

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
INGENIERÍA EN DISEÑO DE PRODUCTOS  
VALPARAÍSO - CHILE**



**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ESTRUCTURA MÓVIL GIRATORIA PARA UN SISTEMA  
COOPERATIVO MULTI-ROBOT DE CONSTRUCCIÓN IMPRESA.**

**CONSTANZA ANDREA JACHURA DERPICH  
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO EN DISEÑO DE PRODUCTOS  
FRANCISCO QUITRAL  
AGOSTO - 2021**

## AGRADECIMIENTOS |

Primero que nada, me gustaría agradecer a mis pilares fundamentales en este proceso de formación universitaria tanto profesional como personal, a mis padres Maritza y Luis quienes me apoyaron desde un comienzo en esta etapa de mi vida, agradeciendo todas las enseñanzas, valores y principios que me permitieron desenvolverme y enfrentar nuevos desafíos. Agradecer a mis hermanos Luis y Millenka que me dieron todo su apoyo y me acompañaron en esta aventura de salir de casa he ir a estudiar a otra región.

A mis amigas Fernanda y Marlene que me acompañaron en esas largas noches de trabajo y durante todas las etapas de la vida universitaria, fuimos creciendo juntas y enfrentándonos a todos los desafíos que se nos cruzaran por delante, dándome todo el apoyo emocional que alguien podría pedir. Agradecer a Gregorio mi mejor amigo y compañero de vida que me ha brindado todo el apoyo emocional en los momentos más difíciles de este camino y me ha acompañado en todas mis etapas de crecimiento celebrando mis triunfos y ayudándome a superar mis fracasos, quien junto a mi gatita Kira me han dado los momentos más felices y de enojo en mi vida.

Finalmente me gustaría agradecer a todos los profesores que se vieron involucrados en mi formación profesional, a mi profesor guía Francisco Quitral quien estuvo presente durante este proceso y me aguantó por mucho tiempo con su paciencia infinita. Y una especial mención a la profesora Gabriela López, quien me apoyó, dio ánimos, muchos cariños y me impulsó a crecer como profesional.

## RESUMEN |

Actualmente, la industria 4.0 abre una oportunidad para aumentar la productividad y mejorar la eficiencia de las operaciones en los procesos de construcción de edificaciones. En las últimas décadas la robótica se ha implementado de manera incipiente para colaborar en la industria de la construcción.

En este contexto, la presente memoria se enmarca bajo el proyecto FONDECYT 1181015 “Diseño arquitectónico y gestión de construcción impresa en 3D mediante sistemas cooperativos multi-robots”, liderado por el Dr. Rodrigo García Alvarado de la Universidad del Bío Bío. Como parte del equipo de trabajo en la UTFSM se diseñó una estructura móvil giratoria para un sistema cooperativo de múltiples robots en la construcción impresa, robots destinados a ejecutar deposición de material para fabricación aditiva de construcción impresa en obra, el diseño considera las libertades y restricciones que otorga el extrusor o boquilla de impresión en el espacio de trabajo de los robots.

La estructura móvil giratoria se diseñó para una posible implementación futura en el prototipo a escala ubicado en el laboratorio de Sistemas Cooperativos Multi-Robots para la Construcción (SISCOM), montado por el Departamento de Arquitectura en dependencias del Departamento de Ingeniería en Diseño y el apoyo del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María.

La metodología utilizada para llevar a cabo esta investigación y su desarrollo consistió en cuatro pasos, en primer lugar se definieron los requerimientos de diseño a partir de lo conocido y solicitado por el proyecto para cumplir con su funcionamiento, pasando a una descomposición funcional de la estructura móvil giratoria para identificar y entender sus sistemas y componentes, en segundo lugar, se realizó un estudio y análisis de referentes existentes en el mercado correspondientes a los sistemas funcionales del proyecto, luego se proponen diseños de estructuras giratorias que se adapten a la configuración del sistema cooperativo multi-robot, se realizó una tabla comparativa de las ventajas y desventajas de estos diseños.

Finalmente, el diseño óptimo se validó a través de un análisis de esfuerzo estático y una animación de la dinámica del funcionamiento sincrónico de la estructura móvil giratoria realizado en los softwares Autodesk Inventor y Fusion 360.

## ABSTRACT |

Currently, Industry 4.0 opens an opportunity to increase productivity and improve the efficiency of operations in building construction processes. In the last decades robotics has been implemented in an incipient way to collaborate in the construction industry.

In this context, this report is framed under the project FONDECYT 1181015 "Architectural design and construction management printed in 3D through cooperative multi-robot systems", led by Dr. Rodrigo García Alvarado of the University of Bío Bío. As part of the work team at UTFSM, a rotating mobile structure was designed for a cooperative system of multiple robots in printed construction, robots destined to execute material deposition for additive manufacturing of printed construction on site, the design considers the freedoms and restrictions given by the extruder or print nozzle in the robots workspace.

The rotating mobile structure was designed for a possible future implementation in the scale prototype located in the Laboratory of Cooperative Systems Multi-Robots for Construction (SISCOM), assembled by the Department of Architecture in

dependencies of the Department of Engineering in Design and the support from the Civil Works Department of the Federico Santa María Technical University.

The methodology used to carry out this research and its development consisted of four steps, firstly, the design requirements were defined based on what is known and requested by the project to comply with its operation, moving to a functional decomposition of the structure. rotating mobile to identify and understand its systems and components, secondly, a study and analysis of existing references in the market corresponding to the functional systems of the project were carried out, then rotating structures designs are proposed that adapt to the system configuration cooperative multi-robot, a comparative table of the advantages and disadvantages of these designs was made. Finally, the optimal design was validated through a static stress analysis and an animation of the dynamics of the synchronous operation of the rotating mobile structure carried out in the Autodesk Inventor and Fusion 360 software.

## ÍNDICE |

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	6
ÍNDICE.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
INTRODUCCIÓN.....	24
OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	27
OBJETIVO GENERAL.....	27
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	29
CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	32
2.1. FABRICACIÓN DIGITAL.....	32
2.2. FABRICACIÓN ADITIVA / IMPRESIÓN 3D.....	34
2.2.1. PROCESO BÁSICO DE IMPRESIÓN 3D.....	35
2.2.2. IMPACTO EN LA SOCIEDAD.....	37
2.3. IMPRESIÓN 3D EN LA CONSTRUCCIÓN / CONSTRUCCIÓN IMPRESA.....	38

2.3.1. ANTECEDENTES DE LA IMPRESIÓN 3D EN LA CONSTRUCCIÓN.	40	4.3.1. PROPUESTAS DE DISEÑO...	116
2.3.2. TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D EN LA CONSTRUCCIÓN .....	44	4.4. ETAPA 4: DISEÑO DE DETALLE...	153
2.3.3. CLASIFICACIÓN DE IMPRESORAS 3D SEGÚN ESTRUCTURA MECÁNICA.....	53	CONCLUSIÓN.....	166
SISTEMAS COOPERATIVOS MULTI-ROBOTS .....	64	REFERENCIAS .....	170
METODOLOGÍA.....	69	ANEXOS.....	176
4.1. ETAPA 1: CLARIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	70	ANEXO 1: MODELO PREDESCRIPTIVO DE PAHL Y BEITZ. CICLO BÁSICO DEL PROCESO DE DISEÑO Y SU ENFOQUE SISTEMÁTICO .....	176
4.1.1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO .....	70	ANEXO 2: DISEÑO DE LA ESTRUCTURA PARA UN SISTEMA COOPERATIVO MULTI-ROBOT PROPUESTA POR ESTEBAN AGÜERO. ....	177
4.1.2. DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS.....	73	ANEXO 3: CLASIFICACIÓN DE RECURSOS SEGÚN METODOLOGÍA TRIZ .....	179
4.2. ETAPA 2: DISEÑO CONCEPTUAL..	76	ANEXO 4: CÁLCULO APROXIMADO DEL VOLUMEN DEL ESPACIO DE TRABAJO DE UN ROBOT.....	180
4.2.1. DESCOMPOSICIÓN FUNCIONAL DEL PROYECTO .....	76	ANEXO 5: DIMENSIONES EN MM DEL ÁREA DE TRABAJO DEL ROBOT UR5, VISTA LATERAL (Fuente: <a href="https://www.universal-robots.com/articles/ur/application-installation/what-is-a-singularity/">https://www.universal-robots.com/articles/ur/application-installation/what-is-a-singularity/</a> ).....	181
4.2.2. ANÁLISIS DE REFERENTES...	93		
4.3. ETAPA 3: DISEÑO BÁSICO.....	116		

ANEXO 6: MODELO DE LA RELACIÓN QUE MANTIENEN LAS ÁREAS DE TRABAJO DE LOS ROBOTS UR5, DIMENSIONES EN MM, VISTA LATERAL .....	182	EN DIFERENTES PUNTOS DEL ESPACIO DE TRABAJO, ESTUDIO CASO A Y B. ....	193
ANEXO 7: MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA EL CALCULO DE LOS VALORES $h$ Y $h'$ , DIMENSIONES EN MM, VISTA LATERAL .....	184	ANEXO 14: POSICIONAMIENTO DE LA BRIDA DE HERRAMIENTAS Y LAS DOS JUNTAS CONSECUTIVAS A ESTA ÚLTIMA EN DIFERENTES GRADOS DE ROTACIÓN, ESTUDIO CASO A Y B.....	195
ANEXO 8: ECUACIÓN PARA CALCULAR EL VOLUMEN DE UN SEGMENTO ESFÉRICO. ....	186	ANEXO 15: ESAMBLE DE LOS COMPONENTES BASE DE SOPORTE Y ROBOT UR5/CB3.....	197
ANEXO 9: TABLA DE COMPONENTES QUE REQUIEREN DE LA BÚSQUEDA DE REFERENTES. ....	187	ANEXO 16: PROPUESTAS DE DISEÑO PARA LA VIGA GIRATORIA, GUÍA LINEAL DE PRECISIÓN Y MECANISMO DE DESPLAZAMIENTO LINEAL.....	199
ANEXO 10: MATRIZ DE RELACIÓN Y CONEXIÓN ENTRE LOS COMPONENTES REFERENCIADOS DE CADA SISTEMA. ...	188	ANEXO 17: HOJA DE CALCULO CON DATOS PARA DETERMINAR LOS REQUERIMIENTOS DE LOS MOTORES. .	200
ANEXO 11: PROPUESTAS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE ROTACIÓN. ....	189	ANEXO 18: PLANIMETRÍA DE LAS DE LAS PIEZAS DISEÑADAS PARA EL COMPONENTE MECANISMO DE EXTENSIÓN DEL EJE VERTICAL. ....	201
ANEXO 12: PLANIMETRÍA DE LA BOQUILLA DE EXTRUSIÓN.....	192	ANEXO 19: FORMULAS PARA GENERAR UN ENGRANAJE CON AUTODESK INVENTOR .....	204

## ÍNDICE DE FIGURAS |

Figura 1: Impresora 3D de modelado por deposición fundida (Fuente: <a href="https://innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/fdm-modelado-por-deposicion-fundida/">https://innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/fdm-modelado-por-deposicion-fundida/</a> ). .....	35
Figura 2: Tecnología CC en funcionamiento y muros representativos 3D rellenos de hormigón (Fuente: Khoshnevis, Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies, 2004). .....	42
Figura 3: Ejemplos de procesos de construcciones a gran escala, (a) D-Shape, (b) Contour Crafting y (c) Concrete Printing (Fuente: Lim, y otros, 2012). .....	43
Figura 4: Representación esquemática de las principales componentes en el proceso de extrusión de material (Fuente: Wang, Jiang, Zhou, Gou, & Hui, 2017). .....	45
Figura 5: Proceso de fabricación con CC (Fuente: Khoshnevis, Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies, 2004). .....	46
Figura 6: Impresión de hormigón 3D por CC (Fuente: Sanjayan & Nematollahi, 2019). .	47

Figura 7: Objeto fabricándose con el método Concrete Printing (Fuente: Le, y otros, Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, 2012).....	48
Figura 8: Huecos entre filamentos de hormigón impreso (Fuente: Le, y otros, Hardened properties of high-performance printing concrete, 2012).....	49
Figura 9: Representación esquemática de las principales componentes en el proceso de inyección aglutinante (Fuente: Wang, Jiang, Zhou, Gou, & Hui, 2017).....	50
Figura 10: Máquina D-Shape con cabezal de impresión compuesto por 300 boquillas (Fuente: <a href="https://d-shape.com/what-is-it/the-process/the-concept/">https://d-shape.com/what-is-it/the-process/the-concept/</a> ).....	51
Figura 11: Casa fabricada con el proceso D-Shape (Fuente: <a href="https://d-shape.com/what-is-it/the-process/the-concept/">https://d-shape.com/what-is-it/the-process/the-concept/</a> ).....	51
Figura 12: Similitudes entre los métodos de construcción impresa (Fuente: Lim, y otros, 2012). ....	53
Figura 13: Sistemas de construcción impresa (Fuente: Seminario BIM y Construcción Impresa 3D, 2020).....	54
Figura 14: Sistema cartesiano tipo pórtico (Fuente: Siciliano, Sciavicco, Villani, & Oriolo, 2009). ....	54
Figura 15: sistema aporticado de impresión móvil (Fuente: <a href="https://bemore3d.com/">https://bemore3d.com/</a> ).....	55
Figura 16: Proyecto de construcción de Contour Crafting (Fuente: <a href="https://www.contourcrafting.com/building-construction">https://www.contourcrafting.com/building-construction</a> ).....	56
Figura 17: Monolite del Reino Unido (Fuente: <a href="https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/01/D-Shape_printer">https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/01/D-Shape_printer</a> ).....	56
Figura 18: Esquema sistema cilíndrico y su espacio de trabajo (Fuente: <a href="http://www.udesantiagoovirtual.cl/moodle2/mod/book/tool/print/index.php?id=24911">http://www.udesantiagoovirtual.cl/moodle2/mod/book/tool/print/index.php?id=24911</a> )....	56
Figura 19: (A) Muro de tierra impreso en 3D con escalera empotrada y (B) Gaia casa impresa en 3D con materiales naturales (Fuente: <a href="https://www.3dwasp.com/">https://www.3dwasp.com/</a> ).....	57
Figura 20: Casa residencial impresa en 3D por impresora cilíndrica (Fuente: <a href="https://www.apis-cor.com/gallery">https://www.apis-cor.com/gallery</a> ).....	58
Figura 21: Esquema sistema delta (Fuente: PwC analysis).....	58

Figura 22: Impresora Delta WASP 3MT CONCRETE (Fuente: <a href="https://www.3dwasp.com/en/concrete-3d-printer-delta-wasp-3mt-concrete/">https://www.3dwasp.com/en/concrete-3d-printer-delta-wasp-3mt-concrete/</a> ).....	59	Figura 28: Prototipo de construcción impresa utilizando el sistema Minirobots (Fuente: <a href="http://robots.iaac.net/">http://robots.iaac.net/</a> ). ....	67
Figura 23: Impresora gigante BigDelta de WASP (Fuente: <a href="https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/">https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/</a> ).....	60	Figura 29: Esquema adaptado de las etapas de diseño y desarrollo del prototipo. ....	69
Figura 24: Esquema del sistema articulado con su espacio de trabajo (Fuente: Siciliano, Sciavicco, Villani, & Oriolo, 2009).....	61	Figura 30: Modelo 3D del laboratorio SISCOM (Fuente: Agüero Naguian, 2019).....	70
Figura 25: (A) Impresora móvil Cybe RC 3Dp, (B) CAZZA X1 robot de impresión 3D y (C) Máquina de Contour Crafting para construcción en superficie Lunar (Fuentes: <a href="https://cybe.eu/technology/3d-printers/">https://cybe.eu/technology/3d-printers/</a> , <a href="https://www.3dnatives.com/es/cazza-x1-robot-impresion-3d-041020172/">https://www.3dnatives.com/es/cazza-x1-robot-impresion-3d-041020172/</a> y <a href="https://www.3dnatives.com/es/contour-crafting-casas-luna-03082016/#!">https://www.3dnatives.com/es/contour-crafting-casas-luna-03082016/#!</a> ).....	62	Figura 31: Prototipo del sistema cooperativo multi- robot, montado en el laboratorio de SISCOM. Estado actual (izquierda), estado objetivo (derecha) (Fuente: González Böhme, García Alvarado, Quitral Zapata, & Valenzuela Astudillo, 2020). ....	71
Figura 26: Robots manipuladores en trabajo combinado (Fuente: <a href="https://www.infoplcn.net/noticias/marcas/106-yaskawa-motoman">https://www.infoplcn.net/noticias/marcas/106-yaskawa-motoman</a> ). ....	65	Figura 32: Esquema del estado objetivo del proyecto (Fuente: elaboración propia). ....	72
Figura 27: Robots imprimiendo simultáneamente una pared de hormigón (Fuente: Zhang, y otros, 2018). ....	66	Figura 33: Modelo CAD del estado objetivo del proyecto (Fuente: elaboración propia). ....	76
		Figura 34: Sistema estructural del proyecto y partes que lo componen (Fuente: elaboración propia). ....	77
		Figura 35: Sistema de rotación del proyecto y partes principales que lo componen (Fuente: elaboración propia). ....	79
		Figura 36: Sistema de extrusión del proyecto y partes que lo componen (Fuente: elaboración propia). ....	80

Figura 37: Límites del espacio de trabajo del robot UR5/CB3 (Fuente: <a href="https://www.universal-robots.com/">https://www.universal-robots.com/</a> ).....	82
Figura 38: (A) Robots sobre techo con eje vertical, (B) Robots sobre techo con eje inclinado en 45°, (C) Robots sobre techo con eje horizontal (D) Robots sobre muro con eje horizontal y (E) Robots sobre muro con eje inclinado en 45° (Fuente: elaboración propia).....	83
Figura 39: Conceptualización de la trayectoria de desplazamiento con robots fijos y estructura móvil. De izquierda a derecha, viga central giratoria y robots sobre techo en inclinación, estructura circular rotatoria y viga con robots sobre techo en inclinación y estructura circular rotatoria con robots sobre techo en inclinación y muro en inclinación (Fuente: elaboración propia).....	85
Figura 40: Conceptualización de la trayectoria de desplazamiento con robots móviles y estructura fija. De izquierda a derecha, robots montados sobre muro en inclinación y robots montados sobre techo en inclinación (Fuente: elaboración propia).....	86
Figura 41: Esquema conceptual de la composición de las áreas de trabajo de los robots (Fuente: elaboración propia).....	86
Figura 42: Esquema de las variables para la parametrización de coordenadas del área de trabajo de los robots y sus respectivas definiciones (Fuente: elaboración propia). 87	
Figura 43: Esquema de parametrización de coordenadas con $\alpha = 0^\circ$ (Fuente: elaboración propia).....	88
Figura 44: Segmento esférico correspondiente al volumen total de impresión (Fuente: elaboración propia).....	91
Figura 45: Ubicación de los robots cuando $D > 1622$ mm (Fuente: elaboración propia).....	92
Figura 46: volumen total de impresión cuando $D > 1622$ mm (Fuente: elaboración propia).....	93
Figura 47: Manguera de mortero con acoples (Fuente: <a href="https://www.bautech-hoefer.de/PFT-OnlineShopde/es/Mangueras-de-mortero-y-accesorios">https://www.bautech-hoefer.de/PFT-OnlineShopde/es/Mangueras-de-mortero-y-accesorios</a> ).....	95
Figura 48: Acople Camlock hembra (Fuente: <a href="https://www.kmx.cl/product/acoples-camlock/">https://www.kmx.cl/product/acoples-camlock/</a> ). ....	95
Figura 49: Dispensador de cartucho robótico FD400 Air-Less™ (Fuente: <a 852="" 872"="" 948="" 975="" data-label="Page-Footer" href="https://aim-&lt;/a&gt;&lt;/td&gt; &lt;td&gt;&lt;/td&gt; &lt;/tr&gt; &lt;/table&gt; &lt;/div&gt; &lt;div data-bbox="> <p>14</p> </a>	

robotics.com/fd-air-less-cartridge-dispenser/)	96		
Figura 50: PlasmaTEC-X UR (Fuente: <a href="https://tantec.com/plasmatec-x-ur/">https://tantec.com/plasmatec-x-ur/</a> ).	97		
Figura 51: Cambiador de herramientas manual Millibar (Fuente: <a href="https://www.millibar.com/manual-tool-changer/">https://www.millibar.com/manual-tool-changer/</a> ).	97		
Figura 52: conector SHW de GRIP (Fuente: <a href="https://www.grip-gmbh.com/connect/shw">https://www.grip-gmbh.com/connect/shw</a> )	98		
Figura 53: Base de robot en 45 grados para montaje en marco (Fuente: <a href="https://cobotdepot.com/product/45-degree-robot-base-frame-mount/">https://cobotdepot.com/product/45-degree-robot-base-frame-mount/</a> ).	99		
Figura 54: Base de robot en ángulo de Vention (Fuente: <a href="https://vention.io/parts/angled-robot-base-873">https://vention.io/parts/angled-robot-base-873</a> ).	99		
Figura 55: Conector de base GRIP (Fuente: <a href="https://www.grip-gmbh.com/products/connect">https://www.grip-gmbh.com/products/connect</a> ).	100		
Figura 56: Impresora 3D de hormigón con sistema aporticado móvil (Fuente: <a href="https://bemore3d.com/bem-por2/">https://bemore3d.com/bem-por2/</a> ).	101		
Figura 57: Impresora 3D DS 3×3 ACADEMY (Fuente: <a href="https://d-shape.com/3d-printers/">https://d-shape.com/3d-printers/</a> ).	101		
		Figura 58: Carro elevador para torre truss (Fuente: <a href="https://www.valook.cl/productos/truss-system/accesorios/carro-torre-30-30-40-cosmic-truss-160161">https://www.valook.cl/productos/truss-system/accesorios/carro-torre-30-30-40-cosmic-truss-160161</a> )	102
		Figura 59: Proyecto DFAB HOUSE desarrollado en el laboratorio de Fabricación Robótica del ETH (Fuente: <a href="https://www.madera21.cl/conoce-el-primero-proyecto-arquitectonico-a-gran-escala-y-de-madera-en-que-colaboran-robots/">https://www.madera21.cl/conoce-el-primero-proyecto-arquitectonico-a-gran-escala-y-de-madera-en-que-colaboran-robots/</a> ).	103
		Figura 60: Columna telescópica LIFTKIT-UR (Fuente: <a href="https://www.ewellix.com/en/cl/products/telescopic-pillars/liftkit/liftkit-ur">https://www.ewellix.com/en/cl/products/telescopic-pillars/liftkit/liftkit-ur</a> ).	104
		Figura 61: Eje lineal de posicionamiento horizontal para robots colaborativos (cobot) (Fuente: <a href="https://www.ewellix.com/en/global/products/linear-systems/slidekit-20">https://www.ewellix.com/en/global/products/linear-systems/slidekit-20</a> ).	105
		Figura 62: Extensor de rango 7th Axis para alcance aéreo (Fuente: <a href="https://vention.io/range-extender">https://vention.io/range-extender</a> ).	106
		Figura 63: Guía lineal de servicio pesado HDS2 (Fuente: <a href="https://www.hepcmotion.com/product/linear-guides/hds2-heavy-duty-linear-guide/?tab=product">https://www.hepcmotion.com/product/linear-guides/hds2-heavy-duty-linear-guide/?tab=product</a> ).	106

Figura 64: Perfiles de aluminio con ranura en T (Fuente: <a href="https://www.hepcomotion.com/product/aluminium-profile-construction-system/mcs-aluminium-profiles/">https://www.hepcomotion.com/product/aluminium-profile-construction-system/mcs-aluminium-profiles/</a> ). .....	107	diameter-ring-guides-segments-and-track-systems/?tab=product).....	110
Figura 65: Extrusión de aluminio de Vention (Fuente: <a href="https://vention.io/parts-library/category/structural-and-framing/aluminum-extrusions">https://vention.io/parts-library/category/structural-and-framing/aluminum-extrusions</a> ). .....	107	Figura 70: Carril plano para el desplazamiento de bloques de cojinetes MHD (Fuente: <a href="https://www.hepcomotion.com/product/linear-guides/mhd-track-roller-linear-motion-system/?tab=technical">https://www.hepcomotion.com/product/linear-guides/mhd-track-roller-linear-motion-system/?tab=technical</a> ). .....	111
Figura 66: Truss cuadrado (Fuente: <a href="https://www.valook.cl/productos/truss-system/cuadrado-30-30">https://www.valook.cl/productos/truss-system/cuadrado-30-30</a> ). .....	108	Figura 71: Sistema de movimiento lineal con rodillos de pista MHD para trabajo pesado (Fuente: <a href="https://www.hepcomotion.com/product/linear-guides/mhd-track-roller-linear-motion-system/?tab=product">https://www.hepcomotion.com/product/linear-guides/mhd-track-roller-linear-motion-system/?tab=product</a> ). .....	111
Figura 67: Guías lineales curvas (Fuente: <a href="https://www.rollon.com/IN/en/products/linear-line/5-curviline/">https://www.rollon.com/IN/en/products/linear-line/5-curviline/</a> ). .....	109	Figura 72: Corona de orientación con cremallera exterior e interior (Fuente: <a href="https://www.skf.com/cl/products/slewing-bearings">https://www.skf.com/cl/products/slewing-bearings</a> ). .....	112
Figura 68: Anillo guía de precisión de gran diámetro (Fuente: <a href="https://www.hepcomotion.com/product/ring-guides-track-systems-and-segments/large-diameter-ring-guides-segments-and-track-systems/?tab=product">https://www.hepcomotion.com/product/ring-guides-track-systems-and-segments/large-diameter-ring-guides-segments-and-track-systems/?tab=product</a> ). .....	109	Figura 73: Robot Rotopod R-2000 (Fuente: <a href="https://www.designworldonline.com/roller-pinion-gear-steps-up-rotopod-robot-motion/">https://www.designworldonline.com/roller-pinion-gear-steps-up-rotopod-robot-motion/</a> ). .....	113
Figura 69: Carro de rodamientos para cargas pesadas (Fuente: <a href="https://www.hepcomotion.com/product/ring-guides-track-systems-and-segments/large-diameter-ring-guides-segments-and-track-systems/?tab=product">https://www.hepcomotion.com/product/ring-guides-track-systems-and-segments/large-diameter-ring-guides-segments-and-track-systems/?tab=product</a> ). .....	109	Figura 74: Carro modular para riel (Fuente: <a href="https://www.thingiverse.com/thing:1839201">https://www.thingiverse.com/thing:1839201</a> ). .....	114

Figura 75: Bloque de rodillo ajustable y aplicación con un anillo de precisión (Fuente: teknoology).....	115
Figura 76: Esquema conceptual del desplazamiento en un riel circular (Fuente: Elaboración propia). .....	117
Figura 77: Diseños conceptual de los componentes Guía circular de precisión y Mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia). .....	118
Figura 78: Propuesta de diseño “viga circular doble T con cremallera y carro de desplazamiento móvil con motor” (Fuente: Elaboración propia). .....	118
Figura 79: Propuesta de diseño 2 de guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia). .....	119
Figura 80: Propuesta de diseño 3 de guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia). .....	119
Figura 81: Propuesta de diseño 4 de guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia). .....	120
Figura 82: Propuesta de diseño 5 de guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia).....	120
Figura 83: Distancia superior entre los componentes anillo estructural y la estructura de apoyo (Fuente: elaboración propia).....	121
Figura 84: Propuesta de diseño 6 de guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia).....	122
Figura 85: Componente mecanismo de desplazamiento circular de la propuesta de diseño 6 (Fuente: Elaboración propia)....	122
Figura 86: Partes del mecanismo ajustable de la propuesta de diseño 6 (Fuente: Elaboración propia).....	123
Figura 87: Esquema conceptual del componente acople de boquilla (Fuente: Elaboración propia).....	124
Figura 88: Orientación de los ejes de rotación del robot UR5, en la izquierda el caso A y derecha caso B (Fuente: elaboración propia). .....	124

Figura 89: Robots UR5 utilizando el acople de boquilla del caso A (Fuente: elaboración propia).....	125	mecanismo de desplazamiento línea (Fuente: Elaboración propia). .....	132
Figura 90: Robots UR5 utilizando el acople de boquilla del caso B (Fuente: elaboración propia).....	125	Figura 98: Interferencia entre el componente estructura de apoyo y guía lineal de precisión (Fuente: Elaboración propia). .....	132
Figura 91: Diseño conceptual para el acople de boquilla (Fuente: Elaboración propia).....	127	Figura 99: Propuesta de diseño 2 para viga giratoria, guía lineal de precisión y mecanismo de desplazamiento línea (Fuente: Elaboración propia). .....	133
Figura 92: Propuesta Conector de brida ajustable con palanca para el componente acople de boquilla (Fuente: Elaboración propia).....	127	Figura 100: Interacción entre los componentes guía lineal de precisión y mecanismo de desplazamiento línea (Fuente: Elaboración propia).....	133
Figura 93: Propuesta de diseño 2 del acople de boquilla (Fuente: Elaboración propia).....	128	Figura 101: Esquema conceptual del componente mecanismo de extensión del eje vertical (Fuente: Elaboración propia). .....	135
Figura 94: Modelo 3D de la base de robot en ángulo de Vention (Fuente: <a href="https://vention.io/parts/angled-robot-base-873">https://vention.io/parts/angled-robot-base-873</a> ). .....	129	Figura 102: Propuesta de “Mecanismo de desplazamiento vertical con carros elevadores” para el componente mecanismo de extensión del eje vertical (Fuente: Elaboración propia).....	135
Figura 95: Propuesta de diseño para el componente base de soporte (Fuente: Elaboración propia). .....	129	Figura 103: Partes del mecanismo de extensión del eje vertical en la propuesta de “Mecanismo de desplazamiento vertical con carros elevadores” (Fuente: Elaboración propia).....	136
Figura 96: Dimensiones de la cara de la propuesta de diseño para el componente base de soporte (Fuente: Elaboración propia). ....	130		
Figura 97: Propuesta “Mecanismo de desplazamiento lineal Vention” para la viga giratoria, guía lineal de precisión y			

Figura 104: Propuesta de diseño 2 para el componente mecanismo de extensión del eje vertical (Fuente: Elaboración propia).....	136
Figura 105: Propuesta de diseño conceptual del proyecto SISCOM (Fuente: Elaboración propia). .....	142
Figura 106: Análisis de esfuerzo estático del componente viga giratoria (Fuente: Elaboración propia). .....	143
Figura 107: Propuesta conceptual de optimización para el componente viga giratoria (Fuente: Elaboración propia). .....	144
Figura 108: Análisis de esfuerzo estático de la propuesta conceptual para la optimización del componente viga giratoria (Fuente: Elaboración propia). .....	144
Figura 109: Propuesta de optimización para el componente viga giratoria (Fuente: Elaboración propia). .....	145
Figura 110: Análisis de esfuerzo estático de la propuesta para la optimización del componente guía circular de precisión (Fuente: Elaboración propia). .....	147
Figura 111: Propuesta de optimización del mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia). .....	147
Figura 112: Propuesta de optimización del mecanismo de desplazamiento circular montada en la estructura SISCOM (Fuente: Elaboración propia).....	148
Figura 113: Integración del componente mecanismo de extensión del eje vertical al sistema estructural.....	153
Figura 114: Partes y piezas del mecanismo de extensión del eje vertical.....	154
Figura 115: Base de unión y fijación del motor del mecanismo de desplazamiento vertical. .	154
Figura 116: Módulo de fijación y soporte para el husillo.....	155
Figura 117: Pieza de unión de tuerca y carro de desplazamiento.....	155
Figura 118: Desplazamiento del sistema de extrusión en el eje vertical. ....	156
Figura 119: Interacción entre el componente guía circular de precisión y el mecanismo de desplazamiento circular. ....	157
Figura 120: Motor y piñón que dan movimiento giratorio a la guía circular de precisión. ..	157
Figura 121: Mecanismo de desplazamiento circular montado en el componente de desplazamiento vertical. ....	158

Figura 122: Viga giratoria montada en guía circular de precisión.....	158
Figura 123: módulo de fijación de los ejes cilíndricos y husillos.....	159
Figura 124: módulos de desplazamiento lineal de precisión.....	159
Figura 125: Componente de acople para la boquilla de extrusión instalado en brazo robótico.....	160
Figura 126: Diseño de la estructura móvil giratoria para un sistema cooperativo multi-robot de construcción impresa.....	161
Figura 127: Dimensiones generales de la estructura móvil giratoria. ....	162
Figura 128: estructura móvil giratoria con los espacios de trabajo de los robots.....	162
Figura 129: Análisis de esfuerzo estático del componente viga giratoria. ....	163
Figura 130: Demostración del límite del alcance de los brazos robóticos, considerando que hay un elemento estructural al centro de la impresión.....	164

## ÍNDICE DE TABLAS |

Tabla 1: Listado de requerimientos.....	74
Tabla 2: Clasificación de los recursos del proyecto según metodología TRIZ. ....	75
Tabla 3: Funciones de los componentes del sistema estructural.....	78
Tabla 4: Funciones de los componentes del sistema de rotación.....	79
Tabla 5: Funciones de los componentes del sistema de extrusión.....	81
Tabla 6: Funciones de los componentes adicionales al sistema de extrusión. ....	82
Tabla 7: Rotulación de las variables D, L, i y h, dimensiones en mm.....	89
Tabla 8: Rotulación de las variables D, i', L' y h', dimensiones en mm.....	89
Tabla 9: Tabla comparativa de las características en las propuestas de diseño para los componentes guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia). ....	138
Tabla 10: Tabla comparativa de las características en las propuestas de diseño para el componente acople de boquilla (Fuente: Elaboración propia).....	140
Tabla 11: Tabla comparativa de las características en las propuestas de diseño para los	

componentes viga giratoria, guía lineal de precisión y mecanismo de desplazamiento línea (Fuente: Elaboración propia). ..... 140

Tabla 12: Tabla comparativa de las características en las propuestas de diseño para el componente mecanismo de extensión del eje vertical (Fuente: Elaboración propia). ..... 141

Tabla 13: Material y peso de cada componente. .... 146

Tabla 14: Listado de partes y piezas necesarias para la fabricación de los componentes del sistema estructural. .... 150

Tabla 15: Listado de partes y piezas necesarias para la fabricación de los componentes del sistema de rotación. .... 152

## I. INTRODUCCIÓN |

## INTRODUCCIÓN |

La industria de la construcción constantemente se encuentra en búsqueda de la optimización de procesos y disminución de costos de una edificación. Es por ello, que la implementación de nuevas tecnologías como la impresión 3D ofrece un alto potencial de aplicaciones, como se refleja en los procesos de fabricación aditiva, esta tecnología posee una gran versatilidad que permite personalizar y adaptar cualquier diseño, cuyo desarrollo en la construcción podría proporcionar condiciones de trabajo más seguras, disminuir los costos de mano de obra y proporcionar libertad de diseños arquitectónicos fomentando la innovación (Khan, 2020).

Uno de los avances hacia la industria 4.0 es la construcción impresa o construcción mediante impresión 3D, que consiste en la fabricación aditiva de edificios y componentes constructivos a partir de un modelo digital 3D, mediante la deposición de capas sucesivas y superpuestas de morteros cementicios, estas capas se unifican y se adhieren entre sí para crear una estructura sólida y resistente que evita el uso de encofrados.

En comparación con los procesos de construcción convencionales, la aplicación de técnicas de impresión 3D con hormigón en la construcción trae consigo grandes ventajas como: la eliminación de encofrados lo que produce una reducción de costos y desperdicios, volviéndose un sistema de fabricación más sostenible, reducción de tiempos de construcción al poder dejar las máquinas en operación a velocidad constante, disminuir los accidentes laborales al eliminar trabajos peligrosos, disminuir la posibilidad de errores al trabajar con mayor precisión, entre otros (Sanjayan & Nematollahi, 2019).

Dados los avances en ciencia y tecnología a nivel global, específicamente los avances relacionados a la robótica es posible considerar que en un futuro la utilización de robots tenga un rol fundamental en la industria de la construcción, ya que estos pueden ser capaces de realizar diferentes procesos en la fabricación de un edificio y/o componentes constructivos, dando mayores grados de libertad formal arquitectónica, permitiendo experimentar con diferentes diseños y lograr edificaciones más eficientes optimizando

material. Es por esto que se debe considerar la investigación y desarrollo de sistemas cooperativos donde múltiples robots puedan realizar diversas tareas de forma simultánea.

El proyecto FONDECYT 1181015, “Diseño arquitectónico y gestión de construcción impresa en 3D mediante sistemas cooperativos multi-robots”, liderado por el Dr. Rodrigo García Alvarado de la Universidad del Bío Bío tuvo por objetivo desarrollar un método de gestión y diseño de construcciones arquitectónicas impresas por sistemas cooperativos multi-robots.

En el marco de este proyecto se desarrolló el Diseño y Simulación de la Estructura Móvil Giratoria para un Sistema Cooperativo Multi-Robot de Construcción Impresa como memoria para optar al título de Ingeniero en Diseño de Productos.



## **II. OBJETIVOS DEL PROYECTO |**

## OBJETIVOS DEL PROYECTO |

Los objetivos que guiarán el desarrollo de esta memoria de título se componen de un objetivo general y de objetivos específicos, los que se destacan a continuación.

### OBJETIVO GENERAL

Diseñar una estructura móvil giratoria y simular el funcionamiento sincrónico de un Sistema Cooperativo Multi-Robot de construcción impresa.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Investigar y analizar diferentes tipos de estructuras y mecanismos que se puedan adaptar a los sistemas de la estructura móvil giratoria.
2. Establecer y definir el espacio de trabajo de los robots, considerando las libertades y restricciones que otorga el extrusor o boquilla de impresión.
3. Verificar la configuración de los componentes de la estructura móvil de la viga giratoria mediante un análisis de esfuerzo estático.

### III. CAPÍTULO 1 |

## 1. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN |

El proyecto FONDECYT 1181015, liderado por el Dr. Rodrigo García Alvarado, fue ejecutado conjuntamente por académicos y profesores de la Universidad del Bío-Bío y la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). El equipo del Departamento de Arquitectura de la UTFSM; Luis Felipe González (coinvestigador), Eduardo Valenzuela y Francisco Quitral, diseñaron y montaron un prototipo a escala en el laboratorio de Sistemas Cooperativos Multi-Robots para la Construcción (SISCOM), en dependencias del Departamento de Ingeniería en Diseño y con el apoyo del Departamento de Obras Civiles.

Esta memoria para optar al título de Ingeniero en Diseño de Productos se enmarca en la etapa de diseño del prototipo de la estructura móvil giratoria que sustenta el sistema Cooperativo Multi-Robot de construcción impresa. Este diseño se concentrará principalmente en el estudio y elaboración de modelos 3D para la propuesta de la estructura móvil giratoria. Adicionalmente se establecerá el rango del espacio de trabajo de los robots y se realizará una simulación del funcionamiento sincrónico de la estructura móvil giratoria con el Sistema Cooperativo Multi-Robot

para verificar la dinámica del funcionamiento y comprobar su coherencia y simultaneidad.

## IV. CAPÍTULO 2 |

## 2. CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROYECTO |

En el escenario actual de competencia globalizada de alta demanda en el desarrollo tecnológico, manufacturera e innovación, las principales industrias se han visto forzadas a reconfigurar sus procesos. La industria 4.0 y la manufactura inteligente son parte de esta revolución tecnológica-industrial (Ynzunza, Izar, & Bocarando, 2017).

Esta nueva etapa llamada Industria 4.0 y su casi-sinónimo Cuarta Revolución Industrial, que referencia una hipotética cuarta mega etapa de la evolución técnico-económica de la humanidad se caracteriza por, la automatización y digitalización de los procesos, el uso de las tecnologías de la electrónica y de la información en la manufactura (Sommer, 2015), lo que nos lleva al desarrollo de procesos de fabricación donde se priorice la capacidad de interacción e intercambio de información entre humanos y máquinas (Roblek, Meško, & Krapež, 2016).

### 2.1. FABRICACIÓN DIGITAL

Hoy en día podemos encontrar y disponer de diversos equipos de fabricación de elementos

materiales que se pueden controlar y programar por computadora a través de información digital, este sistema integrado, asistido por computadora es lo que actualmente conocemos como fabricación digital.

La fabricación digital se define como “procesos asistidos por computadora que manipulan material mediante sistemas sustractivos o aditivos” (Seely, 2004). Los sistemas sustractivos extraen material y se asocian a las máquinas de control numérico (CNC, en inglés, computer numerical control) y los sistemas aditivos solidifican material y se vinculan a las máquinas de prototipo rápido (RP, en inglés Rapid Prototyping) (García, 2011). La diferencia fundamental entre estos dos sistemas es que en los procesos CNC se crean objetos eliminando material (sustractivo), mientras que en los procesos RP se crean objetos agregando material y construyéndolos capa por capa (aditivo). Algunos ejemplos de procesos CNC son el fresado, el corte por chorro de agua y el corte por láser. Los procesos de RP incluyen impresión tridimensional, estereolitografía y modelado por deposición fundida (Seely, 2004).

A pesar de que la fabricación digital, pareciera que utiliza tecnologías aparentemente modernas, no es tan nueva como parece, su origen se remonta a finales del siglo XX como resultado de la convergencia de las tecnologías de la computación y las de la maquinaria de control numérico (NC). Entre las décadas de 1970 y 1980, con el abaratamiento de los ordenadores (hito del IBM PC de 1981), el desarrollo de software CAM y la integración de hardware y software con maquinaria CNC (computer numerical control), se consolidan las prácticas de CAD/CAE/CAM (Computer Assisted Design / Engineering / Manufacturing), particularmente en las industrias aeroespacial, naval y automovilística. Posteriormente, en la década de 1990 se inicia la aplicación del CAD/CAE/CAM en el campo de la arquitectura y la edificación (Pérez de Lama Halcón, Gutiérrez de Rueda García , Sánchez-Laulhé Sánchez de Cos, & Olmo Bordallo, 2011).

Desde entonces, la fabricación digital ha ido incorporando nuevas técnicas, herramientas de digitalización y diseño computacional, para adaptarse a diversas industrias y aportar en el desarrollo e innovación de estas, como lo

podemos ver en los campos de aplicaciones biomédicas, moda de vestuario, construcción, manufactura, gastronomía, aeroespacial, automóvil, entre otras. Gracias a la integración de las recientes tecnologías, la fabricación digital se ha vuelto indispensable en las industrias para experimentar con nuevos procesos de fabricación, disminuyendo tiempos y costos.

Para la relevancia de esta tesis, el sistema de fabricación digital en el que se centrará es el sistema aditivo, específicamente relacionado a las máquinas de impresión 3D para ejecutar construcciones arquitectónicas.

## 2.2. FABRICACIÓN ADITIVA / IMPRESIÓN 3D

La fabricación aditiva (AM, en inglés, Additive Manufacturing) es el nombre técnico que engloba todas las tecnologías de impresión 3D, se trata de la fabricación de objetos o piezas tridimensionales por aportación de material en vez de sustracción. En impresión 3D, partiendo por un archivo digital (modelo 3D), se utilizan diferentes procesos aditivos en los que se agregan capas sucesivas

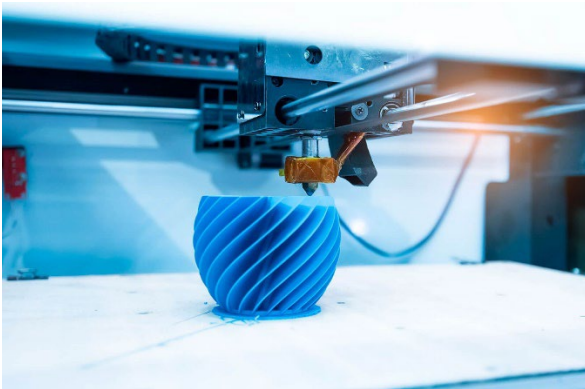
de material en superficies puntuales, lineales o planas para crear un objeto tangible (Jorquera Ortega, 2016).

Una de las mayores ventajas y particularidades de la fabricación aditiva es su libertad y versatilidad en el proceso de construcción, derribando casi todas las barreras y limitaciones que presentan las tecnologías de fabricación tradicional. Una impresora 3D es una herramienta capaz de construir geometrías complejas con alta precisión y la misma facilidad y esfuerzo que requiere una geometría sencilla. Además, proporciona un máximo ahorro de material, flexibilidad y personalización en el diseño de objetos.

Se hace necesario entonces clasificar los sistemas aditivos, los cuales se pueden catalogar según el proceso y material que se utilice para la fabricación de un objeto. La clasificación más clara de los sistemas aditivos es por procesos, rescatando las clasificaciones propuestas por Espinel (2015), dividiéndolos de la siguiente manera:

1. Sinterizado Láser Selectivo (SLS)

2. Estereolitografía (SLA)
3. Modelado por Deposición Fundida (MDF) (FDM: Fused Deposition Modelling)
4. Impresión 3D por inyección de tinta (3D inkjet printing)
5. Inyección de fotopolímero (Multijet/Polyjet Printing)



*Figura 1: Impresora 3D de modelado por deposición fundida (Fuente: <https://innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/fdm-modelado-por-deposicion-fundida/>).*

Siendo el proceso de modelado por deposición fundida uno de los más conocido y utilizados en la actualidad (figura 1), se ha visto una creciente implementación de máquinas para la impresión 3D de prototipado rápido en las diferentes industrias, debido a su sistema de extrusión

permite trabajar con materiales de diversas características y propiedades mecánicas, estos materiales se verán condicionados al tipo de impresora y especificaciones físicas y mecánicas requeridas del objeto a fabricar. Algunos ejemplos de materiales para impresoras 3D pueden ser desde los termoplásticos (PLA, ABS, PETG, etc.), polvos, metales, resinas, entre otros.

### 2.2.1. PROCESO BÁSICO DE IMPRESIÓN 3D

Al utilizar métodos de fabricación digital, en el proceso de elaboración de un objeto, es casi inexistente la manipulación de la pieza por parte del usuario mientras la máquina esta interactuando con el material. Todos los métodos comienzan cuando el usuario configura un archivo en la computadora y termina cuando envía el archivo a la máquina. El usuario tiene diferentes niveles de control sobre la manipulación del material durante la configuración de la máquina, pero una vez que se ha enviado el archivo, el usuario puede hacer poco más que mirar y estar pendiente de si ocurre un error en el proceso de

fabricación para intervenir rápidamente. Sin embargo, en la actualidad, se han implementado unas herramientas y tecnologías en las impresoras 3D, permitiendo al usuario intervenir durante el proceso de impresión mediante la variación de parámetros como la velocidad de impresión y temperatura de extrusión. También, algunas de las impresoras 3D han incorporado sistemas de alerta de fallas y/o cámaras, para que el usuario pueda ver el objeto que está imprimiendo desde su smartphone sin necesidad de estar en el mismo lugar y si ocurre alguna falla puede detener la impresión remotamente.

Para fabricar un objeto en una impresora 3D, inicialmente se debe crear un modelo digital o modelo 3D de la pieza que se quiera prototipar, este archivo, normalmente se realiza con un software llamado CAD (Diseño Asistido por Computadora), luego el modelo 3D se debe exportar, generalmente en formato STL, el cual contiene toda la información geométrica necesaria para representar el modelo digital y que la impresora puede interpretar para producir el objeto. STL es el formato que se creó para el primer proceso comercializado, la

estereolitografía (stereolithography), por eso se utilizan las siglas STL. Es el archivo adoptado como estándar por todos los sistemas de impresión 3D y se caracteriza porque el modelo está compuesto por caras triangulares. El archivo STL contiene las coordenadas de los vértices y la normal de la cara, que es lo que indica hacia donde está mirando el objeto (delimita lo que sería la cara exterior y la interior) (Espinel Velasco, 2015). Por otro lado, es importante mencionar que cuando se quiere fabricar un objeto dimensionalmente mayor que las dimensiones de trabajo de la impresora, se debe realizar un corte del archivo STL en diferentes bloques, este procedimiento te permite la fabricación por partes.

Para proceder a la impresión se debe preparar la impresora, ya sea colocado o cambiando el material de impresión que necesite, si es necesario y la impresora no cuenta con una calibración automática, se debe calibrando la superficie de impresión. Cuando la impresora 3D esté lista iniciará el proceso de impresión y fabricación del modelo físico capa por capa, en este momento el usuario solo deberá esperar el resultado, sin embargo, es importante siempre

estar atento a la impresora 3D durante el proceso de impresión, para actuar e intervenir si se presenta algún problema en el proceso.

Finalmente, cuando termina el proceso de impresión, se procede a realizar una limpieza y acabado del objeto impreso, quitando la pieza de la impresora 3D y desprendiendo la plataforma de impresión (“cama”), además se deben eliminar las partes adicionales que se pudieron crear al momento de imprimir la pieza como lo son los soportes de impresión, los cuales actúan como puntos de tensión para evitar que la pieza colapse y se desprenda hacia abajo.

## 2.2.2. IMPACTO EN LA SOCIEDAD

En la actualidad la impresión 3D es una de las tecnologías más prometedoras y ha ido creciendo fuertemente en diferentes industrias, tal como lo mencionan Fressoli & Smith (2015), esta tecnología de fabricación digital promete generar una tercera revolución industrial con profundas consecuencias para la manufactura, el comercio y

el consumo. Debido a que están surgiendo constantemente nuevas aplicaciones para este sistema de impresión, además de materiales novedosos que se adaptan al proceso de fabricación aditiva. Uno de los principales hechos que impulsaron la accesibilidad de esta tecnología se atribuye a la expiración de patentes anteriores, lo que ha dado paso a los fabricantes para desarrollar nuevos dispositivos de impresión 3D (Ngo, Kashani, Imbalzano, Nguyen, & Hui, 2018).

Las tecnologías aditivas de prototipado rápido han pasado de ser exclusivamente de uso industrial a ser una tecnología disponible para todo tipo de persona, gracias a los desarrollos recientes se han reducido los costos de adquisición de las impresoras 3D y sus materiales de filamento de impresión, además cada vez se hace más presente la difusión por parte de industrias, universidades y espacios como FabLabs, que facilitan el acceso y popularizan estas tecnologías de fabricación (Silva, Jeronymo, & Barata, 2019).

El creciente interés por la utilización y adaptación de sistemas de impresión 3D ha provocado un

incremento continuo en las investigaciones relacionadas este método de fabricación, lo que ha generado comprender y eliminar algunas restricciones que impedían el uso de esta tecnología. Este hecho ha permitido grandes avances científicos en diferentes industrias mejorando la calidad de vida de las personas y atribuyendo a las empresas en una disminución de tiempo en generación de prototipos de prueba, lo que repercute en una reducción de los costos de producción.

### 2.3. IMPRESIÓN 3D EN LA CONSTRUCCIÓN / CONSTRUCCIÓN IMPRESA

La industria de la construcción es uno de los sectores más grandes de la economía mundial, Sanjayan & Nematollahi (2019) afirman que los gastos relacionados a la construcción a nivel mundial son de \$ 10 billones de dólares equivalentes al 13% del PIB. A pesar de los grandes gastos relacionados a la industria, presenta ganancias de productividad bajas

comparadas con otros sectores y no satisface su demanda mundial.

Desde el descubrimiento del hormigón en el siglo XIX, muchos investigadores han intentado la automatización de la construcción con este material sin tener mucho éxito. Uno de estos inventores fue Thomas Edison, quien creo una máquina para construir casas de hormigón de una sola vertida y patentó su idea fallida en 1917 (Sanjayan & Nematollahi, 2019). Desde entonces se han realizado muchos avances tecnológicos que podrían impactar en la industria de la construcción sobre todo con la utilización del hormigón, ya que, aunque parezca un material de construcción simple, presenta muchos desafíos al momento de utilizarlo y adaptarlo a sistemas de bombeos y fabricación aditiva.

En la industria de la construcción se está en constante búsqueda de optimizar y disminuir los costos en el proceso de edificación, sobre todo en la construcción con hormigón que sigue siendo laboriosa, costosa y muy propensa a producir accidentes. Es por ello, que la industria ha buscado implementar nuevas tecnologías de

impresión 3D en hormigón. Como se mencionó en el capítulo anterior, la tecnología de impresión 3D tiene un alto potencial de aplicaciones en diferentes industrias, gracias a su versatilidad permite personalizar y adaptar cualquier tipo de diseño, cuyo desarrollo en la construcción podría proporcionar condiciones de trabajo más seguras, disminuir los costos de mano de obra y proporcionar libertad de diseños arquitectónicos fomentando la innovación (Khan, 2020).

La construcción impresa se podría definir como el proceso de fabricación que unifica capas de material para crear edificaciones o infraestructuras a partir de un modelo digital 3D. En comparación con los procesos de construcción convencionales, Sanjayan & Nematollahi (2019) aseguran que la aplicación de técnicas de impresión 3D con hormigón en la construcción, ofrecen muchas ventajas como:

1. Reducción en costos de construcción al eliminar encofrados.
2. Disminución de accidentes laborales al eliminar trabajos peligrosos (como,

trabajar en alturas), otorgando mayor seguridad en el espacio de construcción.

3. Creación de nuevos puestos de trabajo con alto nivel tecnológico, al ofrecer unas capacitaciones para la utilización de estas tecnologías.
4. Reducción en el tiempo de construcción, las máquinas podrían operar en el sitio a una velocidad constante.
5. Disminuye la posibilidad de errores, ya que otorga mayor precisión en la deposición del material.
6. Sistema de fabricación más sostenible, gracias a la reducción de desperdicios como encofrado.
7. Mayor libertad arquitectónica, lo que permitiría diseños más sofisticados con fines estructurales y estéticos.
8. Desarrollar el potencial de elementos estructurales multifuncionales, a través de geometrías complejas.

Como se menciona anteriormente, la construcción impresa rompe con la ortogonalidad impuesta por el sistema constructivo existente, ofreciendo una oportunidad de investigar y experimentar con

diferentes diseños de volúmenes, considerando la lógica de las impresoras 3D, se propone que las estructuras impresas tendrían formas tridimensionales fuera de lo común, permitiendo lograr modelos y edificaciones más eficientes en la optimización de material, generar diferentes texturas que podrían soportar condiciones sísmicas y acercarnos a conceptos bioclimáticos más sustentables.

Cabe mencionar que el sector de la construcción es considerado una de las principales fuentes de contaminación medioambiental a nivel mundial, ya que produce enormes efectos negativos en el medioambiente tanto directa como indirectamente (Enshassi, Kochendoerfer, & Rizq, 2014). Uno de los mejores aportes que podría tener la construcción 3D, es que permitiría implementar estrategias para causar menor impacto ambiental, a través del desarrollo, planificación previa en el diseño digital.

