estas mejoras permiten una mayor precisión y rendimiento de la impresora 3D, lo que se traduce en impresiones más precisas y velocidades de impresión más altas.

B.5. Tecnologías Existentes

El presente apartado se dedica a revisar las patentes relacionadas con las innovaciones en impresión 3D. Se destacan tecnologías novedosas y se realiza una tabla comparativa que resume las propuestas de valor de cada patente analizada.

B.5.1. Motores

El motor eléctrico, compuesto por nada más que una disposición de bobinas de cobre y láminas de acero, es claramente un conversor de energía bastante inteligente, lo que justifica una consideración seria. Como principal característica, convierte la energía eléctrica en energía mecánica de rotación por medio de la acción de los campos magnéticos generados en sus bobinas

Motores a paso [Stepping motors]

Destacan porque pueden ser controlados directamente por computadoras, microcontroladores y Controladores Lógicos Programables (PLC). El eje de salida gira en una serie de intervalos angulares discretos, o "pasos", dando un paso cada vez que se recibe un pulso de comando. Cuando se ha suministrado un número definido de pulsos, el eje habrá girado en un ángulo conocido y esto hace que *el motor sea muy adecuado para el control de posición de lazo abierto*. Al contrario de lo que se pueda creer, cada paso se completa muy rápidamente, a menudo en menos de un milisegundo. Los ángulos de paso están en su mayoría en el rango de 1,8 a 90° (Hughes & Drury, 2019b). En la Figura B.35 se puede observar un motor a pasos

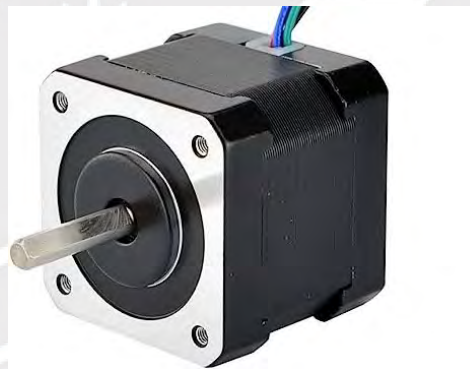


Figura B.35 - Motor a pasos
(Fuente: Amazon)

Aplicaciones y características:

- Uso en unidades de cabeza de disco [hard disk drives (HDDs)]
- Pequeños deslizadores de máquinas herramienta controlados numéricamente, donde el motor impulsa un husillo
- Alimentaciones de impresión, donde el motor podría conducir directamente, o a través de fajas
- Rango de torque desde 1 μ Nm, en un diminuto motor de reloj de pulsera de 3 mm de diámetro hasta aproximadamente 40 Nm en un motor de 15 cm de diámetro adecuado para una aplicación donde se necesitan velocidades angulares de 500 rev/min
- La mayoría de las aplicaciones utilizan motores que se pueden sostener cómodamente en la mano

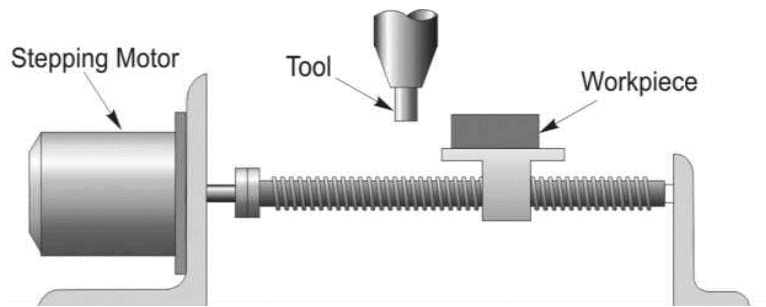


Figura B.36 - Control de posición de lazo abierto usando motor a paso
(Fuente: Hughes & Drury - b)

Servomotores:

Los servomotores permiten un control preciso de la *posición, velocidad y aceleración angular*. Consiste en un motor adecuado acoplado a un sensor para realimentación de posición. También requiere un controlador relativamente sofisticado, a menudo un módulo dedicado diseñado específicamente para su uso con servomotores. También está diseñado para uso en aplicaciones que requieren aceleración y desaceleración rápidas (Hughes & Drury, 2019a)



Figura B.37 – Servomotor
(Fuente: Alibaba)

Como se mencionó anteriormente, muchos servomotores se utilizan en aplicaciones de control de posición de circuito cerrado, la posición angular del eje de salida es destinada a seguir un voltaje de referencia (V_{ref}). El potenciómetro montado en el eje de salida proporciona un voltaje de retroalimentación proporcional a la real posición del eje de salida y en función del ángulo. No debe variar con la temperatura, de lo contrario la precisión del sistema estará en duda. Se realiza el control con voltaje de retroalimentación y el de referencia.

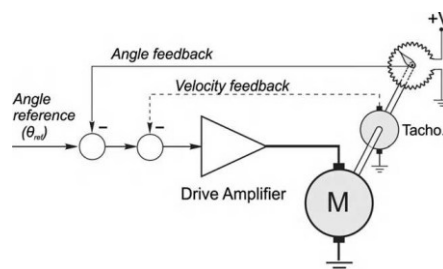


Figura B.38 - Control a lazo cerrado de un Servomotor
(Fuente: Hughes & Drury - a)



Aplicaciones comunes:

- Robótica, para controlar el movimiento de brazos, pinzas y otras articulaciones. Ofrecen alta precisión, repetibilidad y control torque
- Máquinas de control numérico por computadora (CNC), como las fresadoras, los tornos y las impresoras 3D, dependen de servomotores para un control preciso del movimiento de la herramienta. Permiten un posicionamiento preciso de la herramienta de corte, lo que garantiza operaciones de mecanizado complejas y de alta calidad.
- Encuentran aplicaciones en varios sistemas de automatización industrial, incluidas las cintas transportadoras, maquinaria de embalaje, líneas de montaje y los robots de colocación
- Sistemas de cámara, como las cámaras de giro, inclinación y zoom (PTZ) utilizadas en vigilancia y cinematografía, utilizan servomotores. Permiten un control de movimiento suave y preciso
- Aplicaciones aeroespaciales, incluidas las superficies de control de aeronaves (aleros, elevadores y timones), mecanismos de tren de aterrizaje y brazos robóticos utilizados para la exploración espacial. Ofrecen un control fiable y preciso en entornos exigentes

Comparación entre tecnologías, motores

Teniendo en cuenta las principales características de los servomotores y motores a paso, se plantea una comparación entre ellas, en la Tabla B.3. Es importante considerar que los datos mostrados son en su mayoría cuantitativos y muestran un análisis de las características generales de estos motores.

Tabla B.3 - Comparación entre características de Servomotor y Motor a paso
(Fuente: Elaboración propia)

Característica	Servomotor	Motor a paso
		
Precisión y control	Alta precisión ($\pm 0.1^\circ$ o mejor)	Buena precisión ($\pm 1^\circ$ o mejor)
Torque	Alto torque (hasta 20 Nm o más)	Menor torque (hasta 5 Nm aproximadamente)
Control	Está equipado con sistemas de retroalimentación [como encoders, potenciómetros] que brindan información de posición en tiempo real.	Control de lazo abierto, se puede implementar sistemas de lazo cerrado.
Rendimiento dinámico	Excelente rendimiento dinámico, puede lograr aceleraciones/desaceleraciones	Rendimiento dinámico limitado, puede sufrir vibraciones y problemas de

	suaves y rápidas.	resonancia a alta velocidad
Eficiencia energética	Eficiente en términos de consumo de energía debido al control de circuito cerrado.	Menos eficientes ya que consumen energía incluso cuando mantienen la posición.
Ruido	Funcionamiento generalmente silencioso debido a un control de movimiento suave.	Puede producir más ruido audible, especialmente a velocidades altas.
Sobrecalentamiento	Menos propenso al sobrecalentamiento, adecuado para un funcionamiento prolongado en entornos exigentes.	Puede ser susceptible al sobrecalentamiento, especialmente cuando se opera a altas velocidades durante períodos prolongados.
Costo aproximando (200W)	\$550 - \$900	\$100 - \$300

B.5.2. Controladores

La placa controladora es responsable de todas las funciones electrónicas de una impresora 3D. Manejan toda la lógica detrás de la impresión 3D, como analizar archivos G-code, regular la temperatura para el caso de impresoras de escritorio y, lo más importante, controlar el movimiento. Este último es especialmente importante si hablamos de impresión FDM y motores a paso.

Microcontroladores

Los controladores basados en microcontroladores utilizan dispositivos informáticos de pequeña escala, como placas Arduino o Raspberry Pi, para gestionar el proceso de impresión 3D (Gorman et al., 2020). Estos controladores se encargan de tareas esenciales de control de movimiento, procesamiento de datos y comunicación con varios componentes, un ejemplo de este tipo de controlador ampliamente conocido es el MKS GenZ (Figura B.39). Son comunes en impresoras 3D de nivel básico y proyectos de bricolaje [Actividad manual y casera de reparación, instalación, montaje] debido a su costo efectivo y versatilidad.



Figura B.39 – MKS GenZ
(Fuente: Github)

PLC [Programmable Logic Controller]

Los PLC son controladores industriales utilizados en aplicaciones de “servicio pesado” para garantizar un rendimiento confiable y robusto. Pueden procesar datos en tiempo real y ejecutar algoritmos de control sofisticados, lo que los hace adecuados para impresoras 3D de grado profesional utilizadas en proyectos de construcción. En la Figura B.40, se muestra un PLC Siemens.



Figura B.40 - PLC Siemens
(Fuente: autycom.com)

CNC Controllers [Computer Numerical Control]:

Los controladores CNC se utilizan comúnmente en impresoras 3D y sistemas de mecanizado de grado industrial. Emplean software y placas de control CNC para traducir las instrucciones de código G en movimientos precisos de los ejes de la impresora. Por ejemplo, se tiene el modelo F 0i de FANUC en la Figura B.41. Este tipo de controladores se caracteriza principalmente por impresiones 3D de alta precisión, robustez y repetitividad.



Figura B.41 – FANUC Series 0i-MODEL F
(Fuente: FANUC)

Comparación entre tecnologías, controladores

Se presenta en la Tabla B.4, una comparación entre las principales características de los controladores analizados. Dada la generalidad de las tecnologías analizadas, se darán aspectos generales.

Tabla B.4 - Comparación entre características de tipos de Controladores

Característica	Microcontroladores	PLC	CNC
Características principales	Rentable y versátil	Rendimiento fiable y robusto	Alta precisión
Ventajas de uso	Adecuado para impresoras de principiantes y aficionados	Procesamiento de datos en tiempo real, control preciso	impresiones repetibles, movimiento preciso con traducción de código G
Aplicaciones	Impresoras 3D para principiantes y aficionados, proyectos de bricolaje	Aplicaciones industriales	Impresoras 3D de grado industrial, proyectos a gran escala

B.5.3. Guías Lineales

Las guías lineales están compuestas por una plataforma móvil que se desliza hacia adelante y hacia atrás a lo largo de un elemento lineal llamado riel, y tiene dos formas básicas: redonda y cuadrada. Dado que la plataforma tiene inicialmente seis grados de libertad, tres de rotación y tres de traslación, la guía lineal debe eliminar cinco grados de libertad para producir el movimiento deseado (Nguyen, 2019).

Rodamientos lineales de bolas

Estos rodamientos contienen pequeñas bolas de metal que permiten un movimiento lineal suave del carro a lo largo del eje. Ofrecen un movimiento de baja fricción y requieren menos fuerza para moverse en comparación con las guías de cola de milano. Sin embargo, tienen una menor capacidad de carga para su tamaño y permiten la rotación libre del carro alrededor del eje. Para solucionar esto, algunos diseños de impresoras 3D utilizan un par de ejes para restringir completamente el movimiento del carro. Requieren un mantenimiento regular debido a la acumulación de suciedad y polvo en el lubricante en el área de ubicación de las bolas, como se muestra en la Figura B.42. Esto puede producir más ruido y rayar las superficies del eje.

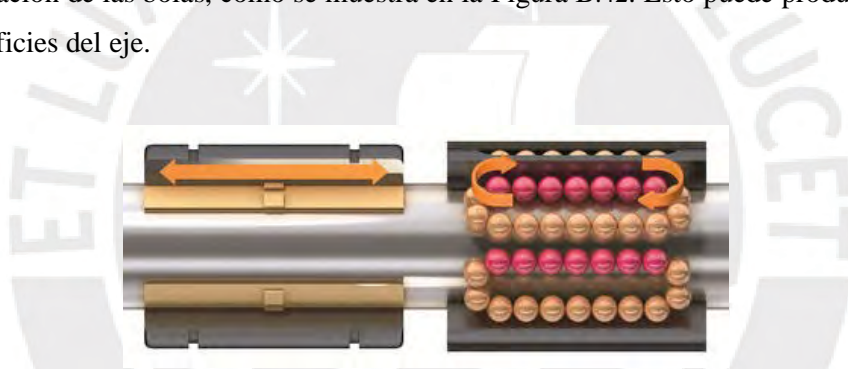


Figura B.42 - Funcionamiento de un rodamiento lineal de bolas
(Fuente: Iigus.eu)

Guía lineal con ruedas

Otro diseño de guía lineal, ampliamente utilizado en impresoras 3D de bajo costo, es la guía lineal de tipo rueda. Utiliza ruedas (Figura B.43) que se desplazan a lo largo de un riel de aluminio, proporcionando un contacto de rodadura controlado y de baja fricción. La transmisión convierte el movimiento rotatorio de las ruedas en el movimiento lineal deseado.

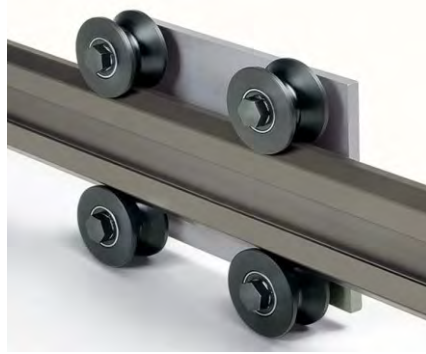


Figura B.43 - Guía lineal del tipo rueda
(Fuente: directindustry.es)

Guía lineal con bloque deslizante

Consisten en un bloque deslizante que se mueve suavemente a lo largo de un riel lineal, gracias a bolas de recirculación o rodillos. Estas guías ofrecen alta precisión, capacidad de carga y larga vida útil, lo que las hace ideales para aplicaciones que requieren un posicionamiento preciso y movimientos repetitivos. Se utilizan en máquinas herramienta, impresoras 3D, sistemas de transporte y más. La configuración, rieles y bloque deslizante se pueden apreciar en la Figura B.44.






Figura B.44 - Guía de bloque deslizante
(Fuente: nsk.com)

Comparación entre tecnologías, guías lineales

Finalmente, se realiza una comparación entre las diferentes configuraciones de guías lineales analizadas. Teniendo en cuenta mantenimiento, fricción y aplicaciones en la Tabla B.5.

Tabla B.5 - Comparación entre tipos de guías lineales

Característica	Rodamientos Lineales de Bolas	Guía Lineal con Ruedas	Guía Lineal de Bloque Deslizante
			

Aplicaciones Comunes	Dispositivos médicos	Impresoras 3D de bajo coste	Máquinas herramienta
	Sistemas de transporte	Sistemas de transporte	Equipos industriales
Mantenimiento [aproximado]	1 mes	2 semanas	4 meses
Fricción	Baja	Baja/Moderada	Baja

B.5.4. Firmware

En el contexto de impresión 3D, el firmware es de suma importancia. Programa informático que define la lógica fundamental que controla los circuitos electrónicos de cualquier tipo de dispositivo. Se analizan las opciones con mayor uso.

Repetier Firmware

Firmware de gama alta que funciona con casi todas las placas de impresora alimentadas por Arduino. De código abierto, diseñado para impresoras 3D y otras máquinas CNC (Repetier Official Website, 2023).

Características (RepRap Official Website, 2023)

- Soporte de aceleración RAMP [Mecanismo para administrar y optimizar la aceleración y desaceleración de los movimientos de la impresora durante la impresión]
- Planificación de ruta (anticipación) para velocidades de impresión más altas
- Rápido – 16 kHz y mayor frecuencia de pasos [steps per second] con un AVR de 16 MHz.
- Control de presión de boquilla para mejorar la calidad de impresión con RAMPS
- ASCII estándar y comunicación binaria mejorada
- Reconoce automáticamente qué protocolo de comunicación está utilizando el software host para comunicación con el firmware.
- Monitoreo continuo de una temperatura.
- Búfer de envío basado en interrupciones (la biblioteca de Arduino normalmente espera a que el destinatario reciba los datos escritos)
- Admite tarjetas SD.
- mm y pulgadas se pueden utilizar para G0/G1
- Ejecución en seco: Ejecución de G-Code sin usar la extrusora. De esta manera, puede probar fallas no relacionadas con la extrusora sin tener que imprimir.
- Compatibilidad con LCD

Marlin

Marlin Firmware se ejecuta en la placa principal de la impresora y gestiona todas las actividades en tiempo real de la máquina. Coordina los calentadores, motores a paso, sensores, luces, pantalla LCD, botones y todo lo demás relacionado con el proceso de impresión 3D.

El lenguaje de control de Marlin es un derivado del código G. Los comandos de código G le dicen a una máquina que haga cosas simples como "establecer el calentador 1 a 180 grados, o mover a XY a la velocidad F. Para imprimir un modelo con Marlin, debe convertirse a código G usando un "slicer" (Marlin Official Website, 2023).

Características (RepRap Official Website, 2023):

- Compatible con los microcontroladores: AVR, SAM, LPC, STM32, ESP32, Teensy, BCM283x, BCM2711B0, etc.
- Configurable para una amplia variedad de máquinas
- Anticipación del planificador para mantener un movimiento rápido.
- Alta frecuencia de pasos [steps per second], idealmente 20 KHz o superior
- Compatibilidad con limit switch, mejorada para pines interrumpibles
- Curva S de aceleración [para lograr movimientos más suaves y controlados a comparación de perfil lineal de aceleración]
- Compatibilidad con tarjetas SD, subcarpetas y nombres de archivo largos
- LCD/controladores: de caracteres, gráficos y en serie (idealmente 20x4, pero se admiten 16x4 y 20x2).
- Menú LCD con rueda codificadora o teclado para impresión de tarjeta SD independiente.
- Compatibilidad con modelo Cartesiano, CoreXY y Delta.

Klipper

Klipper es un firmware de impresión 3D. Combina el poder de una computadora de propósito general con uno o más microcontroladores. Se caracteriza por su enfoque en alta velocidad y movimientos suaves (Klipper Official Website, 2023).

Características (RepRap Official Website, 2023):

- Control de movimiento de motor a paso de alta precisión.
- Altas velocidades de paso incluso en microcontroladores de 8 bits hasta microcontroladores modernos de 32 bits [175k steps per second].
- Los algoritmos cinemáticos, el análisis de código G y más en lenguaje de alto nivel Python.
- Permite la incorporación de múltiples microcontroladores en una sola impresora.
- Varias interfaces Web disponibles. el software host puede ejecutarse en Raspberry Pi.
- Admite configuración de sistemas: Cartesiano, Delta y CoreXY. Agregar más solo requiere cambios en el código de Python.

Smoothieware

Se desarrolló inicialmente para el Smoothieboard, que es un tipo específico de placa controladora de impresora 3D diseñada para funcionar con el firmware de Smoothieware. Sin embargo, es compatible con varios controladores de 32 bits, podría ofrecer flexibilidad para las impresoras 3D. Smoothie es gratuito y de código abierto, intérprete de código G de alto rendimiento. Además, se desempeña como controlador CNC escrito en C++ orientado a objetos para el microcontrolador LPC17xx (Smoothieware Official Github, 2023).

Características (RepRap Official Website, 2023):

- Fácil configuración sin compilación
- Control de corriente digital [Utiliza señales digitales y modulación de ancho de pulso (PWM) para regular la corriente suministrada al motor paso a paso]
- Soporte para fresado láser y CNC
- Documentación extremadamente completa.
- Control de velocidad del extrusor
- Control de velocidad de movimiento
- Soporte de tarjeta SD

Comparación entre tecnologías, firmware

Teniendo en cuenta las características principales de las opciones analizadas de Firmware para impresión 3D en la Tabla B.6 se presenta, además, los controladores electrónicos compatibles.

Tabla B.6 - Comparación entre las opciones de Firmware

Firmware	Repetier	Marlin	Klipper	Smoothieware
	Soporte de aceleración RAMP para optimizar los movimientos de impresión.	Compatible con una amplia variedad de microcontroladores	Control de movimiento de motor a paso de alta precisión.	Fácil configuración sin compilación.
Características principales	Planificación de ruta (anticipación) para velocidades de impresión más altas y alta frecuencia de pasos (16 kHz o más)	Anticipación del planificador para mantener movimientos rápidos y curva S de aceleración para movimientos más suaves	Altas velocidades de paso en microcontroladores de 8 bits y 32 bits (hasta 175k pasos por segundo).	Control de corriente digital mediante señales digitales y modulación de ancho de pulso (PWM)
	Permite pruebas sin extrusión.	Compatibilidad con tarjetas SD, subcarpetas y nombres de archivo largos	Permite la incorporación de múltiples microcontroladores en una sola impresora	Soporte para fresado láser y CNC, documentación completa y control de velocidad tanto del extrusor como del movimiento.

	-	Smoothieboard	
Controlador compatible		RAMPS	-
		RADDS	-
		Melzi	-
		Printboard	-
		Sanguinololu	-
		CRAMPS	-
		EinsyRambo	-
		-	R2C2 RepRap Electronics
		-	Azteeg X5 mini

B.5.5. Interfaces Web

Las interfaces web para impresoras 3D, permiten monitorear y controlar la impresora de forma remota. Este software proporciona una manera fácil de interactuar con sus impresoras y le brinda acceso a varias funciones que mejoran la experiencia del usuario remoto de la impresión 3D. Se analizará Mainsail, Fluidd y OctoPrint, los cuales son de código abierto. Fluidd y Mainsail OS están desarrollados explícitamente para funcionar con el firmware de Klipper en sus impresoras 3D.

Por el contrario, Octoprint está desarrollado como un software genérico de control de impresoras 3D que le brinda acceso inalámbrico a la impresora. Puede ejecutarse en varios firmwares, incluido Klipper, y está desarrollado específicamente para la impresión 3D remota.

Fluidd

Es una interfaz de usuario "fluida" con botones intuitivos como se muestra en la figura Figura B.45, elementos gráficos y algunas características interesantes que facilitan su uso con Klipper. Ofrece opciones de personalización limitadas en comparación a Octoprint y Mainsail. Sin embargo, estas limitaciones son más que suficientes para el uso diario (Pranav G., 2022).

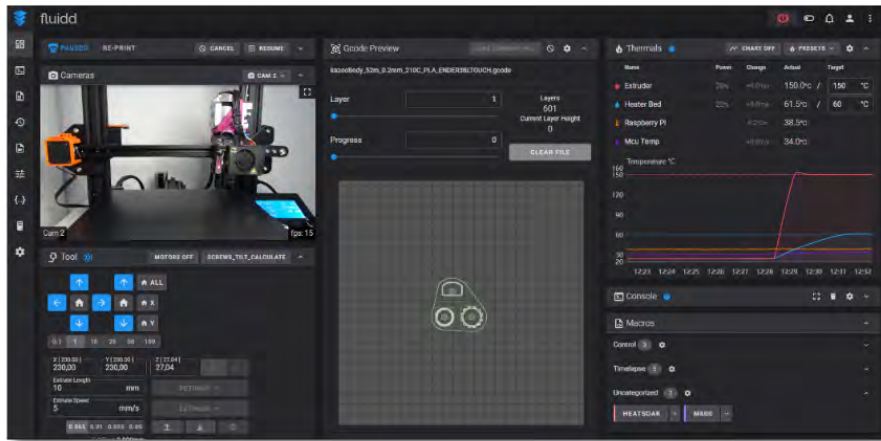


Figura B.45 - Intefaz Fluidt
(Fuente: Github)

Mainsail

Mainsail OS ofrece más personalización que Fluidt OS, pero queda ligeramente por detrás de Octoprint. Sin embargo, muchos usuarios prefieren la personalización limitada pero detallada que ofrece Mainsail OS. El visor de código G tiene opciones para configurar colores para las diversas funciones, y recibe varias opciones para personalizar completamente la interfaz de usuario (Pranav G., 2022). Se ilustra un ejemplo de la interfaz Mainsail en la Figura B.46.

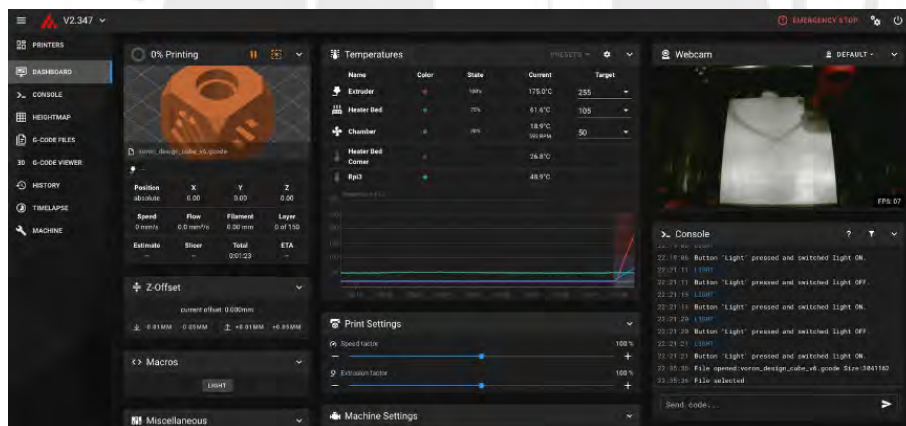


Figura B.46 - Interfaz MainSail
(Fuente: Github)

Octoprint

Octoprint popularizó el escenario de impresión 3D remota y, en muchos sentidos, sentó las bases para Mainsail y Fluidt. Se puede apreciar en la Figura B.47, un ejemplo de interfaz. Octoprint fue desarrollado como una solución integral para la impresión 3D remota y desde entonces se ha adaptado a varios firmware y máquinas (Pranav G., 2022).

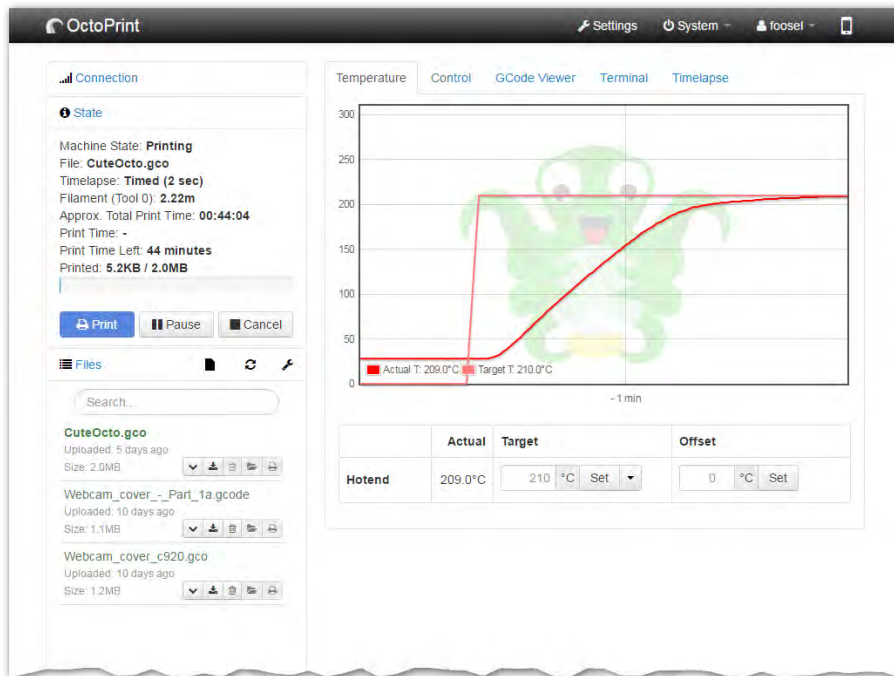
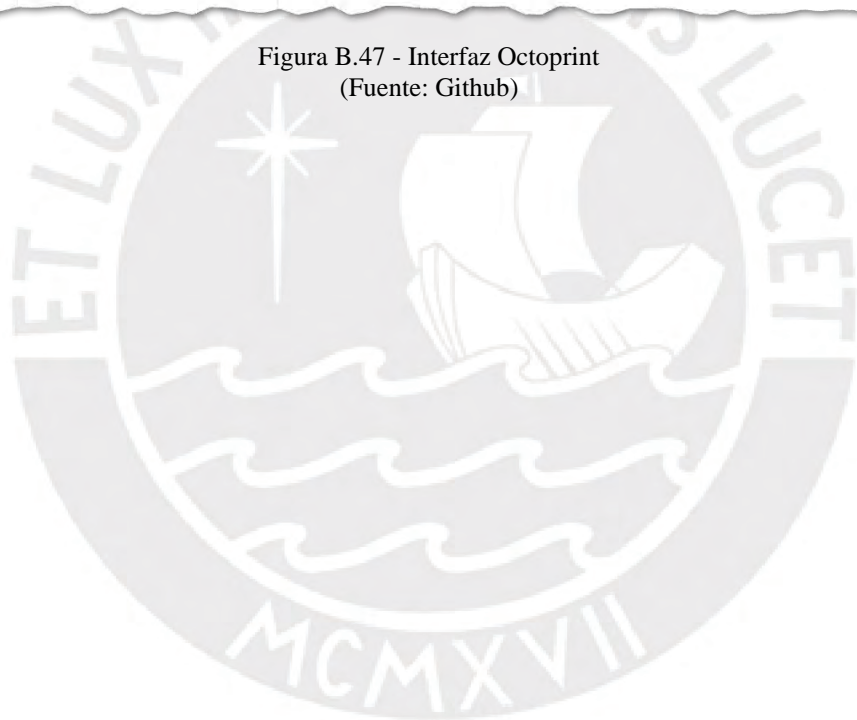





Figura B.47 - Interfaz Octoprint
(Fuente: Github)



Comparación entre tecnologías, interfaces web

Para tener un mejor entendimiento de las características y funciones de cada interfaz web presentada, se tiene la Tabla B.7 Donde se explora nivel de personalización, facilidad de uso en comparación y características adicionales.

Tabla B.7 - Comparación entre Interfaces Web para impresión 3D remota

Interfaz Web	Fluidd	Mainsail	Octoprint
	 (all3dp, 2023)	 (Cotofan, 2023)	 (Octoprint, 2023)
Personalización	Diseño tablero y elementos personalizables Se puede instalar macros para desarrollar botones personalizados	Ofrece más opciones de personalización. Configuración de la interfaz. Se puede preestablecer ajustes de velocidad de extrusión para su impresora 3D.	No se puede cambiar el aspecto o configurar la interfaz de usuario, Tiene plug-in de personalización de UI es Con el plug-in Puede cambiar temas, reorganizar pestañas, íconos, etiquetas y muchas otras cosas.
Facilidad de uso	El de mayor facilidad de uso entre los tres. Tiene varios elementos de diseño y funciones para resulte intuitivo de usar	Menor facilidad de usar en comparación a Fluidd. Tiene un diseño y un flujo de trabajo intuitivos. Permite ver el estado de los limit swtich	Se necesita algo de tiempo para familiarizarse con sus diversos elementos. Todas las pestañas y controles necesarios son fácilmente accesibles.
Características adicionales	Múltiples impresoras y cámaras web	Historial de impresión y estadísticas	Octolapse para la creación de timelapses
	Cargas y miniaturas de Slicer	Visor de código G	Notificaciones en Telegram
	Visor de código G	Visualizador del nivel de la cama [base de impresión]	El plug-in MyMiniFactory permite descargar e imprimir instantáneamente los modelos con un solo clic

Se tiene finalmente la herramienta Obico cuya interfaz se puede apreciar en la Figura B.48, la cual brinda total libertad para controlar la impresora 3D desde prácticamente cualquier lugar e integra funciones de IA para monitorear las impresiones. Funciona en una interfaz de navegador y se conecta

a cualquiera de las interfaces web analizadas. Una vez configurada, puede monitorear, controlar y acceder de forma remota a través de Wi-Fi datos móviles.

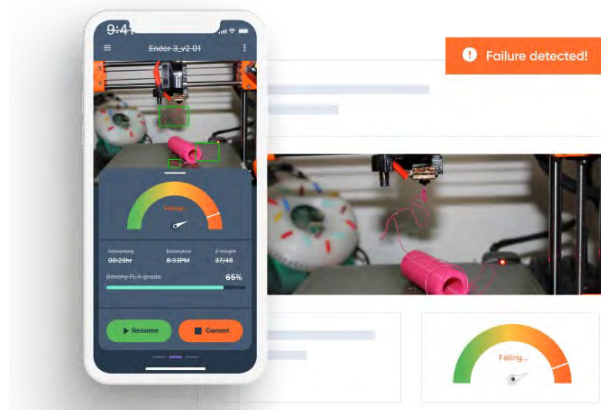


Figura B.48 - Herramienta Obico para impresión 3D remota
(Fuente: Github)

B.5.6. Configuraciones de impresoras 3D

Las impresoras 3D FDM [Fused Deposition Modelling] existen en varias configuraciones. Estas impresoras se distinguen por sus disposiciones mecánicas y sistemas de coordinación. Algunas de las disposiciones mecánicas más populares para impresoras 3D FDM se muestran en la Figura B.49, incluyen: Cartesianas, Delta, Core XY, Polares y SCARA (Mohan Kumar, 2017). Es importante ahondar de manera detallada en cada una de estas configuraciones, pues dicho análisis será útil cuando se realice la evaluación técnica – económica del proyecto de tesis.

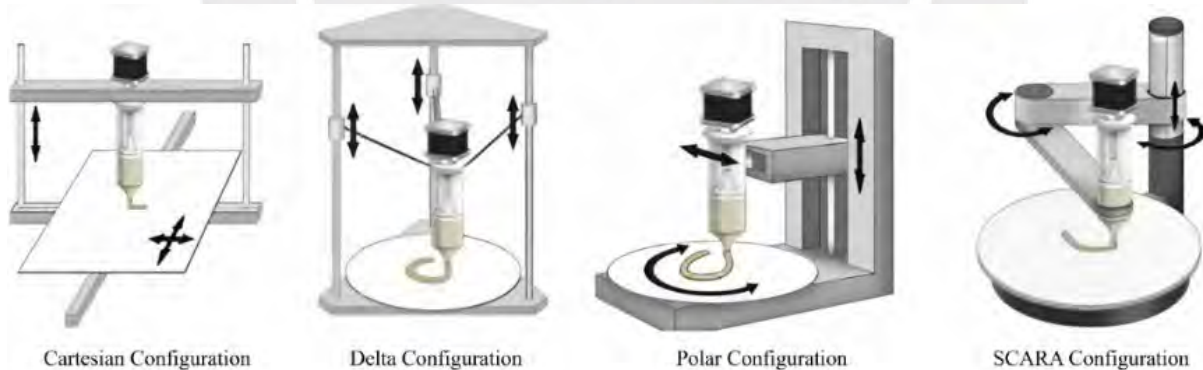


Figura B.49 – Configuraciones de Impresoras 3D
(Fuente: Sun et al.)

Configuración Cartesiana

Las impresoras 3D de tipo Cartesiano son el tipo más común de impresoras tridimensionales FDM, disponibles en el mercado. Este tipo de tecnología se inspira en el sistema de coordenadas cartesianas y utiliza tres ejes ortogonales (X, Y y Z) para determinar de manera precisa las posiciones y la dirección del extrusor. Mediante el ajuste de los ejes según las dimensiones deseadas, el extrusor puede moverse a lo largo de los ejes X e Y, lo que permite un movimiento en cuatro direcciones distintas. Las

disposiciones de configuración cartesiana mostradas en la Figura B.50 son de eje XY cerrado y eje Z abierto; ejes XYZ cerrado (Kopets et al., 2022).

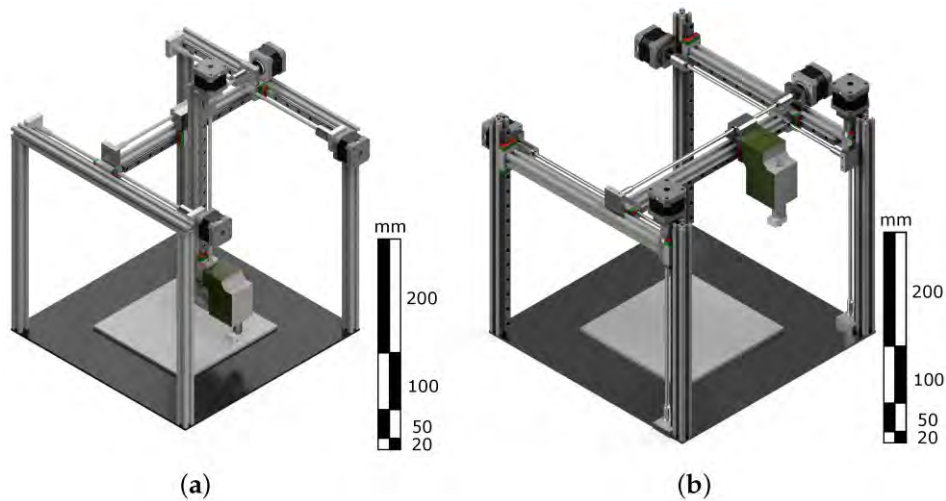


Figura B.50 - (a) eje XY cerrado y eje Z abierto y (b) ejes XYZ cerrado
(Fuente: Kopets et al)

Configuración Delta

La configuración Delta consiste en una plataforma de impresión fija, con el cabezal de impresión montado sobre un patrón triangular en varillas ajustables en altura y longitud, como se muestra en la Figura B.51. Trabaja con el plano cartesiano XYZ, pero de una manera distinta a la configuración delta. El plano XY actúa como el plano de impresión, que permanece estacionario mientras que el cabezal de extrusión se mueve a través del espacio. En comparación con el sistema Cartesiano, esta configuración ofrece tiempos de impresión y costos menores. La impresora destaca en la impresión vertical en lugar de superficies horizontales. Los puntos en el sistema se especifican mediante la longitud que debe moverse cada varilla. Aunque la impresora tiene menos precisión, es adecuada para la tecnología de impresión de alimentos (Sun et al., 2018).



Figura B.51 - Configuración Delta
(Fuente GrabCAD)

Configuración polar

Las impresoras de tipo polar se diferencian de las impresoras cartesianas en términos de su mecanismo de posicionamiento. En lugar de emplear coordenadas X, Y y Z, estas utilizan un enfoque basado en ángulo, radio y altura, propio del sistema de coordenadas polar. El funcionamiento de esta configuración se enfoca en el movimiento del cabezal de impresión. La extrusora se mueve verticalmente en el eje z y realiza la impresión en el plano XY. En este sistema, la base rota y se mueve al mismo tiempo que el extrusor se desplaza hacia arriba y hacia abajo. Estas impresoras son especialmente adecuadas para objetos que tienen una estructura de revolución (Thangalakshmi et al., 2021).

Configuración Scara o Brazo robótico

Del acrónimo SCARA [Selective Compliance Assembly Robot ArmEI]. Implica que el brazo robótico realiza movimientos en el plano X-Y y utiliza un actuador adicional para moverse en el eje Z como se muestra en la Figura B.52. Una de las ventajas del diseño SCARA es que no necesita utilizar rodamientos ni sensores limit switch, lo cual proporciona ciertas ventajas en su disposición y funcionalidad. Cuenta con tres grados de libertad y es accionado por tres motores para realizar un movimiento vertical y dos horizontales. El sistema de alimentación para impresión 3D se encuentra en la parte posterior del robot y se extiende al final del brazo robótico (Sun et al., 2018).



Figura B.52 - Configuración SCARA
(Fuente: blogs.solidworks)

ANEXO C: DISEÑO CONCEPTUAL

C.1. Lista de requerimientos

LISTA DE REQUERIMIENTOS			Página 1 de 2
			Edición: Armando Arturo Custodio Díaz
PROYECTO:	SISTEMA AVANZADO DE IMPRESIÓN 3D DE CONCRETO PARA APLICACIONES DE INVESTIGACIÓN EN LABORATORIO		Fecha: 07-08-2023
			Revisado: xx-xx-2023
CLIENTE:	PUCP		Elaborado: Armando Arturo Custodio Díaz
N°	Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable
1		FUNCIÓN PRINCIPAL	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	Impresión 3D concreto sin necesidad de supervisión	
	E	Interfaz de monitoreo remoto	
	E	Modular y transportable	
	D	Registro de time-lapse	
2		GEOMETRÍA	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	Dimensiones de impresión [2.0 m largo] x [2.0 m ancho] x [3.0 m alto]	
	E	Volumen de impresión efectivo [1.25 m largo] x [1.25 m ancho] x [1.2 m alto].	
3		CINEMÁTICA	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	Velocidad de impresión < 20 cm/s	
	E	Velocidad de desplazamiento de extrusor < 30 cm/s	
4		CARGA	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	Carga máxima de cabezal de extrusor de 22.5 kg	
	D	Peso máximo del sistema < 100kg	
5		ENERGÍA	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	Suministro energético trifásico de 220VAC, 60Hz	
6		COMUNICACIÓN	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	Comunicación entre la impresora e interfaz remota, se debe dar a través de conexión inalámbrica.	
7		SEÑALES DE ENTRADA	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	Señal de inicio de impresión	
	E	Señal de navegación en interfaz de usuario	
	E	Señal de encendido del sistema.	
	E	Señal de apagado de emergencia	
	E	Dispositivo USB con el modelo 3D a imprimir	
	E	Señal de parada de emergencia	
8		SEÑALES DE SALIDA	Armando Arturo Custodio Díaz
	D	Ruido del sistema menor a 50.8 dB	
	E	Señal cuando la impresión está al 98%.	
	E	Señal visual de progreso de la impresión.	
	D	Señal visual de error en la interfaz, en caso de detección	
	E	Señal de control de caudal de material de impresión	
9		CONTROL	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	Control de posición de cabezal [X, Y, Z]	
	E	Control de la velocidad de impresión	
	E	Control de la velocidad de desplazamiento	
	E	Control del caudal de material de impresión	

LISTA DE REQUERIMIENTOS			Página 2 de 2
			Edición: Armando Arturo Custodio Díaz
PROYECTO:	SISTEMA AVANZADO DE IMPRESIÓN 3D DE CONCRETO PARA APLICACIONES DE INVESTIGACIÓN EN LABORATORIO		Fecha: 07-08-2023
			Revisado: xx-xx-2023
CLIENTE:	PUCP		Elaborado: Armando Arturo Custodio Díaz
N°	Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable
10		ELECTRÓNICA	Armando Arturo Custodio Díaz
	D	Cámara de monitoreo remoto y time-lapse	
11		SEGURIDAD	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	Señalización perimétrica de seguridad	
	D	Acceso a al menos 2 caras visibles de la impresora	
12		ERGONOMÍA	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	Interfaz debe seguir el standard ISO 9241-210	
	E	La impresión se realizará en un pallet o plataforma, mesa móvil.	
13		MANTENIMIENTO	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	Mantenimiento anual	
14		MONTAJE Y DESMONTAJE	Armando Arturo Custodio Díaz
	D	Montaje y desmontaje a un tiempo menor a 5 horas y con tres operarios	
15		ÁREA DE TRABAJO	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	Laboratorio Fabcore Fab01, pabellón K, PUCP	
16		COSTO	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	Presupuesto para el proyecto de S/. 26,700	
17		PLAZO	Armando Arturo Custodio Díaz
	E	12 meses de plazo desde octubre del 2023	

C.2. Black Blox Diagram [Diagrama de Caja Negra]

El diagrama Black Box [Caja Negra] se utiliza para tener un entendimiento de todas las entradas, salidas y variables relacionadas al sistema. Aquellas que se tienen en cuenta conforme a la lista de requerimientos y la secuencia de funciones que se debe cumplir. En este diagrama se identifica la función principal y las entradas y salidas del sistema. El diagrama Black Box, junto a sus entradas y salidas de materia, energía y señales. Las entradas y salidas del sistema se explican en la Tabla C.1 y la Tabla C.2 respectivamente.

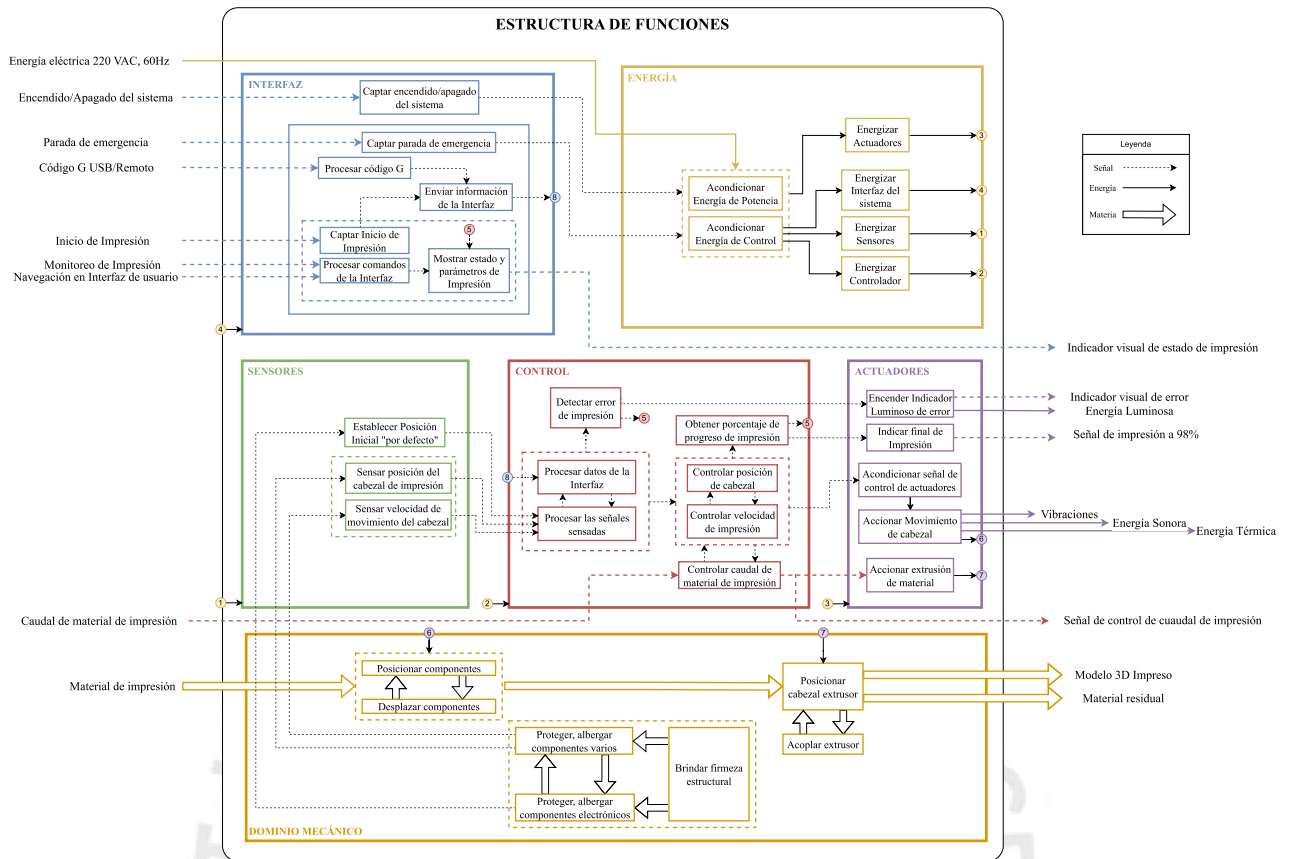
Tabla C.1 - Entradas del Black Box Diagram del sistema de impresión
(Fuente: Elaboración propia)

Entradas		
Tipo	Entrada	Explicación
Energía	Energía Eléctrica 220VAC, 60Hz	Se define como fuente de energía de entrada para alimentar el sistema una fuente de tensión de 220 VAC / 60 Hz. Esta energía se regulará internamente en el sistema para operar los componentes que lo integran.
Señal	Inicio de Impresión	Es la señal que indica el inicio del proceso de impresión, de acuerdo al modelo 3D a imprimir
	Navegación en interfaz de usuario	Se tienen las señales enviadas por el operario mediante la navegación en la interfaz. A través de esta se puede acceder al modo “home 3D Printer”
	Monitoreo de impresión	En la interfaz, además, se puede acceder a un modo de monitoreo de la impresión, esto además se puede dar en la interfaz remota. Se puede apreciar el progreso de la impresión, estado de la batería, velocidad promedio de desplazamiento o impresión y detección de error
	Código G USB / Remoto	El Código G que representa el modelo 3D a imprimir sirve como entrada, este puede darse mediante un dispositivo USB o en la interfaz remota
	Parada de emergencia	En caso de un malfuncionamiento, se tiene la parada de emergencia, que corta el suministro eléctrico general
	Encendido/Apagado del sistema	Señal de encendido o apagado eléctrico general del sistema
	Caudal de material de impresión	Señal proveniente desde un sistema externo, donde se tiene información del caudal de material de impresión
Materia	Material de impresión	Es la materia prima del sistema, material cementoso para impresión de estructuras, patrones, materiales de prueba.

Tabla C.2 - Salidas del Black Box Diagram del sistema de impresión
(Fuente: Elaboración propia)

Salidas		
Tipo	Entrada	Explicación
Energía	Vibraciones	Movimientos oscilatorios que se pueden dar por el movimiento de actuadores componentes necesarios para la impresión 3D
	Energía Térmica	Como resultado de la conversión y dispersión de la energía eléctrica, el sistema liberará energía en forma de calor
	Energía Sonora	El ruido generado durante la impresión 3D de concreto debido a movimientos, fricción y extrusiones
	Energía Luminosa	Señal luminosa utilizada en la detección de errores de impresión y monitoreo del proceso de impresión mediante la interfaz
Señal	Indicador visual de error	Señal visual que alerta sobre problemas o fallas en la impresión
	Indicador visual de estado de impresión	Son indicadores que se presentan en la pantalla de la interfaz y habilitan al usuario para observar las diversas variables de estado de manera visual
	Señal sonora de impresión a 98%	Esta señal se emite para notificar al usuario que el proceso de impresión está a punto de ser completado y que las piezas pueden ser retiradas de la impresora
	Señal de control de caudal de impresión	Esta señal se envía desde el sistema de impresión para controlar el caudal de material de impresión con el que se está realizando el proceso de impresión
Materia	Modelo 3D Impreso	Es la pieza fabricada por el sistema mecatrónico, una vez terminado el proceso de impresión
	Material residual	Restos del material de impresión de entrada de se generan durante la impresión

C.3. Estructura de funciones



i. Dominio de Interfaz

Según la lista de requerimientos, la interfaz del sistema debe captar el inicio de impresión y procesar comandos de la interfaz, como monitoreo del estado de impresión, estado de la batería y detección de posibles errores. Además, todas las funciones mostradas se pueden realizar tanto en la interfaz solidaria al sistema como de manera remota, con excepción al encendido y apagado del sistema. En la Figura C.1, se aprecia el dominio de interfaz y su interconexión con los demás dominios.

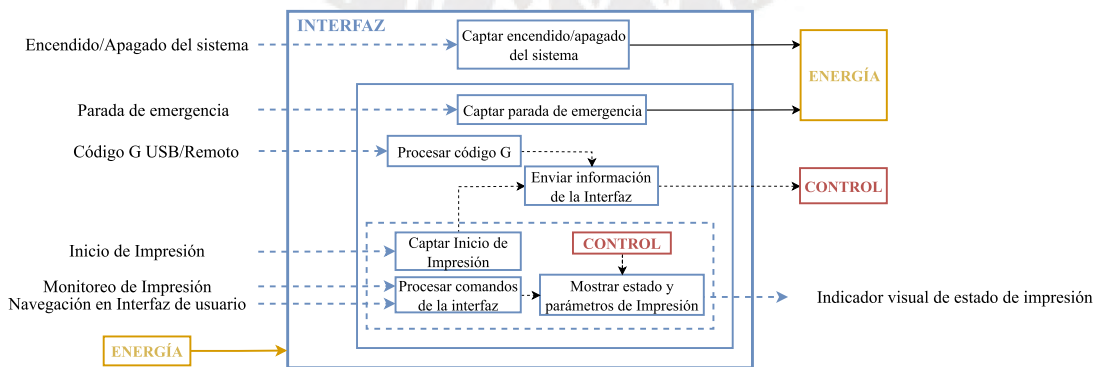


Figura C.1 - Dominio de Interfaz del sistema de impresión 3D
(Fuente: Elaboración propia)

Captar encendido/apagado del sistema: Recibir la señal de encendido o apagado para iniciar o finalizar el suministro energético al sistema.

Captar parada de emergencia: Recibir señal de parada de emergencia para detener el suministro energético y detener el sistema en caso de algún imprevisto.

Procesar código G: Recibir archivo G-code, del modelo 3D a imprimir. Dicha función es válida de manera remota (recibir el código G vía Wifi) o de manera solidaria (recibir el código G vía dispositivo externo).

Enviar información de la Interfaz: Se envía hacia el dominio de control, información a partir de los comandos del usuario en la interfaz, esta información será desde la interfaz solidaria o la interfaz remota.

Captar Inicio de Impresión: Captar la señal de inicio del proceso de impresión.

Procesar comandos de la interfaz: Los comandos que se dan en la interfaz por el usuario, son procesados para poderlos mostrar y tener interacción usuario – interfaz.

Mostrar estado y parámetros de Impresión: Desde el dominio de control y la interfaz, se obtiene la información necesaria para mostrar parámetros de impresión como porcentaje de progreso de impresión, estado del módulo de batería y detección de error de impresión.

ii. Dominio de Energía

Desde el dominio de energía mostrado en la Figura C.2 se debe considerar un bloque de funciones desde el cual se transforme la energía solar en energía eléctrica almacenable. Además, desde la interfaz, donde se tiene la parada de emergencia e inicio y apagado del sistema, se debe asegurar una conexión al dominio energético. Finalmente, se considera la energización de los demás dominios como el de sensores, control, actuadores e interfaz.

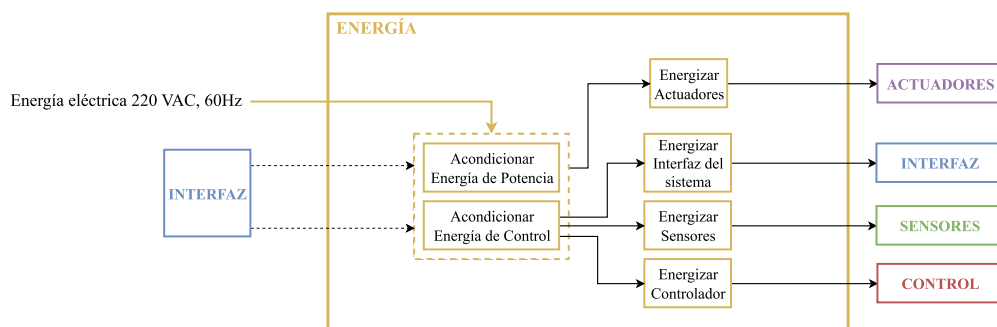


Figura C.2 - Dominio de Energía del sistema de impresión 3D
(Fuente: Elaboración propia)

Acondicionar Energía de Potencia: Preparar y estabilizar la energía 220VAC, 60Hz para que sea compatible con los componentes de potencia y actuadores.

Acondicionar Energía de Control: Adaptar la energía eléctrica 220VAC, 60Hz para que sea adecuada para alimentar los sistemas de control, sensores e interfaz.

iii. Dominio de Sensores

El dominio de sensores, cuyo diagrama se puede apreciar en la Figura C.3, obtiene información del dominio mecánico, desde el cual se capta la información necesaria para calcular la posición “por defecto” del sistema, posición y velocidad del cabezal de impresión y la energía DC en el módulo de batería. Esta información es enviada al dominio de control para posterior procesamiento.

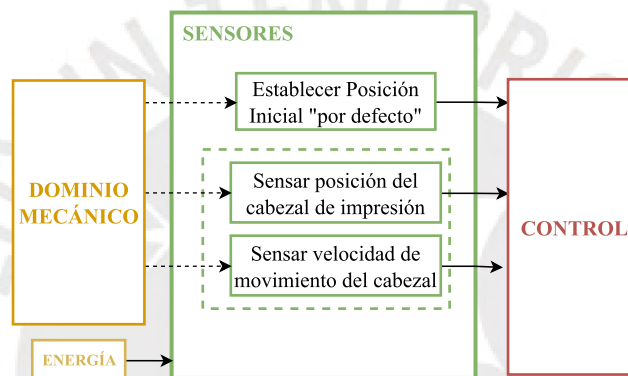


Figura C.3 - Dominio de Sensores del sistema de impresión 3D
(Fuente: Elaboración propia)

Establecer Posición Inicial "por defecto": Configurar la posición inicial predeterminada del sistema de impresión 3D, proporcionando un punto de partida por defecto para componentes estructurales de la impresión, es decir, posición por defecto del cabezal extrusor.

Sensar posición del cabezal de impresión: Implica medir y obtener información necesaria para calcular la ubicación del cabezal de impresión, lo que permite un control preciso y un seguimiento de su posición durante la impresión.

