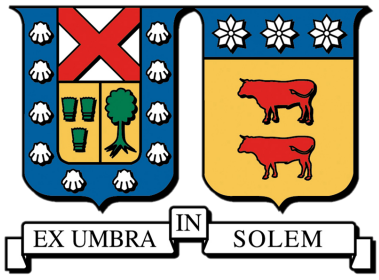
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO, CHILE



DESARROLLO DE UN SISTEMA COMPENSADO DE MANUFACTURA ADITIVA ROBOTIZADA USANDO UN CABEZAL EXTRUSOR DE ALTO VOLUMEN

ANDRÉS HERNÁN ALARCÓN VALENZUELA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: UDO RHEINSCHMIDT

PROFESOR CO-REFERENTE: LUIS PÉREZ POZO

JUNIO-2024

Resumen

El presente trabajo expone los resultados de la utilización de un brazo compensador para la manufactura aditiva, incorporando un cabezal extrusor de alto volumen y mediante el proceso de material fundido. Se establecen los fundamentos y los avances desarrollados en la manufactura aditiva robotizada para el desarrollo de esta investigación.

El procedimiento se efectúa mediante los materiales reciclados y se plantean diseños de uniones. Se incorpora una pletina y una bisagra para el acoplamiento de sistemas y una mejora en la transmisión cinemática, respectivamente. Se sugieren diseños de una unión de tipo pomel para mitigar los errores de precisión y sincronización entre las partes, y un trípode para poder aumentar el área de impresión general. Se obtienen resultados a través de pruebas de funcionamiento, sincronización y precisión de los sistemas mecánicos involucrados, en los cuales se comprueba la factibilidad de la utilización de un sistema compensado, al servir como apoyo al robot UR5 en la operación de un extrusor de alto volumen y economizando los costos al prescindir de máquinas más costosas.

A través de los ensayos de funcionamiento y precisión se demuestra que la interacción mecánica entre los sistemas, en los cuales involucran los grados de libertad y los movimientos permitidos por cada parte, generan imprecisiones en las terminaciones del producto final. Los ensayos de sincronización dan cuenta de la formación de protuberancias en las impresiones.

El desarrollo del brazo compensador permite la puesta en marcha de la fabricación digital de alto volumen, utilizando un robot UR5 y un funcionamiento adecuado para impresiones con dimensiones superiores a las de una impresora 3D comercial. Sin embargo, para un futuro desarrollo se deben efectuar diseños adicionales. Se recomienda la incorporación de una estructura tipo trípode para aprovechar una impresión 3D en 360 grados. En el caso de la unión entre brazos, se recomienda una unión mediante un cardan para una adecuada transmisión cinemática.

Abstract

The present work exposes the results of the use of a compensating arm for additive manufacturing, incorporating a high-volume extruder head and using the molten material process. The foundations and advances developed in robotic additive manufacturing for the development of this research are established.

The procedure is carried out using recycled materials and joint designs are proposed. A plate and a hinge are incorporated for the coupling of systems and an improvement in the kinematic transmission, respectively. Designs of a pommel-type joint are suggested to mitigate precision and synchronization errors between the parts, and a tripod to be able to increase the overall printing area. Results are obtained through performance, synchronization and precision tests of the mechanical systems involved, in which the feasibility of using a compensated system is verified, by serving as support to the UR5 robot in the operation of a high-volume extruder. and saving costs by eliminating more expensive machines.

Through performance and precision tests, it is demonstrated that the mechanical interaction between the systems, which involve the degrees of freedom and movements allowed by each part, generate inaccuracies in the finishes of the final product. Timing tests account for the formation of bumps on prints.

The development of the compensating arm allows the implementation of high-volume digital manufacturing, using a UR5 robot and operation suitable for prints with dimensions larger than those of a commercial 3D printer. However, for future development additional designs must be made. The incorporation of a tripod-type structure is recommended to take advantage of 360-degree 3D printing. In the case of the connection between arms, a connection using a cardan is recommended for adequate kinematic transmission.