A pesar de los avances que se han logrado en la impresión 3D con hormigón aún quedan muchas variables que parametrizar como las velocidades de avance del extrusor, la presión con la que sale

el material del sistema de extrusión, las limitaciones geométricas de las máquinas que se utilizan, la estabilidad estructural durante la impresión y después de la impresión, entre otras que puedan ir surgiendo en los procesos de investigación.

### 2.3.1. ANTECEDENTES DE LA IMPRESIÓN 3D EN LA CONSTRUCCIÓN.

Tradicionalmente, la industria de la construcción se ha basado en dibujos 2D y sus especificaciones para transmitir las propiedades de los materiales, puntos de carga e información de ubicaciones, utilizando maquetas a escala de la edificación, que generalmente están construidas con materiales como maderas, cartulinas, cartón, entre otros, con el fin de evaluar el proyecto en el proceso de diseño. En la actualidad, se han ido incorporando nuevas tecnologías en el proceso de creación y diseño de una edificación, cada vez se está viendo una mayor utilización de herramientas de modelación y representación 3D para crear maquetas digitales con mayores

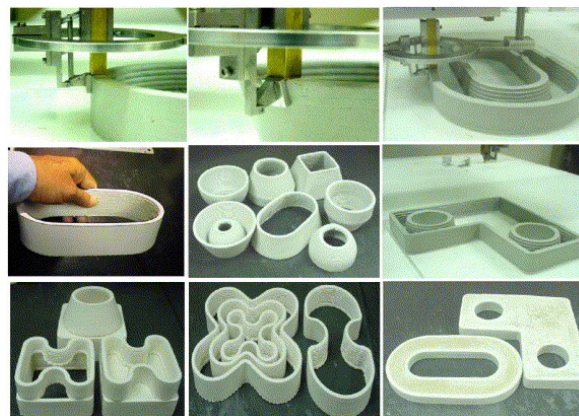
detalles, incluso se han vuelto indispensables a la hora de mostrar un proyecto, ya que permite mostrar de manera más completa el diseño, las formas, estructuras, análisis de esfuerzos y render de la edificación en su contexto, permitiendo una optimización en la planificación de su construcción.

En esta constante búsqueda de automatización por parte de la industria de la construcción, se sumergen en el mundo de la impresión 3D, la cual tendría grandes beneficios para el sector y revolucionaría la forma de construir viviendas y edificaciones, es importante destacar que ya existen numerosos ejemplos de automatización en las obras de construcción, como albañilería automatizada, hormigón proyectado y técnicas de prefabricado (Lim, y otros, 2012). Sin embargo, la impresión tridimensional de viviendas se ha vuelto el centro de atención para esta industria, debido al potencial que esta tecnología presenta para crear casas en diferentes partes del mundo o inclusive en la luna o el planeta marte, sin la necesidad de estar presente en el proceso de construcción.

Como se mencionó anteriormente el interés y los intentos de automatizar la construcción están desde hace mucho tiempo, sin embargo, una de las primeras investigaciones en intentar utilizar la fabricación aditiva en el proceso de construcción de un muro fue realizada por Joseph Pegna (1997), quien produjo pequeñas estructuras de mampostería mediante la deposición alternada de capas delgadas de arena y cemento Portland, utilizando vapor como agente aglutinante. El trabajo realizado por Pegna fue muy prometedor demostrando que la implementación de la fabricación aditiva en los procesos de construcción podría tener un gran potencial económico en cuanto al ahorro que se produce al reutilizar material no utilizado, además demostró que los principios de Rapid Manufacturing se pueden aplicar a los materiales de construcción (Buswell, Soar, Gibb, & Thorpe, 2007).

En 1998 en la Universidad del Sur de California, se encontraba el Dr. Behrokh Khoshnevis creando y patentando una nueva tecnología de fabricación aditiva llamada Contour crafting, este método utiliza el control por computadora y unas paletas

en la zona que deposita material, se explota la capacidad de formación de superficies niveladas, planas, precisas, suaves y con formas libres (Khoshnevis & Dutton, Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials, 1998). Es así como el equipo de Khoshnevis comenzó a incursionar con la impresión 3D en la industria de la construcción, logrando en el año 2004 construir los primeros muros de hormigón impresos en 3D (figura 2), a pesar de que los muros estaban a escala, les permitió abordar y explorar en la integración automatizada de refuerzos modulares, alicatado automatizado de suelos y paredes, servicios de plomería automatizada, cableado automatizado de líneas eléctricas y de comunicación y pintura automatizada, para Khoshnevis todas estas variables debían estar consideradas e integradas dentro de todo el proceso continuo de construcción (Khoshnevis, Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies, 2004). Esta investigación revolucionó el mundo de la construcción e incentivo a invertir en más investigaciones a nivel mundial.



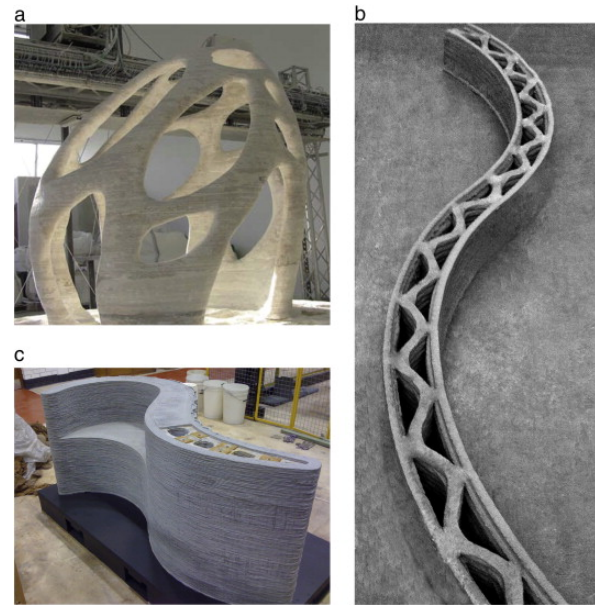
*Figura 2: Tecnología CC en funcionamiento y muros representativos 3D rellenos de hormigón (Fuente: Khoshnevis, Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies, 2004).*

Es así como se inició la carrera por el desarrollo de tecnologías de fabricación aditiva en la construcción, era difícil pensar en la impresión 3D de grandes estructuras y edificaciones, ya que en ese entonces solo se disponía de máquinas de impresión 3D para prototipar objetos a menor escala. Recién en el año 2012 se pudo demostrar técnicas y métodos de impresión 3D aplicables a la construcción. Así lo asegura Lim y otros, hasta ese entonces existían tres procesos de manufactura aditiva enfocadas en la construcción

a gran escala y a la arquitectura en dominio público, llamados Contour Crafting, D-Shape (monolita) y Concrete Printing, estos tres procesos demostraron la fabricación exitosa de estructuras de tamaños significativos y probaron ser adecuados para aplicaciones en la construcción (figura 3), a pesar de ser similares en cuanto al principio de fabricación aditiva estos procesos estaban diseñados para diferentes aplicaciones y materiales, lo que significó que tengan distintas ventajas y desventajas en su aplicación, proporcionando la oportunidad de perfeccionamiento en las diferentes técnicas.

Desde entonces, se han realizado muchas mejoras utilizando tecnologías de fabricación aditiva en la construcción, logrando que esta innovación sea capaz de construir una casa en solo 20 horas, con una máquina que consiste en un robot que se mueve en diferentes direcciones y es capaz de distribuir el material de construcción y fabricar una casa capa tras capa (Mohammed Shakir, 2019). Como lo demuestra la empresa China Winsun, quienes el 2014 fueron capaces de construir alrededor de 10 casas en solo 24 horas con materiales de construcción reciclados,

utilizado una gigantesca impresora 3D fabricada por ellos mismos de 150 metros de largo, 10 de ancho y 6,6 metros de alto (Aldama, 2014).



*Figura 3: Ejemplos de procesos de construcciones a gran escala, (a) D-Shape, (b) Contour Crafting y (c) Concrete Printing (Fuente: Lim, y otros, 2012).*

Actualmente la tecnología de fabricación digital está evolucionando a un ritmo cada vez más rápido y seguirá así en el futuro, constantemente están surgiendo avances a nivel de sistema de bombeo de concreto o extrusión, nuevas mezclas de materiales para la construcción, incorporación

de refuerzos, utilización de robot cooperativos, entre otros.

### 2.3.2. TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D EN LA CONSTRUCCIÓN

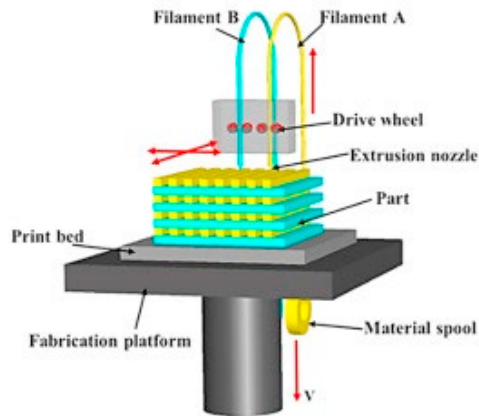
La fabricación aditiva o additive manufacturing (AM) agrupa distintas tecnologías de fabricación que poseen cierta característica en común: El proceso inicia con información digitalizada de una pieza y se fabrica mediante la aportación de material en lugares precisos (generalmente capa sobre capa) y sin necesidad de alguna otra herramienta. El termino AM reúne diferentes tecnologías nuevas en la industria y como tal requieren de normalización para proporcionar directrices y especificaciones que se puedan utilizar de manera fija, básicamente estas tecnologías se dividen en función al cómo se forman o unen las capas de aditivos. Cabe mencionar, que tanto la norma UNE-EN ISO 17296-2:2017 (ISO 17296-2:2015) como en la UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 (ISO/ASTM 52900:2015) concuerdan en normalizar siete categorías de procesos de fabricación aditiva, que

son: Binder Jetting (inyección aglutinante), Directed Energy Deposition (deposición de energía focalizada), Material Extrusion (extrusión de material), Material Jetting (inyección de material), Powder Bed Fusion (fusión de lecho de polvo), Sheet Lamination (laminado de hojas) y VAT Photopolymerisation (fotopolimerización en tanque o cuba) (Pérez-Pérez, Sebastián, & Gómez-García, 2018). De estos procesos dos se utilizan en la construcción impresa: extrusión de material e inyección de material.

#### **SISTEMAS EN LA CONSTRUCCIÓN IMPRESA BASADOS EN EXTRUSIÓN DE MATERIAL**

La tecnología más utilizada en el proceso de fabricación aditiva por extrusión de material es el modelado por deposición fundida (FDM, Fused Deposition modeling). Las impresoras por FDM son las más utilizadas para fabricar compuestos poliméricos, utilizando materiales como PLA, ABS y PC debido a su baja temperatura de fusión, en la figura 4 se muestran los principales componentes de estas impresoras 3D. El proceso de funcionamiento de esta tecnología se logra mediante la extrusión controlada de un filamento continuo de un termoplástico, a través de la

boquilla que se calienta, funde el material para facilitar la distribución de este y se extruye capa por capa, donde las capas se fusionan y luego el material se solidifica inmediatamente después de ser colocado con la temperatura ambiente (Wang, Jiang, Zhou, Gou, & Hui, 2017).



*Figura 4: Representación esquemática de las principales componentes en el proceso de extrusión de material (Fuente: Wang, Jiang, Zhou, Gou, & Hui, 2017).*

Cuando nos referimos a los sistemas de impresión 3D en la construcción basados en el proceso de fabricación aditiva por extrusión de material podemos encontrar dos métodos:

## **Contour Crafting (CC)**

Como se mencionó anteriormente, el método Contour Crafting fue creado por Behrokh Khoshnevis. Sin embargo, Sanjayan & Nematollahi (2019) afirman que esta tecnología de fabricación aditiva patentada ha estado en desarrollo durante casi 15 años, en los cuales se ha ido perfeccionando. La característica clave de este método es la extrusión de un hormigón a base de cemento contra dos paletas controladas por computadora, que en su defecto actúan como dos superficies planas y sólidas, con el fin de crear un objeto de áreas excepcionalmente precisas, suaves, lisas y de forma libre (figura 5) (Khoshnevis & Dutton, Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials, 1998). Al igual que en la fabricación aditiva por extrusión de material, la estructura impresa se ira formando por medio de la deposición de una capa sobre otras hasta terminar la fabricación del objeto.

Este método actualmente posee un cabezal de extrusión que es capaz de depositar material para crear una pared estructural de ancho completo. La tecnología Contour Crafting permite investigar una variedad de materiales (como mortero, hormigón, pastas de cemento y hormigón reforzado con fibra), ya que permite extruir pasta de hormigón o tierra mediante el uso de boquillas más grandes y aumentando la presión de extrusión (Sanjayan & Nematollahi, 2019).

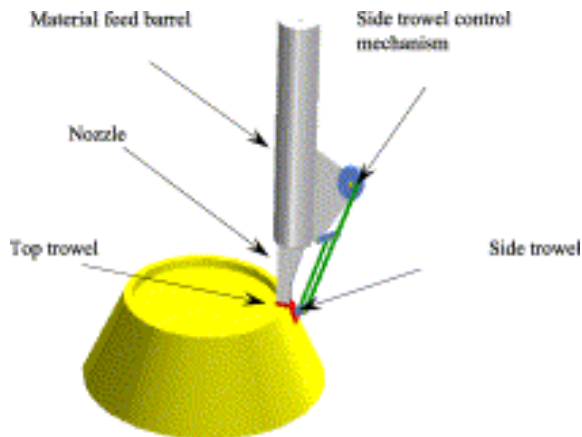


Figura 5: Proceso de fabricación con CC (Fuente: Khoshnevis, *Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies*, 2004).

Cabe mencionar que CC es un método híbrido que combina el proceso de extrusión para formar las superficies o paredes del objeto y el proceso de llenado (vertido o inyección) para construir el núcleo del objeto (figura 6). Gracias a esta característica del método CC, se pueden utilizar varios materiales tanto para superficies exteriores como interiores, abriendo la oportunidad a combinaciones de materiales que reaccionen químicamente entre sí para dar una propiedad física específica a los muros, ya que los materiales pueden extruirse a través del sistema de boquillas CC y mezclarse en el cilindro de la boquilla inmediatamente antes de la deposición. Además, la cantidad de material que saldrá de la boquilla puede controlarse por computadora y correlacionarse con varias regiones en la geometría de la estructura (Tibaut, Rebolj, & Nekrep Perc, 2014). Gracias a la dualidad del sistema, permite la incorporación de refuerzos, vigas, tuberías, cableado eléctrico, entre otros.

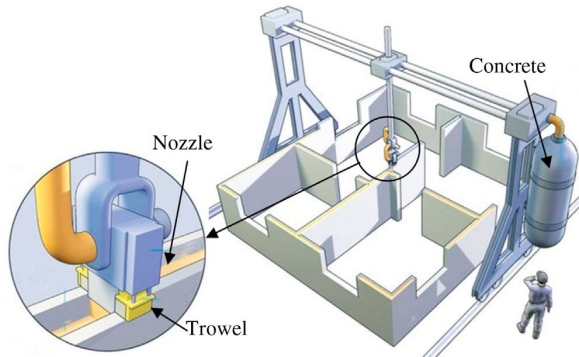


Figura 6: Impresión de hormigón 3D por CC (Fuente: Sanjayan & Nematollahi, 2019).

Algunas de las ventajas importantes del método Contour Crafting en comparación con otros procesos de fabricación aditiva, son una mejor calidad de la superficie, una mayor velocidad de fabricación y una mayor variedad de materiales (Khoshnevis, Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies, 2004). Lo que permite fabricar estructuras a gran escala rápidamente capa por capa, reduciendo drásticamente los costos de construcción de una edificación al minimizar las horas de trabajo necesarias para terminar la fabricación, lo que lleva a aumentar la velocidad con la que se puede poner en venta la casa en el mercado. Además, el proceso de fabricación por

CC es mucho más seguro para los trabajadores de la construcción, ya que disminuye las técnicas tradicionales (Mathur, 2016).

### Concrete Printing

Al igual que CC, Concrete Printing también es un método que se basa en la extrusión de mortero de cemento. Esta tecnología fue desarrollada por el equipo de impresión en hormigón de la Universidad de Loughborough, UK. Esta tecnología se ha desarrollado con el fin de conservar la libertad de creación de figuras tridimensionales complejas sin encofrado, pero a su vez ofrece una menor resolución en la deposición de material, sin embargo, esto último permite un mayor control de las geometrías internas y externas. (Lim, y otros, 2012).

El proceso de impresión de este método comienza con la preparación de datos digitales de la pieza a fabricar, esta etapa es similar a otros procesos de prototipado rápido, donde se mapean las capas transversales del objeto a fabricar. Concrete Printing utiliza una sola boquilla de extrusión, lo que significa que solo se deposita el

volumen de material requerido para la construcción; sin embargo, el enfoque de una sola boquilla limita inevitablemente la tasa de deposición porque la boquilla debe atravesar toda el área de construcción (Lim, y otros, 2012).

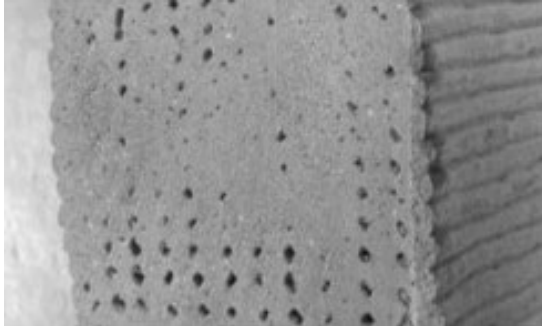
Debido a la naturaleza de impresión de Concrete Printing, produce un acabado acanalado característico debido a las nervaduras distribuidas capa por capa en el proceso de deposición del material para formar el objeto, el sistema de impresión se puede apreciar en la figura 7, este acabado se puede controlar y diseñar para aprovechar el efecto. (Lim, y otros, 2012)



*Figura 7: Objeto fabricándose con el método Concrete Printing (Fuente: Le, y otros, Mix design and fresh*

*properties for high-performance printing concrete, 2012)*

Es importante mencionar que es probable que las estructuras impresas con este método presenten capas anisotrópicas, lo que significa que su estructura y resistencia varían según el lado que se esté examinando, ya que debido a la deposición de filamentos de material se pueden formar huecos entre las uniones de cada capa y filamento, como se muestra en la figura 8, esta condición debilita la capacidad estructural. Además, las uniones entre filamentos, como entre capas, influyen en las propiedades de endurecimiento de los componentes del hormigón, lo que significaría una alta resistencia a la compresión y flexión (Le, y otros, Hardened properties of high-performance printing concrete, 2012).



*Figura 8: Huecos entre filamentos de hormigón impreso (Fuente: Le, y otros, Hardened properties of high-performance printing concrete, 2012).*

Algunas de las ventajas potenciales que podría tener este proceso de impresión 3D con hormigón, las señalan Le y otros en *Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete* (2012), las ventajas son:

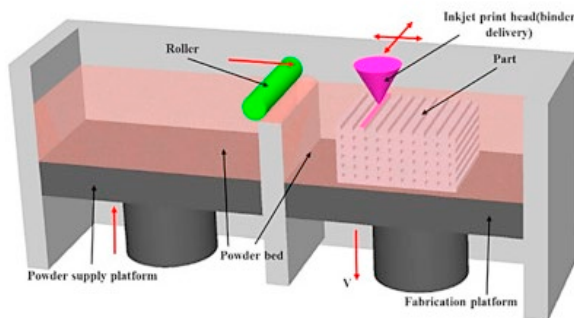
1. La integración de servicios mecánicos y eléctricos dentro de los huecos formados en la estructura por el diseño de impresión podría optimizar el uso de materiales y el trabajo en el lugar.
2. Una mejor precisión en la deposición del material de construcción puede producir nuevos acabados tanto internos como externos.

3. La creación de unidades integradas reducirá los detalles de la interfaz y, por lo tanto, la probabilidad de costosos trabajos de reparación.
4. La combinación de un proceso de construcción en capas con técnicas de modelado sólido podría proporcionar una mayor libertad de diseño.

#### SISTEMAS EN LA CONSTRUCCIÓN IMPRESA BASADOS EN INYECCIÓN AGLUTINANTE

Esta tecnología de impresión 3D se basa en el procesamiento de polvos y se caracteriza por la utilización de un material polvo-líquido, esto quiere decir que en el proceso de impresión se utilizan dos materiales, uno a base de polvo y un agente aglutinante/adhesivo líquido. En la figura 9 se muestran los principales componentes de una impresora 3D por inyección aglutinante. El proceso de funcionamiento de esta tecnología inicia esparciendo polvos en la plataforma de construcción, el polvo se coloca en capas una encima de la otra y luego se unen selectivamente con el aglutinante líquido que se extiende a través

de la boquilla, en la cámara de construcción, después de la formación del patrón 2D deseado, la plataforma desciende y extiende la siguiente capa de polvo, el polvo se esparce en capas iguales y el aglutinante se aplica a través de la boquillas como chorro que pegan las partículas de polvo en forma de un objeto 3D programado. Este proceso se repite hasta terminar la pieza deseada, una vez finalizado el proceso de impresión se debe retirar el polvo sin aglutinante, el cual se utilizará para imprimir en 3D el siguiente objeto (Mathur, 2016).



*Figura 9: Representación esquemática de las principales componentes en el proceso de inyección aglutinante (Fuente: Wang, Jiang, Zhou, Gou, & Hui, 2017).*

Cuando nos referimos al sistema de impresión 3D en la construcción basado en el proceso de fabricación aditiva por inyección aglutinante nos encontramos con un solo método:

## **D-Shape**

El método D-Shape en la construcción impresa, fue introducido por Enrico Dini en Italia, quien fue el fundador e inventor de este sistema, el cual utiliza capas de polvo y adhesivo en lugar de la pasta similar al hormigón o cemento utilizadas por los otros métodos. Esta tecnología al igual que las impresoras 3D por inyección aglutinante, utiliza un proceso de deposición de polvo, mediante el cual el polvo se endurece selectivamente aplicando un aglutinante. El proceso de fabricación comienza depositando una capa de material (arena) de construcción con el grosor deseado, se compacta y luego el cabezal de impresión compuesto por las boquillas montadas en un marco de pórtico se mueve a través de la superficie y depositan el aglomerante en la arena de acuerdo con la sección transversal del modelo digital (figura 10). Los aglutinantes se depositan solo en lugares donde el material de construcción debería solidificarse y el resto se mantiene libre en el

espacio de construcción. Una vez finalizado el proceso de construcción de la pieza, se extrae la arena restante que no fue adherida en la impresión (Sanjayan & Nematollahi, 2019).



Figura 10: Máquina D-Shape con cabezal de impresión compuesto por 300 boquillas (Fuente: <https://d-shape.com/what-is-it/the-process/the-concept/>).

Este sistema de construcción automatizada, que utiliza arena y aglutinante para crear estructuras de forma libre similares a la piedra, permite construir edificios de arenisca de tamaño completo sin intervención humana (Tibaut, Rebolj, & Nekrep Perc, 2014). Un ejemplo de construcción de una casa por D-Shape, se puede apreciar en la figura 11.



Figura 11: Casa fabricada con el proceso D-Shape (Fuente: <https://d-shape.com/what-is-it/the-process/the-concept/>).

El sistema tiene muchas ventajas sobre los procesos formativos tradicionales (uso de encofrado con hormigón), así como otros procesos de construcción impresa. Puede utilizar cualquier material similar a la arena, por lo que produce pocos residuos, ya que el material restante, no adherido se puede reutilizar. Los materiales utilizados son todos de origen natural, por lo que requieren de muy poco procesamiento antes de su uso. Gracias a la naturaleza del

material, el resultado final de la pieza impresa en 3D es muy similar a la piedra natural, logrando este acabado en tiempos de fabricación mucho más cortos (Tibaut, Rebolj, & Nekrep Perc, 2014).

## **COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA CONSTRUCCIÓN IMPRESA**

Si bien los métodos de construcción impresa se basan en procesos de manufactura aditiva, es importante rescatar unos de los principales obstáculos que tienen estos procesos cuando se aplican en la construcción es la fabricación de soportes. Como se mencionó en la sección proceso básico de impresión 3D, en los procesos de fabricación aditiva tradicionales, las piezas pueden presentar secciones colgantes que requieren de superficies para que el material soporte su propio peso. Lim y otros (2012) establecen que estos soportes se pueden lograr de tres formas:

1. Se utiliza material de construcción para crear una estructura muy fina similar a un andamio que se rompe una vez que se termina la fabricación.

2. En impresoras 3D con dos extrusores se pueden utilizar dos materiales, el de construcción y uno que este destinado específicamente para la fabricación de soportes debido a que sus propiedades mecánicas y físicas lo hacen fácil de quitar.
3. En sistemas basados en polvo, el material no consolidado pasa a proporcionar soporte.

Ahora cuando hablamos de soportes en la construcción impresa, nos encontramos que actualmente el método Contour Crafting es capaz de producir elementos verticales principalmente en compresión, es decir, cuando se requiere construir una puerta o ventana, se coloca un elemento estructural horizontal (dintel) que libera un espacio entre dos apoyos y así poder seguir construyendo la pared encima. Por otro lado, tanto el método Concrete Printing como D-Shape requieren de soportes adicionales para construir voladizos y/o otras estructuras de forma libre. Como se mencionó D-Share al utilizar un proceso de fabricación aditiva a base de polvo, aprovecha el material no consolidado para soportes, gracias

al enfoque de este método se mantiene una simplicidad, ya que solo deben equilibrarse los grandes volúmenes de material no adherido con el área de construcción y luego retirar el material sobrante para revelar la pieza. Y Concrete Printing utiliza un segundo material para fabricar soportes, similar al proceso de impresión 3D de modelado por deposición fundida, la desventaja de este proceso para la construcción de soportes es que requiere de un dispositivo de deposición adicional, lo que se traduce en más instrucciones de mantenimiento, limpieza y control, además la estructura secundaria debe eliminarse en un proceso posterior a la fabricación de la estructura principal (Lim, y otros, 2012).

Las similitudes y diferencias se resumen en la figura 12, donde se hace énfasis a tres características de los métodos; Extrusion based (refiérase al sistema basado en extrusión), Single material (refiérase a la utilización de materiales de construcción tradicionales asociados a los métodos) y 3D (refiérase a la capacidad de fabricar estructuras de forma libre).

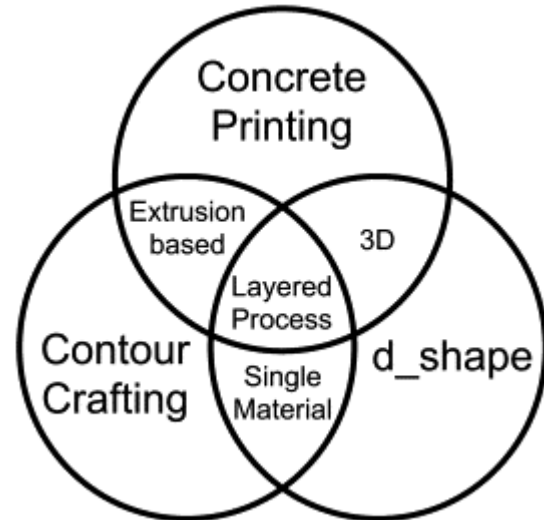


Figura 12: Similitudes entre los métodos de construcción impresa (Fuente: Lim, y otros, 2012).

### 2.3.3. CLASIFICACIÓN DE IMPRESORAS 3D SEGÚN ESTRUCTURA MECÁNICA

Actualmente, existen varios tipos de impresoras de construcción impresa, las cuales pueden tener fines académicos y/o comerciales, volviéndose fundamental conocer la estructura y forma de impresión de cada una de ellas, ya que cada

impresora tiene una lógica de fabricación distinta la cual sustenta y limita el diseño del objeto o estructura que se desea imprimir.

Se pueden distinguir cuatro categorías de sistemas de construcción impresas, según su estructura y volumen de impresión (figura 13), también conocidas como tipos de estructuras mecánicas de un robot: Cartesiano, cilíndrico, articulado y paralelo.

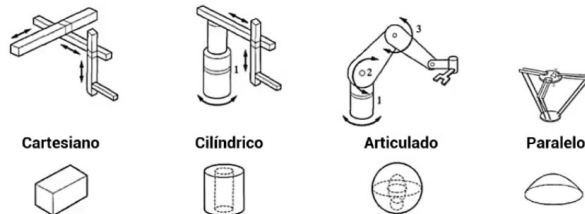


Figura 13: Sistemas de construcción impresa (Fuente: Seminario BIM y Construcción Impresa 3D, 2020).

### Sistema robótico móvil cartesiano o pórtico

El sistema cartesiano de construcción impresa es derivado del sistema de coordenadas cartesianas que se caracteriza por tener ejes lineales con tres grados de libertad (X, Y y Z) (Kampker, Triebs,

Kawollek, Ayvaz, & Hohenstein, 2019). Fundamentalmente este sistema está compuesto por un pórtico, donde los eslabones de la cadena cinemática del mecanismo se conectan por uniones prismáticas (traslacionales) orientadas cada una de ellas en los ejes X, Y y Z del sistema de coordenadas cartesiano, dando a la boquilla de extrusión tres grados de libertad y con una única orientación fija. La configuración geométrica de un sistema cartesiano tipo pórtico (figura 14) proporciona un espacio de trabajo con forma de prisma que está contenido totalmente por la estructura.

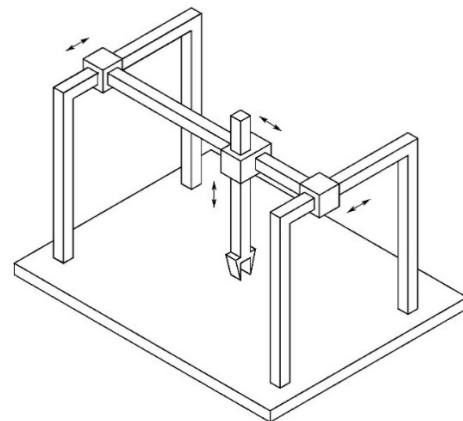


Figura 14: Sistema cartesiano tipo pórtico (Fuente: Siciliano, Sciavicco, Villani, & Oriolo, 2009).

Dentro de las ventajas que tiene este sistema, podemos destacar que promueve movimientos lineales por lo que permite crear estructuras rígidas con modelos cinemáticos simples, lo que se traduce como una mayor facilidad para crear modelos de edificaciones. Por otro lado, dentro de las desventajas nos encontramos con la necesidad de que el terreno de construcción deba proporcionar un espacio de trabajo mucho más grande debido al tamaño de la máquina, incluso para trabajos pequeños de volumen. Además, requiere de una superficie completamente plana para el montaje de la máquina en terreno, al igual que la superficie de impresión, si no la edificación podría quedar desnivelada.

Algunos ejemplos de soluciones utilizadas actualmente en proyectos académicos y/o comerciales, tenemos:

- Be More 3D es una empresa que ha desarrollado un sistema aporticado de impresión móvil, que se desplaza sobre unos carros con ruedas (figura 15). Este sistema utiliza el método Concrete Printing.

- Contour Crafting Corporation es una empresa que desarrolla construcción automatizada de varios tipos de estructura utilizando el método Contour Crafting, como podemos ver en la figura 16.
- D-Shape es una empresa creadora y desarrolladora del método de impresión D-Shape, en la figura 17 se muestra uno de sus proyectos fabricados con el sistema cartesiano de pórtico.



*Figura 15: sistema aporticado de impresión móvil (Fuente: <https://bemore3d.com/>).*

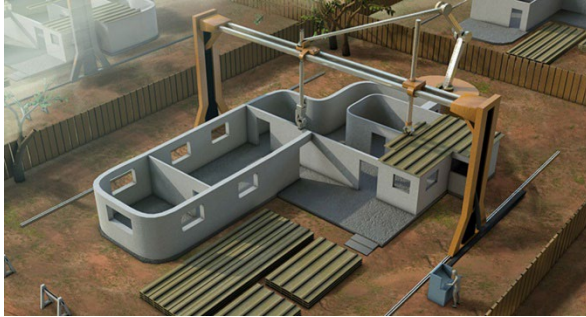


Figura 16: Proyecto de construcción de Contour Crafting (Fuente: <https://www.contourcrafting.com/building-construction>).



Figura 17: Monolite del Reino Unido (Fuente: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2013/01/D-Shape\\_printer](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/01/D-Shape_printer)).

### Sistema robótico móvil cilíndrico

El sistema Cilíndrico de construcción impresa está compuesto principalmente por una base que es

un eje central vertical rotatorio y un brazo en voladizo, la base permite que este brazo gire y las uniones prismáticas posibilitan la traslación de este en el eje Z y Y, como se muestra en la figura 18, dando a la boquilla de extrusión tres grados de libertad y una orientación fija. Debido a la estructura del sistema el espacio de trabajo posee una forma cilíndrica, la cual puede ser completa o incompleta dependiendo el grado de libertad de rotacional del eje central que sustenta al sistema.

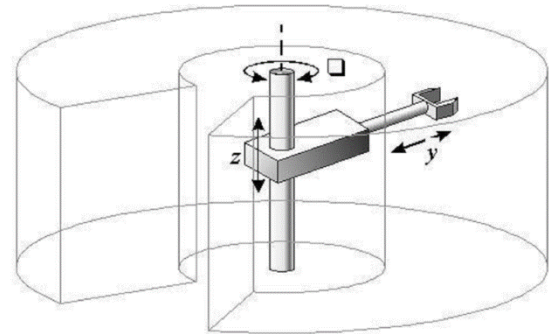


Figura 18: Esquema sistema cilíndrico y su espacio de trabajo (Fuente: <http://www.udesantiagovirtual.cl/moodle2/mod/book/tool/print/index.php?id=24911>).

Las ventajas que tiene este sistema son que posee un modelo cinemático simple, como la

máquina tiene solo un apoyo se necesita poco trabajo de suelo para nivelarla e instalarla. Por otro lado, sus desventajas son que posee un espacio de trabajo más restringido, ya que solo pueden imprimir a su alrededor, menos que se agregue un desplazamiento adicional montando la máquina a una superficie móvil.

Algunos ejemplos de soluciones utilizadas actualmente en proyectos académicos y/o comerciales, tenemos:

- WASP compañía italiana especializada en la fabricación de impresoras 3D, una de estas impresoras es la Crane WASP que utiliza el método Concrete Printing. Logrando imprimir desde muros rectos con empotrados a pequeña escala hasta edificaciones en revolución a gran escala (figura 19).
- Apis Cor es la empresa creadora de una impresora 3D de mortero de hormigón con sistema cilíndrico (figura 20), que utiliza el método Concrete Printing logrando mayor uniformidad entre las capas de impresión.

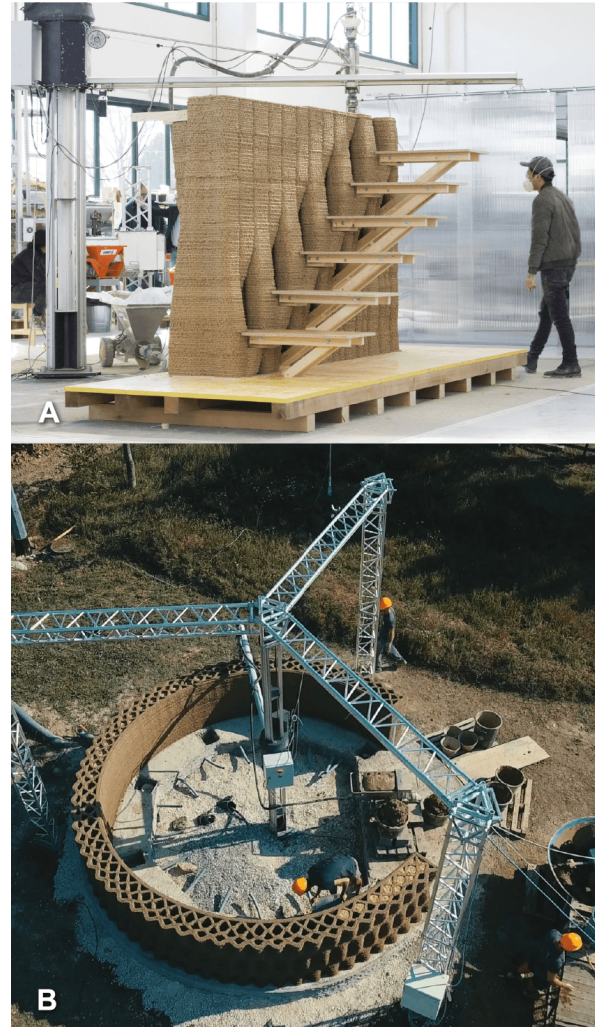


Figura 19: (A) Muro de tierra impreso en 3D con escalera empotrada y (B) Gaia casa impreso en 3D con materiales naturales (Fuente: <https://www.3dwasp.com/>).

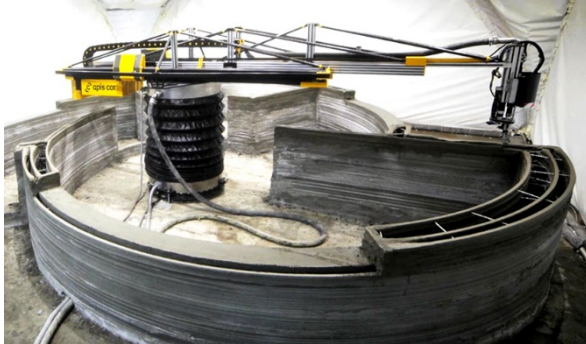


Figura 20: Casa residencial impresa en 3D por impresora cilíndrica (Fuente: <https://www.apiscor.com/gallery>).

### Sistema robótico movable Paralelo o Delta

El sistema paralelo de construcción impresa también conocido como sistema delta, está compuesto principalmente por tres brazos con articulaciones prismáticas o tres rotacionales concurrentes o tres sistemas de cable a tensión concurrentes. El esquema de movimiento de la máquina se muestra en la figura 21, este movimiento se puede dar de dos formas, que cada brazo se puede conectar mediante una unión prismática (traslacional) en dirección del eje vertical Z o por una unión de revolución (rotacional) en uno de los ejes horizontales X o Y entorno al eje vertical Z. Este sistema permite que la boquilla de extrusión tenga tres grados de

libertad de traslación con una única orientación fija. Por otro lado, debido a la composición de su estructura, el sistema alberga un espacio de trabajo con una forma semejante al hemisferio inferior de una esfera o a la forma de un paraguas invertido, este volumen de trabajo está contenido completamente por la estructura del sistema.

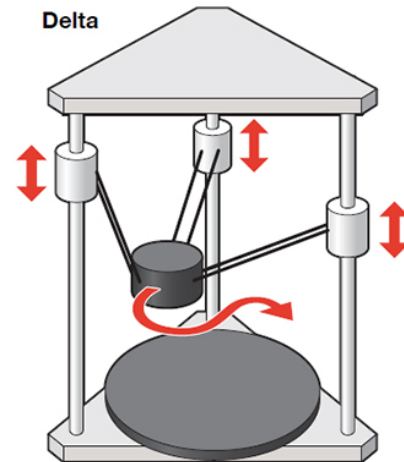


Figura 21: Esquema sistema delta (Fuente: PwC analysis).

Las ventajas que tiene este sistema son que permite un desplazamiento rápido de un punto a otro y no requiere de grandes preparaciones en la superficie de trabajo. Por otro lado, las desventajas son que los límites de fabricación

están definidos por el tamaño de la estructura, por lo que si se quieren fabricar grandes edificaciones es necesario un mayor espacio libre para su instalación y operación.

Algunos ejemplos de soluciones utilizadas actualmente en proyectos académicos y/o comerciales, tenemos:

- WASP compañía mencionada anteriormente, desarrolladora de la línea de impresoras Delta especializadas en la construcción impresa. La impresora Delta WASP 3MT CONCRETE (figura 22) utiliza el método Concrete Printing y permite generar estructuras de hormigón en una base desmontable.
- La misma compañía (WASP) desarrolla una impresora gigante basada en el sistema paralelo, llamada BigDelta (figura 23) que al igual que su otra impresora utiliza el método Concrete Printing, pero con materiales disponibles localmente y de bajo costo para la fabricación de viviendas sustentables.



Figura 22: Impresora Delta WASP 3MT CONCRETE  
(Fuente: <https://www.3dwasp.com/en/concrete-3d-printer-delta-wasp-3mt-concrete/>).

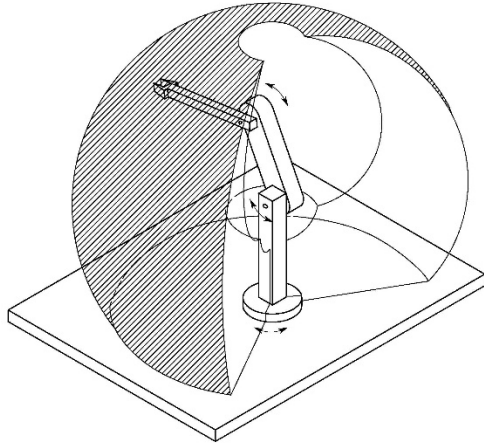


*Figura 23: Impresora gigante BigDelta de WASP (Fuente: <https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12m/>).*

### **Sistema robótico móvil articulado**

El sistema articulado de construcción impresa está compuesto principalmente por un brazo robótico con un sistema de alimentación para

mortero y una boquilla de extrusión. Los tres grados de libertad que posee son rotacionales dispuestos de forma tal que asemejan el movimiento del brazo de una persona, como se muestra en la figura 24 (Hernández Ordoñez, Ortiz Moctezuma, Calles Arriaga, & Rodríguez Portillo, 2015). La estructura y composición del sistema otorga la capacidad de tener tres grados de libertad en cuanto al desplazamiento y tres grados para la orientación de la herramienta, además la máquina puede tener una base móvil o estática otorgando un mayor volumen y accesibilidad de impresión. Por otro lado, posee un espacio de trabajo que se aproxima al volumen de una esfera, el cual puede ser una esfera completa o incompleta, este espacio de trabajo contiene de forma parcial o total a la estructura del sistema.



*Figura 24: Esquema del sistema articulado con su espacio de trabajo (Fuente: Siciliano, Sciavicco, Villani, & Oriolo, 2009).*

Las ventajas que tiene este sistema es que tiene una mayor flexibilidad de trabajo, se puede montar en diferentes tipos de estructuras y lograr múltiples configuraciones. Por otro lado, sus desventajas son que posee un espacio de trabajo reducido por lo que se hace indispensable utilizar plataformas o bases que permitan desplazar el sistema y así poder construir estructuras de mayor tamaño. Además, debido que tiene más libertades para la impresión el modelo cinemático se vuelve complejo.

Algunos ejemplos de soluciones utilizadas actualmente en proyectos académicos y/o comerciales, tenemos:

- CyBe Construction es una compañía holandesa que creó dos impresoras de hormigón 3D con seis ejes, Cybe RC 3Dp (imagen A de la figura 25) y Cybe R 3Dp de las cuales una es móvil y la otra estática, respectivamente. También han desarrollado un material patentado de mezcla de hormigón que se extruye utilizando el método Concrete Printing.
- Cazza Construction compañía estadounidense que ha desarrollado el robot de impresión 3D Cazza X1 (imagen B de la figura 25) con el fin de reconstruir casas afectadas por desastres naturales.
- Colaboración entre el proyecto Contour Crafting y el Programa de Conceptos Avanzados Innovadores (CANI) de la NASA, para generar una máquina de impresión 3D basada en el método Contour Crafting con el fin de construir viviendas en el espacio (imagen C de la figura 25).

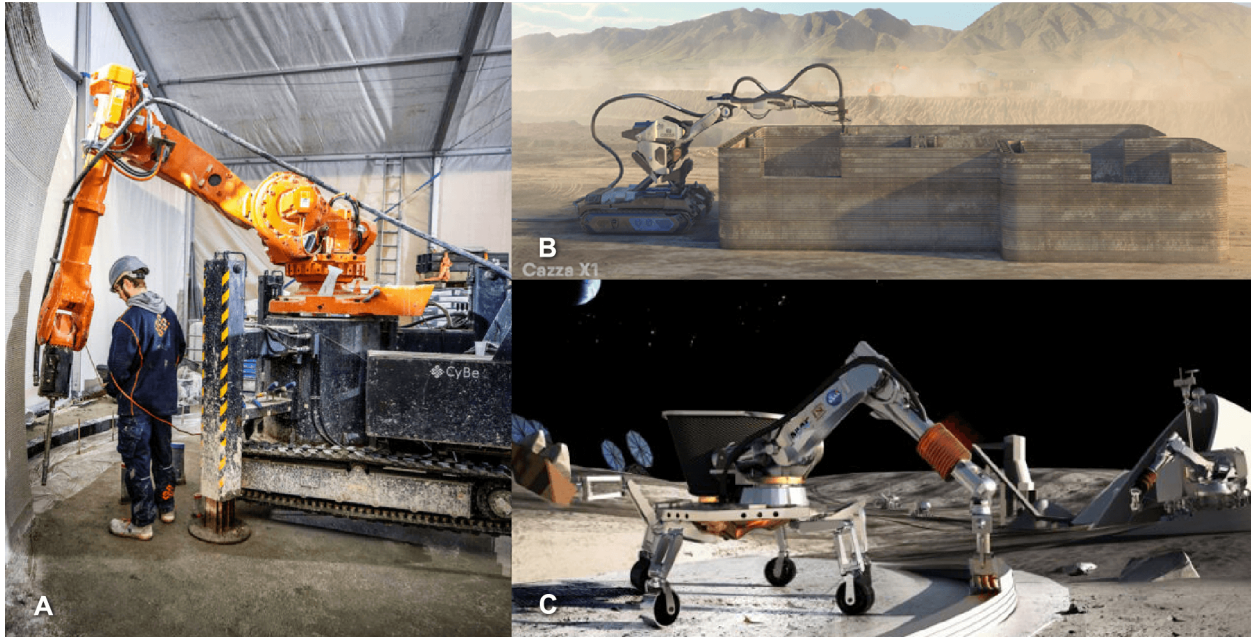


Figura 25: (A) Impresora móvil Cybe RC 3Dp, (B) CAZZA X1 robot de impresión 3D y (C) Máquina de Contour Crafting para construcción en superficie Lunar (Fuentes: <https://cybe.eu/technology/3d-printers/>, <https://www.3dnatives.com/es/cazza-x1-robot-impresion-3d-041020172/> y <https://www.3dnatives.com/es/contour-crafting-casas-luna-03082016/#!>).

## V. CAPÍTULO 3 |

### 3. SISTEMAS COOPERATIVOS MULTI-ROBOTS |

Actualmente, los avances tecnológicos en la robótica han producido un gran desarrollo en el campo de sistemas de robots cooperativos que buscan la gestión coordinada de múltiples robots. Este concepto busca diseñar sistemas compuestos por múltiples robots capaces de resolver problemas conjuntamente, basándose en la experiencia de automatización de robots manipuladores en procesos industriales que pueden realizar tareas como transporte y manipulación de objetos, como se muestra en la figura 26. Estos sistemas proporcionan muchos beneficios en cualquier industria, gracias al trabajo cooperativo que puede realizar un equipo de robots se puede aumentar la producción, disminuir los tiempos de trabajo, realizar procesos continuos y simultáneos, trabajar de manera colectiva o independiente, disminuir riesgos y errores en los procesos de fabricación y aumentar la precisión en los procesos de construcción.



*Figura 26: Robots manipuladores en trabajo combinado  
(Fuente: <https://www.infoplc.net/noticias/marcas/106-yaskawa-motoman>).*

A pesar del gran aumento en la utilización de sistemas cooperativos de robots en la fabricación industrial, su implementación en obras de construcción se ha visto limitado debido a las restricciones y consideraciones que se deben tener para la construcción de una edificación. Esto se debe principalmente a la naturaleza no estructurada de las obras y a los grandes volúmenes de construcción, por lo que se relaciona que las máquinas de construcción deberían ser más grandes que lo que construyen.

Partiendo desde lo básico, la impresión 3D simultánea por parte de un equipo robótico móvil es difícil por varias razones. Primero debemos considerar que los movimientos de los robots deben planificarse y coordinarse perfectamente para optimizar la entrega del material y evitar colisiones entre los robots, además siempre debe considerarse cada robot del equipo durante todas las etapas de construcción, especificando las propiedades y aspectos físicos del robot, los requisitos de las tareas y las características del entorno (Chaimowicz, Campos, & Kumar, 2002). En segundo lugar, la localización de los robots debe ser muy precisa para garantizar que las piezas impresas por los robots queden perfectamente alineadas, teniendo en cuenta que la impresión simultánea es muy importante para garantizar una buena unión entre las capas sucesivas de material. En tercer lugar, es muy importante considerar en todo momento los sistemas de mezclado y bombeo de los robots, ya que deben coordinarse para entregar material de manera sincronizada (Zhang, y otros, 2018).

Un sistema cooperativo Multi-robot de construcción impresa puede utilizar cualquiera de los sistemas de impresión mencionados anteriormente, la diferencia es que hay varios robots ejecutando al mismo tiempo diferentes procesos de construcción impresa en una misma obra. Cabe destacar que, durante el desarrollo de esta investigación, utilizaremos el sistema robótico móvil articulado, brazo robótico o robot manipulador.

Los sistemas de impresión que utilizan un brazo robótico se pueden convertir en un manipulador móvil cuando se les incorpora una plataforma móvil a los robots manipulador, lo que le permite al sistema tener más grados de libertad, ya que se tienen los asociados al brazo robótico y además los de la plataforma móvil. Es así como lo demuestran Zhang y otros (2018) que proponen un sistema de impresión 3D basado en un equipo de múltiples robots móviles, donde robots móviles operan simultáneamente para construir una sola pieza de tamaños arbitrarios dependiendo de la cantidad de robots que se quieran implementar, tal como se puede ver en la figura 27.



*Figura 27: Robots imprimiendo simultáneamente una pared de hormigón (Fuente: Zhang, y otros, 2018).*

Trabajos más recientes han comenzado a explorar el uso de múltiples robots móviles pequeños para completar tareas de fabricación utilizando materiales livianos. El sistema se llama Minibuilders, desarrollado por Iaac (2018) y se compone por tres pequeños robots móviles. Es importante destacar que estos tres robots poseen estructuras diferentes que permiten que cada uno se especialice en una etapa distinta de la construcción de una edificación, uno robot construye la base, otro se encarga de la succión y otro de la sujeción. En la figura 28 se muestra la construcción de un prototipo utilizando el sistema Minibuilders, construido en el espacio expositivo

exterior del Museo del Diseño de Barcelona (Dhub).

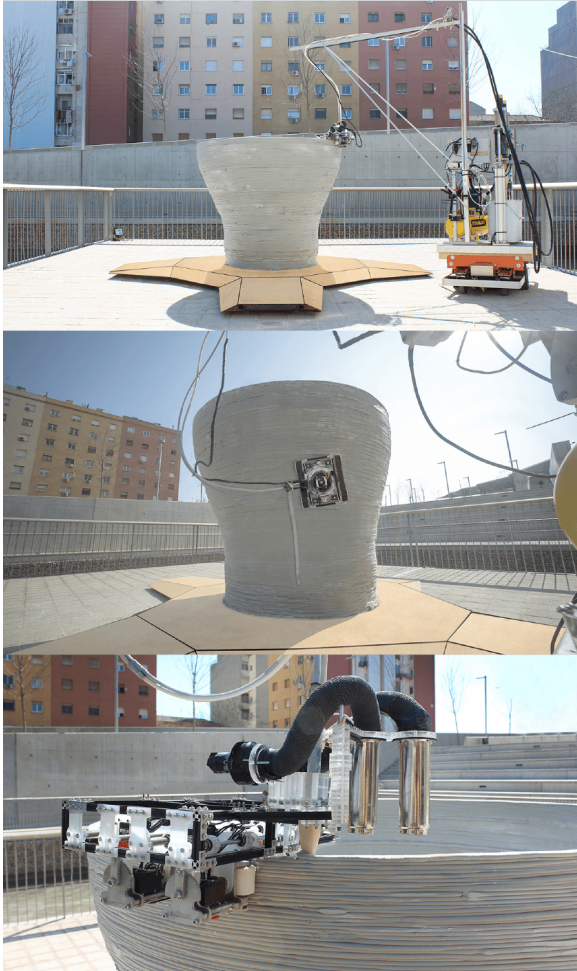


Figura 28: Prototipo de construcción impresa utilizando el sistema Minirobots (Fuente: <http://robots.iaac.net/>).

Cuando se implementa un trabajo simultáneo de manipuladores móviles, se presentan dos perspectivas: trabajo coordinado vs. descoordinado, y trabajo centralizado vs. distribuido. El trabajo coordinado se logra cuando el equipo de manipuladores móviles trabaja coordinadamente, es decir, que todos los robots siguen los mismos lineamientos y se pueden comunicar entre sí, reconociendo el trabajo que hace uno del otro, sin embargo, todos los robots son independientes entre sí. El equipo de manipuladores móviles es independiente cuando el trabajo es distribuido, en el caso contrario, se atribuye a un sistema centralizado. Por otro lado, en un trabajo descoordinado, cada manipulador móvil realiza una tarea sin reconocer el trabajo que realiza el otro robot, sin embargo, el sistema puede ser centralizado o distribuido, en el primer caso: una unidad de procesamiento central controla a todos los manipuladores móviles. En el segundo caso: implica que todos los manipuladores trabajen de manera independiente y sin un control de jerarquía superior que distribuya o dirija el trabajo (Vukobratovic & Tuneski, 1998).

## VI. CAPÍTULO 4 |

## 4. METODOLOGÍA |

Para acercarse al cumplimiento de los objetivos de esta investigación se utilizó la metodológica del proceso de diseño de un producto propuesta por Pahl y Beitz (2007), cuyo modelo prescriptivo (ver modelo en anexo 1) fue adaptado por la autora y se ilustra en la figura 29, donde se muestra la secuencia de pasos que se desarrollaron para generar la propuesta de diseño y prototipo digital de la estructura móvil giratoria del sistema cooperativo multi-robot para construcción impresa.

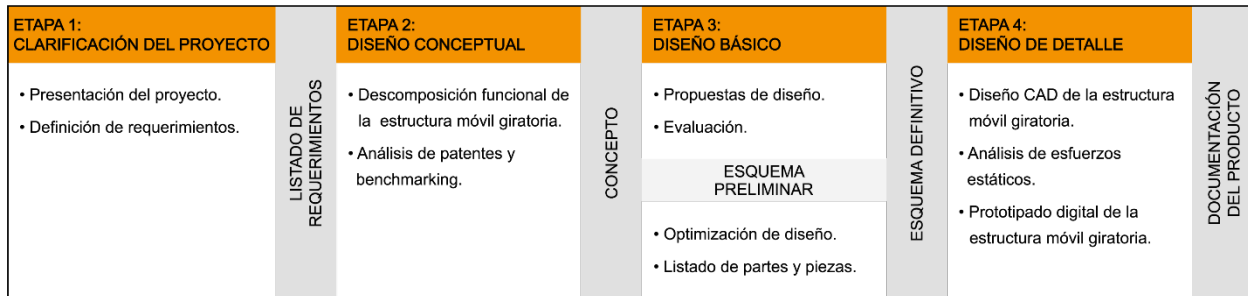


Figura 29: Esquema adaptado de las etapas de diseño y desarrollo del prototipo (Fuente: elaboración propia).