Sensar velocidad de movimiento del cabezal: Se encarga de detectar y obtener información necesaria para calcular la velocidad de desplazamiento del cabezal de impresión.

iv. Dominio de Control

El dominio de control del sistema de impresión se encarga de procesar las señales provenientes de la interfaz y sensores. A partir de ello, retroalimentan nueva información a la interfaz, como progreso de impresión, posible detección de error y estado del módulo de batería. Por otro lado, de acuerdo a la lista

de requerimientos, se debe controlar la posición, velocidad del cabezal extrusor y el caudal de material de impresión. Para el control de posición y velocidad, se tiene un lazo de control cerrado, el cual después de ser procesado en el dominio de control, va al dominio de actuadores. Para el control del caudal de material de impresión se tendrá una señal de entrada con información del caudal y desde el sistema se tendrá una señal de control, la cual va hacia un sistema externo. En la Figura C.4 se muestra el diagrama de dominio de control, donde se puede apreciar la relación entre dominios.

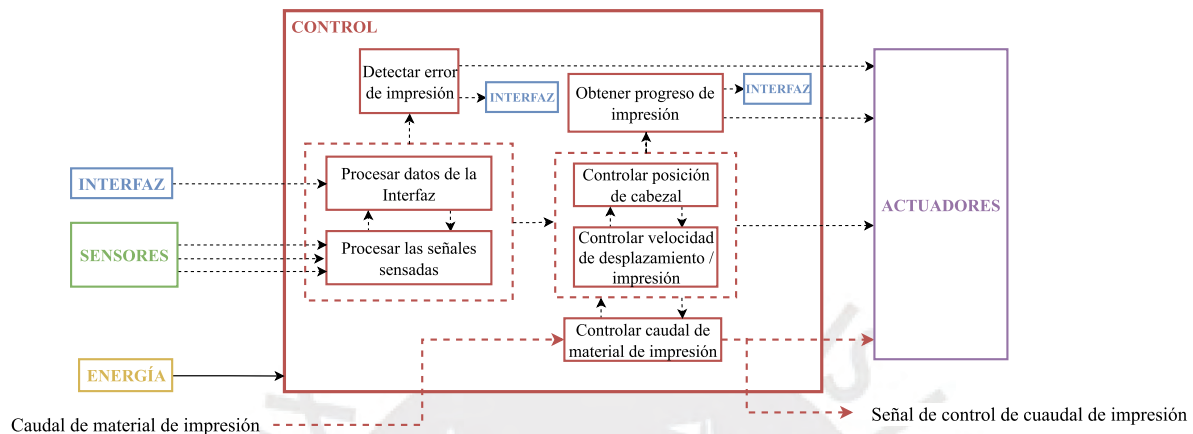


Figura C.4 - Dominio de Control del sistema de impresión 3D
(Fuente: Elaboración propia)

Detectar error de impresión: Identificar cualquier irregularidad o problema en el proceso de impresión, como defectos en la capa o desviaciones del diseño original, con el objetivo de tomar medidas correctivas, esto se logrará analizando la información obtenida desde los sensores.

Procesar datos de la Interfaz: Procesamiento de la información proveniente de la interfaz del sistema, incluyendo las instrucciones de impresión y ajustes seleccionados.

Procesar las señales sensadas: Análisis y procesamiento de las señales capturadas por los sensores del sistema, como las relacionadas con la posición, velocidad y energía, con el fin de tomar decisiones y ajustes en tiempo real.

Controlar posición de cabezal: Ajustar y mantener la posición precisa del cabezal de impresión en coordinación con los datos de diseño (código G o instrucción de movimiento), garantizando una impresión precisa. Enviar las señales necesarias a partir de la posición actual, para llegar a la posición deseada.

Controlar velocidad de impresión: Regular la velocidad de movimiento del cabezal de impresión de acuerdo con las especificaciones de diseño (código G). Enviar señales necesarias a partir de la velocidad actual para llegar a la velocidad de impresión o movimiento deseado.

Controlar caudal de material de impresión: A partir de la señal de entrada donde se obtiene información del caudal actual del material de impresión o a partir de ello, enviar una señal de salida para gestionar la cantidad y el flujo de este material suministrado al cabezal, controlando la extrusión precisa de material durante el proceso de impresión.

v. Dominio de Actuadores

El dominio de actuadores, utiliza las señales procesadas y obtenidas desde el dominio de control para principalmente accionar el movimiento del cabezal extrusor, teniendo vibraciones, disipación de energía sonora y térmica en el proceso. Se tiene, además, el accionamiento de extrusión de material, indicadores luminosos y una señal de finalizado de impresión. Se muestra el dominio de actuadores en la Figura C.5, donde se puede apreciar, además, la conexión entre este dominio y el mecánico, donde se da el funcionamiento físico del sistema.

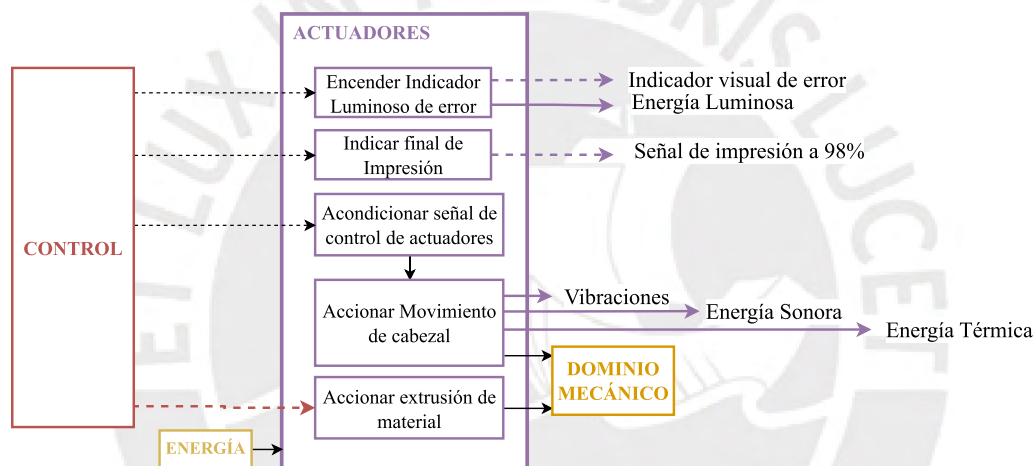


Figura C.5 - Dominio de Actuadores del sistema de impresión 3D
(Fuente: Elaboración propia)

Encender Indicador Luminoso de error: Activar un indicador luminoso en caso de detectarse un error en el proceso de impresión, proporcionando una señal visual de que algo está mal.

Indicar final de Impresión: Notificar de manera visual, audible o a un dispositivo móvil, la finalización exitosa del trabajo de impresión, en este caso, cuando la impresión está a un 98%. Alertando al usuario de que el proceso está inminentemente a concluir.

Acondicionar señal de control de actuadores: Implica la preparación y adaptación de señales de control que se envían para regular y modificar el funcionamiento de los actuadores, para garantizar un movimiento preciso y coordinado del cabezal y otros componentes.

Accionar Movimiento de cabezal: Ejecutar el movimiento del cabezal de impresión a partir del accionamiento de los actuadores del sistema. Siguiendo las instrucciones obtenidas desde el dominio de control y los comandos de movimiento.

Accionar extrusión de material: Activar y controlar el proceso de extrusión de material de impresión, a partir de la señal de salida de control de caudal de material de extrusión. Esta función representa el cabezal extrusor, que en la estructura de funciones se ve que su entrada, es una señal de salida del sistema, pues debido al alcance de la tesis, el cabezal de extrusor será un sistema que será acoplado al presente y desarrollado por un tesista externo del Fabcore.

vi. Dominio Mecánico

Desde el dominio mecánico mostrado en la Figura C.6, se tiene la estructura, configuración y componentes necesarios para el funcionamiento del sistema de impresión. Tiene como entrada las acciones realizadas por los actuadores y el material de impresión, que será convertido en un diseño en 3D, se tendrá en el proceso material residual y constante medición de parámetros como posición y velocidad del cabezal de impresión y la energía DC en el módulo de batería.

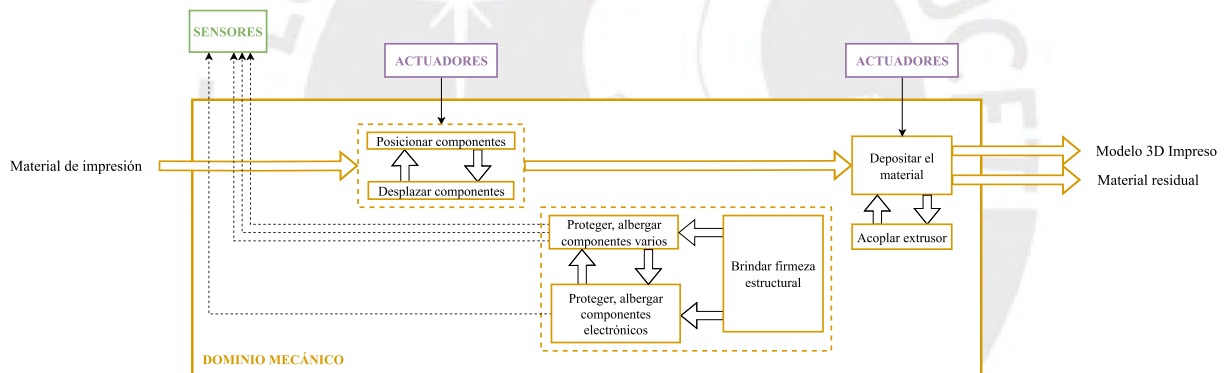


Figura C.6 - Dominio Mecánico del sistema de impresión 3D
(Fuente: Elaboración propia)

Posicionar componentes: Implica un mecanismo para que los diversos componentes del sistema puedan llegar a sus posiciones designadas dentro de la estructura, garantizando un movimiento preciso.

Desplazar componentes: Consiste en desplazar componentes dentro del sistema, con un mecanismo que trabaje junto al mecanismo de posicionamiento de componentes

Acoplar extrusor: Consiste en el mecanismo para conectar y fijar de manera segura el cabezal extrusor al sistema de impresión, garantizando una operación estable durante la extrusión de material.

Posicionar cabezal extrusor: Se encarga de ubicar con precisión el cabezal extrusor en la posición correcta. Esto se logrará teniendo en cuenta las configuraciones de impresión 3D con el que el sistema será diseñado.

Proteger, albergar componentes varios: Proporcionar un entorno para albergar y resguardar componentes del sistema como actuadores y mecanismos de posicionamiento y desplazamiento, esto puede ser con diferentes estructuras de impresora 3D, ya sea abierta, cerrada o enjaulada.

Proteger, albergar componentes electrónicos: Proporcionar un entorno para resguardar los diversos componentes electrónicos. Separando las fuentes de potencia y control para alimentar a los actuadores y procesar la información desde los sensores.

Finalmente, para un mejor entendimiento de la interacción entre el sistema de impresión modular y el sistema de extrusión de material, se presenta la Figura C.7. En ella se puede observar como la señal de caudal de entrada, la cual es sensada desde el sistema de extrusión de material, sirve como entrada para el control del sistema de impresión y a partir de ella, es comparada ante la referencia que el sistema de impresión necesita y el error, es enviado como señal de control hacia el controlador del sistema de extrusión de material, con ello, se acciona la bomba y se vuelve a sensar el material de impresión. Con ello se tiene un lazo de control cerrado entre ambos sistemas y con ello, se tiene claro cuál es la funcionalidad de cada sistema en esta operación.

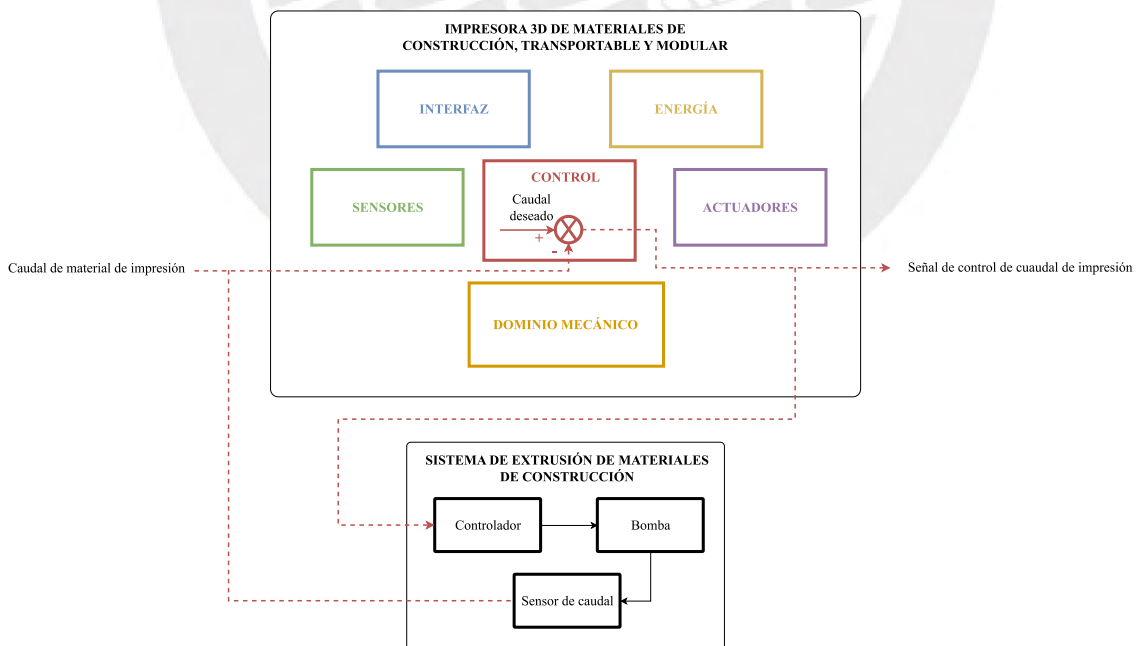




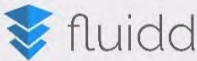


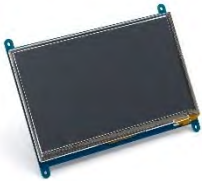








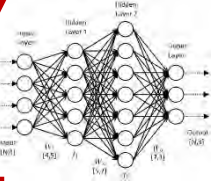
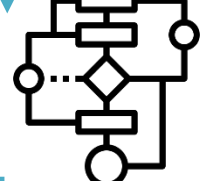


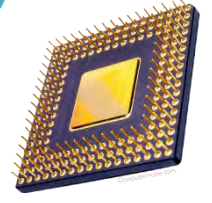


Figura C.7 - Interacción entre el sistema de impresión y el sistema de extrusión de material
(Fuente: Elaboración propia)






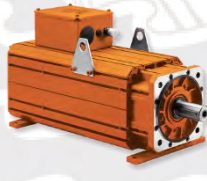


C.4. Matriz Morfológica

DISEÑO DE UNA IMPRESORA 3D DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, TRANSPORTABLE Y MODULAR					
Dominio	Función	Portadores de funciones			
INTERFAZ	Captar encendido/apagado del sistema	Botón pulsador 	Switch 	Key Switch 	
	Captar parada de emergencia	E-Stop Switch 			
	Enviar información de la Interfaz	Fluidd 	Mainsail 	OctoPrint 	
	Captar Inicio de Impresión	Pantalla Táctil 		HMI 	
	Procesar comandos de la Interfaz				
	Mostrar estado y parámetros de Impresión				
	Procesar código G	USB 			
ENERGÍA	Acondicionar Energía de Potencia	Fuente Switching 		Rectificador 	
	Acondicionar Energía de Control				







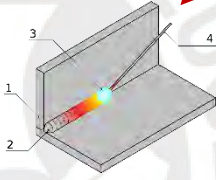


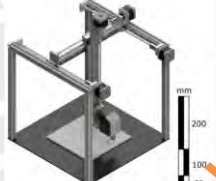




**DISEÑO DE UNA IMPRESORA 3D DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN,
TRANSPORTABLE Y MODULAR**

Dominio	Función	Portadores de funciones		
SENSORES	Establecer Posición Inicial "por defecto"	Limit Switch Mecánico 	Limit Switch Inductivo 	Limit Switch Capacitivo 
	Sensor posición del cabezal de impresión		Encoder	
	Sensor velocidad de movimiento del cabezal			
CONTROL	Detectar error de impresión	Cálculos directos $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$	Redes Neuronales 	Algoritmos 
	Procesar datos de la Interfaz	Placa controladora 	Controlador CNC 	CPU 
	Procesar las señales sensadas			
	Controlar posición de cabezal			
	Controlar velocidad de desplazamiento / impresión			
Controlar caudal de material de impresión				

**DISEÑO DE UNA IMPRESORA 3D DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN,
TRANSPORTABLE Y MODULAR**

Dominio	Función	Portadores de funciones		
ACTUADORES	Encender Indicador Luminoso de error	<p align="center">Indicador LED</p> 		
	Indicar final de Impresión	<p align="center">Buzzer</p> 	<p align="center">Indicador LED</p> 	<p align="center">Mensaje a celular</p> 
	Acondicionar señal de control de actuadores	<p align="center">Driver de motor</p> 		
	Accionar Movimiento de cabezal	<p align="center">Servomotor Industrial</p> 	<p align="center">Stepper Motor</p> 	
	Accionar extrusión de material	<p align="center">Cabezal extrusor</p> 		

**DISEÑO DE UNA IMPRESORA 3D DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN,
TRANSPORTABLE Y MODULAR**

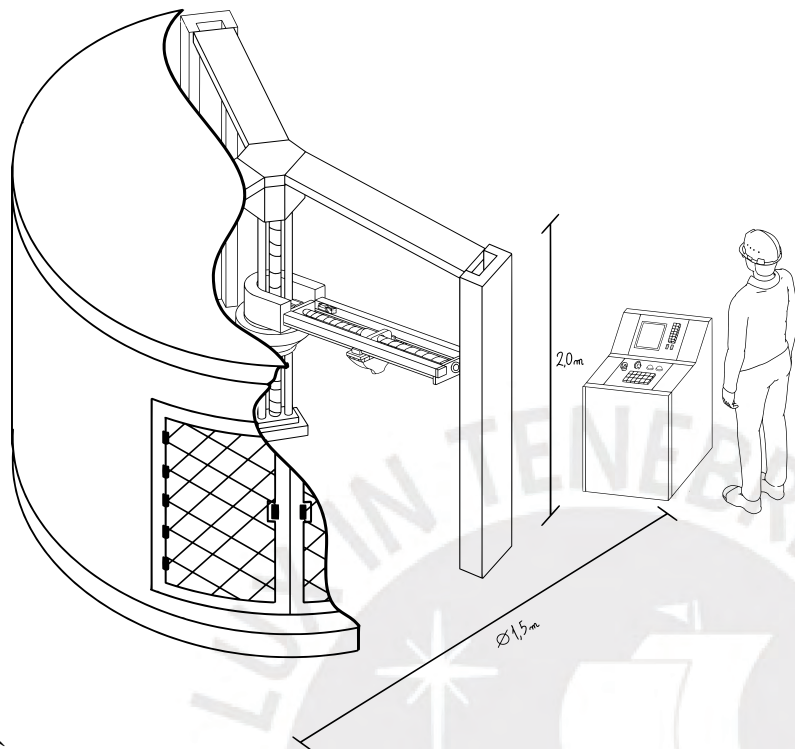
Dominio	Función	Portadores de funciones		
	Posicionar componentes	 <p>Bloque deslizante</p>		 <p>Guía con ruedas</p>
MECÁNICA	Desplazar componentes	 <p>Cremallera</p>	 <p>Correa</p>	 <p>Husillo de bolas</p>
	Acoplar extrusor	 <p>Uniones atornilladas</p>	 <p>Soldadura</p>	 <p>Acople</p>
	Posicionar cabezal extrusor	 <p>Brazo Robótico</p>	 <p>Configuración Cartesiana</p>	 <p>Configuración Delta</p>
	Proteger / Albergar componentes electrónicos	 <p>Caja de control industrial</p>		
	Proteger / Albergar componentes varios	 <p>Estructura cubierta</p>	 <p>Estructura abierta</p>	

C.5. Conceptos de solución

Se tienen tres conceptos de solución en total, los cuales se describirán de manera concisa en esta sección. Estos conceptos se derivan de la elección de opciones en la matriz morfológica que se encuentra en el Anexo C, y estas opciones seleccionadas se encuentran detalladas en la sección anterior. La dinámica a seguir para la presentación de estos conceptos de solución será de la siguiente manera, en un inicio se mostrará de manera general una vista de los sistemas propuestos. Posteriormente, se analizará mediante módulos, a partir de los cuales, se irá realizando la construcción desde cero del sistema y mostrando cada uno de sus componentes.

C.5.1. Concepto de Solución 1

Para el segundo concepto de solución, se ha tenido en cuenta, la **robustez** del mismo, debido al uso de componentes industriales. Con componentes que garanticen la precisión y repetibilidad del movimiento en tres dimensiones. Se tiene, además, la característica principal de ser un sistema de impresión de configuración delta y estructura cubierta. En la Figura C.8 se muestra de manera general la configuración y carcasa del bosquejo de la solución, donde se puede observar el diseño robusto mediante el uso de guías y husillo de bolas para el movimiento lineal, controlador CNC industrial, sensores inductivos industriales y HMI. Dada la configuración, se usarán 3 servomotores industriales y por consiguiente 3 encoders que vienen incluidos. Además, se usarán 2 limit switch inductivos que servirán para limitar el movimiento vertical y a lo largo del radio del brazo robótico. El sistema mostrado sigue el movimiento dado por un sistema de coordenadas cilíndricas por lo que se ha dividido en 5 módulos: módulo estructural, módulo theta, módulo radio, módulo carcasa y módulo interfaz.



Leyenda

1. Kew switch
2. E-stop switch
3. Interfaz web Fluid
4. HMI
5. Puerto USB
6. Fuente switching
7. Encoder en servomotor
8. Limit switch inductivo
9. Redes neuronales
10. Controlador CNC
11. Indicador LED
12. Indicador LED
13. Driver de servomotor
14. Servomotor industrial
15. Cabezal extrusor
16. Bloques deslizantes
17. Husillo de bolas
18. Unión soldada
19. Configuración brazo robótico
20. Caja de control industrial

Figura C.8 - Concepto de solución 1, sistema con brazo robótico|
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis de modularidad, CS1:

Como se mencionó, el CS1, se tiene 5 módulos los cuales serán explicados a continuación. Inicialmente, se tiene el módulo estructural, desde el cuál se brindará firmeza estructural y se albergarán los demás componentes, se muestra en la Figura C.9.

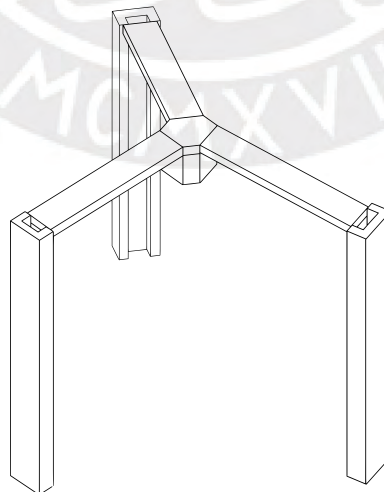


Figura C.9 – CS1, módulo estructural
(Fuente: Elaboración propia)

El módulo theta consiste en los componentes necesarios para realizar el movimiento angular rotatorio del brazo robótico. En la Figura C.10 se muestran cuatro etapas de montaje de este módulo. En (a) se aprecia el husillo de bolas que permitirá el movimiento vertical y será también usado en el módulo radio. En (b) se observa el montaje de slew bearing con su acople al husillo, el cual viene a ser el análogo a los rieles con bloques deslizantes en el movimiento rotario. En (c) se tiene el montaje del servomotor que accionará el movimiento rotatorio. Finalmente, en (d) se aprecia el montaje del servomotor para el movimiento vertical, limit switch inductivo y acople para el montaje del módulo radio.

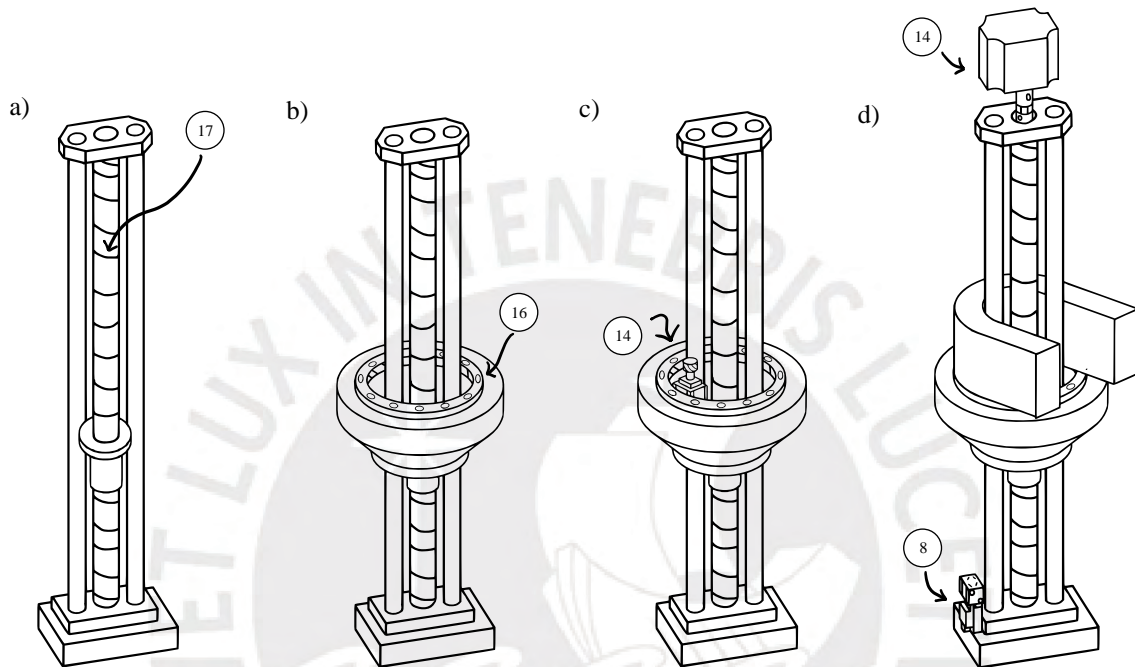


Figura C.10 – CS1, módulo theta
(Fuente: Elaboración propia)

El módulo radio incluye al cabezal extrusor, y el sistema lineal para movimiento a lo largo del radio del brazo robótico. En un inicio (a), se tiene el cabezal extrusor acoplado a una plataforma con bloques deslizantes, este acople es mediante soldadura. En (b), se tiene el montaje del husillo de bolas y con ello, el sistema de movimiento lineal. En (c), se puede apreciar la incorporación del limit switch inductivo y servomotor para accionar el movimiento.

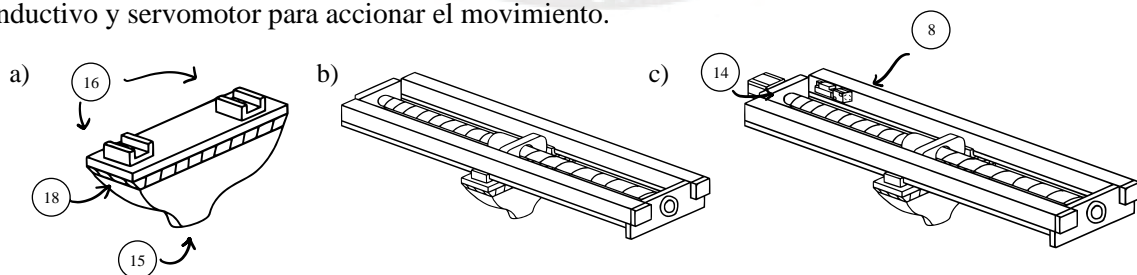


Figura C.11 – CS1, módulo radio
(Fuente: Elaboración propia)

Teniendo en cuenta los tres módulos explicados hasta ahora. El montaje entre módulo theta y radio se muestra en la Figura C.12 (a) y su montaje de módulo estructural se muestra en la Figura C.12 (b). Finalmente, en la Figura C.12 (c), se muestra el montaje de la carcasa.

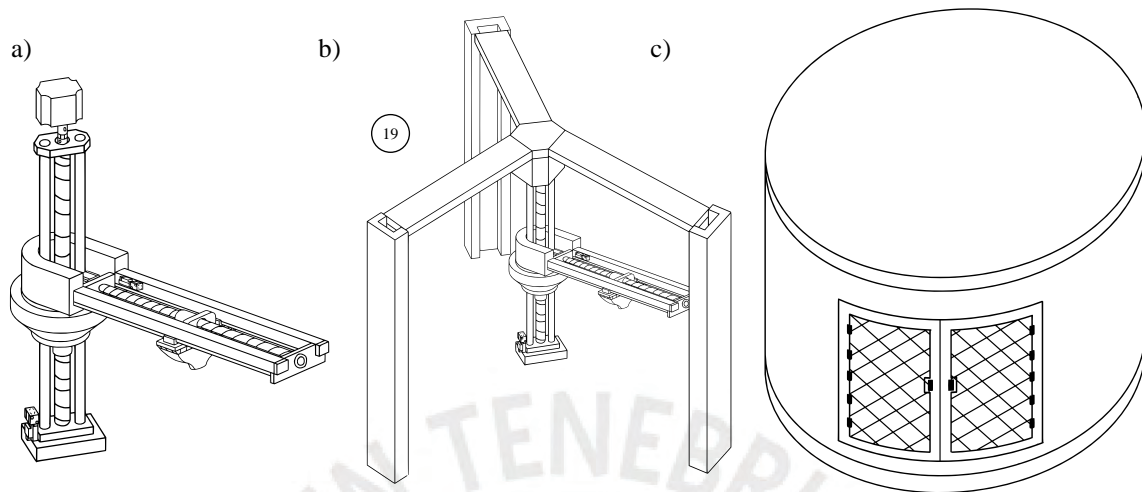


Figura C.12 – CS1, Montaje entre módulos
(Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, el módulo de interfaz incluye la caja de control industrial y la electrónica. La cual incluye los drivers de los tres servomotores, el módulo de interfaz web fluid, las fuentes switching de potencia y de control. Desde la interfaz directa, se tiene el key switch para encendido del sistema, el E-stop switch para la parada de emergencia, indicadores led para la detección de error y finalizado de impresión y los puertos USB para recibir el código G. El controlador CNC industrial normalmente viene en un solo componente junto al HMI y se usará para el control general del sistema y la detección de errores mediante redes neuronales. Todo lo descrito se muestra en la Figura C.13

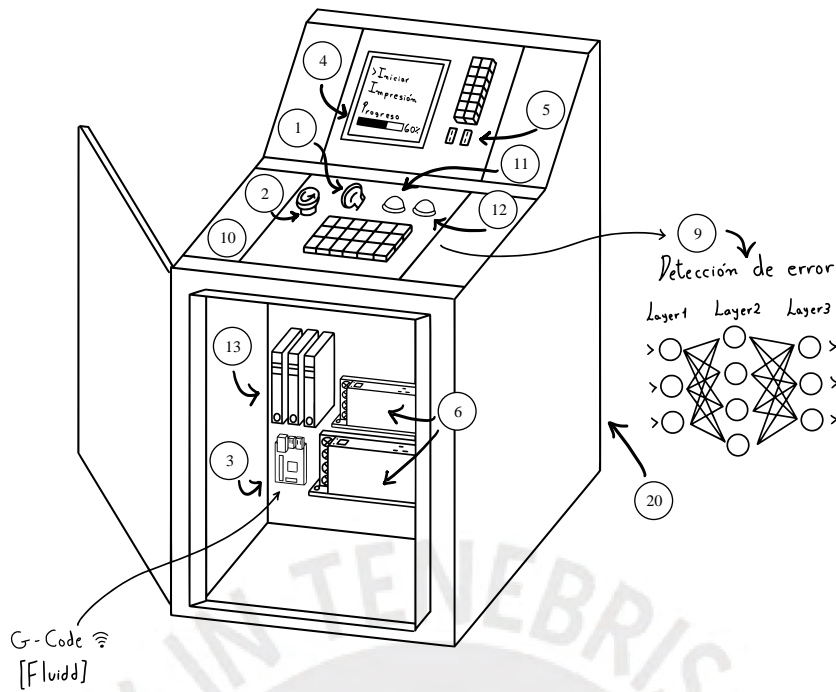


Figura C.13 – CS1, módulo interfaz
(Fuente: Elaboración propia)

C.5.2. Concepto de Solución 2

El concepto de solución 3 se caracteriza por ser el más eficiente en cuanto a velocidad de impresión y espacio. Esto es dado la configuración delta del sistema de impresión y con ello, la posibilidad de almacenar los componentes electrónicos en la parte superior. Por otro lado, la interfaz será muy simple y solo albergará componentes como la pantalla led, botón de encendido, parada de emergencia y puertos USB, Se puede dividir en 6 módulos: módulo estructural, módulo de movimiento lineal, módulo de movimiento de cabezal, módulo de electrónica, módulo de carcasa y módulo de interfaz. El bosquejo general se muestra en la Figura C.14. Se presenta, además, la leyenda de globos, para los componentes que se mostrará en el análisis de modularidad del concepto de solución 2.

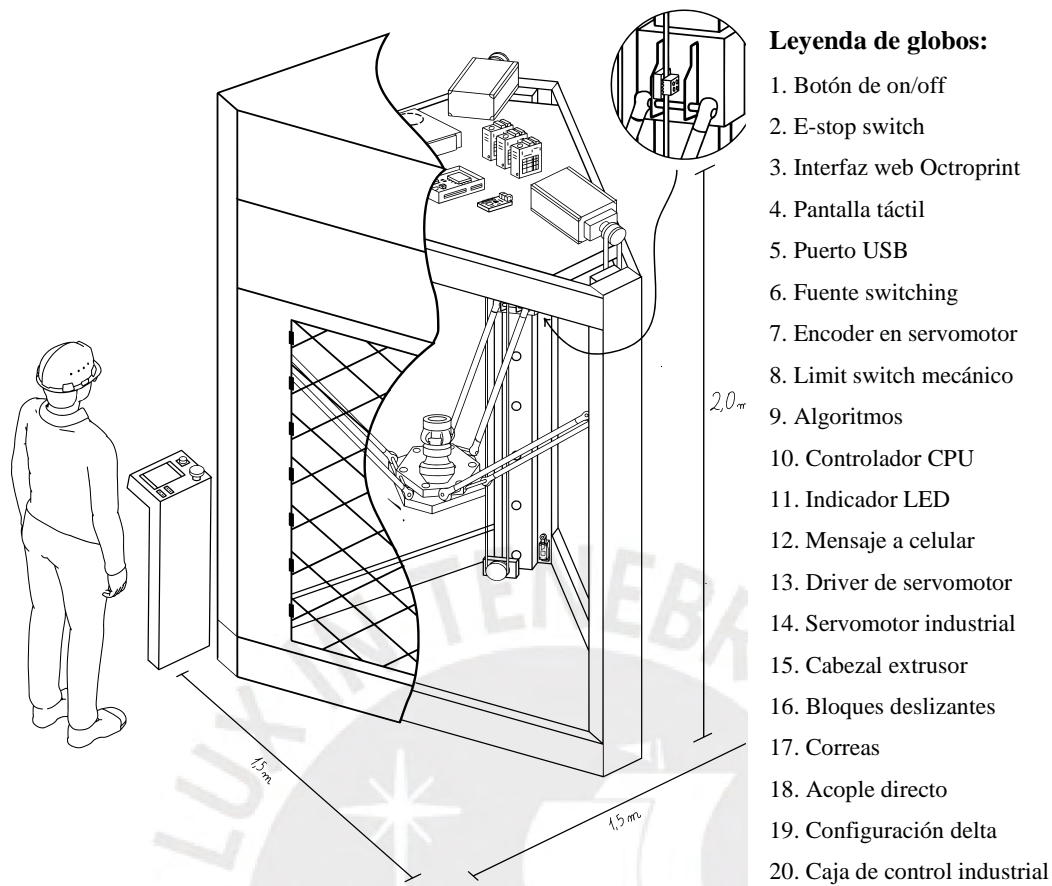


Figura C.14 - Concepto de solución 2, sistema delta
(Fuente: Elaboración propia)

Análisis de modularidad, CS2:

Inicialmente, el módulo estructural consiste en los componentes estructurales que serán ensamblados de tal manera que el sistema tenga la configuración delta. En este primer módulo se albergarán los demás componentes necesarios para el control del movimiento del cabezal, dicho módulo se puede apreciar en Figura C.15 (a). El módulo de movimiento lineal, implica el montaje de rieles y bloques deslizantes, dichos bloques deben tener el acople necesario para montar las varillas que actuarán como brazos para el sistema delta, dicho módulo se puede apreciar en Figura C.15 (b). Cabe tener en cuenta que para apreciar los componentes se ha removido la parte frontal del módulo estructural.

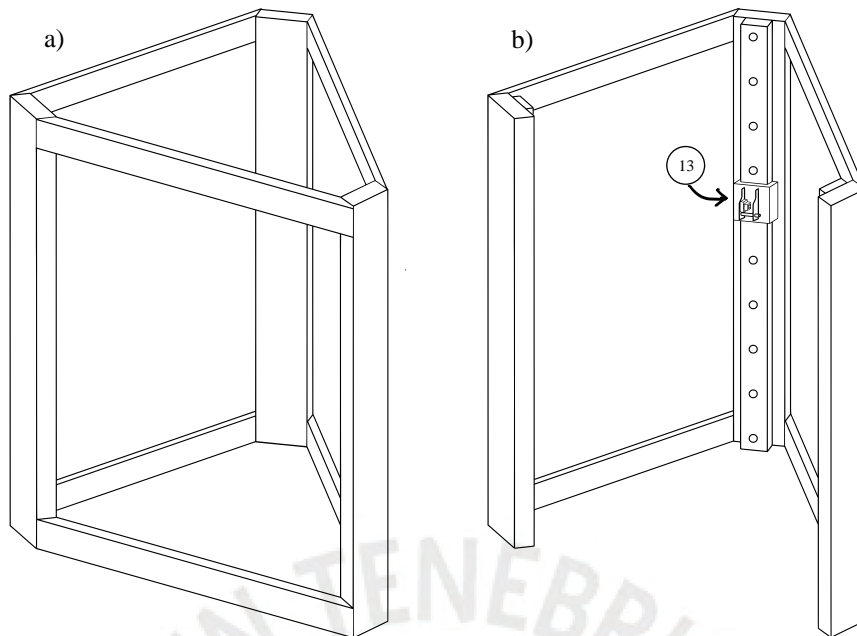


Figura C.15 – CS2, módulo estructural y módulo de movimiento lineal
(Fuente: Elaboración propia)

El módulo de movimiento de cabezal se divide en tres etapas importantes de montaje. En primer lugar, se montan las varillas delta que sostienen el cabezal extrusor, mostrado en la Figura C.16 (a). Luego, se monta el cabezal extrusor mediante un acople directo como se muestra en la Figura C.16 (b). Finalmente, se montan las correas que estarán acopladas a los bloques deslizantes y accionadas mediante tres servomotores industriales, los cuales tienen encoders incorporados, cuyo montaje se muestra en la Figura C.16.

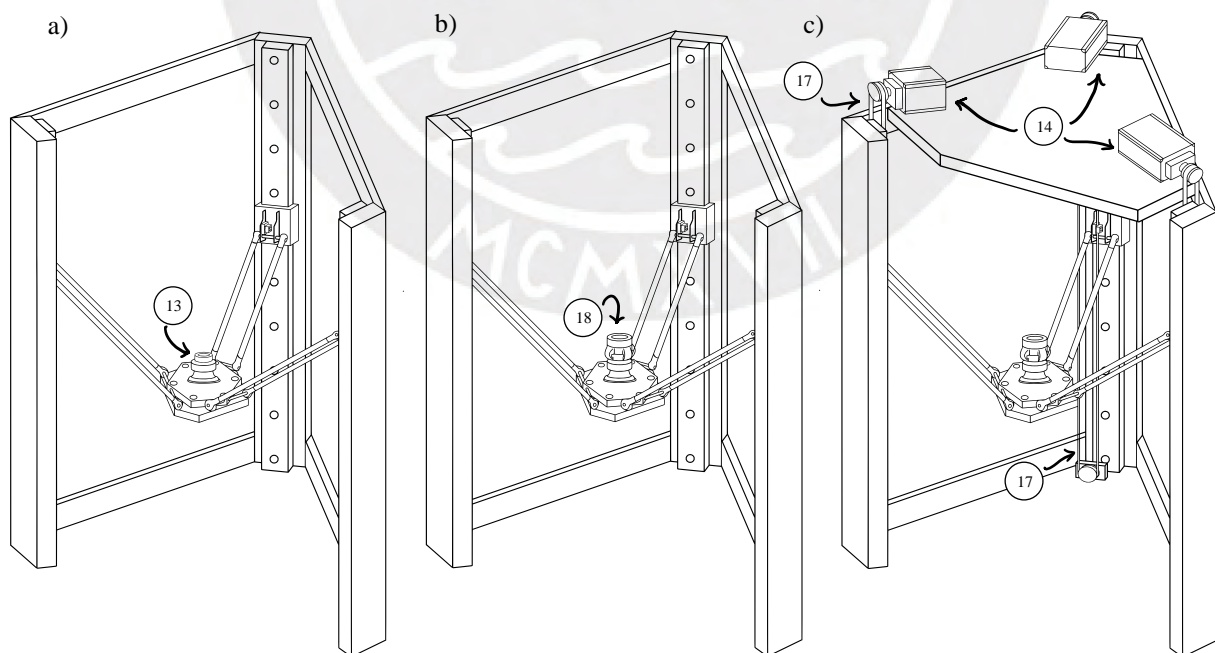


Figura C.16 – CS2, módulo de movimiento de cabezal
(Fuente: Elaboración propia)

El módulo de electrónica incluye componentes como la fuente switching, los tres drivers de tres los servomotores, la computadora de control con CPU, donde se realizará la detección de error mediante algoritmos [9], el módulo de interfaz web Octorprint y el limit switch mecánico. El montaje de estos componentes se realiza en la parte superior del sistema.

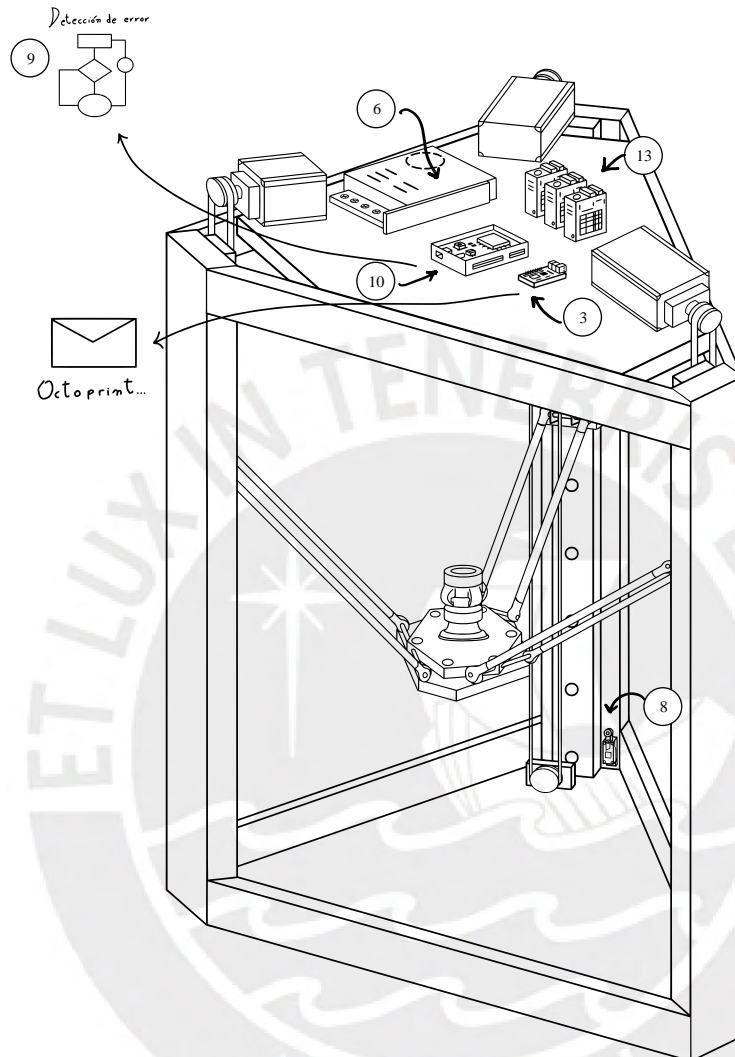


Figura C.17 – CS2, módulo de electrónica
(Fuente: Elaboración propia)

Finalmente se tiene el módulo de carcasa, que consiste en la cubierta exterior del sistema, con puertas y paneles acrílicos para que la impresión pueda ser observada, el módulo de interfaz es finalmente implementado, el cual se puede apreciar en la Figura C.18. Es importante tener en cuenta que el CS3, debe tener una estructura cubierta, por ello se tiene la carcasa, además, en el módulo de interfaz se puede encontrar componentes como la pantalla táctil que servirá como interfaz para el operario, puertos USB para ingresar el código G, el botón de encendido y apagado y el E-stop switch para el apagado de emergencia. Con ello se tiene el concepto de solución 3 completo.

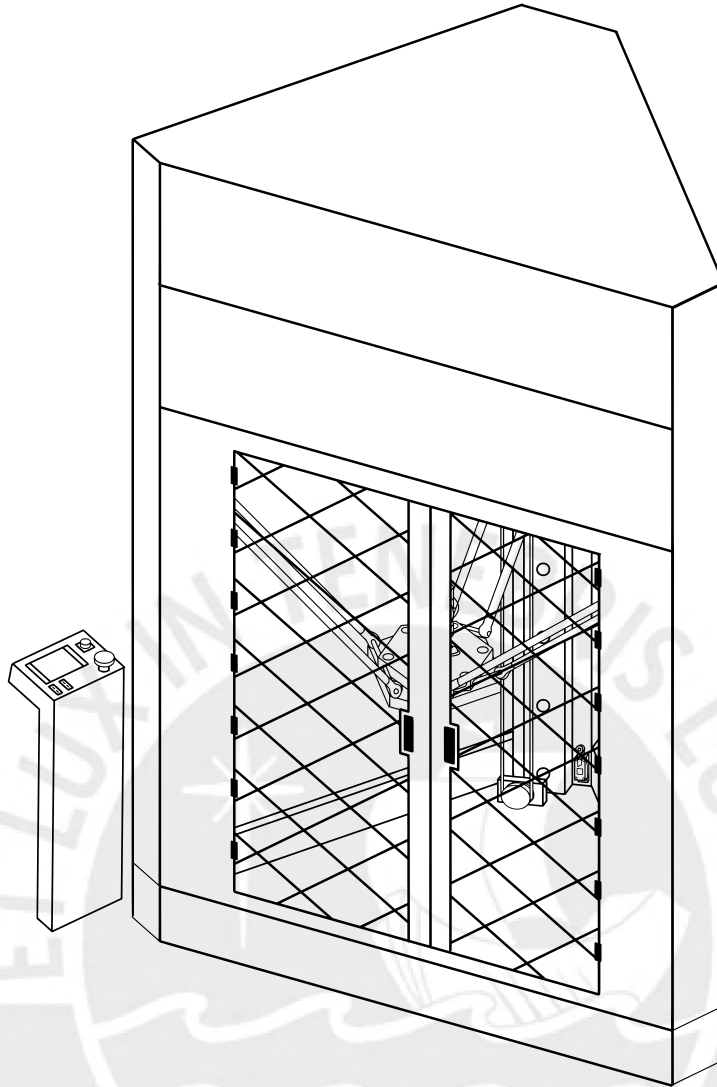
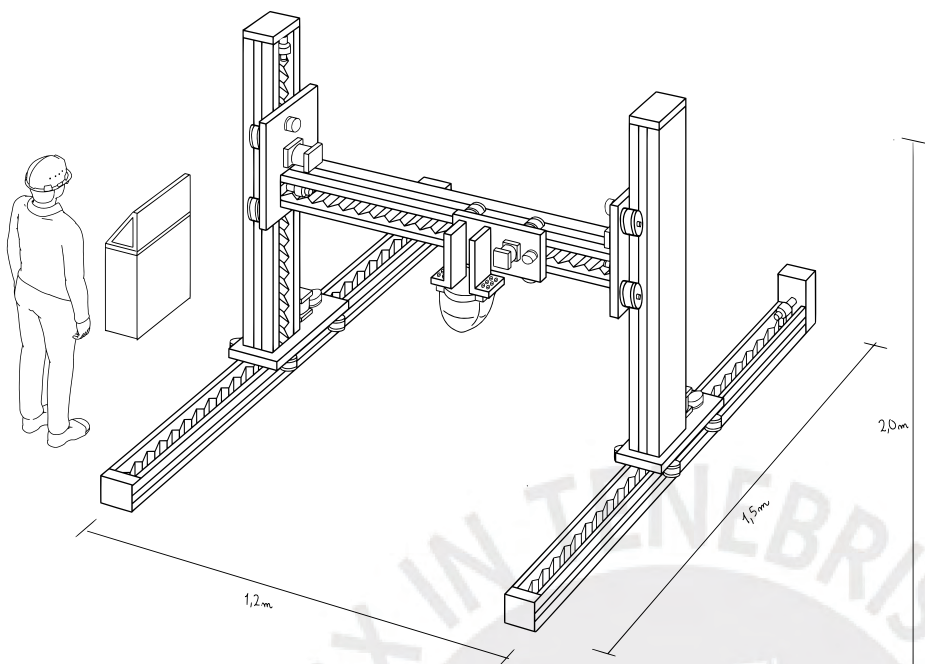


Figura C.18 – CS2, módulo carcasa y módulo interfaz
(Fuente: Elaboración propia)

C.5.3. Concepto de Solución 3

Este concepto de solución tiene la característica principal de ser el concepto de solución económico. Dada su configuración cartesiana, cuya información de componentes, firmware, tecnologías es ampliamente conocida y disponible en open source. En la Figura C.19. se muestra de manera general el sistema de impresión del tipo cartesiano, de estructura abierta y componentes económicos. El presente concepto de solución además cuenta a nivel electrónico con componentes como rectificador AC-DC, limit switch capacitivo, placa controladora y drivers de motores a paso. Por otro lado, desde el dominio mecánico, destaca las guías lineales con ruedas y movimiento lineal mediante rack y piñón. Dada la configuración, es importante tener en cuenta el uso de 5 motores a paso, 5 encoders, 5 limit switch capacitivos y 5 drivers de motores. El sistema de impresión se divide en 5 módulos: módulo eje X, módulo eje Y, módulo eje Z, módulo cabezal y módulo interfaz



Leyenda de globos:

1. Switch
2. E-stop switch
3. Interfaz web Mainsail
4. Pantalla táctil
5. Puerto USB
6. Rectificador
7. Encoder rotativo
8. Limit switch capacitivo
9. Cálculos directos
10. Placa controladora
11. Indicador LED
12. Buzzer
13. Driver de motor
14. Stepper motor
15. Cabezal extrusor
16. Guía con ruedas
17. Cremallera
18. Unión atornillada
19. Configuración cartesiana
20. Caja de control

Figura C.19 - Concepto de solución 3, sistema cartesiano
(Fuente: Elaboración propia)

Se tiene desde un inicio, el primer módulo, el cual es el eje X. En la Figura C.20 se pueden observar los componentes como la cremallera para el movimiento lineal y las guías con ruedas, los limit switch capacitivos, motores a paso y encoder rotativo.

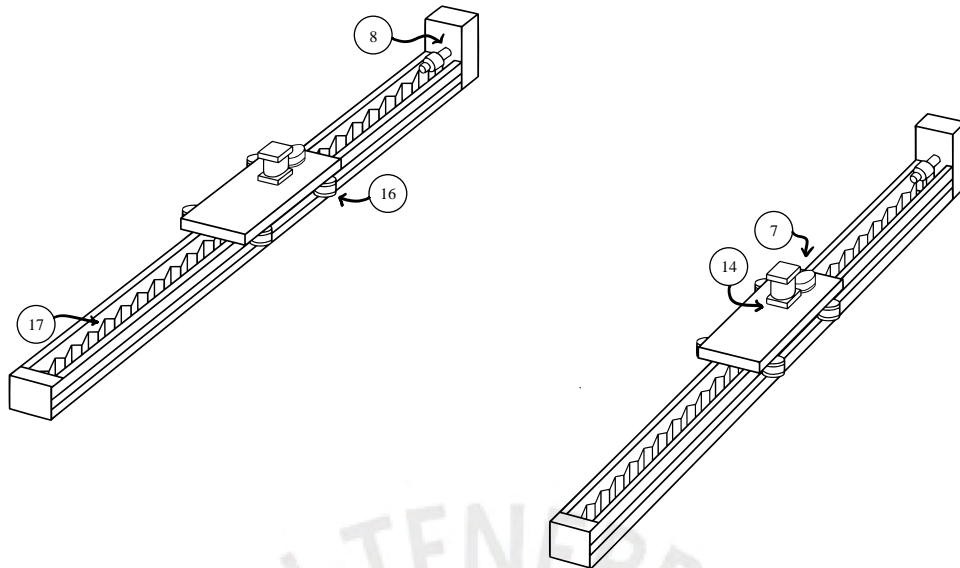


Figura C.20 – CS3, módulo eje X
(Fuente: Elaboración propia)

Del mismo modo, se cuenta con el módulo 2, el eje Z y el módulo 3, el eje Y. Los componentes son los mismos y su montaje en el sistema va según la Figura C.21 (a) y en la Figura C.21 (b) . Por otro lado, para un mejor entendimiento del funcionamiento del encoder junto al motor a pasos, en el sistema de movimiento lineal con cremallera, se muestra la Figura C.22.

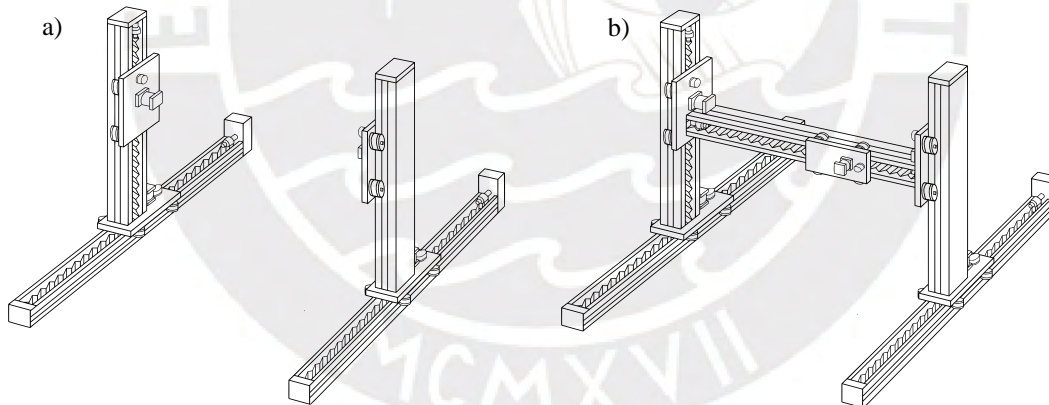


Figura C.21 – CS3, módulos eje Z y eje Y
(Fuente: Elaboración propia)

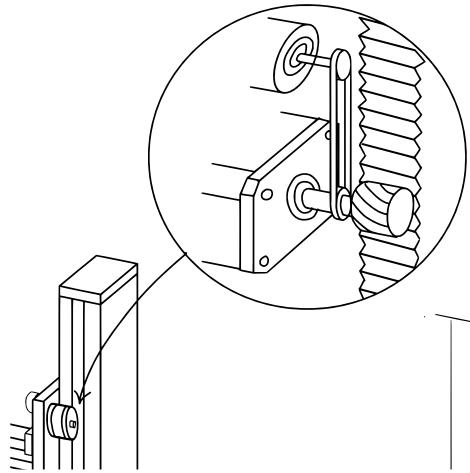


Figura C.22 – CS3, detalle de funcionamiento de encoder
(Fuente: Elaboración propia)

El cabezal extrusor, debe ser acoplado mediante uniones atornilladas. Dicha interacción se muestra en la Figura C.23.

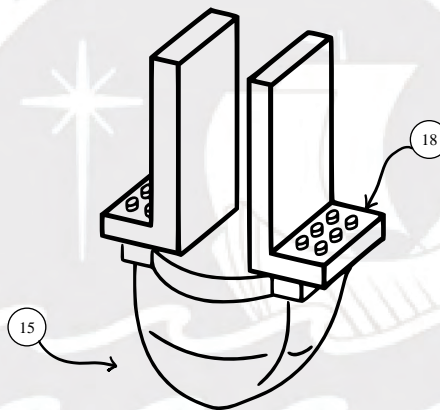


Figura C.23 – CS3, cabezal extrusor
(Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, la caja de control industrial e interfaz, se muestra en la Figura C.24. Desde la interfaz se tiene el switch de encendido y apagado, el E-Stop switch de parada de emergencia, el módulo de interfaz web mainsail, la pantalla táctil, las entradas USB, el buzzer, indicadores LED y detección de error mediante cálculos directos. Desde la electrónica, se tienen los 5 drivers de los motores, rectificadores de energía VAC a energía DC a usar para los componentes potencia y de control, y placa controladora.

o su aplicación. Sin embargo, no es necesaria la precisión milimétrica, por lo que se le asigna un peso de **dos**.