Tabla de Contenidos

1 Introducción **1**

2 Objetivos **2**

3 Marco Teórico **3**

3.1 Manufactura aditiva robotizada 3

3.2 Sistemas auxiliares en manufactura aditiva 6

3.2.1 Orientación óptima 7

3.2.2 Utilización de material soluble o "de sacrificio" 7

3.2.3 Optimización de soportes 7

3.2.4 Piscinas de apoyo 8

3.2.5 Optimización de la topología 8

3.3 Antecedente: Manufactura aditiva 8

3.3.1 Sólido: 8

3.3.2 Líquido 9

3.3.3 Polvo 10

4 Metodología **12**

4.1 Materiales 12

4.1.1 Polipropileno 12

4.1.2 Polietileno 13

4.2 Instalación de Equipos 13

4.2.1 Extrusor 13

4.2.2 Brazo Compensador 15

4.2.3 Brazo robótico UR5 17

4.3 Diseño 19

4.3.1 Consideraciones 19

4.3.2 Etapa preliminar 20

4.3.3 Unión entre sistemas 22

4.4 Diseños Planteados 25

4.4.1 Unión tipo pomel 25

4.4.2 Tripode 28

4.5 Ensayos 29
4.5.1 Condiciones iniciales generales 29
4.5.2 Condiciones de extrusor y superficie 30
4.5.3 Tipos de ensayo 32

5 Resultados **33**
5.1 Ensayo de funcionamiento 33
5.2 Ensayos de precisión 36
5.2.1 Variables relevantes de precisión 36
5.2.2 Resultados de precisión 36
5.3 Ensayos de sincronización 38
5.3.1 Variables relevantes en sincronización 38
5.3.2 Resultados de ensayos de sincronización 38
5.4 Análisis de Resultados 44
5.4.1 Ensayos de Funcionamiento 44
5.4.2 Ensayos de Precisión 44
5.4.3 Ensayos de Sincronización 44

6 Conclusiones y Recomendaciones **46**

7 Anexos **48**
7.1 Guía de Uso Rápida 48
7.2 Plano de brazo compensador 51
7.3 Especificaciones Cobot UR5 52
7.4 Planos de uniones tipo pomel 53

Lista de Tablas

4.1 Variables y factores relevantes en los ensayos. 32

5.1 Ensayos a 20 [mm/s] 37
5.2 Dimensiones por velocidad de motor 37
5.3 Tabla de análisis de varianza 37

Lista de Figuras

3.1 Esquema de control incorporado a AM. 4
3.2 Equipo de robots en manufactura aditiva de acuerdo a la investigación de Alhijaily et al. [3] 5
3.3 Diagrama de método mixto. 6

4.1 Extrusor conectado al brazo robótico y compensador en (a) y (b). Parte superior de extrusor en (c). Extrusor desacoplado en (d). . 14
4.2 Boquillas para el extrusor. 15
4.3 Brazo compensador. 16
4.4 Partes principales del brazo compensador. 16
4.5 Especificaciones del brazo 3arm SERIES 3. 17
4.6 Especificaciones técnicas adicionales del brazo compensador. . . . 17
4.7 Robot UR5. 18
4.8 Soporte acoplado a columna y brazo compensador. 21
4.9 Cabezal Vertical Plano - B 22
4.10 Pletina en Autodesk Inventor. 23
4.11 Pletina de acero 23
4.12 Columna, brazo compensador y pletina. 24
4.13 Bisagra en configuración inicial. 24
4.14 Placa con buje. 26
4.15 Variante 1. 26
4.16 Placas con bujes. 27
4.17 Variante 2. 28
4.18 Estructura básica. 28
4.19 Sistema establecido para ensayo. 30
4.20 Consola de extrusor. 31
4.21 Consola de impresora 3D. 31

5.1 Ensayos iniciales con pellets de PET. 33
5.2 Material derretido. 34
5.3 Entrada expuesta con husillo contaminado. 35
5.4 Husillo extraido para limpieza. 35