#### 4.1. ETAPA 1: CLARIFICACIÓN DEL PROYECTO

Al incorporarse y formar parte de un proyecto que se encuentre en desarrollo, es primordial conocer y entender la mayor cantidad de detalles de este, como objetivos, recursos disponibles, lineamientos, entre otras cosas. Esta información nos permitirá una óptima estructuración de las etapas de diseño y desarrollo de un prototipo.

Por otro lado, es fundamental al momento de iniciar o retomar un proyecto, tener claros los requerimientos de este. Conocer y manejar la mayor cantidad de información útil respecto al proyecto como los requerimientos técnicos de los componentes, el peso y volumen, entre otros, como también los requisitos financieros. Esto permitirá optimizar los recursos disponibles y entender la función de ellos, disminuyendo la incertidumbre durante el desarrollo del proyecto y optimizando la viabilidad del diseño. En particular, para esta investigación es fundamental conocer y establecer los requerimientos tanto funcionales como estructurales, ya que estos parámetros guiarán el proceso de diseño.

##### 4.1.1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

A continuación se presentará el prototipo a escala ubicado en el laboratorio de Sistemas Cooperativos Multi-Robots para la Construcción (SISCOM), perteneciente a Fondecyt 11810158. Donde se conocerá el estado actual del prototipo a escala del proyecto, el estado objetivo que se quiere lograr y componentes del sistema, además se analizará la propuesta de viga giratoria diseñada por Esteban Agüero Naguian en su memoria para optar al título de Arquitecto.

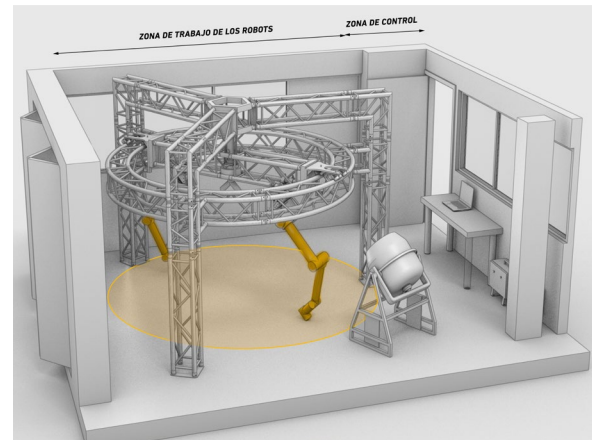


Figura 30: Modelo 3D del laboratorio SISCOM (Fuente: Agüero Naguian, 2019).



*Figura 31: Prototipo del sistema cooperativo multi-robot, montado en el laboratorio de SISCOM. Estado actual (izquierda), estado objetivo (derecha) (Fuente: González Böhme, García Alvarado, Quitral Zapata, & Valenzuela Astudillo, 2020).*

Actualmente, en el laboratorio de SISCOM, se encuentra montada e instalada una plataforma y dos robots UR5/CB3, adaptados para uso experimental de construcción impresa, el laboratorio corresponde a un recinto de 5 x 4.4 x 2.4 m (figura 30). Este prototipo a escala consta de una estructura con tres puntos de apoyo que sustenta el sistema cooperativo multi-robot y se compone de un sistema estructural modular multipropósito de vigas de celosía que incluyen la estructura circular (riel), quedando pendiente la

construcción y montaje de la viga giratoria, así como el sistema de alimentación multi-robot para mortero de cemento (González Böhme, García Alvarado, Quitral Zapata, & Valenzuela Astudillo, 2020), en la figura 31 se muestran el estado actual y el estado objetivo del proyecto. Además, se hace énfasis, en que este proyecto busca generar un sistema de colaboración de impresión que tengan la capacidad de imprimir alrededor de enfierraduras, armaduras o ductos preinstaladas en elementos de construcción.

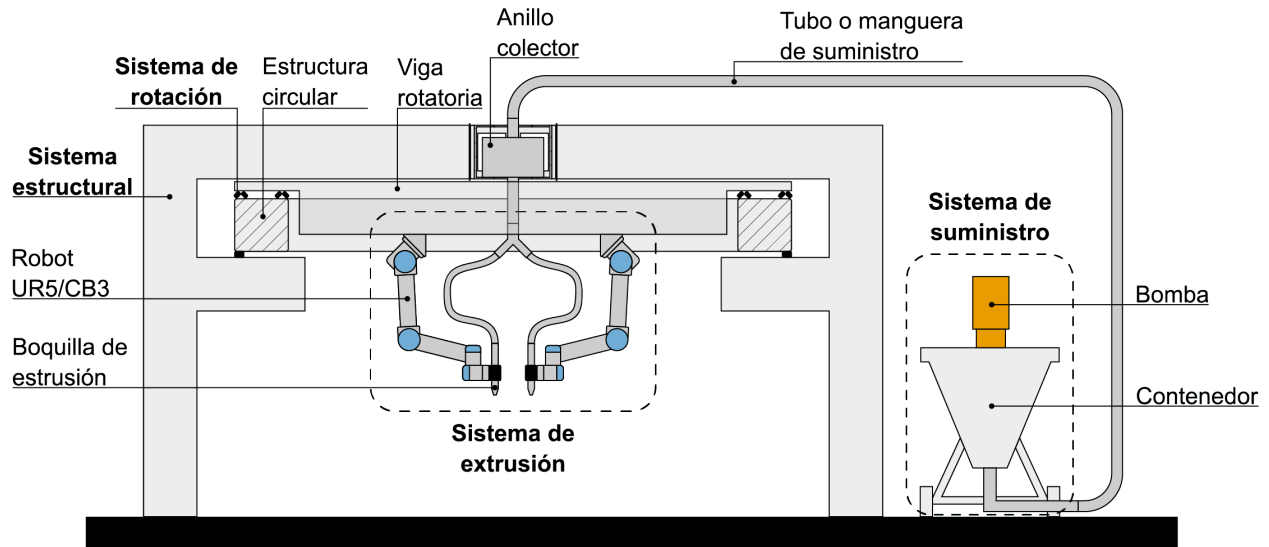


Figura 32: Esquema del estado objetivo del proyecto (Fuente: elaboración propia).

Para comprender el estado objetivo del proyecto se realiza un esquema de este con sus respectivos sistemas y componentes principales (figura 32), cabe mencionar que para una mejor representación de los componentes se debió hacer una pequeña reorganización del sistema estructural.

El prototipo a escala de este proyecto de investigación fue previamente diseñado por Esteban Agüero Naguian (2019) en su memoria “Desarrollo de una plataforma experimental para

el estudio de sistemas multi-robot de construcción impresa”, cuyo objetivo general fue “Idear una plataforma móvil para un conjunto de manipuladores móviles, multi-robot, destinados a ejecutar deposiciones continuas de material para fabricación aditiva”. El diseño 3D de la propuesta de Esteban se muestra en más detalle en el anexo 2, el prototipo se basa en este diseño, llegando a construir todo el sistema estructural y la estructura circular, en cuanto al diseño de la viga o plataforma giratoria, se detectaron las siguientes inconsistencias:

1. Volumen que ocupan los componentes en el espacio, no se consideraron algunos componentes como el motor que haría girar la viga y el espacio que queda entre la estructura circular y el sistema estructural.
2. Terminaciones del riel, en un inicio se pensó utilizar la estructura circular como riel que guiará el movimiento de la viga, sin embargo, esta posee relieves considerables por la soldadura de la misma estructura, además de las piezas de unión (pasadores) que sobre salen de la superficie de la estructura.
3. Precisión en el desplazamiento, no se consideró en el diseño que la viga tuviera un desplazamiento fluido y con precisión.

Es importante destacar que el diseño de la estructura móvil giratoria que soportará a dos robots UR5/CB3 para la construcción impresa, está pensado para ser construido y montado en el prototipo a escala del laboratorio, con el fin de otorgar a estos robots un desplazamiento rotatorio que permitirá la impresión colaborativa con trayectorias helicoidales.

#### 4.1.2. DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS

Los requerimientos se establecieron a partir de lo que se conoció del proyecto y se segmentan de acuerdo con su carácter funcional (establecido por el equipo del proyecto SISCOM), estructural (dado por el contexto de uso) y montaje y ensamble (acordado por la diseñadora con la aprobación del equipo de trabajo).

Los requerimientos expuestos en la tabla 1 serán fundamentales para estructurar y alinear el proceso de diseño, además de guiar y/o restringir las posibles soluciones. Por otro lado, en el caso de algunos requerimientos, deben ajustarse a factores como el espacio de trabajar, el cual es reducido, es por esto por lo que se vuelve necesario hacer un análisis de los recursos disponibles. Para ello se utiliza el modelo de clasificación de recursos de TRIZ, en la tabla 2 se pueden apreciar los resultados (ver anexo 3 para más información sobre la clasificación de cada recurso).

<b>Funcional</b>	<b>Estructural</b>	<b>Montaje y ensamble</b>
La viga debe sustentar dos robots UR5/CB3.	Dimensiones de la viga deben permitir el montaje de dos robots	Montaje accesible para facilitar la mantención de los robots y ensamble ajustable.
La viga debe soportar el peso de los robots y las mangueras de suministro.	Estabilidad, resistencia y soporte para el correcto funcionamiento de los robots	Montaje y ensamble simple que permitan mantener un orden de los componentes.
La estructura móvil giratoria debe rotar en 360° fluidamente.	Plataforma o riel curvo debe tener un desplazamiento fluido sin roce.	Montaje accesible para facilitar su mantención y ensamble ajustable para posibles cambios.
La estructura móvil giratoria debe soportar el peso de los dos extremos de la viga con los robots y demás componentes montados.	Resistente y estable, debe mantener un correcto equilibrio en el desplazamiento de los componentes	El ensamble de los dos extremos de la viga a la estructura móvil giratoria debe ser simétrico, resistente y de fácil montaje.
La estructura móvil giratoria debe permitir el desplazamiento preciso con coordenadas específicas.	Estructura simétrica, equilibrada y estable que permita modelar coordenadas precisas	El montaje y piezas de ensamble deben ser precisas y simétricas.

*Tabla 1: Listado de requerimientos.*

Tipo de recurso	Descripción de recursos del proyecto
Material	Computadoras para prototipo 3D y simulación digital, Software AutoCAD Inventor, un motor Baldor Reliance, dos robots UR5/CB3, Slip Ring hole size: 200mm.
Energía	Energía eléctrica para el funcionamiento de dispositivos, mano de obra.
Información	Prototipo a escala para analizar y tomar dimensiones. Equipo multidisciplinario con Arquitectos e Ingenieros civiles mecánicos. Requerimientos y objetivos del proyecto. Información proveedores de partes y piezas.
Tiempo	Duración del proyecto, tiempos de modelación 3D y simulaciones, tiempos de cotización de fabricación y adquisición de partes y piezas, tiempos de evaluación de factibilidad del proyecto.
Espacio	Laboratorio de SISCO, volumen del prototipo a escala, oficina de la autora, espacio de intercambio de información digital.

*Tabla 2: Clasificación de los recursos del proyecto según metodología TRIZ.*

A partir de los materiales y espacio disponibles se identifica una gran restricción en cuanto al espacio libre para montar la estructura móvil y viga giratoria, este espacio es muy reducido y se debe tener en consideración al momento de ensamblar las partes y piezas, por lo que se deben generar ensambles accesibles para facilitar el correcto montaje de estos, además se debe

mantener un orden de todos los componentes sin que estos se afecten entre sí. Todo esto conlleva a considerar el enorme potencial de las herramientas de modelación 3D, que permitirán un vistazo previo a la fabricación e instalación de piezas y componentes, y así evitar fallas y errores.

## 4.2. ETAPA 2: DISEÑO CONCEPTUAL

Una vez que se entiende el proyecto de manera global y se tienen establecidos los requerimientos de diseño y los recursos, se cruza la información y se comienza a analizar funcionalmente el prototipo a escala del proyecto, junto a otros referentes (análisis de patentes y benchmarking) para presentar propuestas de solución.

### 4.2.1. DESCOMPOSICIÓN FUNCIONAL DEL PROYECTO

Para la descomposición funcional del proyecto se toma como referente principal la versión de diseño propuesta por Esteban Agüero, presentada anteriormente, con algunas variaciones propuestas por el equipo de trabajo de SISCOM. Se analiza la estructura física, composición y funcionalidad de cada una de las partes que componen los sistemas del proyecto en su estado objetivo. Para posteriormente cruzar esta información con el levantamiento de los requerimientos.

A continuación, en la figura 33 se presenta el modelo CAD del estado objetivo del proyecto planteado por el equipo de este, del cual se estudiarán tres sistemas fundamentales en la composición del proyecto SISCOM, el sistema estructural, de rotación y extrusión.

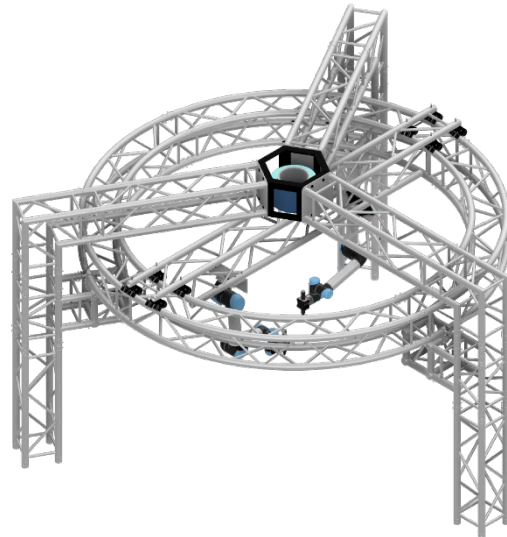


Figura 33: Modelo CAD del estado objetivo del proyecto (Fuente: elaboración propia).

### **SISTEMA ESTRUCTURAL**

El sistema estructural consta de una estructura autoportante que sustenta al sistema cooperativo multi-robot, volviéndose fundamental para el diseño de los sistemas de rotación y extrusión, ya

que su tamaño y forma definen el volumen del espacio donde trabajarán los robots. Cabe destacar que está compuesto por; tres estructuras de apoyo, que convergen y se unen por medio de una pieza de unión en la parte central superior de todo el sistema estructural, además los puntos de apoyo poseen unos módulos que permiten sostener un anillo estructural ubicado en el centro de todo el sistema, todos los componentes del sistema estructural se muestran en la figura 34.

Es importante mencionar que el sistema estructural es el único que se encuentra en su totalidad montado y ensamblado en el laboratorio de SISCOM. Su función principal es sustentar, estabilizar y dar equilibrio estructural a todos los sistemas que componen el proyecto. Debido a que este sistema está construido por diferentes componentes, es fundamental definir las funciones correspondientes a cada uno de ellos y establecer cuáles de estos componentes son indispensables para el desarrollo de los diseños de los demás sistemas y cuales se pueden modificar o eliminar para optimizar el correcto funcionamiento del sistema cooperativo multi-robot.

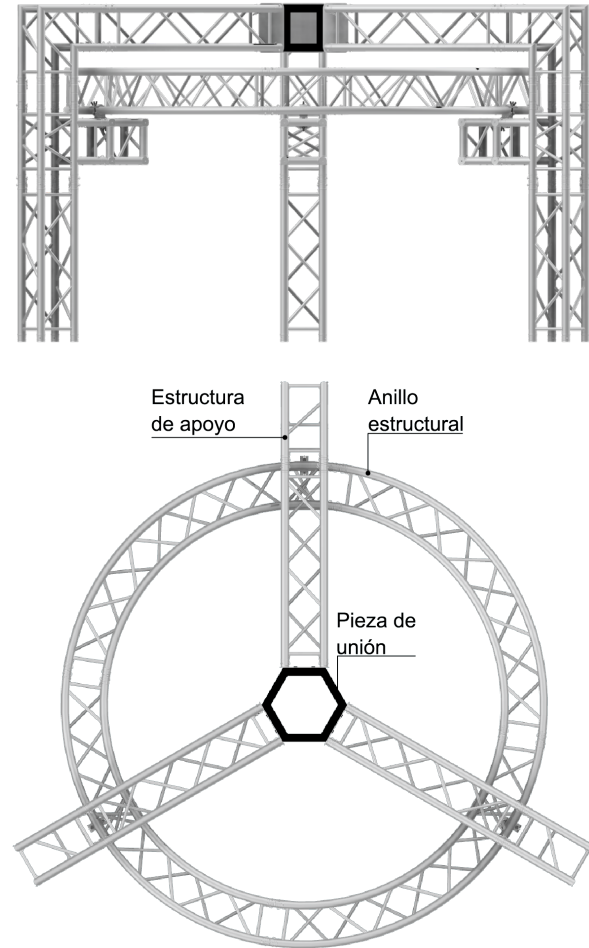


Figura 34: Sistema estructural del proyecto y partes que lo componen (Fuente: elaboración propia).

<b>Componentes</b>	<b>Función</b>
Estructura de apoyo	Transmitir y distribuir cargas dentro del sistema. Sustentar anillo estructural.
Pieza de unión	Unir y fijar las tres estructuras de apoyo.
Anillo estructural	Sustentar y orientar el desplazamiento rotatorio dentro del sistema.

*Tabla 3: Funciones de los componentes del sistema estructural.*

Como se puede apreciar en la tabla 3, las funciones de la estructura de apoyo y la pieza de unión de dan forma al sistema estructural y están directamente relacionadas con la función principal de este. Por otro lado, el anillo estructural también mantiene su relación con la función principal del sistema que compone, pero la función específica de este componente está dirigida a sustentar el sistema de rotación, volviéndose la conexión entre los dos sistemas. Por lo tanto, las dimensiones, forma y montaje de este anillo estructural podrían condicionar el diseño del sistema de rotación.

## **SISTEMA DE ROTACIÓN**

El sistema de rotación consta de una viga que gira en su propio eje sobre un riel de desplazamiento circular, transmitiendo el movimiento rotacional al sistema de extrusión. Cabe destacar que este sistema está compuesto por; una guía circular de precisión (riel circular de desplazamiento) que orienta el movimiento del mecanismo de desplazamiento circular (módulos o patines de desplazamiento) donde va montada la viga giratoria, tal y como se muestra en la vista superior de la figura 35. Es importante mencionar que el factor de precisión que se encuentra en los componentes guía circular y mecanismo de desplazamiento, no se encuentra representado en el modelo CAD debido a que solo se tenía el concepto, en cuanto al tipo de mecanismo que se utilizará, los cuales podrían ser un sistema de engranajes y motor que deberían ser incorporados a estos componentes. Cabe destacar que este factor de precisión es fundamental para obtener un desplazamiento preciso y gradual en la rotación de todo el sistema.

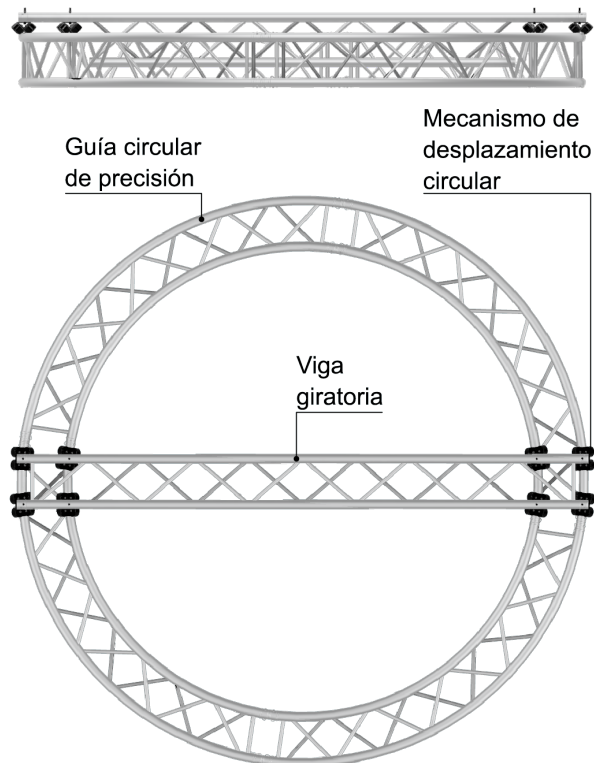


Figura 35: Sistema de rotación del proyecto y partes principales que lo componen (Fuente: elaboración propia).

La función principal del sistema de rotación es sustentar y proporcionar un desplazamiento rotacional de precisión al sistema de extrusión del proyecto. Debido a lo anterior, el correcto funcionamiento del sistema de rotación permitirá establecer una impresión colaborativa con

trayectorias helicoidales, volviéndose fundamental tener presente las funciones y relaciones de todos los componentes de este sistema para el desarrollo de toda la estructura móvil giratoria y así poder optimizar el diseño de esta.

Componentes	Función
Viga giratoria	Sustentar y estabilizar el sistema de extrusión.
Guía circular de precisión	Guiar y precisar el desplazamiento del sistema de rotación.
Mecanismo de desplazamiento circular	Desplazar con precisión la viga giratoria en una guía circular.

Tabla 4: Funciones de los componentes del sistema de rotación.

En la tabla 4 se pueden apreciar las funciones de todos los componentes del sistema de rotación, donde se puede establecer que todos los componentes están directamente relacionados, sin embargo, se observa que la guía circular de precisión está estrechamente conectada con el anillo estructural, ya que en un principio el equipo

del proyecto habría propuesto que ese componente estructural fuera el riel circular de desplazamiento, lo que no era viable debido a que el ensamble de la estructura se hace con pasadores y chavetas, los cuales generan un obstáculo para el mecanismo de desplazamiento circular. Debido al problema encontrado, es de vital importancia proporcionar una guía circular de precisión que cumpla con los requerimientos, este componente podría estar montado sobre el anillo estructural, además se estudiará la posibilidad de que solo las estructuras de apoyo cumplan con el sustento de la guía circular de precisión y así poder disminuir la cantidad de componentes optimizando y simplificando los sistemas.

Por otro lado, se establece la conexión directa que posee el componente de la viga giratoria con el sistema de extrusión, por lo que se puede establecer que el diseño de esta viga estará comprometido con los requerimientos y componentes del sistema de extrusión.

## SISTEMA DE EXTRUSIÓN

Finalmente, el sistema de extrusión consta de dos brazos robóticos articulados que orientan las boquillas de extrusión en tres grados de libertad. Cabe destacar que está compuesto por; dos robots UR5/CB3, dos bases de soporte, dos boquillas de extrusión y dos módulos de sujeción de las boquillas. Estos componentes se muestran en la figura 36.

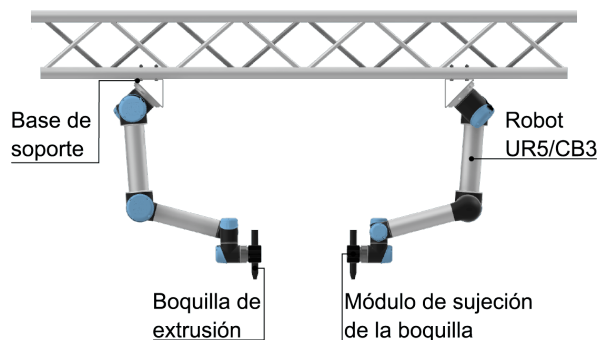


Figura 36: Sistema de extrusión del proyecto y partes que lo componen (Fuente: elaboración propia).

La función principal de este sistema es establecer una impresión 3D de hormigón colaborativa de cualquier tipo de solido en revolución, orientando las boquillas de extrusión para sortear barras o mallas de armadura instaladas en obra.

<b>Componentes</b>	<b>Función</b>
Robot UR5/CB3	Orientar y dirigir la boquilla de extrusión.
Base de soporte	Sustentar al robot y optimizar su alcance de trabajo.
Boquilla de extrusión	Conformar el material extruido y facilitar la salida del mortero.
Acople de boquilla	Sujetar la boquilla de extrusión al robot.

*Tabla 5: Funciones de los componentes del sistema de extrusión.*

En la tabla 5 se pueden apreciar las funciones de todos los componentes del sistema de extrusión, donde se puede establecer que todos los componentes están relacionados entre sí, destacando la base de soporte, ya que es el componente que conecta el sistema de rotación y extrusión. Por otro lado, se debe considerar que el diseño del componente módulo de sujeción de las boquillas es fundamental para lograr el óptimo funcionamiento de las boquillas de extrusión y permitir una impresión 3D helicoidal.

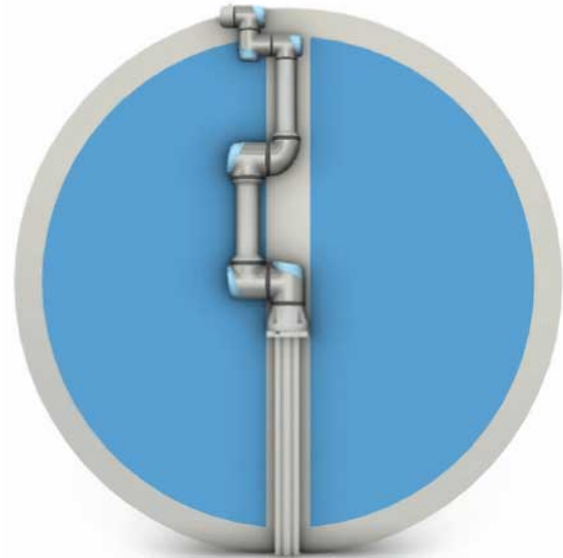
Por otro lado, es fundamental optimizar el proceso de impresión 3D del sistema de extrusión, considerando que el diseño del sistema cooperativo multi-robot debe ser una automatización dinámico y flexible, lo que significa que la ubicación de los robots manipuladores debería ser móvil en todos sus ejes (X, Y y Z), aumentando el alcance del espacio de trabajo de los robots. Para lograr lo mencionado, se debe agregar tres componentes al sistema de extrusión; Una guía lineal de precisión la cual se montará sobre la viga giratoria o bien puede ser la misma viga, un mecanismo de desplazamiento lineal que permitirá mover los robots a lo largo de la viga giratoria en un eje horizontal, y finalmente el mecanismo de extensión vertical en el cual se montaran los robots con la base de soporte para aumentar su rango de trabajo en el eje vertical (eje Z), cabe destacar que este último mecanismo irá montado sobre el mecanismo de desplazamiento lineal. En la tabla 6 se muestran las funciones correspondientes de cada componente agregado al sistema de extrusión.

Componentes	Función
Guía lineal de precisión	Guiar y precisar el desplazamiento lineal de los robots sobre la viga giratoria.
Mecanismo de desplazamiento lineal	Desplazar al robot en su eje horizontal y aumentar su alcance de trabajo.
Mecanismo de extensión del eje vertical	Extender el alcance de trabajo del robot en su eje vertical.

*Tabla 6: Funciones de los componentes adicionales al sistema de extrusión.*

Según lo mencionado anteriormente, es primordial asegurar el correcto funcionamiento de la celda robótica móvil, lo que implica que los dos robots colaborativos orbitales deben optimizar su espacio de trabajo y minimizar la pérdida de grados de libertad. Cabe destacar que el espacio de trabajo del robot es un volumen esférico tal como se muestran en la figura 37, donde se puede apreciar que, por la base del robot, justo por encima y debajo de esta, la atraviesa un volumen cilíndrico que representa el espacio de trabajo que no puede alcanzar el robot. La orientación de este es fundamental dentro del desarrollo de diseño

del sistema para evitar en lo posible que ese volumen interfiera en el espacio efectivo de trabajo de los robots.



*Figura 37: Límites del espacio de trabajo del robot UR5/CB3 (Fuente: <https://www.universal-robots.com/>).*

Además es importante mencionar que el área de alcance recomendado es similar a una esfera de aproximadamente 1,7 m de diámetro (representada de azul en la figura 37), esta área es donde el robot puede mover la herramienta a cualquier posición con casi cualquier orientación, por otro lado, cuando se trabaja fuera del área de alcance recomendado, pero aún dentro del área

de trabajo máxima (representada en gris en la figura 37), se pueden alcanzar la mayoría de las posiciones pero con restricciones en la orientación de la herramienta, porque el robot físicamente no puede llegar lo suficientemente lejos en algunas posiciones. Es por lo anterior, que solo se analizarán las posiciones del robot con el área de trabajo recomendada para asegurarnos de que el robot pueda trabajar de forma óptima sin tener que comprometer la dirección de la herramienta.

Uno de los requerimientos más importantes definidos por el equipo del proyecto, esta relacionado con la ubicación que deben tener los robots al montarse sobre la estructura movil giratoria, estableciendo que los deben situarse de tal forma que se encuentren sobre la cama de impresión, es decir, que se ubiquen por encima del objeto a imprimir. Significando que el área de trabajo de los robots será delimitada por la viga giratoria en la cual irán montados.

A continuación en la figura 38 se presentan las posibles configuraciones de los dos robots, donde el espacio de trabajo efectivo se muestra de color

anaranjado y el espacio no efectivo se representa con un espacio en blanco.

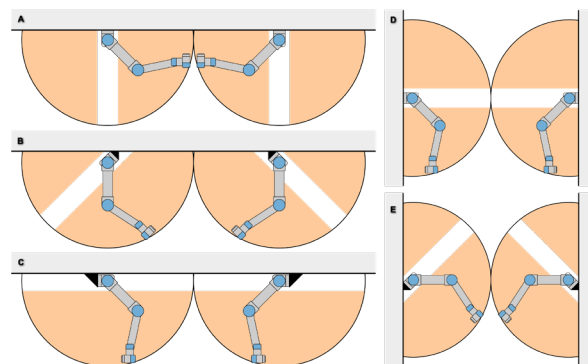


Figura 38: (A) Robots sobre techo con eje vertical, (B) Robots sobre techo con eje inclinado en  $45^\circ$ , (C) Robots sobre techo con eje horizontal (D) Robots sobre muro con eje horizontal y (E) Robots sobre muro con eje inclinado en  $45^\circ$  (Fuente: elaboración propia).

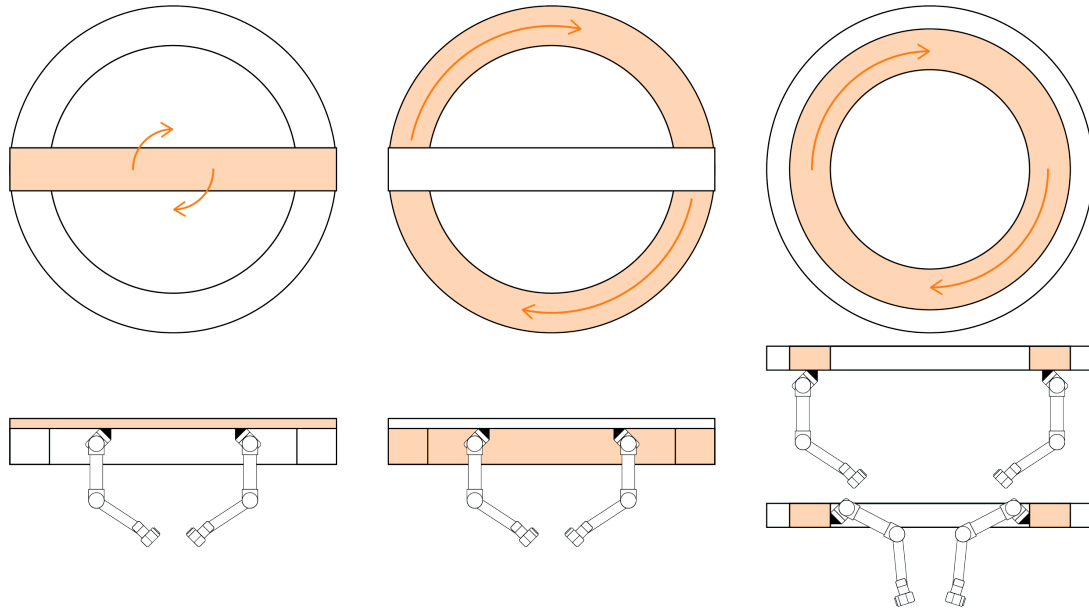
Como se puede apreciar en las opciones presentadas, al inclinar los robots en  $45^\circ$  sobre su eje (opción B de la figura 38), se puede posicionar el cilindro de no alcance de trabajo (espacio en color blanco) en dirección contraria al centro de los robots, ya que en ese espacio se genera un área de intersección donde los robots pueden trabajar colaborativamente, está inclinación del eje permitiendo dar un mayor alcance del área de trabajo, sin embargo, se observa que si los robots necesitan trabajar alejándose del centro de

intersección sus áreas de trabajo se ven obstaculizados por el mismo volumen del cilindro de no alcance de los robots, debido a esto se podría plantear posicionar el eje de los robots con un ángulo menor a  $45^\circ$  para rotar y desplazar el volumen de no alcance hacia arriba disminuyendo su interferencia en el área de trabajo.

Por otro lado, se puede observar que si se orienta el eje de los robots de forma horizontal (opción C de la figura 38) el volumen que no alcanzan los robots quedaría paralelo al superficie de impresión y sobre el espacio de trabajo, dejando libre y sin intervención el área trabajo que queda debajo de los robots, sin embargo, a simple vista se puede apreciar que para estos casos (opción B y C) el volumen de trabajo en la opción C disminuiría un pequeño porcentaje, ya que este es un poco más achatado que las otras opciones, aproximadamente el volumen disminuye un 6,8%, este cálculo se realizó con la ayuda del software Autodesk Inventor, considerando que el volumen de trabajo es una esfera perfecta de diámetro 1,7 m y eliminando el volumen del cilindro de no alcance, para más detalles ver el anexo 4.

Para complementar el análisis del posicionamiento de los robots sobre la estructura móvil giratoria se plantean configuraciones de desplazamiento y como estas afectan a los robots. Las configuraciones de la figura 39 reflejan las posibles ubicaciones de los robots montados en el sistema de rotación para conceptualizar su trayectoria de desplazamiento rotacional y así poder establecer la ubicación de los robots en el sistema obteniendo un alcance de trabajo óptimo en su funcionamiento. Con este fin, se estudiaron las posibles configuraciones de desplazamiento, considerando orientación de los robots y formas de lograr un desplazamiento rotacional.

En la figura 39, se visualizan las posibles configuraciones de desplazamiento de los robots, donde las estructuras que rotan se muestran de color anaranjado, además se debe considerar que los robots se montan a una estructura que les transmite el movimiento rotacional, es decir, la base de los robots queda en una posición fija y la estructura proporciona el desplazamiento rotacional a estos.

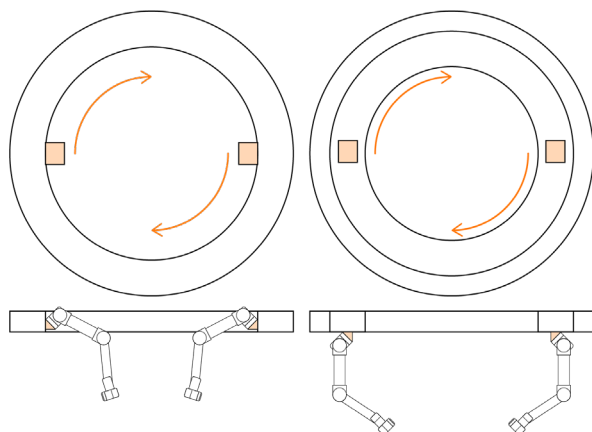


*Figura 39: Conceptualización de la trayectoria de desplazamiento con robots fijos y estructura móvil. De izquierda a derecha, viga centra giratoria y robots sobre techo en inclinación, estructura circular rotatoria y viga con robots sobre techo en inclinación y estructura circular rotatoria con robots sobre techo en inclinación y muro en inclinación (Fuente: elaboración propia).*

Por otro lado, en la figura 40 se presentan las configuraciones de desplazamiento considerando que la base de soporte de los robots es móvil y el resto de la estructura es fija, es decir que los mismos robots son los que se desplazan por el espacio de trabajo. Comparando con las configuraciones de desplazamiento rotacional planteadas, se puede observar que las

configuraciones donde las bases de soporte de los robots son móviles, les permite tener mayor flexibilidad y espacio de trabajo, sin embargo, eso se traduce en una mayor coordinación de trabajo entre ellos ya que si no estos podrían colisionar o entorpecer el trabajo del otro. Por otro lado, en las configuraciones donde la base de los robots queda fija y la estructura transmite el

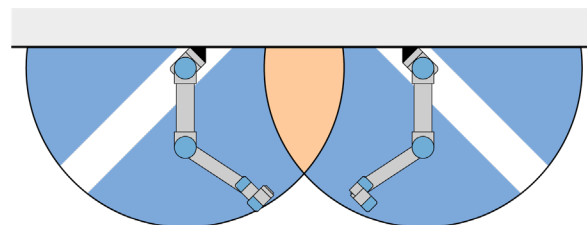
desplazamiento de rotación, permite un trabajo más coordinado y simétrico, disminuyendo las posibles colisiones que podrían tener los robots, sin embargo, se debe considerar que la estructura a rotar tiene un volumen y peso mayor.



*Figura 40: Conceptualización de la trayectoria de desplazamiento con robots móviles y estructura fija. De izquierda a derecha, robots montados sobre muro en inclinación y robots montados sobre techo en inclinación (Fuente: elaboración propia).*

Para tener una mayor comprensión de los espacios que utilizan los robots se establecen dos áreas de trabajo, el área de trabajo individual, representado de color celeste en la figura 41, este espacio de trabajo es el área total de alcance

recomendado por el fabricante y el área de trabajo colaborativo, representada de color anaranjado en la figura 41, es el espacio de trabajo donde se genera una intersección de las áreas individuales de cada robot. Cabe destacar que siempre el área de trabajo donde no tiene alcance los robots se representará de blanco.

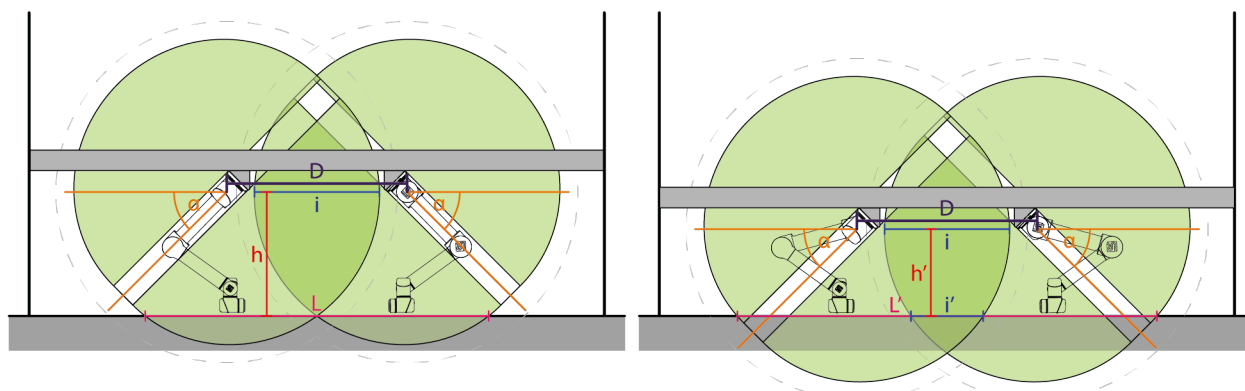


*Figura 41: Esquema conceptual de la composición de las áreas de trabajo de los robots (Fuente: elaboración propia).*

Estableciendo las áreas de trabajo que tendrán los robots surge la necesidad de parametrizar como la distancia entre los dos robots y el ángulo en que se posicionan su eje afectan a estos espacios de trabajo, también es importante considerar cual serían las dimensiones de la superficie de la intersección entre las áreas de trabajo de los robots y el suelo, es decir, cuáles serían las dimensiones de la cama de impresión.

Para lograr la mayor precisión posible se deben considerar las dimensiones exactas del área de alcance recomendado, las cuales se muestran en el anexo 5, donde se puede apreciar que el volumen no es una esfera perfecta, sino más bien una esfera truncada. Debido a su forma se establece que las coordenadas de intersección varían según la orientación del eje central del robot.

A continuación, en la figura 42, se establecen y definen las variables a considerar para parametrizar el área de trabajo de los robots según su desplazamiento lineal sobre la viga giratoria, donde se busca analizar las correspondientes relaciones que tienen cada variable entre sí para poder establecer las ecuaciones matemáticas que nos permitan obtener los valores de estas.



$\alpha$  = Ángulo de rotación del eje del robot.  
**D** = Distancia entre los ejes centrales de los robots.  
**L** = Distancia de la superficie de impresión en el primer punto de intersección de las áreas de trabajo de los robots.  
**i** = Distancia máxima del área de trabajo colaborativo.  
**h** = Altura del área de trabajo.

**i'** = Distancia mínima del área de trabajo colaborativo.  
**L'** = Distancia de la superficie de impresión cuando se define un  $i'$ .  
**h'** = Altura del área de trabajo cuando se define un  $i'$ .

Figura 42: Esquema de las variables para la parametrización de coordenadas del área de trabajo de los robots y sus respectivas definiciones (Fuente: elaboración propia).

Es importante establecer que valores de  $\alpha$ ,  $D$  y  $i'$  serán definidos por el operador del sistema según el caso que se quiera estudiar. Además, esta parametrización nos permitirá establecer los valores máximos y mínimos que estas variables podrían tener. Cabe mencionar que el valor del ángulo de  $\alpha$  que se muestra en la figura 42 tiene un valor de  $45^\circ$ , ubicándose el área de trabajo de no alcance en dirección opuesta a la intersección de los dos robots, analizando esta figura se establece que al disminuir este ángulo se puede lograr un área de trabajo donde el cilindro de no alcance se interponga lo menos posible en el trabajo de los robots.

Debido a lo mencionado anteriormente, se establece que para un óptimo trabajo de los robots el ángulo  $\alpha$  debe ser igual a  $0^\circ$ , ya que los robots al estar ubicados en esta posición el área de no alcance no interviene en el espacio de trabajo que se encuentra debajo de ellos, facilitando llegar a cualquier lugar o coordenada del área de trabajo proporcionada. En la figura 43 podemos ver la posición de los robots cuando  $\alpha = 0^\circ$  y como se ajustan todas las variables de parametrización.

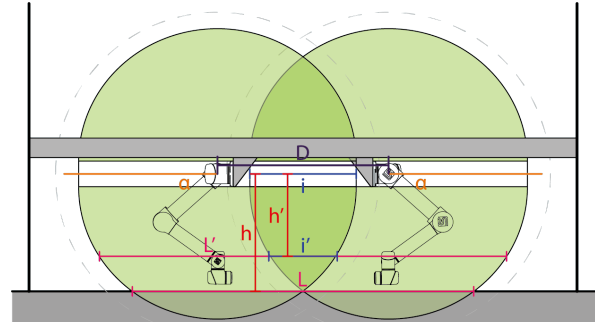


Figura 43: Esquema de parametrización de coordenadas con  $\alpha = 0^\circ$  (Fuente: elaboración propia).

Cabe mencionar que cuando  $\alpha = 0^\circ$  se genera una condición de borde donde se establece que las zonas de las áreas de trabajo que se analizarán serán simétricas, facilitando la obtención de las ecuaciones matemáticas, pero estas no serán exactas para todos los valores de  $\alpha$ . A partir del esquema de la figura 43 se analizan las variables las relaciones entre ellas, estableciendo que  $D$  mantiene una relación directa con las demás, ya que la mayoría dependen del valor que tome  $D$ . La relación entre las variables se define como; si aumenta la distancia  $D$ , disminuyen distancias  $h$  e  $i$ , pero  $L$  aumenta. De igual manera si se tiene un  $i'$  definido la variable  $h'$  disminuye y  $L'$  aumenta cuando aumenta  $D$ .

Con ayuda de Autodesk Inventor se realiza un modelo de las áreas de trabajo de los robots con los valores reales de las variables propuestas (ver modelo en anexo 6), generando una tabla comparativa de los valores que van adquiriendo las variables, cuando se definen cinco valores para distintos para  $D$  e  $i'$ .

A continuación, se presentan dos tablas con los valores que van adquiriendo todas variables cuando se definen diferentes valores para  $D$  e  $i'$ .

$D$	$i$	$L$	$h$
800	822	1600	744,62
900	722	1800	713,87
1000	622	2000	677,76
1100	522	2200	635,31
1200	422	2400	585,06

Tabla 7: Rotulación de las variables  $D$ ,  $L$ ,  $i$  y  $h$ , dimensiones en mm.

$D$	$i'$	$L'$	$h'$
1000	100	2100	635,31
1000	200	2200	585,06
1000	300	2300	524,57
1000	400	2400	449,38
1000	500	2500	348,97

Tabla 8: Rotulación de las variables  $D$ ,  $i'$ ,  $L'$  y  $h'$ , dimensiones en mm.

Podemos ver en la tabla 7 que a la variable  $D$  se le otorgan cinco valores diferentes y se observa como las demás variables van cambiando, valores que nos servirán para hacer un análisis matemático y obtener las ecuaciones de cada variable en función de  $D$ .

Para obtener la ecuación de  $i$  se observó que la variable al estar posicionada exactamente sobre el eje central que cruza perpendicularmente por la base del robot su valor dependería de la distancia que hay entre el centro de los robots y el largo total del cilindro de no alcance de trabajo (corresponde al valor de 1622 mm.) Resultando en la ecuación para obtener el valor de  $i$ :

$$i = 1622 - D$$

Para obtener la ecuación de  $L$  se visualizó que este valor está directamente relacionado con  $D$ . Resultando en la ecuación para obtener el valor de  $L$ :

$$L = 2D$$

Para plantear la ecuación de  $h$  se requirió de un análisis trigonométrico implementando el teorema de pitágoras, donde se proyectó un triángulo rectángulo en función del valor de  $h$  el cual representa un de los catetos, el otro cateto dependerá del valor de  $D$  y la hipotenusa será un valor fijo, ya que siempre el extremo inferior de la recta proyectada por  $h$  intersestará con la circunferencia que forma el área de trabajo por lo que la hipotenusa siempre tendrá el valor de su radio, el esquema del análisis trigonométrico se detalla en el anexo 7. Cabe mencionar que la ecuación resultante para obtener el valor de  $h$  se puede expresarse de dos formas; la primera es considerando que las intersecciones de la recta proyectada por  $h$  son desde el eje central de los robots hasta el punto inferior de la intersección de las dos áreas de trabajo de los robots, esta ecuación es válida para la mayoría de valores que

podría tomar  $\alpha$ . La segunda se ajusta al caso cuando  $\alpha = 0^\circ$ , ya que se deben restar al valor de  $h$  el tramo que pasa por el área de no alcance de trabajo. Resultando en las ecuaciones para obtener el valor de  $h$ :

$$h_1 = \left( \sqrt{811,86^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) + 38,14$$

$$h_2 = \left( \sqrt{811,86^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) - 37,36$$

Por otro lado, para plantear las ecuaciones de  $L'$  y  $h'$  se requiere de ir variando el valor de  $i'$ , sin embargo, también se puede ir variando el valor de  $D$ , pero en una primera instancia solo se irá modificando la variable  $i'$  para generar un escenario más controlado. Podemos ver en la tabla 8 los cinco valores diferentes que se le otorgan a la variable  $i'$  y considerando que  $D$  es constante. Cabe mencionar que al dejar  $L$  en un valor constante el valor de  $i$  también lo será y tendrá el mismo valor mostrado en la tabla 7, ya que  $i$  es independiente de la variable  $i'$ .

Para obtener la ecuación de  $L'$  se comparó con el resultado obtenido en la tabla 7, específicamente con el caso cuando  $D = 1000$  mm, visualizando

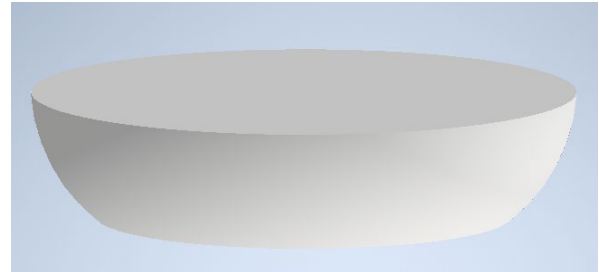
que el valor de  $L'$  al igual que el de  $L$  estaba directamente relacionado con  $D$ , pero aumenta en función del valor de  $i'$ . Resultando en la ecuación para obtener el valor de  $L'$ :

$$L' = 2D + i'$$

Finalmente, para obtener la ecuación de  $h'$  se requiere del mismo análisis trigonométrico utilizado para obtener la ecuación de  $h$  el cual se detalla en el anexo 7, de igual forma se puede comprobar el resultado de esta ecuación comparando los valores de las tablas 7 y 8, ya que en la tabla 7, cuando al valor de  $D$  es el mismo que en la tabla 8, el valor de  $h'$  va a ser el mismo que  $h$  cuando a  $D$  se le agregue el valor de  $i'$ . Es decir, que cuando en la tabla 7 el valor de sea  $D = 1100$  mm y en la tabla 8 el valor de  $i' = 100$  mm,  $h' = h$ . Por otro lado, cabe mencionar que tendremos la misma condición de  $h$  para expresar las ecuaciones de  $h'$ . Resultando en las dos ecuaciones para obtener el valor de  $h'$ :

$$h'_1 = \left( \sqrt{811,86^2 - \left( \frac{D+i'}{2} \right)^2} \right) + 38,14$$

$$h'_2 = \left( \sqrt{811,86^2 - \left( \frac{D+i'}{2} \right)^2} \right) - 37,36$$



*Figura 44: Segmento esférico correspondiente al volumen total de impresión (Fuente: elaboración propia).*

El volumen total del espacio de impresión corresponderá a la unión de los dos espacios de trabajo de los robots, además se puede establecer que cuando la viga se encuentra rotando, el volumen total siempre será un segmento esférico (parte de una esfera comprendida entre dos planos paralelos que la cortan) tal y como se muestra en la figura 44. Para obtener el valor del volumen total del espacio de impresión se utilizó la fórmula para calcular el volumen de un segmento esférico, la cual se muestra en el anexo 8, reemplazando las variables de esta ecuación por las definidas anteriormente, podemos obtener las ecuaciones para el volumen total cuando la cama de impresión se logra en el primer punto de intersección y cuando se tiene un

$i'$  definido, resultando respectivamente las siguientes ecuaciones:

$$V_r = \frac{\pi h_2}{6} \left( 3 \left( \frac{D + 1622}{2} \right)^2 + 3 \left( \frac{L}{2} \right)^2 + h_2^2 \right)$$

$$V_r' = \frac{\pi h_2'}{6} \left( 3 \left( \frac{D + 1622}{2} \right)^2 + 3 \left( \frac{L'}{2} \right)^2 + h_2'^2 \right)$$

Todas estas ecuaciones nos servirán para que el operador del sistema cooperativo multi-robot pueda posicionar a los robots en un desplazamiento horizontal sobre la viga giratoria, según lo requiera el caso y saber cuál será el tamaño de la cama de impresión y la altura a la cual estarán los robots sobre el suelo. Debido a lo anterior se pueden definir los criterios:

- El valor máximo de  $D$  dependerá de las dimensiones del largo de la viga giratoria por donde se desplazarán los robots.
- El valor mínimo de  $D$  dependerá del volumen y espacio que utilice la base de soporte donde irán montados los robots.
- El valor máximo de  $i$  dependerá del valor mínimo que puede adquirir  $D$ , ya que cuando  $D$  es mínimo el valor de  $i$  es máximo.
- El valor de  $i'$  nunca podrá ser mayor a  $i$ .

- El valor mínimo de  $h$  y  $h'$  dependerá de la capacidad que tenga el robot para mover la herramienta en el espacio de trabajo, debido que al estar montados sobre una viga esta podría interponerse al momento de subir la boquilla de extrusión, ya que el segmento articulado del brazo robótico más cercano a la base debe subir.
- Cuando aumenta el valor de  $i'$ , disminuye el valor de  $h'$ .

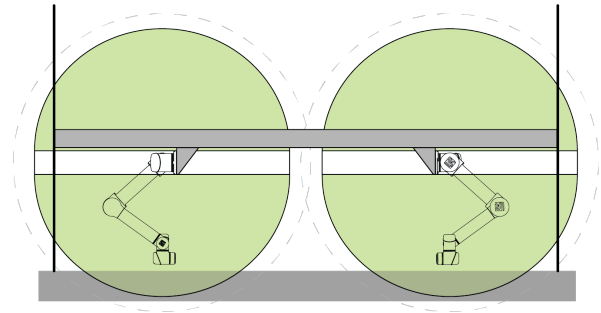
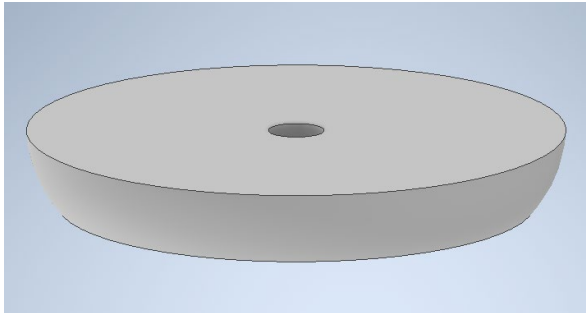


Figura 45: Ubicación de los robots cuando  $D > 1622$  mm (Fuente: elaboración propia).

Es importante mencionar que cuando  $D > 1622$  mm no existe área de trabajo colaborativo, como se observa en la figura 45, por lo que las ecuaciones previamente establecidas no serán

válidas para este caso. Cuando se genera este caso la cama de impresión se divide en dos zonas simétricas dejando en el centro un espacio donde los robots no tienen alcance, es decir que el volumen del espacio de trabajo que se genera cuando la viga está rotando, sería igual a un toroide generado por un segmento circular, como se muestra en la figura 46.



*Figura 46: volumen total de impresión cuando  $D > 1622$  mm (Fuente: elaboración propia).*

Cabe destacar que el caso cuando  $D > 1622$  mm no impide el funcionamiento del sistema, además como se puede apreciar en la figura 46 se puede imprimir cualquier tipo de sólido en revolución considerando que tendrá un espacio hueco en el centro, condición que también se puede lograr cuando  $D < 1622$  mm.

#### 4.2.2. ANÁLISIS DE REFERENTES

El objetivo del análisis de referentes es conocer y estudiar los sistemas, estructuras y mecanismos que sean capaces de realizar las diferentes funciones de los sistemas que componen el proyecto SISCOM anteriormente planteadas, haciendo énfasis en los tipos de desplazamiento curvo o circular, ensambles y montajes que existen en el mercado, desde un punto de vista del diseño se estudiará función y forma. Es fundamental la arista del diseño ya que interesa saber si se han diseñado previamente estos sistemas, estructuras o mecanismos en otros contextos y así poder rescatar su eficiencia y extrapolarlo al proyecto en cuestión.