- **Concepto de solución 1:** El concepto de solución uno cuenta con un controlador CNC industrial, una configuración de brazo robótico tipo grúa y servomotor industrial con encoder por lo tanto, se le asigna el máximo puntaje de precisión, **tres**.
- **Concepto de solución 2:** El concepto de solución dos cuenta con encoders rotativos y un controlador CPU, que utilizan las impresoras 3D semiindustriales, sin embargo, la configuración delta hace que no sea la más precisa, por ello se le asigna un puntaje de **dos**.
- **Concepto de solución 3:** El concepto de solución tres cuenta principalmente con una configuración cartesiana, que destaca por su precisión. Sin embargo, cuenta con encoders rotativos y una placa controladora, por lo que se le asigna una puntuación de **dos**.

REPETIBILIDAD

La repetibilidad se relaciona con la capacidad del sistema para producir resultados consistentes en múltiples impresiones del mismo diseño. Si se imprime una pared modular varias veces, la repetibilidad garantiza que todas las paredes sean idénticas en términos de dimensiones y calidad. Su importancia se centra en la uniformidad, no obstante. Priorizar este criterio implica utilizar equipos sofisticados para un aspecto que no es crucial en la construcción estructural. Es por ello que se le asigna un peso de **uno**.

- **Concepto de solución 1:** Dado el controlador CNC industrial y servomotor industrial con encoder, se le asigna puntaje de **tres** en cuanto a repetibilidad.
- **Concepto de solución 2:** Debido a la configuración y la cinemática inversa que se debe realizar para la ubicación del cabezal extrusor en el espacio tridimensional, se le asigna un puntaje de repetibilidad de **dos**.
- **Concepto de solución 3:** Debido al uso de una placa controladora, en conjunto a motores a paso, se tiene un nivel aceptable de repetibilidad, por ello se le asigna un puntaje de **dos**.

ROBUSTEZ

La robustez se refiere a la capacidad del sistema para funcionar de manera confiable en diversas condiciones ambientales y situaciones operativas, como altas temperaturas o entornos con recursos limitados. Su importancia es crítica para garantizar que el sistema pueda operar sin problemas en áreas remotas afectadas por desastres naturales, donde las condiciones pueden ser adversas y acceso al suministro de energía de 220VAC, 60Hz con posibles cortes. Se le asigna un peso de **tres** a este criterio para garantizar que el sistema de solución óptimo sea robusto.

- **Concepto de solución 1:** Este concepto de solución es el más robusto, debido al uso de componentes industriales, como el controlador CNC, limit switch inductivo, HMI, servomotores, guías con patines y fuente conmutada. Se le asigna un puntaje de **tres**.
- **Concepto de solución 2:** El concepto de solución 2 utiliza componentes robustos como el CPU, limit switch mecánico, guías con patines y fuente conmutada. Sin embargo, componentes como la pantalla LED o motores a paso, hacen que se le valore con un puntaje de **dos** en cuanto a robustez.
- **Concepto de solución 3:** El uso de componentes como placa controladora, sensor capacitivo no industrial, pantalla led, guía con ruedas, hacen que el concepto sea económico. Por ello, este es el concepto de solución con menor robustez, por ello se le asigna un puntaje de **uno**.

VELOCIDAD

La velocidad se relaciona con la eficiencia del sistema en la producción de componentes de construcción en un tiempo determinado. Su importancia radica en la capacidad de respuesta rápida ante desastres, lo que reduce el tiempo en que las personas están expuestas a riesgos y mejora la capacidad de recuperación. Además, según la lista de requerimientos, el sistema debe tener velocidades de desplazamiento cercanos a 20cm/s para impresión y 25cm/s para desplazamiento, lo que compete directamente con la tecnología de construcción industrial actual. Por ello, a este criterio se le asigna un valor de **tres**.

- **Concepto de solución 1:** Dado el uso de servomotores de mayor potencia componentes robustos, además de la configuración de brazo robótico, se le asigna el puntaje máximo, respecto al criterio de velocidad, **tres**.
- **Concepto de solución 2:** La configuración delta permite alcanzar altas velocidades de impresión y desplazamiento. Esto implicaría el concepto que mejor desempeño tiene respecto a este criterio. Sin embargo, el uso de motores a paso equilibra su desempeño y al igual que en el concepto de solución 1, se le asigna un puntaje de **tres**.
- **Concepto de solución 3:** La configuración cartesiana es más lenta que las demás configuraciones presentadas, además, debido al uso de motores a paso, se le asigna un puntaje de **dos**.

MODULARIDAD

Este criterio refiere a la capacidad del sistema para ser modular, es decir, compuesto por módulos o componentes intercambiables que pueden ser ensamblados o desmontados de manera eficiente. El sistema de impresión 3D modular está compuesto por módulos o dominios para la extrusión de material,

el sistema de movimiento, la electrónica de control, de potencia y energización. Que pueden ser reemplazados o actualizados fácilmente según las necesidades o cambios en la tecnología. Su importancia radica en la flexibilidad y la capacidad de adaptación del sistema, lo que permite realizar mejoras y un fácil mantenimiento. Dado a que el diseño de un sistema modular es uno de los objetivos del presente trabajo, este criterio tiene un peso relativo de **cuatro**.

- **Concepto de solución 1:** Dada la estructura cerrada, y la soldadura para acoplar el extrusor, el concepto de solución 1 no es del todo modular. Sin embargo, la configuración de brazo robótico ofrece mayor modularidad y posibilidad de intercambio de componentes como motores. Por lo tanto, se le asigna un puntaje **dos**.
- **Concepto de solución 2:** Con una estructura cerrada y acople por forma del cabezal extrusor, se puede inferir un sistema medianamente modular. Por ello, se le asigna un puntaje de **dos**.
- **Concepto de solución 3:** El sistema cartesiano abierto y uso de uniones atornilladas se puede traducir en un diseño estructural por módulos, por lo tanto, se tiene el concepto de solución con mayor capacidad de modularidad, se le asigna un valor de **tres**,

TRANSPORTABILIDAD

La transportabilidad se refiere a la facilidad con la que el sistema de impresión 3D y sus componentes pueden ser transportados a áreas remotas y desplegados en el lugar de trabajo. Se evalúa si el sistema se puede desmontar y empacar de manera eficiente para su transporte a zonas afectadas por desastres naturales. Su importancia radica en la capacidad de llevar el equipo a ubicaciones críticas de manera rápida y sin problemas, lo que es esencial para una respuesta efectiva a desastres y la construcción de viviendas en lugares de difícil acceso o con infraestructura dañada. Por ello, el valor de peso relativo para este criterio es **cuatro**.

- **Concepto de solución 1:** Dado el uso husillos que pueden ser de acero inoxidable y una estructura cerrada, se podría tener un valor bajo de transportabilidad. Sin embargo, la configuración de brazo robótico, implica menor cantidad de componentes, por ello se le asigna un puntaje de **tres** en cuanto a transportabilidad.
- **Concepto de solución 2:** Debido al uso de fajas en lugar de husillos y cremallera para el movimiento lineal, implica un sistema ligero, sin embargo, una estructura cerrada implica una cantidad mayor de componentes, por lo que se le asigna un puntaje de **tres**.
- **Concepto de solución 3:** Dada la estructura abierta, pero el uso de rack y piñón, al igual que en los demás conceptos de solución, se tiene un equilibrio en cuanto al criterio de transportabilidad, sin embargo, por su estructura cartesiana, se le asigna un puntaje de **dos**.

C.6.2. Criterios económicos

Se establecen los criterios económicos para realizar una evaluación económica que se concentra en los costos presentes en la implementación del sistema, utilizando los criterios económicos descritos a continuación para comparar los conceptos de solución: Costo de componentes, facilidad de adquisición de componentes, costo de la implementación, cantidad de componentes estructurales, cantidad de componentes electrónicos. Por lo tanto, se realiza un análisis para so relativo de los criterios económicos y evaluación de las alternativas de solución.

COSTO DE COMPONENTES

En el contexto de implementar el sistema de impresión 3D desde los laboratorios Fabcore de la PUCP, el costo de componentes cobra vital importancia, refiriéndose al gasto asociado con la adquisición de elementos necesarios para el sistema. Se trata de encontrar un equilibrio entre la eficacia de los dominios y la elección de los componentes que hacen esto posible. A pesar de que hoy en día hay avances tecnológicos que pueden resolver los problemas con facilidad, su costo a menudo es elevado y no siempre accesible. Por lo tanto, es esencial estimar el costo aproximado de las soluciones alternativas que cumplen la misma función, siendo el principal factor limitante el presupuesto establecido en la lista de requerimientos. En este contexto, se le asigna un peso relativo de **cuatro** a este criterio.

- **Concepto de solución 1:** Los principales componentes con los que cuenta el concepto de solución 1 son industriales y altamente robustos. Por lo tanto, esto tiene como consecuencia un precio elevado. Sin embargo, con esto se gana precisión, repetibilidad y robustez. Se tiene componentes como el controlador CNC, sensor inductivo industrial, guías con patines, baterías de litio, servomotor, HMI, entre otros, por ello se le asigna un puntaje de **uno**.
- **Concepto de solución 2:** El concepto de solución 2 tiene componentes industriales como el limit switch mecánico y las guías con patines. Se tiene componentes accesibles como la pantalla led, baterías de plomo ácido y pantalla led. Esto garantiza el obtener todos los componentes necesarios, debido al precio accesible en general, sin sacrificar en gran cantidad el desempeño técnico, por ello se le asigna un puntaje de **tres**.
- **Concepto de solución 3:** El concepto de solución 3 tiene los componentes más económicos, como el sensor inductivo, superconductores, rectificador, placa controladora, y guías con ruedas. Esta decisión implica asegurar la implementación del proyecto en el caso de un bajo presupuesto. Si bien, esto sacrifica el desempeño técnico, se tiene un proyecto funcional. Por ello, se le asigna un puntaje de **tres**.

FACILIDAD DE ADQUISICIÓN DE COMPONENTES

La accesibilidad a la tecnología se centra en la ubicación del proveedor para adquirir o fabricar los componentes, ya sea en el mercado local o internacional. Aunque la opción preferida es el mercado nacional debido a su cercanía y rapidez de compra, no siempre está disponible. La tecnología en el Perú es avanzada, lo que significa que algunos componentes o su producción son accesibles localmente. Sin embargo, la escasez a nivel nacional nos obliga a explorar alternativas, por otro lado, la espera por productos extranjeros es un factor importante, pues se tiene plazo de 12 meses para la implementación completa del sistema. En vista de esto, se asigna un peso relativo de **cuatro** a este criterio.

- **Concepto de solución 1:** La manufactura de componentes industriales se realiza en el extranjero, para el caso de un controlador ADTECH, en China y los controladores FANUC en japon. Servomotores y HMI SIEMENS son fabricados en Alemania. Por ello, se asigna un puntaje de **dos**.
- **Concepto de solución 2:** Para el caso del concepto de solución 2, se tienen motores a paso, pantalla LED, CPU, fuentes conmutadas. Componentes disponibles a nivel nacional. Por ello, se asigna un puntaje de **tres** en cuanto a facilidad de adquisición de componentes
- **Concepto de solución 3:** Los componentes seleccionados para el concepto de solución 3, son “open source”, cuya adquisición es sencilla y también a nivel nacional. Por lo tanto, se asigna un puntaje de **tres**.

COSTO DE LA IMPLEMENTACIÓN

En este criterio se considera la inversión necesaria para la capacitación en tecnologías, instalación y operación del sistema. Existe basta información “open source” en la implementación de impresoras 3D, sin embargo, para soluciones innovadoras, es necesario invertir recursos para estas tecnologías innovadores como la inteligencia artificial, algoritmos. Además, entrenar al personal en la adecuada incorporación de tecnologías específicas como la programación de servomotores o controladores industriales. Se le asigna a este criterio un peso de **dos**.

- **Concepto de solución 1:** Para sistemas de impresión 3D que utilizan componentes industriales, es necesaria capacitación para implementar las tecnologías adquiridas. Por ejemplo, para programar los servomotores y el controlador CNC, ya no se utiliza un firmware, se utiliza un software propio del controlador y ello requiere capacitación. Por otro lado, la implementación de redes neuronales requiere de entrenamiento, que se traduce en el uso de recursos para este fin. Por lo tanto, se le asigna un puntaje de **uno**.

- **Concepto de solución 2:** En el caso del sistema de impresión para el concepto de solución 2, se aproxima a una impresora 3D semi industrial. La implementación de un CPU como controlador y motores a paso, requerirá de capacitación y uso de recursos. Además, la implementación de algoritmos para la detección de errores requiere un análisis enfocado y moderada complejidad en comparación a las redes neuronales. Por ello se le asigna un puntaje de **dos**.
- **Concepto de solución 3:** El concepto de solución 3 es el más sencillo de implementar, pues el firmware a implementar en la tarjeta es de “open source”. Además, con el controlador y motores a paso seleccionados, la implementación será directa. Finalmente, para la detección, se utilizarán cálculos directos, que pueden no ser precisos, se puede apreciar como el menor uso de recursos afecta el rendimiento. A este concepto de solución se le asigna un puntaje **tres**.

CANTIDAD DE COMPONENTES ESTRUCTURALES

Este criterio influye directamente en los costos de construcción. Además, contribuye directamente a la modularidad y transportabilidad del sistema. La minimización de componentes estructurales mejora la eficiencia de los recursos y contribuye a la modularidad del sistema. Una menor cantidad de componentes simplifica el proceso de montaje y desmontaje, agiliza el transporte a áreas remotas y favorece la adaptabilidad del sistema. Este enfoque, en última instancia, tiene un impacto positivo en la viabilidad económica. Por ello, se le asigna un peso relativo de **tres**.

- **Concepto de solución 1:** La configuración brazo robótico implica mucho menos uso de componentes estructurales, puesto que, dada la naturaleza de la configuración, el volumen de impresión es externo al brazo robótico y no interno como en el caso delta y cartesiano. Por ello se le asigna un puntaje de **tres** en cuando a a la cantidad de componentes estructurales.
- **Concepto de solución 2:** La configuración delta utiliza un menor número de componentes que el sistema cartesiano, sin embargo, en el concepto de solución dos, con estructura cerrada implicada una cantidad moderada de componentes estructurales. A este concepto de solución se le asigna un puntaje **dos** respecto al criterio.
- **Concepto de solución 3:** La configuración cartesiana utiliza un mayor número de componentes estructurales, los cuales deben ser dinámicos para mover el cabezal extrusor en el espacio tridimensional. Por otro lado, al tener una estructura abierta, se tiene una cantidad moderada de componentes estructurales y con ello, se le asigna un puntaje de **dos**.

ANEXO D: SIMULACIÓN ESTRUCTURAL

D.1. Simulación estructural

Cuando se tiene el caso de **Alpha mínimo**, el efector está ubicado en la posición más lejana de la viga vertical posterior y en la posición superior, donde se tiene que las fuerzas ejercidas por los brazos delta generan un mayor momento respecto a los apoyos fijos de la estructura ubicado en el piso. Se muestra a continuación la ubicación de las fuerzas y apoyos fijos en la Figura D.1 sección (a). El análisis de esfuerzos equivalentes según la teoría de Von Mises y su valor máximo en la sección (b). Los elementos afectados por deflexión y los valores máximos de deflexión en (c). Finalmente, se muestran el factor seguridad en la estructura completa y el factor de seguridad mínimo en (d).

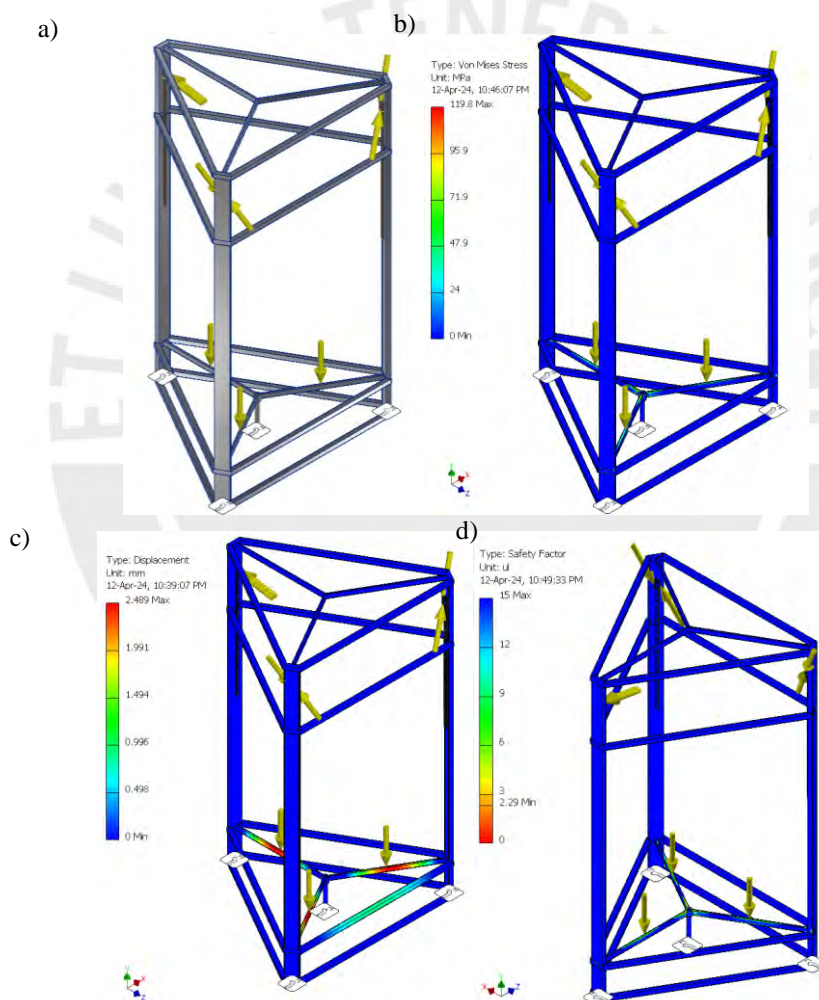


Figura D.1 – Caso 1: (a) Ubicación de esfuerzos (b) Von Mises (c) Deflexión (d) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia)

Por otro lado, se muestran los valores máximos de esfuerzo equivalente y deflexión en la Figura D.2 sección (a) y (b) respectivamente. En la sección (c) se muestra el valor mínimo de factor de seguridad. Estos valores críticos son indicados y su ubicación se puede apreciar en dicha figura.

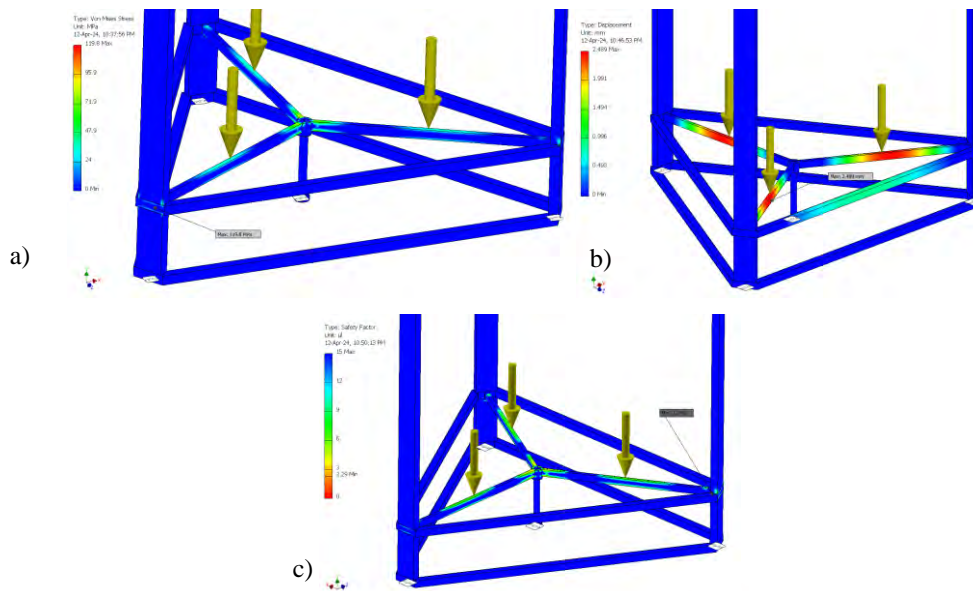
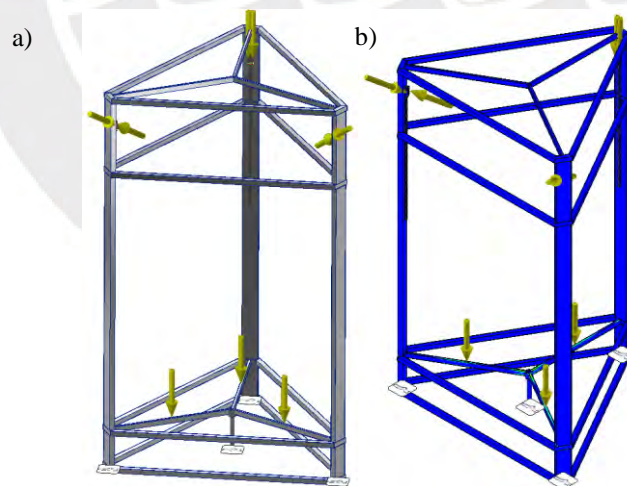


Figura D.2 - Valores críticos caso 1: (a) Ubicación de esfuerzos (b) Von Mises (c) Deflexión (d) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia)

Cuando se tiene el caso de **Alpha máximo**, el efector está ubicado al lado de la viga vertical posterior y en la posición superior. Se muestra a continuación la ubicación de las fuerzas y apoyos fijos en la Figura D.3. Del mismo modo que en el caso anterior. La sección (a). El análisis de esfuerzos equivalentes según la teoría de Von Mises y su valor máximo en la sección (b). Los elementos afectados por deflexión y los valores máximos de deflexión en (c). Finalmente, se muestran el factor seguridad en la estructura completa y el factor de seguridad mínimo en (d).



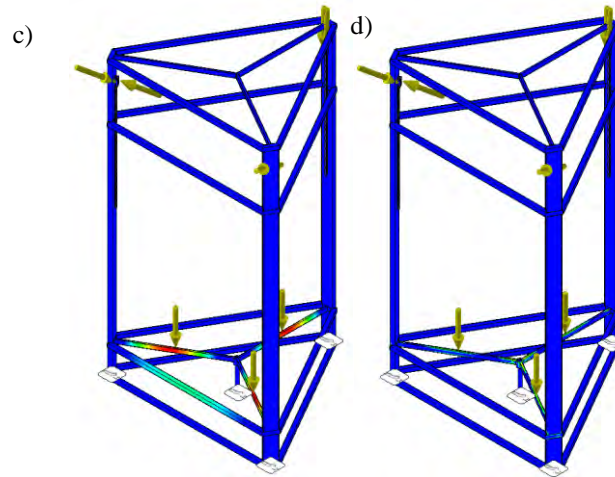


Figura D.3 – Caso 2: (a) Ubicación de esfuerzos (b) Von Mises (c) Deflexión (d) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia)

Se muestran los valores máximos de esfuerzo equivalente y deflexión en la Figura D.4 sección (a) y (b) respectivamente. En la sección (c) se muestra el valor mínimo de factor de seguridad del mismo modo que en la sección anterior, los valores críticos son indicados y su ubicación se puede apreciar.

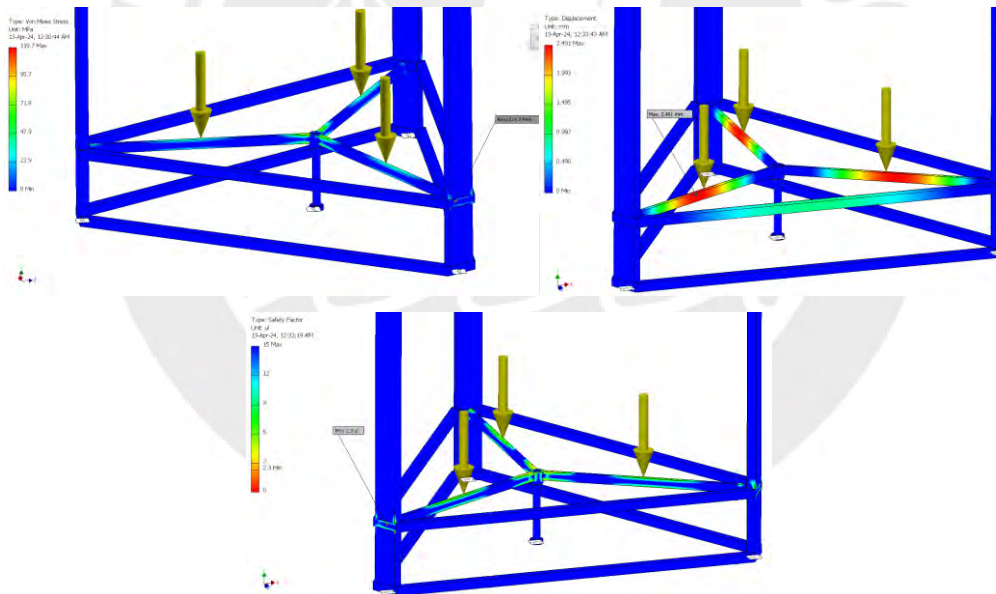


Figura D.4 - Valores críticos caso 2: (a) Ubicación de esfuerzos (b) Von Mises (c) Deflexión (d) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia)

D.2. Simulación de acoples estructurales

La validación del **acople central** y el **acople lateral central** se realiza a la vez, con los perfiles extruidos colocados, igual que las uniones atornilladas correspondientes. Se evalúa el caso de máxima sollicitación, cuando el acople central y los V-Slot 2040 sostienen la carga máxima de material impreso y cuando los brazos ejercen una fuerza en contra de la estructura de 500 N (mayor al valor máximo de 473N analizado). Se muestra a continuación en la Figura D.5, la distribución de las fuerzas ejercidas por los brazos y el peso del material impreso.

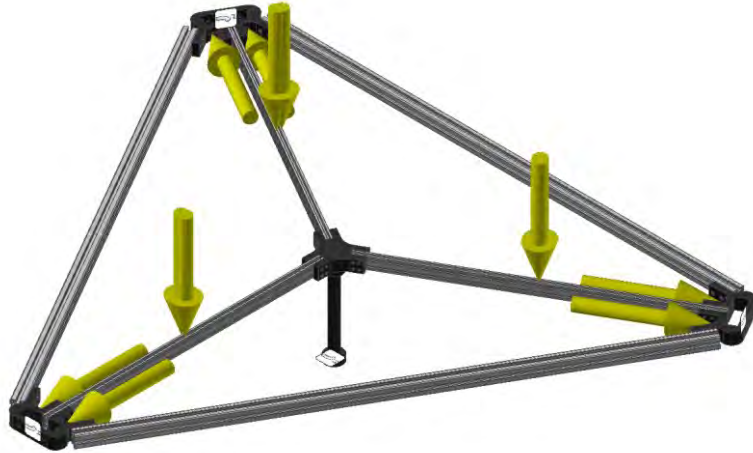


Figura D.5 - Distribución de fuerzas análisis de acople central y acople lateral central
(Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se procede a aislar el acople lateral central y se tienen vistas del análisis según la teoría de Von Mises, deflexión y factor de seguridad, junto a sus valores extremos en la Figura D.6.

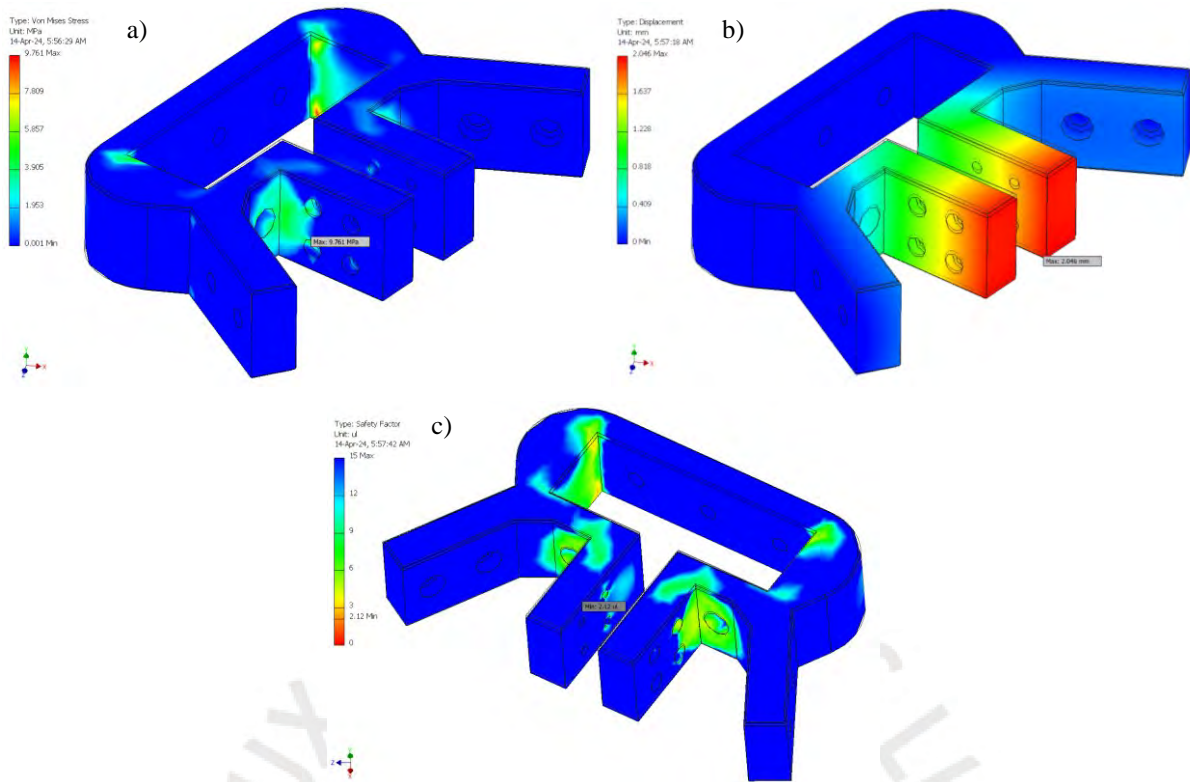


Figura D.6 - Validación de acople lateral central (a) Von Mises (b) Deflexión (c) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia)

Ahora se aislará el acople central y se realizará el mismo análisis en la Figura D.7.

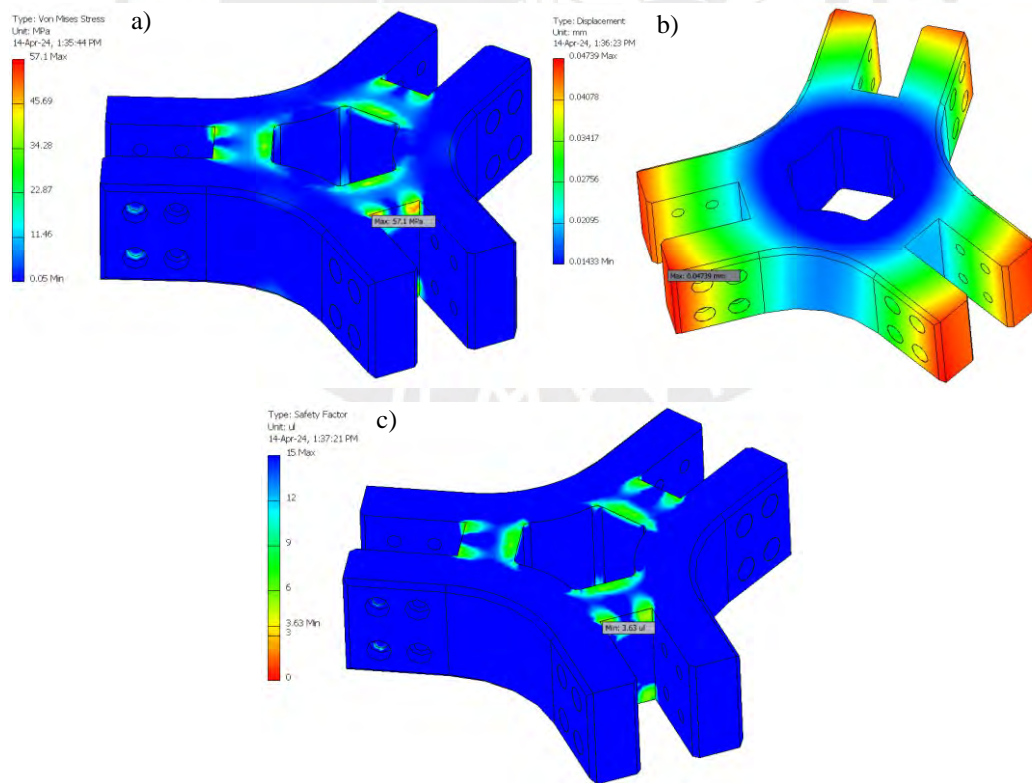


Figura D.7 - Validación de acople central (a) Von Mises (b) Deflexión (c) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia)

La validación del **acople lateral** se realiza de manera independiente de los demás acoples, junto a los T-Slot 4040 y uniones atornilladas. Del mismo modo que en la validación anterior, se simula el caso de sollicitación máxima, cuando se tiene una fuerza de 500 N intentando separa la estructura. Además, se añade una fuerza vertical adicional de 250 N para simular esfuerzos que ocurren cuando la guía está en movimiento. Se tiene la ubicación de estas fuerzas en la Figura D.8.



Figura D.8 - Distribución de fuerzas análisis de acoples laterales (Fuente: Elaboración propia)

Del mismo modo que con los acoples anteriores, se tiene el análisis por elementos finitos en Figura D.9 con los tres casos clave y valores críticos para cada uno.

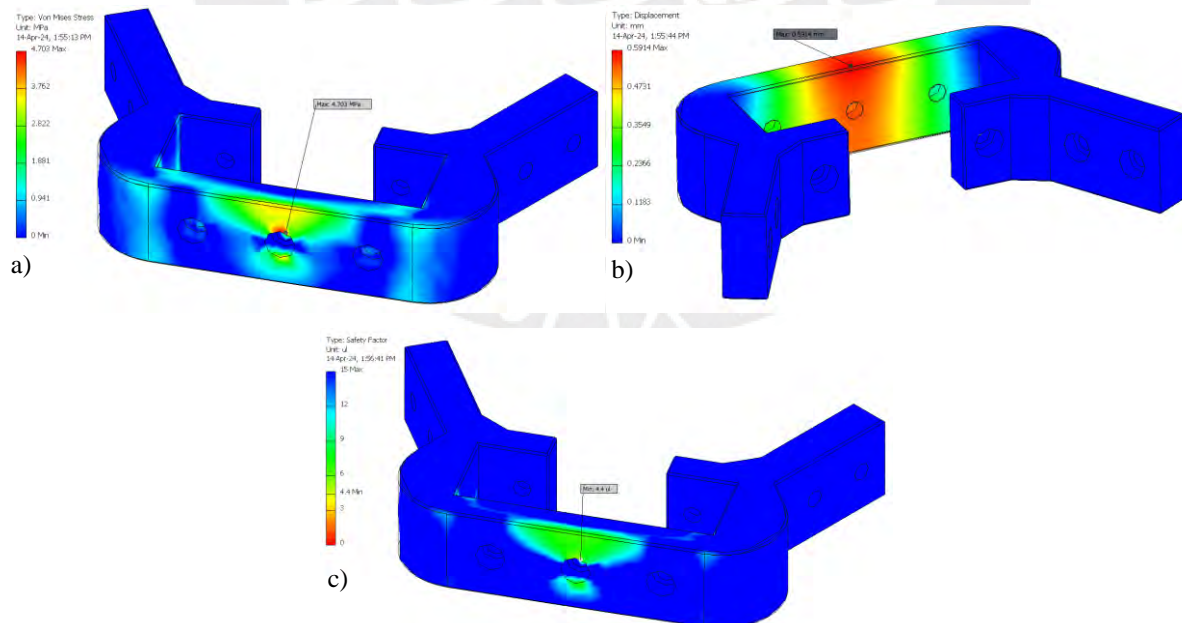


Figura D.9 - Validación de acople lateral (a) Von Mises (b) Deflexión (c) Factor de seguridad (Fuente: Elaboración propia)

ANEXO E: SELECCIÓN DE GUÍA LINEAL

La guía lineal escogida mediante el análisis técnico – económico es una guía lineal del tipo bloque. Lo que permite el movimiento vertical de las guías que estarán acopladas a los brazos delta y permitirán mediante la cinemática inversa, que el efector se mueva en el espacio tridimensional de su volumen de impresión. Se utilizará la herramienta “sizing tool” de Hiwin, para escoger con precisión el modelo de guía lineal a utilizar para esta aplicación. Se tienen los siguientes parámetros de entrada, mostrados en la Tabla E.1.

Tabla E.1 - Parámetros de entrada para la selección de guía lineal Hiwin
(Fuente: Elaboración propia)

Detalles obligatorios	Stroke length	Longitud de desplazamiento del bloque, calculado en este documento como LH	1220 mm
	Angle A	Ángulo respecto al plano horizontal sobre el cual estará inclinada la guía, en este caso la guía será vertical	90°
	Angle B	Ángulo de rotación respecto al eje sobre el cual se da el movimiento, en este caso es indiferente, pues la posición de la guía es vertical	0°
	Rail – drive distance (Z_a)	Distancia de la superficie de la guía vertical hacia la posición donde estará ajustada la correa para realizar el movimiento. Se aproxima cerca de un cuarto del desfase de guías lineales	25 mm
	Rail – drive distance (Y_a)	Distancia de la superficie de la guía vertical hacia la posición donde estará ajustada la correa. En base al diseño preliminar, esta posición de ajuste de la correa estará ligeramente espaciada del centro	20 mm
Masa en movimiento	m	Masa de la carga a mover, se escoge teniendo en cuenta el dimensionamiento del diseño preliminar, y asumiendo una guía de acero.	2kg
	X_m	Distancia en dirección x del centro de masa de la carga y centro de la superficie de la guía	0 mm
	Y_m	Distancia en dirección x del centro de masa de la carga y centro de la superficie de la guía	0 mm
	Z_m	Distancia en dirección x del centro de masa de la carga y centro de la superficie de la guía. Solo se considera este parámetro y se aproxima como la mitad del desfase de guía.	45 mm
Fuerzas externas	F_x	Componentes de las fuerzas existentes en la aplicación del movimiento de la guía, se coloca las fuerzas en el caso de mayor sollicitación	
	F_y		
	F_z		
	X_F	Posiciones de los respectivos componentes de las fuerzas respecto al centro de la superficie de la guía lineal	
	Y_F		
	Z_F		
Perfil de movimiento	Velocity	Velocidad de movimiento vertical	0.53 m/s
	Acceleration	Aceleración vertical, la cual se calcula de manera automática con los demás parámetros	0.42 m/s ²
	t_{pos}	Tiempo de posicionamiento en base a la aceleración y velocidad constante.	3.58 s
	t_a	Tiempo de aceleración desde el reposo	1.30 s
	t_{pause}	Tiempo de cero movimiento de la guía durante un ciclo	0 m/s

El perfil de movimiento con los parámetros seleccionados, se muestran en la Figura E.1, donde se tiene el caso de un ciclo de movimiento, desde la parte más baja de ida y vuelta.

Driving profile

	Travel distance [mm]	v [m/s]	a [m/s ²]	t _{pos} [s]	t _a [s]	t _{pause} [s]	Acting mass	Acting forces	Description of single travel run
Travel run 1	1,220	0.535	0.412	3.58	1.3	0	Mass 1	[F1]; [F2]	
Travel run 2	-1,220	-0.535	-0.412	3.58	1.3	0	Mass 1	[F1]; [F2]	

v = Speed · a = Acceleration · t_{pos} = Positioning time · t_a = Acceleration time · t_{pause} = Pause · Acting mass = Moving masses on this journey · Acting forces = External forces at work on this journey

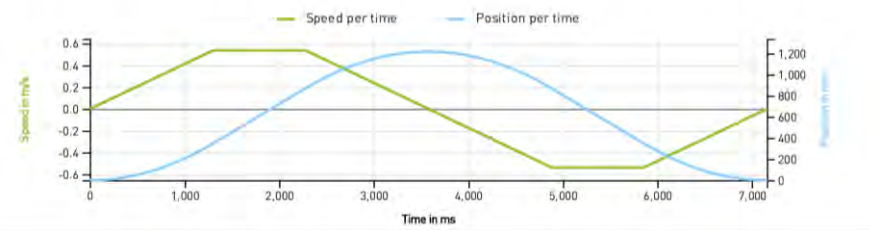


Figura E.1 - Gráfica de perfil de movimiento
(Fuente: Hiwin.de)

Con estos parámetros en consideración, se tienen 149 coincidencias con diferentes características que pueden ser útiles para la aplicación del sistema de impresión, como se puede apreciar en la Figura E.2.



Figura E.2 - Coincidencias de perfiles lineales Hiwin
(Fuente: Hiwin.de)

Utilizando los filtros, se escogerá el perfil de menor ancho, con esto se tienen dos opciones como se aprecia en Figura E.3. El menor ancho posible es de 20 mm.

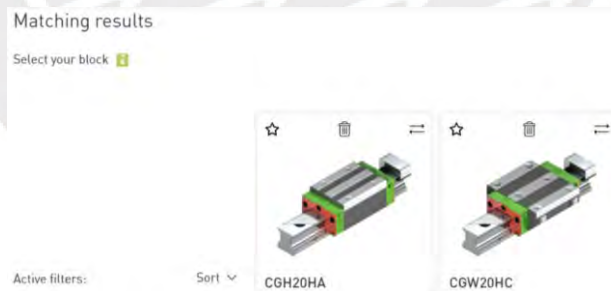


Figura E.3 - Filtro de ancho de 20 mm para selección de guía lineal
(Fuente: Hiwin.de)

ANEXO F: SELECCIÓN DE CORREA

En base a los cálculos geométricos y requerimientos de funcionamiento de la impresora 3D Colibri del Fabcore, se tiene la Tabla F.1, donde se tienen las condiciones de funcionamiento del sistema de impresión.

Tabla F.1 - Condiciones de funcionamiento, guías lineales y sistema de impresión
(Fuente: Elaboración propia)

Máquina motriz (Servomotor)	Condiciones de funcionamiento		Máquina de trabajo
Potencia mayor a 125 W	Duración diaria	12 horas	Polea sujeta en la parte superior de la impresora, potencia de 125 W como caso extremos
	Número de maniobras	2 veces al día	
	Influencias medioambientales	Temperatura ambiente y polvo	
	Distancia entre ejes	De 2520 a 2760 mm	
	Diámetro máximo de poleas	55 mm	

Con esto, se tiene en la Tabla F.2, la selección de la correa dentada síncrona según el manual Optibelt, en base a tablas y gráficos mostrados en el Anexo E. La tabla muestra todos los pasos necesarios y detallados para la selección y validación de la correa seleccionada.

Tabla F.2 - Selección de correa síncrona Optibelt
(Fuente: Elaboración propia)

Factor de carga	$c_2 = c_0 + c_3 + c_6 = 1.6 + 0.0 + 0.2 = 1.8$
Potencia calculada	$P_B = P * c_2 = 225 W$
Perfil de correa dentada	Correa perfil 3M HP
Relación de transmisión	$i = 1$, pues ambas poleas tendrán el mismo diámetro
Número de dientes de las poleas dentadas	$z_1 = z_2 = 24$; $d_{w1} = d_{w2} = 22.92$
Distancia entre centros de los ejes	Entre 2520 mm y 2760 mm, se escoge de manera provisional el valor de $a = 2640$ mm
Desarrollo efectivo de la correa dentada	$L_{wth} = 2 * a + \frac{\pi}{2} * (d_{wg} + d_{wk}) + \frac{(d_{wg} - d_{wk})^2}{4 * a}$ $L_{wth} = 5352 \text{ mm}$ $L_{wst} = 5310 \text{ mm}$
Distancia entre centros	$a_{nom} = K + \sqrt{K^2 - \frac{(d_{w2} - d_{w1})^2}{8}}$ $K = \frac{L_{wst}}{4} - \frac{\pi}{8} (d_{w1} + d_{w2})$ $a_{nom} = 2619 \text{ mm}$
Ajuste mínimo x/y entre las distancias	$x = 0.004 * a_{nom} = 10 \text{ mm}$ $y = 14 \text{ mm}$
Número de dientes que engranan en las poleas	$Z_e = \frac{Z_1}{6} * \left(3 - \frac{d_{w2} - d_{w1}}{a_{nom}} \right) = 12$
Factor de la longitud de la correa	$c_7 = 1.2$ ($L_{wst} > 600$)
Factor de engrane del diente	$c_1 = 1$ ($Z_e > 6$)
Ancho de correa mediante el potencial nominal	$P_U = P_N * c_1 * c_7$ $P_N = 67.7 * Factor$ $Factor = 1.87$ $P_U \geq P_B$ $126 \text{ KW} > 0.27 \text{ KW}$

Resultados:

- 5 correas dentada Optibelt OMEGA HP denominación **1062 3M HP 24**
- 2 poleas síncronas Optibelt ZRS denominación **15 3M 24**

El motivo para escoger un factor de ancho de 1.87 en la selección de ancho, es por motivos de disponibilidad comercial en el Perú, las correas Optibelt OMEGA HP 3M HP 24, son fáciles de conseguir en el mercado peruano.



ANEXO G: SUBSISTEMA DE CONTROL DE MOVIMIENTO

G.1. Diagrama de flujo general

Se muestra el diagrama de flujo general (DFG) en la Figura G.1, donde se determina la lógica del funcionamiento del sistema desde la perspectiva del controlador. Se puede observar la función Raspberry() que se debe poner en funcionamiento si se tiene una interfaz remota, además de la función Navegar_Interfaz(), a partir de la cual se escogerán operaciones necesarias para el funcionamiento del sistema de impresión. Dentro de esta última función, se puede iniciar el proceso de posicionamiento en home, el movimiento manual y la impresión.

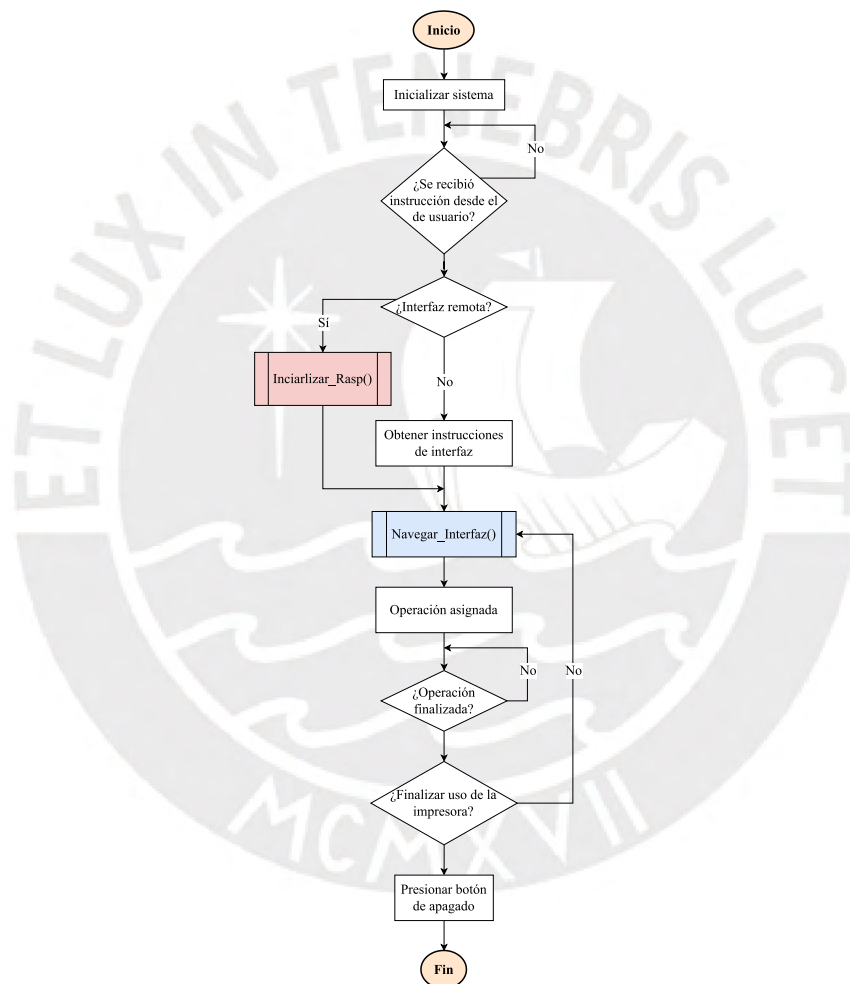


Figura G.1 - Diagrama de flujo general
(Fuente: Elaboración propia)

G.2. Diagramas de flujo específico

Los diagramas de flujo específicos (DFE) detallan con mayor precisión y claridad las operaciones y procesos involucrados en el sistema. Estos diagramas desglosan la lógica de funcionamiento de manera

más específica, mostrando las interconexiones y funciones clave. Estos diagramas ilustran con mayor detalle el proceso de posicionamiento en home, el movimiento manual y la secuencia de impresión.

Inicializar Raspberry

La función de inicialización de la raspberry mostrada en Figura G.2, implica la activación del funcionamiento del sistema desde una interfaz remota conectada a una red local. El diagrama de flujo general considera esta función, pues a partir del funcionamiento de la raspberry es que se obtendrá información de la impresión vía código Wifi, se obtendrán los comandos obtenidos en la navegación de impresión y el código G. Finalmente, toda esta información debe ser transmitida al controlador.

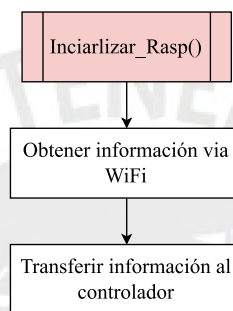


Figura G.2 - Raspberry (DFE)
(Fuente: Elaboración propia)

Navegar Interfaz

Desde la navegación en la interfaz se puede escoger tres operaciones clave de funcionamiento del sistema, el posicionamiento home, el movimiento manual del efector y la impresión del componente 3D. Ello se muestra en la Figura G.3.

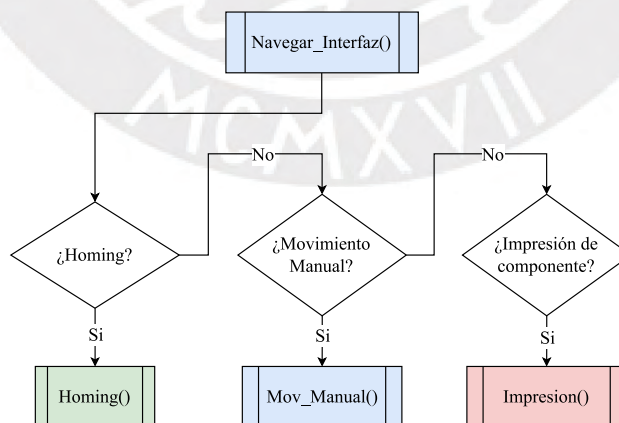


Figura G.3 - Navegar Interfaz (DFE)
(Fuente: Elaboración propia)

Posicionamiento y velocidad con encoders

Desde la perspectiva del controlador, se debe procesar la información obtenida desde el encoder para el control de la velocidad de movimiento y cumplir con los requerimientos de velocidad. Velocidad de desplazamiento menor a 25cm/s y velocidad de impresión menor a 20cm/s. Con ello, se tiene la función Encoder_Velocidad(), para obtener la velocidad de rotación de los motores. Con esto y la función Encoder_Posicion(), se puede realizar la cinemática inversa para el control de posición del efector, manteniendo las velocidades solicitadas en la lista de exigencias. Esto se detalla en la Figura G.4.

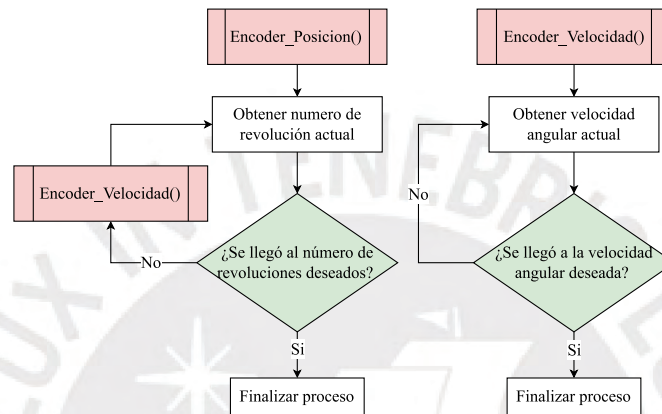


Figura G.4 - Encoder posicionamiento y velocidad
(Fuente: Elaboración propia)

Impulsar motores

Desde la función Impulsar_Motores() se realiza la cinemática inversa para calcular la ubicación a desplazar de efector mediante las rotaciones necesarias de cada motor, esto se controla desde la función Encoder_Posición() y con ello se tiene el flujo de funcionamiento para controlar el posicionamiento del efector para un sistema delta. El proceso de esta función se muestra en la Figura G.5.

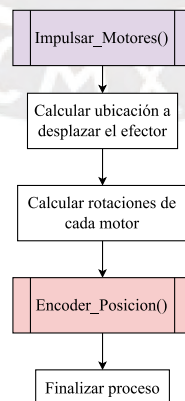


Figura G.5 - Impulsar motores (DFE)
(Fuente: Elaboración propia)

Operaciones de la impresora

Dada la explicación a detalle de las funciones, se tienen las operaciones que se van a realizar en el proceso de funcionamiento de la impresora. Dado a que la principal función del sistema de impresión es el control preciso y veloz del efector, para realizar la impresión, se tiene la operación homing, cuyo flujo de funcionamiento reside en los limit switches para la colocación de los componentes en la posición por defecto. El movimiento manual es para mover el efector en el volumen de impresión y a distancias controladas. Finalmente, el proceso de impresión, el cual es el principal, se realiza a partir del código G, línea por línea. Estas operaciones se muestran a mayor detalle en la Figura G.6.

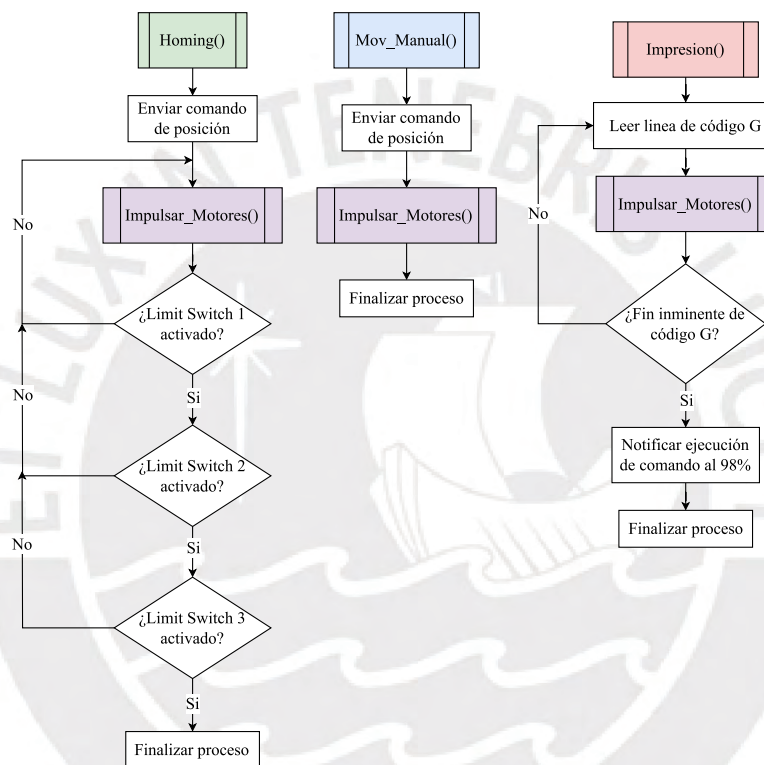


Figura G.6 - Operaciones de la impresora (DFE)
(Fuente: Elaboración propia)

ANEXO H: SIMULACIÓN DE CÓDIGO

El objetivo de esta sección es realizar la validación de los parámetros calculados anteriormente. En la Tabla H.1 se tienen los tres parámetros más importantes a validar mediante simulación. Es importante tener en cuenta que las revoluciones por minuto de los motores y velocidad angular tienen una relación directamente proporcional con la velocidad vertical a las cuales están sometidas las guías, por lo tanto, bastará con realizar la validación de este parámetro.

Tabla H.1 - Parámetros a validar mediante simulación
(Fuente: Elaboración propia)

Parámetro	Símbolo	Unidad
Velocidad vertical de guías lineales	V_z	mm/s
Torque de motores	T_M	N.m.
Potencia de motores	P_M	W

Se parte del trabajo realizado por el profesor Chyun-Chau Fuh de la National Taiwan Ocean University, el cual consiste en el código de simulación de un robot Delta para aplicaciones de pick and place (Chyun-Chau Fuh, 2021). Dicho trabajo en Matlab, se adaptó para simular el movimiento y velocidad de movimiento del efector para la configuración delta de una impresora 3D. En la Figura H.1 (a) se muestra el trabajo original del profesor Chyun, en (b) se muestra la adaptación realizada con las dimensiones diseñadas en los apartados anteriores.