5.5 Muestras de impresión tomadas para ensayo de precisión. 36
5.6 Ensayos generales de sincronización. 39
5.7 Ensayos de 1 a 3 capas. 40
5.8 Ensayos de 4 capas. 41
5.9 Ensayos de 4 capas a 200°C. 42
5.10 Ensayos de 4 a 5 capas. 43

7.1 Regulación vertical. 48
7.2 Tensión para brazo radial y basculante. 49
7.3 Regulación vertical. 49
7.4 Zona roja a evitar durante operación. 50
7.5 Plano de brazo compensador 3arm SERIES 3. 51
7.6 Especificaciones técnicas Cobot UR5 52
7.7 Unión variante 1 53
7.8 Unión variante 2 54

1. Introducción

La llegada de la industria 4.0 y los avances tecnológicos actuales han hecho posible la manufactura automatizada; mejorando no solo los aspectos productivos referentes a la calidad de aquello que se fabrica, sino que también la reducción de los tiempos de elaboración y los costos. Un sistema de fabricación digital, denominado FAB-LAB, es un reflejo de los tiempos actuales; permitiendo el uso de materia prima para la creación de objetos con geometrías complejas en tiempo reducidos, disminuyendo la cantidad de máquinas implementadas para cada tipo de mecanizado. Su aplicación depende de componentes automatizados y soportes que garanticen las operaciones. Este trabajo da cuenta del desarrollo de un sistema de apoyo que permite el trabajo en un FAB-LAB.

La automatización de procesos involucrados en la fabricación digital, supeditada a procesos de manufactura aditiva, origina una serie de desafíos en la elaboración del producto final. El comportamiento de materiales y la topología requerida deben ser considerados por cada procedimiento efectuado y la utilización de sistemas robóticos pueden conllevar imprecisiones debido a la falta de elementos que aseguren la precisión durante la operación y el post-procesado [1]. Este informe muestra cómo un sistema de apoyo en particular contribuye a las terminaciones de un objeto a fabricar.

El trabajo presente considera operaciones básicas de impresión y la experimentación de procedimientos acordes para su funcionamiento a corto y mediano plazo. Además, se consideran los beneficios y desafíos que involucran la ejecución de las operaciones, sugiriendo diseños y consideraciones prácticas para una posible optimización a largo plazo. Para ello, se han desarrollado ensayos que permitan comprobar el rendimiento del conjunto y establecer parámetros relevantes a la impresión.

El informe da a conocer el marco teórico de la manufactura aditiva robotizada y la implementación de sistemas de soporte. Posterior a ello, se muestra la metodología y los elementos utilizados en los ensayos. Se dan a conocer los ensayos de funcionamiento, precisión y sincronización y se analizan los resultados.

2. Objetivos

El presente trabajo de título tiene como objetivo general el desarrollo de un sistema de manufactura aditiva robotizada usando un brazo compensador lo que permitirá el uso de un cabezal extrusor de alto volumen que supera la capacidad de carga límite del Cobot.

Para realizar este trabajo de título se deben completar los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un estudio del estado del arte de la manufactura aditiva robotizada y los sistemas auxiliares asociados.
- Diseñar los elementos mecánicos y soporte para la compensación de peso del cabezal.
- Realizar pruebas de funcionamiento, sincronización y precisión del sistema desarrollado.
- Elaborar guías de uso y mantenimiento para asegurar el correcto funcionamiento del sistema.

3. Marco Teórico

3.1 Manufactura aditiva robotizada

La manufactura aditiva robotizada es la integración de dispositivos robóticos a los sistemas de fabricación de esta índole. Dentro de las ventajas que conllevan esta adición incluyen la posibilidad de aumentar el volumen de fabricación, mejorar la precisión de estructuras creadas mediante correcciones en tiempo real e incluso poder prescindir de elementos de soporte para la impresión. Mediante la implementación de CAD y software que traduzca el código de diseño a programación robótica, la AM robotizada es ampliamente utilizada en los métodos anteriormente mencionados.