Algunas de las consideraciones que se tuvieron en cuenta para la búsqueda de referentes fueron:

- Forma y dimensiones de la boquilla de extrusión, cabe destacar que este componente es un acople macho que se une a la manguera de suministro de mortero.

- Peso del robot UR5/CB3 considerando los cables y manguera.
- Peso total que deberá soportar la viga giratoria y el sistema de rotación.

El peso de un robot con sus cables es de 18,4 kg y el peso de la manguera se estimará en 5 kg que corresponde a la carga útil del robot, asegurándonos de que los sistemas soporten el peso de los robots cuando se está en una condición máxima de carga. Obteniendo el peso en conjunto de un robot con la manguera de suministro, el cual es igual 23,4 kg. Este peso conjunto será soportado por la base de soporte y el mecanismo de extensión del eje vertical, sin embargo, se debe considerar aumentar ese peso para evitar posibles fatigas de los componentes y dar margen de error, estimando un peso conjunto de 30 kg.

La viga giratoria deberá soportar todos los componentes del sistema de extrusión, lo que significa que mínimo deberá soportar el peso de los dos robots con sus mangueras de suministro, cuyo total es de 46,8 kg, pero con las consideraciones anteriormente mencionadas su

peso total estimado sería de 60 kg, sin embargo, esta carga es móvil y actuará como dos cargas puntuales de 30 kg a lo largo de toda la viga.

Por otro lado, se debe considerar que el sistema de rotación deberá soportar el peso de la viga giratoria con el sistema de extrusión montado, cargas que se definirán durante la búsqueda de referentes y propuestas de diseño.

Para iniciar con la búsqueda de referentes primero se debió definir los componentes que requerían de un proceso de diseño, así las funciones de estos componentes guiaran las palabras claves para realizar la búsqueda de referentes. Los componentes con sus respectivas funciones y palabras clave se muestran en el anexo 9, además se presenta el orden de busque de los componentes según su relación y relevancia con los demás. Debido a lo mencionado, se inicia con los referentes enfocados en el sistema de extrusión, ya que el diseño del sistema de rotación dependerá de la morfología que podrían tener las soluciones a los componentes del sistema de extrusión.

## SISTEMA DE EXTRUSIÓN

A continuación, se presentan los referentes principales para el componente acople de la boquilla. Cabe destacar que la boquilla de extrusión está conformada por un acople de manguera camlock macho, como el que se muestra en la figura 47, debido a lo mencionado anteriormente el primer referente estudiado en el acople hembra de este sistema.



Figura 47: Manguera de mortero con acoples (Fuente: <https://www.bautech-hoefer.de/PFT-OnlineShopde/es/Mangueras-de-mortero-y-accesorios>)

## Acople Camlock Hembra



Figura 48: Acople Camlock hembra (Fuente: <https://www.kmx.cl/product/acoples-camlock/>).

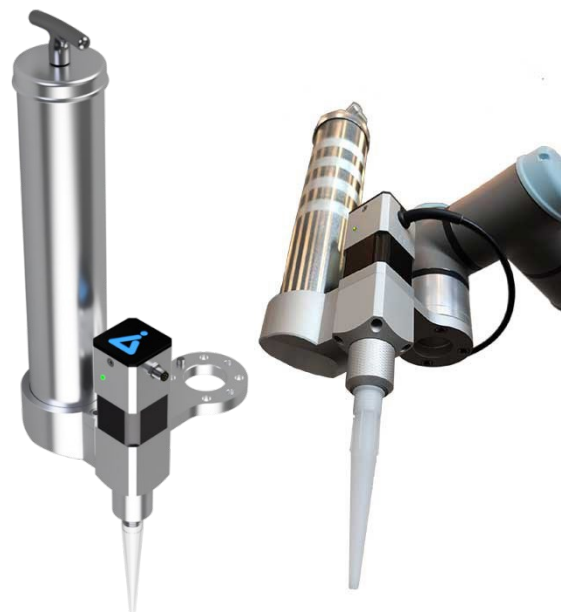
Los acoples Camlock o Unión rápida tipo Camlock, son un sistema de sujeción que permite realizar de forma rápida y sencilla uniones entre mangueras, acoplamiento con estanques, bombas o bien a líneas de piping. A estos acoples también se les conoce como “unión leva y ranura” o “Cam & groove coupling”, debido a su sistema de sujeción, donde el acople macho posee una especie de ranura circular que se ensambla con el acople hembra (figura 48) que posee unas especie de palancas de sujeción rápida. Este sistema puede estar fabricado con cuerpo en

Aluminio, Acero Inoxidable 316, Polipropileno o bien Bronce/Latón.

Lo que se rescata de este referente es su sistema de acople, el cual está diseñado específicamente para generar un ensamblaje rápido y sencillo entre los acoples, gracias a sus palancas que se ajustan con un pivote y se adaptan a la forma de la ranura.

#### **FD400 - Aim Robotics**

FD400 es una herramienta de dispensación / efector final para Universal Robots que garantiza la entrega precisa de fluidos de viscosidad media, como grasa y silicona, dentro de una configuración de producción. Esta herramienta se muestra en la figura 49, de la cual se rescata su sistema de sujeción y ensamblaje al Universal Robot, como se puede apreciar este encaja perfectamente a los agujeros de montaje ubicados en la cabeza del robot, además se destaca la orientación de la herramienta de dispensación la cual se podría extrapolar a la boquilla de extrusión del sistema de extrusión.



*Figura 49: Dispensador de cartucho robótico FD400 Air-Less™ (Fuente: <https://aim-robotics.com/fd-air-less-cartridge-dispenser/>).*

#### **PlasmaTEC-X UR – Tantec**

PlasmaTEC-X UR es una unidad de tratamiento superficial con plasma atmosférico. Es una unidad para el tratamiento de superficies de diferentes polímeros y se puede utilizar en diversas industrias como impresión, encolado o modificación de superficies. Esta herramienta se muestra en la figura 50, de la cual se rescata el

sistema de instalación y montaje, al igual que el referente anterior, esta herramienta se ensambla al robot por medio de las perforaciones ubicadas en el extremo del brazo, por otro lado, este sistema se destaca por su sistema de sujeción de la herramienta de plasma, el cual permite un fácil y sencillo de montaje, ya que actúan como prensas y solo con girar un tornillo se puede fijar o soltar la herramienta.

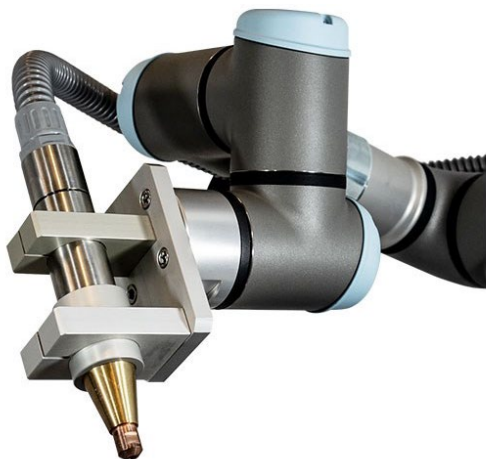


Figura 50: PlasmaTEC-X UR (Fuente: <https://tantec.com/plasmatec-x-ur>).

## Millibar Manual Tool Changer - Millibar Robotics



Figura 51: Cambiador de herramientas manual Millibar (Fuente: <https://www.millibar.com/manual-tool-changer/>).

Millibar Manual Tool Changer, tal como lo dice su nombre es un cambiador manual de herramientas permite a los operadores cambiar las herramientas sin esfuerzo de manera rápida y simple para aplicaciones de producción de en serie de alto volumen. En la figura 51 se puede apreciar su sistema de acople de herraminetas,

cual se rescata debido a su rápida y sencilla manipulación, como se puede observar su cambiador de herramienta manual solo requiere de soltar la palanca para hacer un rápido cambio sin necesidad de sacar el acople del extremo del brazo.

### **SHW Connector – GRIP**



*Figura 52: conector SHW de GRIP (Fuente: <https://www.grip-gmbh.com/connect/shw>)*

El conector SHW permite al operador cambiar rápidamente herramientas, como pinzas o aplicaciones en un brazo robótico. El conector se compone de un montaje superior e inferior, el montaje superior está conectado al brazo del

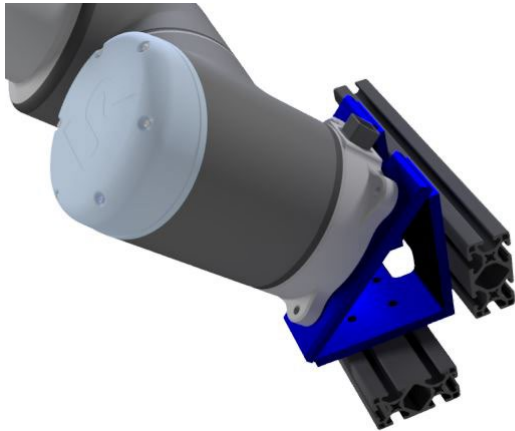
robot, mientras que el montaje inferior está conectado a la herramienta. Al ensamblar los dos montajes se conecta la herramienta al robot, permitiendo una instalación rápida de diferentes herramientas, como se muestra en la figura 52.

Lo que se rescata de este referente es su sistema de ensamble entre los dos montajes que permite una instalación rápida y sencilla sin tener que desenroscar ninguna parte del robot, lo cual se logra mediante una palanca de liberación mecánica, muy similar a lo visto en el referente Millibar Manual Tool Changer, sin embargo, la diferencia que se observa entre estos dos referentes es el tipo de ensamble entre las dos piezas que los componen.

Los siguientes referentes corresponden al componente base de soporte, cabe destacar que los productos de base para montaje de un robot son limitados, ya que normalmente los robots son montados directamente a una estructura o espacio de trabajo, por lo que en el mercado en su mayoría encontraremos bases de montaje en ángulo y placas de montaje, estas últimas no se

estudiarán como referente ya que en su mayoría solo son placas lisas de instalación.

### **Base de robot en 45 grados para montaje en marco - Cobot Depot**

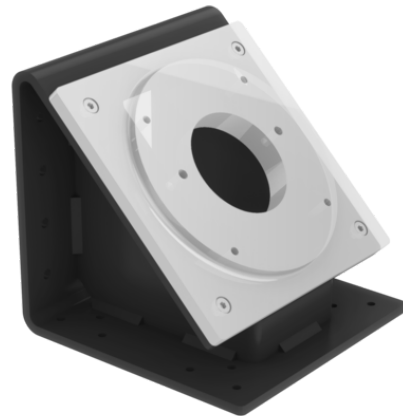


*Figura 53: Base de robot en 45 grados para montaje en marco (Fuente: <https://cobotdepot.com/product/45-degree-robot-base-frame-mount/>).*

Esta base de 45 grados está diseñada con centros de orificios de montaje que corresponden a los rieles de marco con ranuras en T, montándose a los marcos como se muestra en la figura 53. El diseño modular del soporte se adaptará a los tres tamaños de Universal Robots.

Lo que se rescata de este referente es su versatilidad capaz de adaptarse a diferentes tamaños de robots, por otro lado se debe tener presente su materialidad, el cual está fabricado de aluminio 6061-T6, consideración que nos servirá si es que se necesita fabricar una pieza personalizada.

### **Angled Robot Base – Vention**



*Figura 54: Base de robot en ángulo de Vention (Fuente: <https://vention.io/parts/angled-robot-base-873>).*

La base del robot en ángulo de Vention permite un fácil montaje de los robots en ángulo de 45° o en plano, optimizando el alcance del robot. Para la instalación del robot debe incorporarse una placa

de montaje del robot, tal como se muestra en la figura 54.

De este referentes se rescata la sencillez de la forma que permite montar un robot en ángulo, en posición vertical o posición horizontal, según donde se instale la placa de monje del robot. A diferencia del referente anterior este solo requiere de un punto de apoyo entre la estructura donde se quiere montar y la base del robot. Su mayor resistencia estructural se debe al porte interior de la base y su material de fabricación (acero 1010), cual le da mayor resistencia pero aumenta su peso (7,8 kg).

### **Base Connector – GRIP**



*Figura 55: Conector de base GRIP (Fuente: <https://www.grip-gmbh.com/products/connect>).*

El conector de base GRIP (figura 55) permite la extracción rápida y fácil de todo el brazo del robot, sin necesidad de desenroscar la base. Este producto se compone de dos piezas de montaje, una que se atornilla a la base del robot y la otra a una mesa, estructura o celda de trabajo. El ensamble de estas piezas permite una conexión rápida y segura. Este sistema de conexión manual permite a las empresas utilizar el mismo robot en varias celdas diferentes sin tener que desenroscar el robot cada vez.

Al igual que el referente conector SHW de GRIP, se rescata su sistema de ensamble, el cual con una simple palanca permite liberar el robot de su posición actual y llevarlo a una nueva posición, facilitando la mantención del robot.

A continuación, se presentan los referentes para el componente mecanismo de extensión del eje vertical, cabe mencionar que debido a su relación con los demás componentes de los sistemas se presentan diferentes soluciones que cumplen con la misma función de este.

## BEM PRO2 8080 - Be More 3D



Figura 56: Impresora 3D de hormigón con sistema aporticado móvil (Fuente: <https://bemore3d.com/bem-pro2/>).

BEM PRO2 8080 es la primera impresora 3D modulable y deslizante del mercado. Permite la construcción de edificaciones totalmente personalizadas en tiempo récord. Como se puede apreciar en la figura 56, esta impresora 3D de hormigón posee un sistema aporticado móvil, el cual permite al sistema de extrusión en todas las direcciones (X,Y y Z).

Lo que se rescata de este referente es su mecanismo de elevación el cual permite que la

viga central que soporta el sistema de extrusión de desplace en el eje vertical. Este mismo mecanismo que se utiliza para deslizar el sistema de extrusión sobre la viga central.

## DS 3×3 ACADEMY - D-Shape™

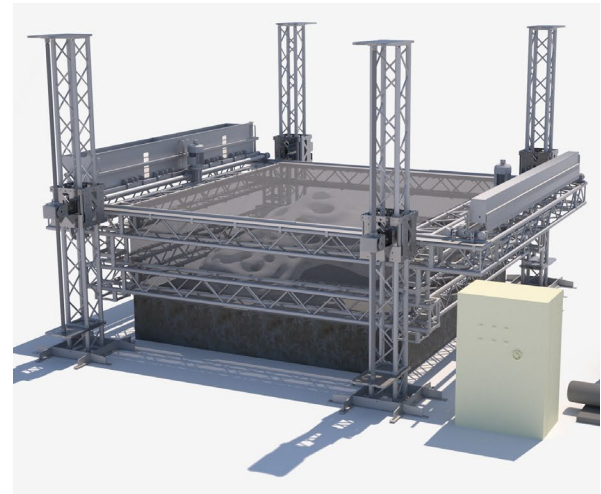


Figura 57: Impresora 3D DS 3×3 ACADEMY (Fuente: <https://d-shape.com/3d-printers/>).

DS 3×3 ACADEMY (figura 57) es una impresora 3D patentada de lecho de partículas de bloques de construcción conglomerados, es decir que utiliza el metodo de impresión aditiva D-Shape. Lo que se rescata de este referentes es el

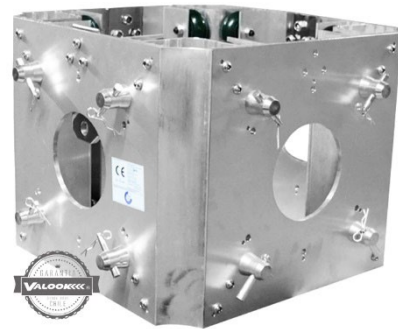
mecanismo de elevación que se conecta a un husillo de avance, el cual es muy parecido al del referente anterior, sin embargo, se destaca que esta impresora 3D debe mover en el eje vertical mucho más peso, ya que debe mover una corridilla de boquillas montadas sobre el marco central.

Como se puede observar en los dos referentes vistos (figura x y x), poseen un mecanismo de desplazamiento que se adaptan a sus estructuras de apoyo y adicionalmente un husillo de avance que se conecta a mecanismo y permite que este suba o baje. Es por ello que se busca en el mercado la pieza mecánica que cumpla con la función de desplazamiento vertical y a su vez se adapte a la estructuras de apoyo de celosía que componen el sistema estructural del proyecto, cabe destacar que las estructuras de celosía corresponden a truss cuadrado 30/30.

### **Carro F34 - Cosmic Truss**

El carro elevador F34 (figura 58) está diseñado para ser utilizado con pilares de truss cuadrado 30/30. Dispone de cuatro conectores en sus cuatro caras, los cuales le permiten acoplar otras

estructuras de celosía (truss cuadrado 30/30 o 40/40). Posee un peso de 35,63 kg y una materialidad de aluminio lo que le otorga al carro una gran estabilidad y seguridad a la estructura. Destacando de su diseño su sistema de desplazamiento conformado por cuatro ruedas montadas en cada esquina las cuales se deslizan por la estructura de celosía.

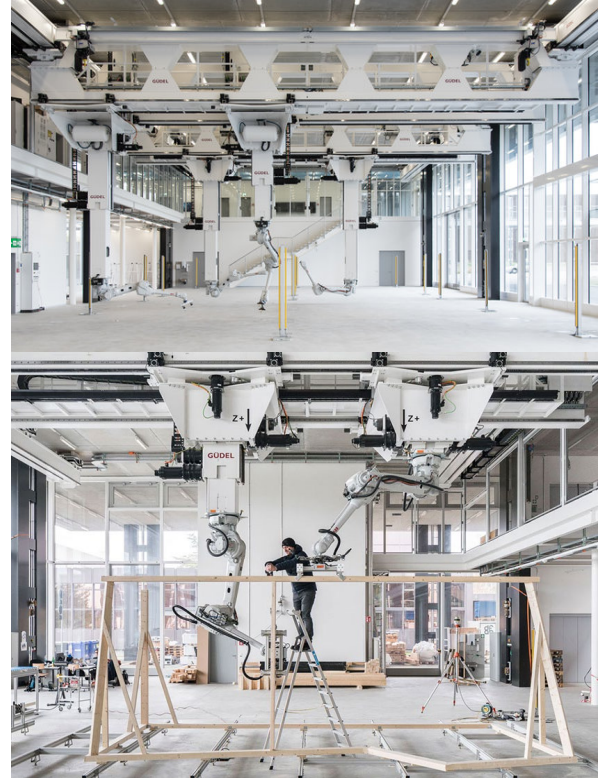


*Figura 58: Carro elevador para torre truss (Fuente: <https://www.valook.cl/productos/truss-system/accesorios/carro-torre-30-30-40-cosmic-truss-160161>)*

**The Robotic Fabrication Laboratory (RFL) -  
ETH Zurich**

El Laboratorio de Fabricación Robótica (RFL) de la Escuela Politécnica Federal (ETH) de Zurich es un sistema multi-robótico con un alto grado de flexibilidad que se utiliza para varios procesos en la construcción de edificios digitales. Está compuesto por cuatro robots industriales de seis ejes que cuelgan boca abajo de un sistema de pórtico elevado. En la figura 59 se muestra el laboratorio de fabricación robótica y su utilización en el proyecto arquitectónico de gran escala llamado DFAB HOUSE.

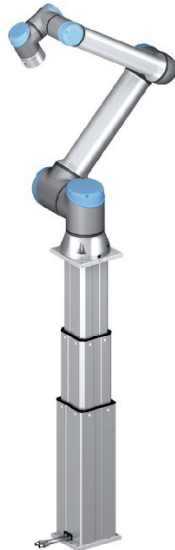
De este referente se rescata el sistema de columnas telescópicas utilizadas para cambiar el posicionamiento vertical de los robots, cabe destacar que este sistema pertenece a la empresa GÜDEL, sin embargo, para su implementación en el prototipo del sistema cooperativo multi-robot, el sistema de posicionamiento vertical ofrecido por GÜDEL posee grandes dimensiones, ya que están diseñados para acoplarse a robots industriales los cuales son mucho más grandes que los que se utilizarán en el prototipo.



*Figura 59: Proyecto DFAB HOUSE desarrollado en el laboratorio de Fabricación Robótica del ETH (Fuente: <https://www.madera21.cl/conoce-el-primero-proyecto-arquitectonico-a-gran-escala-y-de-madera-en-que-colaboran-robots/>).*

Es por ello que se busca en el mercado, un sistema de posicionamiento vertical que se adapte al robot UR5 y a las dimensiones del prototipo.

### **LIFTKIT-UR - EWELLIX**



*Figura 60: Columna telescópica LIFTKIT-UR (Fuente: <https://www.ewellix.com/en/cl/products/telescopic-pillars/liftkit/liftkit-ur>).*

LIFTKIT-UR (figura 60) es un sistema de posicionamiento vertical para la extensión del rango operativo de un robot universal. Es un sistema listo para instalar que incluye un pilar

telescópico, un controlador y un complemento de software para Universal Robots (UR Caps).

De este producto se destaca la facilidad de montaje y adaptabilidad a los diferentes tipos de robots universal, además posee un diseño de pilar robusto que le permite soportar y empujar cargas de hasta 1500 N.

A continuación, se presentan los referentes para los componentes guía lineal de precisión y mecanismo de desplazamiento lineal, la búsqueda de los referentes para estos componentes se hace en conjunto debido que alguna de las soluciones se presentan en conjunto satisfaciendo las funciones de los dos componentes.

### **SLIDEKIT 2.0 – EWELLIX**

El SLIDEKIT 2.0 es un sistema de posicionamiento horizontal para la extensión del rango operativo de un robot universal. Es un sistema listo para instalar que incluye un módulo lineal, un controlador y un complemento de software para Universal Robots (URCaps).



*Figura 61: Eje lineal de posicionamiento horizontal para robots colaborativos (cobot) (Fuente: <https://www.ewellix.com/en/global/products/linear-systems/slidekit-20>).*

Como se puede apreciar en la figura 61, el sistema de posicionamiento horizontal esta compuesto dos mecanismos, el primero guía el movimiento preciso sobre el carril horizontal, este mecanismo hace referencia al componente guía lineal de precisión. Y el segundo, es un carro que coincide con la guía y se desplaza de forma precisa por el carril horizontal, este ultimo hace referencia al componente mecanismo de desplazamiento lineal. Lo que se rescata de este referente que

dispone de un posicionamiento e instalación fácil y rápida, el sistema esta listo para usar por lo que no requiere desarrollo de hardware / software y puede soportar cargas hasta máximo 1111,5 kg aproximadamente.

### **7TH Axis range extender - Vention**

Los extensores de rango 7th Axis de Vention (figura 62) son kits de máquinas integrales que se pueden configurar por completo según sus necesidades de fabricación y aumentar el alcance de trabajo horizontal en espacios limitados con un extensor de rango montado en el piso o en el techo. Los extensores de rango cobot vienen con un software URCap intuitivo y sin código que interactúa sin problemas con cualquier Universal Robots.

Al igual que el referente anterior, esta solución se compone de dos partes que hacen referencia a los componentes guía lineal de precisión y mecanismo de desplazamiento lineal. Sin embargo, este referente destaca por su versatilidad de diseño, ya que los extensores de rango se pueden adaptar según la necesidad del

cliente, además con este sistema se puede asegurar un desplazamientos horizontal aereo.



Figura 62: Extensor de rango 7th Axis para alcance aéreo (Fuente: <https://vention.io/range-extender>).

### HDS2 Heavy Duty Linear Guide – HepcoMotion

HDS2 es una guía lineal de servicio pesado, compuesta por guías lineales para manejar cargas pesadas y boques de cojinetes en V.

De este referente se rescata su modularidad, ya que las guías se pueden montar sobre cualquier perfil de aluminio, como se muestra en la figura 63, estas guías lineales pueden tener en un lado un sistema de cremallera lo que permite un

desplazamiento preciso del bloque de cojinetes. Además las guías lineales y cojinetes son de acero inoxidable lo que les otorga una mayor resistencia.

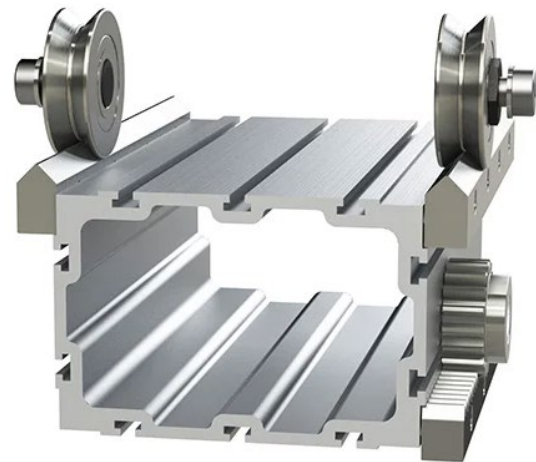
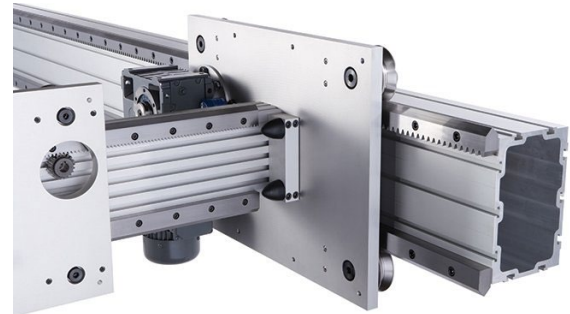


Figura 63: Guía lineal de servicio pesado HDS2 (Fuente: <https://www.hepcotion.com/product/linear-guides/hds2-heavy-duty-linear-guide/?tab=product>).

## SISTEMA DE ROTACIÓN

A continuación, se presentan los referentes principales para el componente viga giratoria, la búsqueda de estos referentes se hizo considerando la magnitud de las cargas a las cuales este referente va a estar sometido.

## MCS Aluminium Profiles - HepcoMotion



Figura 64: Perfiles de aluminio con ranura en T (Fuente: <https://www.hepcotion.com/product/aluminium-profile-construction-system/mcs-aluminium-profiles/>).

La gama de perfiles de aluminio Hepco (figura 64) poseen ranuras en T o lados lisos, las cuales permiten la fijación de sistemas de guías lineales. El uso de perfiles de aluminio como alternativa a los marcos de acero soldados puede reducir los costos de material, mejorar la flexibilidad y reducir el tiempo de montaje.

## Aluminum Extrusion - Vention

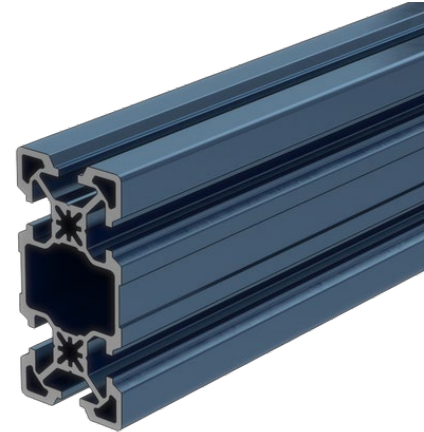


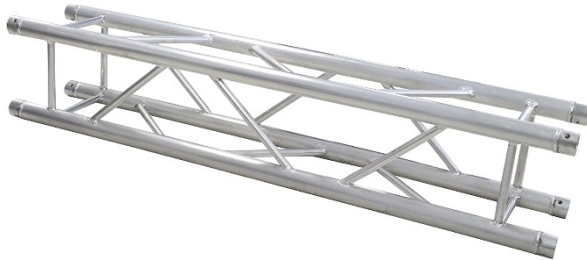
Figura 65: Extrusión de aluminio de Vention (Fuente: <https://vention.io/parts-library/category/structural-and-framing/aluminum-extrusions>).

Las extrusiones de aluminio son de alta precisión, con una mejor rigidez estructural, rectitud y precisión que otras vigas del mercado. poseen ranuras como interfaz única en "forma de V" de Vention (se muestran en la figura 65), las cuales han sido especialmente diseñada para funcionar con las placas de ensamblaje de alta precisión de Vention, lo que permite ensamblajes rígidos y de alta precisión que normalmente no se pueden hacer con extrusiones de aluminio. Las interfaces en "forma de V" también se pueden utilizar como

riel cuando se combinan con los componentes de movimiento lineal de Vention.

De estos dos referentes se rescata su versatilidad para el montaje de componentes como guías y sistemas de fijación, además poseen una estructura y forma simple que puede llegar a soportar mucho peso dependiendo del tamaño de la viga.

### **Truss System**



*Figura 66: Truss cuadrado (Fuente: <https://www.valook.cl/productos/truss-system/cuadrado-30-30>).*

Un truss es un conjunto de vigas u otros elementos que crea una estructura rígida. Estructura fabricada de celosía, ya que esta

formada por elementos rectos como listones de aluminio que se unen para construir la viga, como se muestra en la figura 66.

Lo que se rescata de este referente es que al tener diferentes puntos de distribución de cargas, es más resistente que los otros dos referentes mencionados anteriormente, sin embargo, posee un volumen mucho mayor y sus listones que se unen son tubulares, lo que podría dificultar su montaje con el sistema de rotación y extrusión.

Finalmente se presentarán los referentes para los componentes guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular. Al igual que el sistema de extrusión, la búsqueda de los referentes para estos componentes se hace en conjunto debido que alguna de las soluciones se presentan en conjunto satisfaciendo las funciones de los dos componentes.

### **Curviline – Rollon**

Curviline son guías lineales curvas con deslizadores de rodamientos radiales de bolas. El diseño de las guías curvilíneas están disponibles en diferentes tamaños con radio constante o

variable, según lo necesite el cliente. Sus rieles deslizadores son cincados según ISO 2081, ofreciendo resistencia y durabilidad de los productos.



*Figura 67: Guías lineales curvas (Fuente: <https://www.rollon.com/IN/en/products/linear-line/5-curviline/>).*

Lo que se rescata de este referente, con respecto al componente guía circular de precisión, es su versatilidad y materialidad que le da resistencia, además de que se puede realizar la fabricación de este en tamaños de gran escala para todo tipo de aplicaciones no lineales y ofrece un acople perfecto con sus deslizadores, evitando descarrilamientos. Por otro lado, con respecto al

componente mecanismo de desplazamiento circular, se rescatan el sistema de cuatro rodillos de los deslizadores, los cuales están dispuestos en módulos pares con un eje rodamiento central que permite al deslizador adaptarse a cualquier forma curva que podría tomar el riel, en la figura 67 se puede observar como el deslizador se va adaptando a las curvas del riel.

### **HDRT Heavy Duty Ring Guides and Track Systems - HepcoMotion**



*Figura 68: Anillo guía de precisión de gran diámetro (Fuente: <https://www.hepcotion.com/product/ring-guides-track-systems-and-segments/large-diameter-ring-guides-segments-and-track-systems/?tab=product>).*

HDRT son unas guías de anillo de precisión de gran diámetro (figura 68), las cuales se pueden fabricar en cualquier tamaño sin límite superior.

Los anillos se pueden producir según sus requisitos exactos; combinado con la gama de rodamientos guía en V o bloques de rodamientos MHD de Hepco. Se pueden alcanzar capacidades de carga superiores a 20 toneladas.

Este referente hace referencia al componente guía circular de precisión, rescatando su versatilidad de fabricación y fusión de guía con el sistema de precisión, ya que los anillos se pueden especificar con un engranaje mod grande y una transmisión de piñón que brindan fuerzas impulsoras extremadamente altas, además su construcción modular proporciona una solución fácil de ensamblar.

### **MHD bearing blocks – HepcoMotion**

Los Carros MHD de rodamientos en V (figura 69), se adaptan al sistema guías de anillo de precisión HDRT, ya que sus rieles también tienen terminación en V, este sistema de rodamiento permite un mayor acople de ambos componentes, mejorando el deslizamiento y evitando el descarrilamiento.



*Figura 69: Carro de rodamientos para cargas pesadas (Fuente: <https://www.hepcotion.com/product/ring-guides-track-systems-and-segments/large-diameter-ring-guides-segments-and-track-systems/?tab=product>).*

Este referente hace referencia al componente mecanismo de desplazamiento circular, rescatando su forma y terminación en V que optimiza el desplazamiento y se adapta a cualquier tipo de curva, sin embargo, es importante considerar la separación entre los cuatro rodamientos en V que componen el carro ya que si la curva del anillo es muy cerrada la distribución de los rodamientos deberá ser más cercana sino el carro no podrá desplazarse.

## MHDT Flat Tracks / MHDT Flat Track Rack Cut - HepcoMotion



Figura 70: Carril plano para el desplazamiento de bloques de cojinetes MHD (Fuente: <https://www.hepcotion.com/product/linear-guides/mhd-track-roller-linear-motion-system/?tab=technical>).

MHDT Flat Tracks, tal como lo dice su nombre, son carriles o guías planas de acero que guían y permiten el desplazamiento de los bloques de cojinetes MHD. Estos carriles también pueden tener un extremo con una cremallera (MHDT Flat Track Rack Cut) para precisar el desplazamientos de los bloques incorporando un motor y piñón, como se muestra en la segunda imagen de la figura 70.

Este referente hace referencia al componente guía circular de precisión, rescatando su diseño simple que se adapta al montaje de un perfil de aluminio u otro tipo de vías.

## MHD Track Roller Linear Motion System - HepcoMotion



Figura 71: Sistema de movimiento lineal con rodillos de pista MHD para trabajo pesado (Fuente: <https://www.hepcotion.com/product/linear-guides/mhd-track-roller-linear-motion-system/?tab=product>).

Los bloques de cojinetes MHD (figura 71) ha sido diseñado específicamente para transportar equipos de automatización pesados. Las cargas elevadas y sobresalientes se adaptan fácilmente, lo que hace que el sistema sea especialmente adecuado para mover robots grandes.

Este referente hace referencia al componente mecanismo de desplazamiento circular, rescatando su distribución de los rodamientos los cuales hacen contacto todo el tiempo con el sistema de guías, distribuyendo las cargas a las cuales podrías estar sometido el sistema.

### **Corona de orientación - SKF**

Las coronas de orientación son rodamientos que están compuestas por un aro interior y un aro exterior, uno de los cuales suele incorporar un engranaje, como se muestra en la figura 72. Junto con los orificios de fijación de ambos aros, permiten una transmisión de potencia optimizada con una conexión simple y rápida entre los componentes adyacentes de la máquina. La fabricación de estas coronas puede ser estándar o personalizadas, con diámetros exteriores de 0,1

a 18 m, para satisfacer las exigencias de aplicaciones especiales.



*Figura 72: Corona de orientación con cremallera exterior e interior (Fuente: <https://www.skf.com/cl/products/slewing-bearings>).*

Este referente hace una completa fusión entre los componentes guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular, rescatando su integración de componentes que permite un óptimo control de movimiento de precisión y simplifica el sistema en una sola pieza, su alto grado de resistencia a cargas pesadas y su rápido y sencillo sistema de fijación.

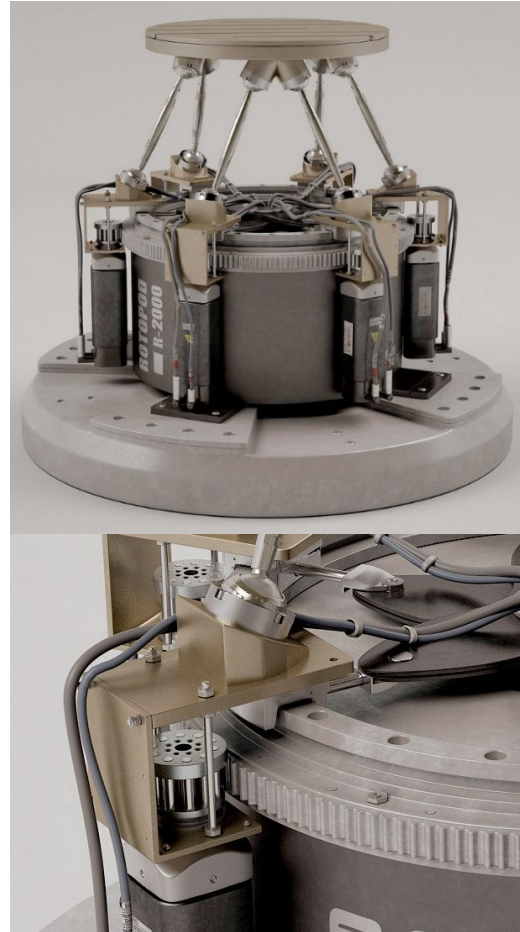
Sin embargo, muchas veces al requerir diámetros de mayor tamaño, la altura y espesor del año aumentan en demasía, lo que se refleja en su peso y costo. Además, cabe mencionar que al ser solo una pieza su mantención se complica un poco, aun así, la mantención se hace a largo plazo.

### **Rotopod R-3000**

El rotopod consta de manipuladores de eslabones paralelos que utilizan un conjunto de puntales que proporcionan seis grados de libertad de movimiento, como se muestra en la figura 73. Los rotópodos se han utilizado para simuladores de vuelo y conducción, posicionamiento industrial, pruebas de articulaciones y estudios biomédicos de movimiento.

Como referente con respecto al componente guía circular de precisión, se rescata la utilización de un riel interior independiente que guía el desplazamiento de varios módulos de precisión. Como referente con respecto al componente guía circular de precisión, se rescata la utilización de

un riel interior independiente que guía el desplazamiento de varios módulos de precisión.



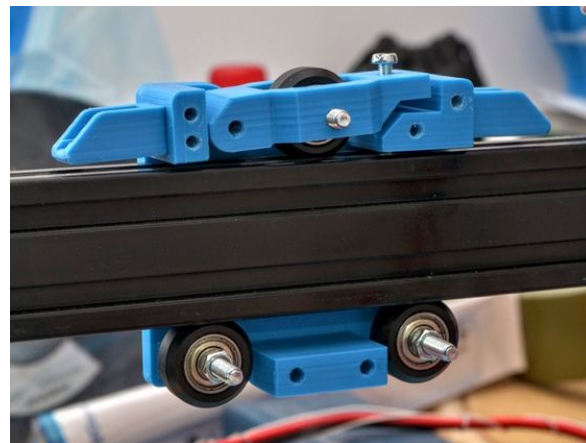
*Figura 73: Robot Rotopod R-2000 (Fuente: <https://www.designworldonline.com/roller-pinion-gear-steps-up-rotopod-robot-motion/>).*

Por otro lado, con respecto al componente mecanismo de desplazamiento circular, se rescata el módulo de desplazamiento, el cual incorpora un sistema de precisión y un carro que se acopla a las guías curvas independientes, este sistema permite una mayor independencia del desplazamiento de cada módulo. Cabe destacar que este sistema de precisión está compuesto por Roller Pinion Gear (RPG) de Nexen, que reemplaza el diseño tradicional de engranajes rectos de dientes con un sistema de rodillos que funciona con mayor suavidad y un anillo de engranajes Nexen. El sistema de riel está compuesto por guías THK las cuales no disponen grandes diámetros y no soportan mucho peso.

### **Carro modular para railes con perfiles de aluminio**

El carro modular para railes de 40x20, se compone de tres ruedas, de las cuales la rueda superior posee un sistema de ajuste que se fija con un perno superior, lo que permite que solo se atornille la tensión en lugar de las tuercas excéntricas en los rodamientos, como se muestra en la figura 74. Este carro fue diseñado para la impresora 3D de escritorio Tevo Tarantula para

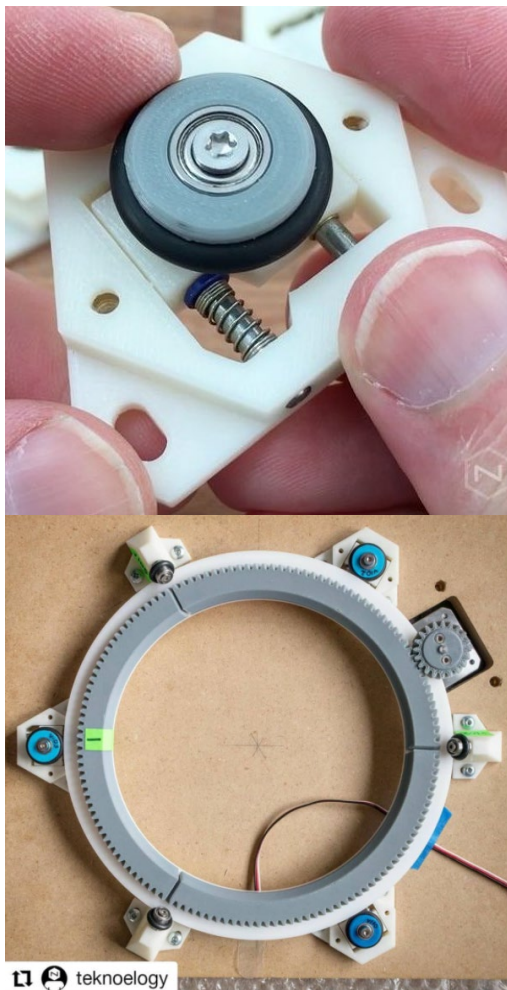
reemplazar el carro X original, sin embargo, puede ser utilizada para otros rieles 4020 y ruedas en V sólidas (24 mm).



*Figura 74: Carro modular para riel (Fuente: <https://www.thingiverse.com/thing:1839201>).*

Este referente hace referencia al componente mecanismo de desplazamiento circular, rescatando su sistema de montaje que permite adaptarse al riel que en este caso es un perfil de aluminio lineal, sin embargo, al poseer tres rodamientos, el carril se puede acoplar a un sistema de riel curvo, donde su ruda ajustable se pueda modificar para que el carro se adapte a cualquier riel.

## Adjustable roller block – Teknoology



*Figura 75: Bloque de rodillo ajustable y aplicación con un anillo de precisión (Fuente: teknoology).*

El bloque de rodillo ajustable es un módulo que permite fijar y ajustar el posicionamiento lineal de un rodamiento. Está compuesto por una rueda o rodamiento que se monta en un cubo, este último posee unos pequeños rodamientos lineales que se acoplan a un sistema de “micro-riel” cilíndrico y un pequeño resorte mantiene la tensión en el cubo, tal como se muestra solo y en aplicación en la figura 75.

Este referente hace referencia al componente mecanismo de desplazamiento circular, rescatando su sistema ajustable de riles incorporados los cuales se pueden dejar fijos en una posición, además al contemplar solo un componente y ser modular este referente permite muchos tipos de aplicaciones las cuales se pueden adaptar fácilmente a un sistema de guías curvo.

Finalizando la búsqueda de referentes se realizó un análisis las variantes de relación y conexión entre los componentes según el enfoque de diseño de los sistemas de extrusión y rotación, donde se realizó una matriz comparando cada componente entre sí para determinar cuales

tienen o podrían tener una relación de diseño, es decir, que se estableció que componentes se podrían ensamblar entre sí para futuras consideraciones en la propuestas de solución, el análisis de relación y conexión de las partes y posibles fusiones de componentes. La matriz se muestra en el anexo 10, donde se marca con una X los componentes que mantienen una relación de montaje y ensamble. Además, con una X de color anaranjado, se muestran los componentes que mantienen esta relación pero que su solución podría terminar en una fusión de ellos, cabe mencionar que estos componentes destacados pueden cambiar el orden de ensamble y montaje sin alterar el funcionamiento del sistema.

#### 4.3. ETAPA 3: DISEÑO BÁSICO

En esta etapa del proceso de diseño se decantó la información establecida y recolectada en la definición de requerimientos, la descomposición funcional y el análisis de los referentes que cumplen con las funciones de cada componente estudiado.

#### 4.3.1. PROPUESTAS DE DISEÑO

A continuación, se presenta el desarrollo del diseño de las propuestas, cada una surgió de las posibles combinaciones y relaciones que poseen los componentes, además de la implementación de los sistemas, mecanismos y piezas rescatadas de los referentes.

##### **Guía circular de precisión y Mecanismo de desplazamiento circular**

Para iniciar con el diseño del sistema de rotación se desarrolló un esquema conceptual del desplazamiento en un riel circular, para ello se debió estudiar los posibles casos del posicionamiento de ruedas o rodamientos montados sobre un riel circular, como se muestra en la figura 76, donde las ruedas de color rosado se encuentran tangenciales a un segmento de riel circular. Gracias a este esquema se pudo analizar la relación con respecto al posicionamiento tangencial de los rodamientos, donde se observó que al colocar dos rodamientos como se muestra en el caso A de la figura, se puede trazar

claramente una línea recta entre el centro de estos dos rodamientos, demostrando que siempre se agrupan quedando paralelos uno al otro. Lo mismo se puede ver en el caso B, donde hay cuatro ruedas que se alinean en pares, sin embargo, las rectas que forman los pares de ruedas son opuestas. Por otro lado, en el caso C donde se disponen de tres rodamientos, los dos que de fuera que están tangente al exterior del riel circular buscan alinearse al único rodamiento que se encuentra al interior del riel, formándose un triángulo al unir las rectas proyectadas desde el centro de los tres rodamientos.

Por otro lado, en la misma figura 76, se pueden observar los casos D y E donde se incorpora un componente que permite el desplazamiento de precisión, este mecanismo estará compuesto por un sistema de engranajes, la cremallera de orientación será incorporada a la guía o riel circular y un pinón montado sobre un motor que transmitirá el movimiento rotacional al sistema de rotación. Y es en el caso F donde se muestra como este mecanismo de precisión interactúa con

las ruedas que permitirán un desplazamiento rotacional.

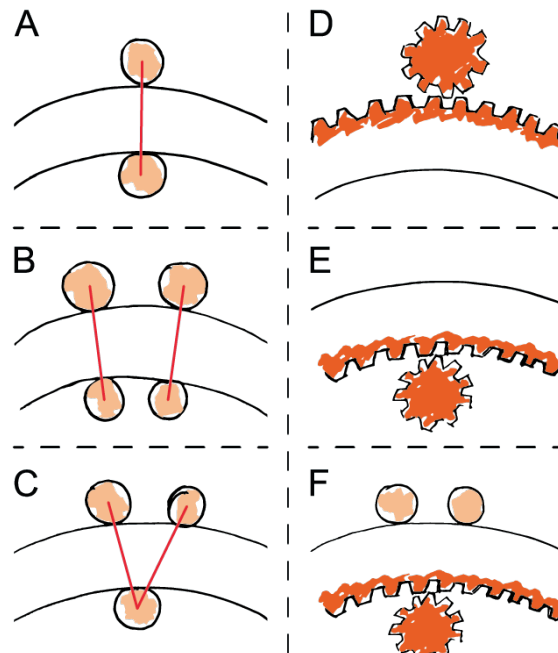


Figura 76: Esquema conceptual del desplazamiento en un riel circular (Fuente: Elaboración propia).

Teniendo en cuenta el esquema anterior, se procede a plantear diferentes combinaciones de diseño para los componentes guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular. Planteando seis diseños conceptuales, los cuales se muestran en la figura 77, estos

diseños se muestran solo desde una perspectiva la cual a simple vista podrían relacionarse a un mecanismo de desplazamiento lineal, donde los elementos con color rosado, naranja y rojo corresponden a ruedas de desplazamiento, mecanismo de desplazamiento de precisión y motor, respectivamente.

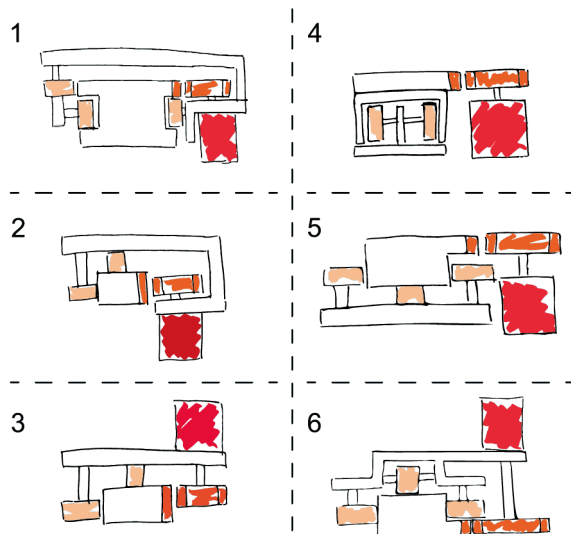


Figura 77: Diseños conceptual de los componentes Guía circular de precisión y Mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia).

Las propuestas de diseño conceptual nos permitirán estudiar su adaptación a un mecanismo de desplazamiento rotacional, las

cuales se llevaron a cabo mediante una modelación 3D sencilla y conceptual de dichos diseños que darieron paso a cinco propuestas formales. A continuación, se desarrollará cada propuesta y en el anexo 11 se podrán ver imágenes más a detalle de cada propuesta.

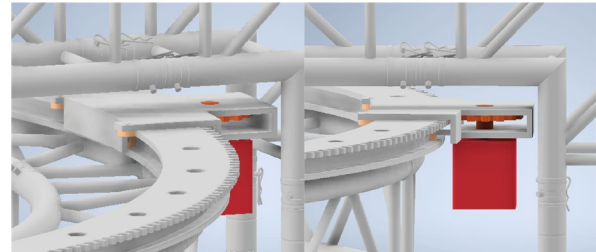
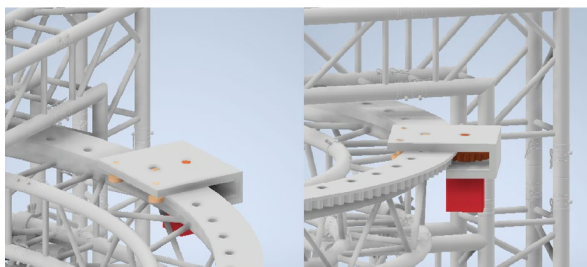


Figura 78: Propuesta de diseño “viga circular doble T con cremallera y carro de desplazamiento móvil con motor” (Fuente: Elaboración propia).

La figura 78 muestra la propuesta “viga circular doble T con cremallera y carro de desplazamiento móvil con motor”, esta propuesta se basa en el diseño conceptual 1, como se puede observar esta propuesta dispone de seis ruedas de las cuales cuatro están orientadas de forma vertical y sirven de apoyo y sustento en el mismo eje para la viga giratoria, cabe mencionar que el componente guía circular de precisión se conforma de una viga de acero con forma de

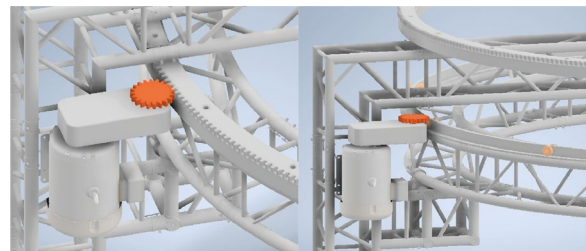
“doble T”, donde su anillo superior exterior presenta una sección de cremallera, la cual permite el desplazamiento de presión de la viga giratoria, cabe destacar que este componente mencionado en esta propuesta permanece fijo a al anillo estructural. Por otro lado, las dos ruedas que se encuentran en posición horizontal y el piñón mantienen el mecanismo de desplazamiento circular centrado en la guía y un movimiento rotacional continuo preciso.



*Figura 79: Propuesta de diseño 2 de guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia).*

La figura 79 muestra la propuesta “Cremallera circular y carro de desplazamiento móvil con motor”, esta propuesta se basa en el diseño conceptual 2, sin embargo, se puede considerar el mismo diseño y principio de funcionamiento que el diseño conceptual 3, ya que en entre estos dos

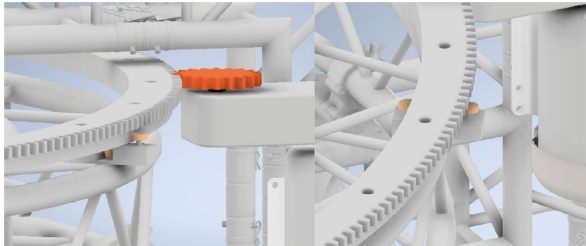
diseños el único gran cambio es la orientación del motor, modificando un poco la placa donde se montan las partes del mecanismo. Esta propuesta se compone de tres ruedas de las cuales una rueda se dispone de forma vertical soportando el peso de la viga giratoria y dos ruedas horizontales que con la ayuda del piñón centran el mecanismo de desplazamiento circular en el anillo de precisión, este último va fijo al anillo estructural.



*Figura 80: Propuesta de diseño 3 de guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia).*

La figura 80 muestra la propuesta “Plataforma de rotación con cremallera circular”, la cual se basa en el diseño conceptual 4, está compuesto por una viga circular en forma de T invertida, la cual dispone de 10 pares de rodamientos combinados con rodillo axial fijo, este tipo de rodamiento ofrece una óptima combinación radial / axial permitiendo

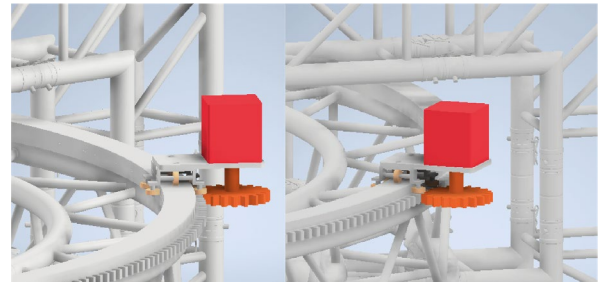
un mayor reparto de las cargas externas reduciendo las presiones entre el rodamiento y su perfil guía. Cabe mencionar que esta viga con los rodamientos montados se encuentra fija al anillo estructural, para generar el movimiento de rotación se monta sobre los rodamientos una viga circular con forma de C la cual hace contacto con los dos ejes del rodamiento radial / axial, sobre esta viga se instala un anillo con cremallera exterior que interactúa con un piñón conectado al motor. En esta propuesta es todo el anillo el que rota por lo tanto la viga giratoria se monta sobre él.



*Figura 81: Propuesta de diseño 4 de guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia).*

En la figura 81 podemos ver la propuesta “Viga circular con cremallera y módulos de desplazamiento fijo”, la cual se basa en el diseño

conceptual 5, propuesta compuesta por 4 módulos que permiten el desplazamiento circular, los cuales van fijos al anillo estructural, estos módulos poseen tres ruedas de las cuales una está orientada de forma vertical soportando la carga del anillo de precisión con la viga giratoria montada, y las dos ruedas posicionadas de forma horizontal que quedan tangentes a los diámetros interior y exterior del anillo de precisión permitiendo el desplazamiento circular y centrando los módulos a la guía.