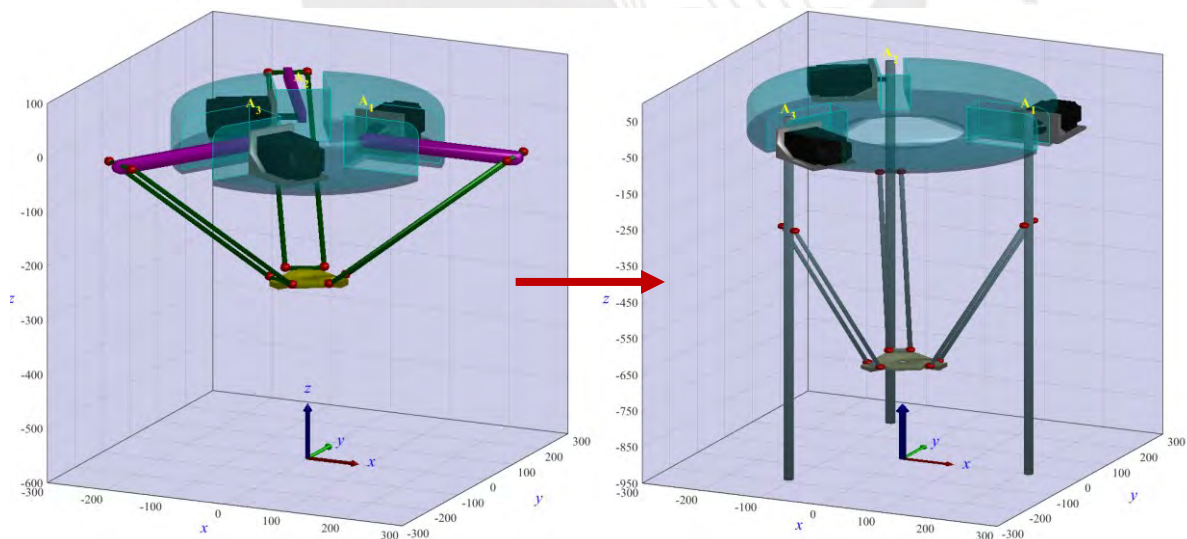


Figura H.1 - Adaptación del trabajo del profesor Chyun a la presente tesis
(Fuente: Elaboración propia)

Se definen las variables necesarias para que la geometría del modelo en simulación sean las mismas que las calculadas en el subsistema estructural. Se tiene un factor de escala “ScaleFactor” que implica una proporción de la geometría original y se define así para que la geometría calculada sea adaptada al código original.

```

TotalHeight = ScaleFactor*3000;    % (mm) Height of the structure
OffsetBase = ScaleFactor*300;      % (mm) "Desfase de base"
OffsetPully = ScaleFactor*180;    % (mm) "Desfase de polea"
RodsHeight = ScaleFactor*1300;    % (mm) Height of rods on Z axis
Lr   = ScaleFactor*1420/2;        % (mm) dis(O,Ai)
Lb   = ScaleFactor*1500;          % (mm) Length of link B (long side)
Lb_s = ScaleFactor*110;           % (mm) Length of link B (short side)
Lh   = ScaleFactor*180;           % (mm) dis(P,Ci)
pulleyDiameter = 22.92;           % (mm) Diameter of the Pulley
thickness_PLATE = ScaleFactor*10; % (mm) Main efector thickness

```

Las formas y piezas a imprimir y simular son infinitas. Para la simulación se procede a imprimir una esfera de radio máximo igual al del diámetro de impresión, es decir, una impresión donde se incluye el caso de sollicitación máxima calculada anteriormente. Para esto se selecciona la velocidad máxima de impresión, la cual según requerimientos del sistema es de 30 cm/s. Dicha simulación de impresión se muestra en la Figura H.2.

```

max_Vel = 300;    % (mm/s) maximun efector velocity
R = ScaleFactor*(1420)/2; % (mm) Radius of the sphere

```

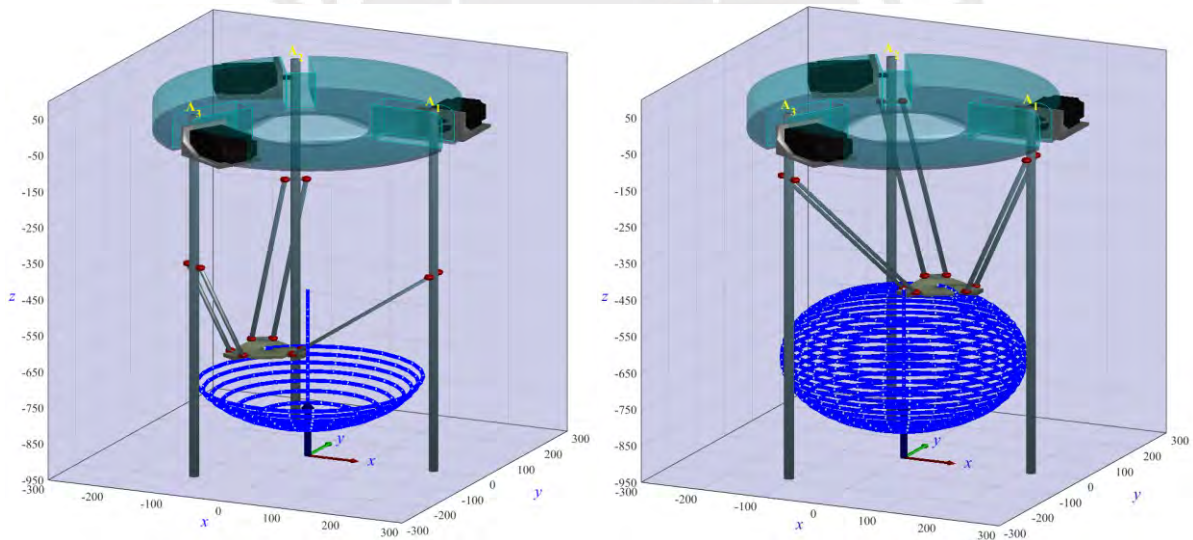


Figura H.2 - Simulación de impresión de una esfera de diámetro máximo
(Fuente: Elaboración propia)

Con esta simulación, se obtienen los gráficos en tiempo real de los parámetros de velocidad, torque y potencia. En la Figura H.3 se muestra, por ejemplo, las gráficas de velocidad vertical y torque de los motores para las guías y motores ubicadas en A1, A2 y A3 como se designa en la simulación.

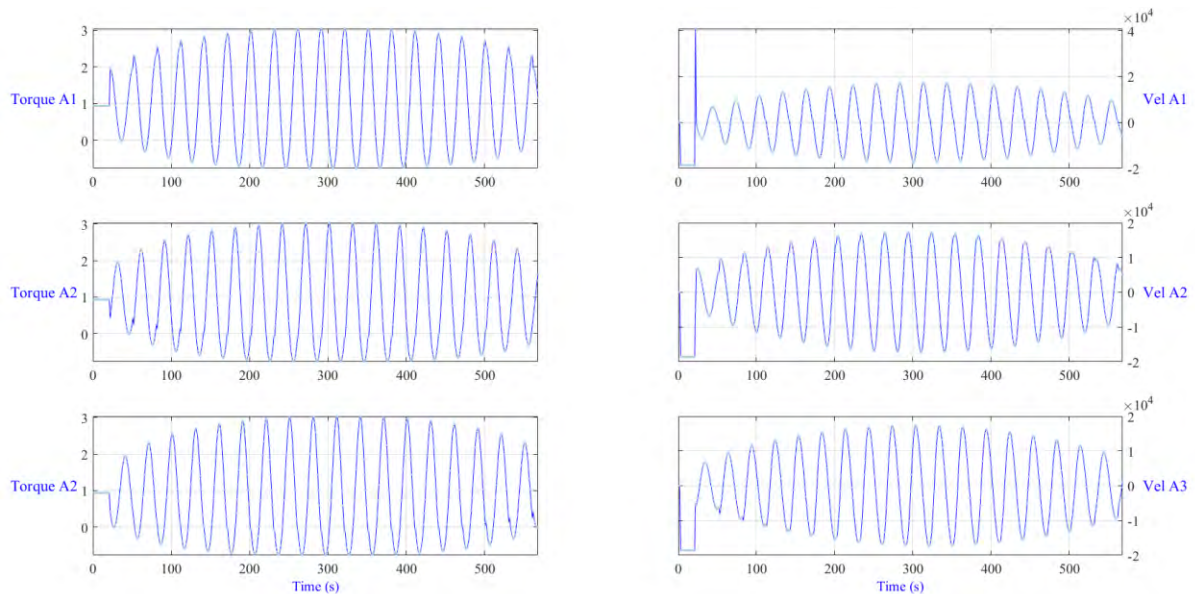


Figura H.3 - Gráficos en tiempo real de parámetros a analizar
(Fuente: Elaboración propia)

Es importante resaltar que para el cálculo del torque se tiene una función llamada “solve_for_unknown_forces”, desde la cual se simula el peso del cabezal extrusor y material de impresión que carga la manguera. Para cada posición se resuelve la ecuación de equilibrio para el efector y se tienen los valores de fuerzas ejercidas por los brazos delta. A partir de los componentes verticales de estas fuerzas calculadas y junto al diámetro de polea, se calcula el torque se vio en el apartado de anterior en el diseño del subsistema de movimiento lineal vertical.

Cuando la simulación de impresión finaliza, se crean tres archivos de extensión xlsx, donde se tiene la data del análisis de los parámetros a analizar. Estos parámetros son velocidad lineal, torque de motores y potencia de motores. Como se mencionó anteriormente, revoluciones por minuto y velocidad angular de motores se calcula a partir de la velocidad lineal, lo cual se realiza y se tiene el análisis mostrado en la Figura H.4, en un archivo de extensión xlsx, donde se realiza el procesamiento y limpieza de datos para su análisis y validación de cálculos.

```

if k0 > m_loops - 1

    xlswrite('velocity.xlsx', B_vel(29:end, :));
    xlswrite('torques.xlsx', torquesAll(30:end, :));
    xlswrite('power.xlsx', powerAll(30:end, :));

    k0 = 0;
    plotting = 0;
    set( findobj('Tag','pb_Run'), 'String','Run' )

end

```

	V. Conv. Raw (mm/s)			Torque (N.m)			R.P.M.			w (rad/s)			Power (W)		
3	-172.88	106.31	67.57	0.96	1.78	0.08	-144.05	88.59	56.30	-15.09	9.28	5.90	-14.44	16.49	0.45
4	-177.76	75.32	103.57	0.75	1.89	0.18	-148.13	62.76	86.30	-15.51	6.57	9.04	-11.56	12.40	1.62
5	-174.38	-41.43	133.73	0.55	1.95	0.32	-145.30	34.52	111.43	-15.22	3.62	11.67	-8.32	7.04	3.70
6	-162.47	5.97	156.62	0.37	1.96	0.49	-135.38	4.97	130.51	-14.18	0.52	13.67	-5.24	1.02	6.63
7	-142.22	-29.72	171.35	0.22	1.91	0.68	-118.51	-24.76	142.78	-12.41	-2.59	14.95	-2.75	-4.96	10.13
8	-114.35	-64.28	177.58	0.11	1.82	0.89	-95.28	-53.56	147.97	-9.98	-5.61	15.50	-1.06	-10.20	13.72
9	-80.10	-96.38	175.39	0.03	1.68	1.10	-66.75	-80.31	146.15	-6.99	-8.41	15.30	-0.20	-14.15	16.85
10	-41.26	-124.73	165.30	-0.01	1.51	1.31	-34.38	-103.94	137.74	-3.60	-10.88	14.42	0.04	-16.43	18.93
11	0.00	-148.08	148.08	-0.01	1.31	1.51	0.00	-123.39	123.39	0.00	-12.92	12.92	0.00	-16.96	19.51
12	41.26	-165.30	124.73	0.03	1.10	1.68	34.38	-137.74	103.94	3.60	-14.42	10.88	0.10	-15.88	18.31
13	80.10	-175.39	96.38	0.11	0.89	1.82	66.75	-146.15	80.31	6.99	-15.30	8.41	0.74	-13.55	15.30
14	114.35	-177.58	64.28	0.22	0.68	1.91	95.28	-147.97	53.56	9.98	-15.50	5.61	2.21	-10.49	10.73
15	142.22	-171.35	29.72	0.37	0.49	1.96	118.51	-142.78	24.76	12.41	-14.95	2.59	4.59	-7.25	5.07
16	162.47	-156.62	-5.97	0.55	0.32	1.95	135.38	-130.51	-4.97	14.18	-13.67	-0.52	7.75	-4.33	-1.01
17	174.38	-133.73	-41.43	0.75	0.18	1.89	145.30	-111.43	-34.52	15.22	-11.67	-3.62	11.34	-2.09	-6.82
18	177.76	-103.57	-75.32	0.96	0.08	1.78	148.13	-86.30	-62.76	15.51	-9.04	-6.57	14.85	-0.69	-11.69
19	172.88	-67.57	-106.31	1.17	0.01	1.63	144.05	-56.30	-88.59	15.09	-5.90	-9.28	17.69	-0.06	-15.10
20	160.31	-27.66	-133.13	1.38	-0.02	1.45	133.58	-23.05	-110.93	13.99	-2.41	-11.62	19.31	0.04	-16.80
21	140.93	13.87	-154.56	1.57	0.00	1.24	117.43	11.56	-128.79	12.30	1.21	-13.49	19.32	0.00	-16.77
22	115.78	54.59	-169.50	1.73	0.05	1.03	96.47	45.49	-141.24	10.10	4.76	-14.79	17.50	0.24	-15.22

Figura H.4 - Análisis de parámetros obtenidos mediante simulación
(Fuente: Elaboración propia)

Dado este conjunto de datos extenso, se grafican en el tiempo para un mejor entendimiento y futura validación con los cálculos realizados anteriormente. Se tienen los gráficos de velocidad vertical, torque y potencia en las figuras Figura H.5, Figura H.6 y Figura H.7 respectivamente.

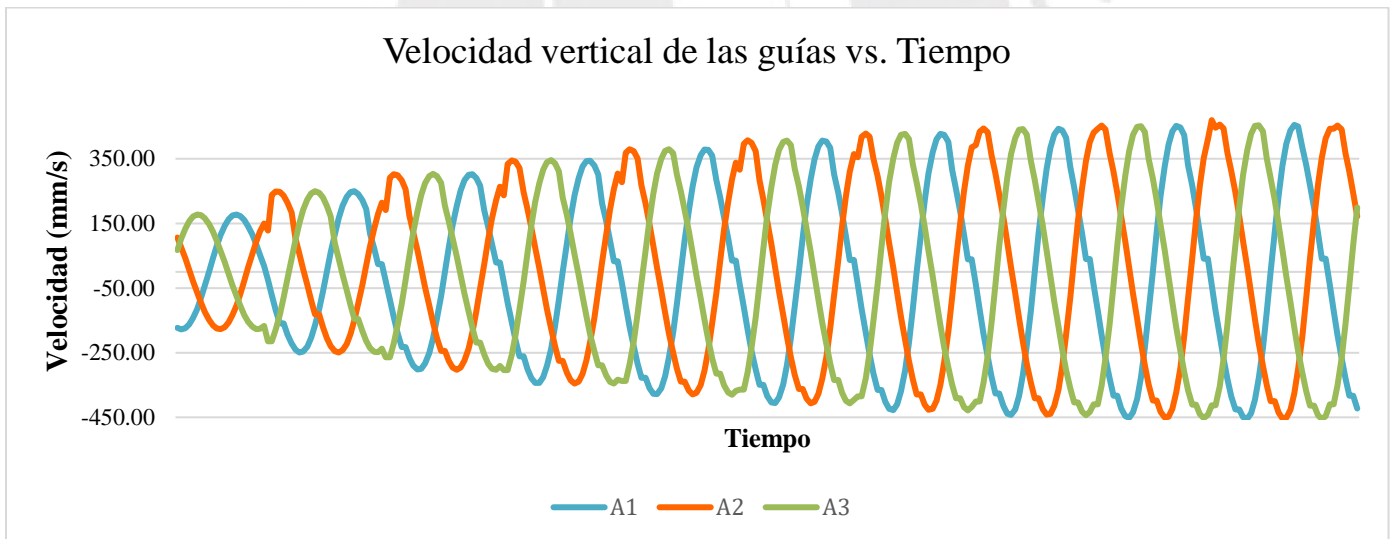


Figura H.5 - Gráfica de velocidad vertical durante impresión
(Fuente: Elaboración propia)

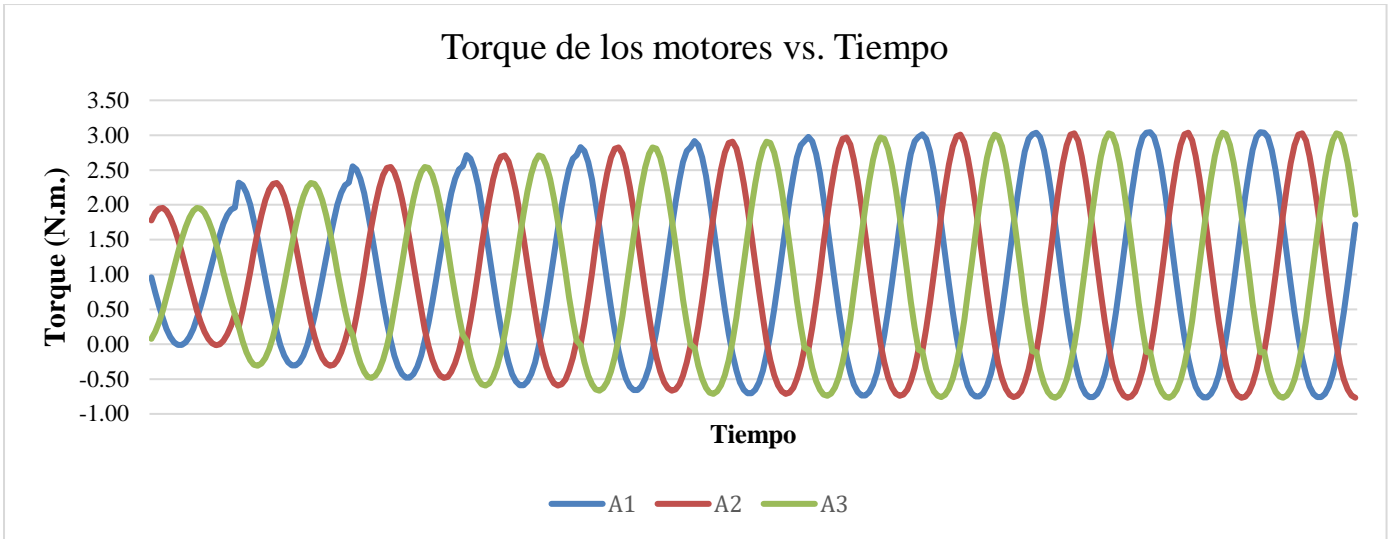


Figura H.6 - Gráfica de torque de motores durante impresión
(Fuente: Elaboración propia)

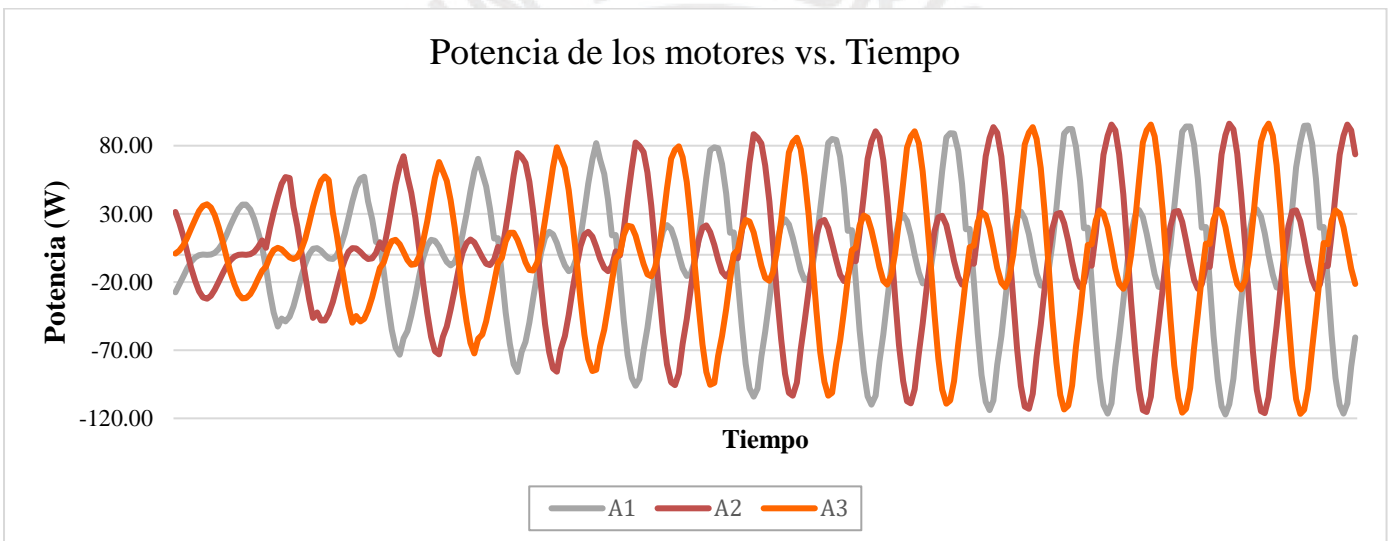


Figura H.7 - Gráfica de potencia de motores durante impresión
(Fuente: Elaboración propia)

ANEXO I: INTERFAZ WEB REMOTA

En el desarrollo del proyecto se considera fundamental incorporar una interfaz web que permita controlar y monitorizar la impresión 3D de manera remota. Para ello, se optó por utilizar Octoprint, una plataforma de código abierto ampliamente reconocida por su compatibilidad y facilidad de uso. La implementación utilizó una Raspberry Pi como servidor. Aunque el diseño original del proyecto contempla el uso del controlador BTT SKR 3 Ez, para las pruebas se utilizó una impresora Prusa i3 MK3, que está equipada con un controlador Rambo versión 1.3. Esta elección se justifica porque la conexión de la Raspberry Pi con el controlador Rambo es idéntica a la conexión que se hubiera establecido con el controlador BTT SKR 3 Ez. La configuración de componentes para la validación, se muestra en la Figura I.1.

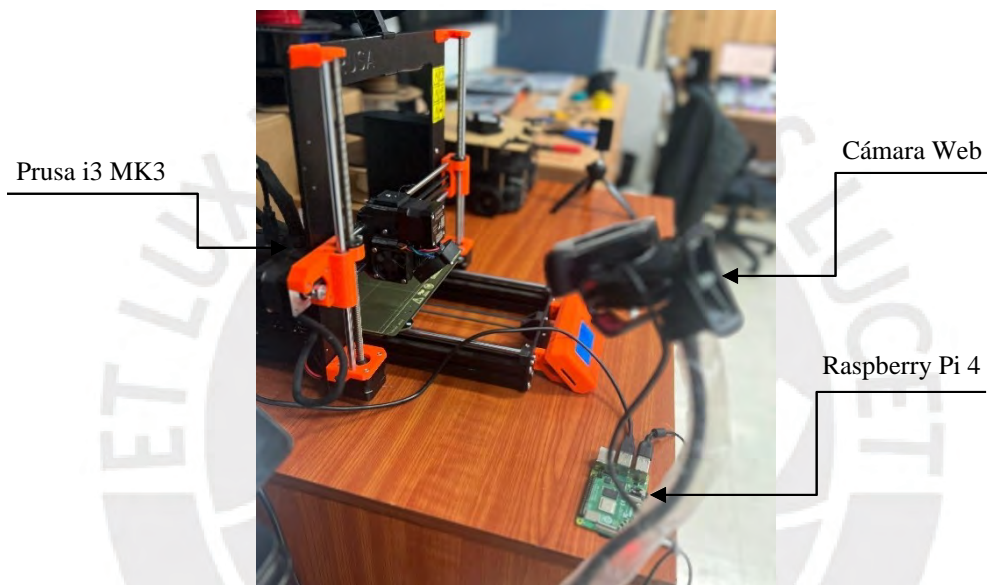


Figura I.1 - Configuración de componentes para validación de interfaz Web
(Fuente: Elaboración propia)

I.1. Instalación de Octoprint

La instalación de Octoprint comienza con la descarga de la imagen oficial de OctoPi desde su sitio web. Esta imagen se graba en una tarjeta SD de 16 GB como se observa en la Figura I.2.



Figura I.2 - Instalación de Octoprint en al Raspberry
(Fuente: Elaboración propia)

Durante la instalación, se debe ingresar los detalles de la red Wi-Fi (SSID y contraseña) para permitir la conexión inalámbrica de la Raspberry Pi. En este caso, se utiliza el usuario y contraseña de la red PUCP. Esto se muestra a continuación en la Figura I.3.

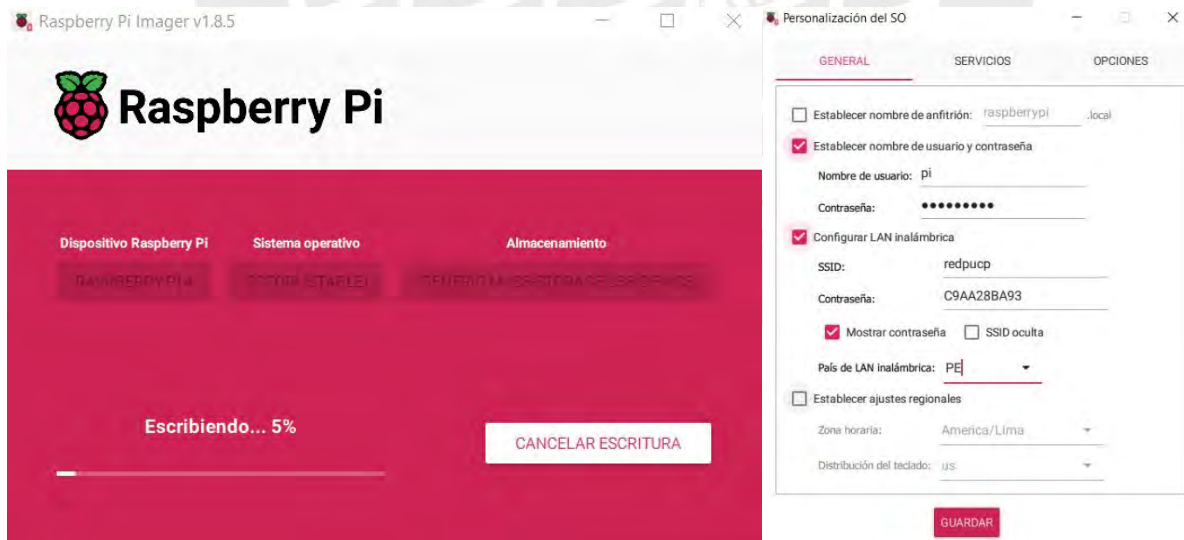


Figura I.3 - Configuración de red, Raspberry Pi
(Fuente: Elaboración propia - Screenshot)

La configuración de impresora en la interfaz de Octoprint se realiza para establecer el perfil de la impresora, configurar los límites dimensionales, de temperatura, y establecer una contraseña para el

acceso remoto. Como se muestra en la Figura I.4, esta configuración se realiza con la Prusa i3 MK3, sin embargo, se tiene la opción de configurar una impresora Delta con la opción “circular”.

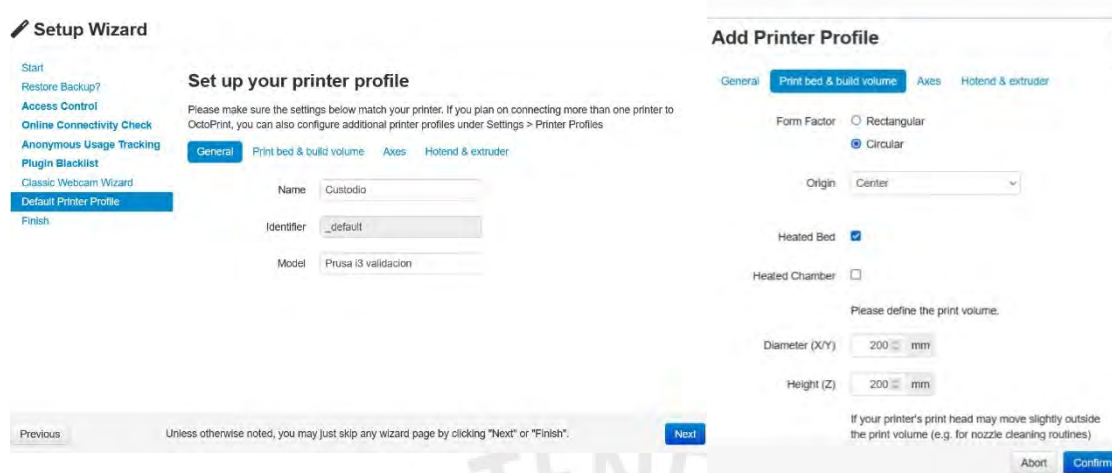


Figura I.4 - Configuración de impresora en Octoprint
(Fuente: Elaboración propia - Screenshot)

I.2. Conexión de Raspberry Pi con impresora de prueba

La conexión de la Raspberry Pi con la impresora de prueba, Prusa i3 MK3, que emplea un controlador Rambo 1.3, se realiza a través de un cable USB, similar a los utilizados con las placas Arduino. Esta metodología de conexión es idéntica a la que se emplearía con el controlador BTT SKR 3 Ez, facilitando la validación del sistema diseñado. Aunque el proyecto original contempla el uso del controlador BTT SKR 3 Ez, se utiliza la Prusa i3 MK3 disponible en el laboratorio de investigación interdisciplinaria K303 para las pruebas. Dicha conexión se muestra en la Figura I.5.



Figura I.5 - Conexión física entre Raspberry e impresora de prueba
(Fuente: Elaboración propia)

Finalmente se muestra la interfaz Octoprint accedida mediante la dirección IP asignada a la Raspberry Pi. Como se muestra en la Figura I.6, se accede a Octoprint a través de un navegador web ingresando la

dirección IP obtenida. Desde esta interfaz, se puede hacer monitoreo remoto de temperatura de cama y extrusor, enviar a posición por defecto “home” y mover el efector en direcciones deseadas.

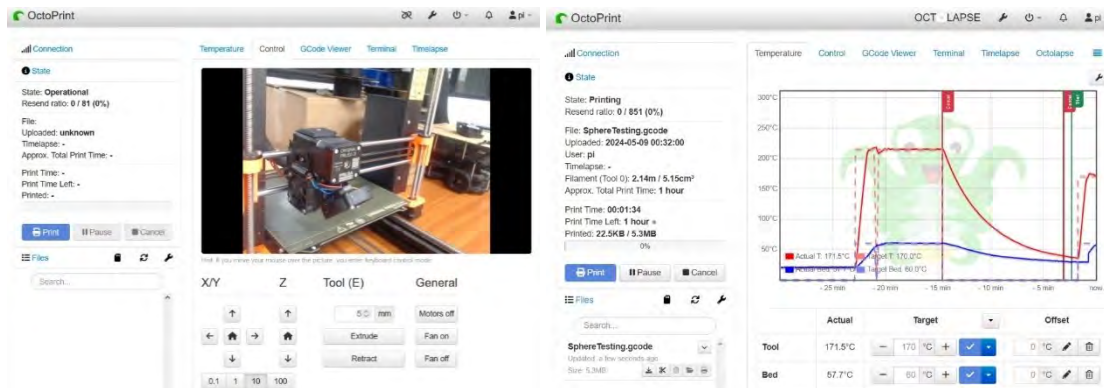


Figura I.6 - Interfaz Web remota Octoprint obtenida (Fuente: Elaboración propia - Screenshot)

I.3. Validación de la interfaz Web con Obico

Se instala el plugin OBICO como se muestra en Figura I.7, se integra en Octoprint para mejorar la capacidad de monitorización y detección de errores.

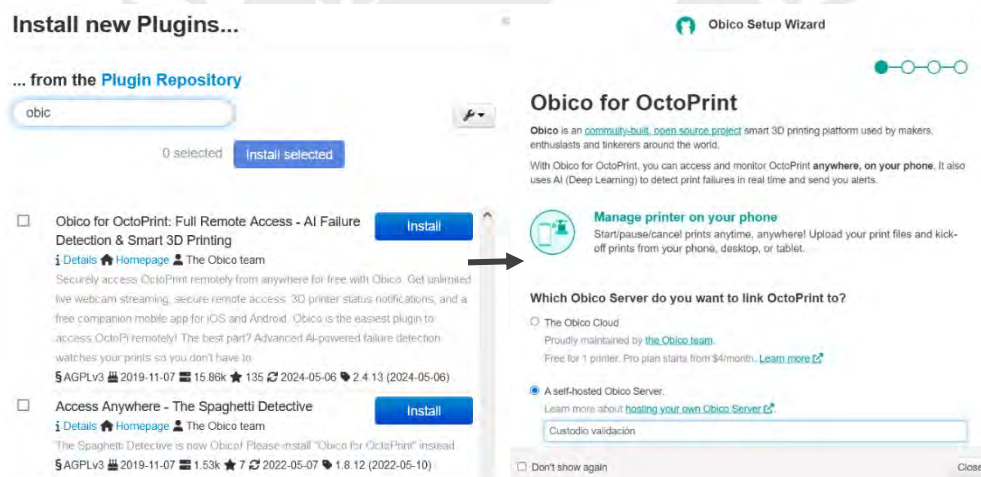


Figura I.7 - Instalación de Obico en Octoprint (Fuente: Elaboración propia - Screenshot)

Las pruebas incluyen la impresión remota, donde se verifica la funcionalidad de cargar y ejecutar trabajos de impresión a través de la interfaz web, así como la capacidad de pausar o cancelar estos trabajos remotamente. Es conocido que el plugin instalado tiene todas estas funcionalidades, las cuales se probaron y funcionaron perfectamente. Se tiene en la Figura I.8, la pieza prueba a imprimir y monitorear utilizando Obico.

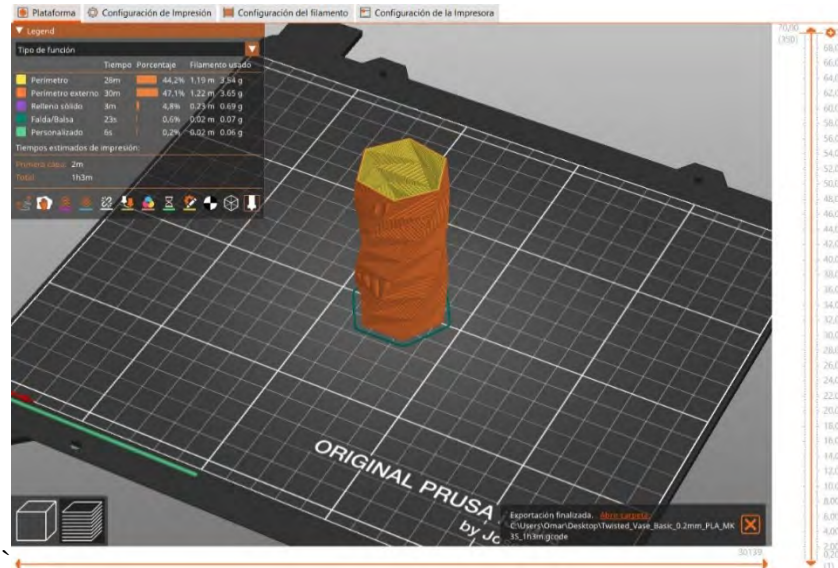


Figura I.8 - Impresión de prueba para validación de Obico
(Fuente: Elaboración propia - Screenshot)

El monitoreo remoto se evalúa mediante la transmisión de video en tiempo real y la supervisión del estado de la impresora, asegurando la estabilidad y calidad de impresión. Se muestra en Figura I.9 el proceso de monitoreo de la pieza de prueba.

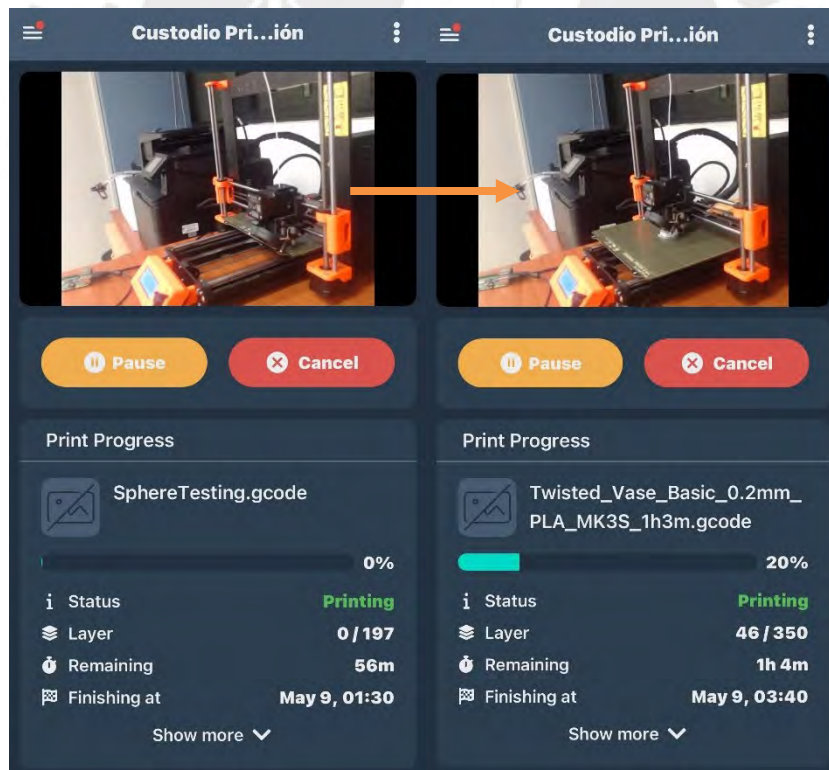


Figura I.9 - Proceso de impresión y monitoreo remoto
(Fuente: Elaboración propia - Screenshot)

Estas pruebas demuestran que la impresora puede ser operada de manera segura desde cualquier ubicación remota, utilizando las capacidades de Octoprint y el plugin OBICO. Las validaciones dadas, demuestran que es posible esta funcionalidad de impresión remoto mediante interfaz Web

implementada. Finalmente, cuando la impresión, termina se envía una notificación al usuario, como se pidió en la lista de requerimientos, esto se muestra en la Figura I.10.

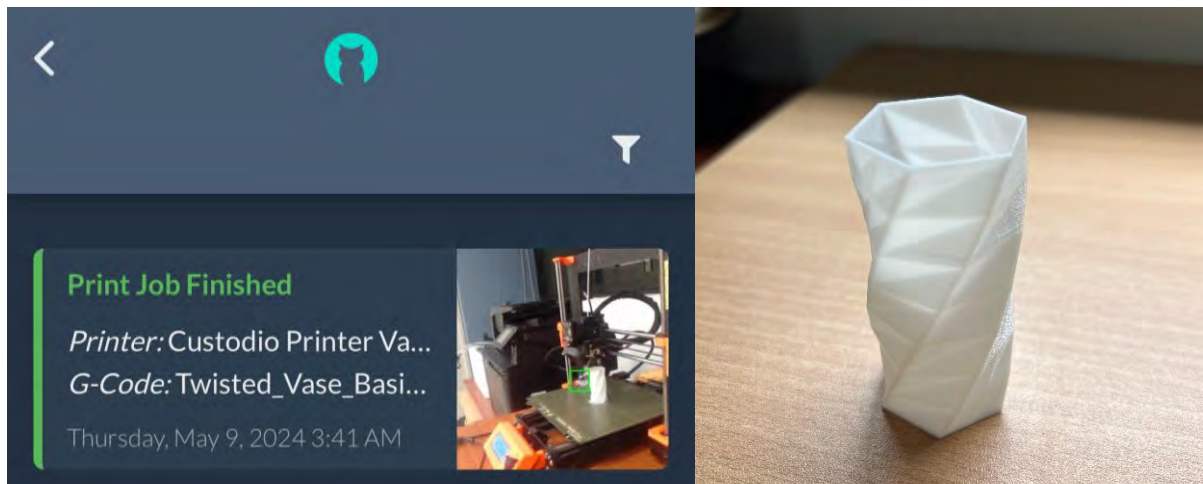
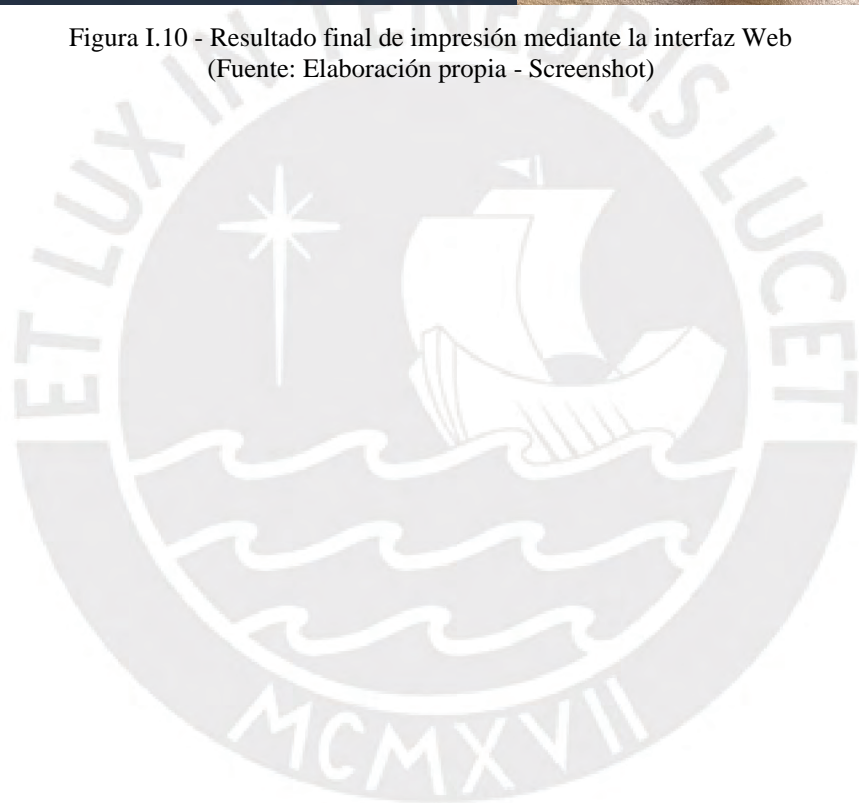


Figura I.10 - Resultado final de impresión mediante la interfaz Web
(Fuente: Elaboración propia - Screenshot)





ANEXO J: COSTOS DE COMPONENTES

V-Slot 2040, 3.2m

S/. 165



Categorías: [ACCESORIOS MECANICOS](#), [IMPRESORAS 3D](#), [PERFILES - ACTUADORES, V-SLOTS](#) / Etiquetas: [perfil](#), [v-slot](#)

PERFIL V-SLOT 20X40X3.2 METROS

S/165.00

ESTRUCTURA DE ALUMINIO V-SLOT 20*40 MILIMETROS

1

Añadir al carrito



Oyeron Online
Necesitas ayuda?



Robert Online
Chatea por WhatsApp

Need Help? Chat with us



T-Slot 40120
42.40 €



Aluminum Slot Profile 40*120

€42.39

Tax included

↪ Last items in stock Delivery time: 4-7 working days

35,03 €/m (VAT excluded)

Aluminum slot profile 40x120 - slot 8 mm.

Weight: 4.58 kg/m

CNC Cutting tolerance ±0,5 mm

For lengths greater than 1700 mm contact info@alu10.com.

Enter your Length mm

€42.39

Alu10 - 40120



Rieles tipo Hiwin HG20 3.0m

S/. 515.00

Sale!



Categorías: DESPLAZAMIENTO, SIN CATEGORÍA

RIELES TIPO HIWIN HGH20 * 3 METROS

~~S/595.00~~ **S/515.00**

1

Añadir al carrito



Chatt Online
Necesitas Ayuda?



Request Online
Chatar por WhatsApp

Need Help? Chat with us



Bloque Hiwin HG20 CGH20HA

S/. 400.00



Patin movil para riel / guia lineal HIWIN HGH20CA

S/ 400.00

4 disponibles

1

Añadir al carrito



Añadir a la lista de deseos

SKU: HW20

Categoría: Mecánica CNC

Etiqueta: riel



Placa de sujeción T5-10mm

7.60 \$

T2.5 T5 T10



C\$6.63 ~~C\$7.53~~ -12%

1% de descuento extra

Placa de sujeción de la correa de distribución T2.5 T5 T10, Conector de arco de aluminio, ancho de la placa del diente, 1 piezas, 6-30mm

1 Vendidos

Anchura: T5-15mm Width

- T2.5-6mm Width
- T2.5-10mm Width
- T5-10mm Width
- T5-15mm Width**
- T5-20mm Width
- T5-25mm Width
- T5-30mm Width
- T5-40mm Width
- T10-20mm Width
- T10-25mm Width
- T10-30mm Width

Número de piezas: 1pc

1pc



Acople PHS12 hembra

11.20 \$



Cs 11.20 ~~Cs11.91~~ -6%

Al por mayor: +2 unidades, 5% dto. extra

5% de descuento extra

Cojinetes de junta de extremo de varilla PHS8 PHS10 PHS12 (1 PC), hembra, mano derecha, roscada, con incrustaciones de línea, extremos de cojinete

PLUS Marcas destacadas | Enviado en 72h?

Descuento cupón

-C\$4.18 dto.
en pedidos +C\$54.39

C\$2.79 off
en pedidos +C\$27.89

Longitud: PHS12

PHS8

PHS10

PHS12

PHS12



Tuerca de acoplamiento de varilla redonda M10x40mm

15.40 / 5 \$

[Página principal](#)

[Productos](#) ▾

[Comentarios](#)



c\$ 15.36 / lote (5 unidades)

Tuerca de acoplamiento de varilla redonda de 5 piezas, barra de tuercas cilíndricas largas de acero inoxidable A2, M3, M4, M5, M6, M8

Size: M10 x 16 x 40

M3 x 6 x 5	M4 x 8 x 10	M5 x 10 x 10	M5 x 10 x 15	M5 x 10 x 20
M5 x 10 x 8	M6 x 10 x 10	M6 x 10 x 15	M6 x 10 x 20	M8 x 12 x 20
M8 x 12 x 25	M8 x 12 x 30	M8 x 12 x 40	M10 x 16 x 20	M10 x 16 x 25
M10 x 16 x 30	M10 x 16 x 40	M12 x 18 x 25	M12 x 18 x 30	
M12 x 18 x 40	M12 x 18 x 50	M14 x 20 x 30		



Correa dentada HTD 3M-15mm x 1.0m

S/. 30.00

Inicio > CNC Open Source HW > Correa Dentada HTD 3M-15mm (por metro)



CORREA DENTADA HTD 3M-15MM (POR METRO) < >



#SKU: 000242

Correa dentada síncrona abierta ideal para aplicaciones de movimiento lineal, CNC, Robótica. Tipo: HTD 3M, Ancho: 15mm.

S/ 30,00

En stock



Añadir Al Carrito

Código QR ~ Compartir ~

☆ A Lista De Deseos



Polea dentada HDT 3M – 15mm 24T

S/. 38.00

Inicio > CNC Open Source Hw > Polea dentada HTD3-24T-8.00



POLEA DENTADA HTD 3M-15-24T-8.00 < >

#SKU: 000440



Polea de aluminio diseñada para trabajar con motores paso a paso Nema 23 con un diámetro de eje de 8mm. Trabaja con la correa HTD 3M ancho: 15mm. Ideal para aplicaciones V-Slot.



S/ 38,00



Agolado

Código QR Compartir

Notificarme cuando esté disponible

su@email.com



Acepto los términos y condiciones y la política de privacidad

A Lista De Deseos



Varilla lisa 8mm x 300 cm
S/. 80.00

Inicio / MECANISMOS-CNC-3D-LASER / VARILLAS DE ACERO / VARILLA LISA 8mm X 300CM



Categoría: VARILLAS DE ACERO / Etiqueta: varilla

VARILLA LISA 8mm X 300CM

S/80.00

VARILLA ACERADA DE 8 MILIMETROS X 300 CENTIMETROS

1

Añadir al carrito



Owca Online
Necesitas ayuda?



Robot Online
Chattea por WhatsApp

Need Help? Chat with us



Chumacera D8mm-KFL08

S/. 15.00

Inicio > CNC Open Source Hw > Rodamientos > Chumacera D8mm KFL08



CHUMACERA D8MM KFL08



#SKU: 000272

Chumacera de pared para ejes/husillos de 8mm de diámetro.



S/ 15,00



En stock




Añadir Al Carrito

Código QR ~ Compartir ~


A Lista De Deseos



Motor Clearpath CPM-SDSK-3441S-RLN
\$ 432.00

 NEMA 34 ClearPath-SDSK Model

Part Number:
CPM-SDSK-3441S-RLN




The ClearPath-SDSK model allows you to precisely servo-control position (and velocity) using "step & direction" (or quadrature A/B) command signals. These digital signals are commonly used to control stepper motors and digital servos, so they are available from a wide variety of products including PLCs and stand-alone motion control "indexers". Compared to ClearPath-SDHP models, which also use step & direction control signals, the SDSL models have less peak torque, but are a lower price for any given amount of continuous (RMS) shaft torque and power.

Purchase

MOTOR QUANTITY PRICING

Qty:	1-9	10-49	50-99	100-199	200+
	\$432	\$418	\$388	\$360	CONTACT

Quantity:

CPM-SDSK-3441S-RLN [Add to cart](#) 



Varilla roscada 12mm
S/. 20.00



The screenshot shows the product page for 'VARILLA ROSCADA M 12 x 1 m' on the FERROPOLIS website. The page features a navigation bar with the company logo and a search bar. Below the navigation bar, there are menu items for '¡OFERTAS DEL MES!', 'CATEGORÍAS', 'SERVICIOS', 'NOSOTROS', and 'POLÍTICA DE VENTA'. The breadcrumb trail indicates the path: 'Inicio > VARILLA ROSCADA M 12 x 1 m'. The product image shows a long metal rod and a shorter section with a yellow end. The product details include the name 'VARILLA ROSCADA M 12 x 1 m', the code 'VVARILLA1168', the price 'S/. 20.00', and the note 'Impuesto incluido.'. A quantity selector is set to '1'.

FERROPOLIS

Buscar en todos los productos...

¡OFERTAS DEL MES! CATEGORÍAS SERVICIOS NOSOTROS POLÍTICA DE VENTA

Inicio > VARILLA ROSCADA M 12 x 1 m

VARILLA ROSCADA M 12 x 1 m
VVARILLA1168
S/. 20.00
Impuesto incluido.

Cantidad
-

1

+



Tubo fibra de carbón 12mm
115 €

Products > Carbon tubes round > Sorted by wall thickness > Precision tube 1mm

CARBON HIGH PRECISION TUBE 1MM Ø 14MM X Ø 12MM



Quantity	Unit price
To 9	€114.76*
To 49	€111.32*
From 50	€105.58*

Prices incl. VAT plus shipping costs

available immediately

Finish

High glossy grinded mat Winding surface

Length

1 m 2 m



Braket Vertical SK12

S/. 8.00

Inicio / MECANISMOS-CNC-3D-LASER / ACCESORIOS MECANICOS / BRAKET VERTICAL SK12



Categorías: [ACCESORIOS MECANICOS](#), [MECANISMOS-CNC-3D-LASER](#) /
Etiquetas: [sk12](#), [soporte](#)



BRAKET VERTICAL SK12

S/8.00

1

Añadir al carrito



Chicos Online
Necesitas ayuda?




Roberto Online
Chatea por WhatsApp

Need Help? Chat with us



Controlador BTT SKR 3 Ez
70.00 \$

Home BIGTREETECH BTT SKR 3 EZ Control Board Mainboard for 3D printer



BIGTREETECH BTT SKR 3 EZ Control Board Mainboard for 3D printer
~~\$79.99 USD~~ **\$66.99 USD**

1028000417
★★★★★ 18 reviews

Type: SKR 3 EZ

SKR 3 EZ SKR 3 EZ + 5pos EZ2209

SKR 3 EZ + 5pos EZ5160 Pro V1.0 SKR 3-DO MODE

Quantity
- 1 +

[Add to cart](#) [Buy with PayPal](#)
More payment options



Fuentes de poder Switching



www.peptel.com.pe

JUPE SUMINISTROS DE ENERGIA S.A.C.

Av. Nicolás de Piérola 1727, Tienda 132 Lima
Telf: +51 - 989 573 666 - 942 395 632
ventas@peptel.pe

RUC: 20610608958

PROFORMA

001- N° 000228

CLIENTE : PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU RUC / DNI : 20155945860 DIRECCION : AV. UNIVERSITARIA NRO. 1801 URB. PANDO LIMA - LIMA - SAN MIGUEL	FECHA : 15/05/2024 17:56 VENEDOR : JENNY PALACIOS MONEDA : SOLES
--	--

CODIGO	DESCRIPCION	MARCA	GARANTIA	CANTIDAD	P. UNIDAD	P. TOTAL
PE-60-12V	FUENTE DE PODER SWITCHING 12V 5A 60W	PEPTEL	1 AÑO	1	60.00	60.00
PE-480-48V	FUENTE DE PODER SWITCHING 48V 10A 480W	PEPTEL	1 AÑO	1	248.50	248.50



Limit Switch ME-8112

40.00 \$



[Home](#) [Products](#) [Find a Distributor](#) [About](#) [Downloads](#) [Contact](#)

Search

0 items - \$0.00 | [Log In](#)

Home / Limit Switches - Miniature / ME-8112



ME-8112

SKU: ME-8112 Category: [Limit Switches - Miniature](#)
\$39.20

1

[Add to cart](#)

[Request 3d File](#)

[Part Drawing](#)

[Technical Specs](#)



Estructura de soporte para Interfaz

S/. 695.00



Página 1 de 2
Fecha: 23 de mayo de 2024
COT - 37-2024

PROPUESTA Nro. COT – 37 - 2024


Empresa: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

Atención: Ing. Arturo Custodio Diaz

RUC: 20155945860

Emitido por: Allan Flores M.

SERVICIO

#	Descripción	Cant.	Precio Unitario (Nuevos Soles)	Precio Total (Nuevos Soles)
1	Servicio de manufactura de estructura en acero inoxidable calidad AISI/SAE304 	1	S/695.00	S/695.00
		TOTAL		S/695.00



Botón de emergencia XB2-01ZS

S/. 15.00

Categoría: MÓDULOS Y ACCESORIOS ELECTRÓNICOS



BOTON DE EMERGENCIA XB2-01ZS RED

S/15.00

Para desconectar el circuito en casos de emergencia con rapidez y facilidad, utilice el Botón de Emergencia con Base de Metal. De 440v

1

Añadir al carrito



Chatteo Online
Necesitas ayuda?




Busca por Online
Chattea por WhatsApp

Need Help? Chat with us



Botón de encendido PVA3F2B0SS304
S/. 66.4

PVA3F2B0SS305



Images are for reference only
See Product Specifications

[Share](#)

Compare Product

Mouser #:	612-PVA3F2B0SS305
Mfr. #:	PVA3F2B0SS305
Mfr.:	E-Switch
Customer #:	<input type="text" value="Customer #"/>
Description:	Pushbutton Switches Anti-vandal, SPDT, On- (On), Panel Mount, Front, Silver, LED, White, IP65
Lifecycle:	New At Mouser
Datasheet:	PVA3F2B0SS305 Datasheet (PDF)
ECAD Model:	3D Model

Download the free [Library Loader](#) to convert this file for your ECAD Tool. [Learn more about ECAD Model](#)

[Add To Project](#) | [Add Notes](#)

Availability

Stock: Non-Stocked

Factory Lead-Time: 13 Weeks [?](#)

Enter Quantity: Minimum: 1 Multiples: 1

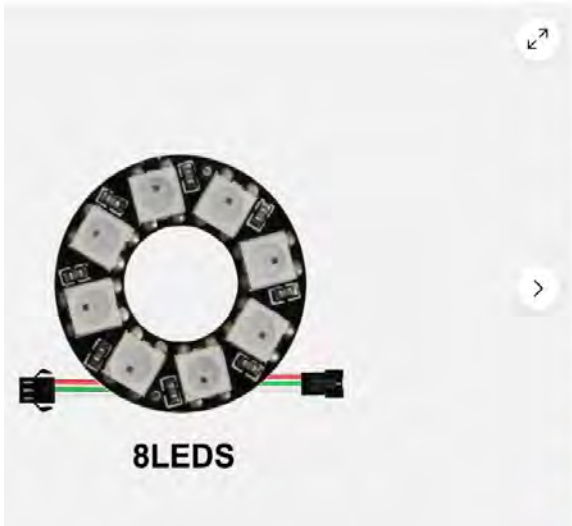
Pricing (PEN)

Qty.	Unit Price	Ext. Price
1	S/66.39	S/66.39
10	S/62.61	S/626.10
25	S/61.18	S/1,529.50
40	S/57.23	S/2,289.20
120	S/55.53	S/6,663.60
280	S/54.06	S/15,136.80
520	S/51.32	S/26,686.40
1,000	S/48.67	S/48,670.00



Led strip circular WS2812B

3.00 \$



8LEDS

Kit controlador LED WS2812B 8/16/24/35/45
módulos de anillo de píxeles RGB 28 teclas WiFi LED

mostrar título original

tiaochongyi (62158)
99% positivos · Otros artículos del vendedor · Contactar al vendedor

US \$2.93
Aproximadamente S/. 10.96
Costaba ~~US \$3.22~~
Ahorra US \$0.29 (9 % de descuento)

Estado: **Nuevo**
La oferta finaliza en: 4 d 14 h

LED Type: **8Leds Bleok Ring**

Cantidad: Más de 10 disponibles / 15 vendidos

¡Cómpralo ahora!