De acuerdo a Safeaa et al. [2], un sistema que incorpora la integración de un control interconectado entre la programación y el hardware puede generar productos más precisos, impidiendo la formación de singularidades y mejorando las propiedades mecánicas a través de una correcta alimentación.

Un software de control para AM o Additive Manufacture Control Software (AMCS) comunica algoritmos mediante MATLAB, los cuales son traducidos a código G. Con la parametrización de las trayectorias lineales y curvas, es posible establecer la ubicación del efectuador final o el punto de extrusión, el cual se encuentra desplazado a la unión entre el robot y la operación establecida a través del mapa cartesiano. Adicionalmente, el control de la extrusión puede ser definida con el software, permitiendo la sincronización del control de movimiento y la alimentación simultáneamente.

Las pruebas realizadas por Safeaa et al. dan cuenta de las limitaciones de impresión dado el volumen del robot y su alcance y los errores que pueden generarse debido a calibraciones; pero también mejorar la precisión, eliminando la formación de capas tipo escaleras en un 25%.

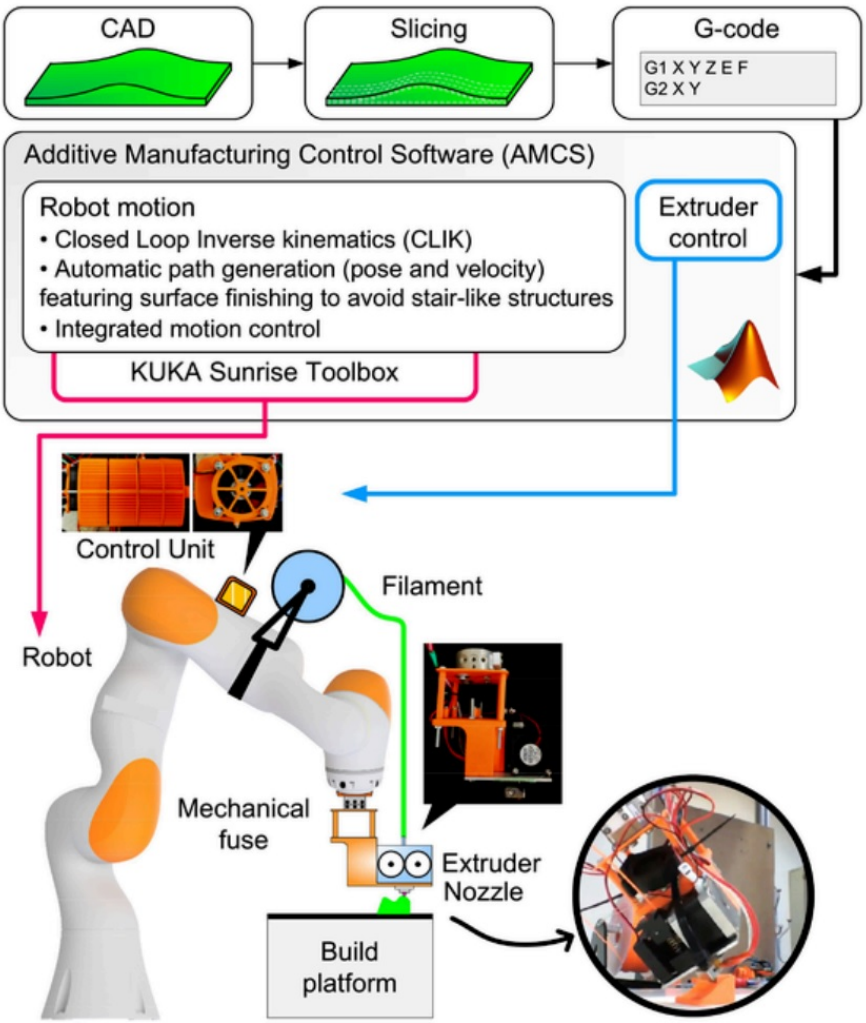


Figura 3.1: Esquema de control incorporado a AM.