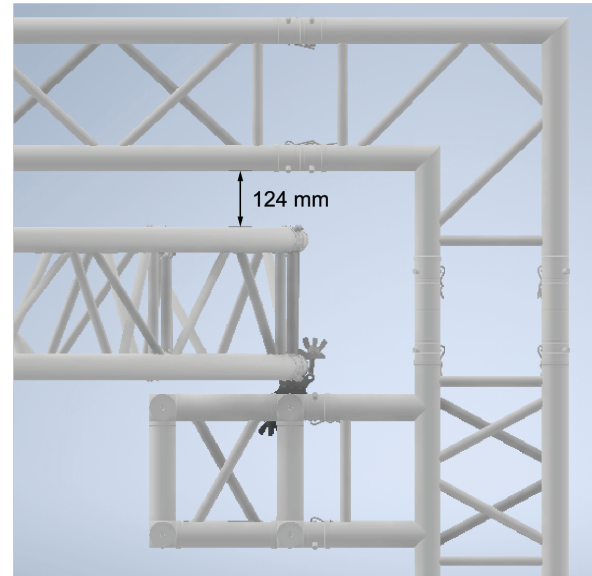
*Figura 82: Propuesta de diseño 5 de guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia).*

La figura 82 muestra la propuesta “Viga circular dentada y carro de desplazamiento móvil con motor”, esta propuesta se basa en el diseño conceptual 6 y la aplicación de mecanismos

rescatados de referentes. Como se puede apreciar, esta propuesta posee seis ruedas para el desplazamiento de las cuales cuatro se encuentran orientadas de forma horizontal y mantienen el mecanismo de desplazamiento circular centrado en el anillo guía de precisión y un movimiento rotacional continuo. Además, el componente guía circular de precisión permanece fijo al anillo estructural y el mecanismo de desplazamiento circular es el que rota con la viga giratoria montada. Cabe destacar que en esta propuesta se adaptó el sistema de doble deslizadores con ejes de rodamiento central que se adaptan a todo tipo de riel y guías curvas, sistema rescatado del referente Curviline de Rollon.

Con el desarrollo de estas propuestas de diseños se planteo generar una nueva configuración de las estructuras de celosía que dan forma al componente estructura de apoyo, además de plantear la eliminación del componente anillo estructural, con el fin de aumentar el espacio donde se posicionaran los componentes del sistema de rotación, porque como se puede

apreciar en las propuestas presentadas el espacio superior de montaje que hay entre el anillo estructural y la estructura de apoyo es pequeño, interponiéndose en algunas propuestas y condicionando el tamaño de las piezas a diseñar, la distancia que hay entre estos dos componentes se muestra en la figura 83. Al aumentar esta distancia permitirá plantear optimos sistemas de montaje y mejorar el diseño de las propuestas.



*Figura 83: Distancia superior entre los componentes anillo estructural y la estructura de apoyo (Fuente: elaboración propia).*

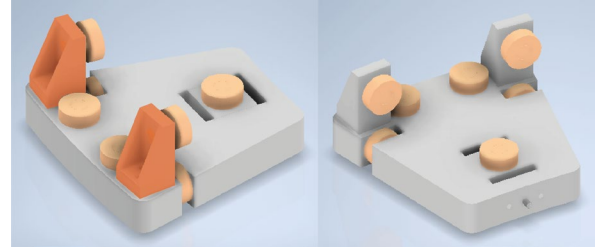
Esta modificación dio paso al desarrollo de la propuesta “Viga circular con cremallera y carro de desplazamiento fijo”, que se muestra en la figura 84, donde se elimina el anillo estructural y se utilizan solo las estructuras de apoyo para generar tres puntos de carga que mantienen la estabilidad y equilibrio de los sistemas de rotación y extrusión.



*Figura 84: Propuesta de diseño 6 de guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia).*

El componente de guía circular de esta propuesta, esta formado por un anillo que en su parte inferior posee una superficie sobresaliente lisa y en su parte superior un sistema de cremallera exterior proporcionando una desplazamiento preciso al rotar en contacto con el piñón del motor. Cabe destacar que este componenete será el que lleve montada la viga giratoria, por lo tanto la guía

circular no será fija y rotará transmitiendo el desplazamiento giratorio a la viga.



*Figura 85: Componente mecanismo de desplazamiento circular de la propuesta de diseño 6 (Fuente: Elaboración propia).*

Por otro lado mecanismo de desplazamiento circular de la propuesta se compone de siete rodamientos que permitan el desplazamiento del anillo guía de precisión, cuatro de estos rodamientos se ubican paralelos en pares, los cuales mantienen fijo el anillo guía de forma vertical, donde las piezas montables que se muestran de color naranja en la figura 85, son piezas desmontables que permiten un fácil montaje de la guía circular, además estas piezas mantienen en equilibrio el sistema cuando la viga giratoria cambia de posición. Los otros tres rodamientos que se encuentran orientados de forma horizontal permiten centrar y desplazar la

guía circular, donde el rodamiento que hace contacto con el interior del anillo posee un mecanismo ajustable que permite modificar la ubicación de este rodamiento adaptándose a las dimensiones de la guía circular y facilitando el montaje y mantenimiento de esta última.

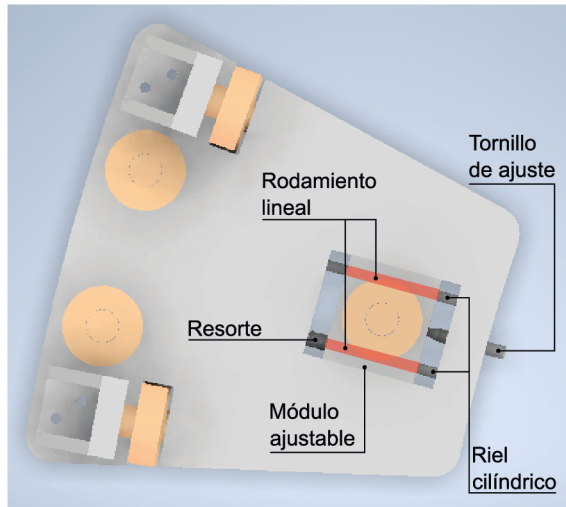


Figura 86: Partes del mecanismo ajustable de la propuesta de diseño 6 (Fuente: Elaboración propia).

Es importante mencionar que el mecanismo ajustable de la propuesta se basó en el referente Adjustable roller block de Teknoology, en la figura 86, se muestran las partes que componen este mecanismo, donde un rodamiento se monta en el

módulo ajustable que posee incrustados dos rodamientos lineales que se acoplan a unos rieles cilíndricos los cuales permiten desplazar el módulo a lo largo de ellos y por medio de un tornillo de ajuste y un resorte se puede ir variando y manteniendo una posición fija del módulo.

### Acople de boquilla

Para el desarrollo del diseño del componente acople de boquilla, se requirió estudiar las dimensiones y formas de la boquilla de extrusión, con el fin de comparar su tamaño con la brida para herramientas o cabeza del robot, las dimensiones de la boquilla de extrusión se muestran en el anexo 12. Además con este análisis se determinó las posibles configuraciones del acople de boquilla, según la posición y orientación de la brida para herramienta y la boquilla de extrusión, estableciéndose dos casos, los cuales se muestran en la figura 87. En el caso A la boquilla de extrusión se orienta paralelo al eje de rotación de la brida para herramientas, al contrario del caso B donde la boquilla se encuentra perpendicular al eje.

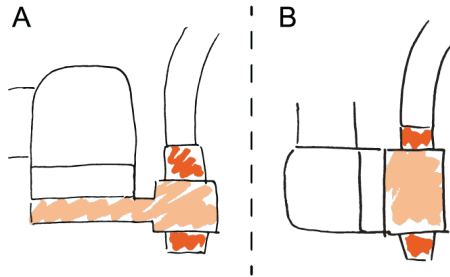


Figura 87: Esquema conceptual del componente acople de boquilla (Fuente: Elaboración propia).

Para averiguar cuál de los dos casos era el óptimo para el sistema de extrusión, se estudia el posicionamiento del robot en ambos casos, donde se esquematizan los ejes de rotación con el fin de visualizar la libertad de movimiento de todas las partes del robot, tanto base, juntas y brida de herramienta del brazo robótico. En la figura 88, se muestra el caso A y B con los ejes de rotación para cada parte que componen al robot. Considerando que la boquilla de extrusión siempre debe quedar perpendicular a la superficie de impresión, tomando esta condición, se comparan ambos casos donde se puede observar que las partes que cambian de posición para esta condición son solo la brida de herramienta y las dos juntas consecutivas a esta última.

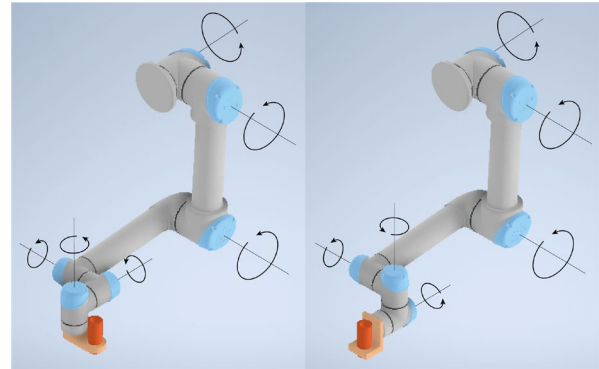
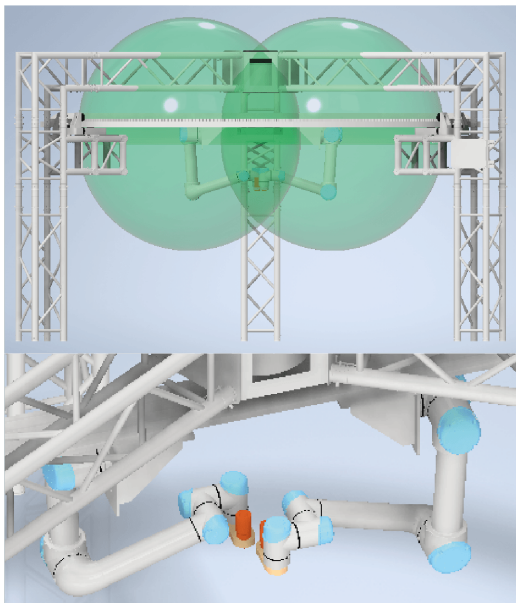


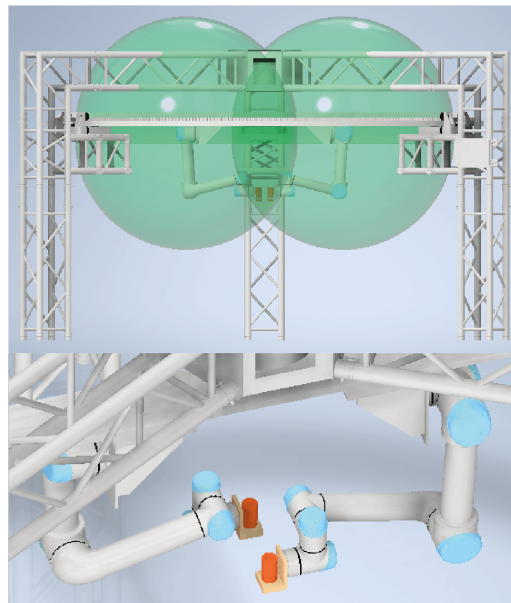
Figura 88: Orientación de los ejes de rotación del robot UR5, en la izquierda el caso A y derecha caso B (Fuente: elaboración propia).

Por otro lado, una de las variantes a considerar para definir el caso óptimo para el posicionamiento de la boquilla de extrusión en el sistema, fue considerar como afectan estas dos configuraciones del componente acople de boquilla al espacio de trabajo de los robots. Debido a lo anterior, se conceptualizan estos dos casos, donde se analizan posicionamientos de las boquillas de extrusión en diferentes puntos del espacio de trabajo (esferas de color verde) de los robots, se realizaron las mismas posiciones para cada caso, las cuales se muestran en el anexo 13.



*Figura 89: Robots UR5 utilizando el acople de boquilla del caso A (Fuente: elaboración propia).*

En la figura 89, muestra el sistema de extrusión si se utilizara el acople de boquilla del caso A, se puede observar el trabajo colaborativo entre los dos robots, donde se permite obtener distancias más cercanas de trabajo entre las boquillas de extrusión, considerando que esta distancia puede cambiar con el giro de la brida para herramientas o cambiando de posición a los robots en la viga de rotación.



*Figura 90: Robots UR5 utilizando el acople de boquilla del caso B (Fuente: elaboración propia).*

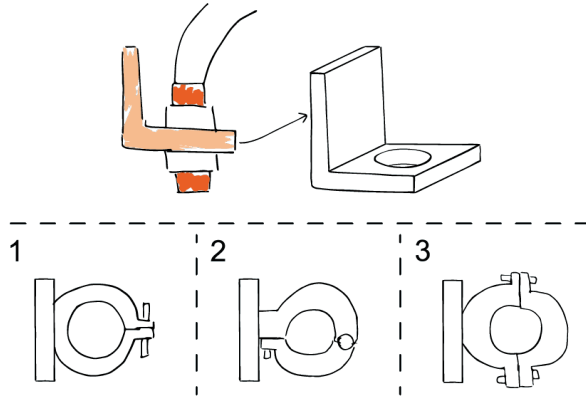
Por otro lado, en la figura 90 se puede observar el sistema de extrusión si se utiliza el acople de boquilla del caso B, donde las boquillas de extrusión se encuentran un poco más separadas, sin embargo, esto puede cambiar si se rota la juta o codo que sigue a la brida alcanzando distancias más cercanas, para este caso en sus diseños se debe considerar el espacio que se genera al rotar esta junta ya que los módulos de sujeción de las

boquillas podrían chocar. Como se puede apreciar en las dos figuras anterior y en el anexo 13, la orientación de la boquilla no proporciona un cambio significativo al movimiento de los robots en su espacio de trabajo, considerando que se debe tratar de mantener la boquilla de extrusión en una sola dirección y que los dos robots no deben colisionar durante su desplazamiento en la viga giratoria, los robots disponen de movimientos limitados, por otro lado ambos casos no entorpecen la posición de la herramienta y tampoco generan un cambio importante de las dimensiones del volumen del espacio de trabajo, por lo que cualquiera de los dos casos podría implementarse en el sistema de extrusión.

Debido a lo mencionado anteriormente, se realizó un análisis más profundo de la rotación y desplazamiento considerando posicionar en diferentes grados de rotación las partes que corresponden a la brida de herramienta y las dos juntas consecutivas a esta última, considerando que para estos dos casos son las tres partes que se posiciona diferentes. En el anexo 14, se pueden apreciar las diferentes posiciones que

pueden adquirir estas partes de robot y como le afecta a la orientación de la boquilla de extrusión concluyendo que en el caso B, como la boquilla se encuentra en dirección perpendicular al eje de giro de la brida de herramientas esto permite que, al girar las otras partes del brazo robótico, siempre se podrá encontrar la condición donde la orientación de la boquilla de extrusión quede forma perpendicular a la superficie de impresión. Condición que no se logra posicionando la boquilla igual al caso A. Demostrando que el caso B es el adecuado para implementarse en el sistema de extrusión.

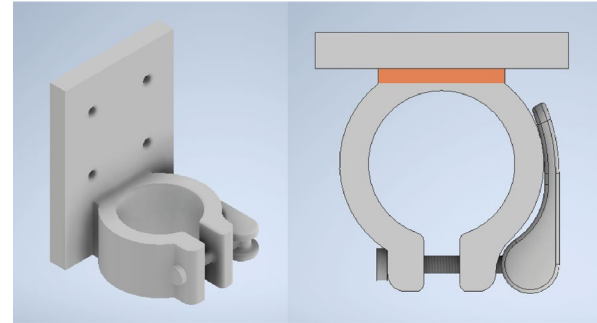
A continuación, se presentan las propuestas de diseño enfocadas en el desarrollo del componente acople de boquilla, conservando la forma de L, donde en su base posee un mecanismo para la sujeción de la boquilla de extrusión, es este mecanismo de sujeción que se busca optimizar, el cual debe permitir un fácil y rápido montaje de la boquilla para posibles mantenciones de esta.



*Figura 91: Diseño conceptual para el acople de boquilla (Fuente: Elaboración propia).*

En la figura 91, se pueden ver tres propuestas conceptuales donde se evalúan diferentes mecanismos de sujeción tipo abrazadera, el diseño 1 cuenta con un punto de fijación con rosca de las abrazaderas, el diseño 2 consta de dos piezas que se unen por un pivote y un punto de fijación con rosca de las abrazaderas, y el diseño 3 cuenta con dos partes que se unen en dos puntos de fijación con rosca. La comparación se basó en cantidad de piezas y facilidad de fabricación, considerando su materialidad en acero o titanio, si bien los tres diseños cumplen con su objetivo se optó por optimizar el diseño 1

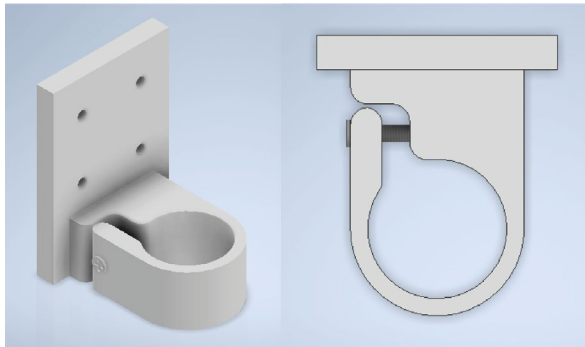
debido a que era el que necesitaba menos piezas y eran fáciles de fabricar.



*Figura 92: Propuesta Conector de brida ajustable con palanca para el componente acople de boquilla (Fuente: Elaboración propia).*

En la figura 92, se puede apreciar la propuesta “Conector de brida ajustable con palanca” para el acople de boquilla, la cual se basa en el diseño conceptual 1 y el mecanismo de sujeción del referente PlasmaTEC-X UR de Tantec. Esta propuesta busca proporcionar un cómodo y fácil montaje de la boquilla al sistema de extrusión, para ello se planteó un sistema de abrazadera las se presan por medio de una palanca de ajuste rápido sin necesidad de utilizar un desatornillador. Una de las características a analizar de esta propuesta es el tipo de material a utilizar y como

el espesor y altura de abrazadera le afectara al ajuste y prensado de la boquilla de extrusión, también se debe considerar el volumen del espacio de unión entre la abrazadera y el bloque con el sistema de acople para la brida de herramientas del robot, este espacio se indica de color anaranjado en la figura 92, es importante su consideración debido a que el tamaño de intersección entre este espacio y la abrazadera podría afectar la flexibilidad del de ajuste de esta última.



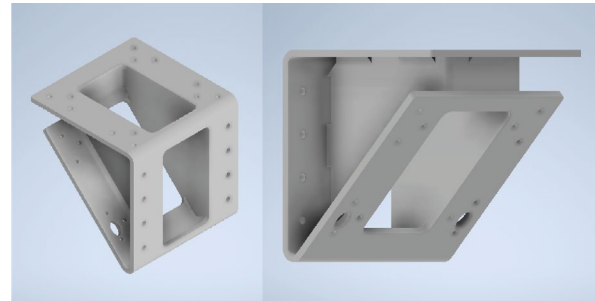
*Figura 93: Propuesta de diseño 2 del acople de boquilla (Fuente: Elaboración propia).*

En la figura 93, se muestra la propuesta “Conector de brida ajustable” para el acople de boquilla, la cual se crea de una variación del diseño conceptual 2, donde se optimiza la cantidad de

pizas eliminando el pivote, esta propuesta solo cuenta con un tornillo de ajuste el cual otorga diferentes diámetros de ajustes al modificar la posición del tornillo ubicado en la unión entre la abrazadera y el bloque con el sistema de acople para la brida de herramientas del robot.

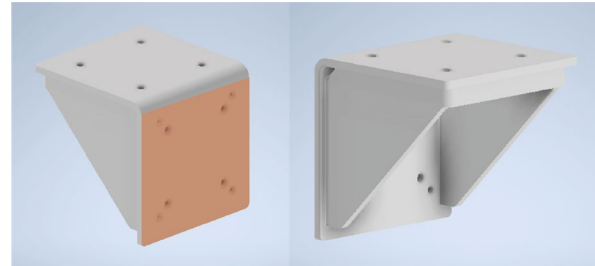
### **Base de soporte**

Con respecto al diseño del componente base de soporte para el robot se decidió utilizar la base del robot en ángulo de Vention, mostrada anteriormente en la sección de referentes, debido a su diseño se puede adaptar a las necesidades del proyecto y posicionamiento de los robots solo instalando una placa de montaje específica para el robot UR5.



*Figura 94: Modelo 3D de la base de robot en ángulo de Vention (Fuente: <https://vention.io/parts/angled-robot-base-873>).*

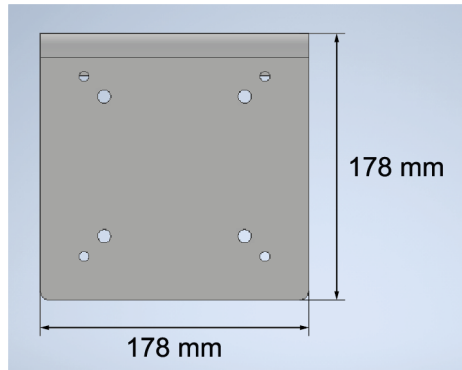
Para realizar un estudio de la relación, tamaño y montaje entre la base de robot en ángulo y el robot UR5/CB3, se descarga el modelo CAD del producto en la página de Vention (figura 94) y se acoplan los dos componentes en el programa Autodesk Inventor. En el anexo 15 se evidencia el ensamble entre el componente base de soporte y el robot UR5 y se observa que la base se interpone a algunos movimientos del brazo robótico como cuando los robots necesitan trabajar en el espacio colaborativo, esto se debe a las dimensiones (223 x 223 x 223 mm) base la cual se adapta a robots más grandes que el UR5. Debido a lo anterior, se debe diseñar una base de soporte más angosta que permita el libre movimiento del robot.



*Figura 95: Propuesta de diseño para el componente base de soporte (Fuente: Elaboración propia).*

En la figura 95 se muestra la propuesta de diseño del componente base de soporte, la cual se basa en el referente base de robot en ángulo de Vention, como se puede observar el diseño de este componente permite posicionar al robot de forma horizontal, sin necesidad de instalar una placa de montaje para el robot, en la cara indicada de color anaranjado en la figura 95, se ubican las perforaciones adecuadas que se adaptan a la base del robot UR5, adicionalmente se le agregaron perforaciones que permiten, de ser necesario, instalar el acople rápido Base Connector de GRIP visto en la sección de referentes. Por otro lado, en se puede observar que el diseño solo contempla dos caras perpendiculares donde una será para el ensamble con la base del robot y la otra cara se podría

acoplar al mecanismo de desplazamiento lineal de la viga giratoria o mecanismo de extensión del eje vertical, según lo analizado en la matriz de relación entre componentes del anexo 10, debido a lo anterior se debe considerar que la cara se acople a alguno de estos dos mecanismos, los que utilizaran se definirán en esta sección. Cabe destacar que estas se unen por una estructura de perfiles triangulares soldados a ellas.



*Figura 96: Dimensiones de la cara de la propuesta de diseño para el componente base de soporte (Fuente: Elaboración propia).*

En la figura 96, se pueden apreciar las nuevas dimensiones de la cara en la propuesta de diseño para la base de soporte, correspondiendo como dimensiones totales 178 x 178 x 178 mm,

significando una reducción volumen del componente en comparación al utilizado en el mercado. Por otro lado, al solo utilizar dos caras perpendiculares y reducir las dimensiones del componente podría reflejar una disminución del peso total de la base de soporte a diferencia de la base de robot en ángulo de Vention la cual posee un peso de 7,8 kg.

### **Viga giratoria, Guía lineal de precisión y Mecanismo de desplazamiento lineal**

Para el desarrollo del diseño de la viga giratoria se debe considerar que este componente puede ir montado sobre la guía circular de precisión o el mecanismo de desplazamiento circular, sin embargo, para cualquiera de los dos casos la viga giratoria, la guía lineal de precisión y el mecanismo de desplazamiento lineal serán los mismos, solo cambiará el sistema de acople o montaje esta.

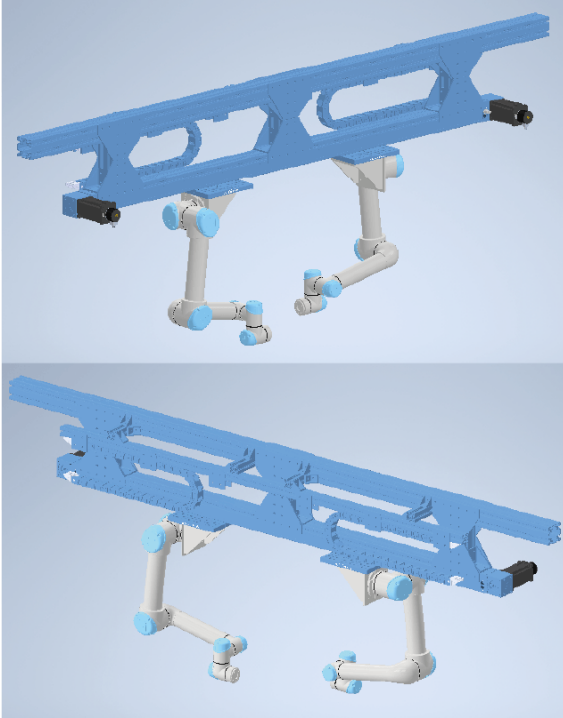
Debido a lo anterior se desarrollan dos propuestas para viga giratoria con sus correspondientes

componentes de guía lineal de precisión y mecanismo de desplazamiento lineal, estas propuestas se realizaron considerando los productos disponibles en el mercado que se adapten a las necesidades del proyecto, estudiados en la sección de referentes, así se puede asegurar la viabilidad de los componentes. Cabe destacar que las propuestas desarrolladas a continuación contemplan productos que se adecuan a las necesidades y resistencia de carga necesaria para soportar todo el sistema de extrusión.

En la figura 97 se muestra la propuesta “Mecanismo de desplazamiento lineal Vention”, la cual posee una estructura compuesta por el sistema extensor de rango 7TH Axis range extender y Aluminum Extrusion de Vention, esta estructura se encuentra unida por placas de montajes y la configuración de las partes y piezas de esta propuesta fue realizada con las consideraciones dadas por el fabricante. Donde la viga de extrusión de aluminio cumple la función de viga giratoria y el extensor de rango 7th Axis corresponde al guía lineal de precisión y

mecanismo de desplazamiento línea, ya que este último producto posee la capacidad de poder montar dos carros deslizadores. Sin embargo, debido al largo de las dimensiones de esta viga dadas por la escala del proyecto (no mayor a 3000 mm), el extensor de rango 7th Axis para alcance aéreo que se adapta a la escala del proyecto posee un largo de 2500 mm aprox. Lo que disminuye el largo de la guía línea de precisión, según las recomendaciones del fabricante, es posible montar dos robots UR5 en este extensor de rango, pero el desplazamiento de ellos sería limitado.

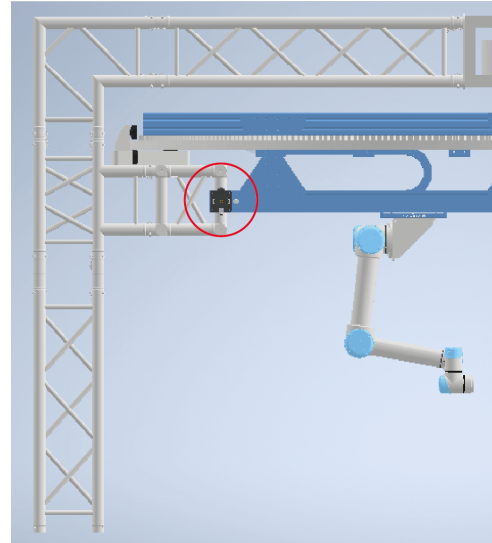
En el anexo 16 se muestra como iría montada la propuesta “Mecanismo de desplazamiento lineal vention” sobre el resto del sistema de rotación, como se puede apreciar la viga giratoria queda montada sobre el componente guía circular de precisión, como se mencionó anteriormente aún no se encuentra definido sobre que componente está montada la viga, sin embargo, nos sirve para dimensionar los puntos de apoyo que tendrá la viga giratoria y el tipo de montaje que se debe diseñar.



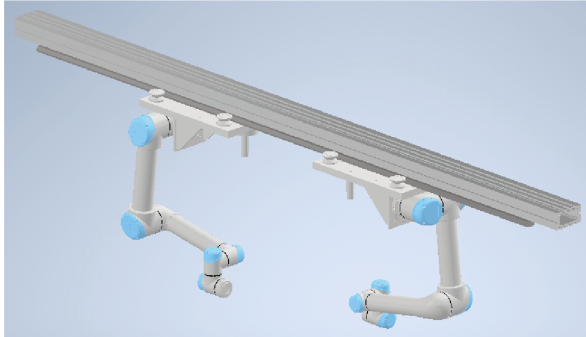
*Figura 97: Propuesta “Mecanismo de desplazamiento lineal Vention” para la viga giratoria, guía lineal de precisión y mecanismo de desplazamiento línea (Fuente: Elaboración propia).*

Por otro lado, al montar esta propuesta en el sistema de rotación, se identificó que una parte de la estructura de apoyo interrumpe el movimiento giratorio de la guía lineal de precisión, esta interferencia se muestra en un círculo rojo en la

figura 98, por lo que se debe tener en consideración modificar la estructura de apoyo al implementarse esta propuesta de diseño.

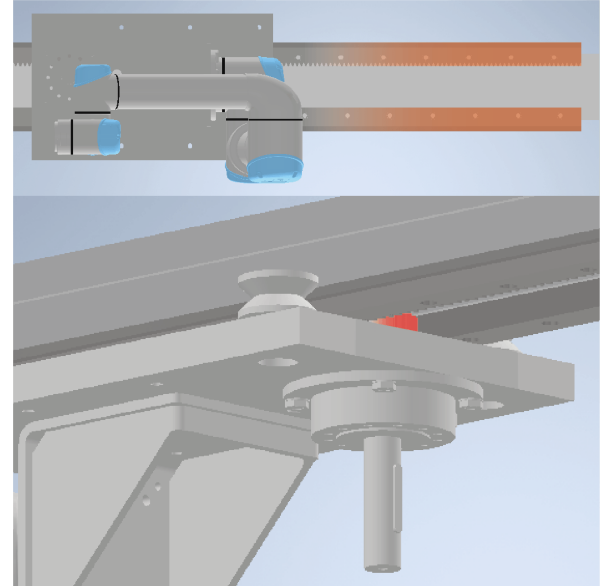


*Figura 98: Interferencia entre el componente estructura de apoyo y guía lineal de precisión (Fuente: Elaboración propia).*



*Figura 99: Propuesta de diseño 2 para viga giratoria, guía lineal de precisión y mecanismo de desplazamiento línea (Fuente: Elaboración propia).*

En la figura 99 se presenta la propuesta “Mecanismo de desplazamiento lineal HepcoMotion”, donde el componente de viga giratoria corresponde a un perfil de aluminio con ranura en T de HepcoMotion, la guía lineal de precisión corresponde a las guías lineales HDS2 de HepcoMotion y mecanismo de desplazamiento línea representado por los juegos de bloques de cojinetes en V compatible con las guías HDS2.



*Figura 100: Interacción entre los componentes guía lineal de precisión y mecanismo de desplazamiento línea (Fuente: Elaboración propia).*

Esta propuesta posee dos guías lineales con terminación exterior en V que se acoplan a los cojinetes, estas guías se señalan de color naranja en la figura 100, una de estas guías posee una cremallera interior que interactúa con un piñón montado en cada bloque o carro con cojinetes en V, el piñón se señala de color rojo en la misma figura, cada carro tendrá su propio piñón con

motor que le permita un desplazamiento independiente de cada robot.

Por otro lado, en el anexo se puede ver como iría montada esta propuesta sobre el resto del sistema de rotación, como se puede apreciar la viga giratoria queda montada sobre el componente guía circular de precisión, apreciando que esta propuesta ocupa menos altura del espacio de impresión y no se genera una interferencia entre todos los componentes, a diferencia de la propuesta anterior.

### **Mecanismo de extensión del eje vertical**

Finalmente, para desarrollar el diseño del componente mecanismo de extensión del eje vertical, se plantearon diferentes diseños conceptuales de la distribución de mecanismos que permitieran un desplazamiento vertical del sistema de extrusión. Se plantearon tres diseños conceptuales, los cuales se muestran en la figura 101, estos diseños muestran cómo se relaciona el componente mecanismo de extensión del eje

vertical con los demás componentes del sistema estructural y de rotación. En cada caso se representa el componente con un color rosado, en el caso A se representa un mecanismo que permite desplazar todo el sistema de extrusión y rotación en su eje vertical, dependiendo directamente del sistema estructural, ya que se requiere que el componente estructura de apoyo cumpla una función extra de guías de desplazamiento vertical. En el caso B y C se representa una columna telescópica como el componente mecanismo de desplazamiento vertical, en el caso B se observa como este componente se relaciona directamente con el sistema estructural y de rotación, donde estas columnas telescópicas cuelgan de la estructura de apoyo y se conectan con el sistema de rotación, es así como este último le transmite el desplazamiento vertical al sistema de extrusión. Por otro lado, en el caso C se observa que el mecanismo de desplazamiento vertical solo se relaciona con el sistema de extrusión, específicamente con la base de soporte de los robots UR5 y el mecanismo de desplazamiento lineal en la viga giratoria.

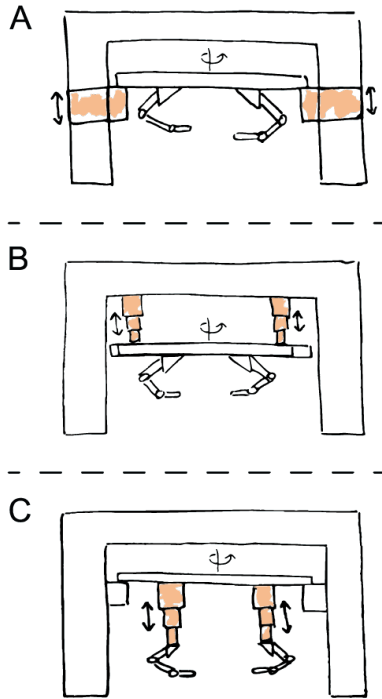


Figura 101: Esquema conceptual del componente mecanismo de extensión del eje vertical (Fuente: Elaboración propia).

Las propuestas de diseño conceptual nos permitieron plantear dos propuestas de diseño optimizando el desplazamiento vertical, estabilidad y resistencia de la estructura.

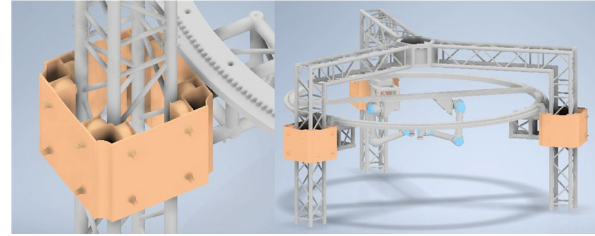
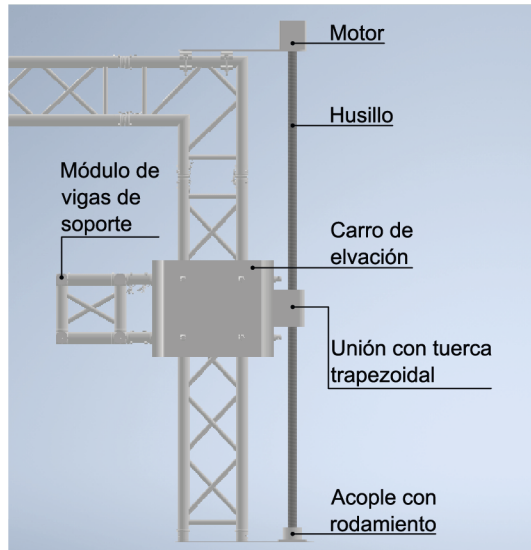


Figura 102: Propuesta de “Mecanismo de desplazamiento vertical con carros elevadores” para el componente mecanismo de extensión del eje vertical (Fuente: Elaboración propia).

En la figura 102 se puede apreciar la propuesta “Mecanismo de desplazamiento vertical con carros elevadores”, en esta propuesta se plantea utilizar tres carros elevadores F34 de Cosmic Truss, para implementar esta propuesta se debe reconfigurar las estructuras de celosía que conforman las estructuras de apoyo, esta reconfiguración consiste construir la sección vertical del componente estructura de apoyo con una viga cuadrada de 30/30 de 1500 mm, esto permite que el carro de elevación se desplace libremente a lo largo de esta viga. Para lograr un desplazamiento preciso y coordinado del desplazamiento vertical de los sistemas se propone utilizar un mecanismo de desplazamiento por transmisión de husillo y tuerca, mismo

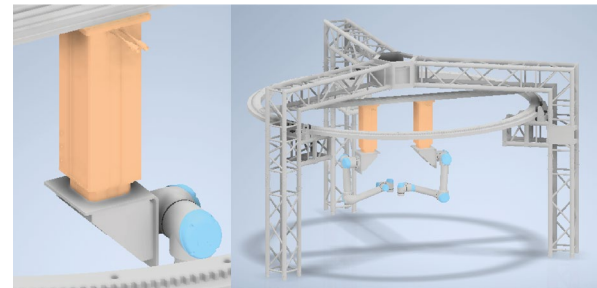
mecanismo de elevación vertical utilizado en diferentes impresoras 3D a gran escala como lo podemos ver en los referentes BEM PRO2 8080 de Be More 3D y DS 3x3 ACADEMY de D-Shap.



*Figura 103: Partes del mecanismo de extensión del eje vertical en la propuesta de “Mecanismo de desplazamiento vertical con carros elevadores” (Fuente: Elaboración propia).*

En la figura 103 se indican las partes que componen el mecanismo de extensión del eje vertical en la propuesta, donde se puede apreciar que el carro de elevación se encuentra conectado

con una unión con tuerca trapecoidal enroscada en el husillo, este último se encuentra acoplado en el extremo superior a un motor que rotará el husillo y desplazará la tuerca trapecoidal a lo largo de este, el otro extremo se conecta a una base que posee un acople con rodamiento que permite la rotación libre del husillo. Cabe destacar que se debe instalar un módulo de viga en la cara interior del carro de elevación, este módulo proporcionará soporte a todo el sistema de rotación y extrusión.



*Figura 104: Propuesta de diseño 2 para el componente mecanismo de extensión del eje vertical (Fuente: Elaboración propia).*

En la figura 104 se muestra la propuesta “Mecanismo de desplazamiento vertical con columnas telescópicas”, en esta propuesta se plantea utilizar la columna telescópica LIFTKIT-UR de EWELLIX como mecanismo de extensión







del eje vertical, ya que posee un diseño robusto capaz de soportar cargas de hasta 1500 N, esta propuesta se basa en el diseño conceptual C, que permite una relación directa con el sistema de extrusión. Cabe destacar que el modelo 3D del producto LIFTKIT-UR en escala real fue descargado de la página web de EWELLIX.

circular, comparando diferentes características que nos permitirán optimizar la eficiencia de fabricación, funcionalidad y usabilidad en los diseños.

#### 4.3.2. EVALUACIÓN DE PROPUESTAS

En esta sub-etapa se evalúan las propuestas planteadas en la etapa anterior para descubrir que diseños satisfacen mejor los requerimientos, esta etapa permitirá obtener datos que permitan optimizar el diseño final del proyecto SISCOM. Por otro lado, por motivos de presupuestos del proyecto, se priorizar la obtención y fabricación de partes y piezas con proveedores nacionales.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de las diferentes propuestas de diseño para los componentes guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento

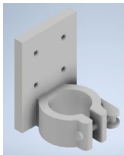

						
<b>Características</b>	<b>viga circular doble T con cremallera y carro de desplazamiento móvil con motor</b>	<b>Cremallera circular y carro de desplazamiento móvil con motor</b>	<b>Plataforma de rotación con cremallera circular</b>	<b>Viga circular con cremallera y módulos de desplazamiento fijo</b>	<b>Viga circular dentada y carro de desplazamiento móvil con motor</b>	<b>Viga circular con cremallera y carro de desplazamiento fijo</b>
Cantidad de módulos de mecanismo de desplazamiento circular	2	2	1	4	2	3
Cantidad de rodamientos por módulos	6	3	20	3	6	7
Capacidad para mantener estable y seguro en su eje al sistema de rotación	Alta	Media	Media	Baja	Baja	Alta
Complejidad de fabricación del mecanismo de desplazamiento circular	Media	Baja	Alta	Baja	Baja	Media
Versatilidad del mecanismo de desplazamiento circular para adaptarse a la guía circular de precisión	Baja	Baja	Baja	Alta	Alta	Media
Complejidad de fabricación de la guía circular de precisión	Alta	Baja	Alta	Baja	Baja	Baja
Accesibilidad de montaje	Baja	Media	Media	Alta	Alta	Alta
Motor que utiliza	Motor nema	Motor nema	Motor baldor reliance	Motor baldor reliance	Motor nema	Motor baldor reliance

*Tabla 9: Tabla comparativa de las características en las propuestas de diseño para los componentes guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia).*

Con el desarrollo de la tabla 9, se comparó los diseños propuestos, donde se priorizó la característica; “Capacidad para mantener estable y seguro en su eje al sistema de rotación”, ya que esta característica está directamente relacionada con el cumplimiento de la función principal del sistema de rotación, debido a lo anterior se identificaron las propuestas que cumplieran de mejor manera esta característica, destacándose las propuestas de diseño “viga circular doble T con cremallera y carro de desplazamiento móvil con motor” y “Viga circular con cremallera y carro de desplazamiento fijo”, para identificar cuál de estas dos propuestas de diseño se destaca sobre la otra, se procede a comparar el resto de las características, donde sobresale la propuesta “Viga circular con cremallera y carro de desplazamiento fijo”, ya que, a pesar de poseer más piezas como rodamientos, comprende una mayor versatilidad, menor complejidad de fabricación en sus componentes y una mayor accesibilidad de montaje, además el diseño “Viga circular con cremallera y carro de desplazamiento fijo” utiliza el motor ya adquirido para el proyecto.

Por otro lado, es importante considerar y estudiar los elementos que se destacan en los demás ítems de características en el resto de los diseños propuestos, ya que este análisis nos permitirá optimizar el diseño final del sistema SISCOM.

Para el componente acople de boquilla, se realizó una tabla comparativa de las dos propuestas de diseño, considerando las características que nos permitirán optimizar la eficiencia de fabricación de la pieza, funcionalidad y usabilidad del diseño, es importante destacar que este componente es el más próximo al operador del sistema.

		
<b>Características</b>	<b>Conector de brida ajustable con palanca</b>	<b>Conector de brida ajustable</b>
Cantidad de piezas	3	2
Accesibilidad de montaje	Alta	Alta
Usabilidad	Alta	Media
Complejidad de fabricación	Media	Baja



Versatilidad del componente para adaptarse a la boquilla	Alta	Alta
--	------	------

*Tabla 10: Tabla comparativa de las características en las propuestas de diseño para el componente acople de boquilla (Fuente: Elaboración propia).*

Con el desarrollo de la tabla 10, se comparó los dos diseños propuestos para el componente acople de boquilla, donde se priorizó la usabilidad de la pieza, definiendo la característica de usabilidad como; “Prescindir de utilizar herramientas extra para el montaje y ajustes de la boquilla de extrusión”, en este ítem se destacó la propuesta de diseño “Conector de brida ajustable con palanca” debido que la pieza proporciona el mecanismo de ajuste manual para la boquilla de extrusión sin necesidad de utilizar herramientas extra.

Para los componentes viga giratoria, guía lineal de precisión y mecanismo de desplazamiento línea, se realizó una tabla comparativa de las dos propuestas de diseño anteriormente presentadas, es importante mencionar que estos componentes

se encuentran disponibles en el mercado, por lo que las características a considerar nos permitirán establecer que producto se requiere comprar, debido a lo último es importante analizar las características como el valor del producto, funcionalidad del mecanismo, usabilidad del diseño para optimizar los recursos y funcionamiento del sistema.

		
<b>Características</b>	<b>Mecanismo de desplazamiento lineal Vention</b>	<b>Mecanismo de desplazamiento lineal HepcoMotion</b>
Peso total de del componente	Alto	Medio
Accesibilidad de montaje	Alta	Alta
Presión del desplazamiento lineal	Alta	Alta
Rango lineal de alcance aéreo	Medio	Alto
Valor monetario del componente	Alto	Medio



*Tabla 11: Tabla comparativa de las características en las propuestas de diseño para los componentes viga giratoria, guía lineal de precisión y mecanismo de desplazamiento línea (Fuente: Elaboración propia).*

Con el desarrollo de la tabla 11, se comparó los dos diseños propuestos para el componente, donde se priorizo las características de valor monetario y peso total del componente, destacando la propuesta de diseño 2, ya que es más accesible de comprar, ocupa menos espacio en el sistema y tiene un menos peso al juntar todas sus partes y piezas.

Para el componente mecanismo de extensión del eje vertical, se realizó una tabla comparativa de las dos propuestas de diseño anteriormente presentadas, es importante mencionar que estos componentes se encuentran disponibles en el mercado, por lo que las características a considerar nos permitirán establecer que producto se requiere comprar, debido a lo último es importante analizar las características como el valor del producto, funcionalidad del mecanismo, usabilidad del diseño para optimizar los recursos y funcionamiento del sistema.

Con el desarrollo de la tabla 12, se comparó los dos diseños propuestos para el componente mecanismo de extensión del eje vertical, donde se

priorizo las características de valor monetario, alcance del desplazamiento vertical y optimización del espacio de trabajo, destacando la propuesta de diseño 1, ya que optimiza de mejor manera el funcionamiento del sistema en cuanto a alcance aéreo y espacio, además tiene un valor mucho menor que la propuesta 2, sin embargo, su accesibilidad de montaje es menor y requiere de componentes extra a fabricar.

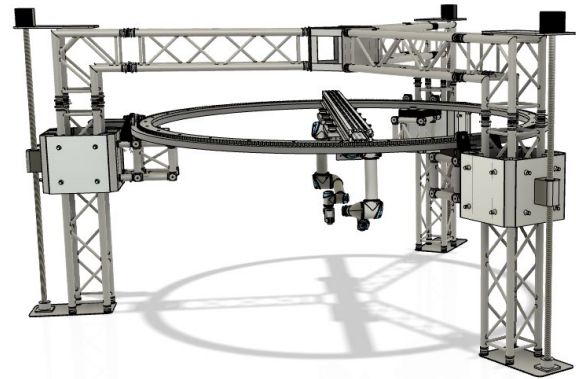
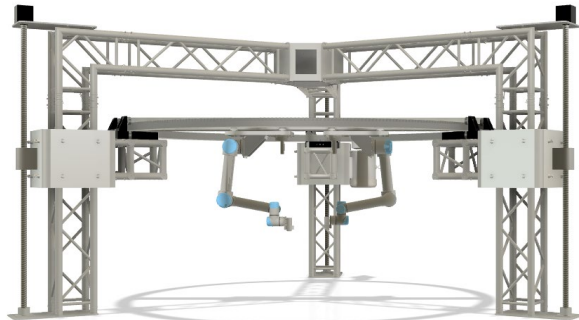
		
<b>Características</b>	<b>Mecanismo de desplazamiento vertical con carros elevadores</b>	<b>Mecanismo de desplazamiento vertical con columnas telescópicas</b>
Alcance del desplazamiento vertical	Alto	Medio
Optimización del espacio de trabajo	Alto	Medio
Accesibilidad de montaje	Media	Alta
Valor monetario del componente	Bajo	Alto

*Tabla 12: Tabla comparativa de las características en las propuestas de diseño para el componente*

*mecanismo de extensión del eje vertical (Fuente: Elaboración propia).*

Cabe mencionar que para el componente base de soporte solo se considerará la propuesta de diseño presentada anterior mente

Finalmente, se montan todos los componentes destacados sobre el resto obteniendo el primer diseño de la totalidad del proyecto SISCOP, este diseño se puede apreciar en la figura 105, cabe destacar que para realizar la incorporación de todos los componentes se tuvo que hacer unos pequeños ajustes de dimensiones, sobre todo disminuir el diámetro del anillo de guía circular de precisión, dejándolo con un diámetro exterior de 3000 mm.



*Figura 105: Propuesta de diseño conceptual del proyecto SISCOP (Fuente: Elaboración propia).*

Por otro lado, para evaluar la resistencia y distribución de sus partes en los diseños propuestos, se realiza un análisis de esfuerzo de los puntos críticos de cargas que se observan al montar todos los componentes de los sistemas. Ya que se eligió la propuesta de diseño 6 para los componentes guía circular de precisión y mecanismo de desplazamiento circular, la cual posee modificaciones en comparación a las otras propuestas que consistieron en el sistema estructural, además considerando que el sistema de rotación, sobre todo el componente guía circular serán los que soporten la mayor carga de todo el sistema de extrusión. Este análisis se debe

hacer considerando las cargas ejercidas por los componentes del sistema de extrusión para obtener datos fidedignos.

### 4.3.3. OPTIMIZACIÓN DE DISEÑO

Para optimizar el diseño de la propuesta, inicialmente se realizó un análisis de esfuerzo de la viga giratoria para verificar que este componente sea capaz de soportar el peso de los robots y el mecanismo de desplazamiento lineal.

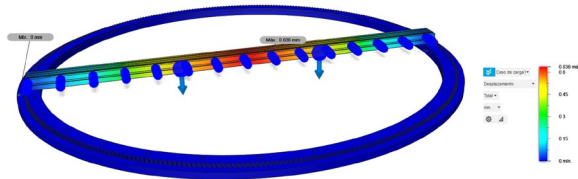


Figura 106: Análisis de esfuerzo estático del componente viga giratoria (Fuente: Elaboración propia).

En la figura 106 se muestra el análisis de esfuerzo conceptual de la viga giratoria montada sobre la guía circular de precisión, donde la viga se sometió a dos cargas de 40 kg, cargas que consideraban el peso de los robots y toda la

estructura y componentes del mecanismo de desplazamiento lineal. Como se puede observar en la figura, se detecta un pequeño desplazamiento máximo de la viga giratoria que se refleja como un pandeo, el cual se señala de color rojo, este valor corresponde a 0,636 mm, a pesar de que la deformación es mínima se opta por optimizar el diseño de la viga giratoria y el mecanismo de desplazamiento lineal, ya que en el diseño conceptual aún faltaban elementos a considerar del mecanismo de desplazamiento lineal los cuales sumarían más cargas a la viga giratoria.

Para mejorar el diseño de la viga giratoria se plantearon dos soluciones la primera consistió en utilizar un perfil de aluminio más robusto y diseñar carros de desplazamiento lineal donde se montarían los robots, los cuales se moverían por medio de un husillo. Finalmente, esta idea se descarta debido a que la viga giratoria montada ocupaba mucho espacio y tenía poca superficie para montarla sobre la guía circular de precisión. La segunda opción que se planteó fue generar un riel de desplazamiento con perfiles cilíndricos de

acero, utilizando rodamientos lineales para el desplazamiento sobre el riel y con un husillo se le daría la precisión el movimiento a cada carro de desplazamiento de los robots.

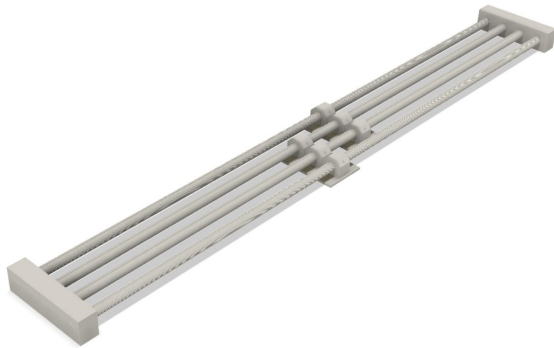


Figura 107: Propuesta conceptual de optimización para el componente viga giratoria (Fuente: Elaboración propia).

En la figura 107 se muestra la propuesta para optimizar el componente viga giratoria, destacando por la simplicidad de sus partes y facilidad adquisición. Se plantea utilizar dos perfiles cilíndricos centrales de 40 mm de diámetro como guías de desplazamiento y dos husillos (diámetro de 40 mm) posicionados a los laterales uno para cada carro de desplazamiento, ya que cada robot tendrá su desplazamiento lineal

propio. Una vez planteado el concepto de la solución se procedió a realizar un análisis de esfuerzo estático para verificar la viabilidad de la propuesta planteada.

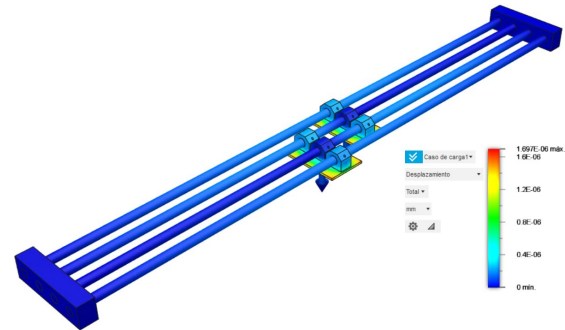
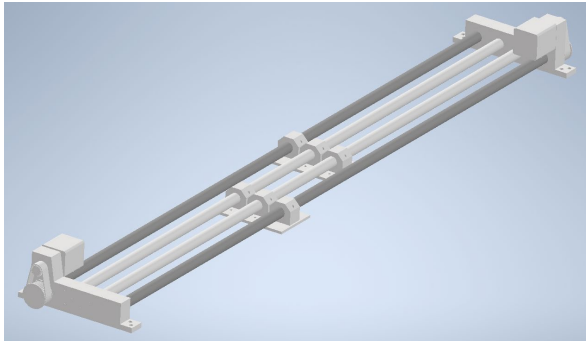


Figura 108: Análisis de esfuerzo estático de la propuesta conceptual para la optimización del componente viga giratoria (Fuente: Elaboración propia).

En la figura 108 se presenta el análisis de esfuerzo de la propuesta de optimización planteada, donde se puede destacar que el mayor esfuerzo se genera en las placas de acero que conforman el carro de desplazamiento donde irán montados cada robot, visualizado que la posible deformación sería un desplazamiento máximo en el eje vertical de las placas de 0,00418 mm, lo cual se considera un desplazamiento despreciable.

A continuación, se muestra la propuesta de optimización más detallada del componente viga giratoria, donde se puede apreciar que se incorpora al diseño los motores que transmitirán el movimiento a los husillos y este último permitirá el desplazamiento lineal de los robots. Además, se incorpora el sistema de sujeción de la viga al componente guía circular de precisión.



*Figura 109: Propuesta de optimización para el componente viga giratoria (Fuente: Elaboración propia).*

Otro de los factores que se estudió en este proceso de optimización fue el peso de todos los componentes diseñados, ya que estos determinarían el motor a utilizar para cada mecanismo de extensión del eje vertical, para obtener el peso de cada componente se estableció el material de cada parte y pieza,

obteniendo la densidad de cada material y con el cálculo del volumen de cada pieza se pudo obtener la masa de cada componente, ya que la masa es igual a la densidad por el volumen.