Puerto USB
S/. 0.50



Buscar por productos

CATEGORÍA DE...



INGRESA / REGÍSTRATE



S/0.00

CATEGORÍAS

RASPBERRY

ARDUINO

SENSORES

MOTORES

MICROCONTROLADORES

INTEGRADOS



electromanía



Conector USB Macho

S/0.50

En stock

✓ Hay existencias

- 1 +

AÑADIR AL CARRITO

Compare

Agregar al Wishlist

SKU: K005-FM112

Categoría: Conectores

Compartir:



Relé SSR (05DD y 10DD)
S/. 40.00

RELAY ESTADO SOLIDO MONOFÁSICO DC-DC 25A; FOTEK; SSR-25DD



Código: SSR-25DD

Categorías: Relay - contactores, Relay solidos

S/40.00

- Marca: FOTEK
- Corriente: 25A
- Voltaje entrada: 3-32 VDC
- Voltaje comando:5-60 VDC
- Monofásico
- Incluye IGV

- 1 + **Añadir Al Carrito**

COMPRAR VÍA WHATSAPP

Bracsan



Obico Pro plan
4.00 \$

SPAGHETTI GALLERY PRICING HELP COMMUNITY SIGN IN SIGN UP

Obico Cloud Plans

Thinking about self-hosting Obico Server instead? [Check out self-hosting vs Obico Cloud.](#)

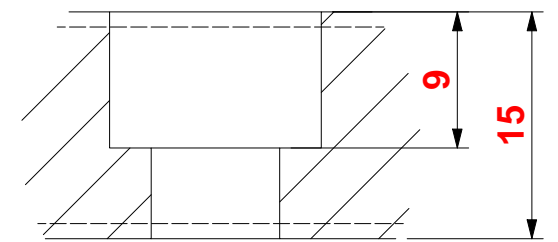
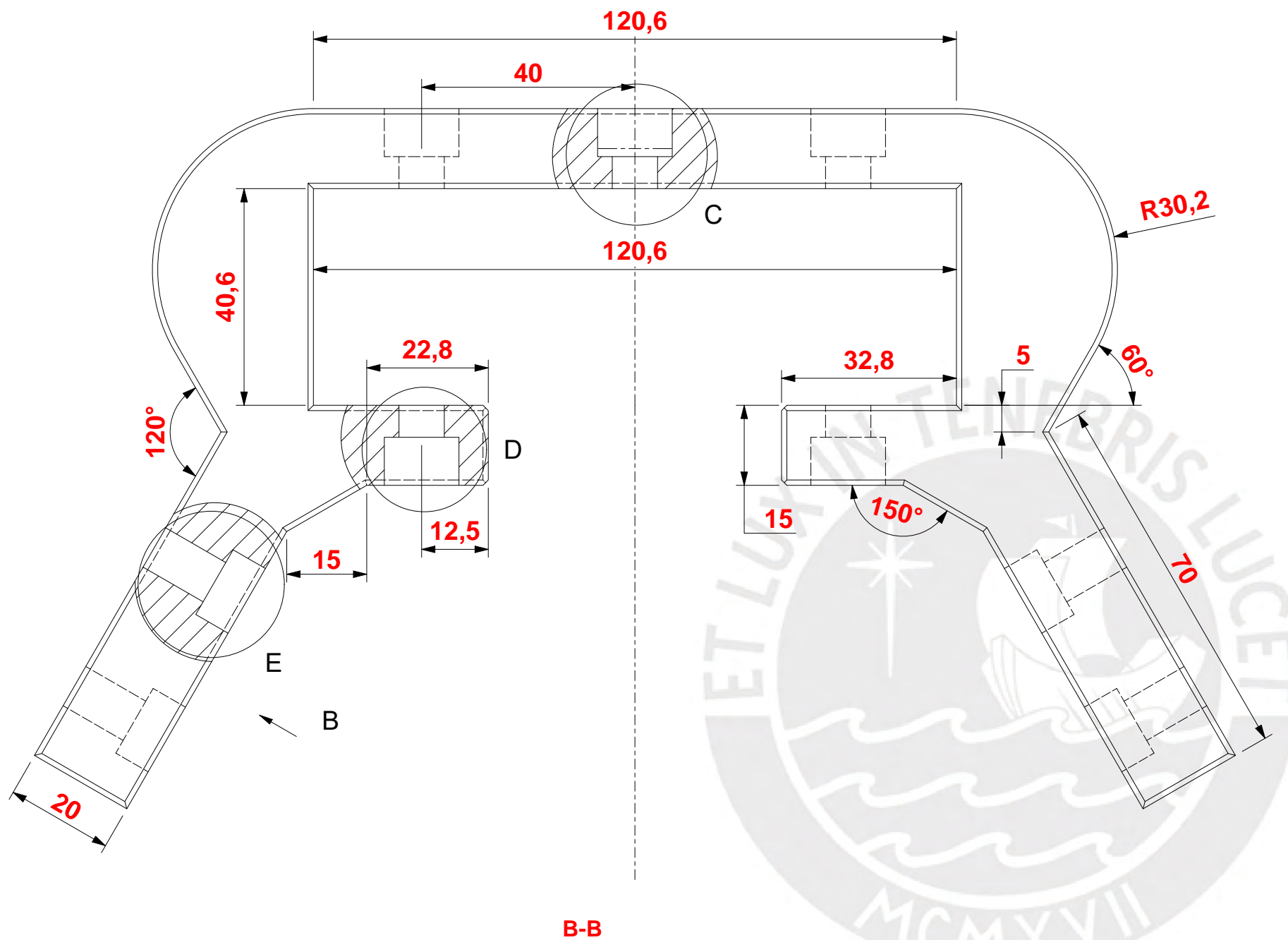
Annual (SAVE 33%) Monthly

Free Print occasionally. \$0 Limited to 1 printer.	Pro Print every day. 2+ printers. \$4 / month (Billed 48 annually) 1st printer included 2+ printers at \$2 / month / printer Calculate cost >>>
Get Started	Start 1 month FREE trial

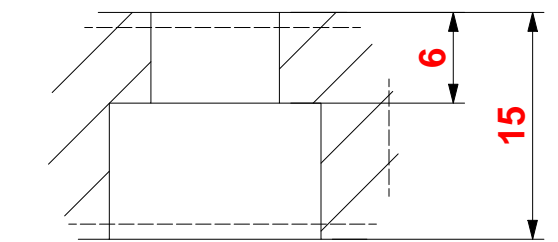




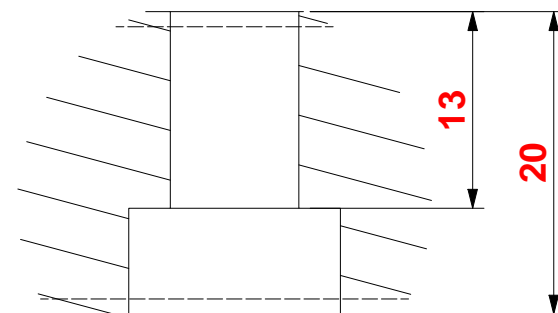
ANEXO K: PLANOS MECÁNICOS DEL SISTEMA



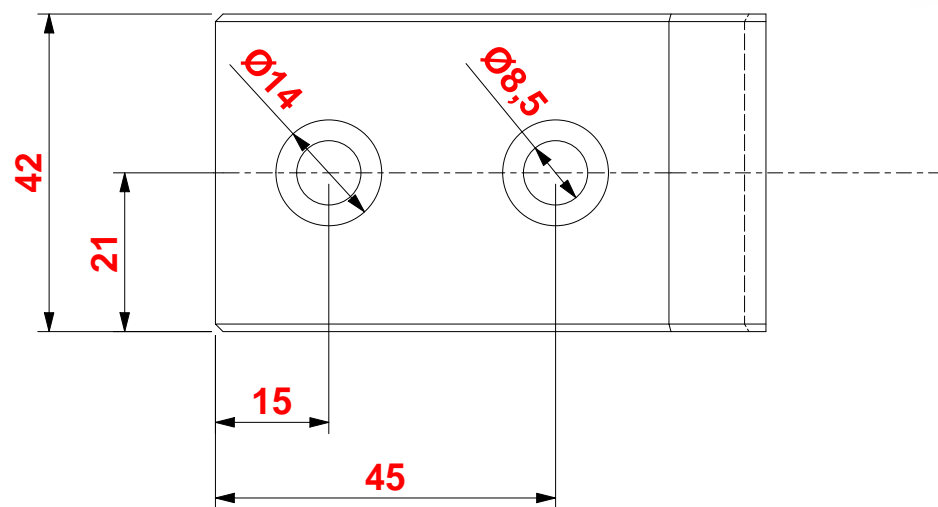
C (2 : 1)



D (2 : 1)



E (2 : 1)



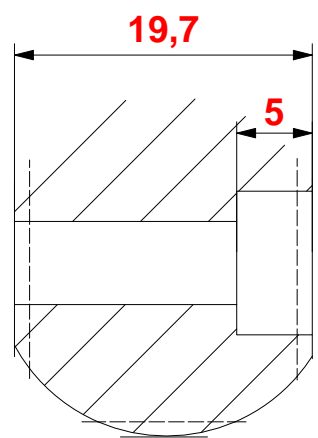
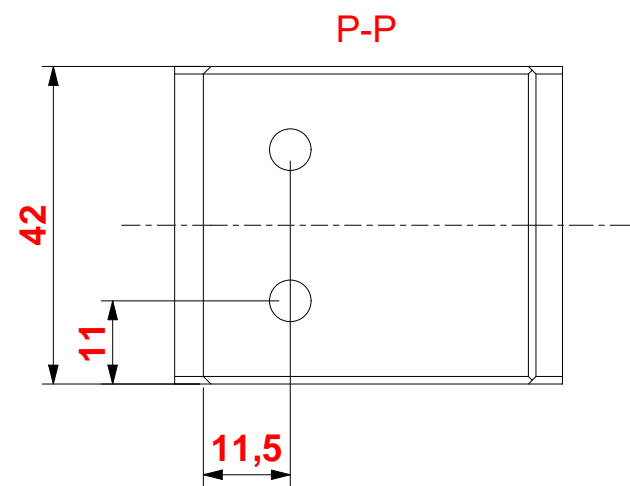
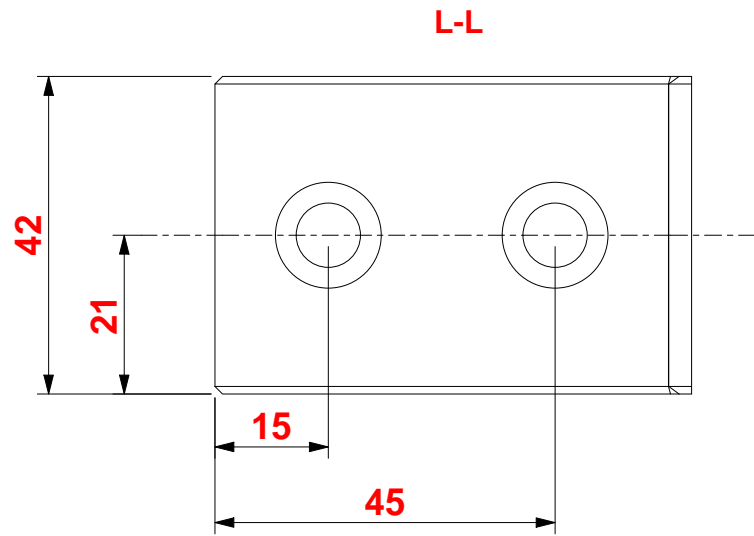
B-B

Material: Polietileno de alta densidad

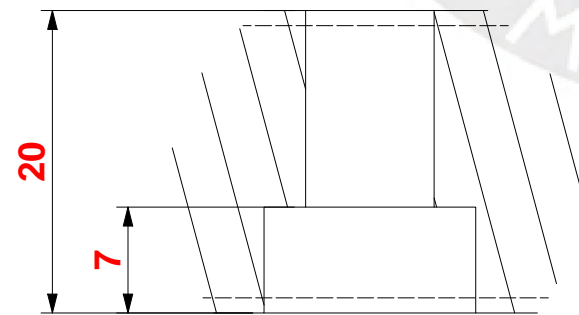
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
		1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 29/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: E001-A

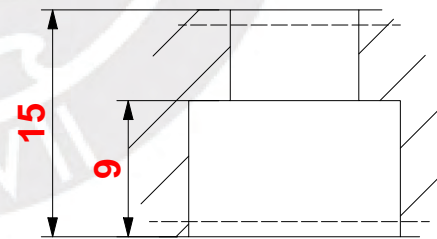
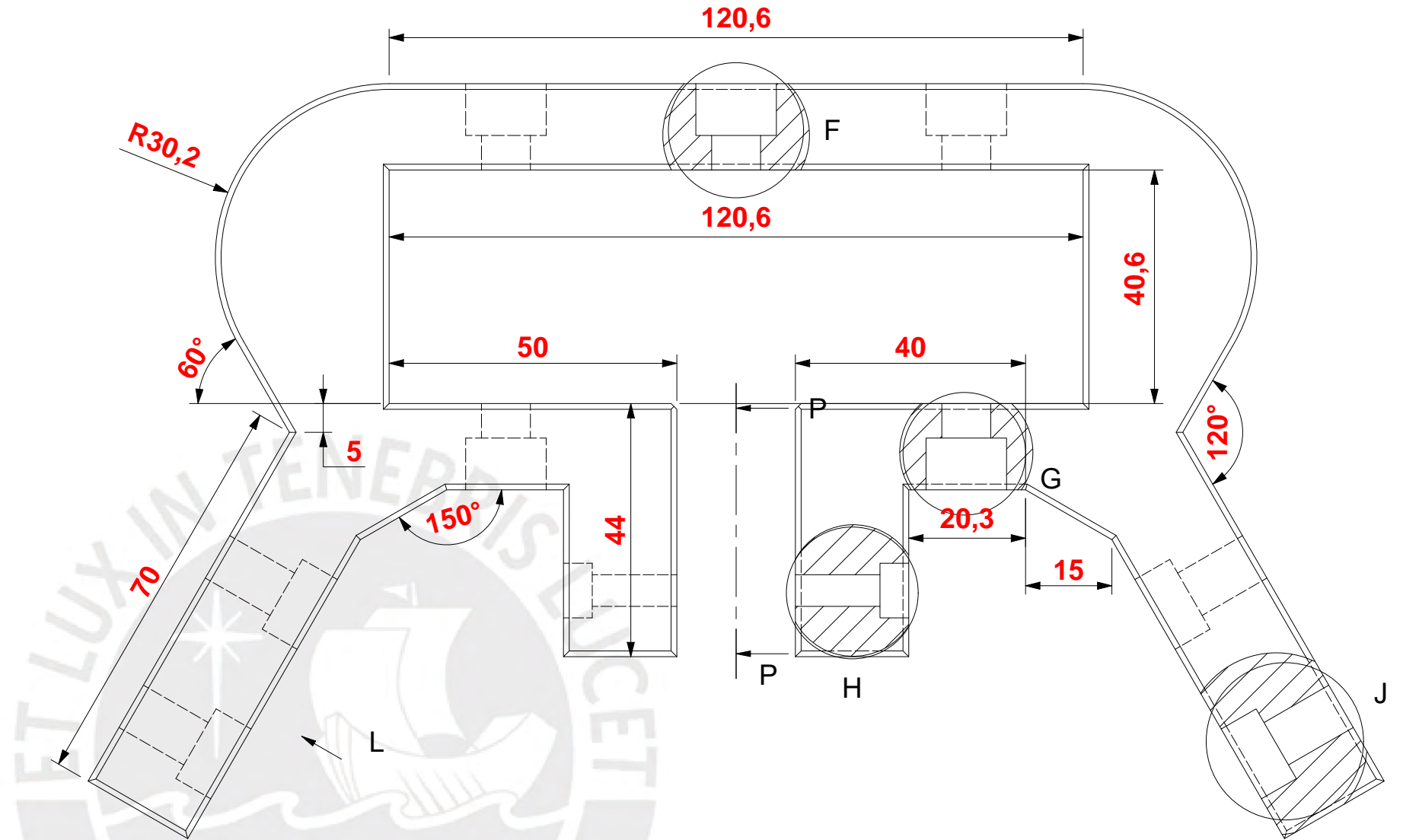
Chaflanes 1mm



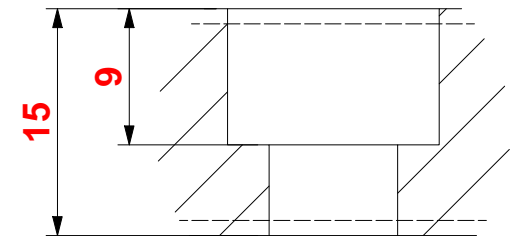
H (2 : 1)



J (2 : 1)



G (2 : 1)



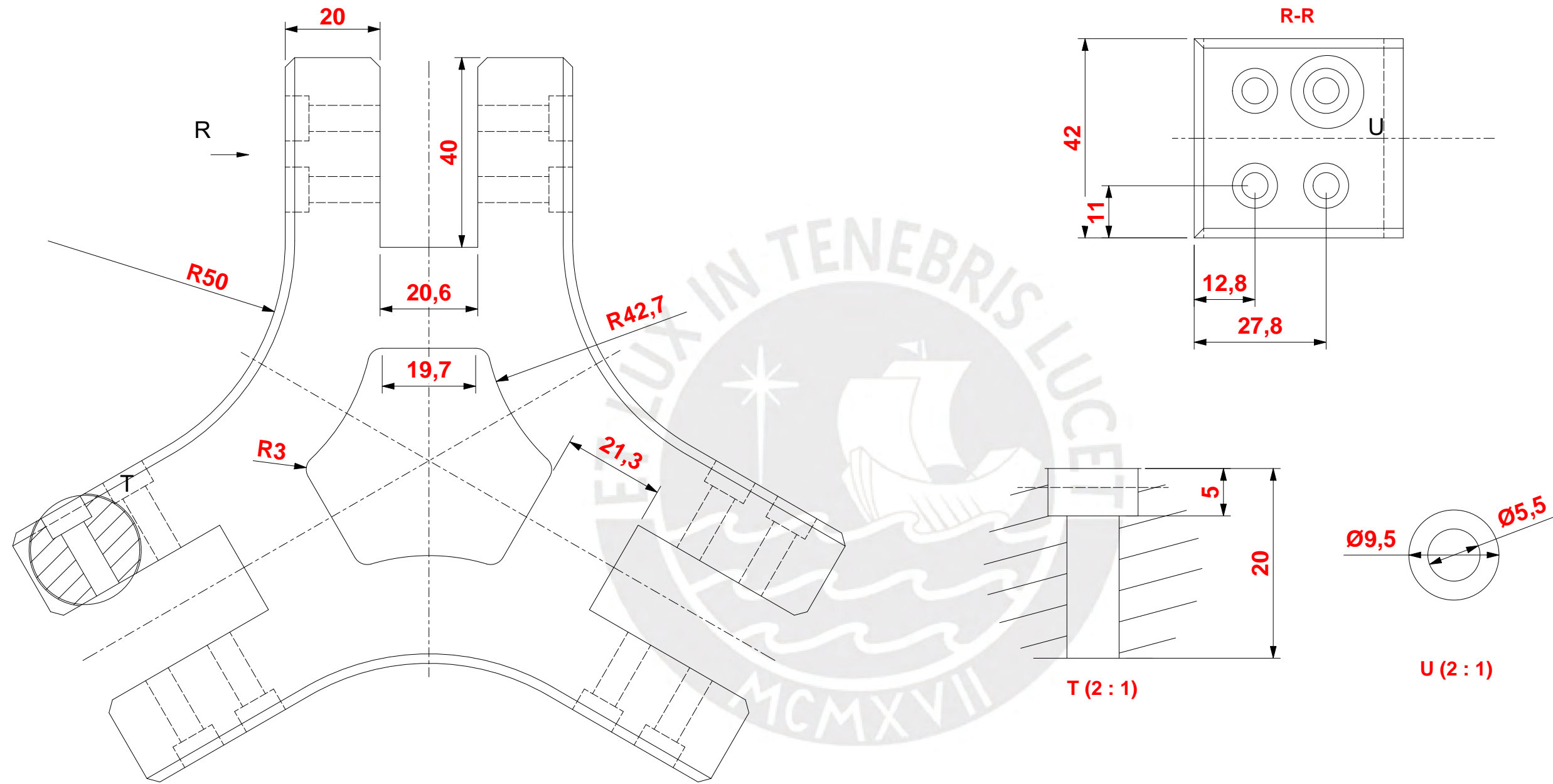
F (2 : 1)

Material: Polietileno de alta densidad

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Acople lateral central	1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 29/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: E002-A

Chaflanes 1mm

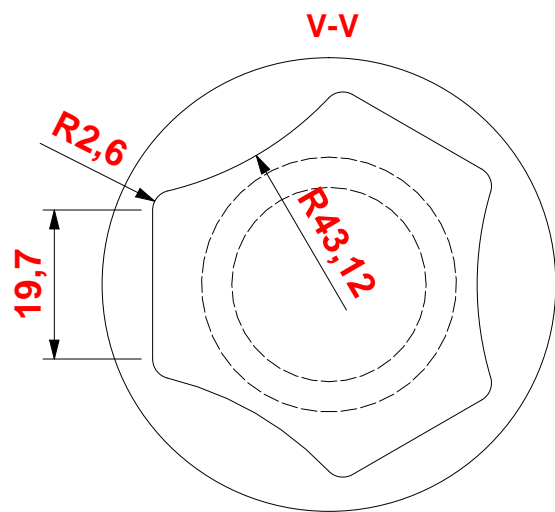
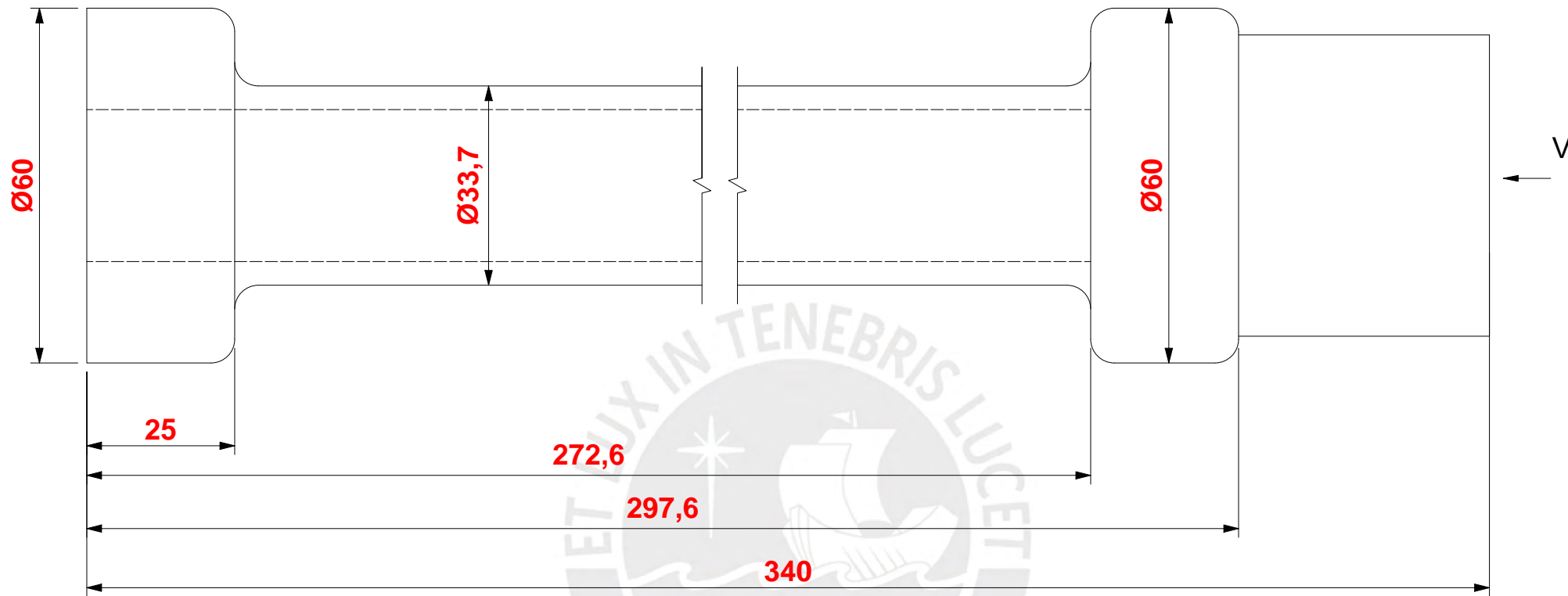


Material: Acero AISI 4140

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Acople central	1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 29/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: E003-A

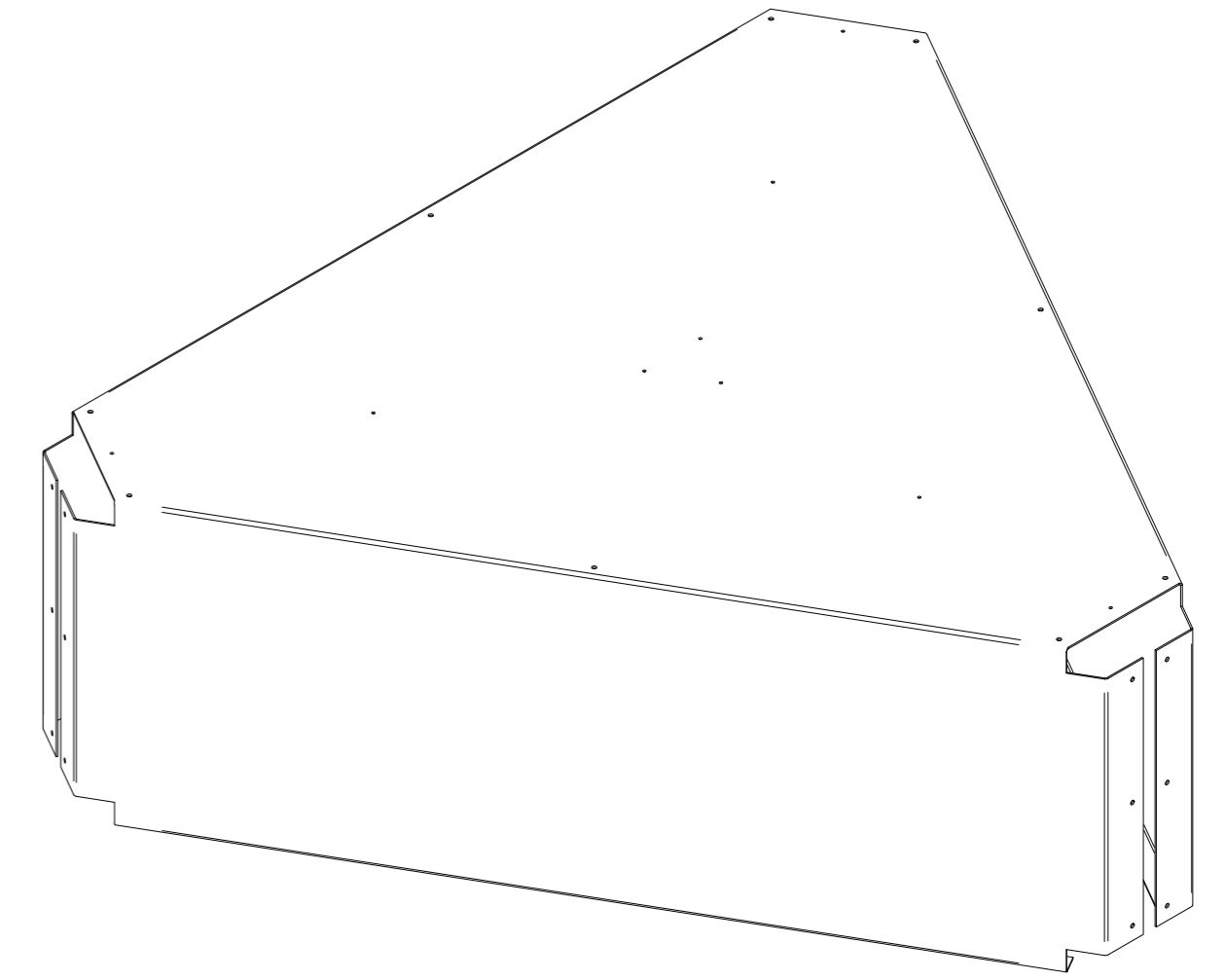
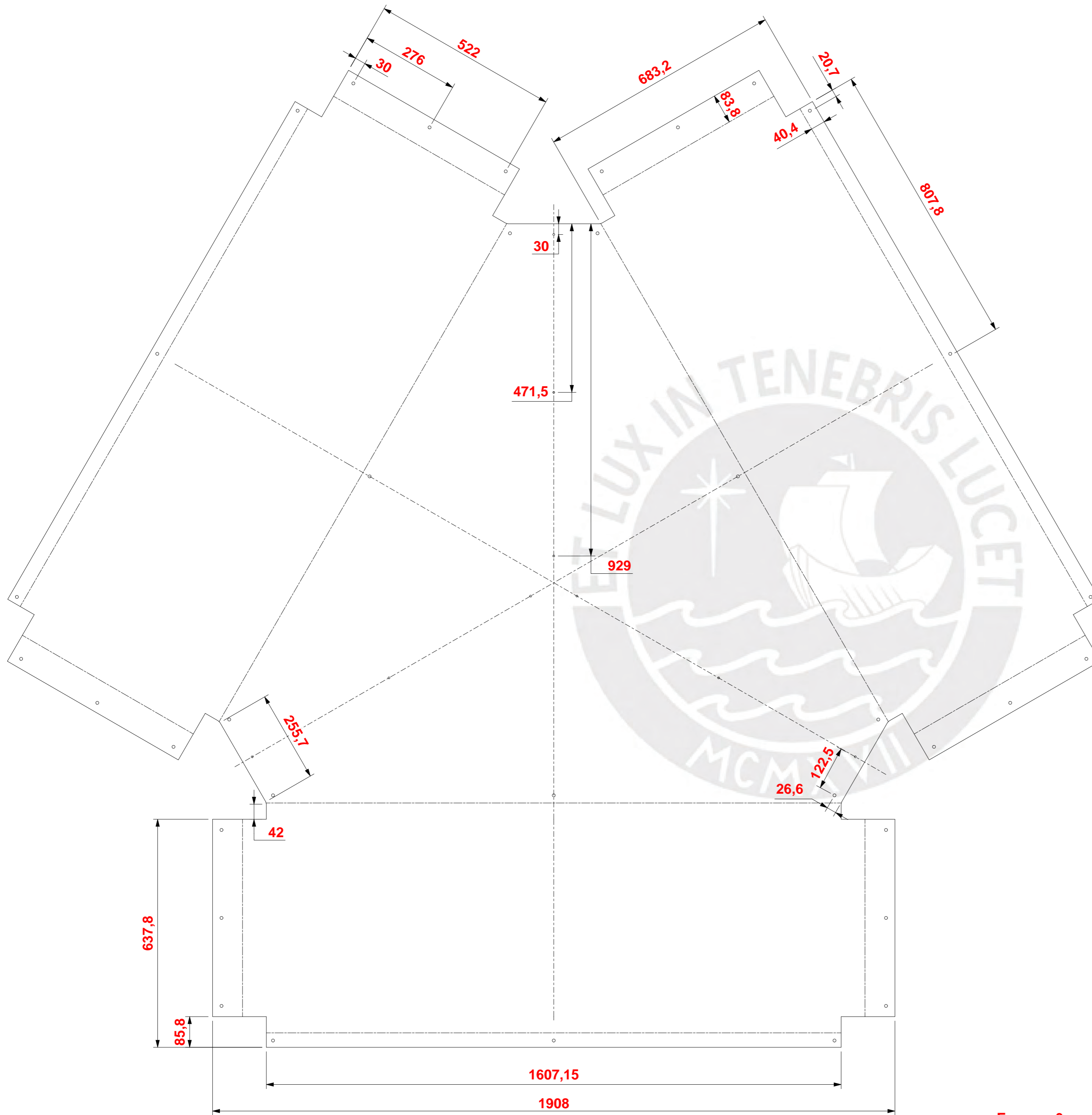
Chaflanes 2mm



Redondeos 4mm

Material: Acero AISI 4140

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ		
FCI - Ingeniería Mecatrónica		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Pedestal de soporte	1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 29/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: E004-A

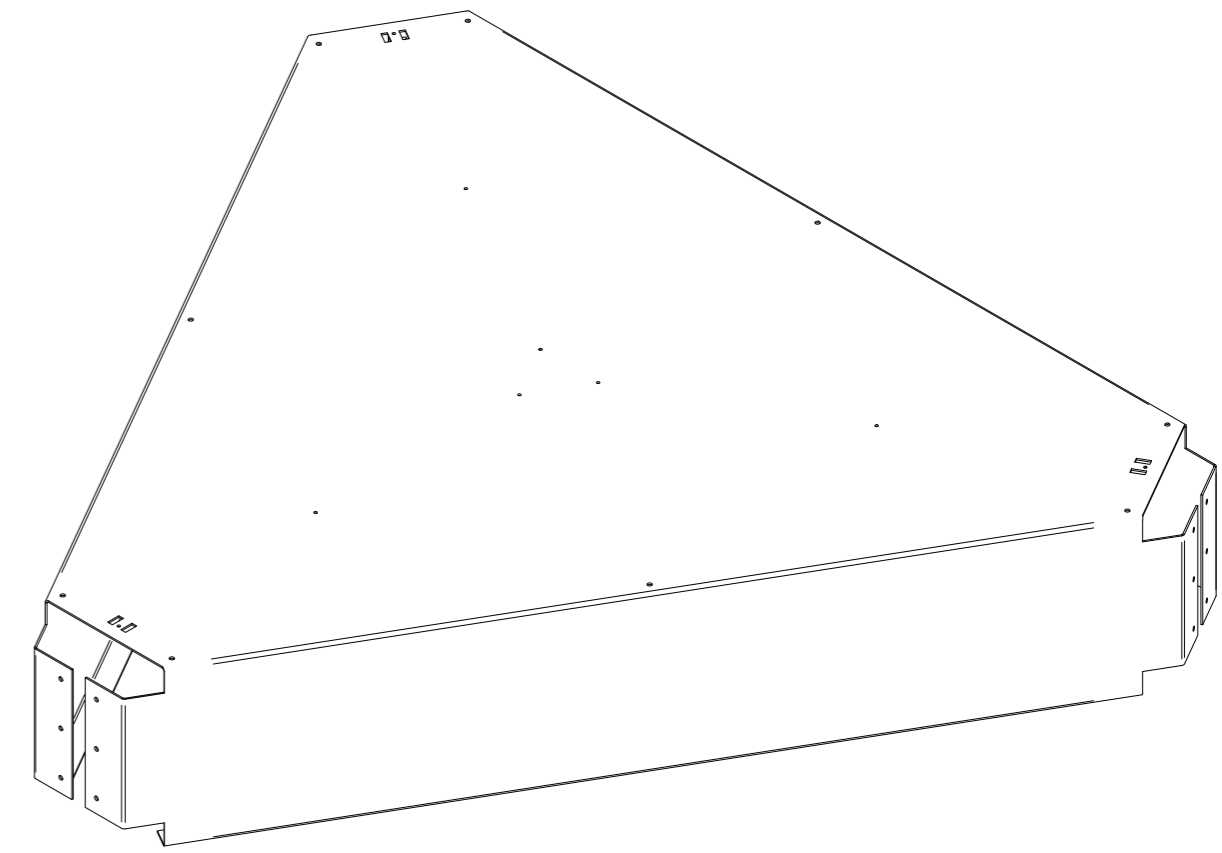
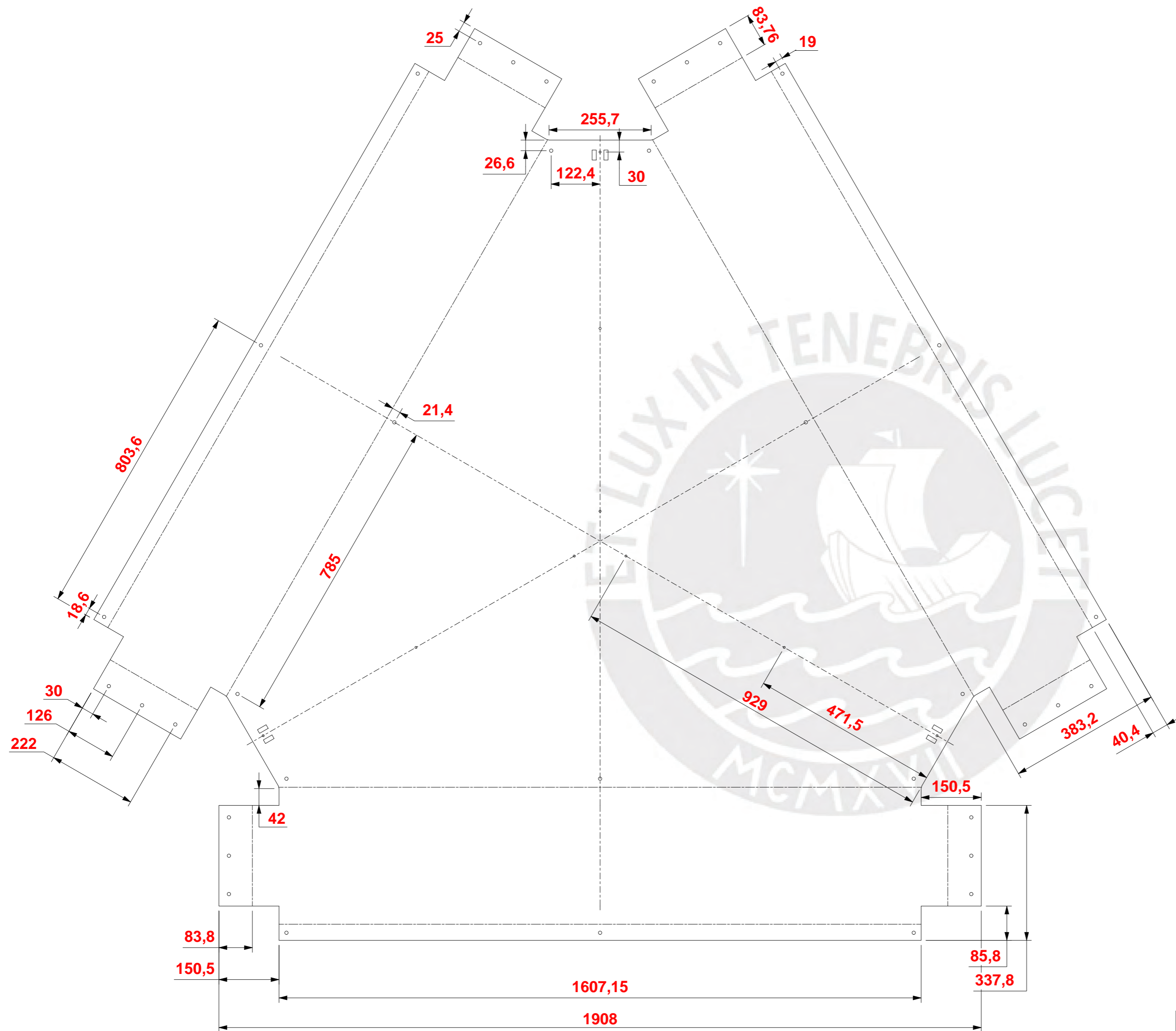


Material: Plancha de acero laminado en caliente ASTM A36

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

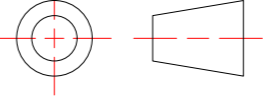
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Cobertor superior	
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 29/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: E005-A

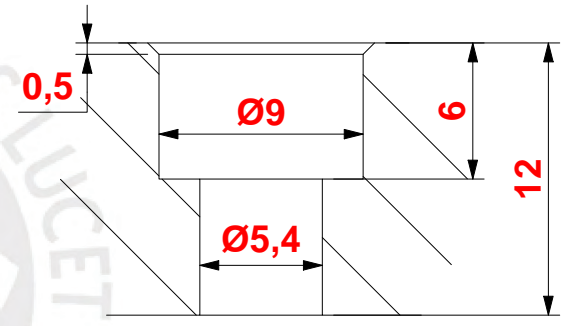
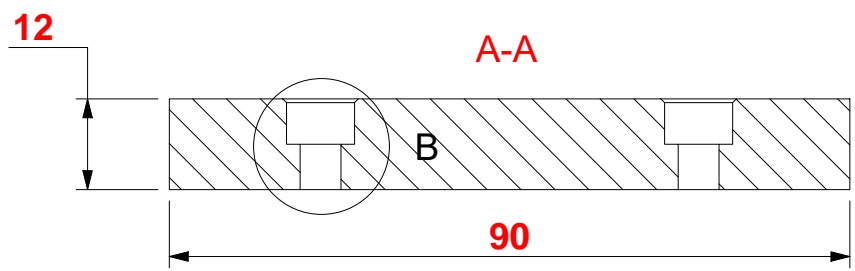
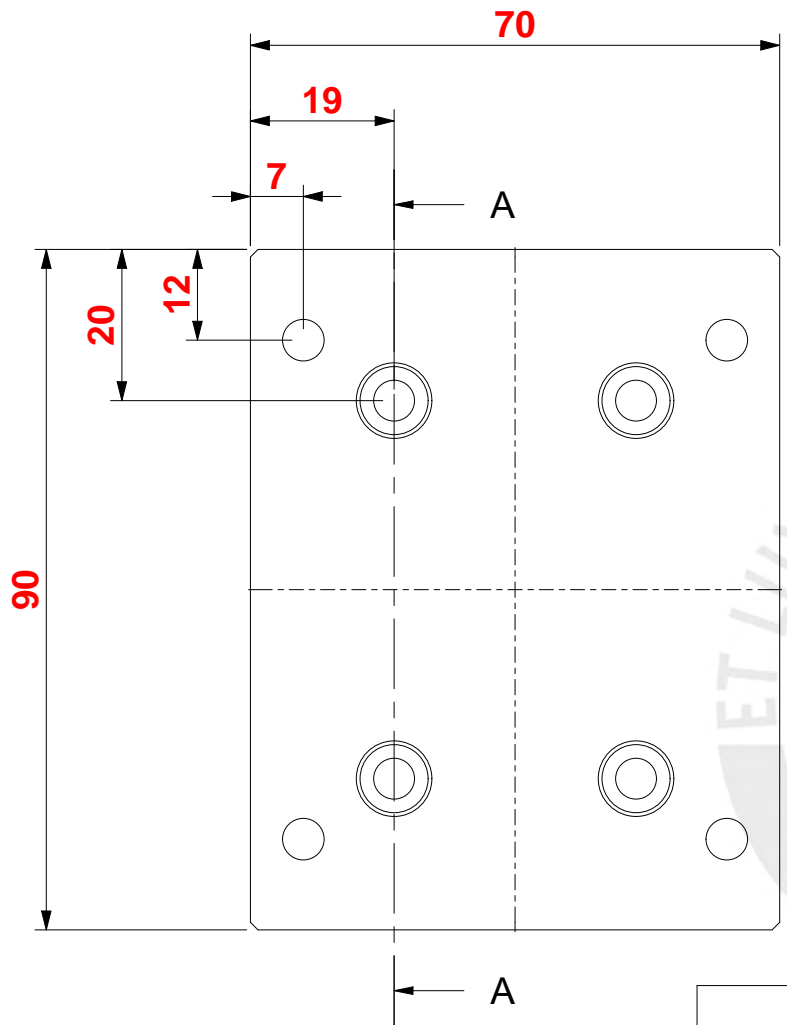
Espesor 3mm



Espesor 3mm

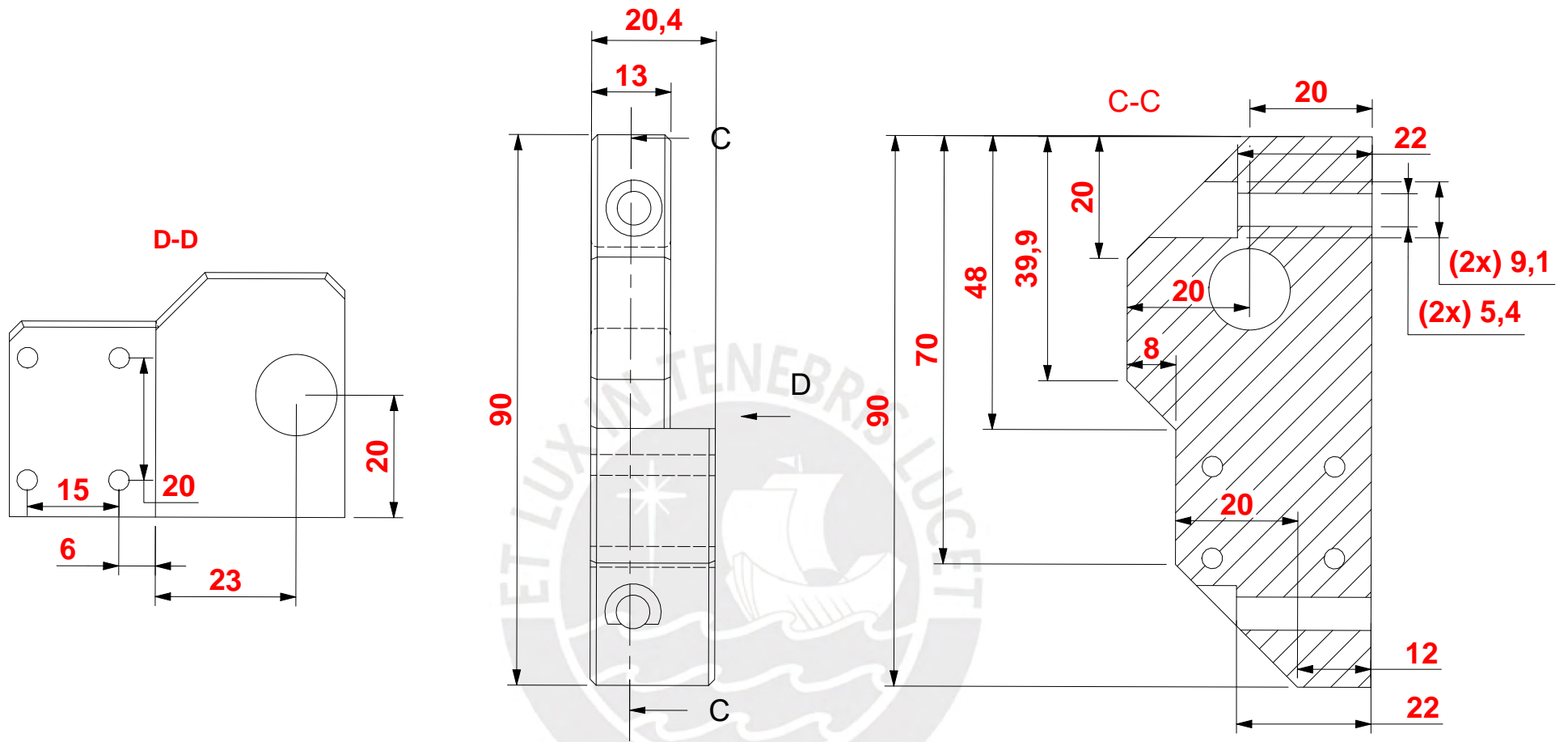
Material: Plancha de acero laminado en caliente ASTM A36

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FCI - Ingeniería Mecatrónica		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA 1:8
Cobertor inferior	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 29/05/2025
20196355	REVISADO POR: Diego Arce	LÁMINA: E006-A



Material: Polietileno de alta densidad

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FCI - Ingeniería Mecatrónica		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Acople de guía lineal	1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 29/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: L001-A

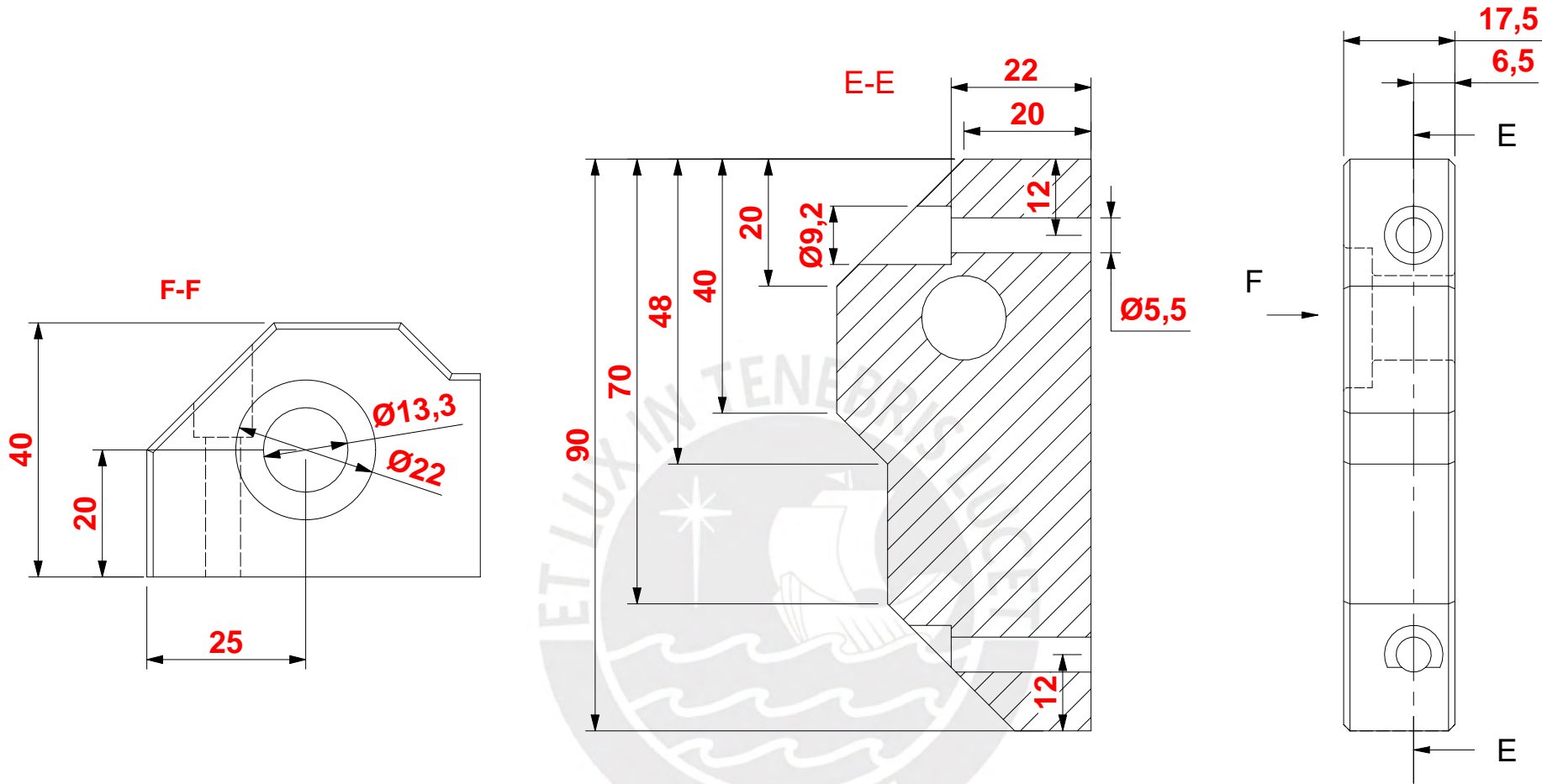


Material: Polietileno de alta densidad

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FCI - Ingeniería Mecatrónica

<p>MÉTODO DE PROYECCIÓN</p> 	<p>TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1</p>	<p>ESCALA</p> <p>1:1</p>
<p>20196355</p>	<p>Armando Arturo, Custodio Díaz</p>	<p>FECHA: 29/05/2025</p>
<p>REVISADO POR:</p>	<p>Diego Arce</p>	<p>LÁMINA: L002-A</p>

Chaflanes 1mm

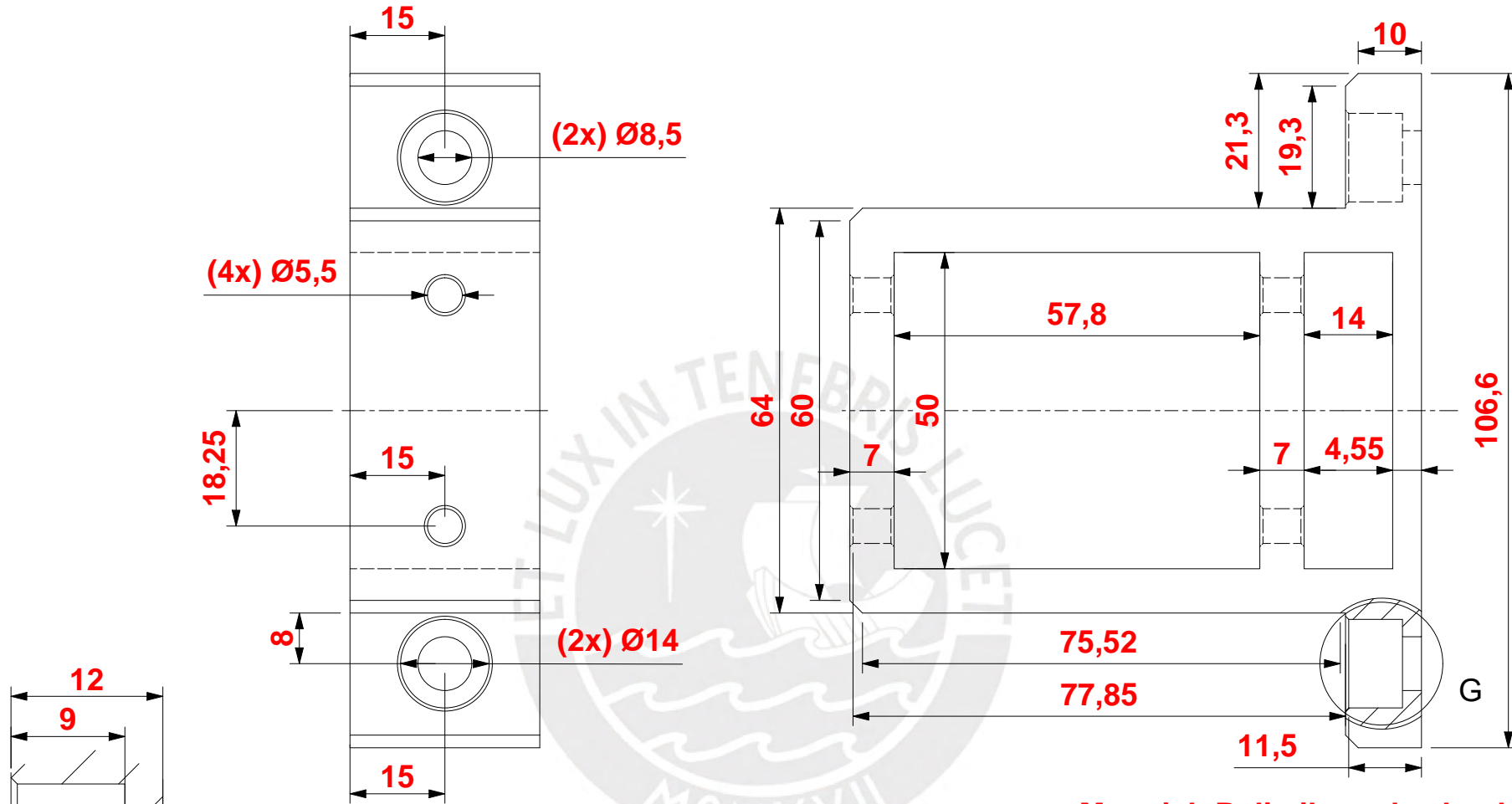


Material: Polietileno de alta densidad

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FCI - Ingeniería Mecatrónica

MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Acople auxiliar izquierdo	
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 29/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: L003-A