Los trabajos realizados por Alhijaily et al. [3] dan cuenta de los desafíos actuales en la incorporación de robots en la manufactura aditiva. La cooperación de múltiples sistemas robóticos involucra un trabajo adicional, en términos de programación y control de la eficiencia, que puede no ser ideal en la ejecución de un sistema único. Además, la incorporación de sistemas móviles para la impresión supone una serie de restricciones mecánicas que pueden conllevar a imprecisiones producto del trabajo continuo requerido. Bajo estas consideraciones, se propone la organización de los equipos de robots a través de 3 ámbitos: La cooperación entre impresoras, la asistencia robótica y el flujo de información.

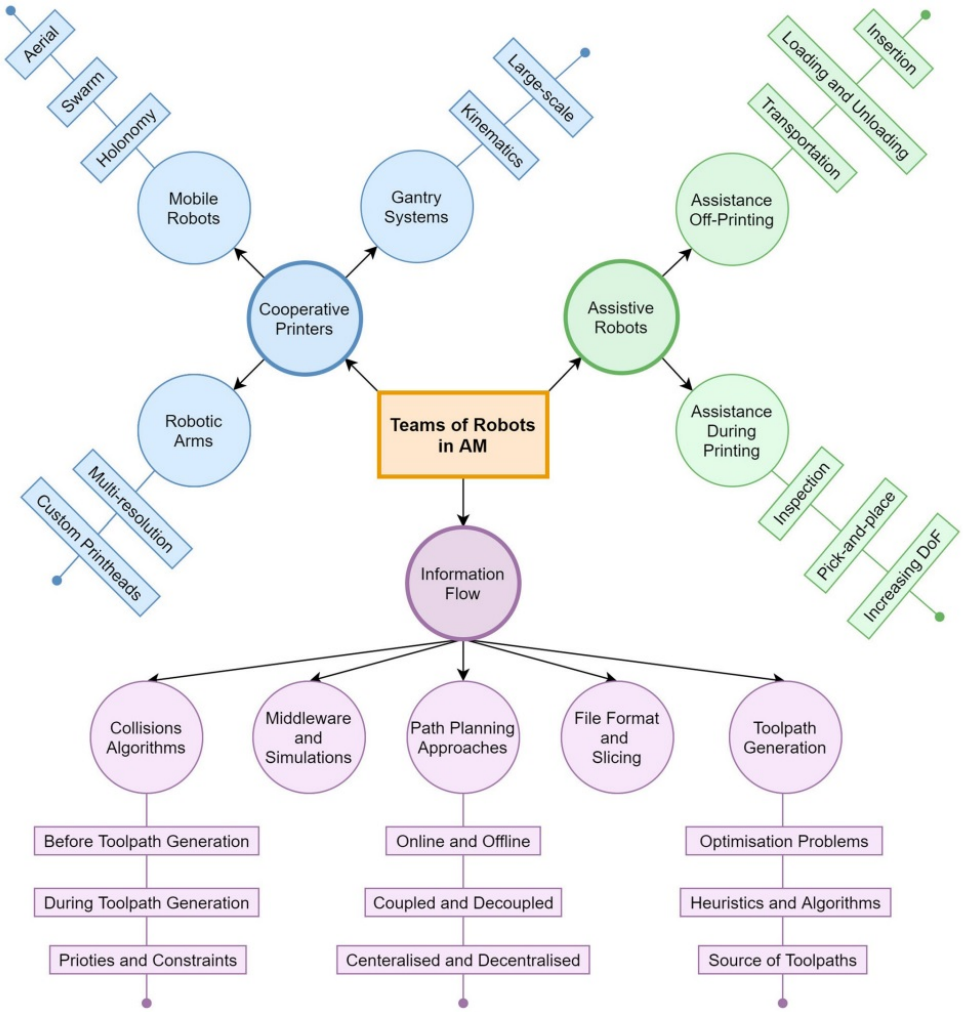


Figura 3.2: Equipo de robots en manufactura aditiva de acuerdo a la investigación de Alhijaily et al. [3]