A continuación, se presenta la tabla 13 del listado de componentes con sus respectivos materiales y pesos, donde se establece que el peso total que deberá desplazar el mecanismo de extensión del eje vertical es de 832,02 kg, este peso se deberá distribuir entre los tres mecanismos de elevación, adicionalmente uno de los mecanismos de elevación deberá desplazar un mayor peso considerando el motor que se fija a un carro de desplazamiento vertical, el cual hace girar todo el sistema de rotación. Las partes adicionales al peso total corresponden al motor (82 kg), caja reductora (36 kg) y piñón de acero SAE 1045 (6,78kg), proporcionando un esfuerzo adicional de 124,78 kg para uno de los carros de elevación.

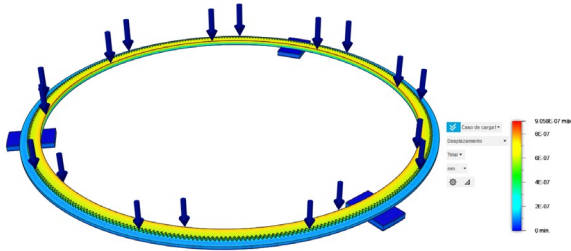
Componente	Material	Peso (kg)
Robot	-	18,4
Boquilla de extrusión	Aluminio	0,21
Manguera con mortero	-	5
Conector boquilla	Acero SAE 1045	0,85
base de soporte	Acero SAE 1045	5,8
Viga giratoria, Guía lineal de precisión y Mecanismo de desplazamiento lineal	Acero SAE 1045 y Acero inoxidable de precisión	119,1
Guía circular de precisión	Acero SAE 1045	533,6 kg
Mecanismo de desplazamiento circular	Acero SAE 1045	39,26

*Tabla 13: Material y peso de cada componente.*

Conociendo el valor de las masas de cada componente se pudo percatar que las partes que otorgan el mayor esfuerzo de carga son la guía circular de precisión y el conjunto de viga giratoria, Guía lineal de precisión y Mecanismo de desplazamiento lineal, sin embargo, el peso del componente mecanismo de desplazamiento circular es considerable debido a que son tres módulo de desplazamiento, los cuales tienen una

proximidad de uso por parte del operador, en cuanto a la instalación y montaje de estos. Debido a lo anterior se procede a modificar las dimensiones del componente guía circular de precisión y optimizar el diseño del mecanismo de desplazamiento circular.

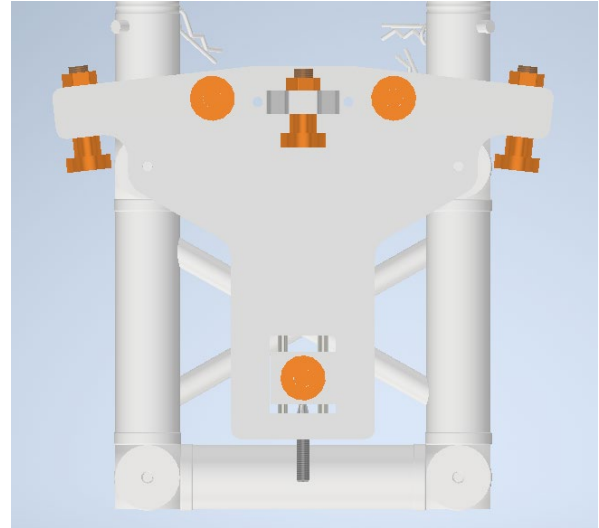
Para optimizar el diseño del componente guía circular de precisión se propuso disminuir el espesor del anillo guía y disminuir el interior para dar mayor superficie de apoyo a la viga giratoria. Se realizó un análisis de esfuerzo en el diseño conceptual planteado, el cual se muestra en la figura 110, donde se puede visualizar que los ajustes de diseño no comprometen la resistencia del componente, ya que solo se observa un posible desplazamiento de 0,0083 mm, lo cual se considera despreciables. Esta mejora en el diseño permitió disminuir el peso del componente a 409,35 kg, reduciendo 124,25 kg de la carga total que deben desplazar los componentes de mecanismo de extensión del eje vertical.



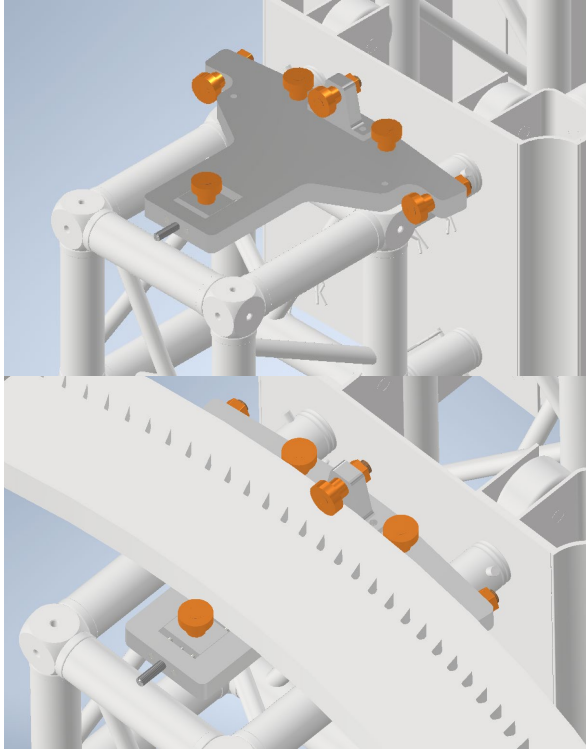
*Figura 110: Análisis de esfuerzo estático de la propuesta para la optimización del componente guía circular de precisión (Fuente: Elaboración propia).*

En cuanto a la optimización del diseño para el componente mecanismo de desplazamiento circular se redujo el espesor de la pieza, se optimizó la distribución de los rodamientos y se incorporó un sistema de montaje para ser instalado a la estructura de apoyo. Cabe destacar que se utilizarán rodamientos de rodillos cilíndricos, los cuales permiten soportar una mayor carga radial con un menor tamaño del rodamiento. En la figura 111, se puede ver que los rodamientos de apoyo radial se distribuyen al costado de la estructura de apoyo para evitar que estos coquen con esta última, además se disminuyó la cantidad de rodamientos a utilizar. Para disminuir el volumen del mecanismo se optó

por diseñar el módulo de desplazamiento optimizando las zonas donde se ubicarían los rodamientos y agujeros de montaje, disminuyendo el tamaño de la pieza y su espesor.



*Figura 111: Propuesta de optimización del mecanismo de desplazamiento circular (Fuente: Elaboración propia).*



*Figura 112: Propuesta de optimización del mecanismo de desplazamiento circular montada en la estructura SISCOM (Fuente: Elaboración propia).*

En la figura 112 se presenta la propuesta de optimización montada en la estructura de apoyo, la cual se monta y se fija al truss cuadrado aprovechando el mecanismo de anclaje de la pieza de apoya la cual cuenta con agujeros con hilado para pernos. Además se puede apreciar

como el mecanismo de desplazamiento circular interactúa con el componente de guía circular de precisión. Con esta optimización del mecanismo se pudo reducir el tamaño y peso del componente a 10,33 kg, reduciendo 86,79 kg de la carga total que deben desplazar los componentes de mecanismo de extensión del eje vertical.

Finalmente se logra reducir el peso total que deberá desplazar el mecanismo de extensión del eje vertical a 619,96 kg, con la propuesta de optimización se logra disminuir un total de 212,06 kg del peso total.

Teniendo la masa total que subira cada mecanismo de desplazamiento vertical se procede a obtener las características de los motores que transmitiran el movimiento a los husillos conectados a cada carro de desplazamiento vertical, en el anexo 17 se muestra en mayor detalle los factores y cálculos que determinaron las características de los motores. Dando como resultado que para los dos soportes que no tienen el peso extra del motor y demas partes, necesitaran un motor con potencia

de 3HP y para el carro de desplazamiento vertical que tiene el peso extra se deberá utilizar un motor con potencia de 4 HP. Adicional a los motores se deberá incluir motoreductor coaxial para cada motor y poder reducir la velocidad con la se desplace el sistema en el eje vertical.

#### 4.3.4. LISTADO DE PARTES Y PIEZAS

Una vez realizada la optimización del diseño conceptual se precedió a generar el listado de partes y piezas necesarias para diseñar a detalle cada componente que compone la estructura móvil giratoria del sistema cooperativo multi-robot.

Se realizó una búsqueda de las piezas y partes estandarizadas disponibles en el mercado necesarias para la construcción de cada componente del proyecto SISCOM, con el fin de disponer con las dimensiones correctas de cada parte y verificar que respondan a los requerimientos de los componentes, es decir, definir las piezas que respondan a los requerimientos físicos al cual estará sometido el componente.

Debido a lo mencionado anteriormente, el factor físico determinante para la mayoría de la elección de las partes y piezas fue el esfuerzo físico al cual estarían sometidos los componentes, debido a que deben soportar un peso considerable

Por otro lado, se vuelve necesario definir las partes y piezas a utilizar en cada componente debido a que las dimensiones y formas de estas condicionaran el diseño de partes específicas creadas para ser manufacturadas.

A continuación, en la tabla 14 se presentan las piezas necesarias con sus respectivas cantidades requeridas para diseñar los componentes del sistema estructural. Se destaca la incorporación de tres motores con cajas reductoras los cuales transmitirán el movimiento al Mecanismo de extensión del eje vertical, reflejando un alto valor de inversión.

En conjunto se presenta en la tabla 15 el listado de partes y piezas necesarias para la fabricación de los componentes del sistema de rotación, requiriendo una mayor cantidad de piezas para el diseño de los componentes, debido a lo anterior

se debe tener en cuenta que no siempre se encontrarán disponibles todas las partes y piezas

en el mercado por lo que los diseños de estos componentes se verán afectados a estos factores.


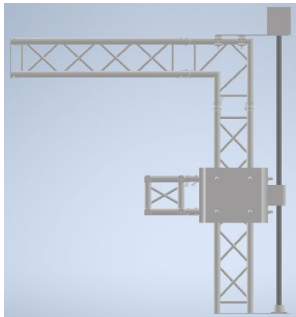
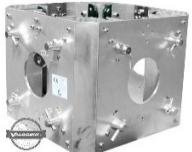








SISTEMA ESTRUCTURAL				
Componente	Partes y piezas	Cantidad	Imagen partes y piezas	Imagen componentes
<b>Mecanismo de extensión del eje vertical</b>	Truss cuadrado 1.5m 30/30 cosmic truss tc-50 3mm	3		
	Carro torre 30/30-40 cosmic truss	3		
	Husillo de bolas de acero FSC series, diámetro 53 mm (2 in), 2 m	3		
	Motores de dos o más velocidades NORD, Motores asíncronos, 112 MP/4	3		
	Reductor de sinfín UNICASE	3		

Tabla 14: Listado de partes y piezas necesarias para la fabricación de los componentes del sistema estructural.

SISTEMA DE ROTACIÓN				
Componente	Partes y piezas	Cantidad	Imagen Partes y piezas	Imagen componente
<b>Viga giratoria</b>	Ejes de acero de precisión macizo, diámetro 40 mm, 2.8 m	2		
	Husillo de bolas con tuerca 40 mm (2 in), 2.8 m	2		
	Sets lineales eLINE, R1027 cerrados normales, diámetro 40 mm, R1027 256 44	4		
	Arcus® Stepper motor nema 23 30Kg-cm 3.0Nm 1.8° 23HS2430	2		

	5 M Paso Nema23 Stepper Motor Rueda de Polea de distribución, Diámetro del eje y Juego de Correas, Ratio 3:1 Reductor Para DIY CNC Router	2		
<b>Guía circular de precisión</b>	Reductor Baldor de 1/2 hp	1		
<b>Mecanismo de desplazamiento circular</b>	Rodamientos de una hilera de rodillos cilíndricos con jaula estándar, diámetro 35 mm, NU 202 ECP	18		
	Eje Acero Inoxidable (304), diámetro 8mm, 100 mm	6		
	LM8UU, Rodamiento lineal de bolas recirculantes (8mm)	6		

Tabla 15: Listado de partes y piezas necesarias para la fabricación de los componentes del sistema de rotación.

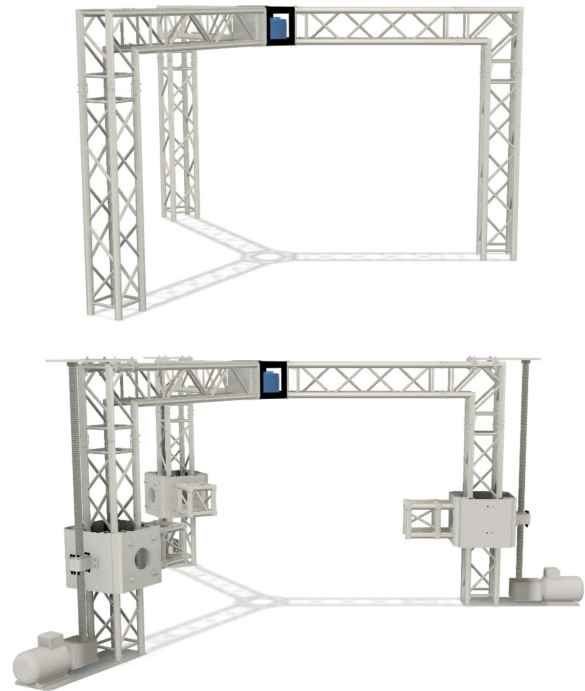
#### 4.4. ETAPA 4: DISEÑO DE DETALLE

Luego de tener definido lo que será la propuesta de diseño se procedió a llevarla a cabo. El diseño CAD a detalle, la construcción se llevó a cabo en tres partes, cada parte está asociada a las funciones principales de los sistemas del proyecto SISCOM se desarrollaron los diseños simultáneamente para asegurar la compatibilidad y conexión entre los componentes, y obtener un óptimo funcionamiento de los sistemas.

##### 4.4.1. DISEÑO CAD DE LA ESTRUCTURA MÓVIL GIRATORIA

El diseño CAD de la estructura móvil giratoria inicio con la implementación de la propuesta conceptual del mecanismo de extensión del eje vertical, debido a su mecanismo de funcionamiento este se volvería un componente articulador entre el sistema estructura y sistema de rotación. En la figura 113 en la primera imagen se puede apreciar solo el sistema estructural y en la segunda imagen como este componente articulador interactúa con los componentes estructurales del proyecto y se termina por

integrar al sistema estructura, debido que su función principal de desplazar al sistema de extrusión en el eje vertical se ve condicionado a ser parte de la estructura cuya función es sustentar, estabilizar y dar equilibrio estructural a todos los sistemas que componen el proyecto, pasando a dar este sustento al sistema rotacional y en consecuencia al de extrusión.



*Figura 113: Integración del componente mecanismo de extensión del eje vertical al sistema estructural.*

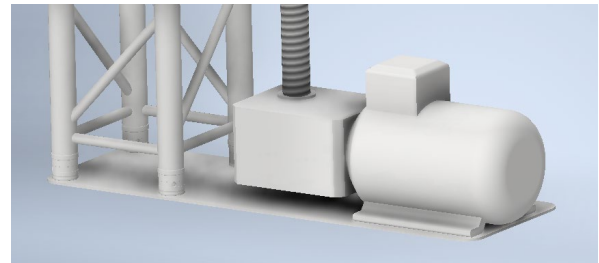


*Figura 114: Partes y piezas del mecanismo de extensión del eje vertical.*

Como se mencionó anteriormente en el diseño conceptual de este componente, el mecanismo que permitirá el desplazamiento vertical se compone de un carro que se desliza por la estructura de apoyo por medio de la incorporación de un husillo que se conecta a un motor que transmite el movimiento y hará girar el husillo desplazando la tuerca conectada al carro, las partes del mecanismo se pueden observar en la figura 114, donde se destaca la incorporación de

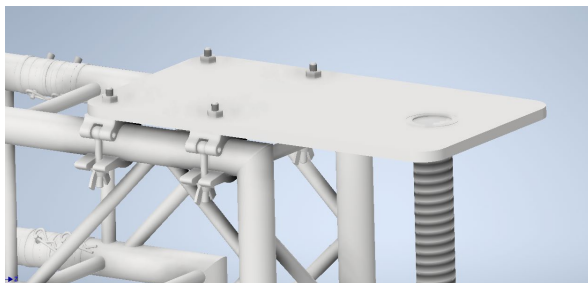
motores eléctricos de alto rendimiento y potencia debido a la fuerza que debe ejercer para desplazar todo el sistema de rotación y extrusión, como se mencionó anteriormente los componentes del sistema de rotación y extrusión aportan un peso bastante alto y considerable que se debe desplazar.

Para la creación e incorporación del diseño del componente mecanismo de extensión del eje vertical, se debió diseñar tres piezas que permitieran el correcto funcionamiento del sistema, la primera de ellas se muestra en la figura 115, esta pieza corresponde a la base de aluminio que une y fija el motor con su caja reductora al componente estructural, para más detalles ver planimetría en el anexo 18.



*Figura 115: Base de unión y fijación del motor del mecanismo de desplazamiento vertical.*

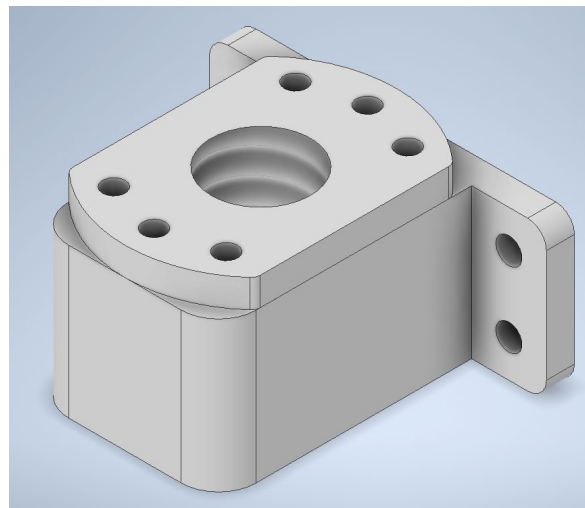
El segundo diseño corresponde a una pieza de fijación para dar soporte y estabilidad al husillo que permitirá el desplazamiento vertical (figura 116), la cual a su vez cuenta con una fijación con rodamiento que permita girar libremente al husillo cabe mencionar que para montar esta pieza se utilizan los acoples del mismo sistema de celosías para lograr una mayor fijación y seguridad (planimetría en anexo 18).



*Figura 116: Módulo de fijación y soporte para el husillo.*

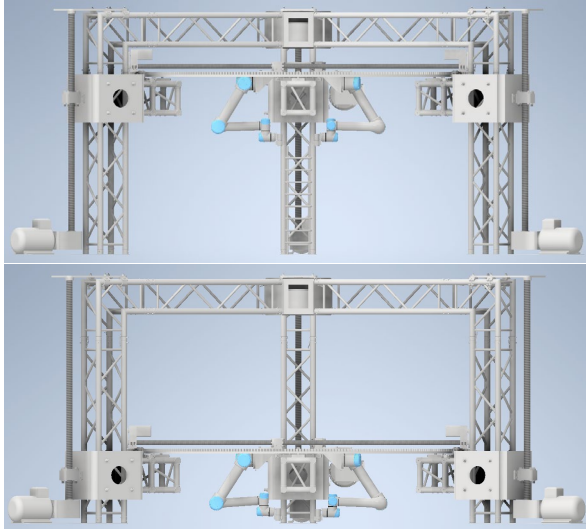
La última pieza corresponde a una componente de unión, la cual se muestra en la figura 117, esta pieza permite unir la tuerca del husillo al carro de desplazamiento convirtiéndose en una de las partes fundamentales del sistema, ya que permitirá que el carro se mueva en el eje vertical y soportara el peso de los demás sistemas, por lo

que se propone su fabricación en acero SAE 1045.



*Figura 117: Pieza de unión de tuerca y carro de desplazamiento.*

Cabe destacar que el componente mecanismo de extensión del eje vertical permite al sistema de extrusión una elevación de 1,6 M y descenso de 0,52 M desde el nivel del suelo, tal como se muestra en la figura 118. Una de las ventajas de este diseño es que se puede adaptar para que el sistema estructural tenga una mayor altura y se puedan lograr impresiones de in mayor tamaño.

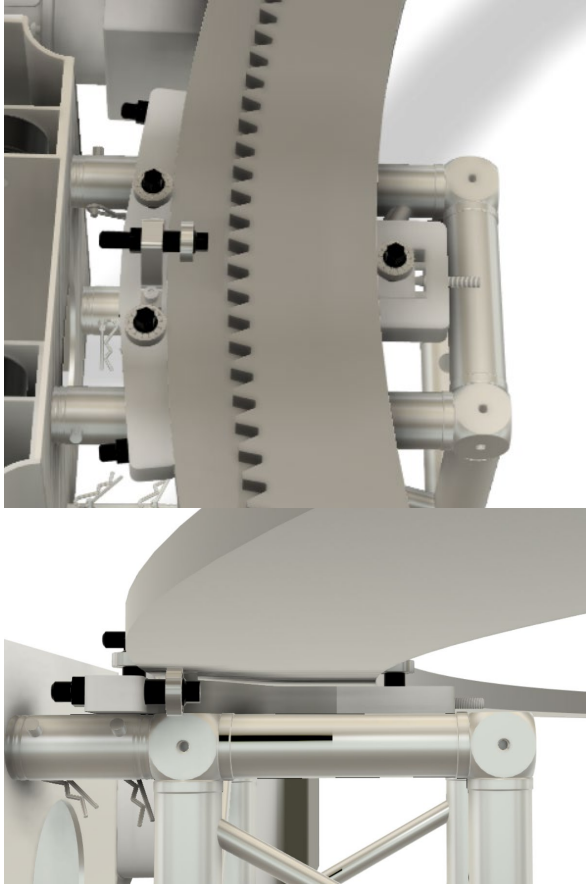


*Figura 118: Desplazamiento del sistema de extrusión en el eje vertical.*

Una vez montado e implementado el mecanismo de desplazamiento vertical, se procede a diseñar y establecer las dimensiones del componente guía circular de precisión, su diseño consiste en un anillo con cremallera circular que otorgara la precisión en la rotación del sistema de extracción. La cremallera fue generada basándose en los datos y fórmulas para fabricar un engranaje (formulas en anexo 19), para tener una mayor precisión del desplazamiento rotacional del sistema se trabaja en la generación de una guía circular con engranaje fabricado con 360 dientes

y un módulo de 8 para adaptarse al tamaño de la estructura. Cabe destacar que este componente cumple la función de un riel por lo que se encuentra en directa interacción con el componente mecanismo de desplazamiento circular, este último adaptándose a la guía circular. Las dimensiones y materialidad de este riel circular están pensadas para dar mayor estabilidad y soporte al sistema, este componente posee un diámetro exterior de 3 M y un diámetro interior de 2,64 M y fue pensado para ser fabricado en acero SAE 1045, debido a su alta resistencia, las especificaciones del componente se muestran en la planimetría en el anexo 20.

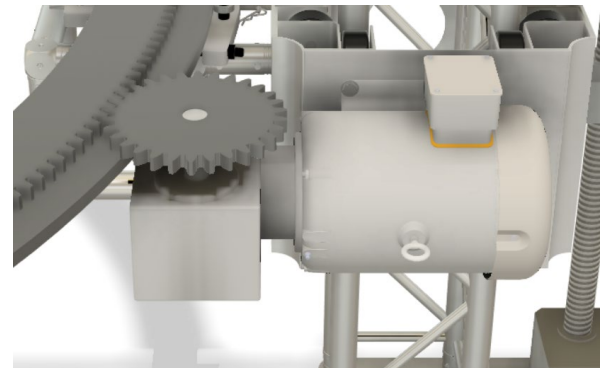
Cabe destacar que este componente aparte de poseer una cremallera otorga espacios donde reposa e interactúa con los módulos de desplazamiento circular, como se muestra en las imágenes de la figura 119, donde se puede apreciar que el contacto entre estos componentes se lleva a cabo por medio de rodamientos que permiten centrar y fijar la guía circular, además de otorgar el desplazamiento rotacional del sistema de extrusión.



*Figura 119: Interacción entre el componente guía circular de precisión y el mecanismo de desplazamiento circular.*

El desplazamiento circular se logra a través de la transmisión de fuerza y torque ejercido por un motor y piñón dando movimiento rotacional al

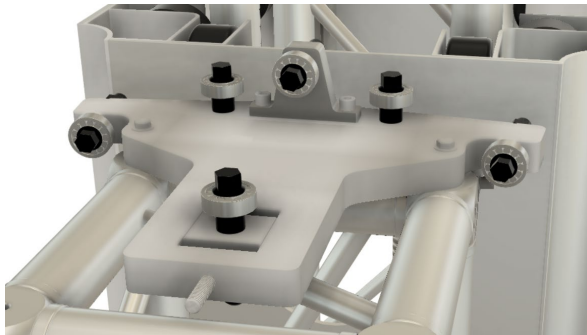
sistema, como se muestra en la figura 120, donde se puede apreciar que este motor va montado al costado de uno de los carros de desplazamiento vertical lo que permite que se mueva junto a todo el sistema. Cabe destacar que este motor cuenta con una caja reductora la cual sirve para disminuir la velocidad de rotación que ejerce el motor y permite al sistema un movimiento lento y fluido.



*Figura 120: Motor y piñón que dan movimiento giratorio a la guía circular de precisión.*

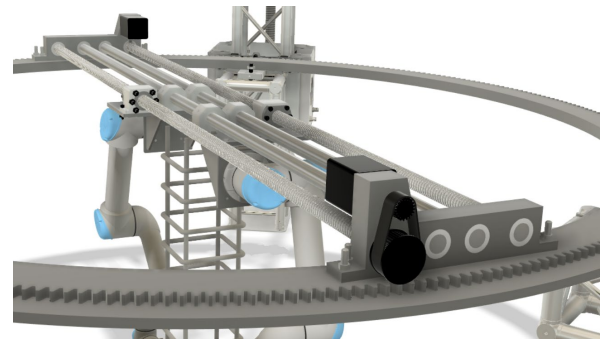
En cuanto al diseño del componente mecanismo de desplazamiento circular, se tuvieron en cuenta del alto esfuerzo al cual estarían sometidos los rodamientos sobre todo la carga radial que tendrían que soportar estas partes, es por ello que se define ocupar rodamientos de cilindros los

cuales soportan mayor carga radial a pesar de poseer un menor diámetro. Para mantener estos rodamientos en las posiciones deseadas se utiliza pernos de acero inoxidable con separadores los cuales evitan el roce y desgaste entre las piezas, tal como se muestra en la figura 121, cabe destacar que, para asegurar un montaje fijo y seguro, se aprovecha el sistema de unión por rosca que posee la estructura del mecanismo de desplazamiento vertical y se diseña este módulo de desplazamiento para que sea montado y fijado estas entradas con rosca que posee la estructura en la que va puesta el componente, para más detalles ver anexo 21.



*Figura 121: Mecanismo de desplazamiento circular montado en el componente de desplazamiento vertical.*

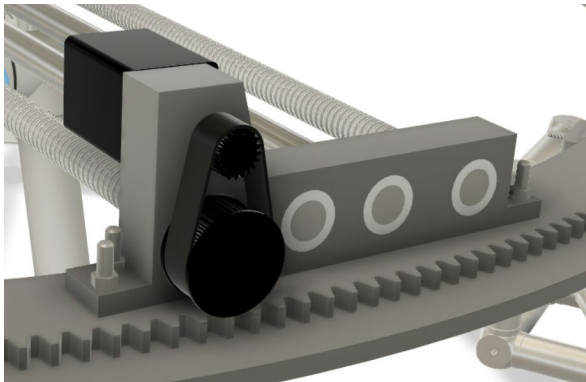
Cabe destacar que el diseño de este componente contempla la posibilidad de adaptarse a diferentes rieles de ser necesario, ya que posee una pieza ajustable al diámetro interior de la guía circular, además del rodamiento desmontable que se adapta al monto de montar el riel.



*Figura 122: Viga giratoria montada en guía circular de precisión.*

Por otro lado, otro de los componentes diseñados para lograr la función del sistema de rotación fue la viga giratoria, la cual permite un desplazamiento horizontal a lo largo de ella, este componente va montado sobre la guía circular y al igual que el mecanismo de desplazamiento vertical posee un sistema de movimiento a través de un husillo y rieles cilíndricos, tal como se muestra en la figura 122.

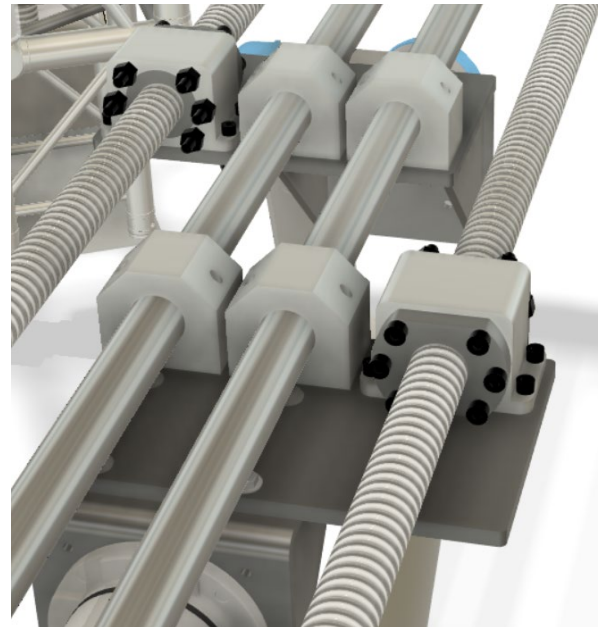
Una de las piezas diseñadas fue el módulo de fijación de los ejes cilíndricos y husillos, la cual se pensó para ser fabricada en acero debido al peso que debe soportar. Esta pieza se monta a la guía circular a través de una unión con pernos y permite la fijación de los husillos y rieles cilíndricos de 40 mm de diámetro a través de un sistema de roscas, esta pieza es simétrica lo que permite utilizarse en ambos lados sin necesidad de cambiar su forma, además esta pieza sustenta el mecanismo de motor con polea, piñón y correa dentada que transmite el movimiento rotacional al husillo, como se muestra en la figura 123.



*Figura 123: módulo de fijación de los ejes cilíndricos y husillos.*

Por otro lado, la viga giratoria permite el montaje rápido y sencillo de los robots a través de un

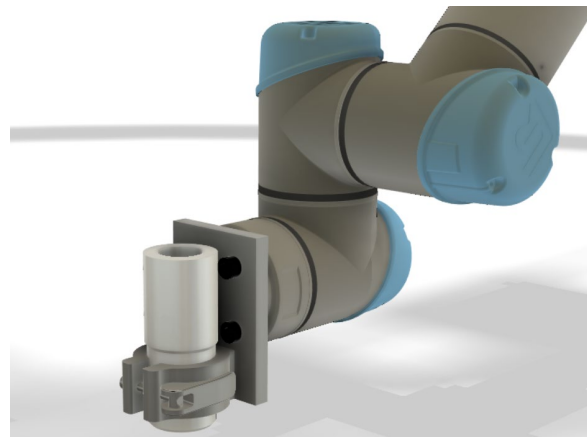
módulo conectado a rodamientos lineales que permiten el desplazamiento a lo largo de los ejes cilíndricos, además de un conector que fija el módulo de montaje del robot al husillo permitiendo un desplazamiento preciso, como se muestra en la figura 124, el soporte del robot se monta a la placa de desplazamiento. Cabe destacar que estos módulos son simétricos lo que permite la fabricación de un solo diseño de pieza.



*Figura 124: módulos de desplazamiento lineal de precisión.*

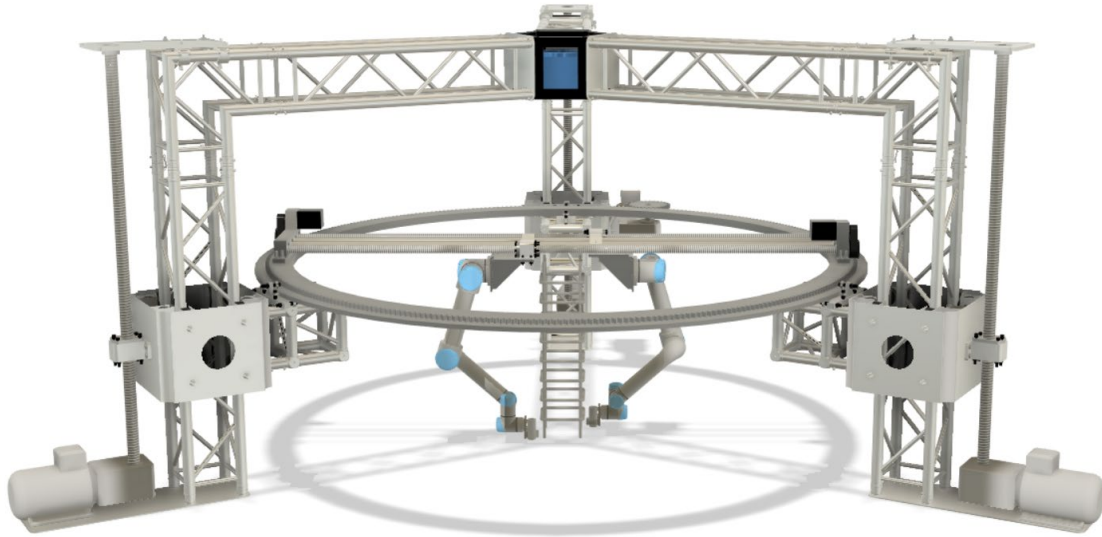
Finalmente, se montan los robots en la base de soporte y se monta el componente de acople para la boquilla de extrusión, en la figura 125, se muestra el conector de brida con sistema de palanca ajustable, este se monta al extremo del brazo robótico por medio de pernos, el diseño de esta pieza permite un ajuste manual de la boquilla de extrusión facilitando la extracción o montaje de esta última, en el anexo 23 se aprecia con mayores detalles las medidas del componente. Cabe destacar que este diseño está pensado para ser fabricado como una pieza de aluminio debido a que no estará sometido a tantos esfuerzos, además de ser un material con mayor maleabilidad permitiendo aumentar la capacidad de adaptarse a diferentes diámetros de boquilla de extrusión.

Cabe destacar que al incorporar una pieza de acople para la boquilla de extrusión esto permitió que el volumen de trabajo del brazo robótico tuviera un ligero aumento, que permitirá en el proceso de impresión alcanzar distancias más lejanas y mantener la dirección de la boquilla de extracción dirigida hacia la cama de impresión.



*Figura 125: Componente de acople para la boquilla de extrusión instalado en brazo robótico.*

Con todos los componentes diseñados y montados en el sistema cooperativo multi-robot para construcción impresa se procede a establecer sus nuevas proporciones y volumen que ocupara en el espacio de trabajo, en la figura 126 se muestra el diseño final e incorporación de todos los componentes y sistemas de la estructura móvil giratoria, donde se puede apreciar que en el centro de del sistema SISCOM se logra una optimización del espacio de trabajo, sin embargo, la incorporación del mecanismo de desplazamiento vertical significa en un aumento en el volumen que ocupa el sistema.



*Figura 126: Diseño de la estructura móvil giratoria para un sistema cooperativo multi-robot de construcción impresa.*

Cabe destacar que las dimensiones finales de la estructura móvil giratoria, la altura del sistema no presenta cambios significativos, sin embargo, el espacio radial que ocupa la estructura si presenta un aumento, como se muestra en las imágenes de la figura 127.

Cabe destacar que gracias a las mejoras de diseño los robots cuneta con una mejor optimización de su espacio de trabajo disminuyendo componentes que pudieron interferir u ocupar una distribución dentro de su

volumen de impresión, en la figura 128 podemos apreciar cómo se representa el espacio de trabajo del robot y el volumen que ocupan con relación a la estructura móvil giratoria.

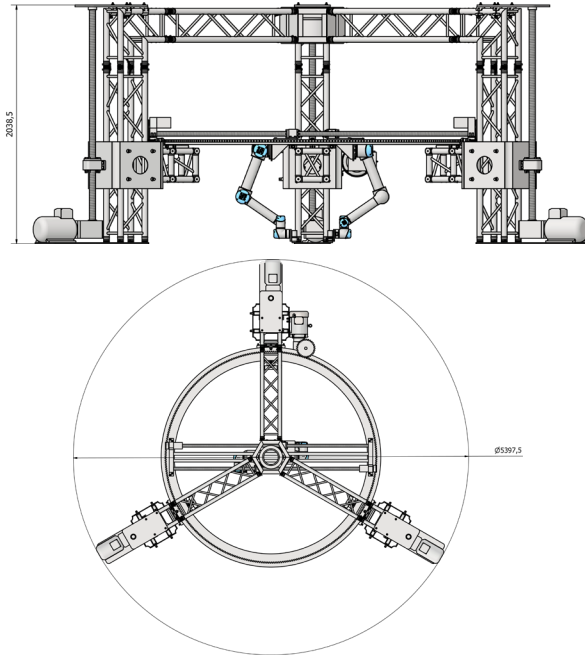


Figura 127: Dimensiones generales de la estructura móvil giratoria.

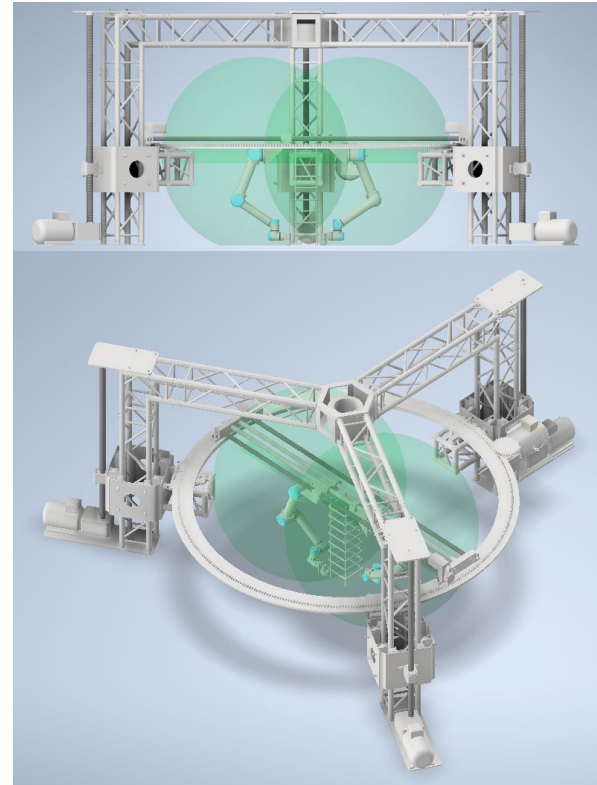


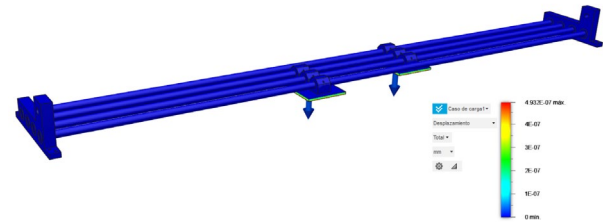
Figura 128: estructura móvil giratoria con los espacios de trabajo de los robots.

#### 4.4.2. ANÁLISIS DE ESFUERZOS ESTÁTICOS

Como proceso de verificación de la resistencia de los componentes de la estructura móvil giratoria

se realizó nuevamente un a análisis de esfuerzo estático del componente viga giratoria con el de detectar posibles fallas de diseño y evitar colapsos estructurales. Cabe destacar que solo se realizó un análisis de esfuerzo a este último componente debido que su correcto funcionamiento es fundamental para el desarrollo del proceso de impresión.

A diferencia del análisis de esfuerzo realizado al diseño conceptual del componente, esta vez la viga giratoria fue sometida una mayor carga estática para asegurarnos de tener un margen de seguridad. Donde se sometió a dos cargas puntuales las cuales se distribuyeron sobre el módulo de desplazamiento lineal que va montado en la viga giratoria. Cada carga se designó con un valor de 588N lo que equivale a aproximadamente 60 kg representando el doble del peso al cual este componente estaría sometido.



*Figura 129: Análisis de esfuerzo estático del componente viga giratoria.*

En la figura 129 podemos observar que a pesar del aumento en del esfuerzo al cual estaría sometido el componente, la viga giratoria no presenta deformaciones considerables que afecten al funcionamiento del sistema.

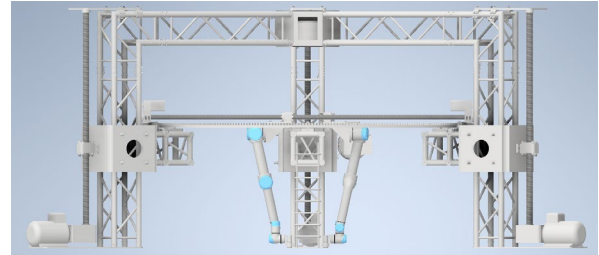
#### 4.4.3. PROTOTIPADO DIGITAL DE LA ESTRUCTURA MÓVIL GIRATORIA

Finalmente, ya teniendo el diseño de la estructura móvil giratoria para un sistema cooperativo multi-robot de construcción impresa, se procede a desarrollar un prototipado digital a través de una animación del funcionamiento de todos los sistemas y componentes del proyecto, con el fin de verificar la configuración y correcto funcionamiento de los componentes de la estructura en movimiento.

Se realiza una animación en el programa Fusion 360 de Autodesk, donde se anima el movimiento que deberán realizar los componentes del sistema para el proceso de impresión con hormigón además de observar el patrón de movimiento en el trabajo cooperativo de los robots. Cabe destacar que la animación fue limitada debido a las capacidades del programa, logrando animar el movimiento giratorio del sistema de rotación, observando el patrón helicoidal de impresión formado por los dos robots, otro de los movimientos logrados fue la animación del mecanismo de desplazamiento en el eje vertical, donde se observa la necesidad de mantener una perfecta sincronización del componente de desplazamiento vertical en las tres estructuras de apoyo.

Finalmente, se comprobó el correcto funcionamiento del desplazamiento lineal de los robots en la viga giratoria, donde se observó que gracias a su diseño tienen un mayor alcance en el desplazamiento horizontal. Cabe destacar que se detecta que al imprimir alrededor de enfierramientos se debe tener en cuenta la altura de este, ya que la viga giratoria al encontrarse al

centro de la estructura no permite trabajar alrededor de elementos con altura mayor a 1 M, ya que los robots no alcanzan la cama de impresión (suelo), como se muestra en la figura 130.



*Figura 130: Demostración del límite del alcance de los brazos robóticos, considerando que hay un elemento estructural al centro de la impresión.*

Para visualizar el video de la animación del funcionamiento de la estructura móvil giratoria ingresar al siguiente link:

- <https://youtu.be/Btymb8lrWk>

## VII. CONCLUSIÓN |

## CONCLUSIÓN |

Inicialmente, se presenta una metodología como un proceso lineal, pero en la práctica, este no se llevó a cabo de esta manera debido que en la etapa de diseño conceptual y de detalle, se iban encontrando elementos en las propuestas que según su modificación esto alteraba los demás componentes de la estructura móvil giratoria, esto se debió a la importante dependencia de las diferentes partes que componían al sistema total. Esto hacía la metodología un proceso iterativo pero eficiente que permitía obtener mejoras y detectar posibles fallas en las diferentes propuestas.

Una de las etapas fundamentales en el proceso de diseño fue la descomposición funcional del estado objetivo del proyecto, debido a que permitió establecer relación y vínculo entre los diferentes componentes de los sistemas, dando paso a posibles configuraciones que permitieran realizar el correcto funcionamiento del sistema cooperativo multi-robots, logrando definir la configuración que se adapte de mejor manera al posicionamiento de los robots dentro de la estructura móvil giratoria. Debido a lo anterior, se logra desarrollar la parametrización del espacio y

volumen de trabajo que utilizarían los robots en el proceso de impresión, lo que da paso a considerar posibles configuraciones, donde los robots podrían estar realizando diversas tareas de forma simultánea.

Gracias al estudio de referentes se pudo conceptualizar varias propuestas que permitieron mejorar y optimizar el diseño final de la estructura móvil, además el trabajo de conceptualización de propuestas en el programa CAD permitió un mayor análisis de las posibles soluciones y detectar eventuales fallas. Sin embargo, debido a que el proceso de diseño se vio afectado por un contexto de pandemia se limitó a realizar propuestas de diseño en forma de croquis y representación de modelos 3D. Según lo mencionado, se detectó un obstáculo en la etapa de conceptualización de las posibles soluciones debido a la falta de desarrollo y creación de prototipos y/o maquetas conceptuales que permitieran comprender la interacción de todos los componentes y posibles configuraciones de estos. A pesar de que se desarrollaron de forma digital en el programa Autodesk inventor se pierde

la interacción directa con los conceptos de funcionamiento y usabilidad de los componentes.

Luego de desarrollar el diseño y simulación de una estructura móvil giratoria para un sistema cooperativo multi-robot de construcción impresa, se pudo identificar que todos los requerimientos funcionales planteados fueron logrados. A pesar de que se trata del diseño de prototipo a escala, se pudo corroborar al definir el listado de partes y piezas necesarias para su diseño, que la implementación requiere un alto valor de inversión, además se reconoce que al aumentar la escala a tamaño real se requiere de algunos rediseños en la estructura para optimizar su funcionamiento.

Por otro lado, se detectó que al tratar de cumplir en su mayor medida con los requisitos funcionales, se debió reestructurar el diseño inicial de la estructura móvil giratoria, considerando en todo momento las dimensiones que los elementos adicionales ocuparían en el espacio y el peso de los componentes que debería soportar el sistema, con la finalidad de obtener parámetros para la definición de

materiales con los que se fabricarían algunos componentes y obtener el análisis de esfuerzo al cual estaría sometido la pieza para optimizar el funcionamiento de todos los sistemas que conforman la estructura móvil giratoria.

Finalmente, se evidencia la importancia de la automatización en la construcción y la incorporación de trabajos cooperativos de múltiples robots, ya que podrían generarse infinitas configuraciones de trabajo y plantear diferentes sistemas cooperativos, dando como resultado un gran impacto en nuestra sociedad, logrando crear estructuras arquitectónicas de alta calidad en poco tiempo, a bajo costo de fabricación, disminuyendo los residuos y desechos de la construcción.

## VIII. REFERENCIAS |

## REFERENCIAS |

- Agüero Naguian, E. (2019). Desarrollo de una plataforma experimental para el estudio de sistemas multi-robot de construcción impresa. *Memoria para optar el título de Arquitecto*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Aldama, Z. (28 de Abril de 2014). Cariño, nos están imprimiendo la casa. *El País*, pág. [https://elpais.com/tecnologia/2014/04/28/actualidad/1398690876\\_287610.html](https://elpais.com/tecnologia/2014/04/28/actualidad/1398690876_287610.html).
- Altshuller, G. S. (1999). *The Innovation Algorithm: TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity*. Technical Innovation Center, Inc.
- Bucco, M. (2016). Universidad de San Andrés. (*Tesis de Maestría*). La impresión 3D y su aplicación en los servicios médicos (prótesis, fármacos, órganos), Buenos Aires.
- Buswell, R. A., Soar, R. C., Gibb, A. G., & Thorpe, A. (2007). Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Automation in Construction*, 16, 224-231.

- Chaimowicz, L., Campos, M. F., & kumar, V. (2002). Dynamic Role Assignment for Cooperative Robots. *International Conference on Robotics & Automation*, (págs. 293-298). Washington, DC.
- Enshassi, A., Kochendoerfer, B., & Rizq, E. (2014). Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción. *Revista Ingeniería de Construcción*, 234-254.
- Espinel Velasco, J. C. (2015). Procesos digitales y sistemas de prototipado rápido aditivos aplicados a la creación escultórica de pequeño formato y relieves. (*Tesis Doctoral*). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Fressoli, M., & Smith, A. (2015). Fabricación digital: ¿Una nueva revolución tecnológica? *Integración & Comercio*, 112-125.
- García, R. (2011). Fabricación digital de modelos constructivos: análisis de equipos y procesos. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 145-157.
- González Böhme, L. F., García Alvarado, R., Quitral Zapata, F. J., & Valenzuela Astudillo, E. A. (2020). SISCOM: Cooperative Multi-Robot Systems in Construction. *XXIV International Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics*. Medellín.
- Hernández Ordoñez, M., Ortiz Moctezuma, M. B., Calles Arriaga, C. A., & Rodríguez Portillo, J. C. (2015). *Robótica: Análisis, modelado, control e implementación*. Victoria.
- IAAC. (2018). *Minibuilders*. Obtenido de <http://robots.iaac.net/>
- Jorquera Ortega, A. (2016). *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D*. España: Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.
- Kampker, A., Triebs, J., Kawollek, S., Ayvaz, P., & Hohenstein, S. (2019). Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems.

- Procedia CIRP*, 81, págs. 815-819. Ljubljana.
- Khan, M. (2020). Mix suitable for concrete 3D printing: A review. *Materials Today: Proceedings*.
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 13, 5-19.
- Khoshnevis, B., & Dutton, R. (1998). Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials. *Materials Technology*, 53-56.
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, 45, 1221-1232.
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A., & Thorpe, T. (2012). Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, 42, 558-566.
- Lim, S., Buswell, R., Le, T., Austin, S., Gibb, A., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21, 262-268.
- Lim, S., Le, T., Webster, J., Buswell, R., Austin, S., Gibb, A., & Thorpe, T. (2009). Fabricating construction components using layer manufacturing technology. *the Global Innovation in Construction Conference*. Leicestershire: Loughborough University.
- Mathur, R. (2016). 3D Printing in Architecture. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 583-591.
- Mohammed Shakir, Q. (2019). 3D-printing of Houses.
- Ngo, T., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. En

- Composites Part B: Engineering* (págs. 172-196).
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. -H. (2007). *Engineering Design. A Systematic Approach*.
- Pegna, J. (1997). Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, 5, 427-437.
- Pérez de Lama Halcón, J., Gutiérrez de Rueda García, M., Sánchez-Laulhé Sánchez de Cos, J. M., & Olmo Bordallo, J. J. (2011). Fabricación digital, código abierto e innovación distribuida.
- Pérez-Pérez, M. P., Sebastián, M. A., & Gómez-García, E. (2018). Análisis y propuesta para la utilización de los contenidos en normas técnicas para la enseñanza de la Fabricación Aditiva. *XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, (págs. 286-299). Madrid.
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A Complex View of Industry 4.0. *SAGE Open*, 1-11.
- Sanjayan, J., & Nematollahi, B. (2019). 3D Concrete Printing for Construction Applications. En J. Sanjayan, A. Nazari, & B. Nematollahi, *3D Concrete Printing Technology: Construction and Building Applications* (págs. 1-11). Butterworth-Heinemann.
- Seely, J. (2004). Digital Fabrication in the Architectural Design Process. (*Tesis de Maestría*). Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. (2009). *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer.
- Silva, C. R., Jeronymo, R. M., & Barata, T. Q. (2019). Análise comparativa dos processos de prototipagem rápida aditiva e subtrativa no desenvolvimento de produtos. *9 ° Congresso Internacional de Design da Informação*, (págs. 2073-2083). Belo Horizonte.
- Sommer, L. (2015). Industrial revolution - industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution? *Journal of*

*Industrial Engineering and Management*,  
1512 - 1532.

Tibaut, A., Rebolj, D., & Nekrep Perc, M. (2014). Interoperability requirements for automated manufacturing systems in construction. *J Intell Manuf*, 27, 251-262.

Vukobratovic, M., & Tuneski, A. (1998). Mathematical Model of Multiple Manipulators: Cooperative Compliant Manipulation on Dynamical Environment. *Journal of Mechanism and Machine Theory*, 33, 1211-1239.

Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B*, 110, 442-458.

Ynzunza Cortés, C. B., Izar Landeta, J. M., & Bocarando Chacón, J. G. (2017). El entorno de la industria 4.0. *ConCiencia Tecnológica*, 33-45.

Zhang, X., Li, M., Hui Lim, J., Weng, Y., DanielTay, Y. W., Pham, H., & Pham, Q.-C. (Noviembre de 2018). Large-scale 3D

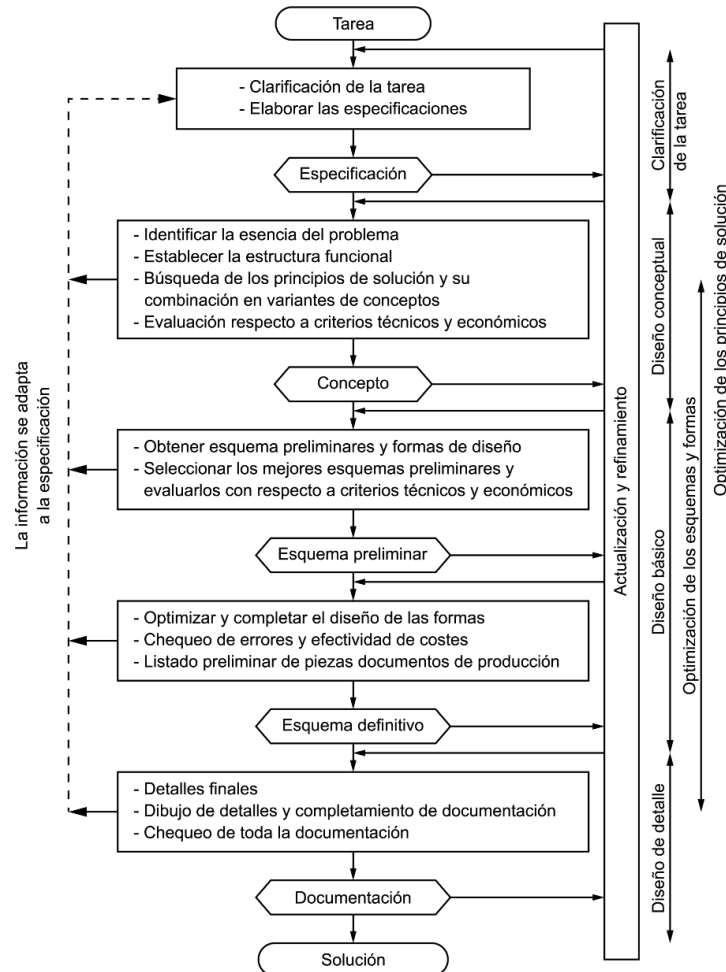
printing by a team of mobile robots. *Automation in Construction*, 95, 98-106.