Chaflanes 1mm

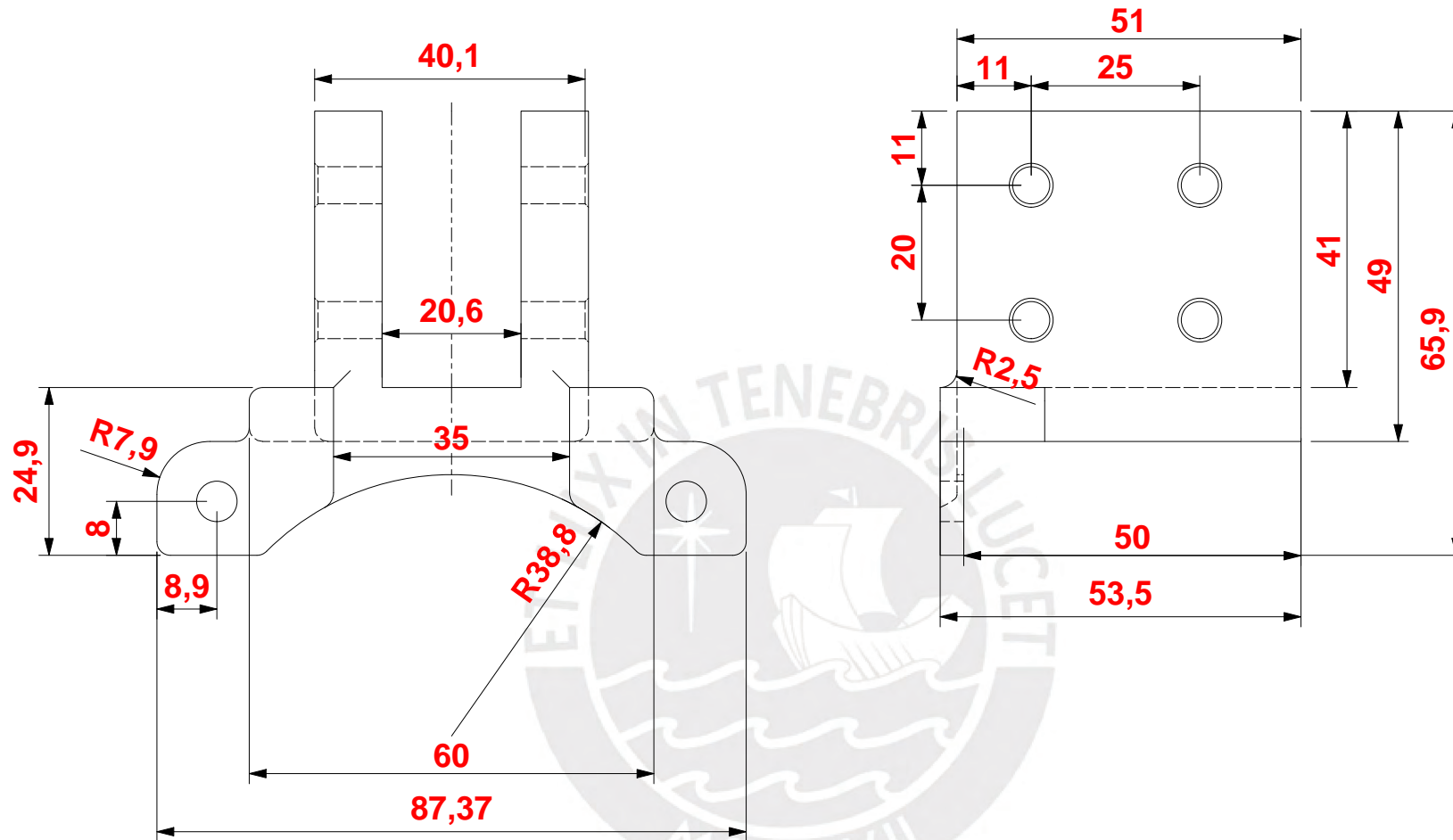


Material: Polietileno de alta densidad

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FCI - Ingeniería Mecatrónica

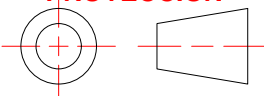
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Acople de polea	
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 29/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: L004-A

Chaflanes no mencionados 0,5mm

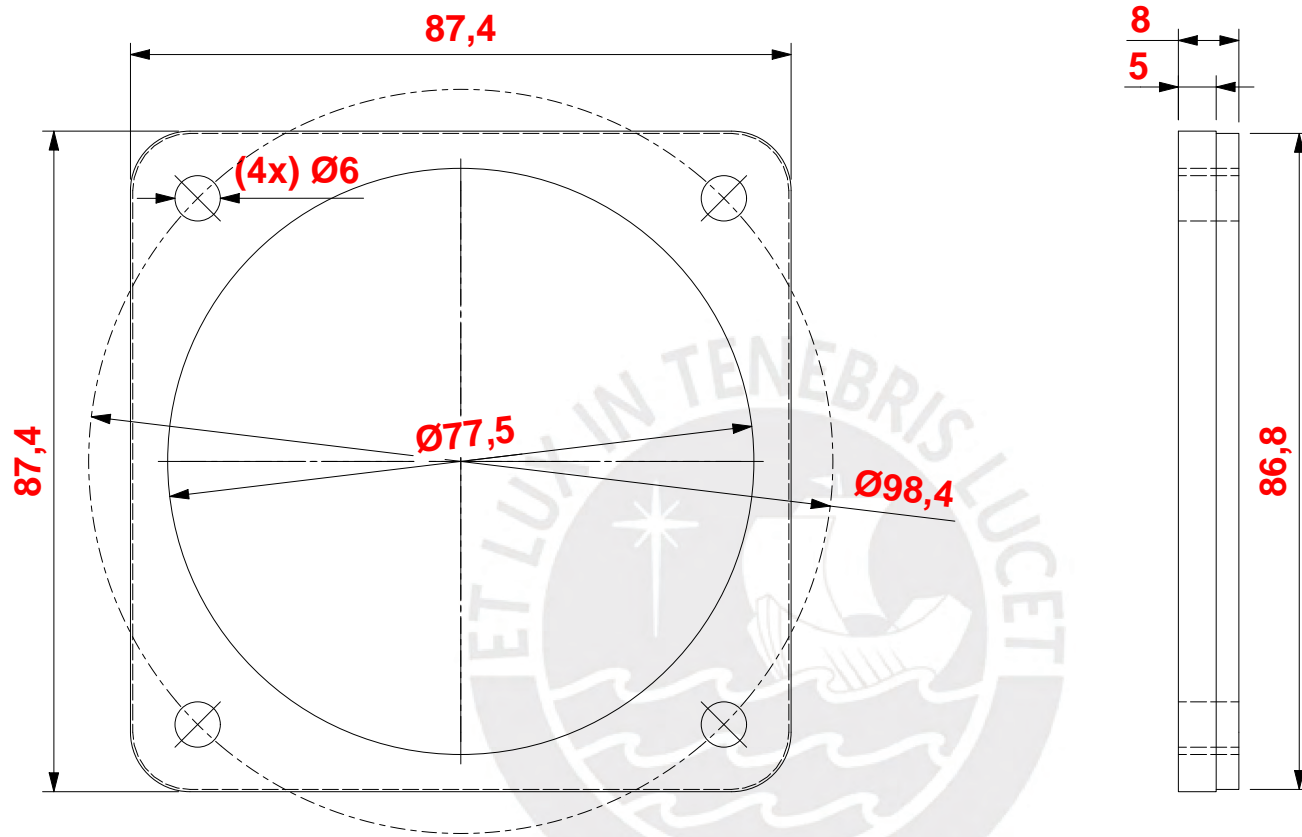


Material: Polietileno de alta densidad

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FCI - Ingeniería Mecatrónica

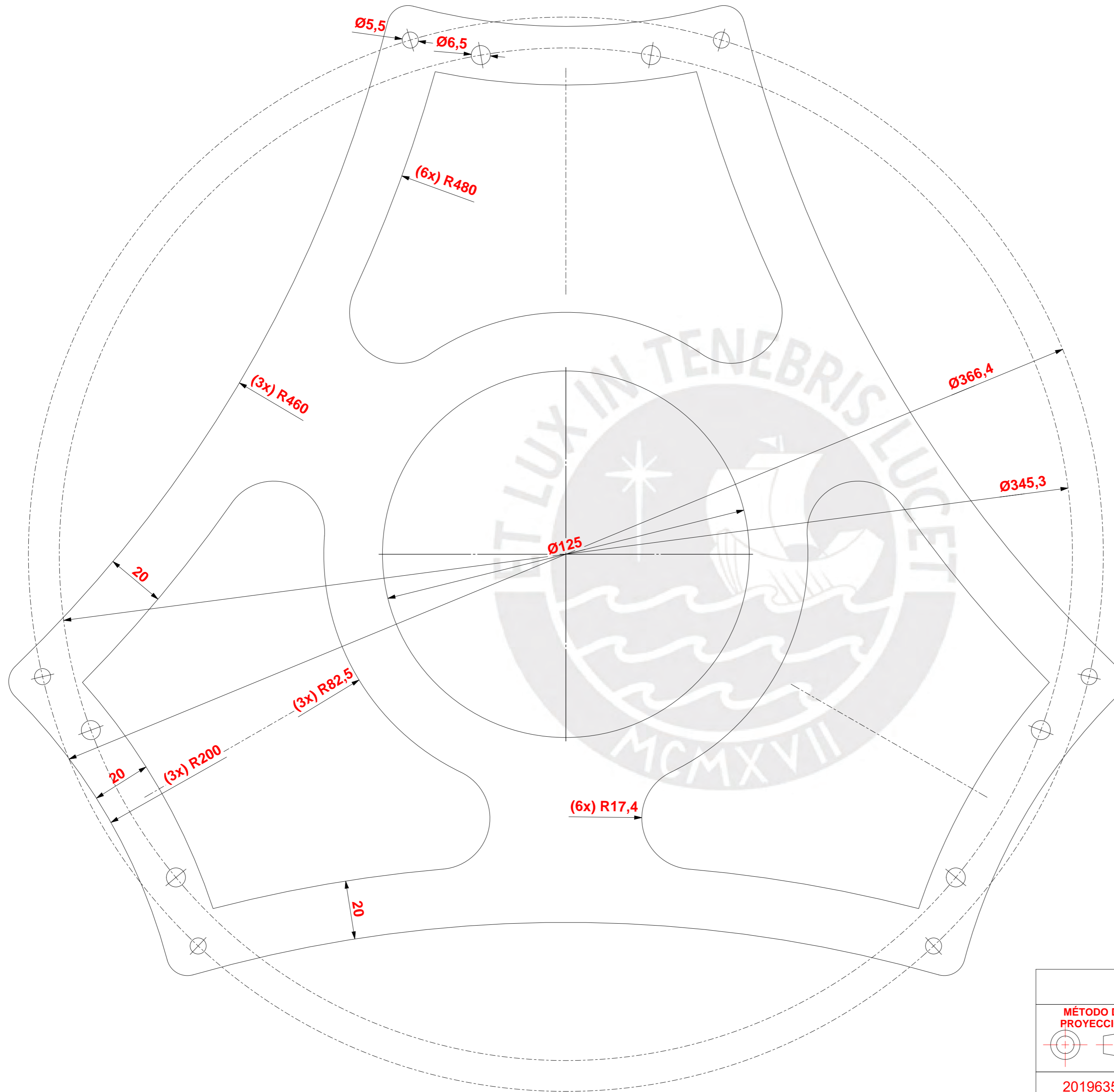
MÉTODO DE PROYECCIÓN 			TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA 1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz		FECHA: 29/05/2025	
REVISADO POR:			Diego Arce	LÁMINA: L005-A

Chaflanes no mencionados 0,5mm



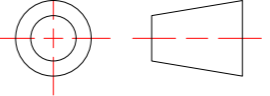
Material: Polietileno de alta densidad

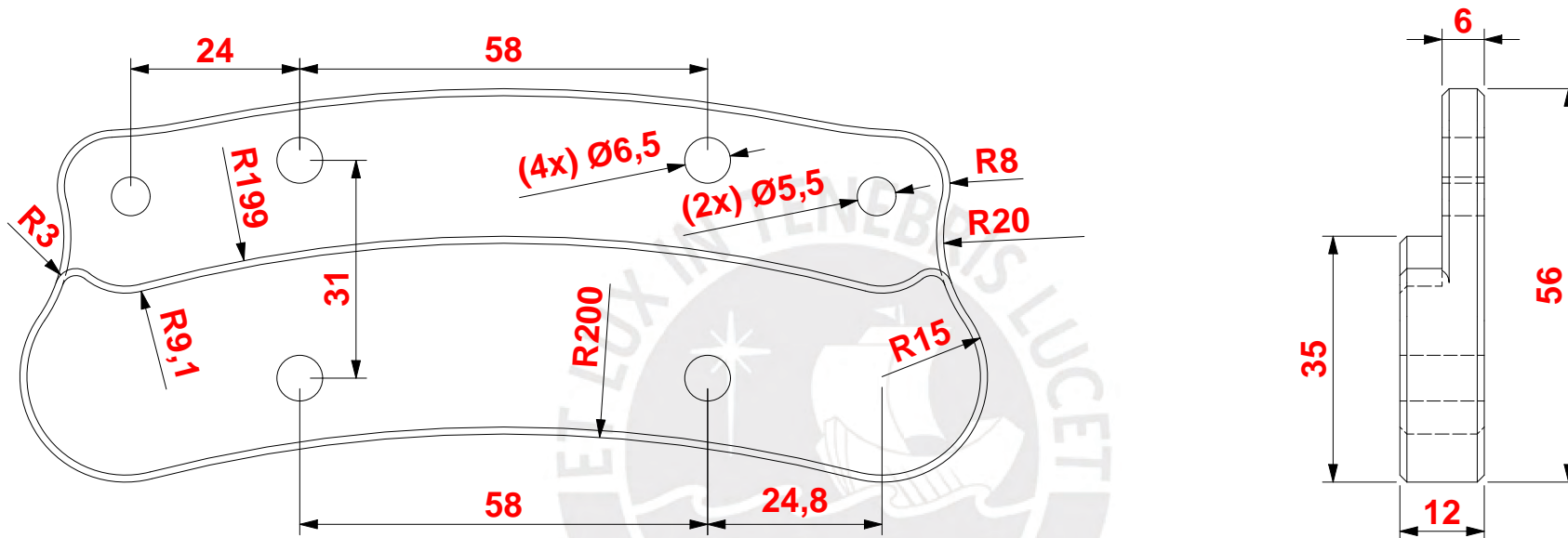
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FCI - Ingeniería Mecatrónica		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Acople auxiliar de motor	1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 29/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: L006-A



Espesor 10mm

Material: Fibra de carbono reforzada

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FCI - Ingeniería Mecatrónica				
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2	- Fabcore -	HORARIO 10M1	ESCALA
	Efactor			1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz		FECHA: 31/05/2025	
REVISADO POR:		Diego Arce		LÁMINA: M002-A

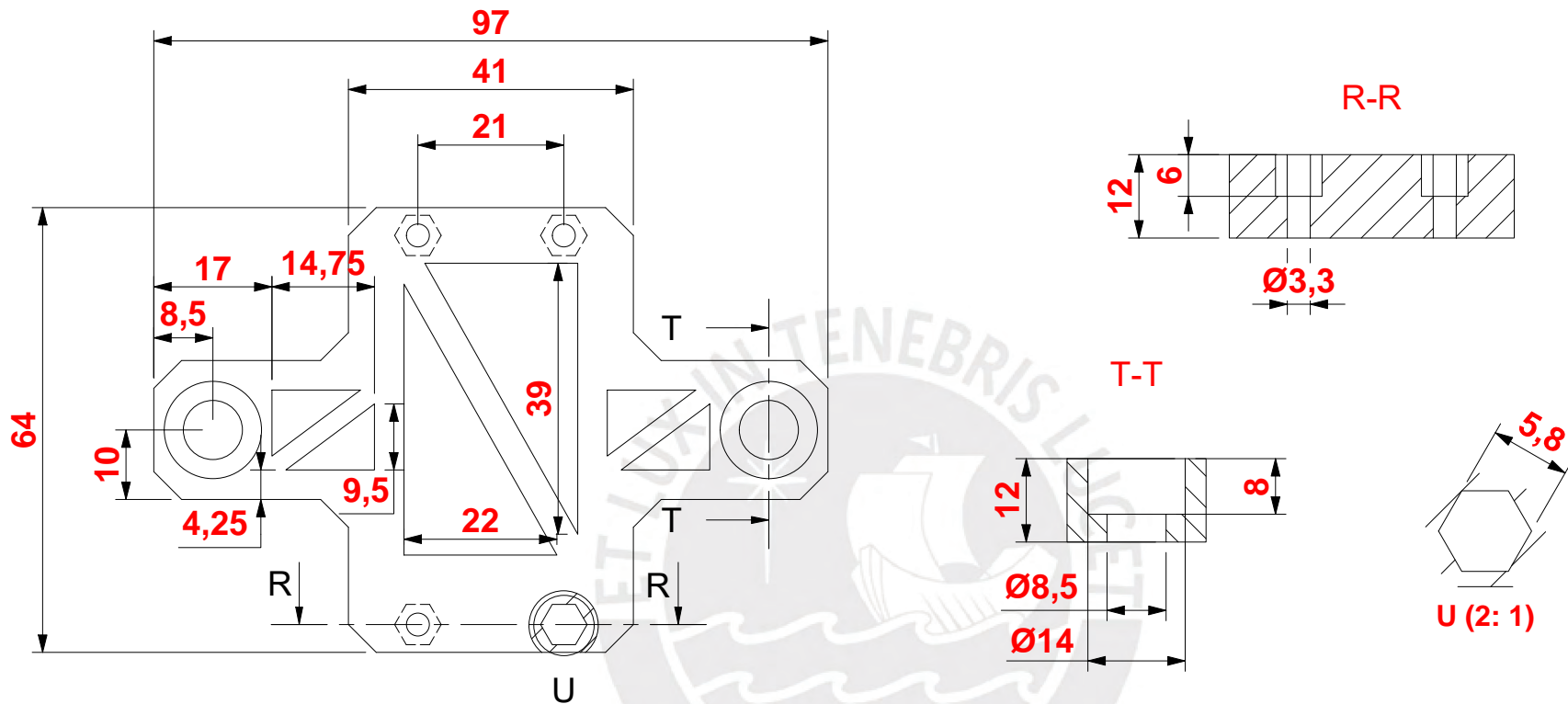


Material: Aluminio 6061

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FCI - Ingeniería Mecatrónica

MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Acople efector	
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 30/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: M002-A

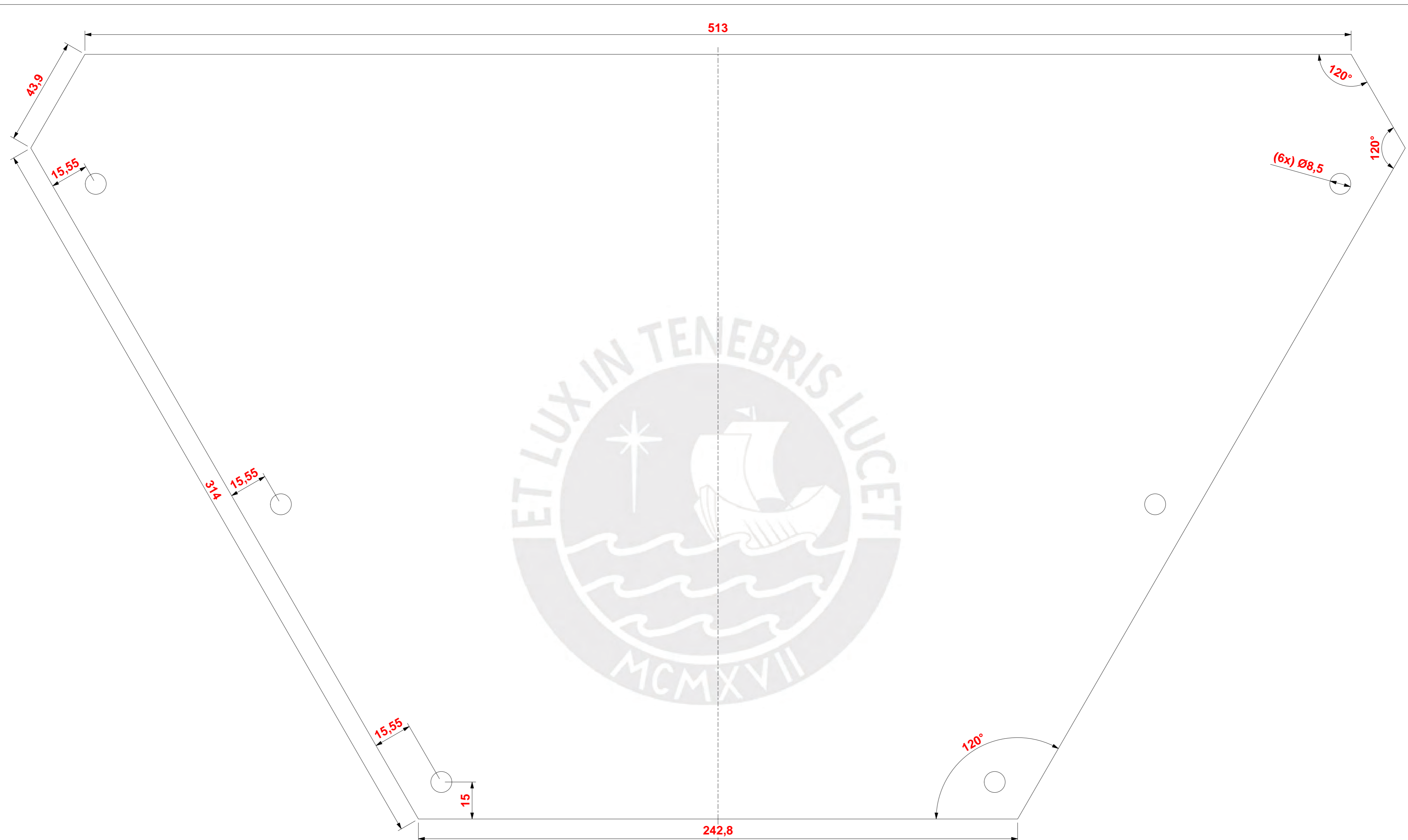
Chaflanes no mencionados 1mm



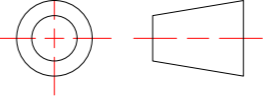
Material: Polietileno de alta densidad

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FCI - Ingeniería Mecatrónica

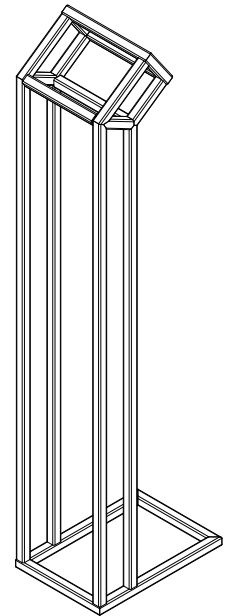
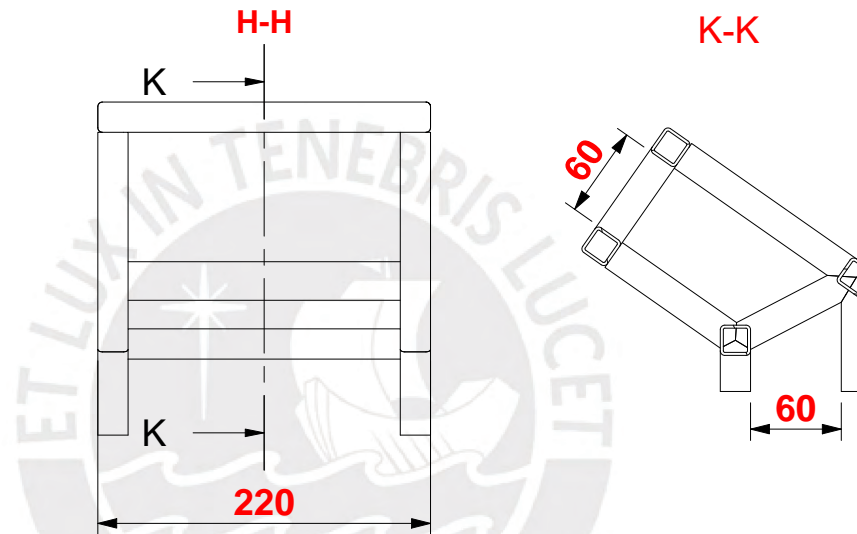
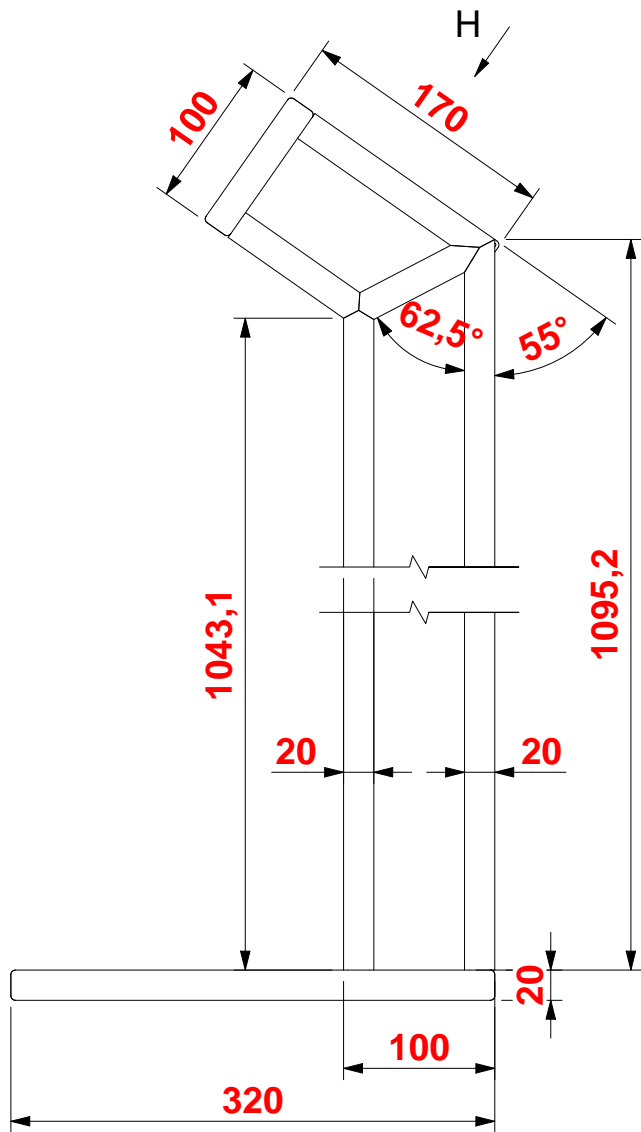
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Acople limit switch	
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 30/05/2025
Chaflanes 4mm	REVISADO POR: Diego Arce	LÁMINA: C001-A



Material: Polimetilmetacrilato

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FCI - Ingeniería Mecatrónica		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA 1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 31/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: C002-A

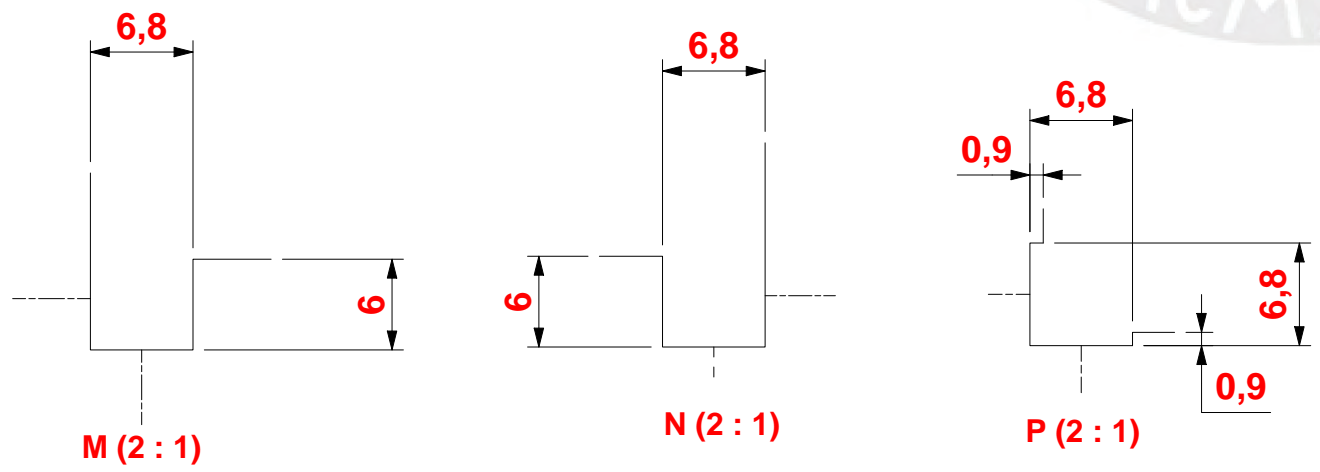
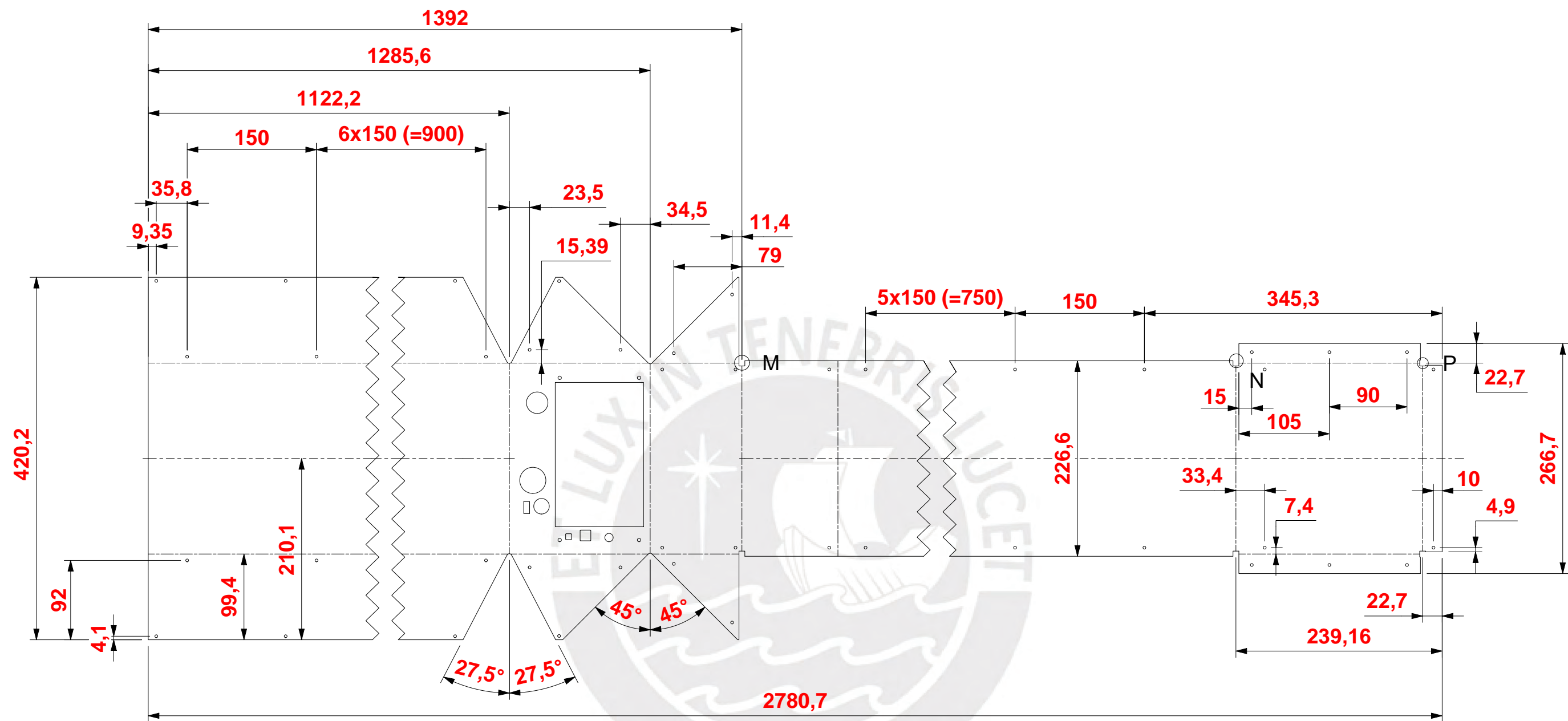
Esesor 5,5mm



Material: Perfiles de aluminio extruido ASTM B221

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FCI - Ingeniería Mecatrónica

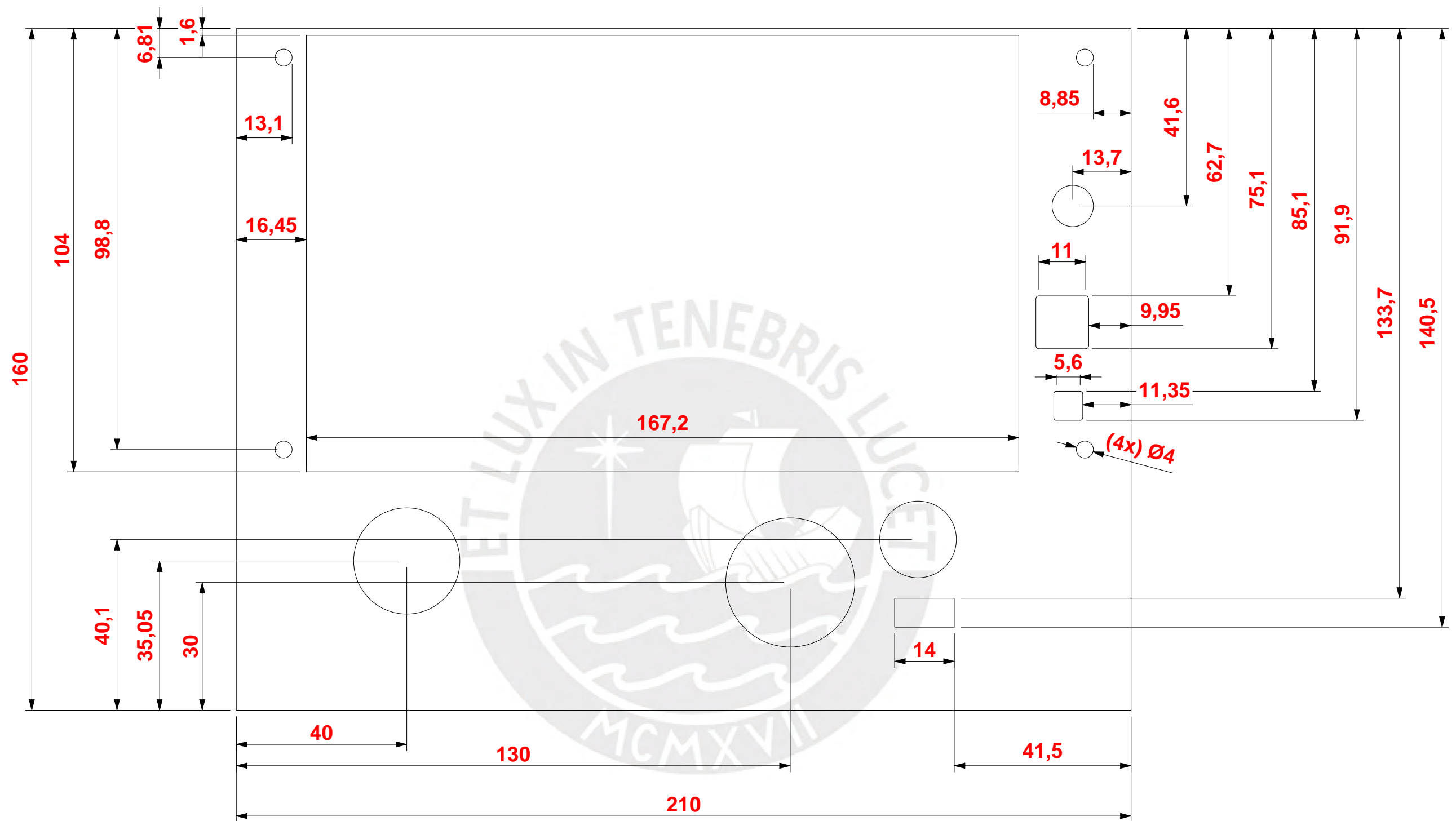
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Estructura de interfaz	
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 30/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: 1001-A



Agujeros 3,3mm
Redondeos no mencionados 3mm

Material: Plancha de acero laminado en caliente ASTM A36

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ			
FCI - Ingeniería Mecatrónica			
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA	
	Cobertor de interfaz		1:5
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz		FECHA: 30/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce		LÁMINA: 1002-A

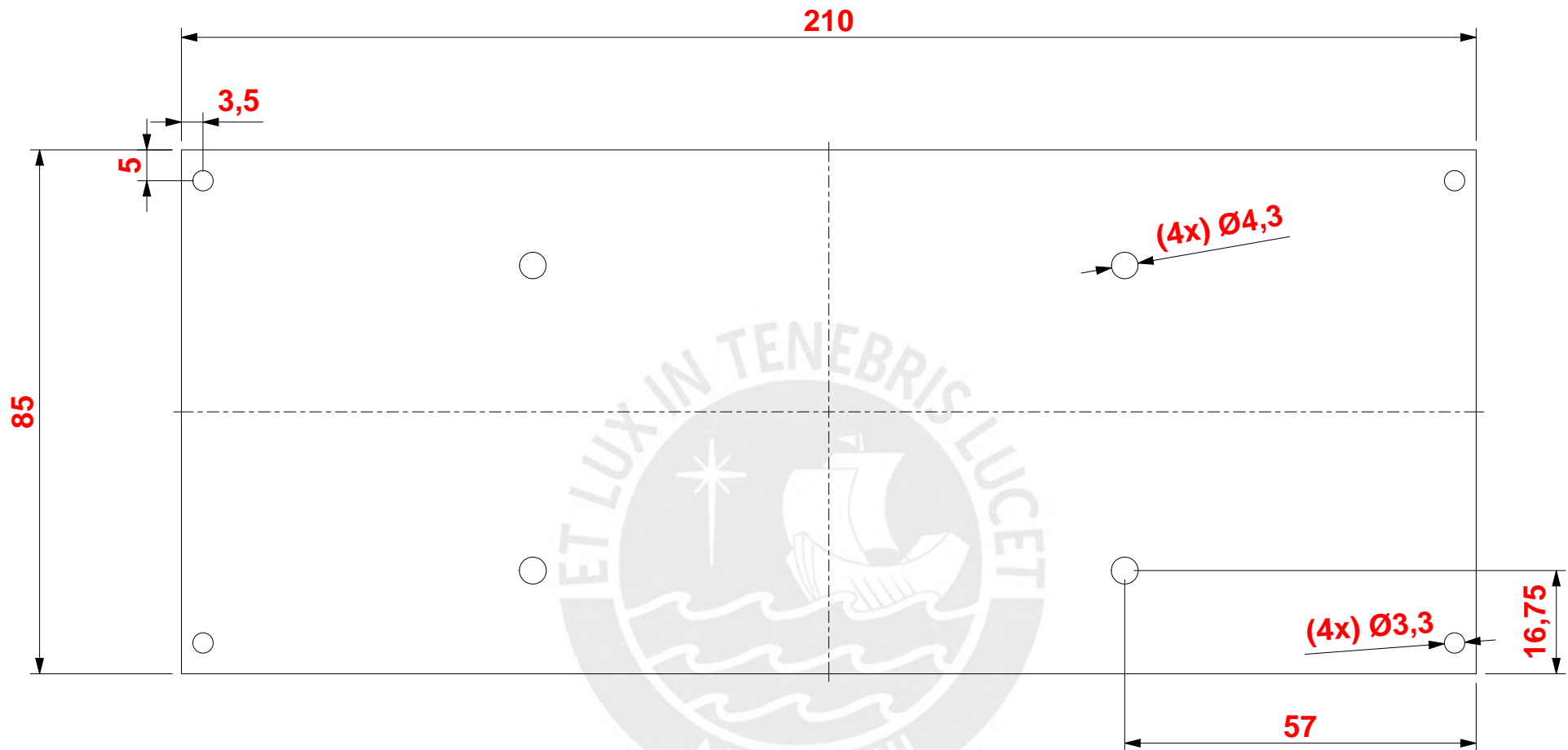


Material: Polimetilmetacrilato

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Soporte de Interfaz	1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 31/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: 1003-A

Espesor 5,5mm

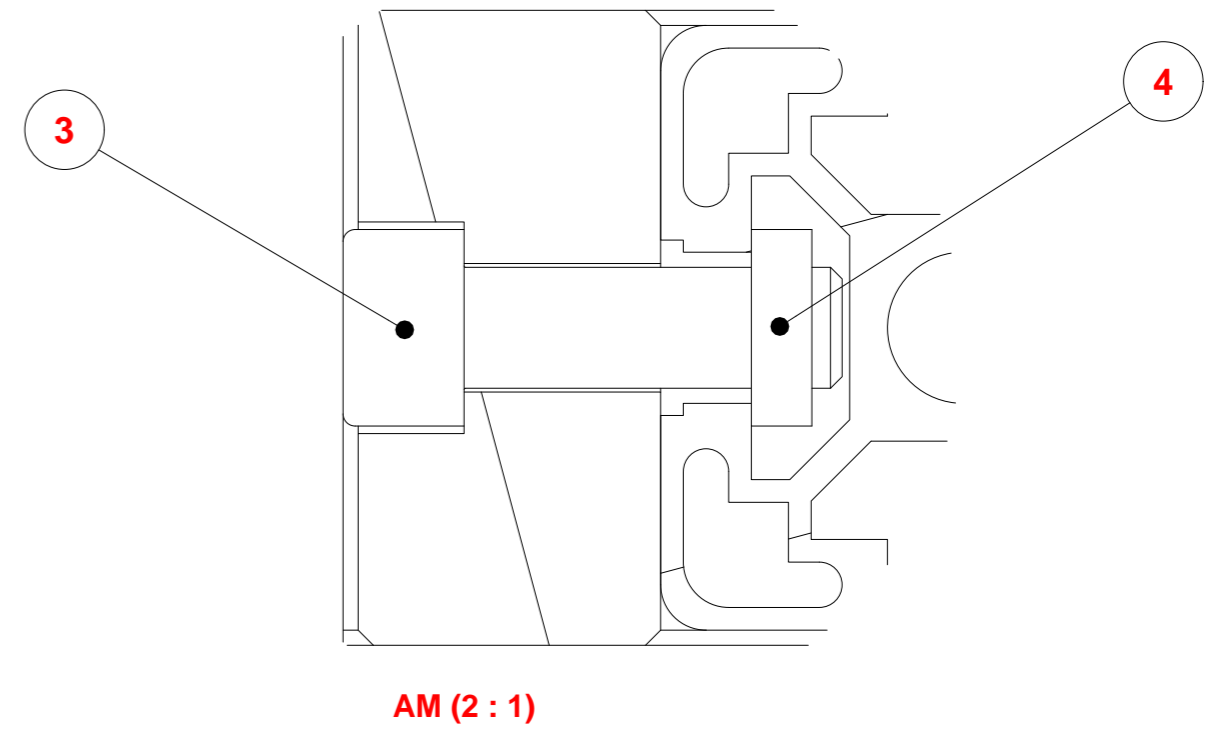
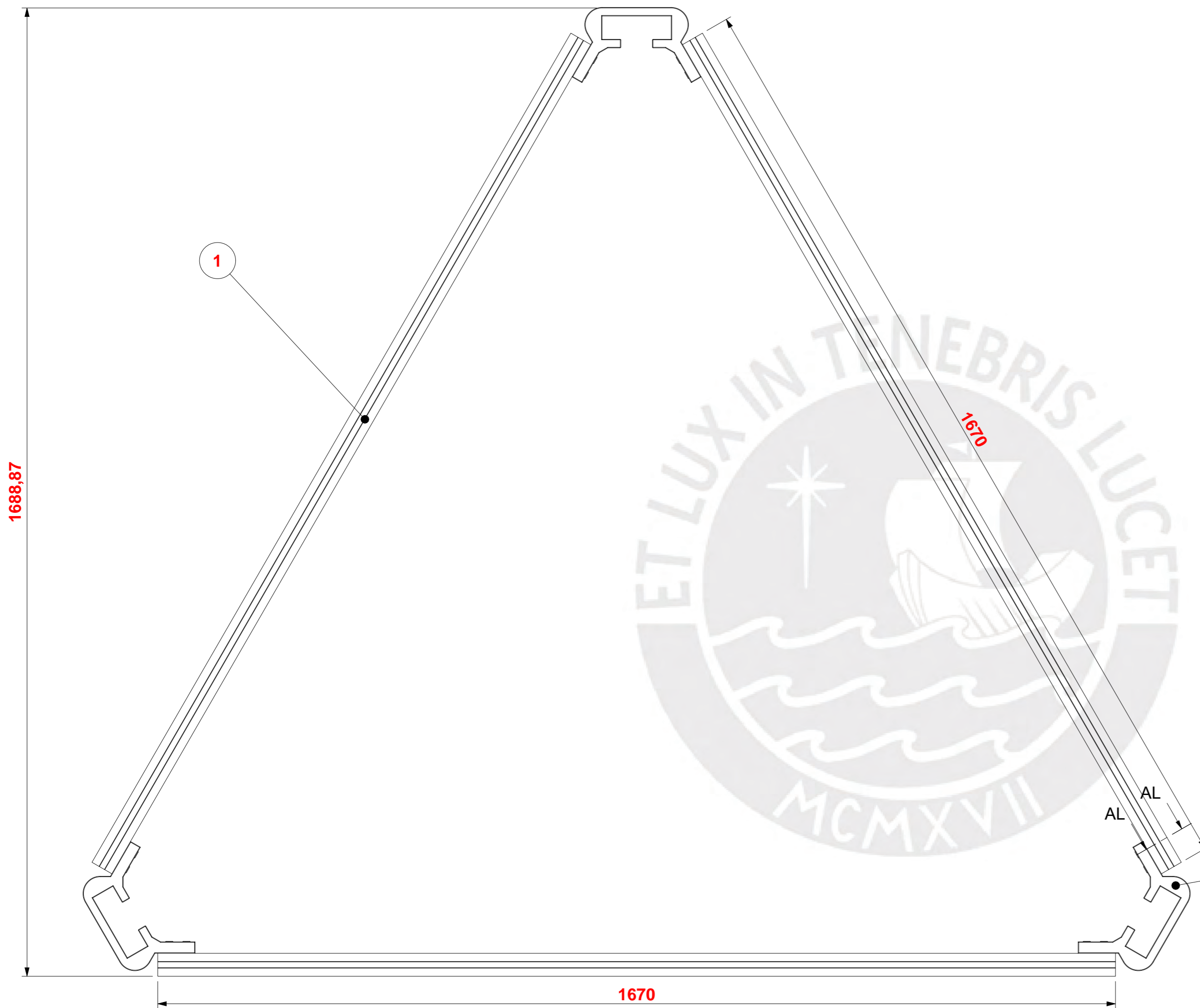


Material: Polimetilmetacrilato

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FCI - Ingeniería Mecatrónica

MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA 1:1
	Soporte de Relés	
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 31/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: I004-A

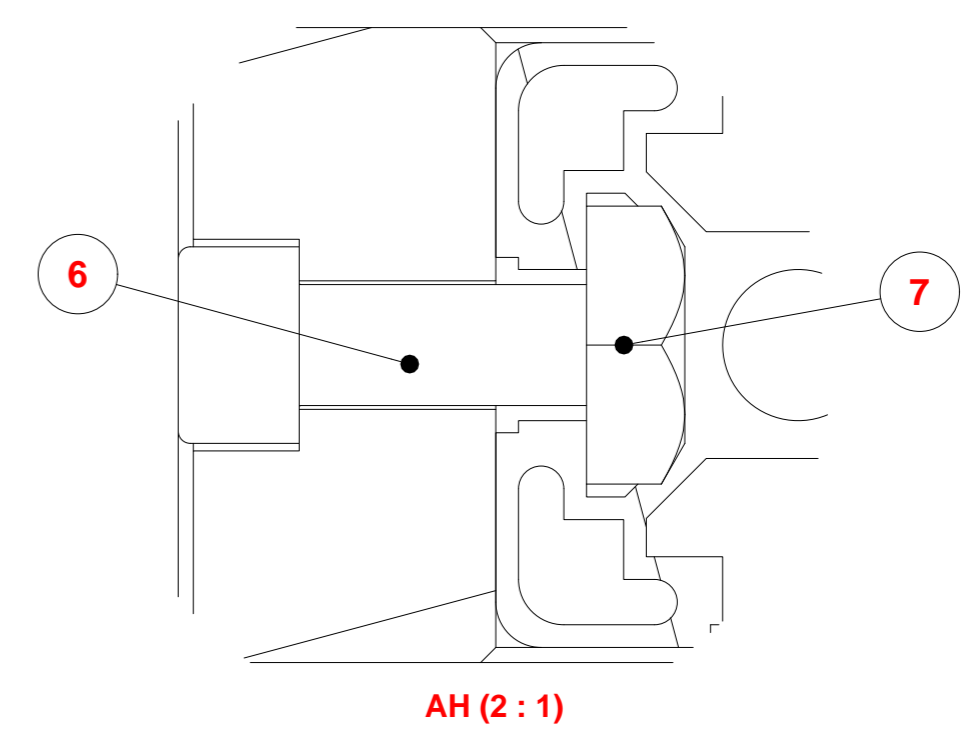
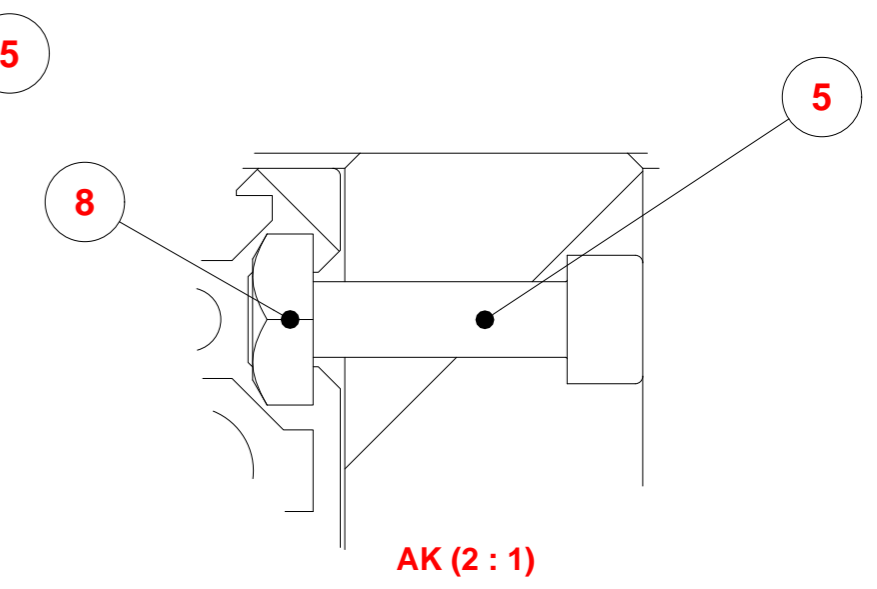
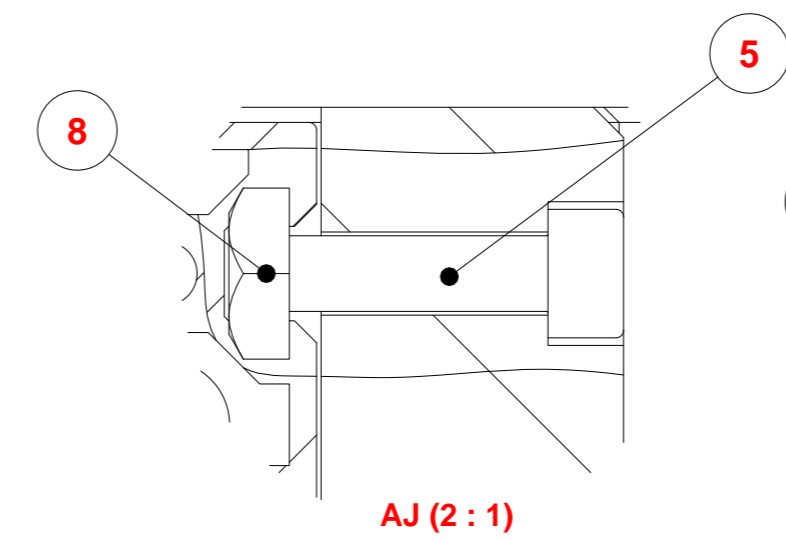
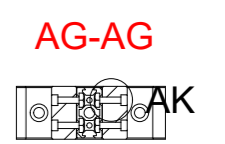
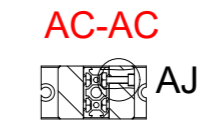
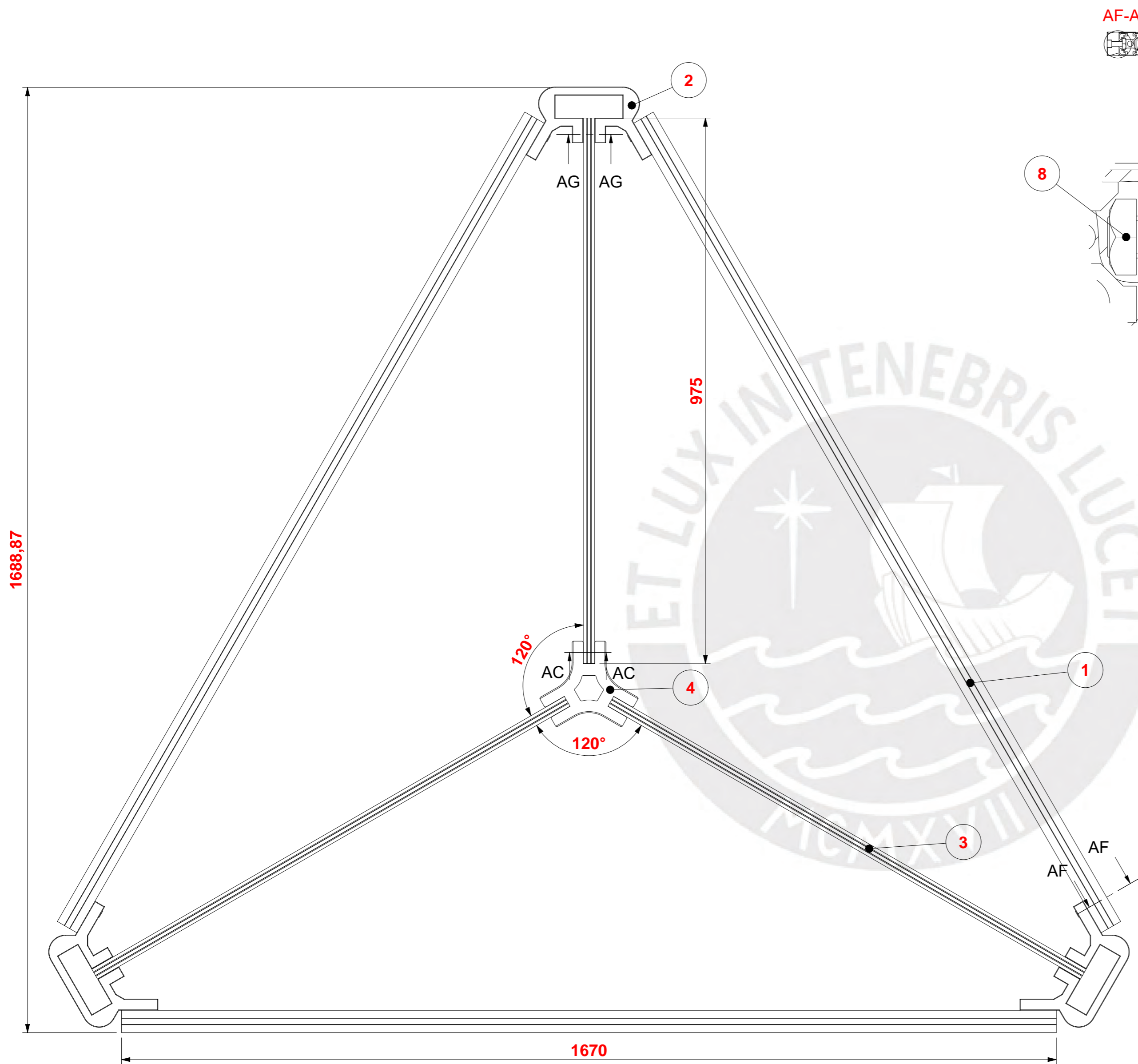
Espesor 5,5mm



AL-AL

REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES
4	12	Tnut M8	DIN 562	
3	12	M8 x 25	ISO 4762	
2	3	Acople Lateral	Acople de HDPE	Ver plano E001-A
1	3	T-Slot 4040	Longitud 1670	