La manufactura aditiva robótica propone nuevas oportunidades de producción, los cuales son aprovechadas en los laboratorios de fabricación digital (FABLAB). Sin embargo, cabe destacar la necesidad de establecer métodos para poder validar su sustentación. Los estudios realizados por Garcia-Ruiz et al.[4] proponen un enfoque de metodología mixta en el cual las investigaciones del FABLAB son estipuladas bajo parámetros cualitativos y cuantitativos.

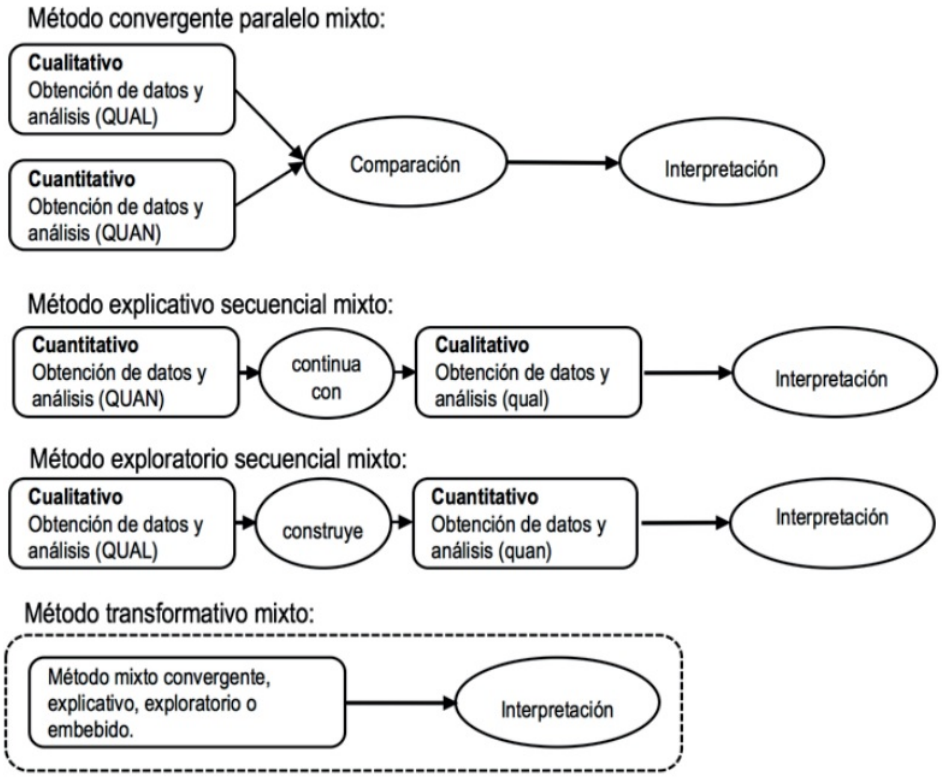


Figura 3.3: Diagrama de método mixto.

En la figura 3.3 se muestran distintos métodos para abarcar el análisis e investigación para la construcción de FABLAB.

3.2 Sistemas auxiliares en manufactura aditiva

Cada método de fabricación por manufactura aditiva extruye material con diferentes geometrías en distintos puntos de referencia y apoyo, lo cual genera una diferencia en la efectividad, y finalmente calidad, de construcción. Estructuras complejas, especialmente aquellas con secciones voladizas, requieren pasar por un determinado tiempo para que las condiciones térmicas y de esfuerzos se adecuen a la rigidez del sistema completo. La utilización de sistemas auxiliares y soportes pueden facilitar los procesos de fabricación, adecuándolos al producto deseado.

Los sistemas auxiliares pueden conllevar un post-procesado, el cual puede significar un costo adicional en tiempo y recursos.