## **IX. ANEXOS |**

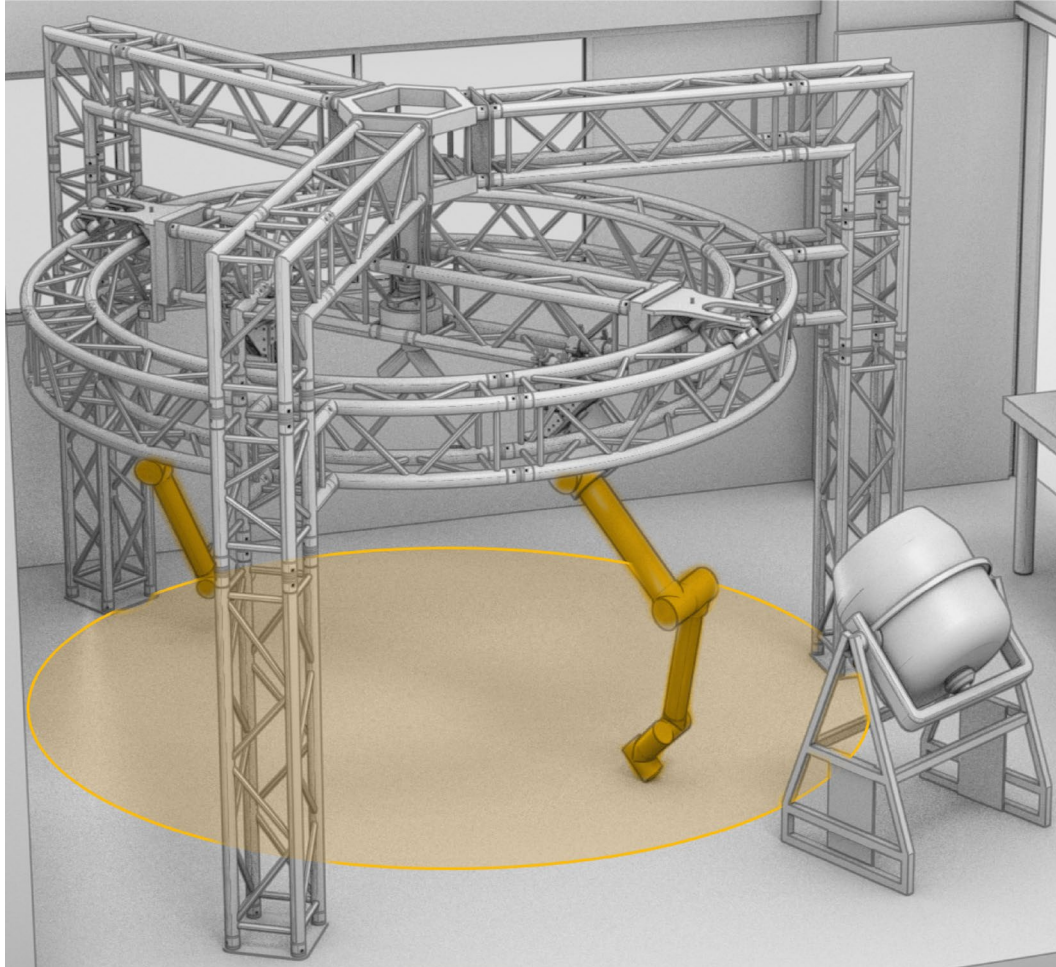
## ANEXOS |

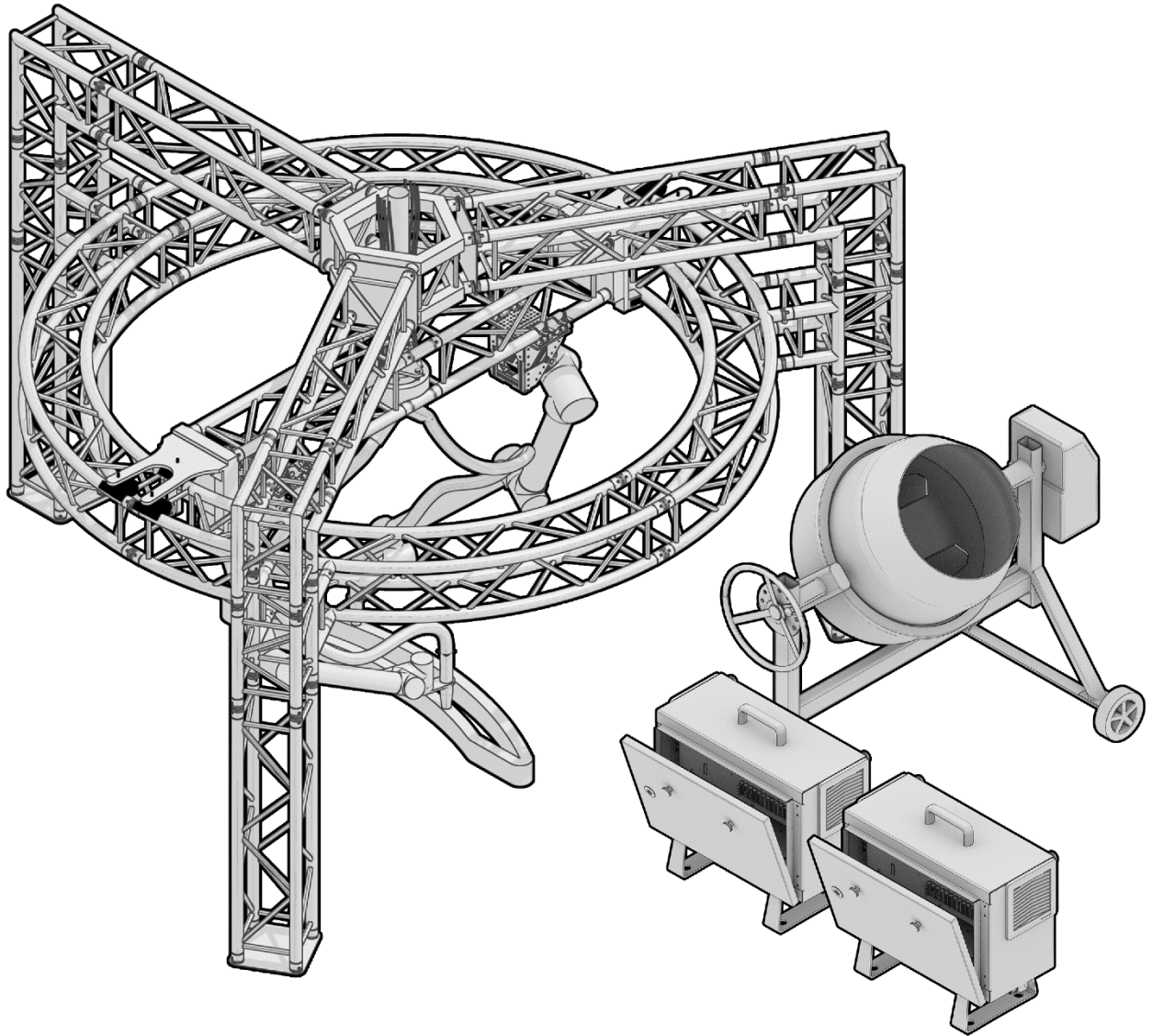
En esta sección se expone la información complementaria que se utilizó para la realización de este trabajo.

### ANEXO 1: MODELO PREDESCRIPTIVO DE PAHL Y BEITZ.



ANEXO 2: DISEÑO DE LA ESTRUCTURA PARA UN SISTEMA COOPERATIVO MULTI-ROBOT PROPUESTA POR ESTEBAN AGÜERO.





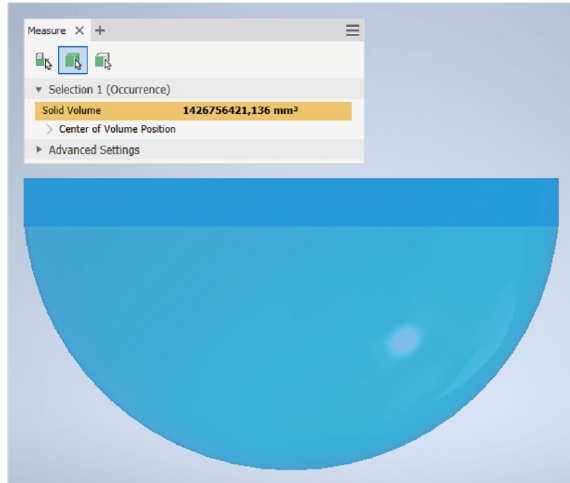
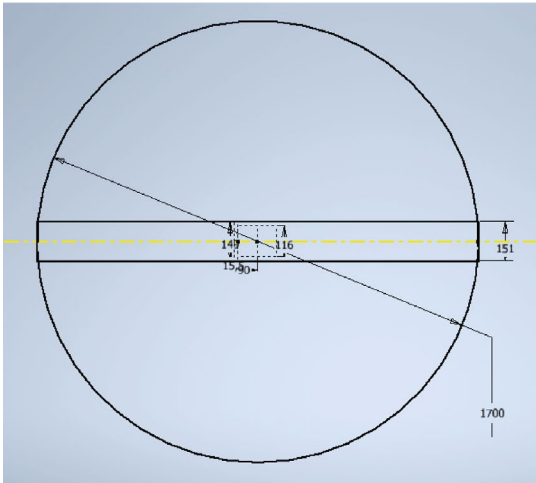
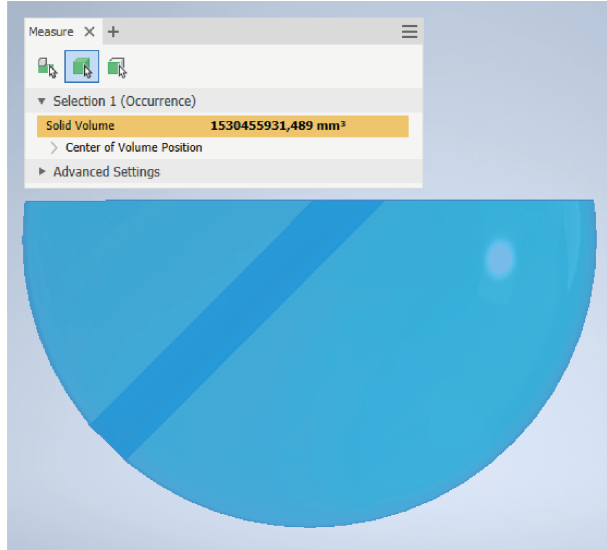
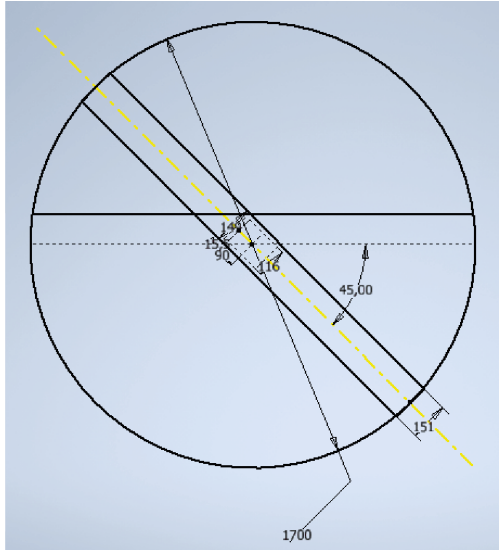
### ANEXO 3: CLASIFICACIÓN DE RECURSOS SEGÚN METODOLOGÍA TRIZ

El objetivo de esta técnica, planteada inicialmente por Altshuller (1999), es el de identificar las oportunidades y limitaciones relacionadas a los recursos (que siempre son limitados) para el desarrollo de un proyecto/solución.

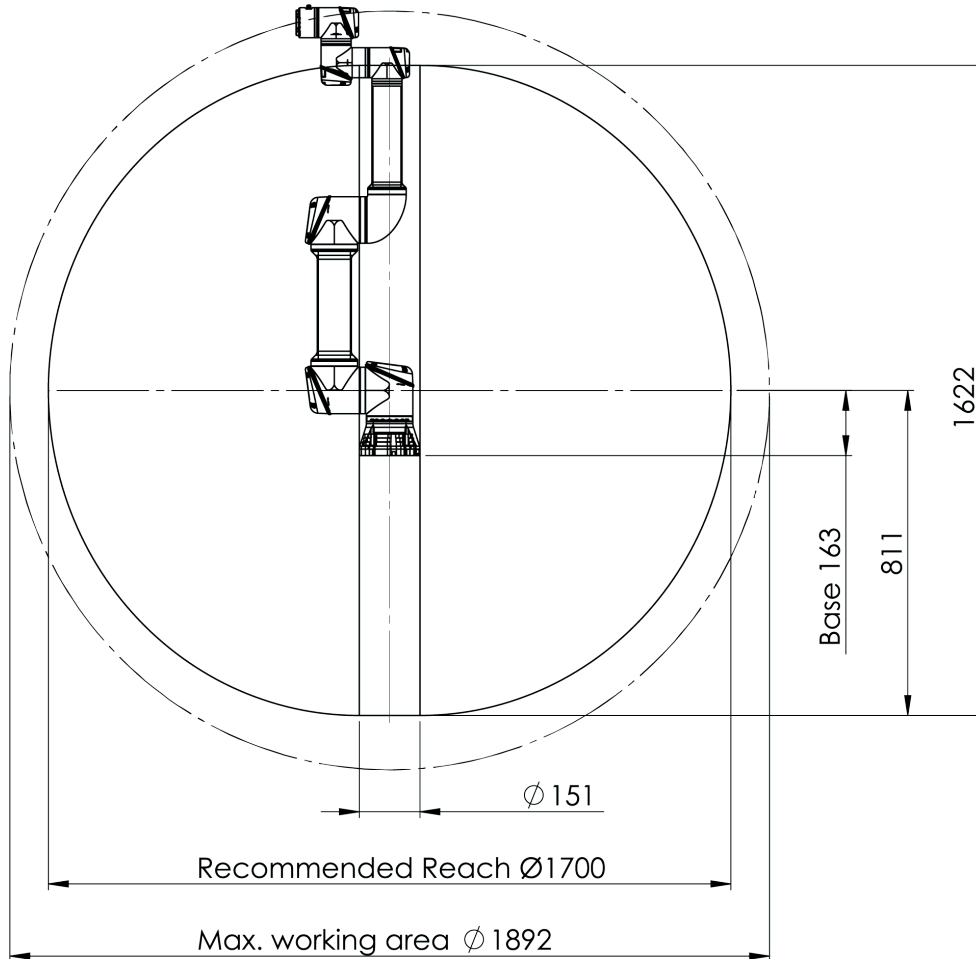
Esta técnica consta de cinco categorías explicadas a continuación:

- **Material:** hace referencia a todo tipo de materia prima, productos semiterminados, materiales manufacturados (por ejemplo: equipos tecnológicos pertenecientes a la planta de producción), material de descarte, etc. De manera más general, considera cualquier tipo de producto manufacturado que pueda ser catalogado como recurso.
- **Energía:** se refiere a cualquier tipo de energía que provenga tanto en forma interna como externa a la compañía. Se puede considerar en este apartado la energía humana, en caso de que se esté utilizando solo el uso de fuerza física.
- **Información:** es acerca de cualquier tipo de información perceptible del sistema (por ejemplo, propiedades del sistema y sus cambios, información temporal, etc.). También puede clasificarse la información proveniente del recurso humano, cuando este aporta con su conocimiento y creatividad.
- **Tiempo:** se refiere a cualquier intervalo de tiempo relevante para la situación actual (trabajos preliminares, trabajo programado, procesos paralelos, pausas, etc.).
- **Espacio:** hace referencia a cualquier espacio o recinto no utilizado y disponible para la empresa o su entorno.

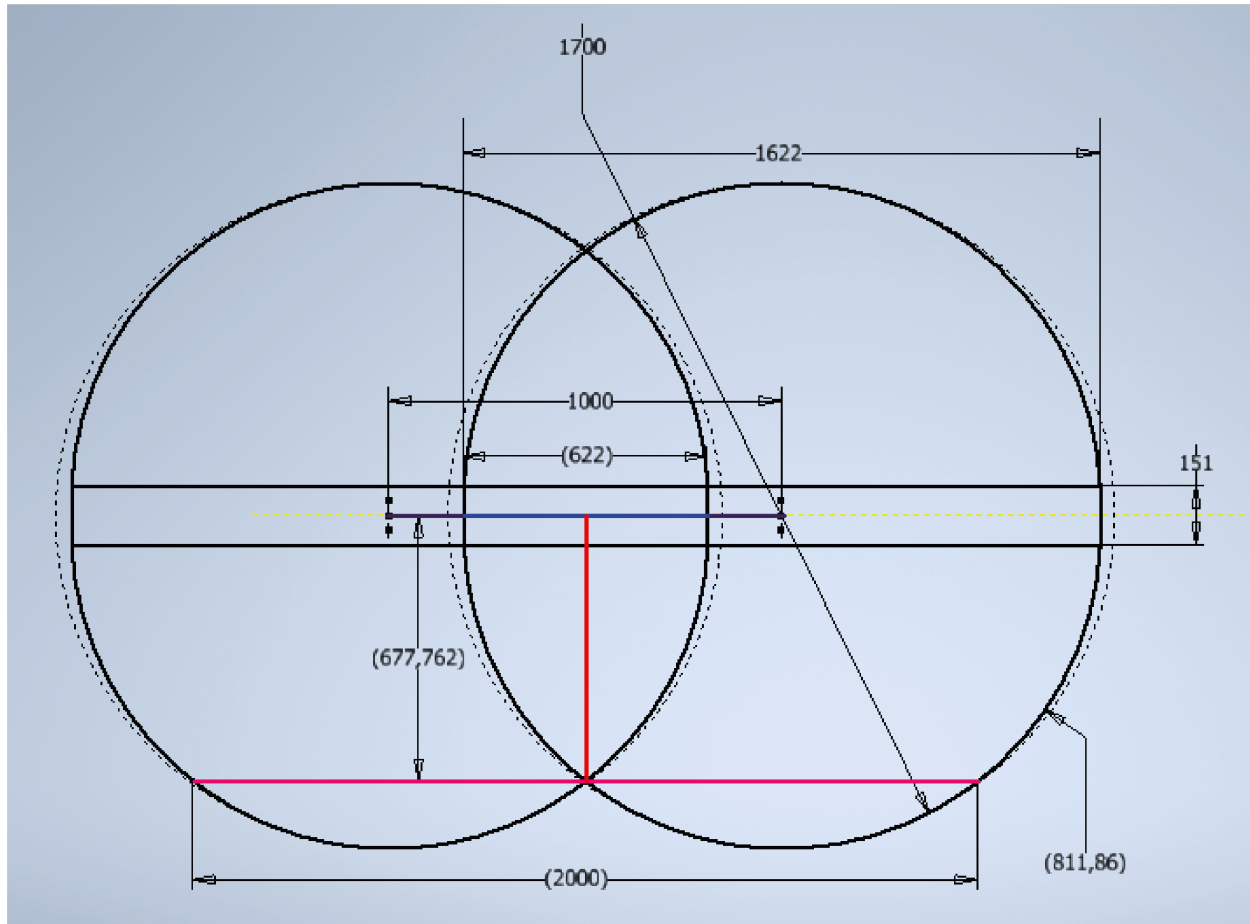
#### ANEXO 4: CÁLCULO APROXIMADO DEL VOLUMEN DEL ESPACIO DE TRABAJO DE UN ROBOT.

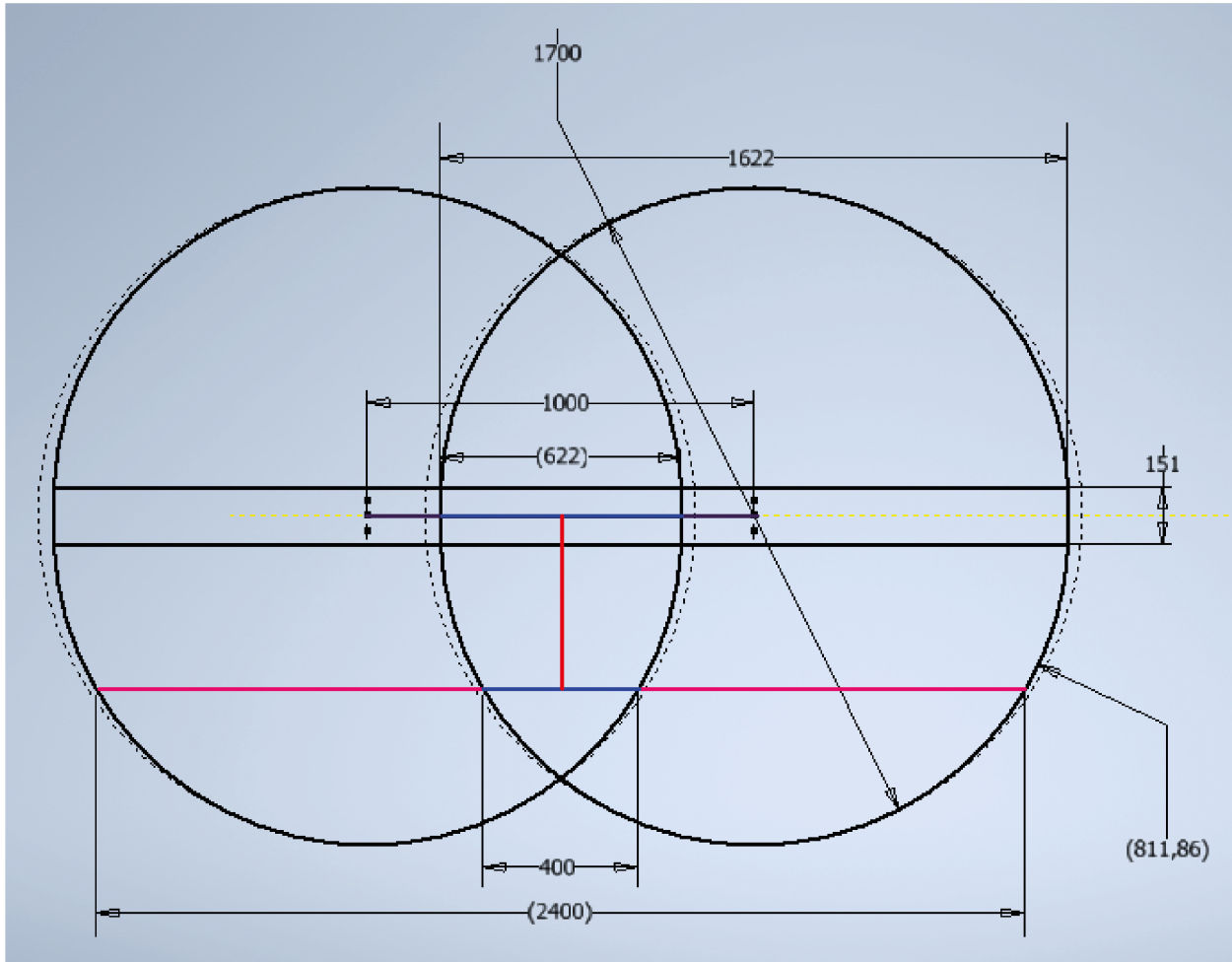


ANEXO 5: DIMENSIONES EN MM DEL ÁREA DE TRABAJO DEL ROBOT UR5, VISTA LATERAL  
(Fuente: <https://www.universal-robots.com/articles/ur/application-installation/what-is-a-singularity/>).

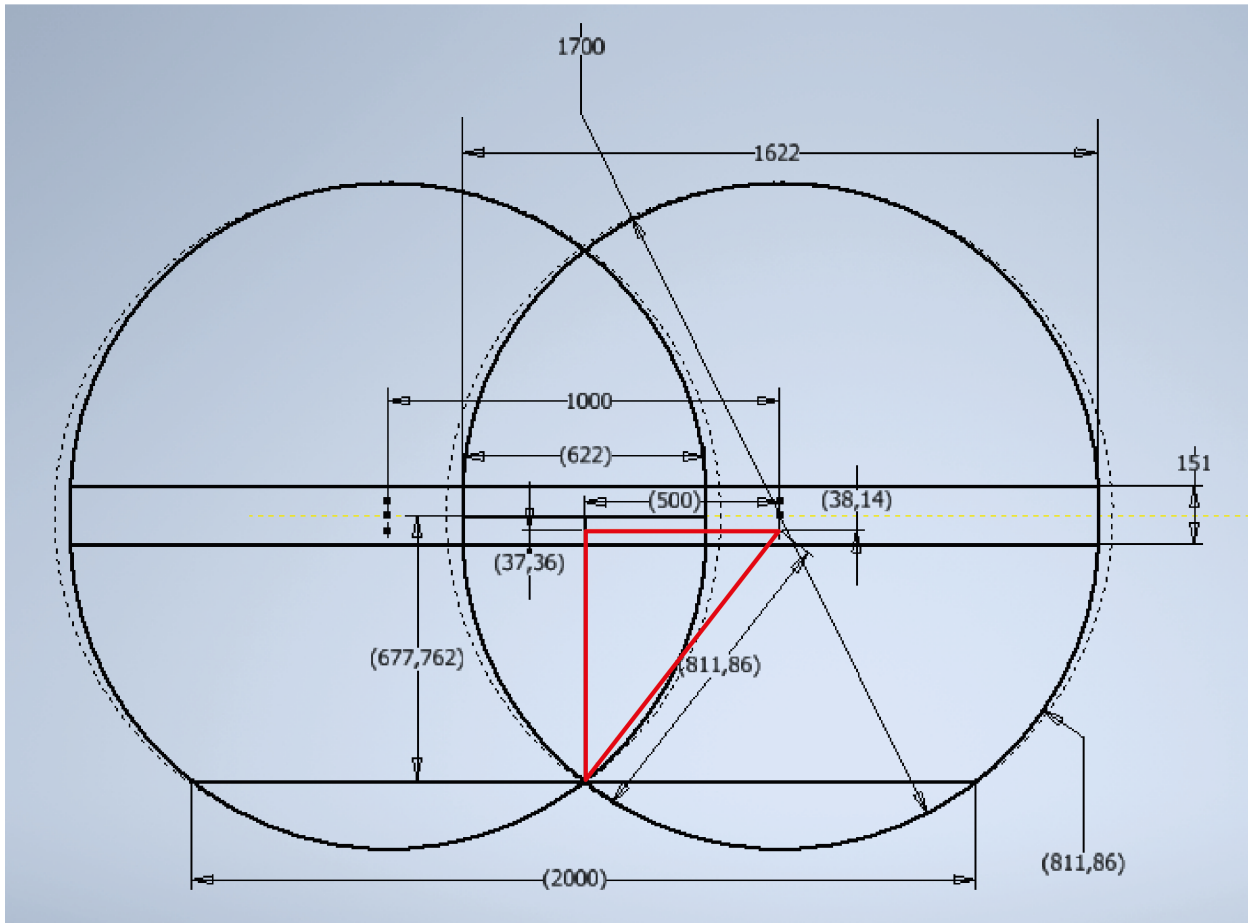


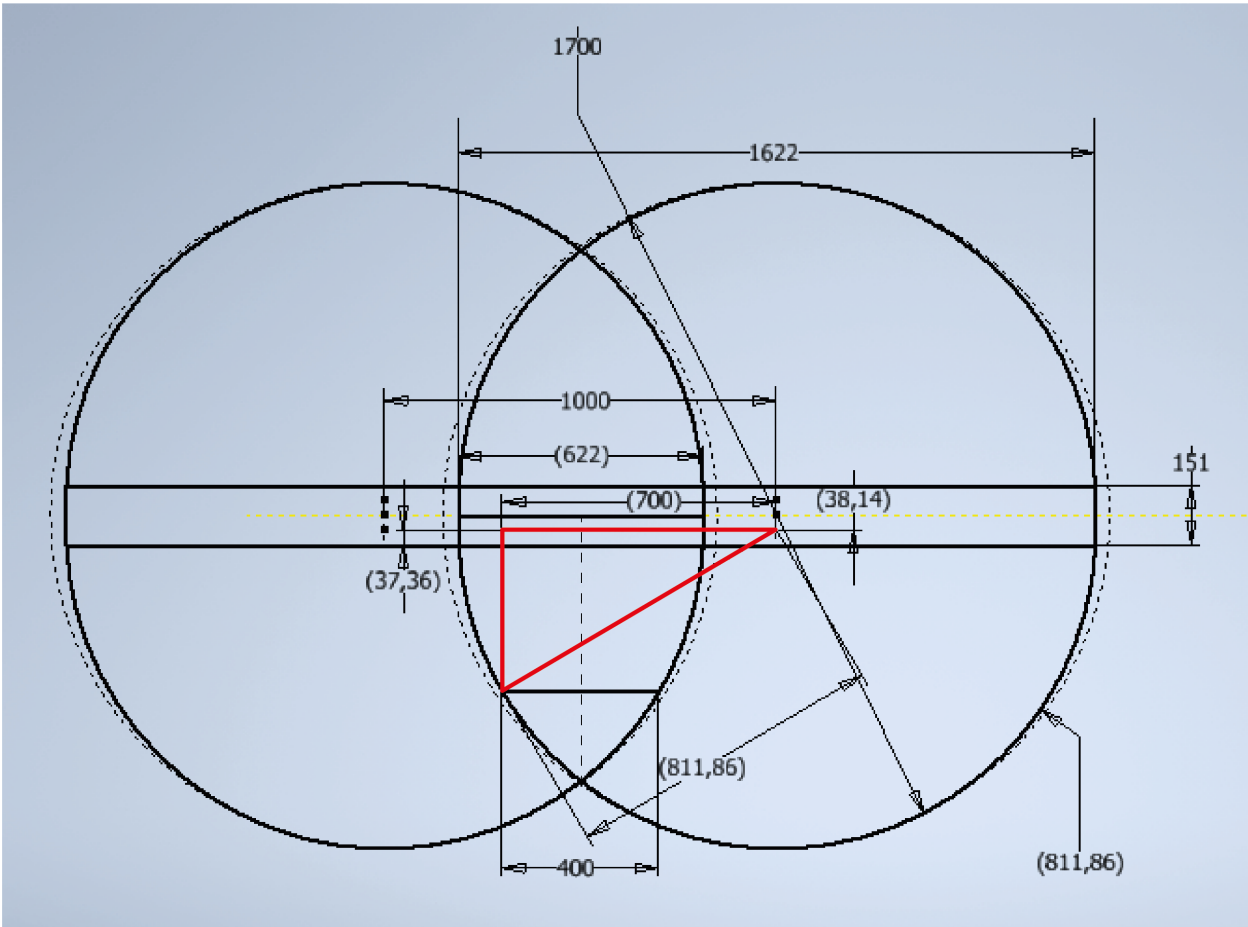
ANEXO 6: MODELO DE LA RELACIÓN QUE MANTIENEN LAS ÁREAS DE TRABAJO DE LOS ROBOTS UR5, DIMENSIONES EN MM, VISTA LATERAL



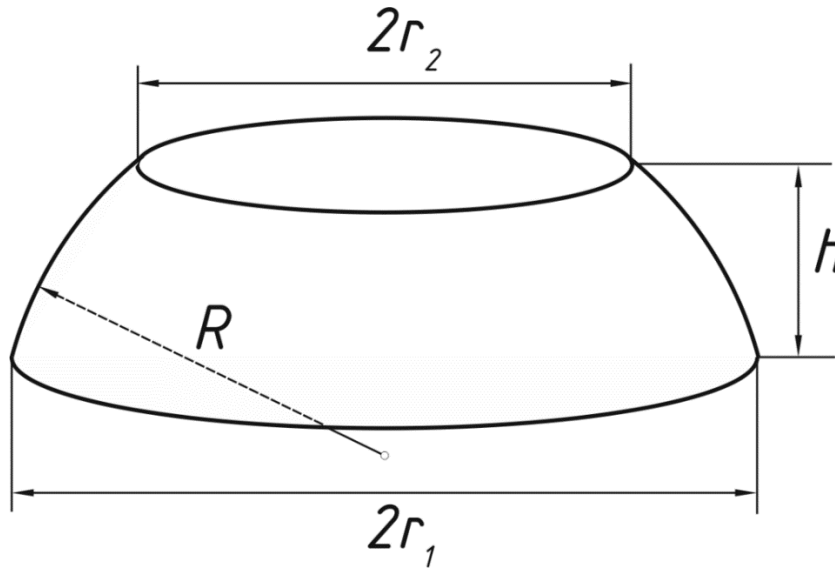


ANEXO 7: MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA EL CALCULO DE LOS VALORES  $h$  Y  $h'$ ,  
DIMENSIONES EN MM, VISTA LATERAL





ANEXO 8: ECUACIÓN PARA CALCULAR EL VOLUMEN DE UN SEGMENTO ESFÉRICO.



$$V = \frac{\pi h}{6} (3r_1^2 + 3r_2^2 + h^2)$$

ANEXO 9: TABLA DE COMPONENTES QUE REQUIEREN DE LA BÚSQUEDA DE REFERENTES.

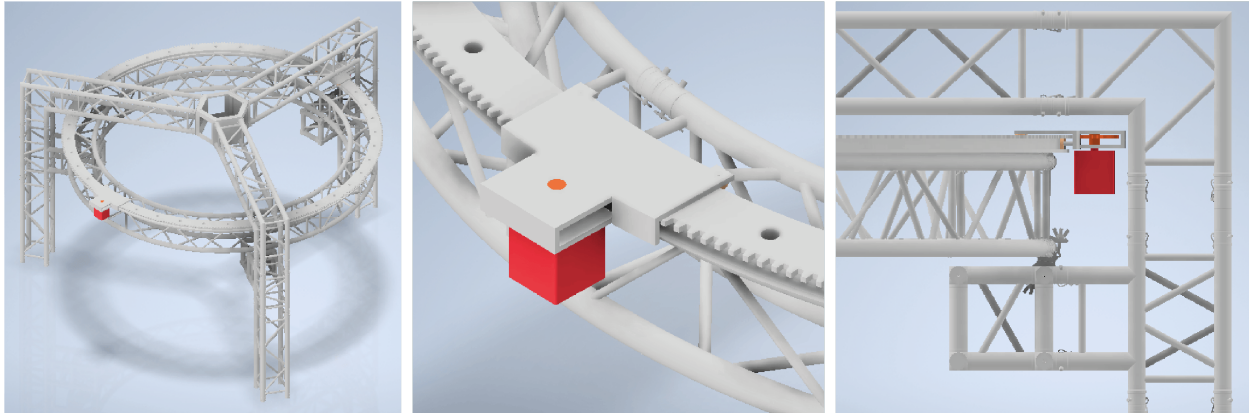
<b>SISTEMAS</b>	<b>COMPONENTES</b>	<b>FUNCIONES</b>	<b>Palabras clave</b>
<b>SISTEMA DE EXTRUSIÓN</b>	acople de boquilla	Sujetar la boquilla de extrusión al robot.	Montaje de herramientas en robot universal. Herramientas para robot universal.
	Base de soporte	Sustentar al robot y optimizar su alcance de trabajo.	Base para robot universal. Conector de base para robot universal.
	Mecanismo de extensión del eje vertical	Extender el alcance de trabajo del robot en su eje vertical.	Sistema de posicionamiento vertical. Columna telescópica para robot universal.
	Guía lineal de precisión	Guiar y precisar el desplazamiento lineal de los robots sobre la viga giratoria.	Extensor de rango para robots universal. Sistema de posicionamiento horizontal. Celda robótica móvil.
	Mecanismo de desplazamiento lineal	Desplazar al robot en su eje horizontal y aumentar su alcance de trabajo.	Extensor de rango para robots universal. Sistema de posicionamiento horizontal. Celda robótica móvil.
<b>SISTEMA DE ROTACIÓN</b>	Viga giratoria	Sustentar y estabilizar el sistema de extrusión.	Estructura de celosía. Perfiles de aluminio. Viga de soporte.
	Guía circular de precisión	Guiar y precisar el desplazamiento del sistema de rotación.	Guía o riel curvo. Guía de anillo de precisión. Corona de orientación.
	Mecanismo de desplazamiento circular	Desplazar con precisión la viga giratoria en una guía circular.	Carros de desplazamiento circular. Patín de desplazamiento en riel. Carro modular para riel.

ANEXO 10: MATRIZ DE RELACIÓN Y CONEXIÓN ENTRE LOS COMPONENTES REFERENCIADOS DE CADA SISTEMA.

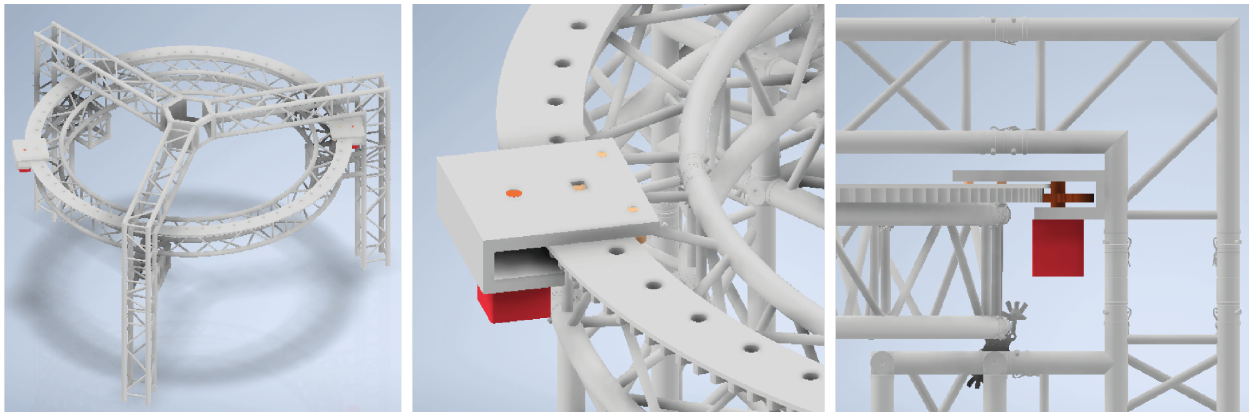
Componente / Componente	SISTEMA ESTRUCTURAL			SISTEMA DE ROTACIÓN			SISTEMA DE EXTRUSIÓN							
	Estructura de apoyo	Pieza de unión	Anillo estructural	Viga giratoria	Guía circular de precisión	Mecanismo de desplazamiento circular	Robot UR5/CB3	Base de soporte	Boquilla de extrusión	Módulo de sujeción de la boquilla	Guía lineal de precisión	Mecanismo de desplazamiento lineal	Mecanismo de extensión del eje vertical	
SISTEMA ESTRUCTURAL	Estructura de apoyo	-	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	X
	Pieza de unión	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Anillo estructural	X	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	-	X
SISTEMA DE ROTACIÓN	Viga giratoria	-	-	X	-	X	X	-	-	-	-	X	X	-
	Guía circular de precisión	X	-	X	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-
	Mecanismo de desplazamiento circular	X	-	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-
SISTEMA DE EXTRUSIÓN	Robot UR5/CB3	-	-	-	-	-	-	-	X	-	X	-	-	-
	Base de soporte	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	X
	Boquilla de extrusión	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
	Módulo de sujeción de la boquilla	-	-	-	-	-	-	X	-	X	-	-	-	-
	Guía lineal de precisión	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X	-
	Mecanismo de desplazamiento lineal	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	X	X
	Mecanismo de extensión del eje vertical	X	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	X	-

## ANEXO 11: PROPUESTAS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE ROTACIÓN.

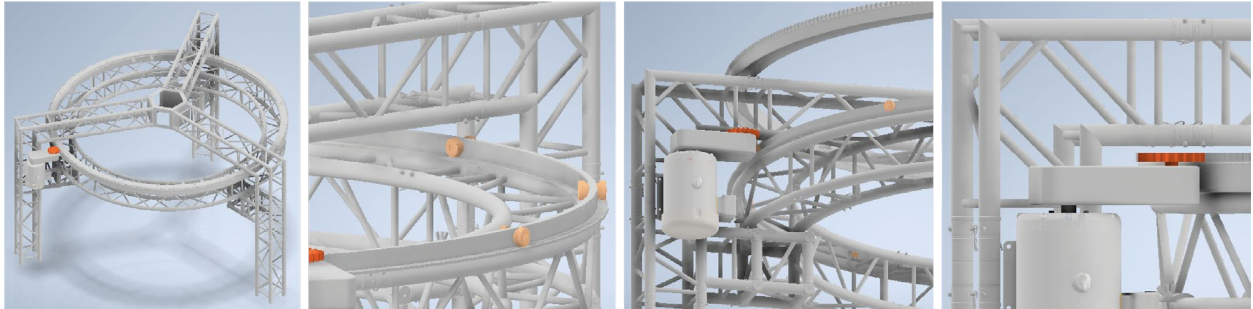
Propuesta “Viga circular doble T con cremallera y carro de desplazamiento móvil con motor”



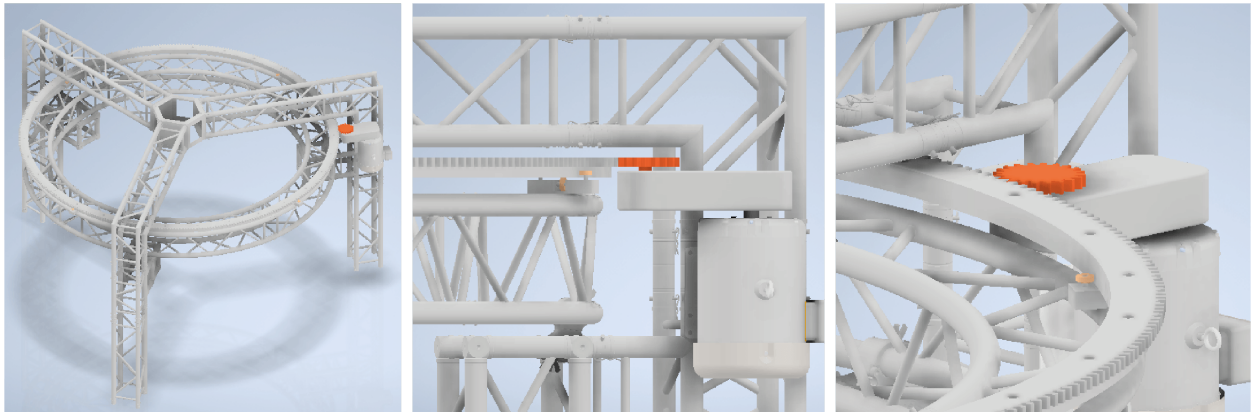
Propuesta “Cremallera circular y carro de desplazamiento móvil con motor”



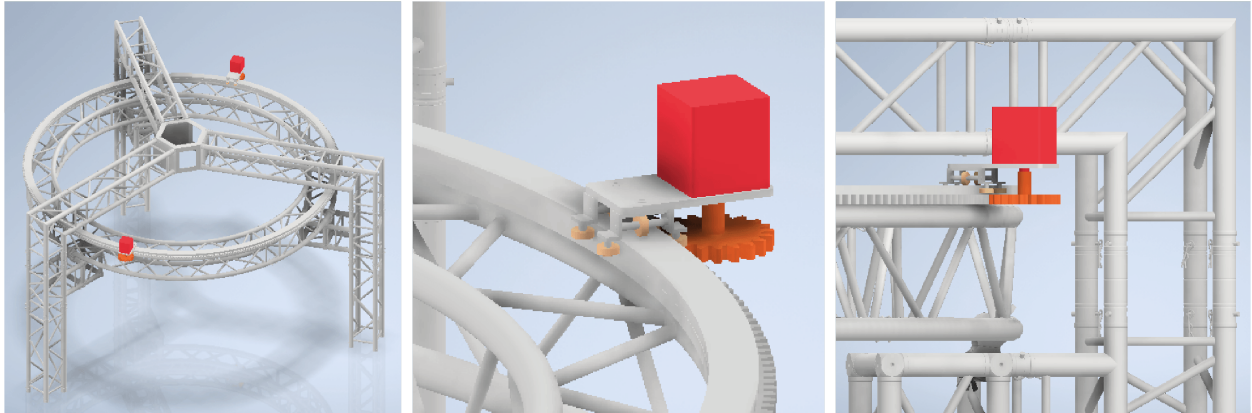
Propuesta de diseño “Plataforma de rotación con cremallera circular”



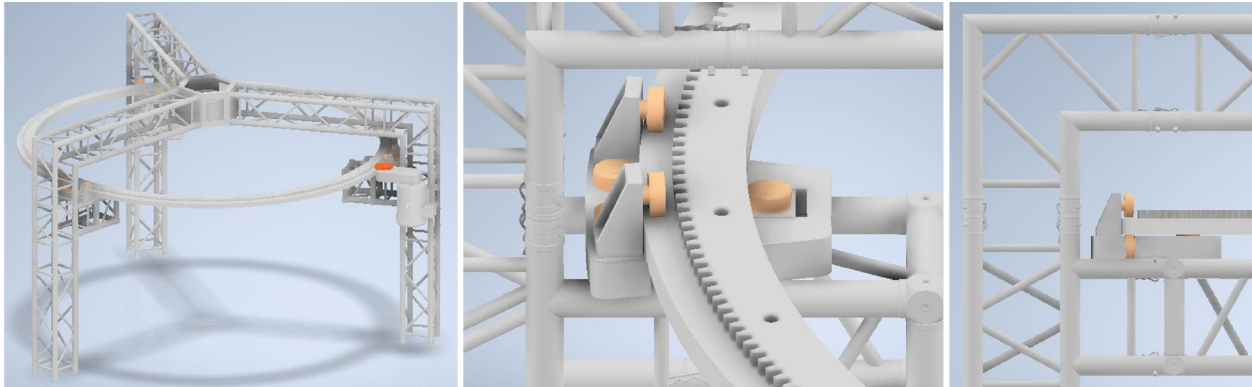
Propuesta “Viga circular con cremallera y módulos de desplazamiento fijo”



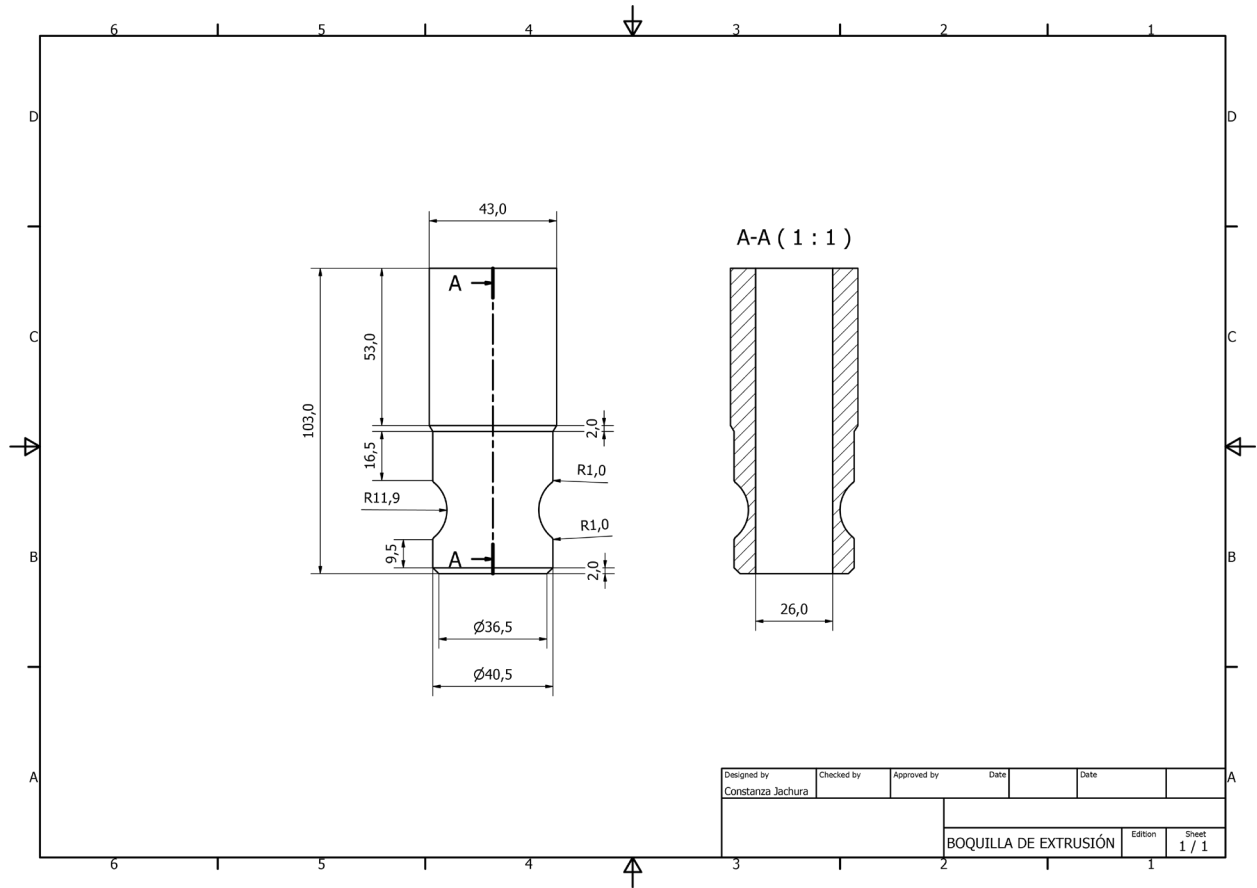
Propuesta “Viga circular dentada y carro de desplazamiento móvil con motor”



Propuesta “Viga circular con cremallera y carro de desplazamiento fijo”

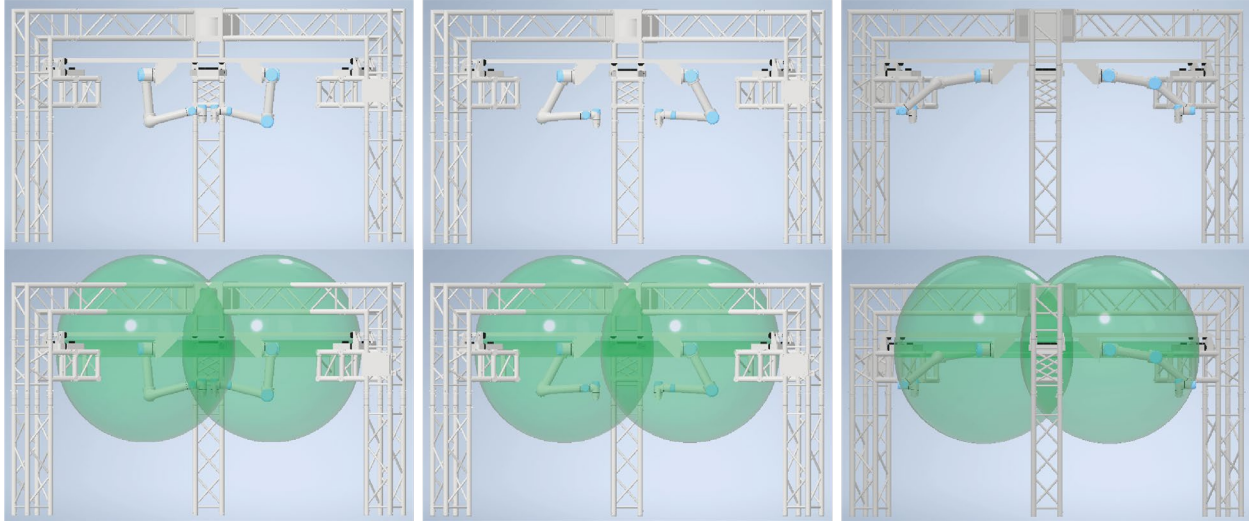


# ANEXO 12: PLANIMETRÍA DE LA BOQUILLA DE EXTRUSIÓN.

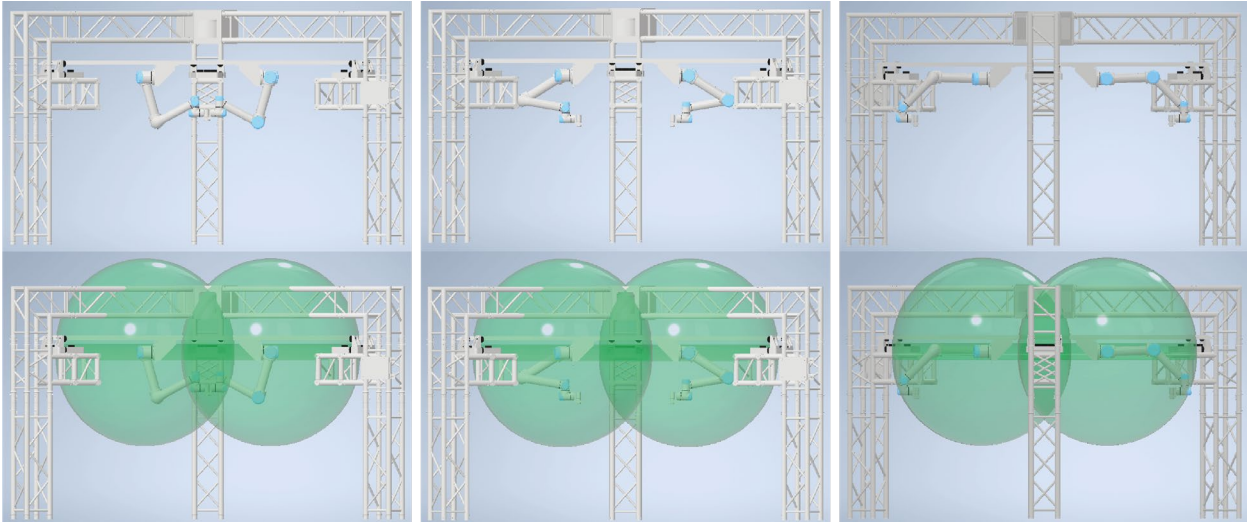


ANEXO 13: POSICIONAMIENTOS DE LOS ROBOTS Y LAS BOQUILLAS DE EXTRUSIÓN EN DIFERENTES PUNTOS DEL ESPACIO DE TRABAJO, ESTUDIO CASO A Y B.