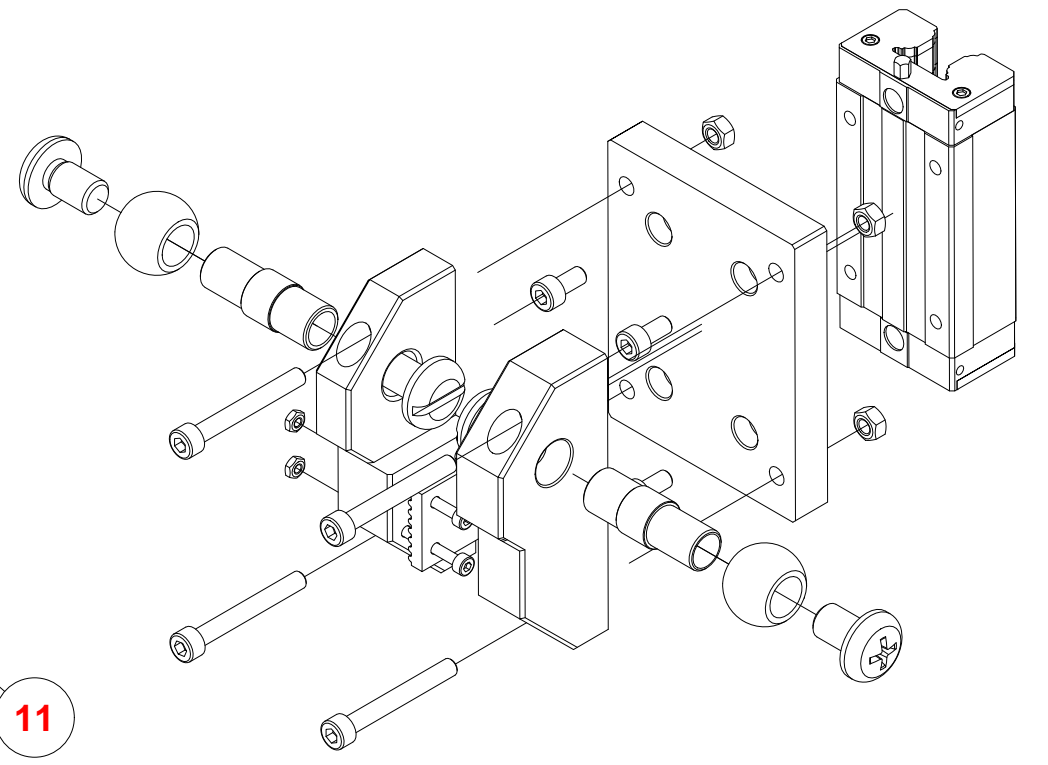
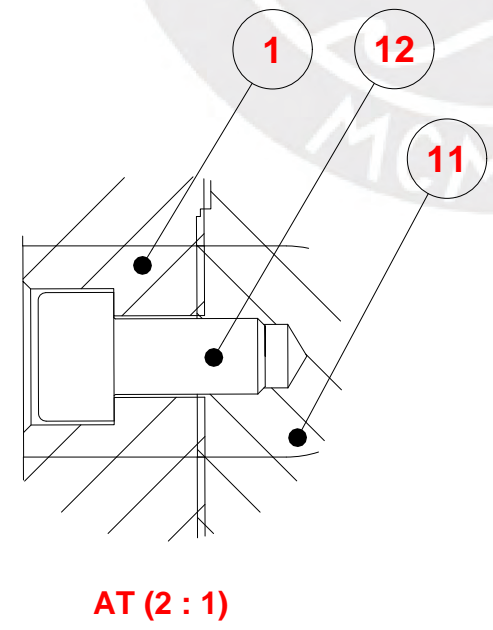
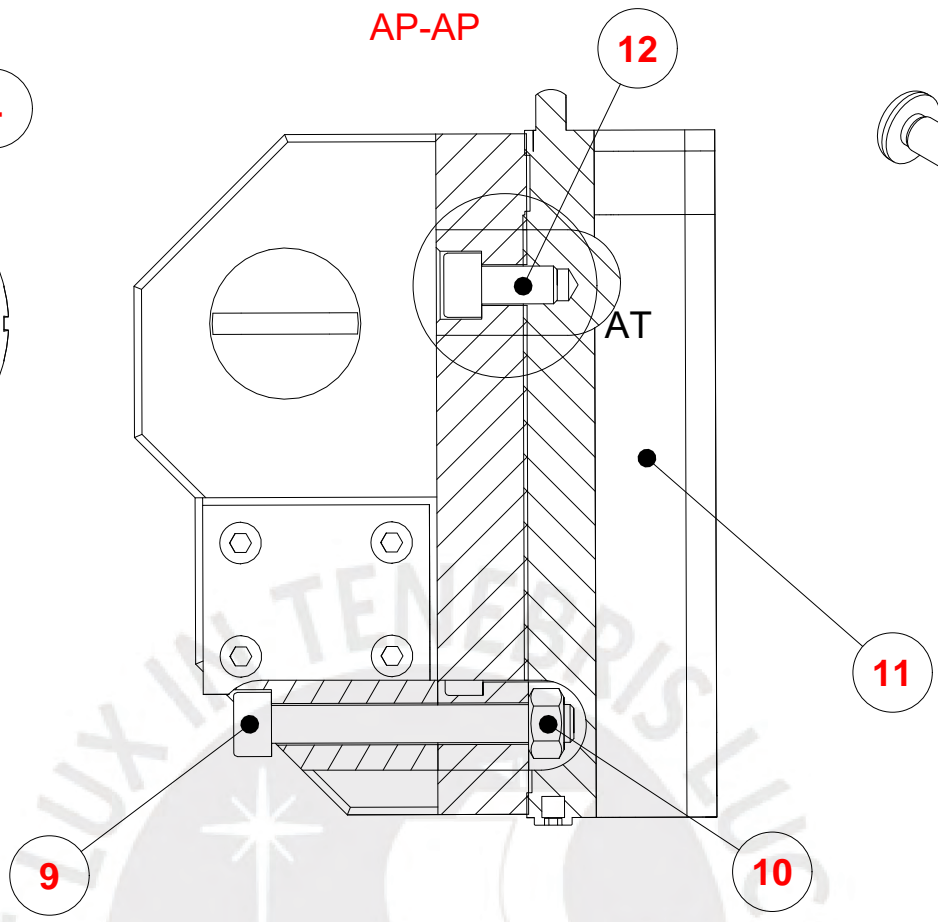
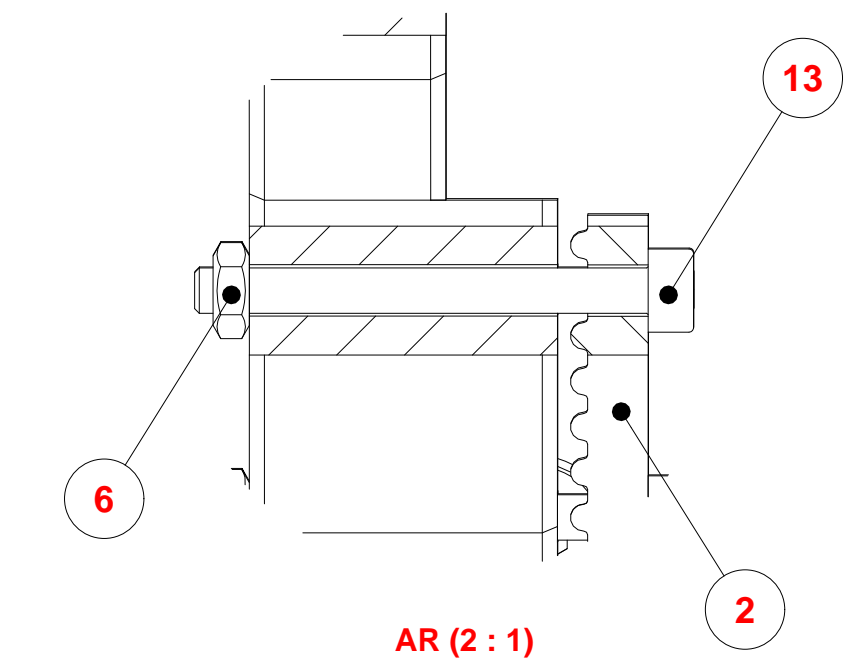
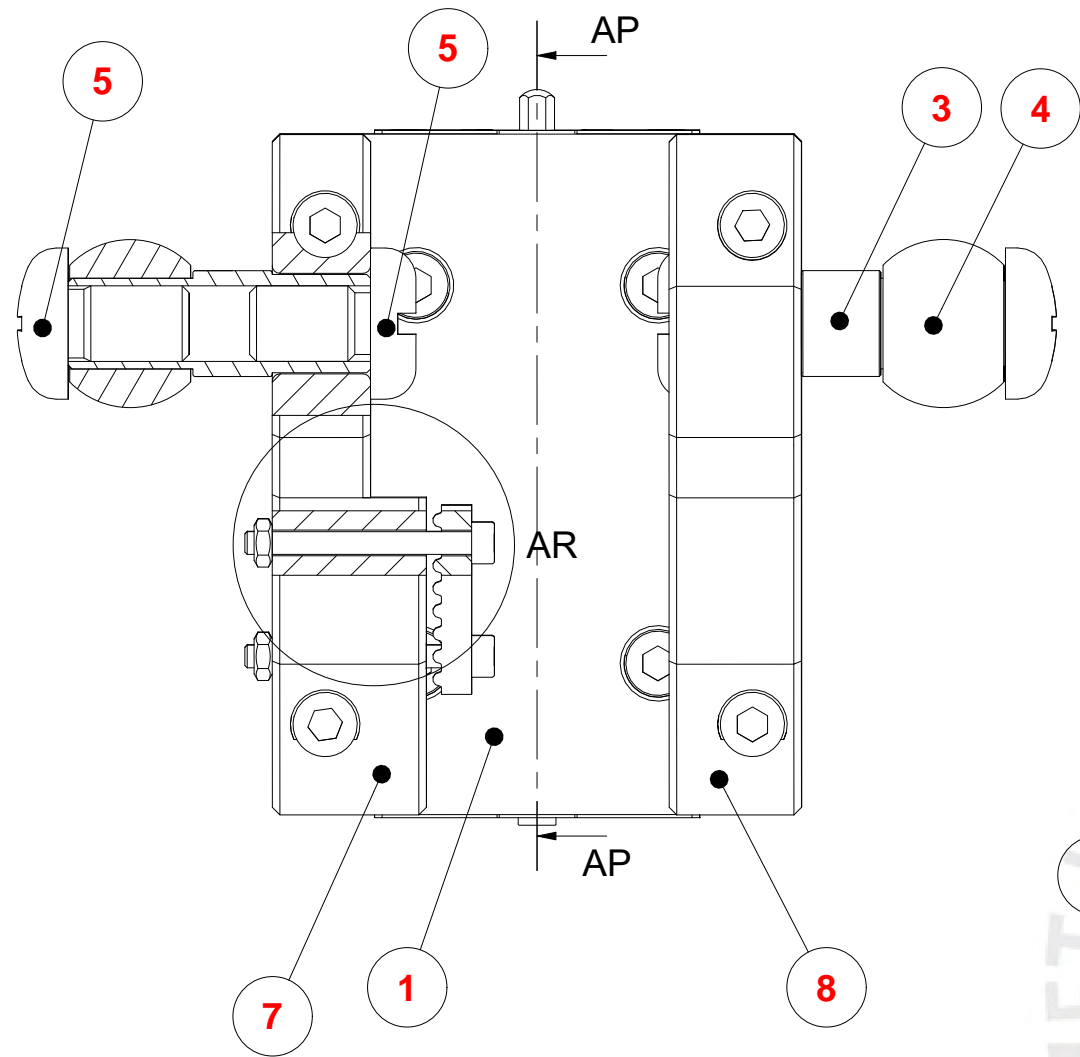
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FCI - Ingeniería Mecatrónica			
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA	
	Esquinas laterales	1:6	
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 31/05/2025	
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: E001-B	



8	38	Tnut M5	DIN 557	
7	8	Tnut M8	DIN 557	
6	12	M8 x 25	ISO 4762	
5	38	M5 x 20	ISO 4762	
4	1	Acople Central	Acople de HDPE	Ver plano E003-A
3	3	V-Slot 2040	Longitud 975	
2	3	Acople Lateral Central	Acople de HDPE	Ver plano E002-A
1	3	T-Slot 4040	Longitud 1670	
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

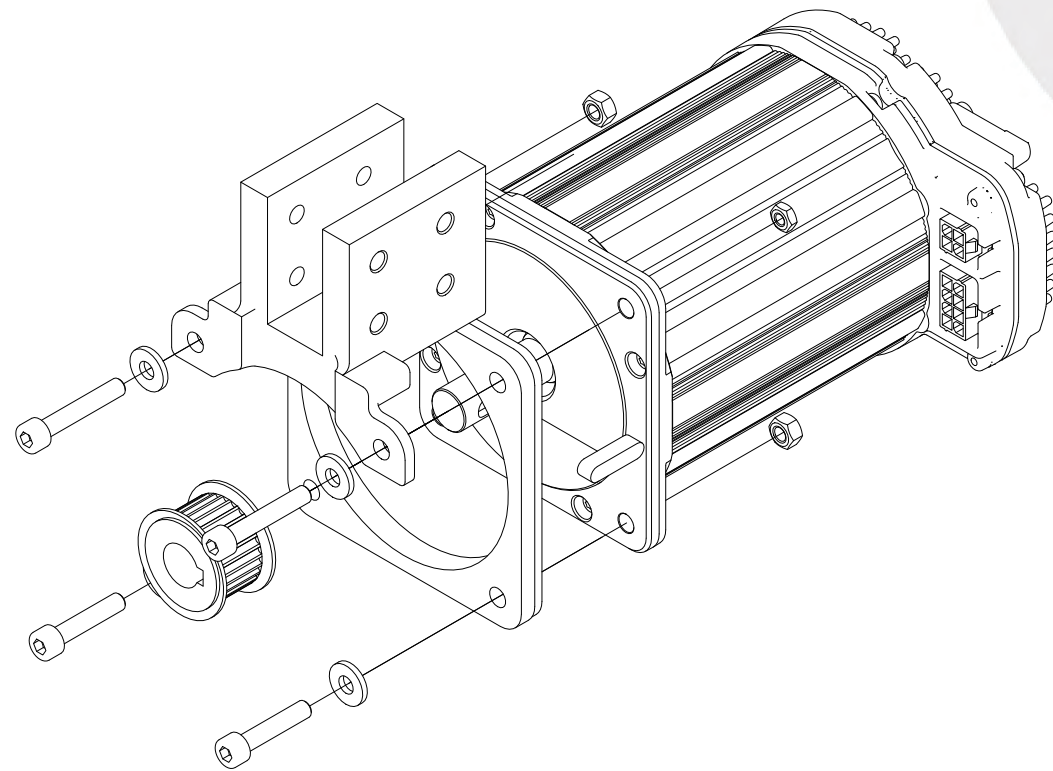
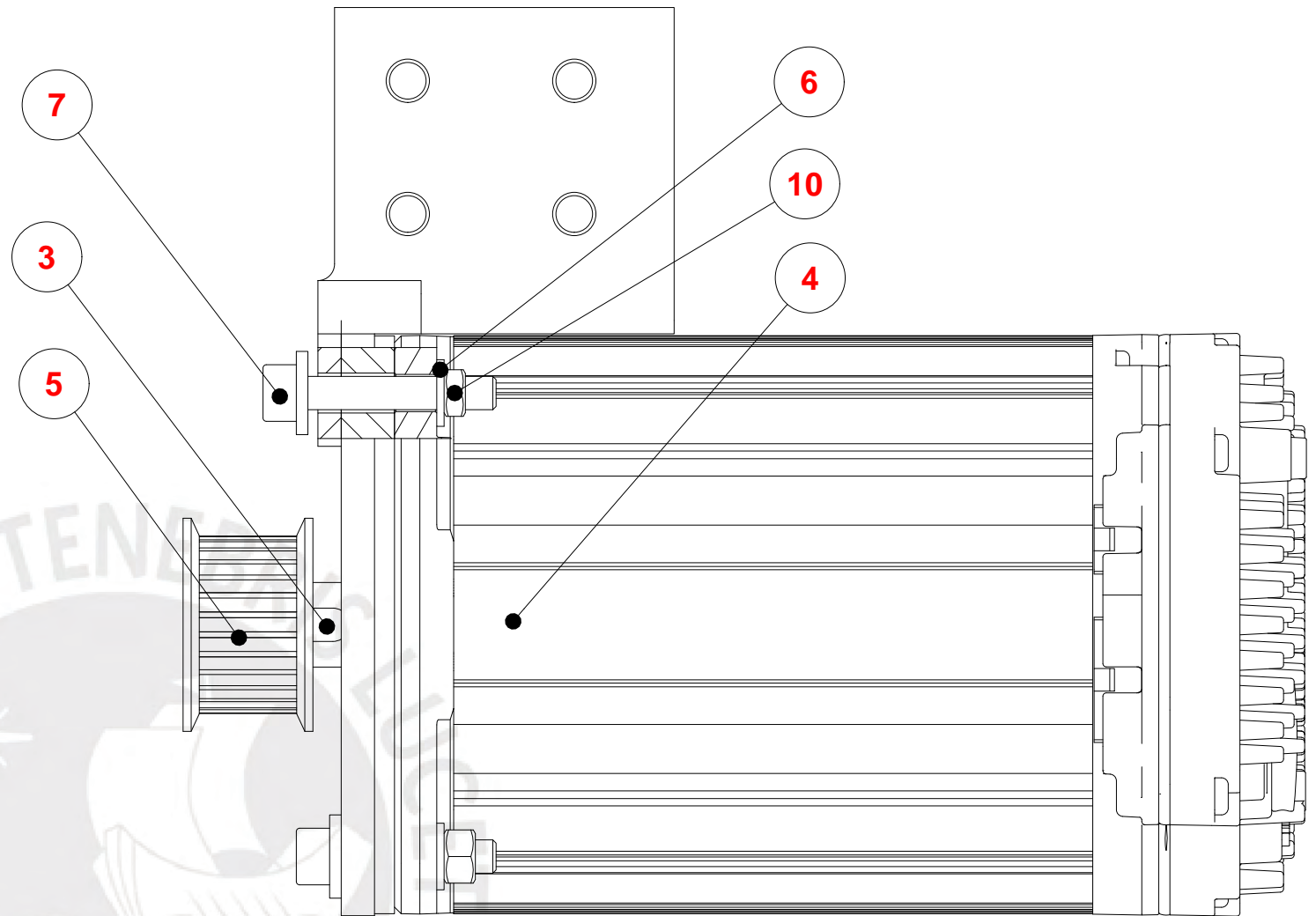
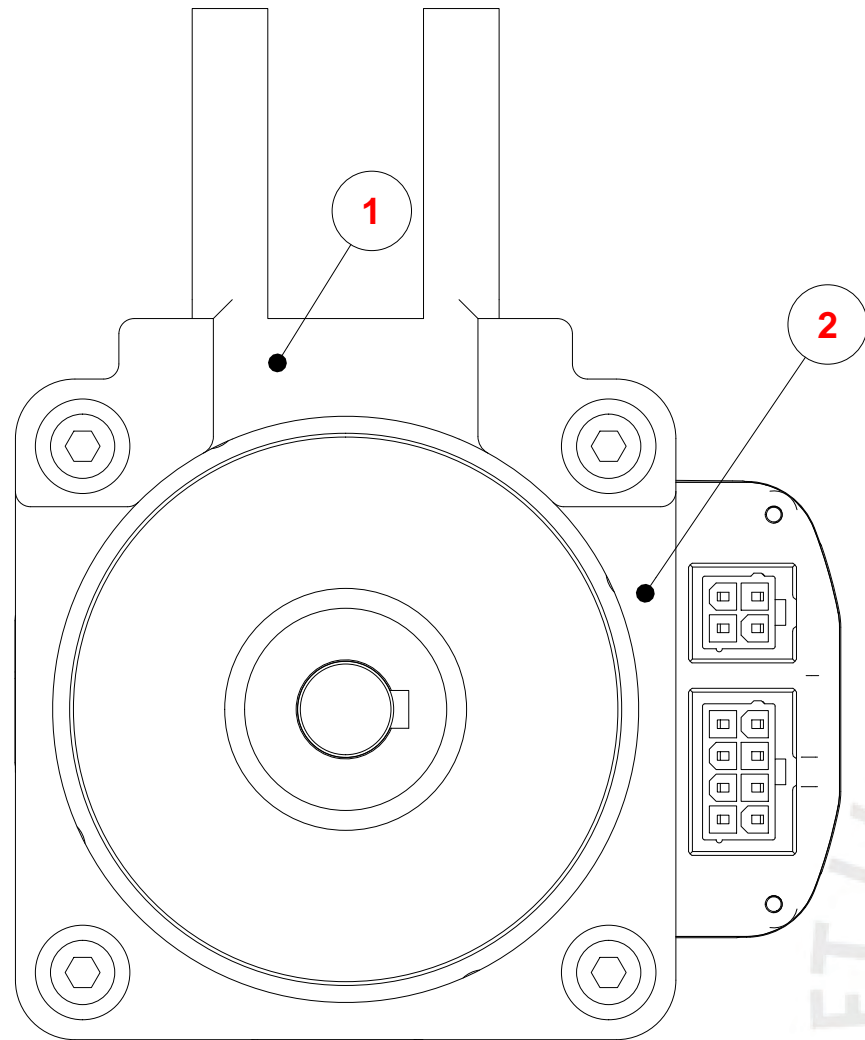
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA 1:6
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 31/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: E002-B



13	4	Tornillo M3 x 30	ISO 4762	
12	4	Tornillo M5 x 10	ISO 4762	
11	1	Guía lineal Hiwin	CGH20HA	
10	4	Tuerca M5	ISO 4032	
9	4	Tornillo 5 x 40	ISO 4762	
6	4	Tuerca M3	ISO 4032	
5	4	Perno M10 x 16	AS 1427	
4	2	Acople esférico	Modelo M12	
3	2	PHS Coupling	PHS12	
2	1	Clamping Plate Toothed	Modelo 30mm x 25xx	
8	1	Acople auxiliar de guía lineal izquierdo	Acople de HDPE	Ver plano L003-A
7	1	Acople auxiliar de guía lineal derecho	Acople de HDPE	Ver plano L002-A
1	1	Acople guía lineal	Acople de HDPE	Ver plano L001-A
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

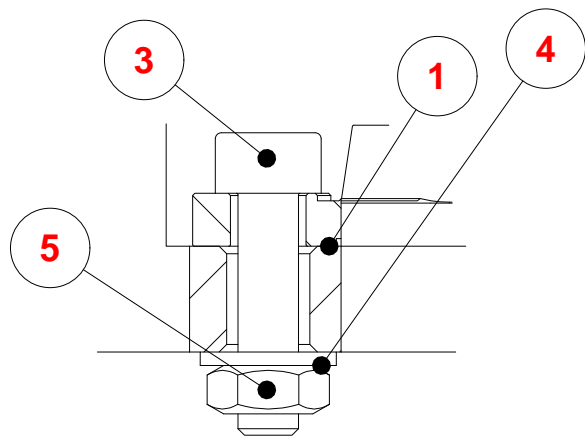
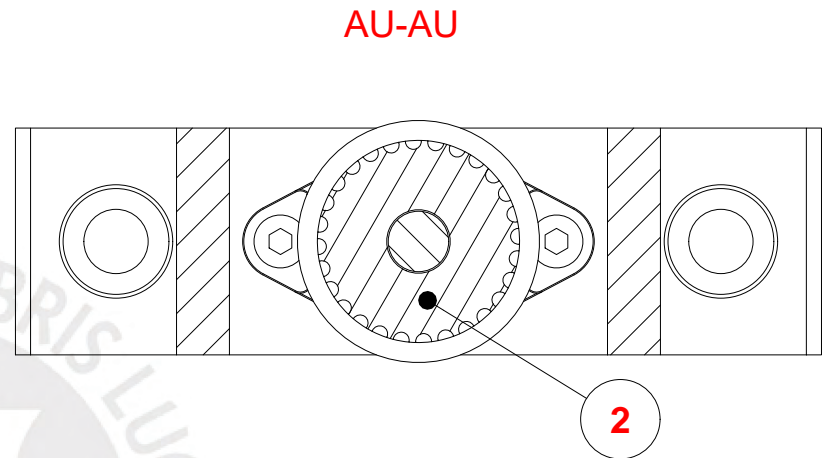
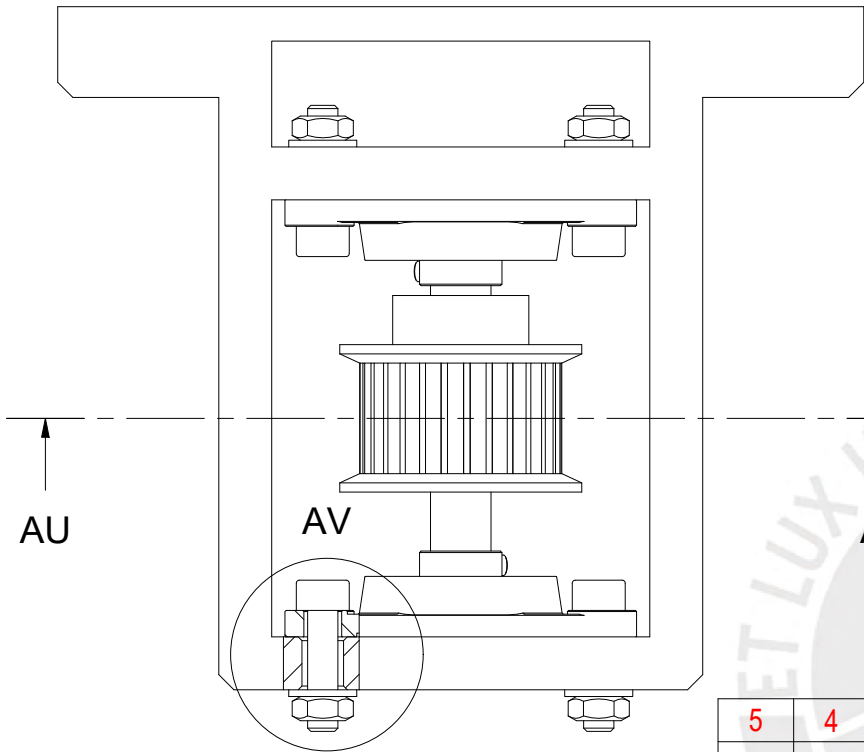
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Bloque lineal	1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 31/05/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: L001-B



10	1	Tuerca M4	ISO 4032	
9	3	Tuerca M5	ISO 4032	
8	2	Tornillo M5 x 25	ISO 4762	
7	2	Tornillo M5 x 30	ISO 4762	
6	4	Washer	AS 1971	
5	1	Polea	P28-3m-15F	
4	1	Motor Clearpath	CPM-SDSK-3441S-RLN	
3	1	Chaveta de transmisión de Potencia	DIN 6885	A5 x 5 x 20
2	1	Acople de motor	Acople de HDPE	Ver plano L006-A
1	1	Acople de motor a estructura	Acople de HDPE	Ver plano L005-A
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Motores y acoples	1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 03/06/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: L002-B

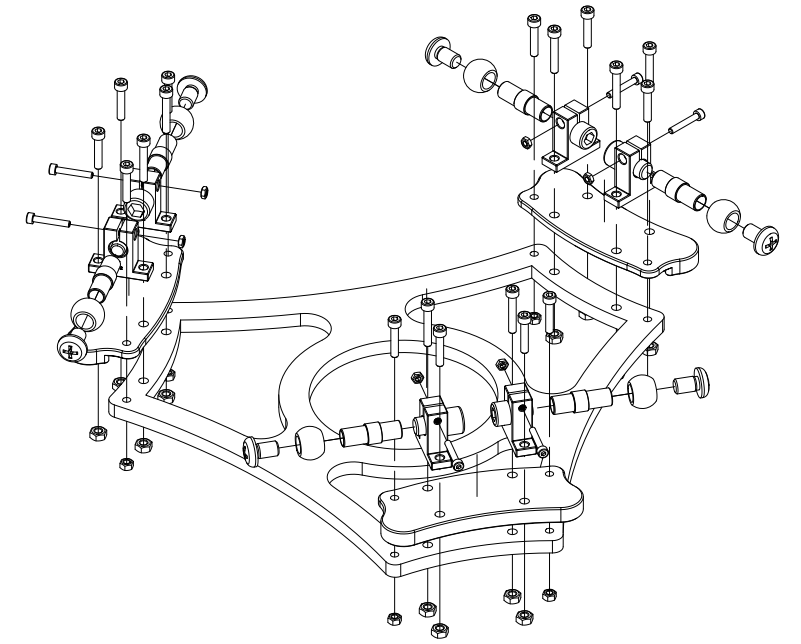
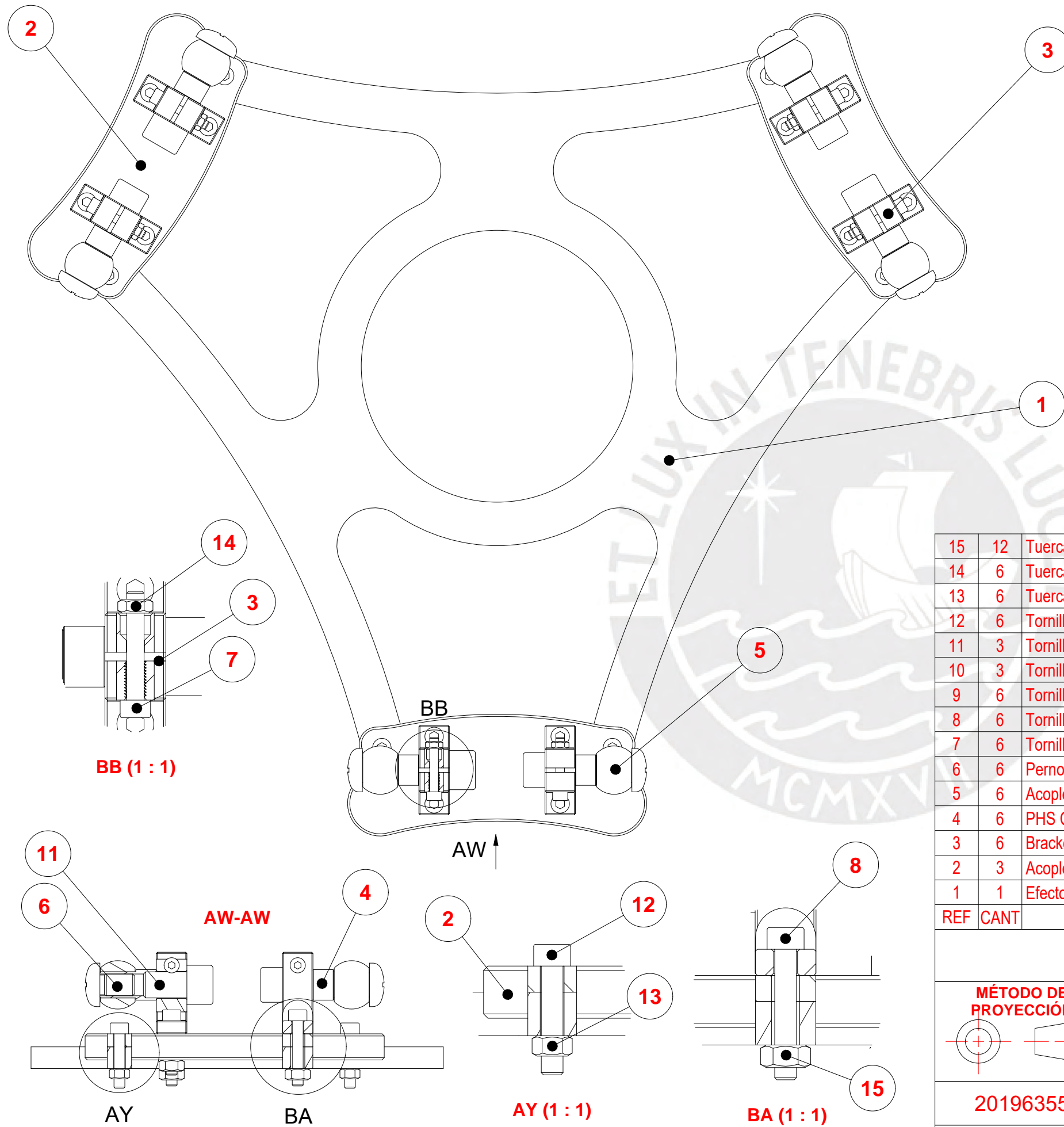


AV (2 : 1)

REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES
5	4	Tuerca M4	ISO 4032	
4	4	Washer	AS 1971 - 4	
3	4	Tornillo M4 x 16	ISO 4762	
2	1	Polea	P28-3m-15F	
1	1	Soporte de Polea	Soporte de HDPE	Ver plano L004-A

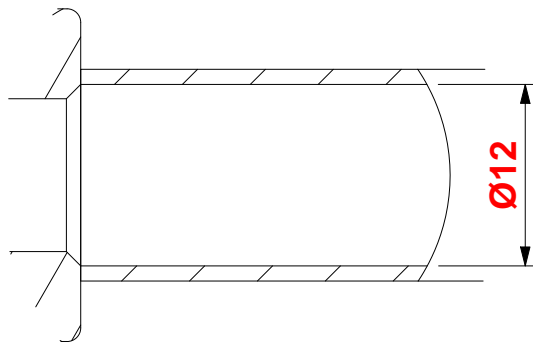
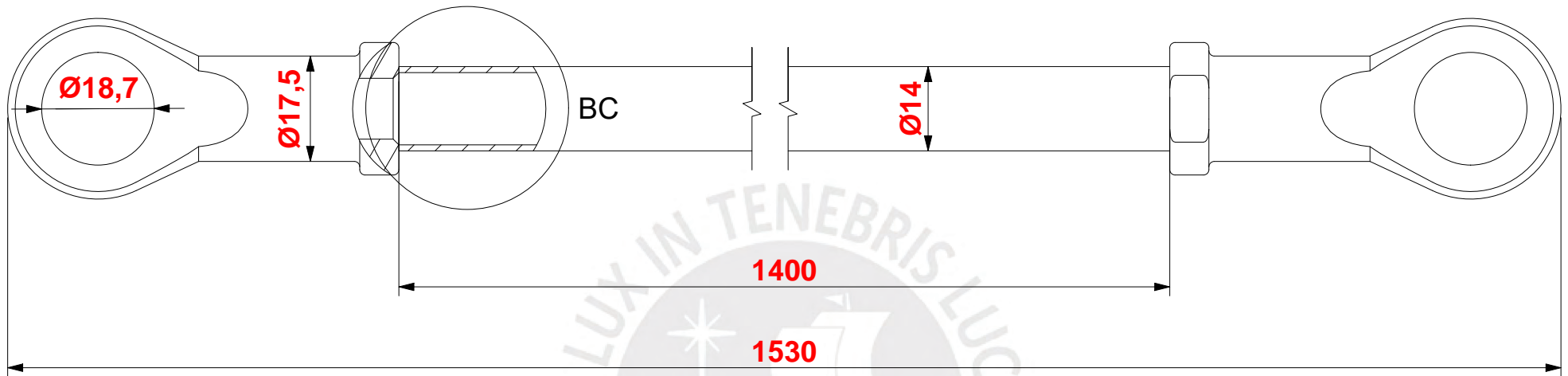
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA 1:1	
	20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 03/06/2025
REVISADO POR:		Diego Arce	LÁMINA: L002-B



15	12	Tuerca M6	ISO 4032	
14	6	Tuerca M4	ISO 4032	
13	6	Tuerca M5	ISO 4032	
12	6	Tornillo M5 x 25	ISO 4762	
11	3	Tornillo M12 x 20	ISO 4762	
10	3	Tornillo M10 x 16	ISO 4762	
9	6	Tornillo M5 x 25	ISO 4762	
8	6	Tornillo M5 x 30	ISO 4762	
7	6	Tornillo M4 x 25	ISO 4762	
6	6	Perno M10 x 16	AS 1427	
5	6	Acople esférico	Modelo M12	
4	6	PHS Coupling	PHS12	
3	6	Bracket	SK12	
2	3	Acople de efector	Acople de aluminio	Ver plano M002-A
1	1	Efector	Efector de fibra de carbono reforzada	Ver plano M001-A
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FCI - Ingeniería Mecatrónica			
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore -	HORARIO 10M1	ESCALA 1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz		FECHA: 04/06/2025
REVISADO POR:	Diego Arce		LÁMINA: M001-B

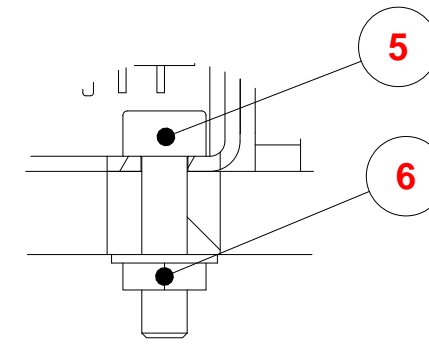
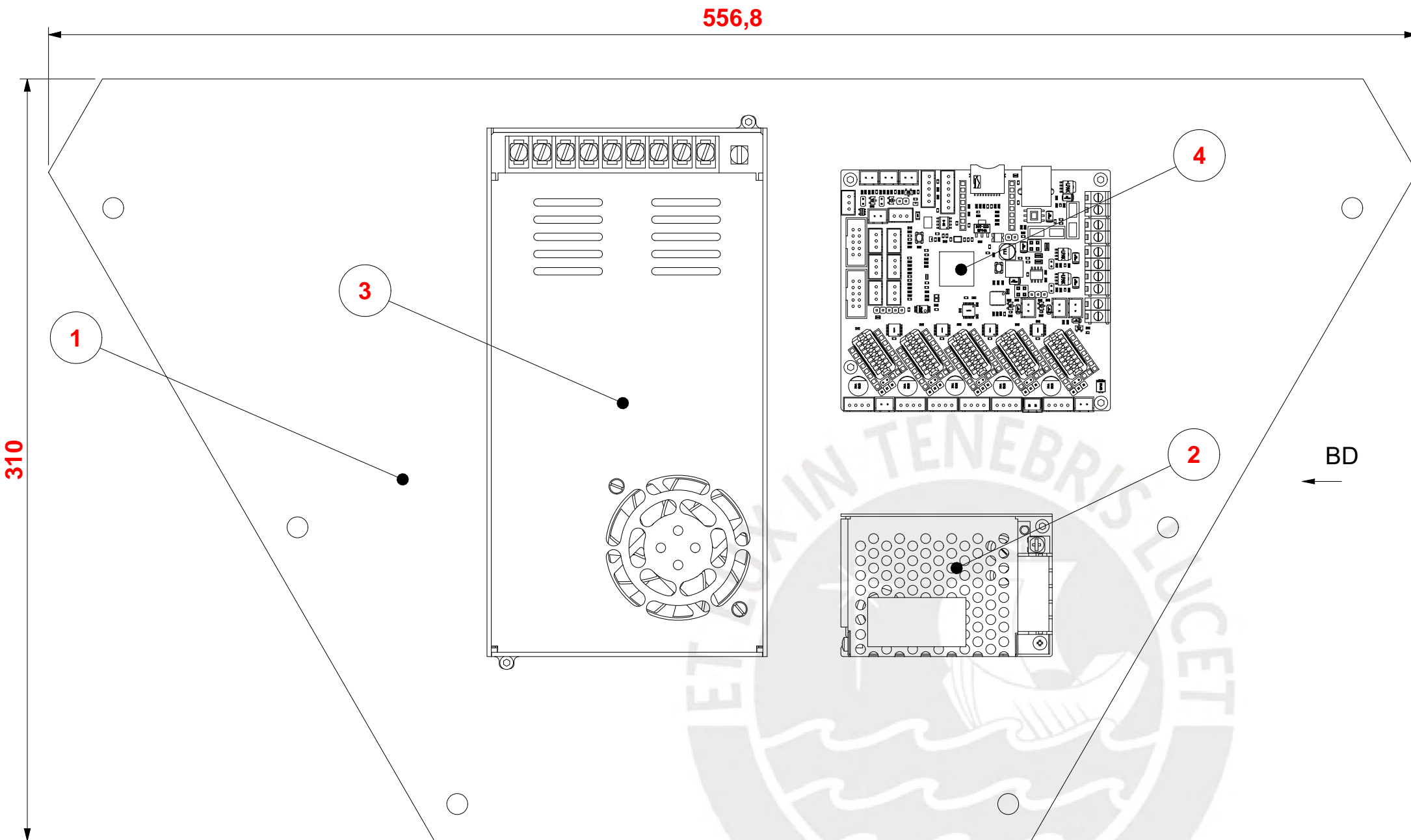


BC (2 : 1)

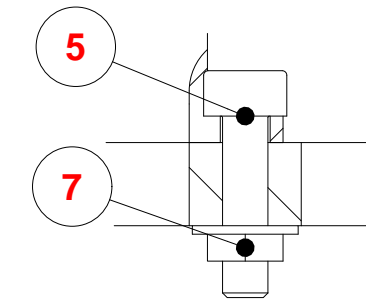
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES
3	1	VarillaVarilla roscada	12mm x 1.0m	Comercial
2	1	Tubo fibra de carbón	12mm x 1.0m	Comercial
1	2	Extremo de varilla	PHS12	Comercial

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

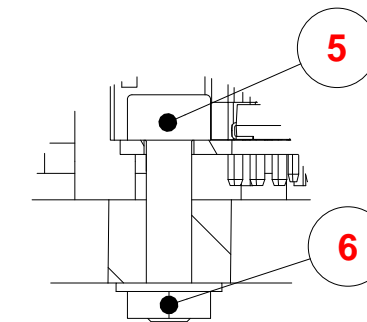
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Brazos delta	1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 04/06/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: M002-B



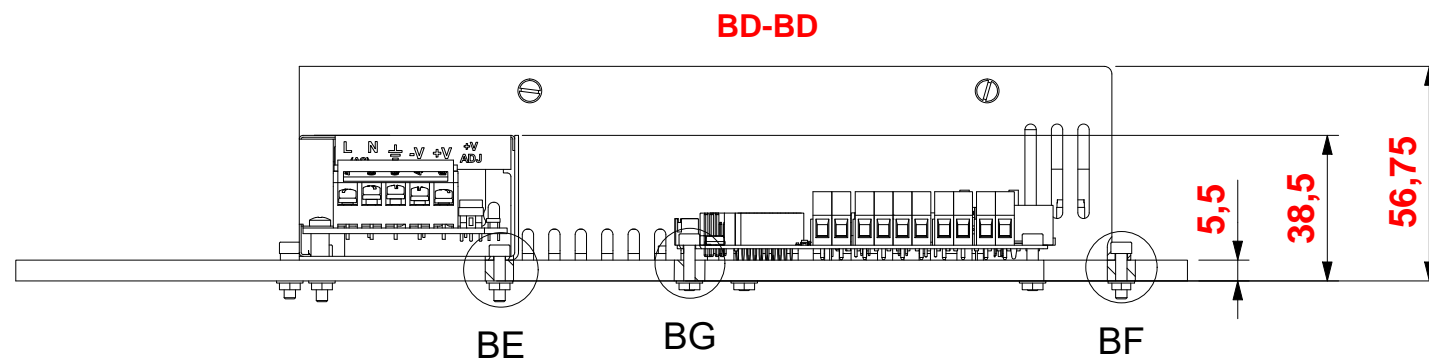
BE (2 : 1)



BF (2 : 1)



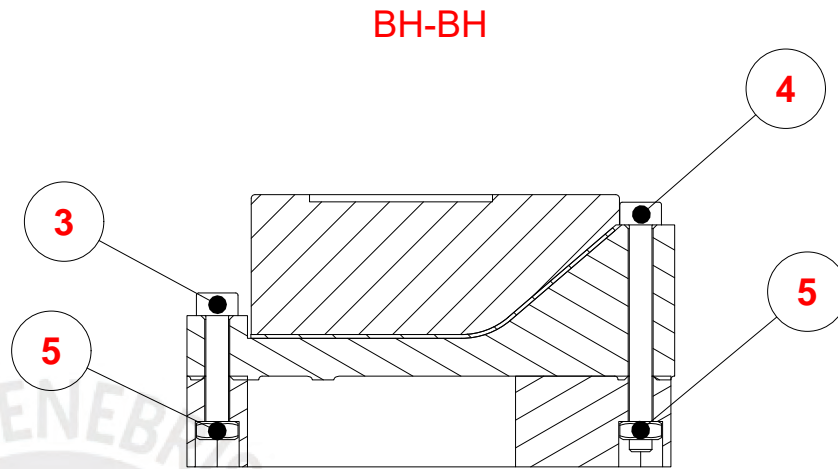
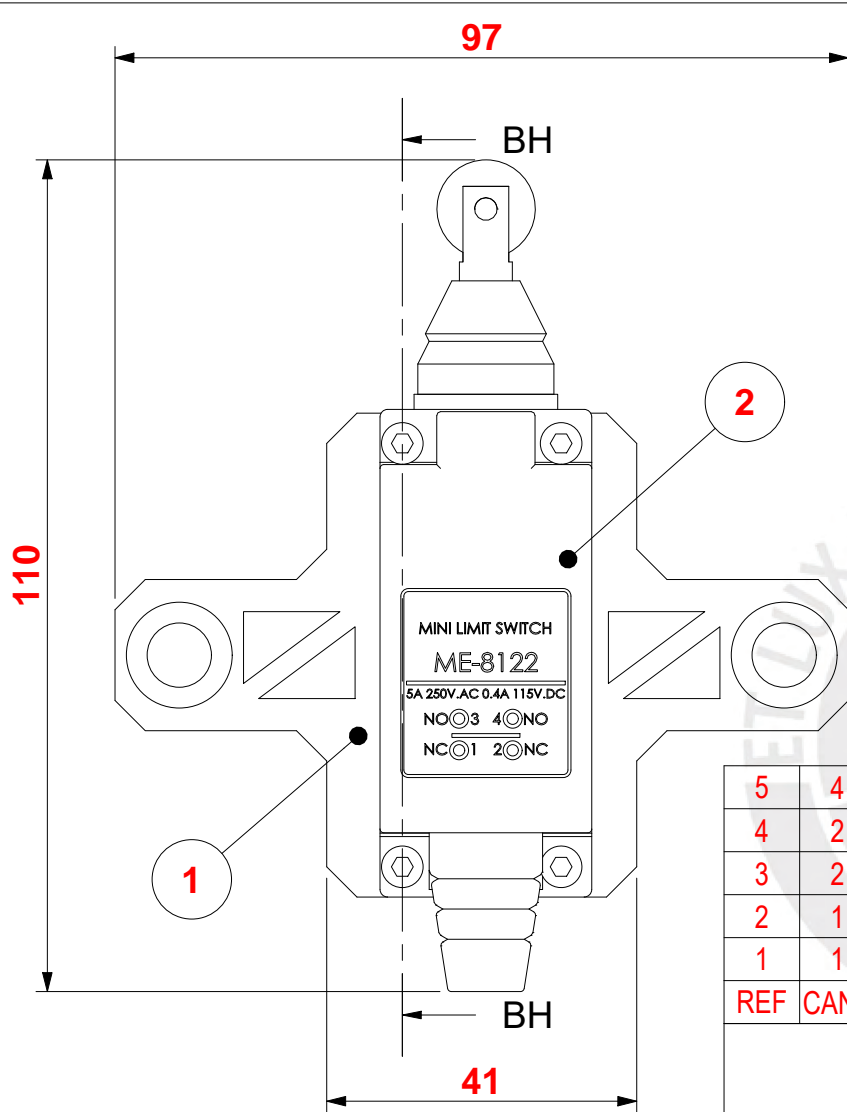
BG (2 : 1)



REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES
7	1	Perno M2.5	AS 1474	
6	7	Perno M3	AS 1474	
5	8	Tornillo M3 x 12	ISO 4762	
4	1	Controlador de Impresora 3D	BTT SKR 3 Ez	
3	1	Power conmutada de control	5V - 2A	PEPTEL
2	1	Power conmutada de potencia	12V - 5A	PEPTEL
1	1	Soporte para electrónica	Soporte de acrílico	Ver plano C002-A

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

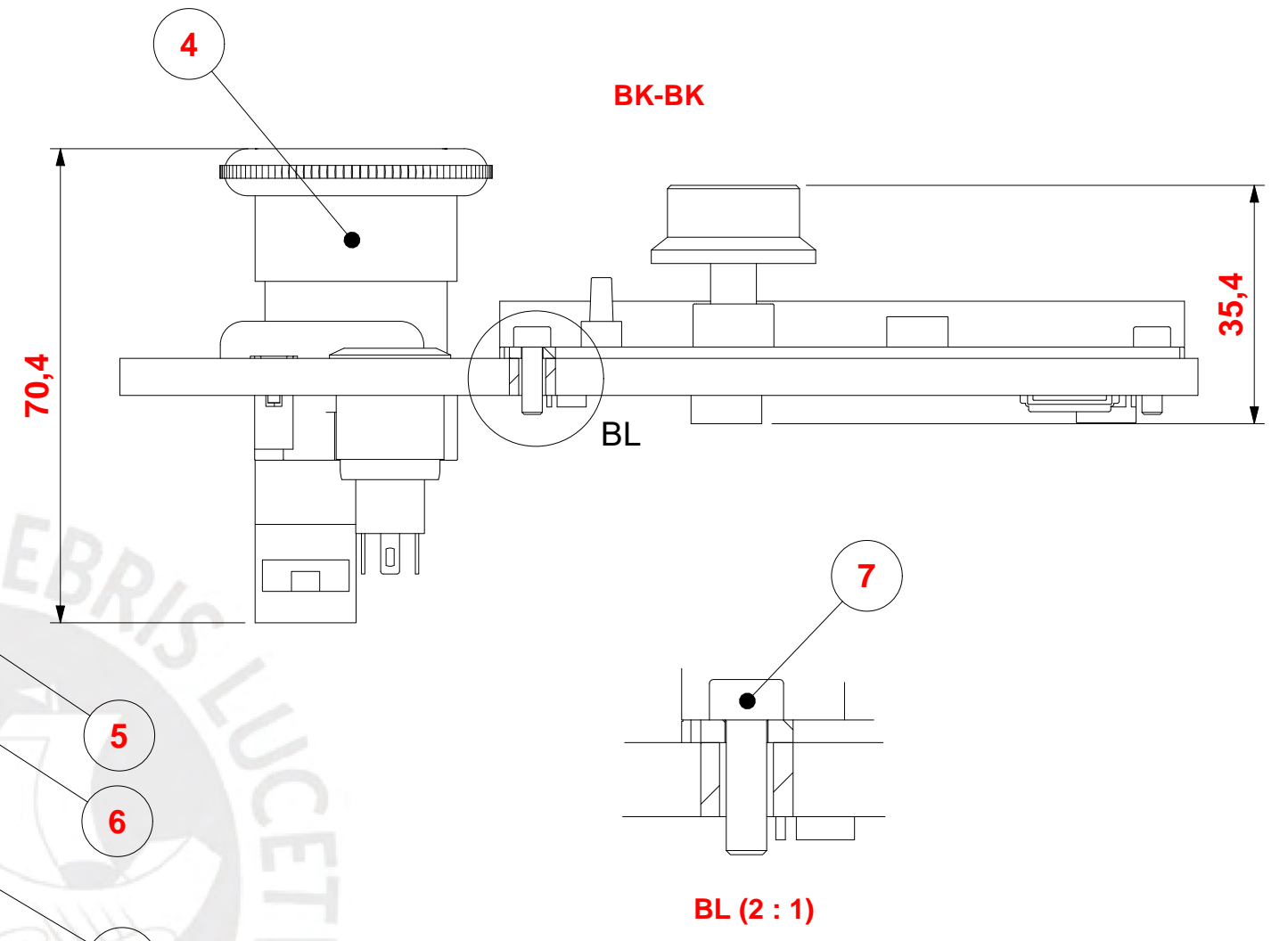
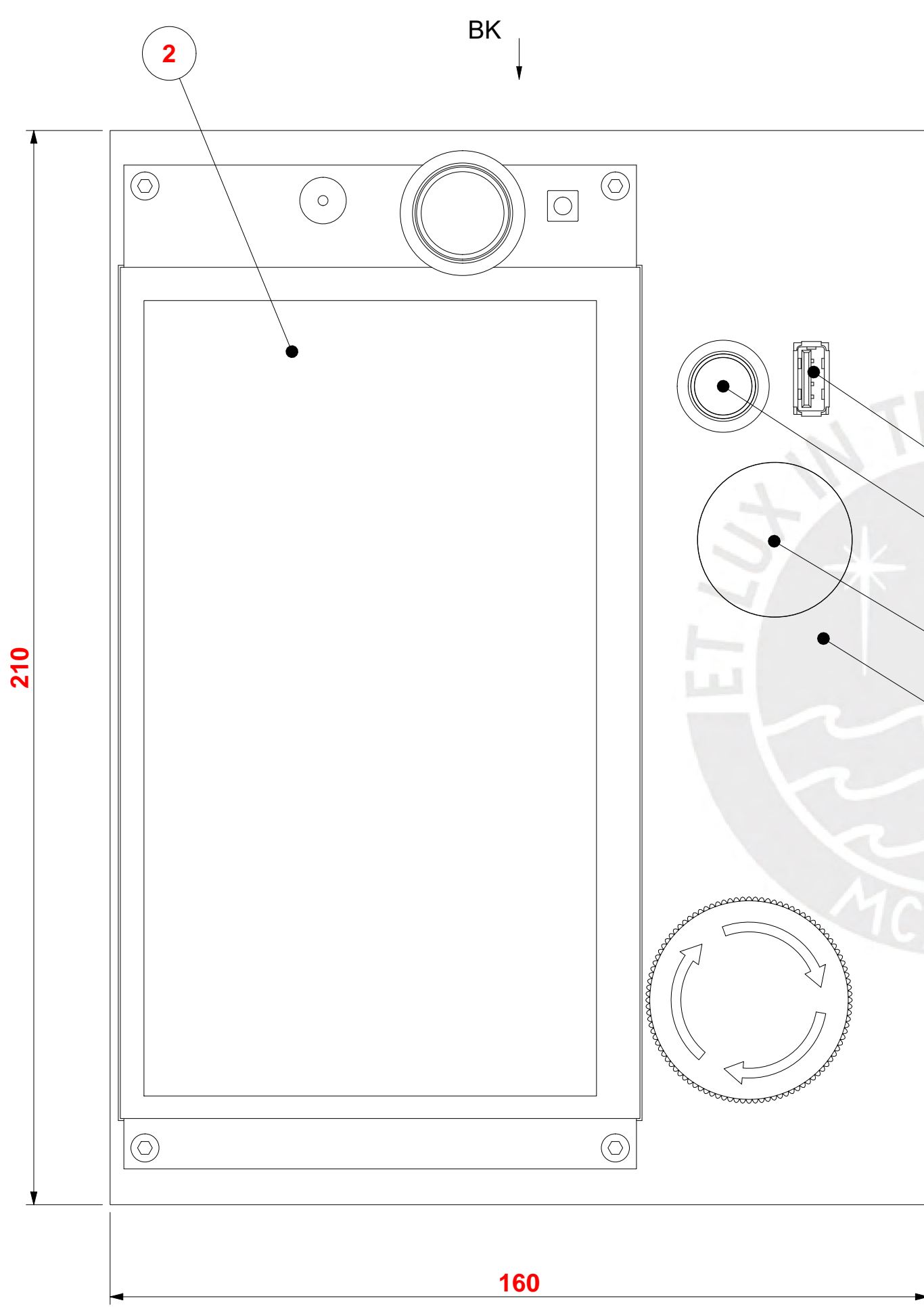
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Soporte y electrónica	1:2
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 04/06/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: C001-B



5	4	Tuerca M3	ISO 4032	
4	2	Tornillo M3 x 30	ISO 4762	
3	2	Tornillo M3 x 16	ISO 4762	
2	1	Limit Switch	Modelo ME 8111	Comercial
1	1	Soporte Limit Switch	Soporte de HDPE	Ver plano C001-A
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

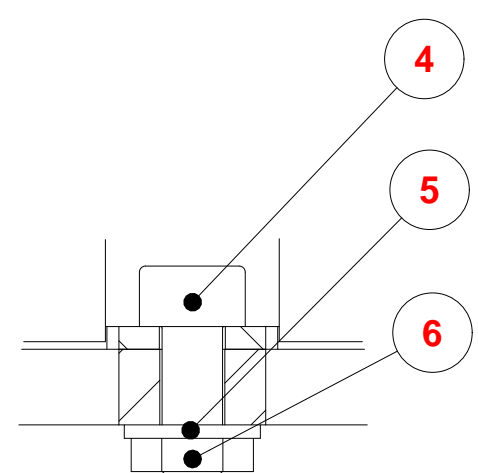
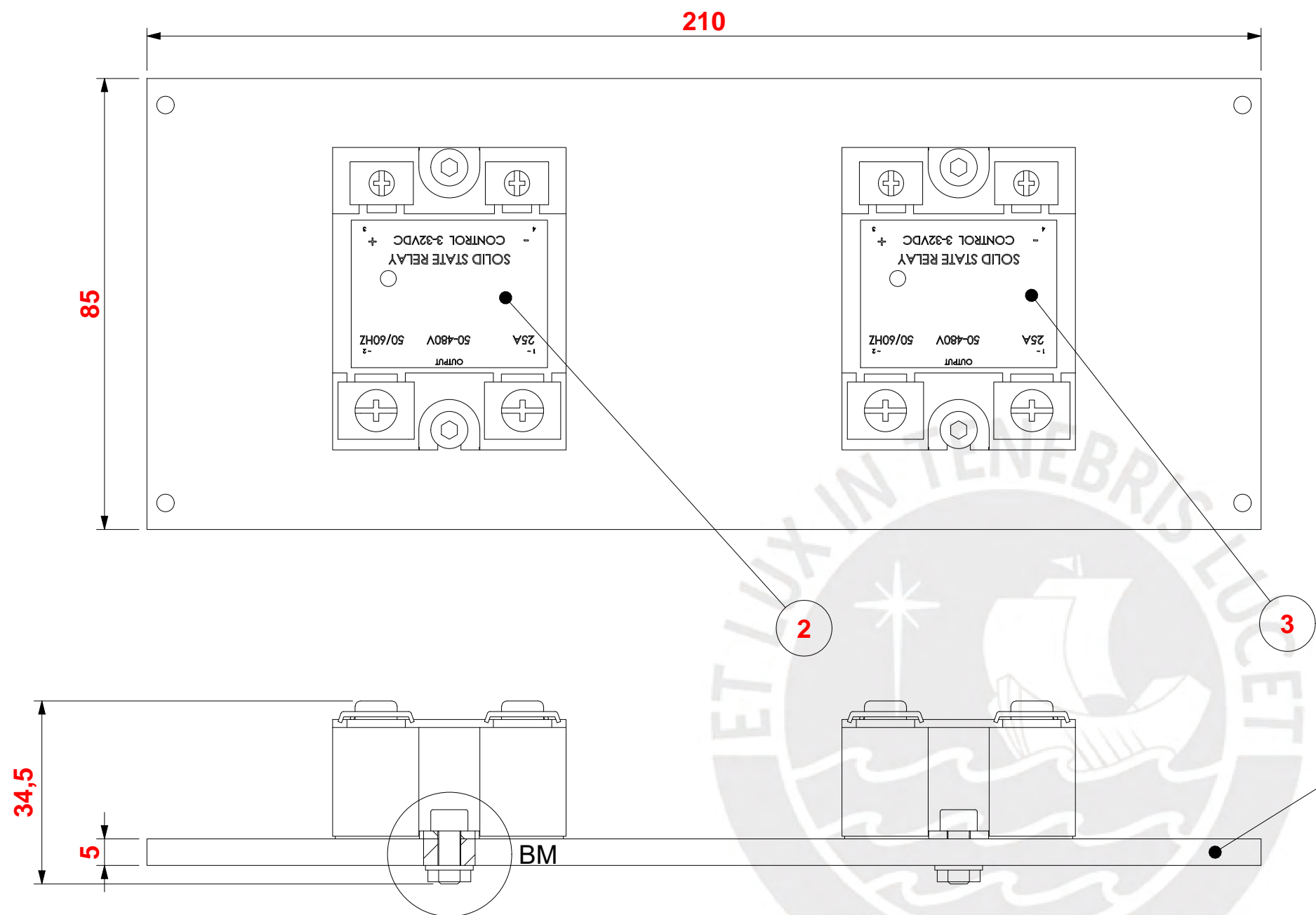
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Limit switch y acoples	1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 04/06/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: C002-B