Caso A

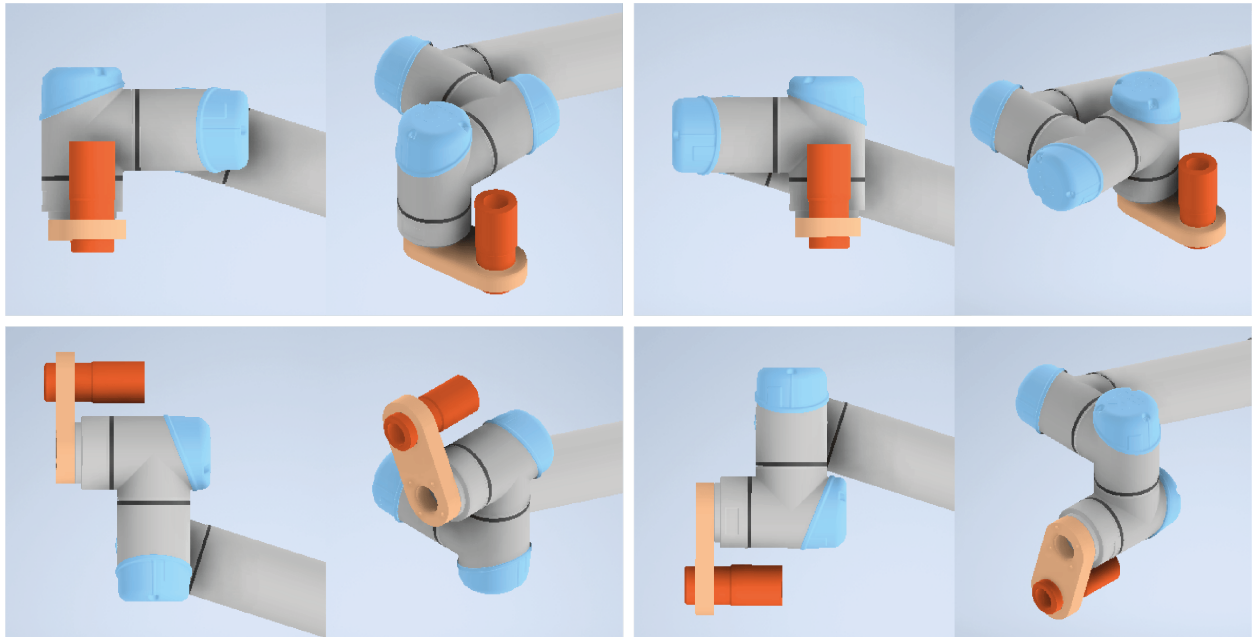


Caso B

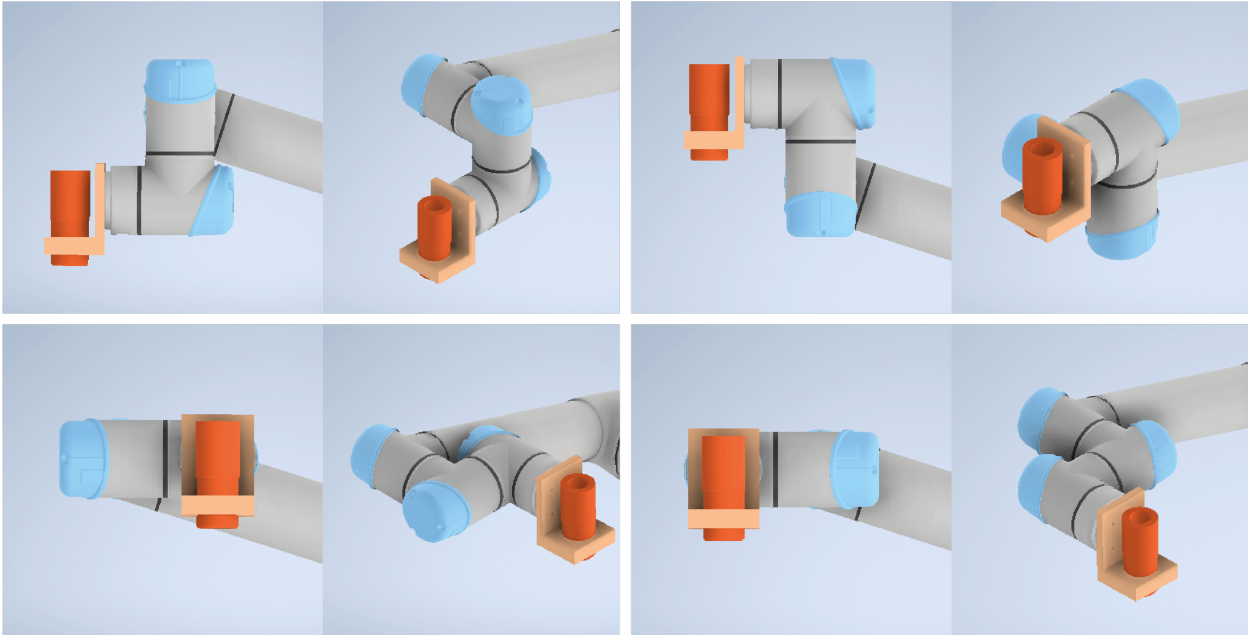


ANEXO 14: POSICIONAMIENTO DE LA BRIDA DE HERRAMIENTAS Y LAS DOS JUNTAS CONSECUTIVAS A ESTA ÚLTIMA EN DIFERENTES GRADOS DE ROTACIÓN, ESTUDIO CASO A Y B.

Caso A

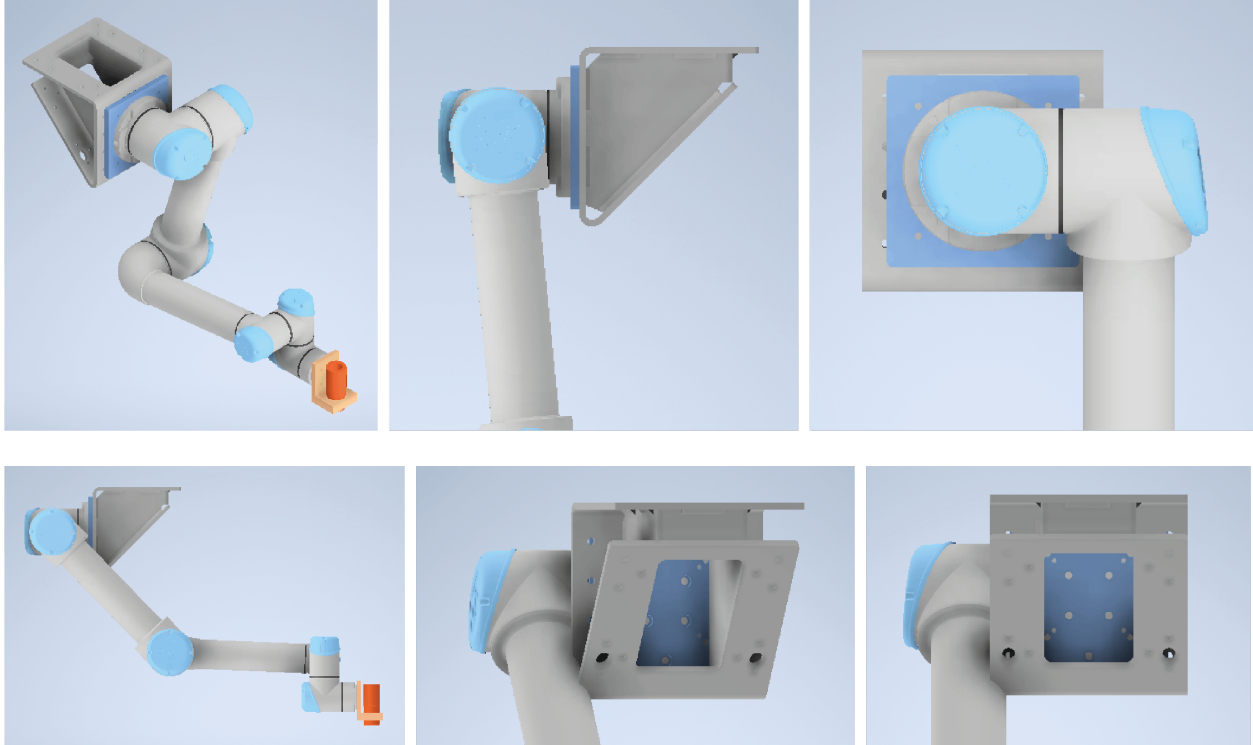


Caso B

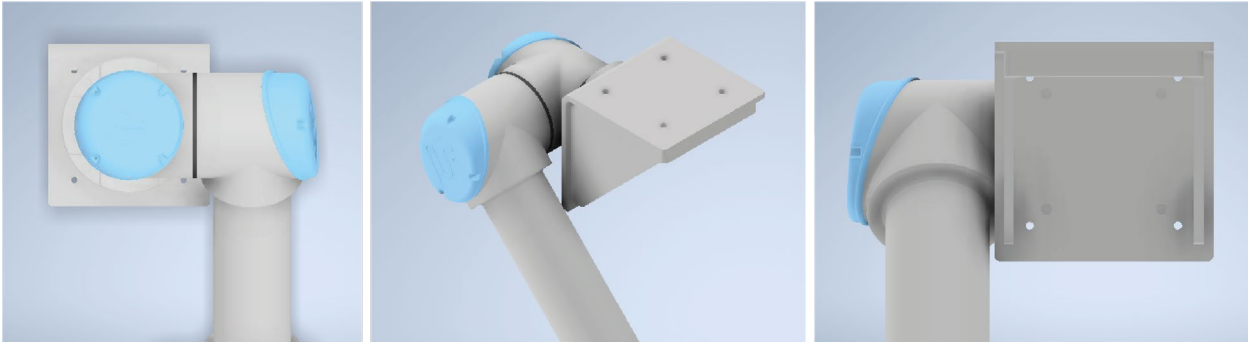


## ANEXO 15: ESAMBLE DE LOS COMPONENTES BASE DE SOPORTE Y ROBOT UR5/CB3.

Ensamble entre base de robot en ángulo de Vention y robot UR5/CB3:

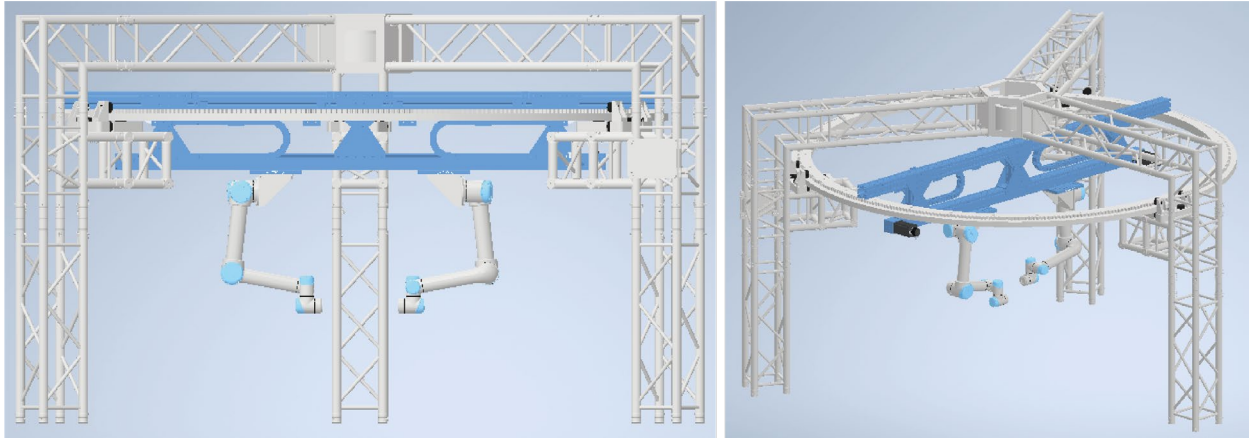


Ensamble entre propuesta de diseño del componente base de soporte y robot UR5/CB3:

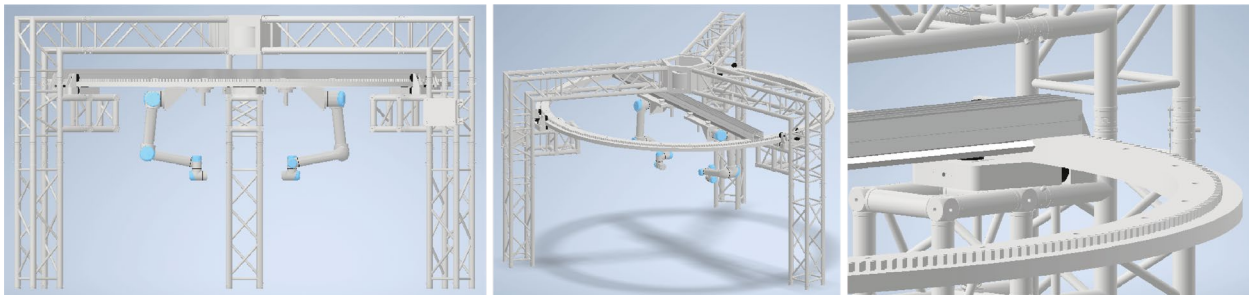


## ANEXO 16: PROPUESTAS DE DISEÑO PARA LA VIGA GIRATORIA, GUÍA LINEAL DE PRECISIÓN Y MECANISMO DE DESPLAZAMIENTO LINEAL.

### Propuesta “Mecanismo de desplazamiento lineal Vention”



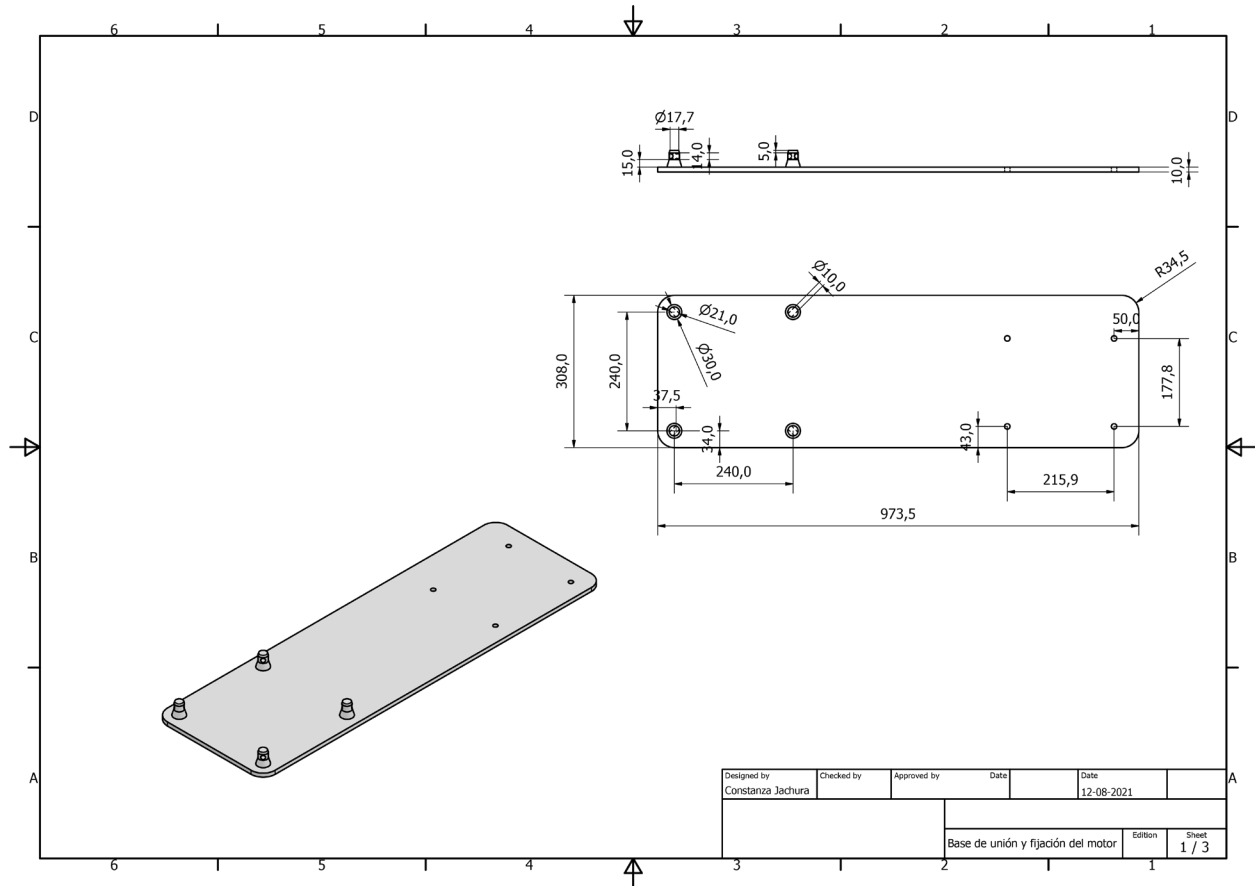
### Propuesta “Mecanismo de desplazamiento lineal HepcoMotion”

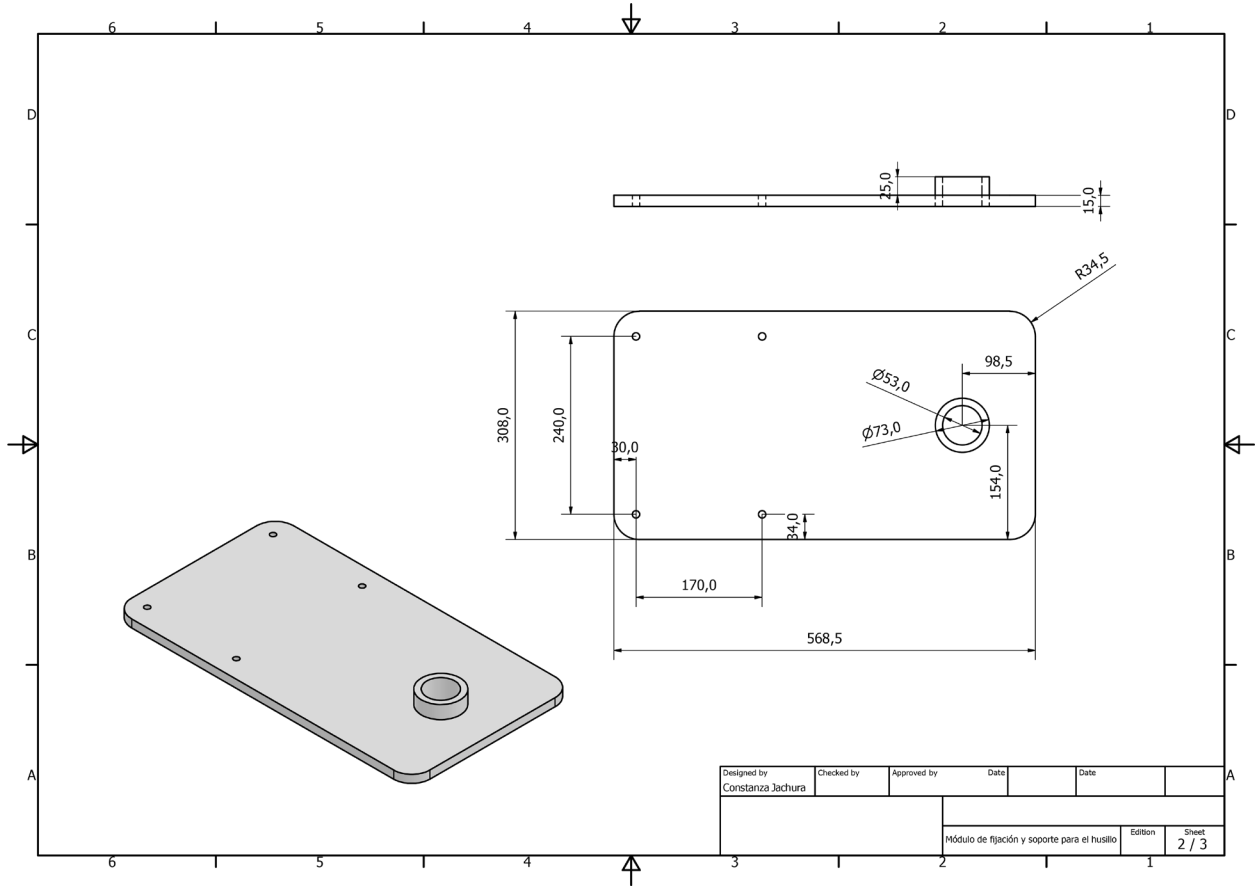


ANEXO 17: HOJA DE CALCULO CON DATOS PARA DETERMINAR LOS REQUERIMIENTOS DE LOS MOTORES.

Masa total de la estructura	619,96	[kg]		
Masa por soporte (3)	206,653333	[kg]		
Masa de sobrepeso	124,78	[kg]		
Factor de seguridad	1,5			
Fuerza soporte 1	3040,90	[N]		
Fuerza soporte 2	3040,90	[N]		
Fuerza soporte 3 + sobrepeso	4877,04	[N]		
Velocidad Nominal del motor	1750	[rpm]		
Velocidad tangencial de subida	1	[m/s]		
Diámetro del reductor	0,02	[m]		
Velocidad de giro esperada	50	[rpm]		límite para materiales pesados
Relación del reductor	35	35 a 1		
Altura de elevación	3	[m]		
Par torque requerido soporte 1	9122,7114	[Nm]		
Par torque requerido soporte 2	9122,7114	[Nm]		
Par torque requerido soporte 3	14631,1245	[Nm]		
Tiempo esperado de subida	3	[s]		
Potencia requerida motor soporte 1	3040,9038	[W]	2,2381052	[HP]
Potencia requerida motor soporte 2	3040,9038	[W]	2,2381052	[HP]
Potencia requerida motor soporte 3	4877,0415	[W]	3,58950254	[HP]
la potencia del motor va a depender del peso y el tiempo que dispone para subir la carga, entre más rápido sea más potencia necesita				

ANEXO 18: PLANIMETRÍA DE LAS DE LAS PIEZAS DISEÑADAS PARA EL COMPONENTE MECANISMO DE EXTENSIÓN DEL EJE VERTICAL.





Designed by Constanza Jachura	Checked by	Approved by	Date	Date	
			Módulo de fijación y soporte para el husillo		Edición
					Sheet 2 / 3



## ANEXO 19: FORMULAS PARA GENERAR UN ENGRANAJE CON AUTODESK INVENTOR

Formulas para generar un engranaje con



**INVENTOR**

Diámetro primitivo (DP)  
 Paso circular (PC)  
 Cabeza del diente (A)  
 Espesor del diente (S)  
 Pie del diente (PD)  
 Radio de entalle (R)  
 Ángulo del espesor (AS)

$$DP = ZM$$

$$PC = \pi M$$

$$A = M$$

$$S = PC (19/40)$$

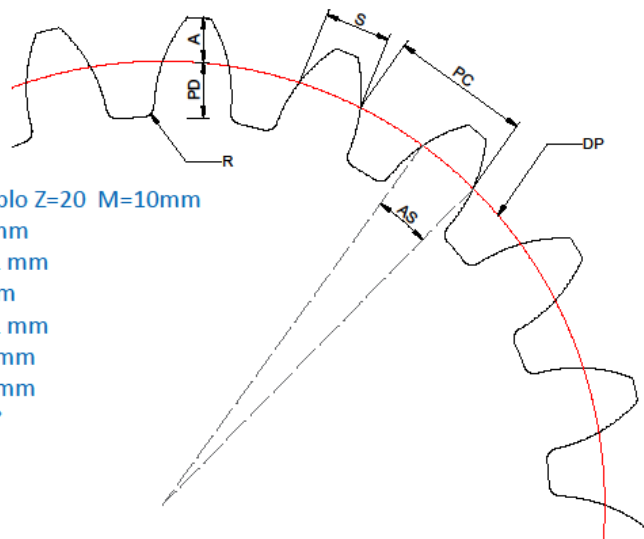
$$PD = 1.25 M$$

$$R = PC/12$$

$$AS = \frac{260 S}{2\pi (\frac{DP}{2})}$$

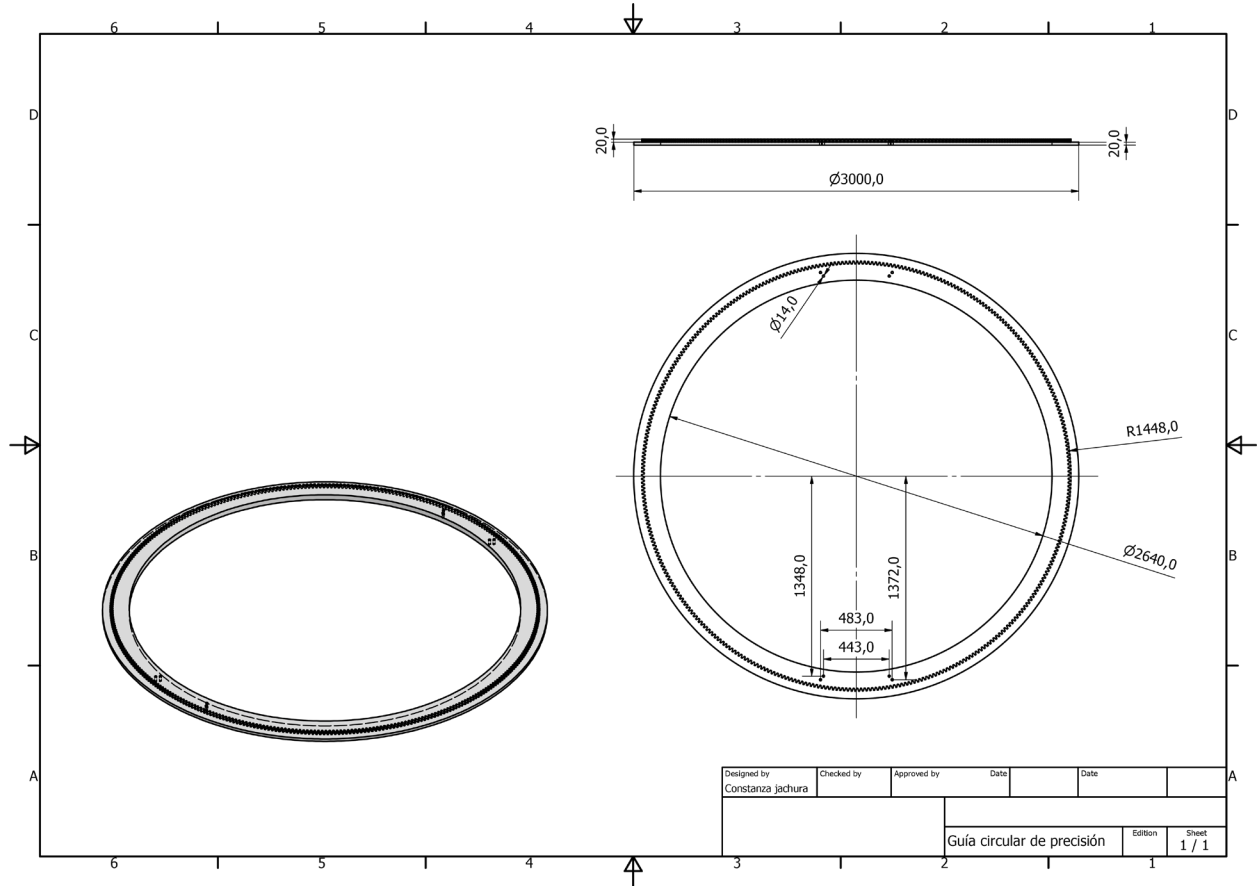
Ejemplo Z=20 M=10mm

200 mm  
 31.41 mm  
 10 mm  
 14.91 mm  
 12.5 mm  
 2.61 mm  
 8.54 °

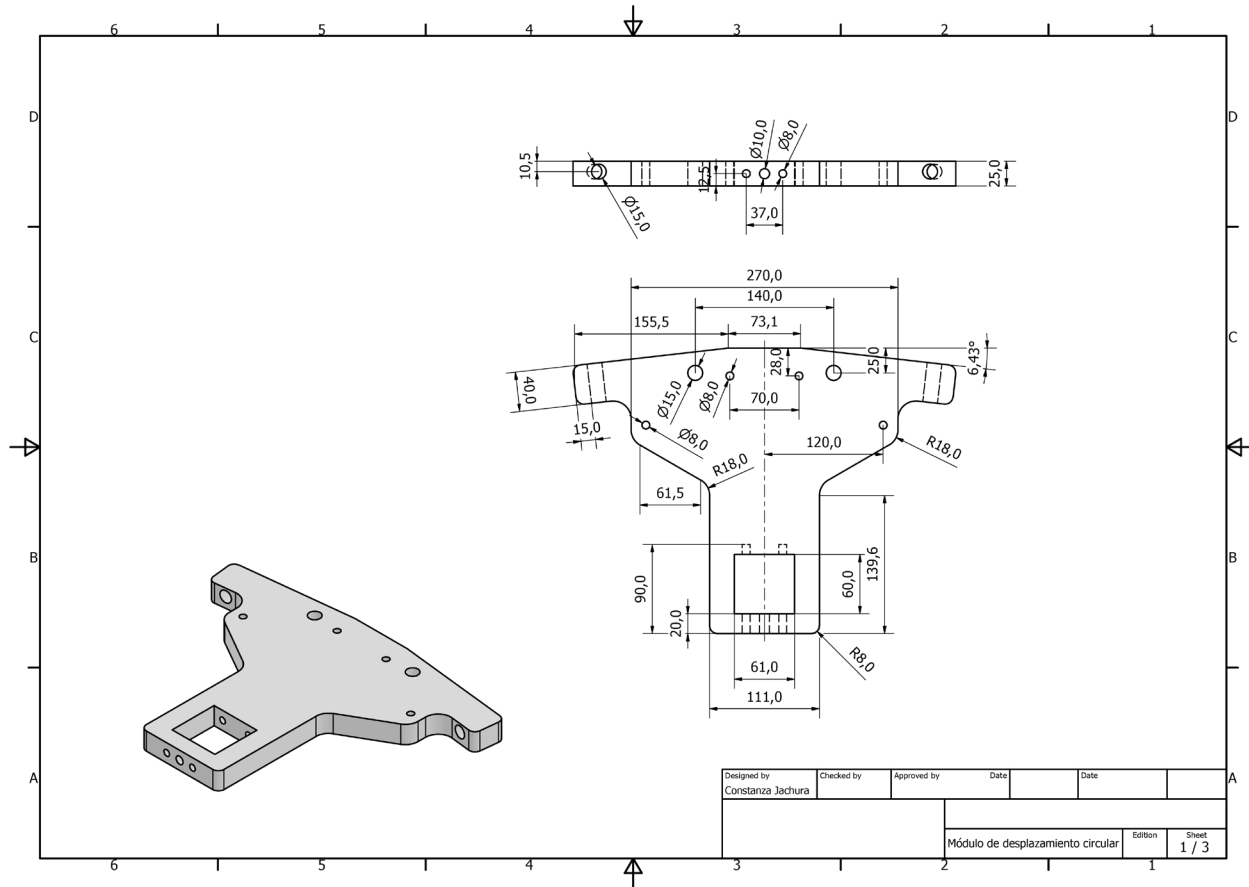


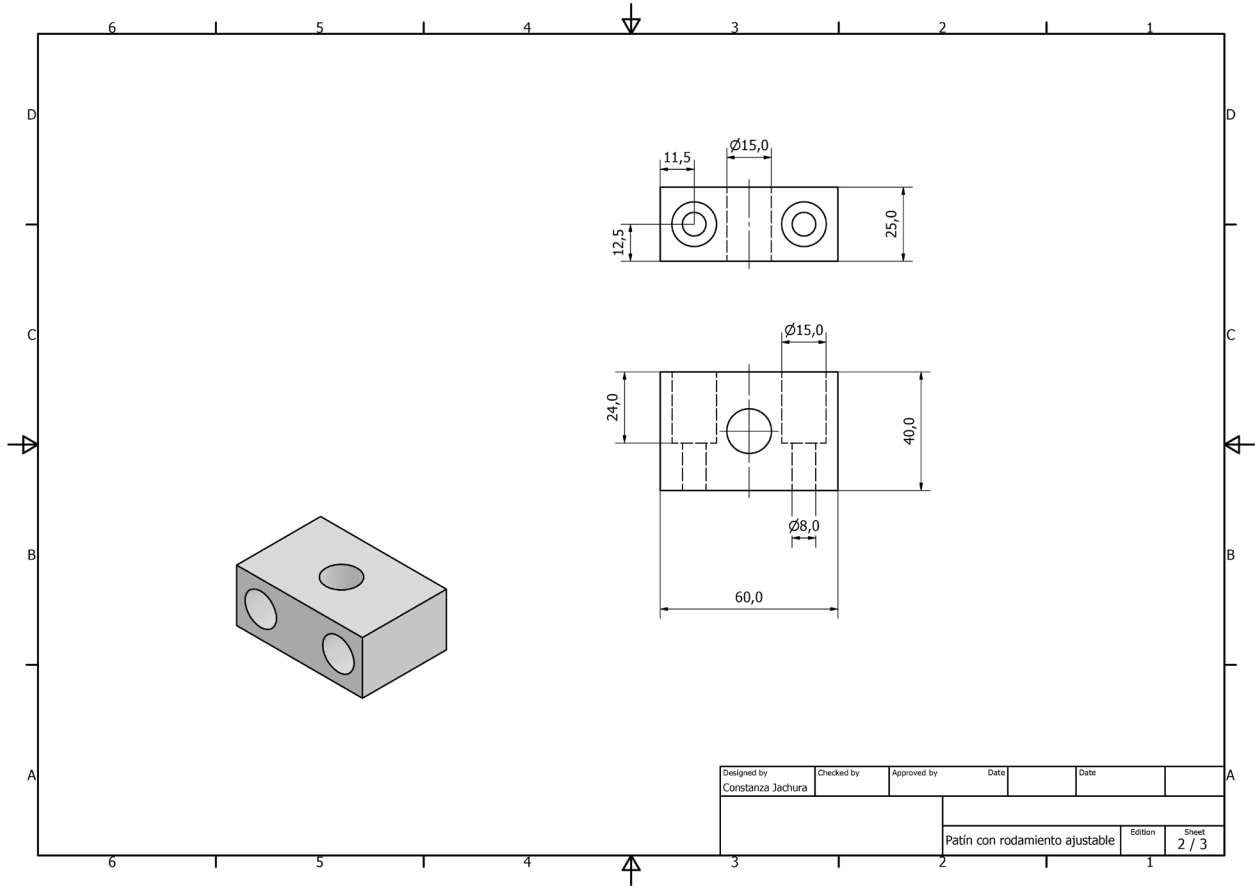
Z = Número de dientes  
 M = Módulo

# ANEXO 20: PLANIMETRÍA DEL COMPONENTE GUÍA CIRCULAR DE PRECISIÓN.

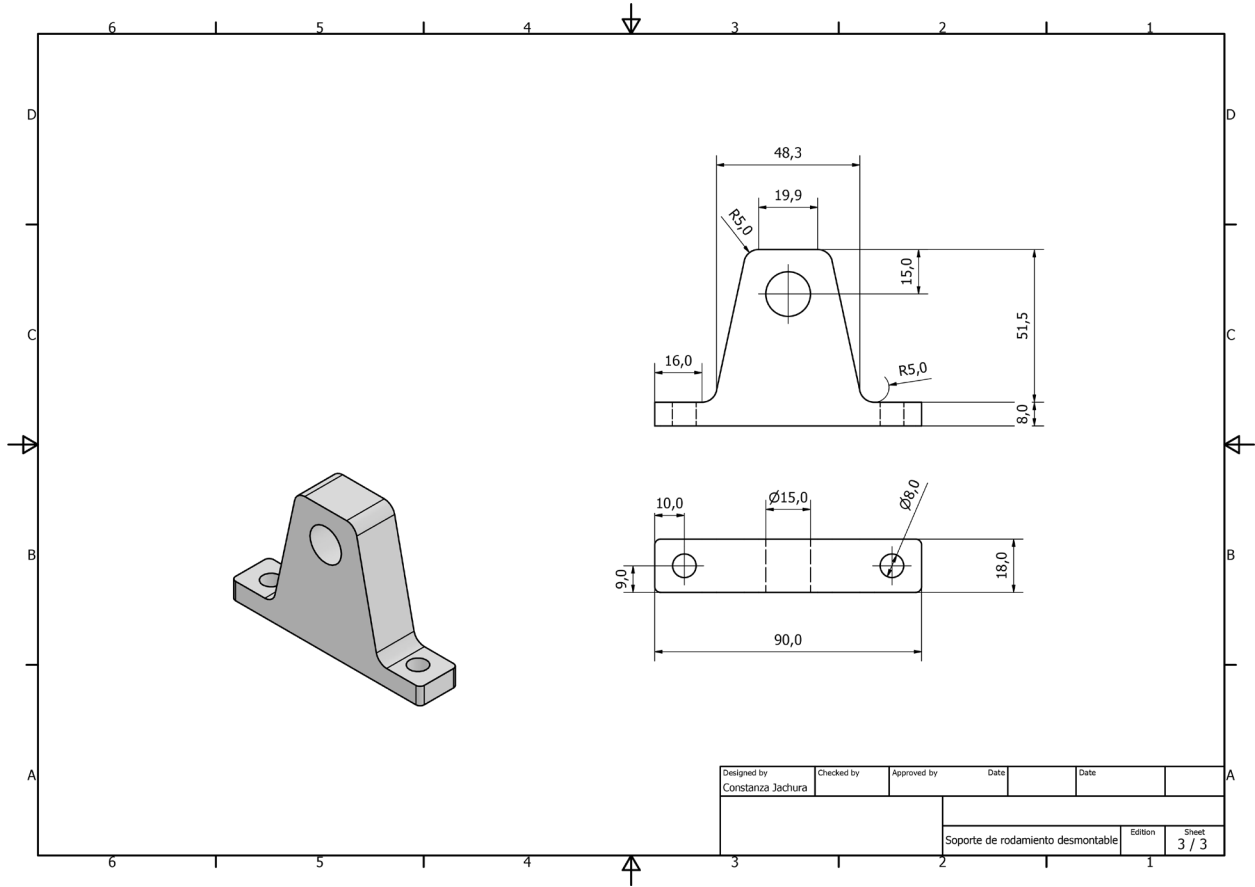


# ANEXO 21: PLANIMETRÍA DEL COMPONENTE MECANISMO DE DESPLAZAMIENTO CIRCULAR.

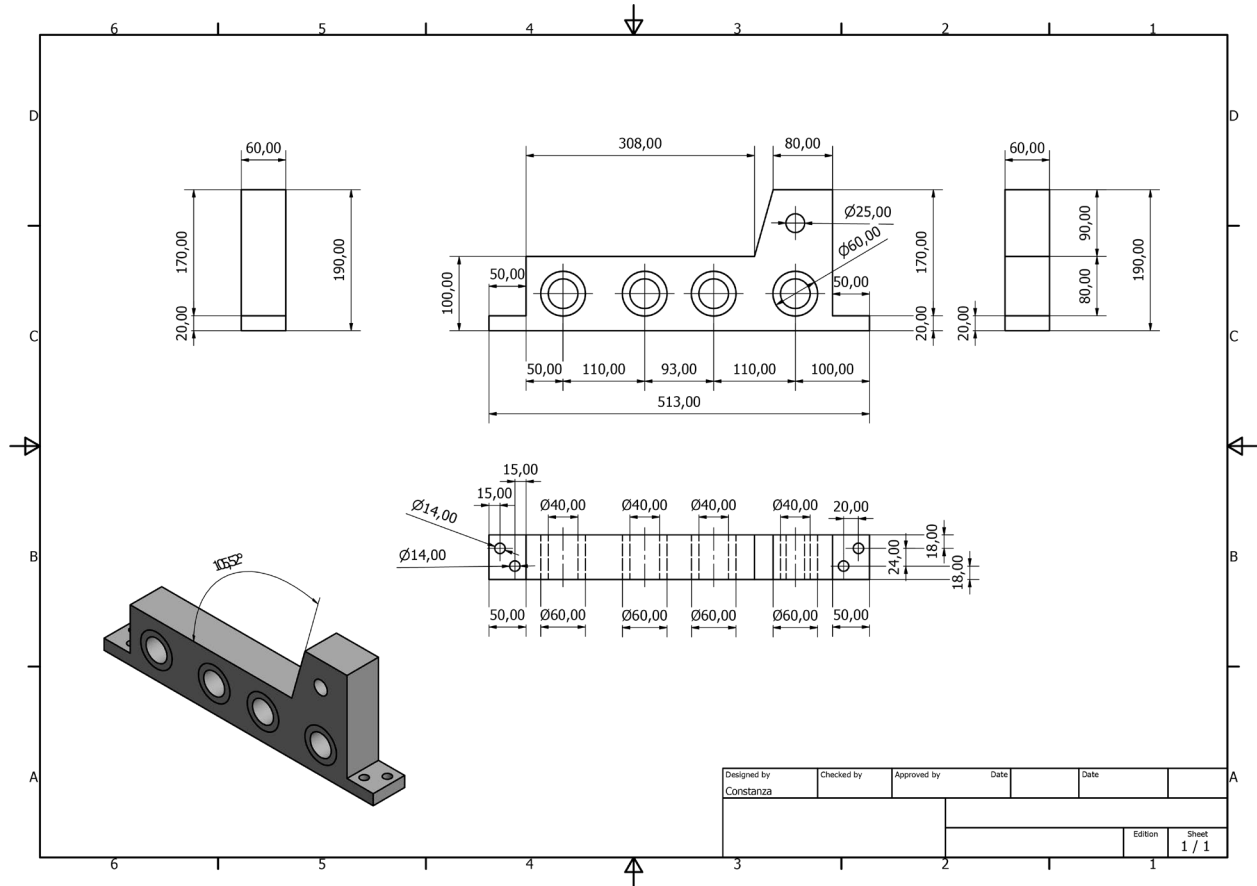


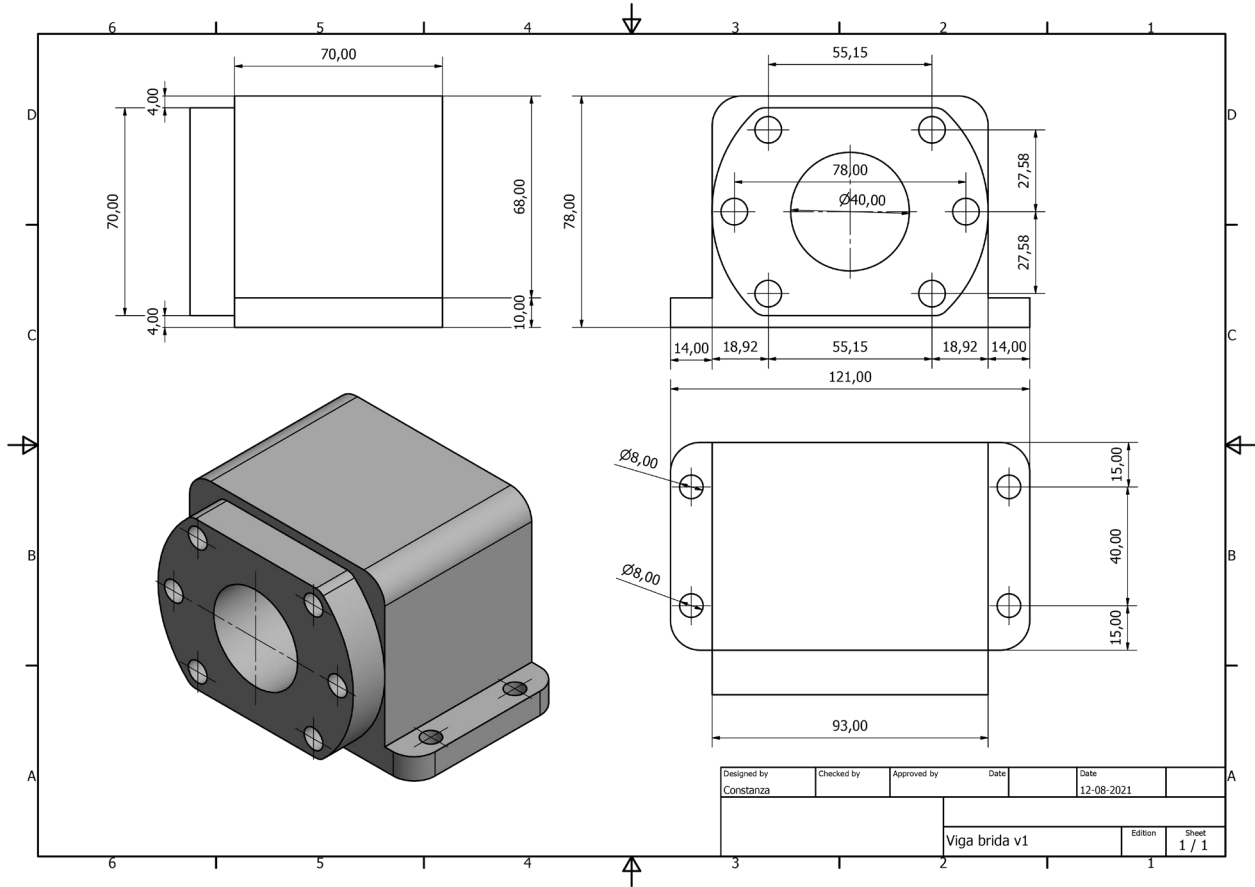


Designed by Constanza Jachura	Checked by	Approved by	Date	Date	
		Patin con rodamiento ajustable		Edition	Sheet 2 / 3

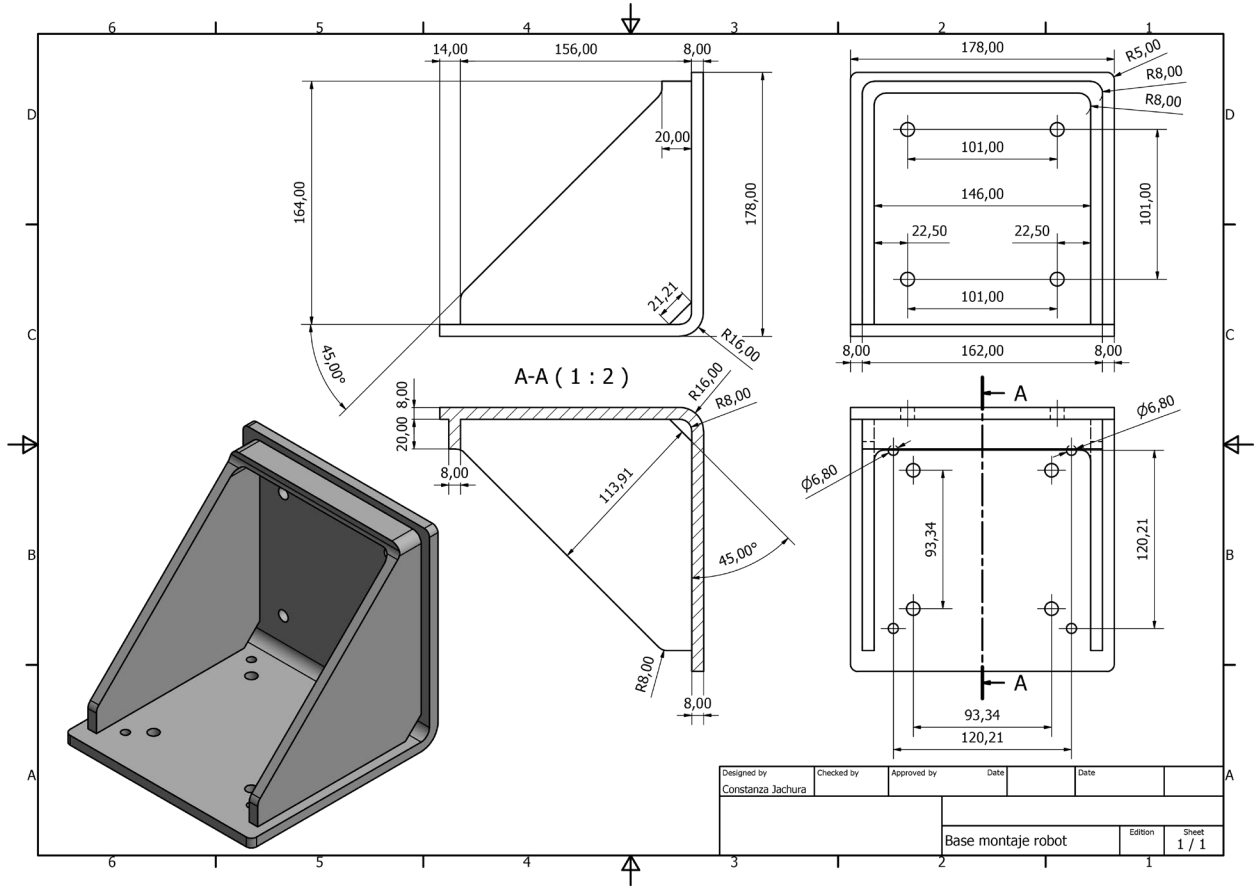


## ANEXO 22: PLANIMETRÍA DEL COMPONENTE VIGA GIRATORIA.

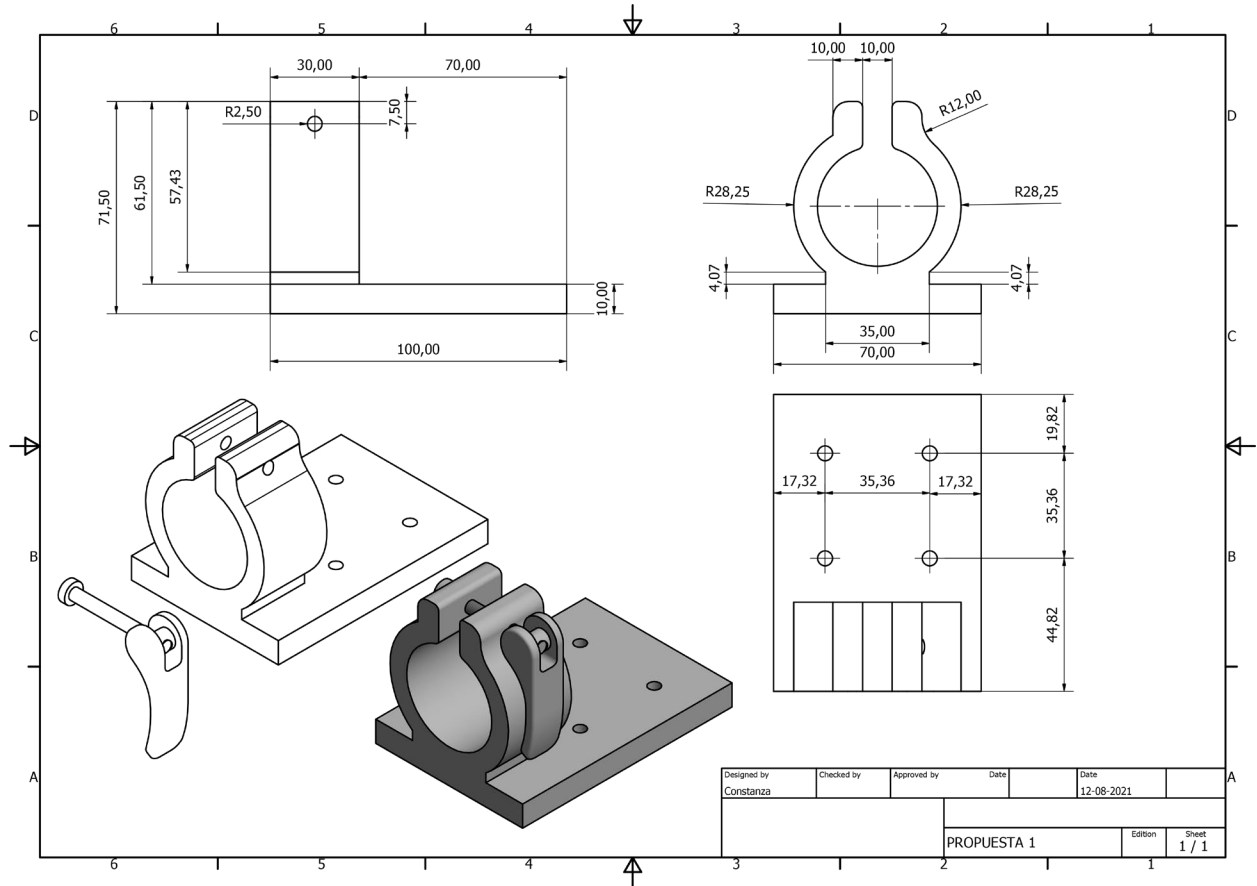


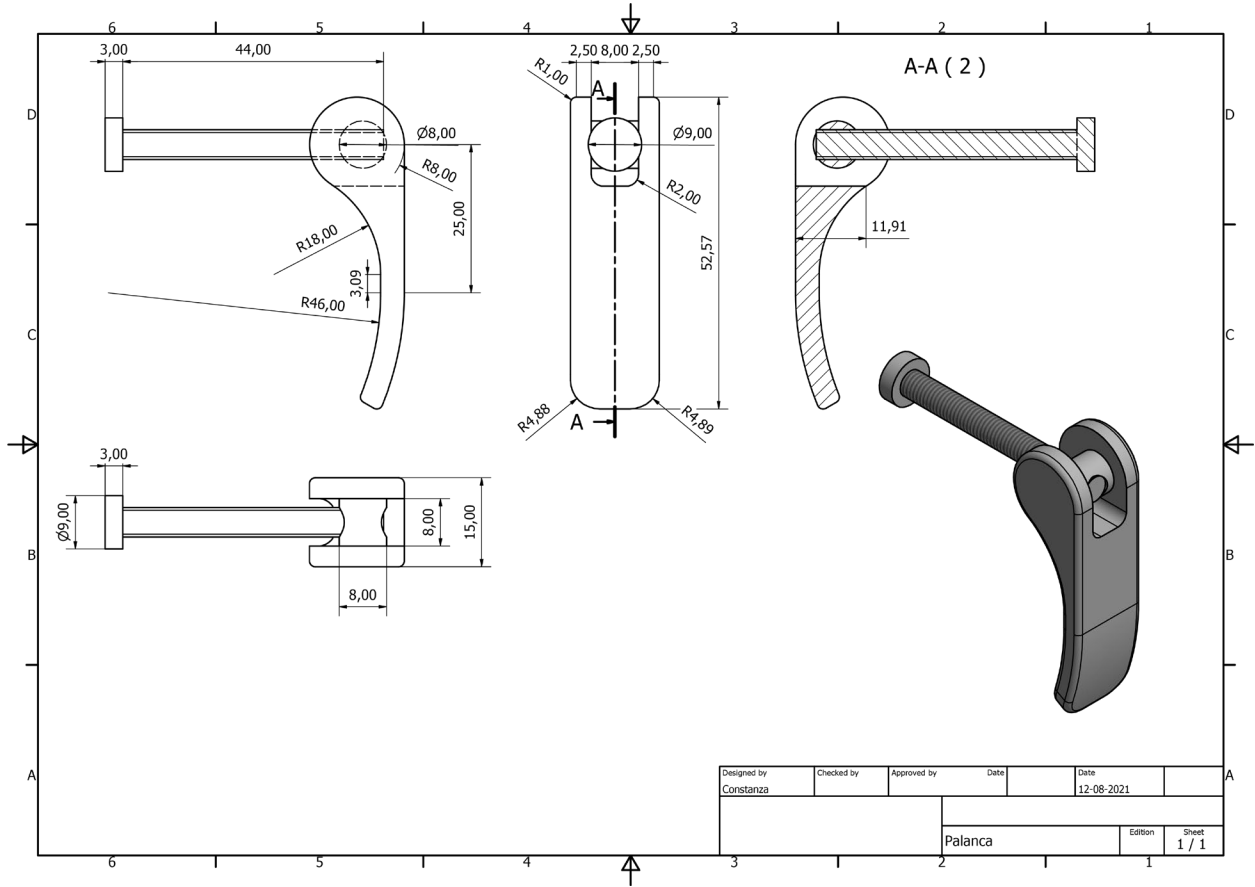






# ANEXO 23: PLANIMETRÍA DEL COMPONENTE ACOPLE PARA LA BOQUILLA DE EXTRUSIÓN.





Designed by Constanza	Checked by	Approved by	Date	Date	
				12-08-2021	
			Palanca		Edition
					Sheet 1 / 1