7	4	Tornillo M3 x 10	ISO 4762	
6	1	Botón de encendido	PVA3F2B0SS304	
5	1	USB Universal		
4	1	Botón de emergencia	XB2-01ZS	
3	8	Led strip circular	WS2812B	
2	1	Display LED	TFT70 3.0	Comercial
1	1	Soporte de interfaz	Soporte de acrílico	Ver plano I003-A
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Componentes de interfaz	1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 04/06/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: I001-B

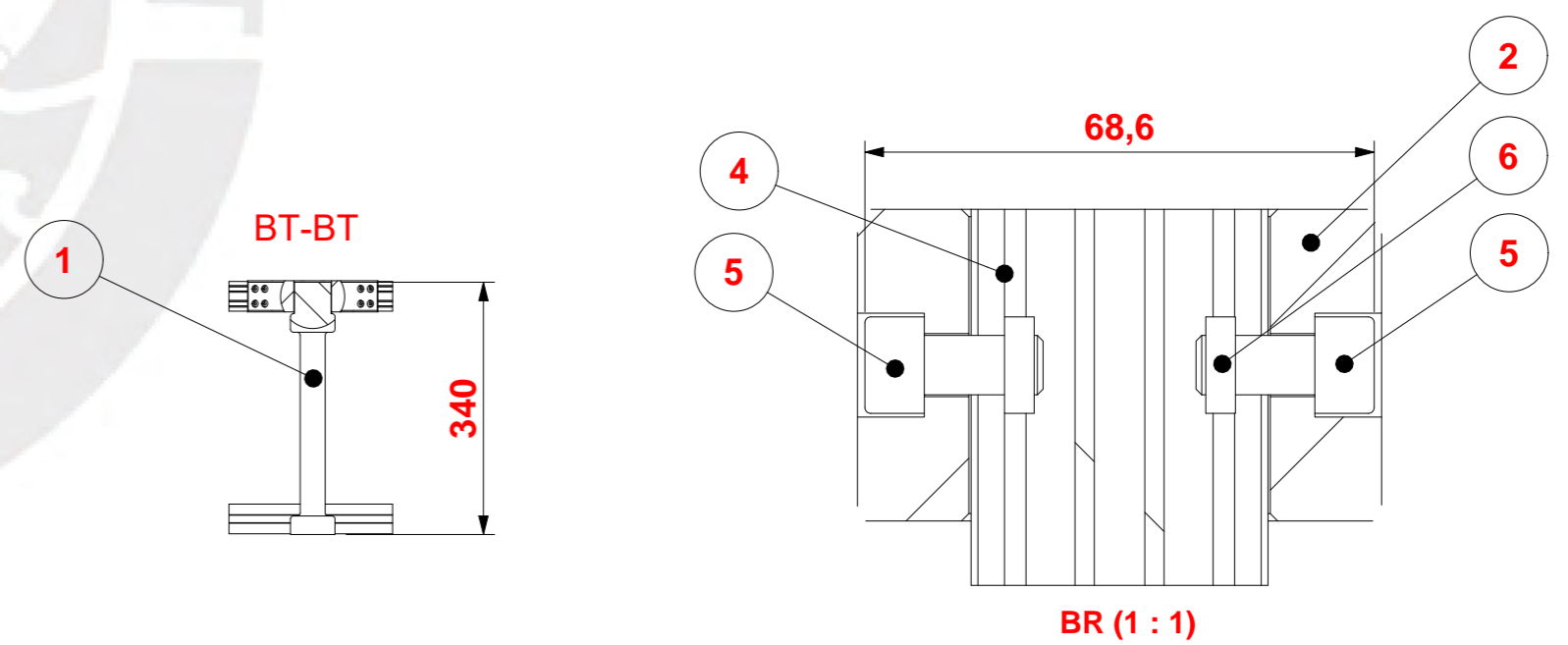
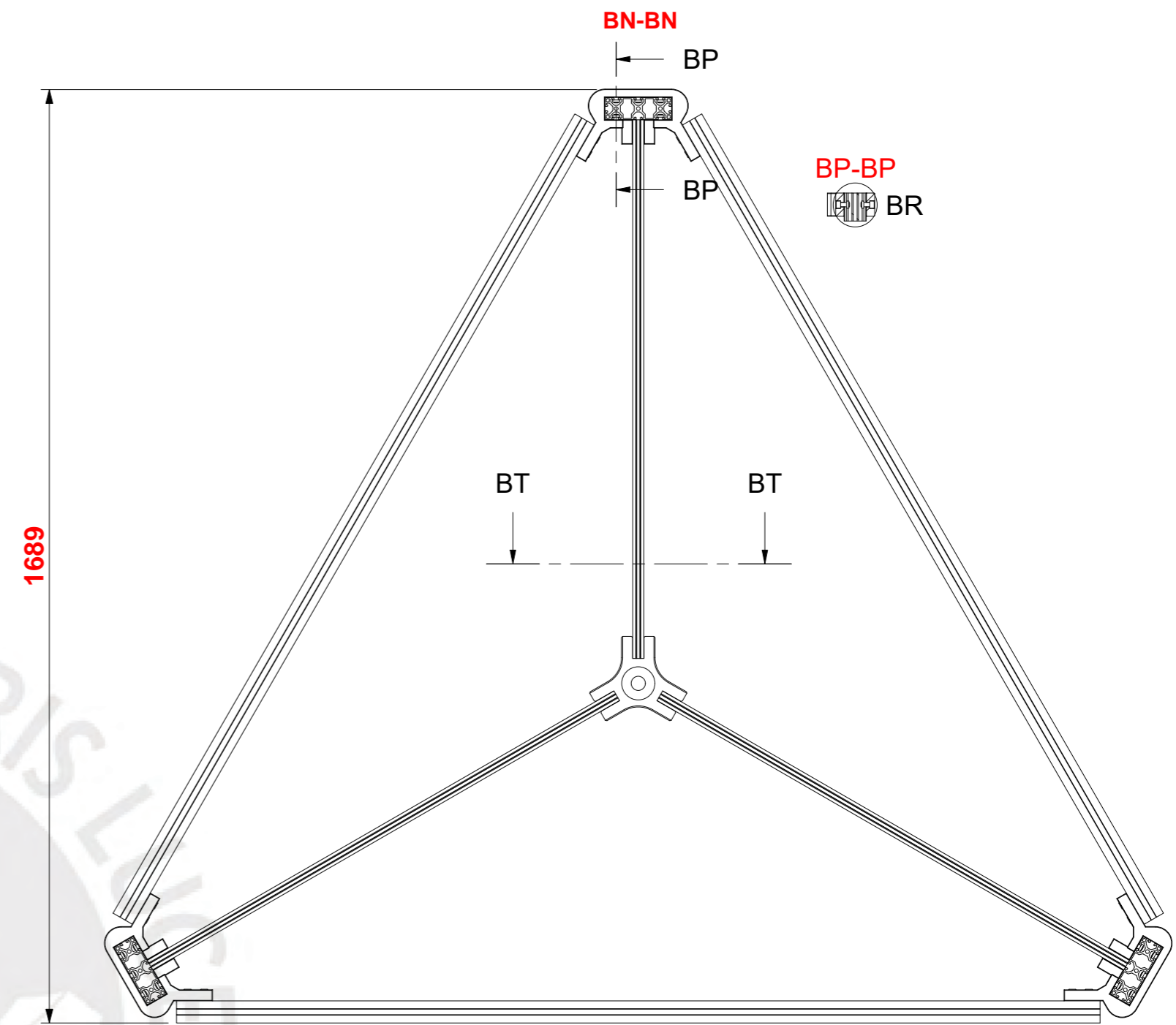
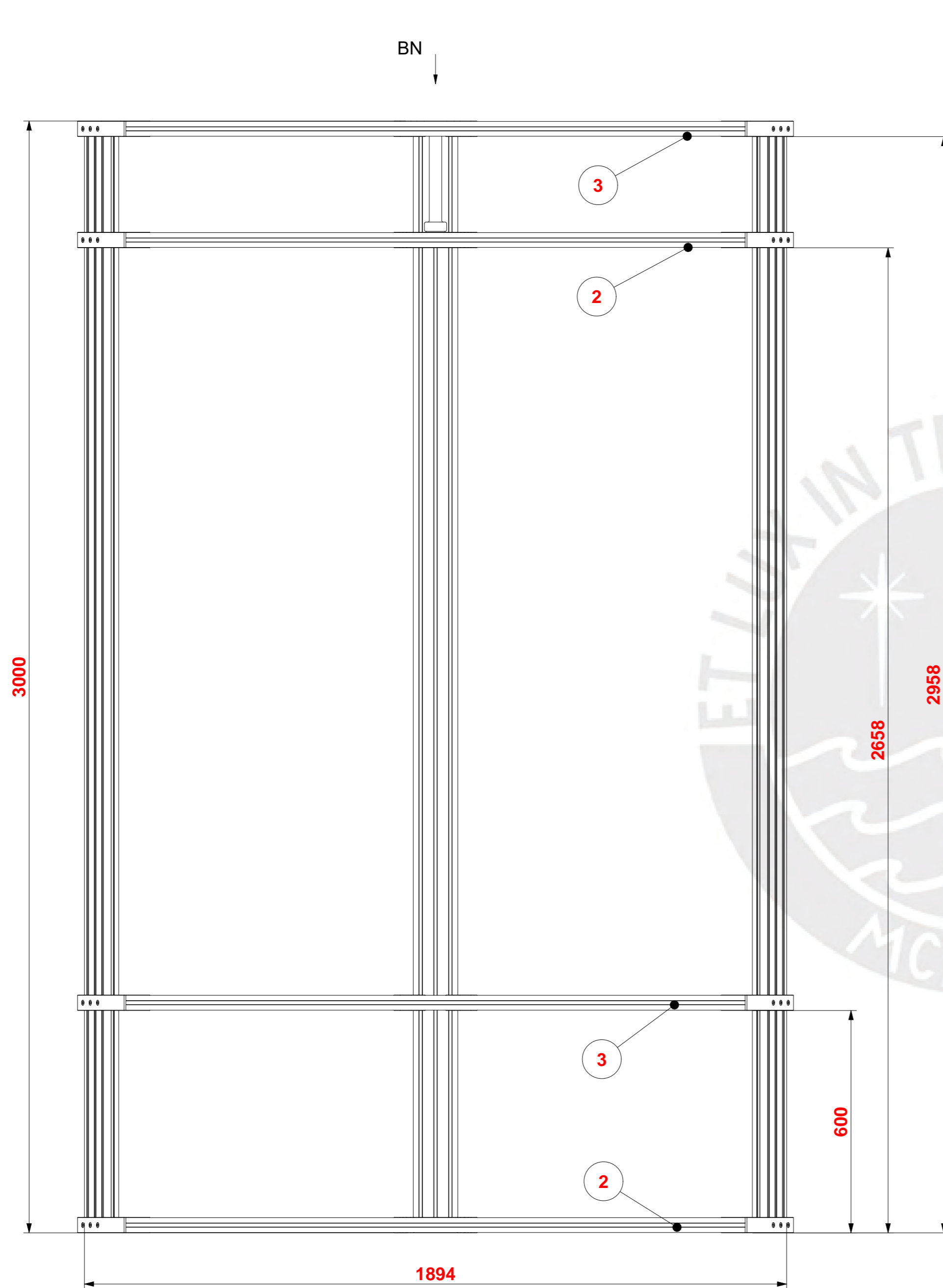


BM (2 : 1)

6	4	Tuerca M4	AS 1474	
5	4	Washer	AS 1971 - 4	
4	4	Tornillo	ISO 4762	
3	1	Relé de encendido	SSR - 05DD	
2	2	Relé de potencia	SSR - 10DD	
1	1	Soporte de relés	Soporte de acrílico	Ver plano I004-A
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

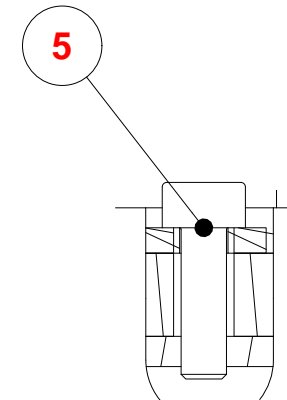
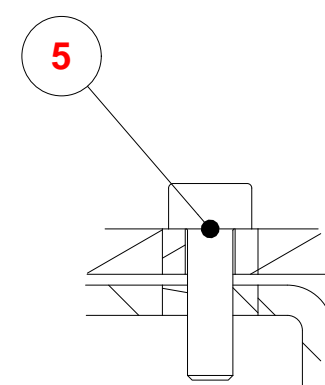
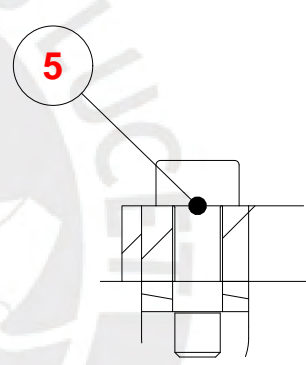
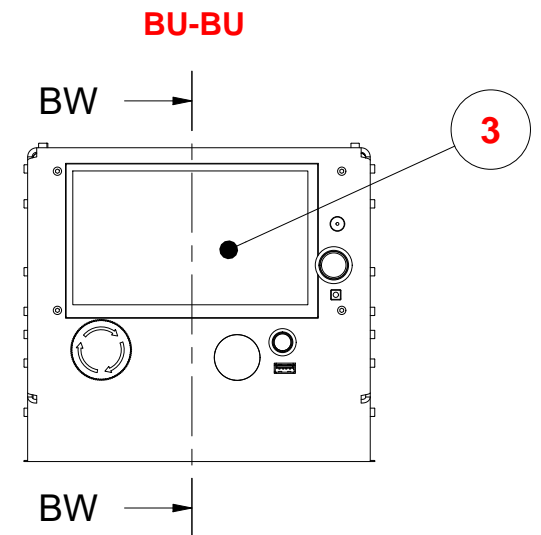
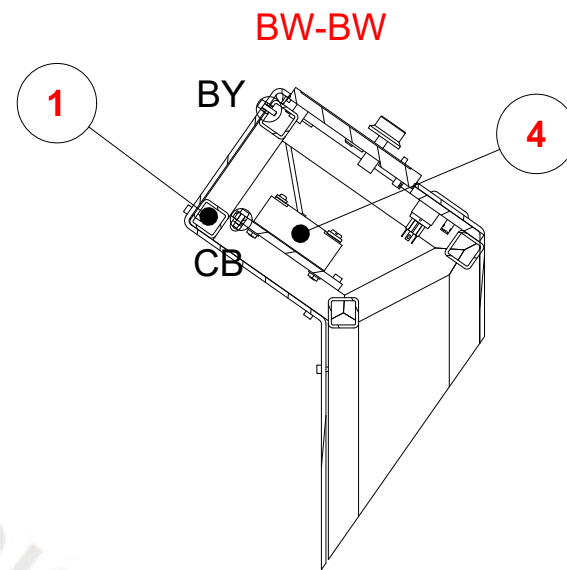
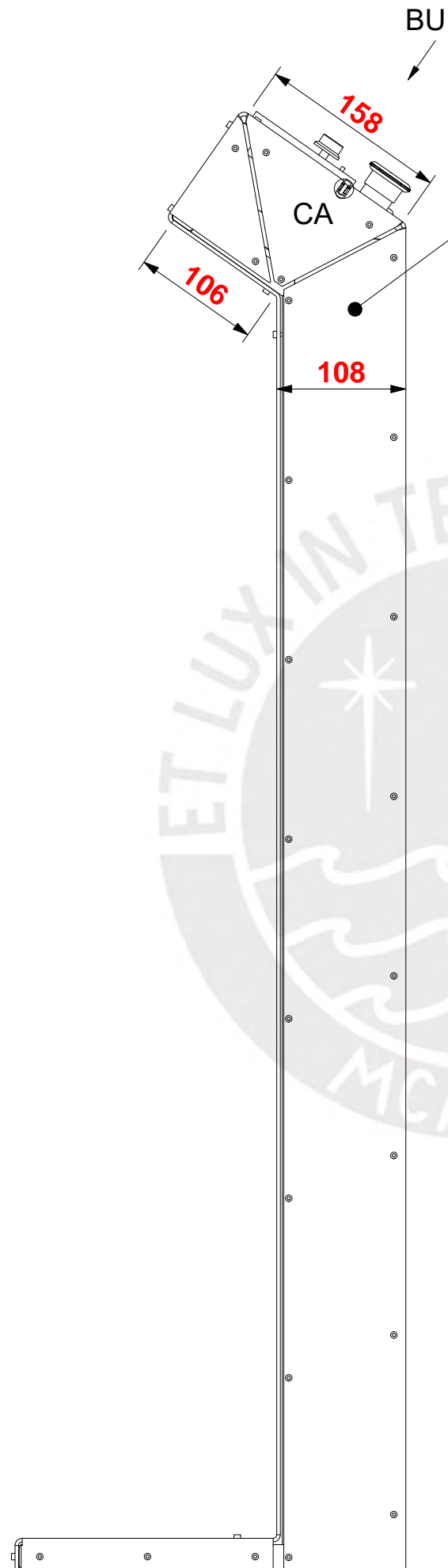
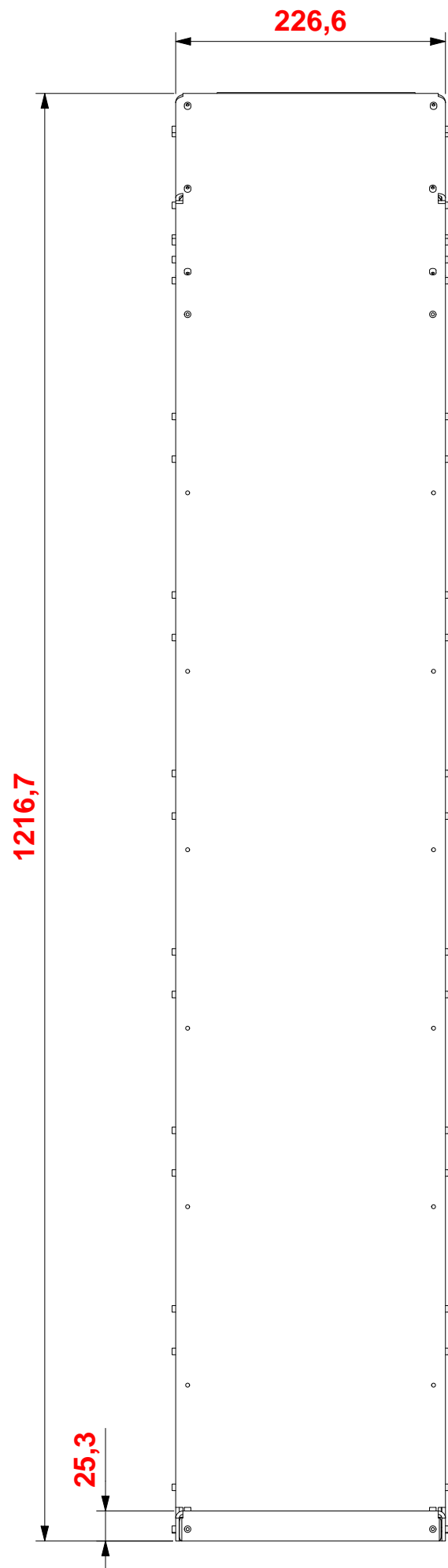
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Relés y soporte	1:1
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 04/06/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: I002-B



6	60	Tnut M8	DIN 562	
5	60	Tornillo M8 x 16	ISO 4762	
4	9	T-Slot 40120	Longitud 1000	
3	1	Esquinas centrales	Sub-Ensamble	Ver plano E002-B
2	4	Esquinas laterales	Sub-Ensamble	Ver plano E001-B
1	1	Pedestal de soporte	Soporte de acero	Ver plano E004-A
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI
- Ingeniería Mecatrónica

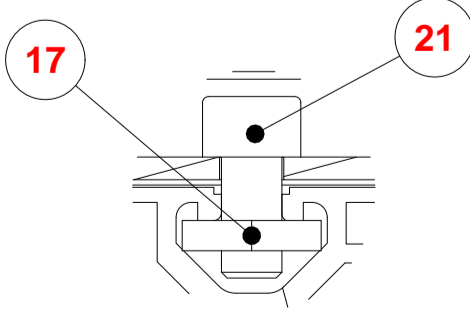
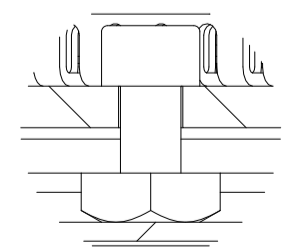
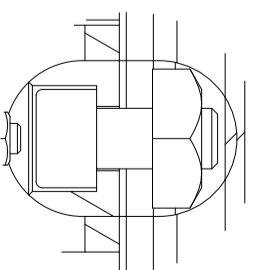
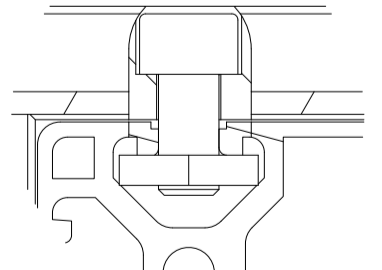
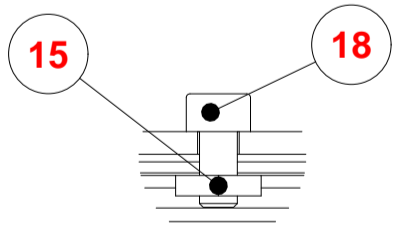
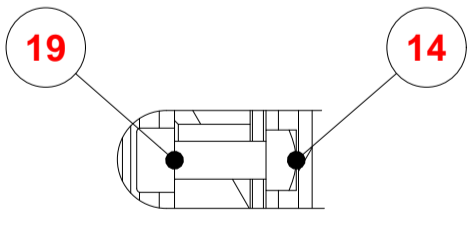
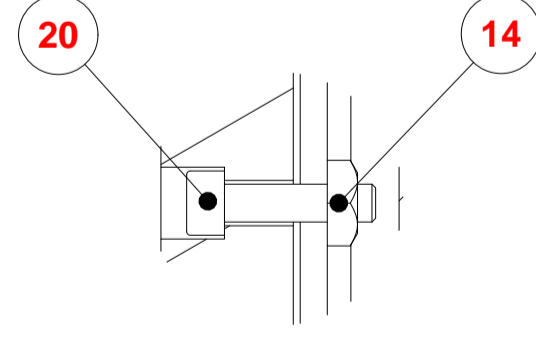
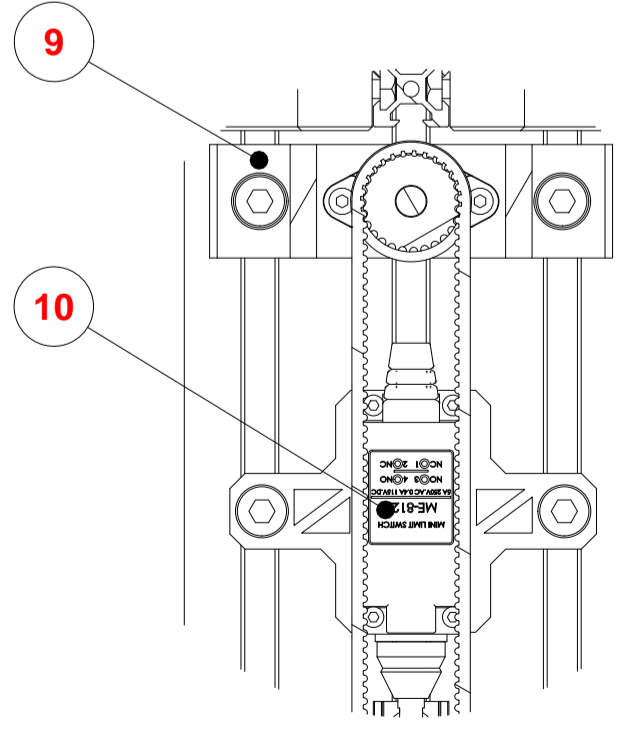
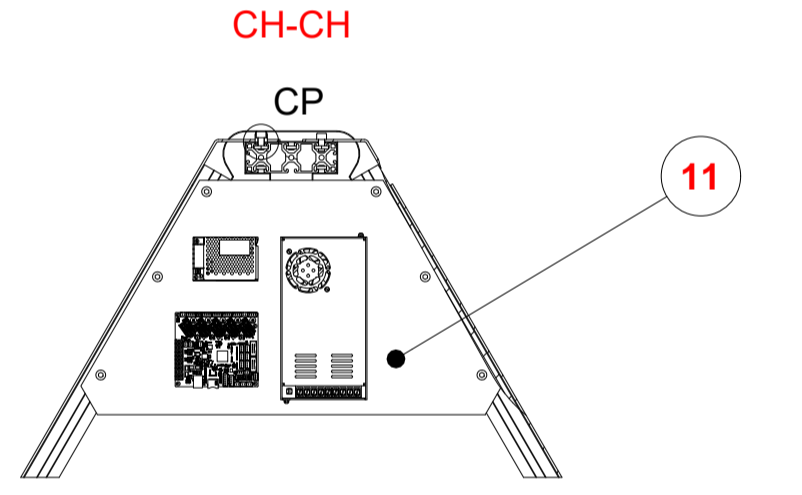
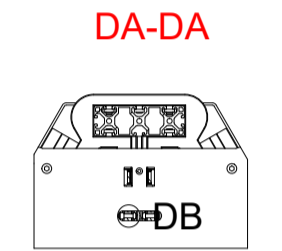
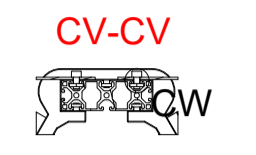
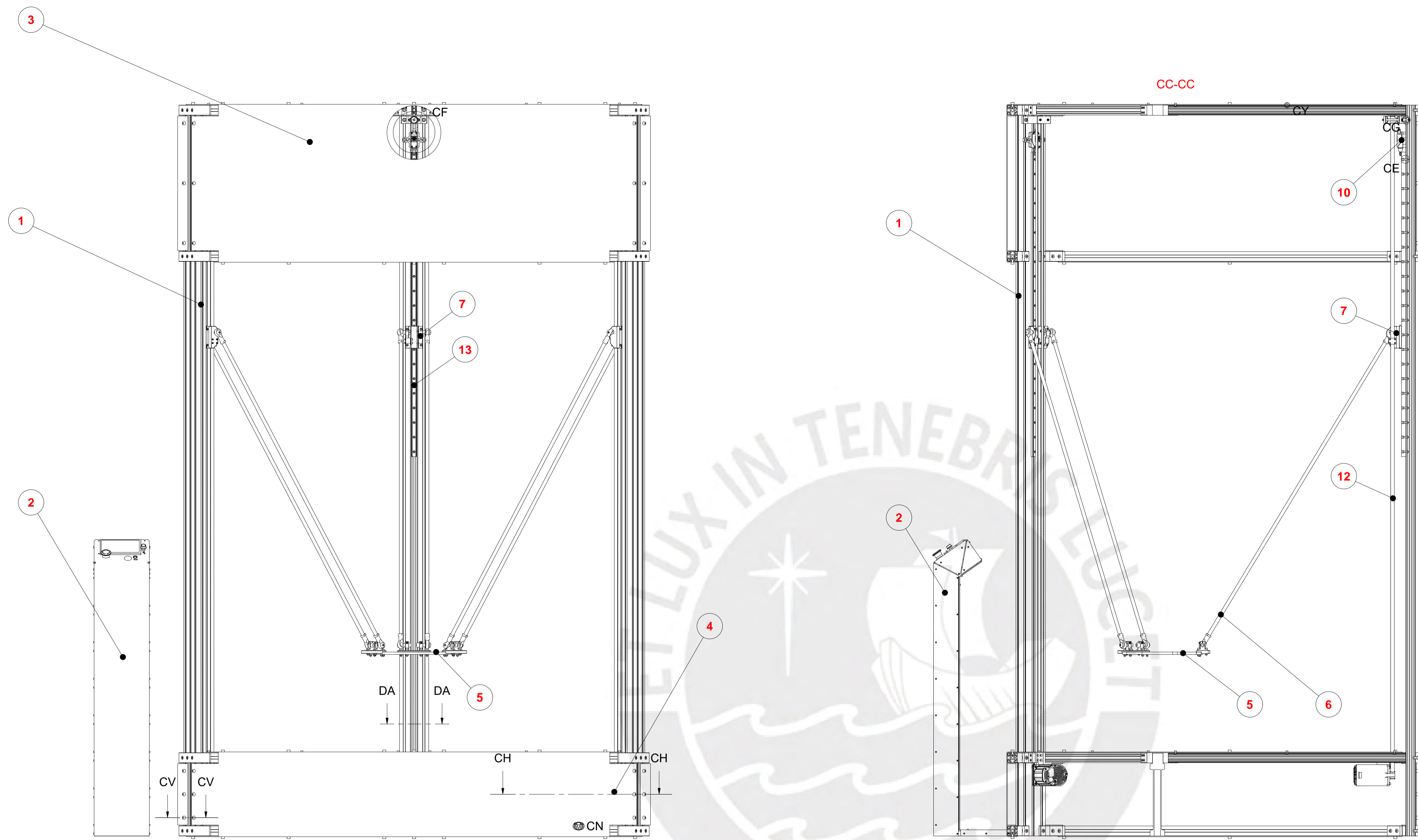
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Subsistema estructural	1:10
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 04/06/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: E001-C



5	64	Tornillo M3 x 10	ISO 4762	
4	1	Relés y soporte	Sub-Ensamble	Ver plano I002-B
3	1	Componentes de Interfaz	Sub-Ensamble	Ver plano I001-B
2	1	Cobertor de interfaz	Chapa 3mm	Ver plano I002-A
1	1	Estructura de interfaz	Arreglo de perfiles de aluminio	Ver plano I001-A
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Subsistema de interfaz	1:5
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 04/06/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LÁMINA: I001-C



21	87	Tomillo M8 x 16	ISO 4762	
20	63	Tomillo M5 x 20	ISO 4762	
19	24	Tomillo M5 x 16	ISO 4762	
18	27	Tomillo M5 x 10	ISO 4762	
17	72	Tnut M8	DIN 562	
16	18	Tnut M8	DIN 557	
15	18	Tnut M5	DIN 562	
14	87	Tnut M5	DIN 557	
13	3	Rieles tipo Hiwin	HG20 1550 mm	Comercial
12	3	Correa dentada HTD	3M-15mm x 1.0m	Comercial
11	1	Soporte y electrónica	Sub-Ensamble	Ver plano C001-B
10	3	Limit Switch y Soporte	ME 8112	Ver plano C002-B
9	3	Poleas y acoples	Sub-Ensamble	Ver plano L003-B
8	3	Motres y acoples	Sub-Ensamble	Ver plano L002-B
7	3	Bloque lineal	Sub-Ensamble	Ver plano L001-B
6	6	Brazos Delta	Sub-Ensamble	Ver plano M002-B
5	1	Efectos y acoples	Sub-Ensamble	Ver plano M001-B
4	1	Cobertor inferior	Chapa 3mm	Ver plano E006-A
3	1	Cobertor superior	Chapa 3mm	Ver plano E005-A
2	1	Subsistema de Interfaz	Ensamble	Ver plano I001-C
1	1	Subsistema Estructural	Ensamble	Ver plano E001-C
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

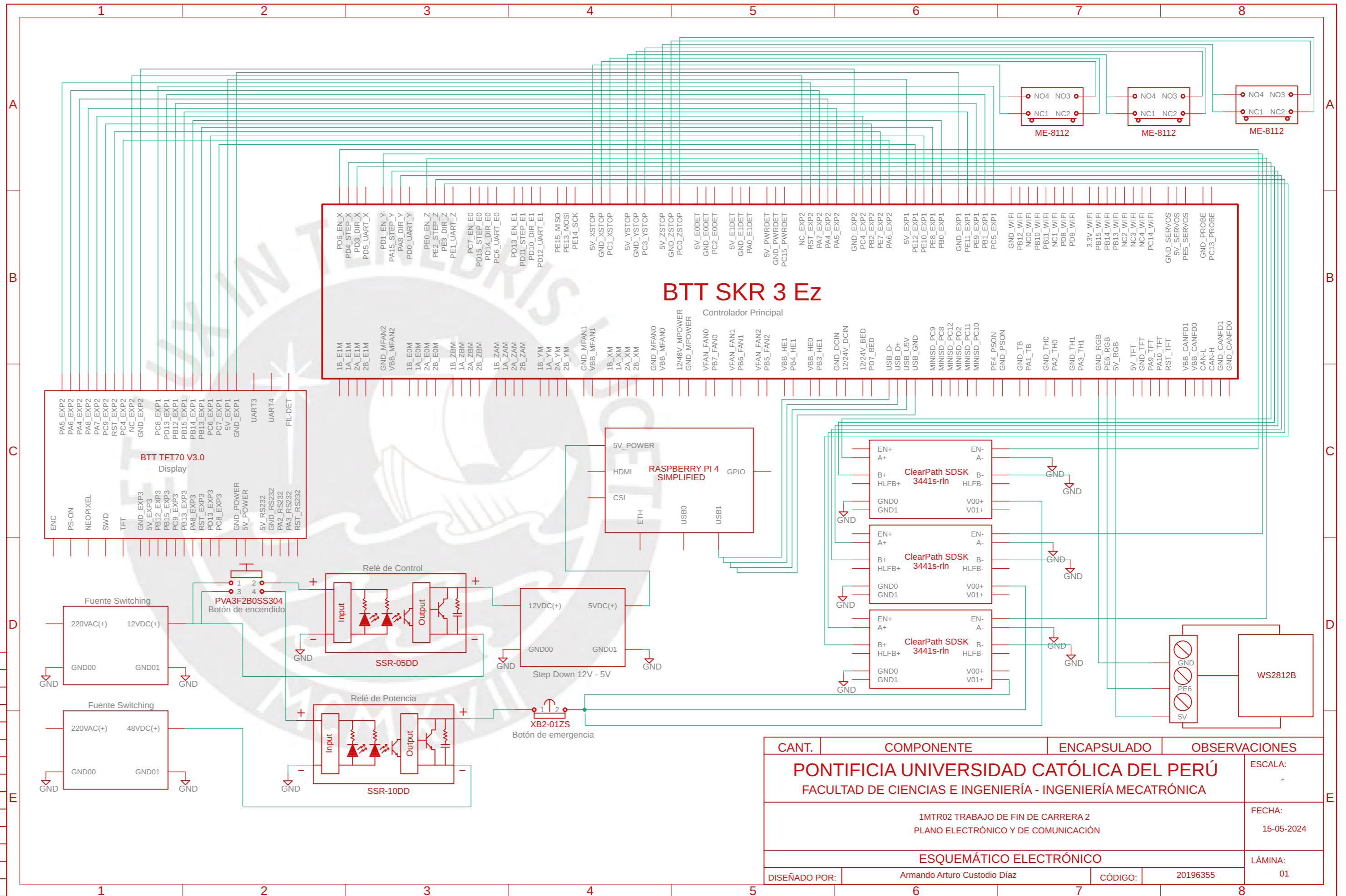
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FCI - Ingeniería Mecatrónica

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
	Sistema General	1:10
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 04/06/2025
REVISADO POR:	Diego Arce	LAMINA: G001-C



ANEXO L: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO GENERAL

6CD	SERVOMOTOR CLEARPATH	3	CPM-SDSK-3441S-RLN
3-7B	CONTROLADOR BIG TREE TECH	1	SKR 3 Ez
12C	LED DISPLAY	1	TFT70 V3.0
5C	RASPBerry	1	PI 4
78A	LIMIT SWITCH	3	ME-8112
8D	STRIP LED LIGHT	8	WS2812B
4D	STEP DOWN 12V-5V	1	XL4015
4E	E-STOP SWITCH	1	XB2-01ZS
2D	PUSH BUTTON	1	PVA3F2B0SS304
3D	RELÉ DC DC	1	SSR-05DD
3E	RELÉ DC DC	1	SSR-10DD
1D	FUENTE SWITCHING	1	PEPTEL 12V-5A
1E	FUENTE SWITCHING	1	PEPTEL 48V-10A
UBI	COMPONENTE	CANTIDAD	CÓDIGO



CANT.	COMPONENTE	ENCAPSULADO	OBSERVACIONES
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA			
1MTR02 TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 PLANO ELECTRÓNICO Y DE COMUNICACIÓN			ESCALA: FECHA: 15-05-2024
ESQUEMÁTICO ELECTRÓNICO			
DISEÑADO POR:	Armando Arturo Custodio Diaz	CÓDIGO:	20196355
			LÁMINA: 01

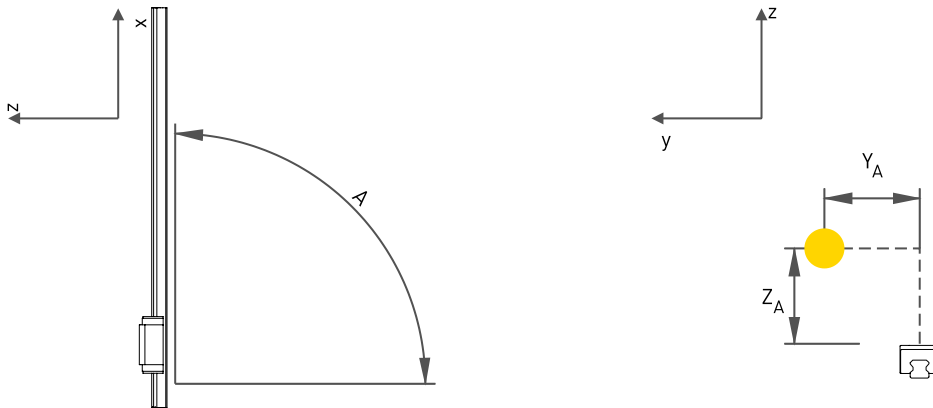


ANEXO M: HIWIN HERRAMIENTA DE SELECCIÓN

Project data

Date 4/14/2024

Your inputs



Stroke length	1,220	mm
Bearing of drive axis y_A	20	mm
Bearing of drive axis z_A	25	mm
Angle A	90	°
Angle B	0	°

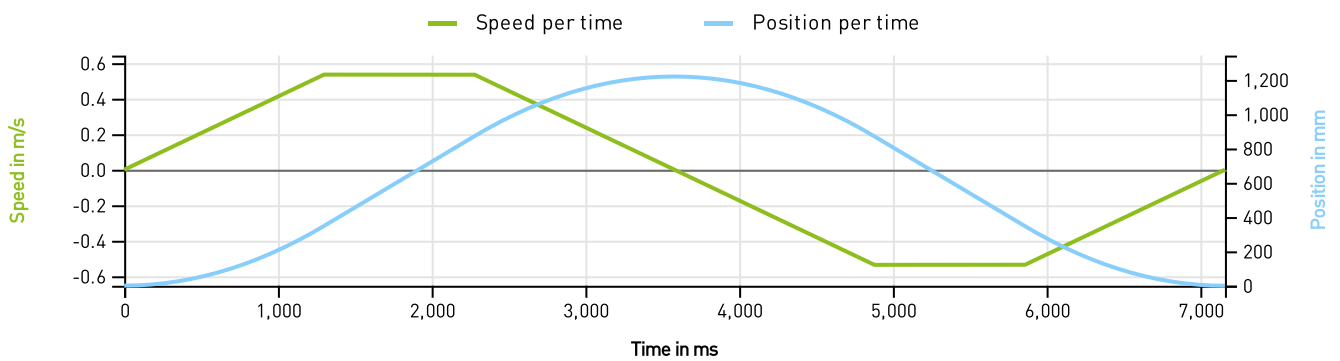
Centre of gravity of the moved mass					
		Mass [kg]	x_m [mm]	y_m [mm]	z_m [mm]
1	Mass 1	2	0	0	50

External forces				Force initiation point			
		F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	x_F [mm]	y_F [mm]	z_F [mm]
1	Force 1	245	210	310	0	20	45
2	Force 2	-245	-210	-310	0	-20	45

Driving profile

	Travel distance [mm]	v [m/s]	a [m/s ²]	t _{pos} [s]	t _a [s]	t _{Pause} [s]	Acting mass	Acting forces	Description of single travel run
Travel run 1	1,220	0.535	0.412	3.58	1.3	0	Mass 1	[F1]; [F2]	
Travel run 2	-1,220	-0.535	-0.412	3.58	1.3	0	Mass 1	[F1]; [F2]	

v = Speed · a = Acceleration · t_{pos} = Positioning time · t_a = Acceleration time · t_{Pause} = Pause · Acting mass = Moving masses on this journey · Acting forces = External forces at work on this journey



Load factor	1.5
-------------	-----

Selected block **CGH20HA**

Series: CG
 Type: H
 Size: 20
 Load type: H
 Block mounting: A
 Preload: Z0

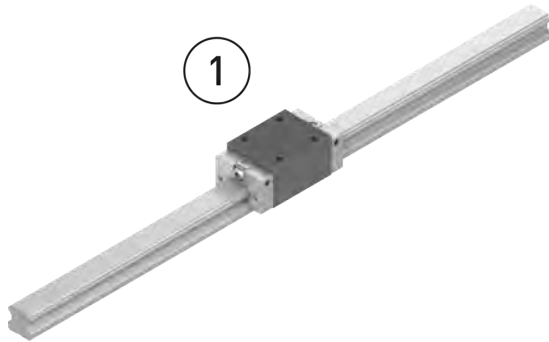
Data of block		
Total height H	30	mm
Block width W	44	mm
Block length L	91	mm
Dynamic load rating C_{dyn}	28,600	N
Static load rating C_0	39,900	N

Application data		
Service life	49,060	km
Static structural safety	13.84	
Load ratio C_{dyn}/P (P/C_{dyn})	9.94 (0.1)	
Lubrication interval	2,991	km
Short block distance	No	

Auslegungsdatenblatt

Sizing ID CELNMCCQKP
Version 1

Date 4/14/2024



Maximum loads in all phases per block			
	Eqv. dyn. load P [N]	Static structural safety	Load ratio C_{dyn} / P (P / C_{dyn})
Block 1	2,883	13.84	9.94 [0.1]

Nominal service life		
	Path [km]	Duration [a]
Block 1	49,060	

General notes

Calculation results are based on the technical information you entered; for missing information, values were assumed by us.

Please note that the calculated service life is a theoretical value.

The service life calculation is based on the assumption of an ideally rigid adjacent construction and presupposes that all the specifications in our assembly instructions for profile rail guides are complied with (in particular the specifications on lubrication).

Please note that the calculated service life is a theoretical value.

The screw strength consideration is not a component of the service life calculation (more information in the assembly instructions for profile rail guides).

In addition, the effects of vibrations, impacts, dirt or temperature fluctuations can only be introduced into the service life calculation by artificially increasing the equivalent load.

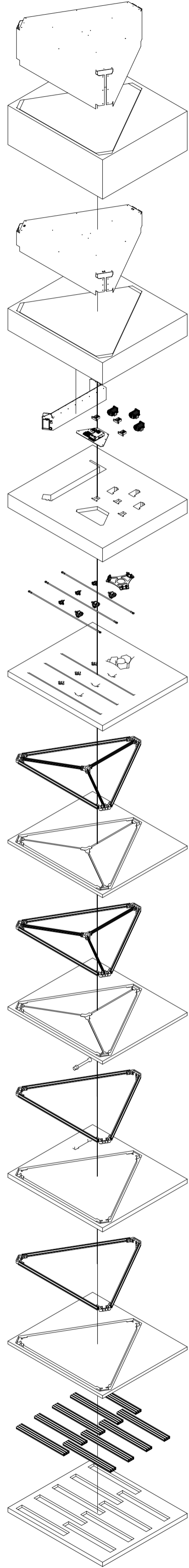


ANEXO N: PINOUT BTT SKR 3 Ez

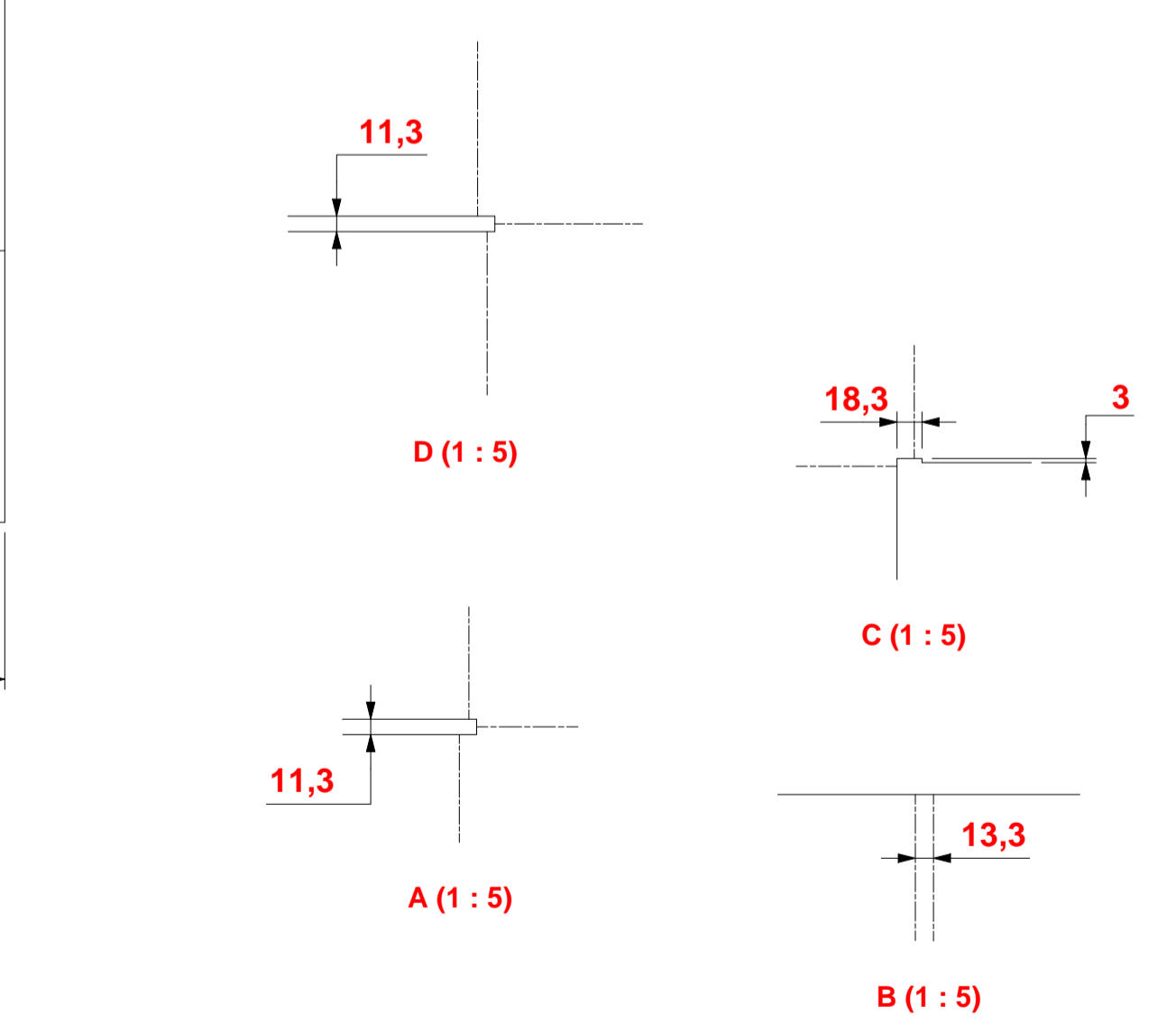
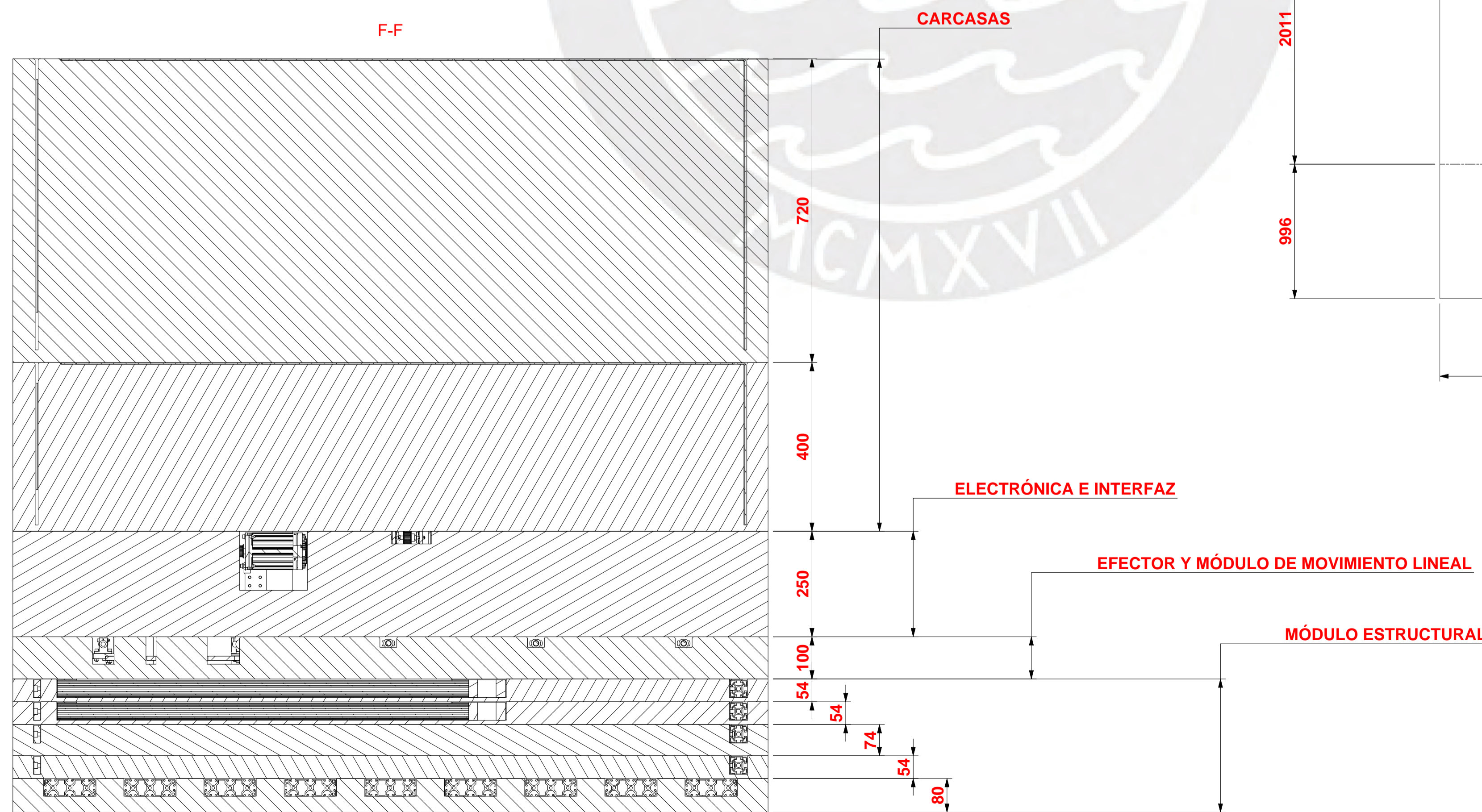
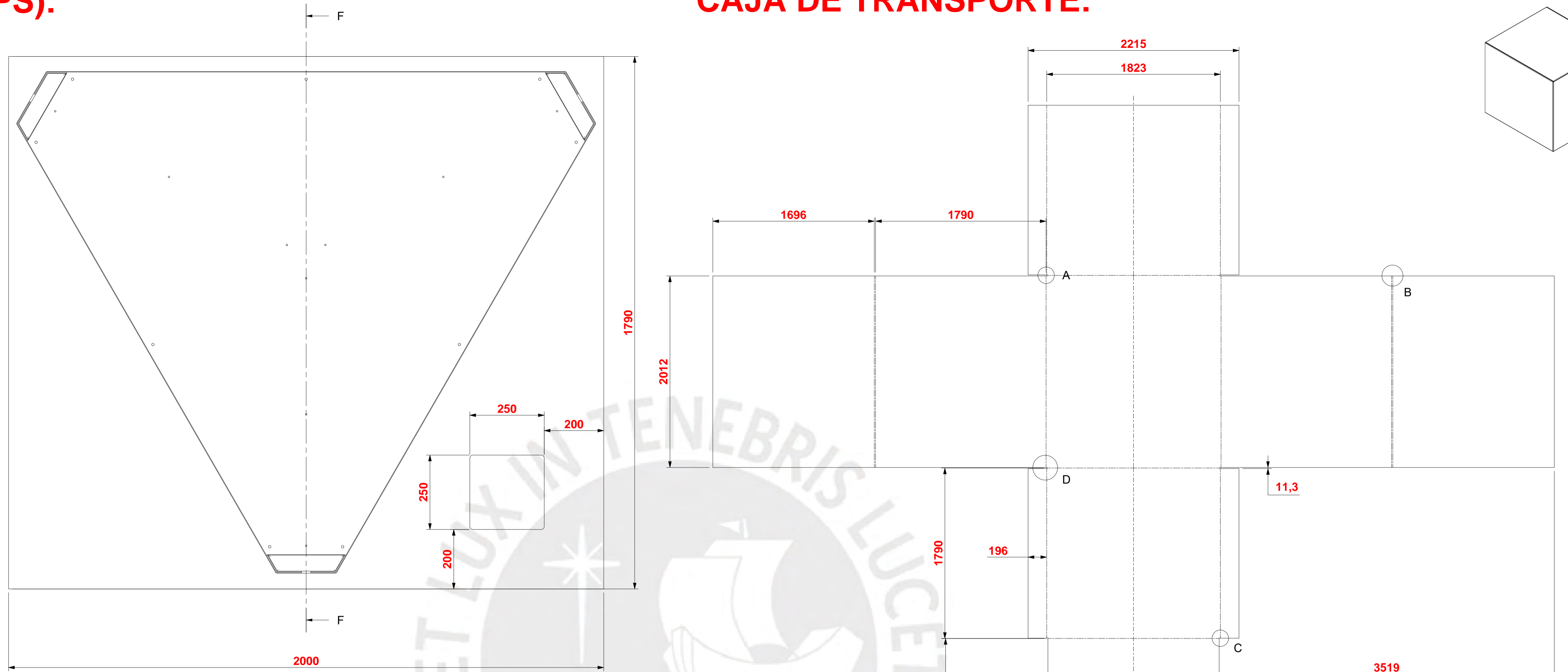
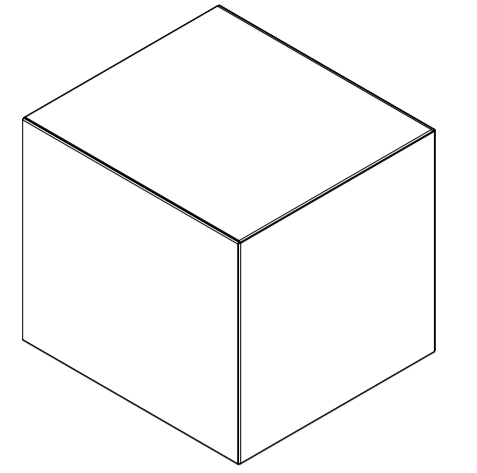


**ANEXO O: PLANO DE DISTRIBUCIÓN DE MÓDULO DE
TRANSPORTE**

MÓDULOS DE (EPS):



CAJA DE TRANSPORTE:



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FCI - Ingeniería Mecatrónica		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - Fabcore - HORARIO 10M1	ESCALA
Módulos de transporte		
20196355	Armando Arturo, Custodio Díaz	FECHA: 02/04/2024
REVISADO POR: Diego Arce		LÁMINA: T001