Es posible reducir los sistemas de soporte [5] bajo 2 focos:

- Manteniendo el diseño original: Orientación óptima de las partes, utilización de material soluble o "de sacrificio" como apoyo, optimización de soportes y piscinas de apoyo.
- Rediseño: Optimización de la topología.

3.2.1 Orientación óptima

La manufactura aditiva se caracteriza por la depositación de material capa por capa. En los variados procesos en los que se efectúan, el material depositado se convierte en el apoyo para la capa siguiente y, dependiendo de la estructura, puede no ser suficiente para que el aglutinamiento de material se sostenga adecuadamente al conjunto. Por ello, la orientación de las partes generadas influye en la construcción del sistema completo.

3.2.2 Utilización de material soluble o "de sacrificio"

En algunos casos, el diseño involucra complejas morfologías que no pueden ser sostenidas en su fabricación. Durante el post-procesado, la remoción de material de apoyo puede debilitar el diseño esperado. Por ello, uno de los métodos implementados para evitar estos inconvenientes es la utilización de un compuesto distinto al ocupado en el objeto impreso, con propiedades mecánicas inferiores y/o que puede ser tratado bajo distintas condiciones de temperatura y presión, sin afectar la estructura diseñada; de tal manera su remoción posterior no afecte la elaboración.

3.2.3 Optimización de soportes

Así como es posible colocar distintos apoyos debajo de las superficies de las capas, la composición de éstas y de acuerdo al diseño generado, pueden también ser elaboradas con distintas formas y orientaciones; de tal manera que sostengan a la estructura general sin perder la precisión y la formación de las capas.

3.2.4 Piscinas de apoyo

Así como es posible esperar que las solicitaciones generadas por las capas sean resistidas por elementos sólidos, también es posible la utilización de aglutinantes y líquidos que permitan mantener la consistencia y la propiedades mecánicas del sistema requerido.

3.2.5 Optimización de la topología

Dependiendo de los requerimientos de diseño, el objeto puede ser modificado para poder llevar una fabricación más eficiente.

3.3 Antecedente: Manufactura aditiva

La manufactura aditiva o *additive manufacturing* (AM) es un proceso de fabricación digital que consiste en la depositación de material a través de una serie de capas, asegurando la morfología requerida para el elemento tridimensional deseado. A diferencia de otros tipos de elaboración, éste economiza la materia prima usada en las operaciones, evitando la remoción de material desechado. Adicionalmente, se caracteriza por el nivel de precisión que se puede adquirir para la realización de estructuras complejas. La manufactura aditiva es aplicada en los sectores automotrices, electrónica, aeroespacial, medicina, arquitectura y deporte, entre otros.[6] [7]

Abdulhameed et al. [1] clasifica y da cuenta de los distintos métodos de manufactura aditiva, dependiendo del estado de la materia prima a utilizar:

- Sólido: A través de laminado de material.
- Líquido: Mediante fusión o polimerización.
- Polvo: Mediante fusión o unión.

3.3.1 Sólido:

- Modelado por filamento fundido o fused deposition modeling (FDM): Es un proceso de impresión en el cual el material es derretido y depositado, en

forma de filamentos, mediante un extrusor con boquilla. El material termoplástico es utilizado en este tipo de fabricación, incluyendo la poliamida (nylon), ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), PLA (Ácido poliláctico), PETG (Glicol modificado con Polietileno Tereftalato), TPU (Poliuretano Termoplástico) y PEEK (Cetona de poliéter), entre otros.

- Fabricación de extrusión congelada (FEF): Extrusión realizada con una pasta cerámica acuosa. El material es depositado en una cámara de construcción, en la que se conserva una temperatura menor a la ambiental, de tal manera que la pasta tome rigidez a través de la congelación.

- Fabricación por objetos laminados (LQM): En este proceso el material es incorporado y unido en forma de laminas u hojas, mediante un revestimiento termoadhesivo que permite el aumento de presión y temperatura adecuados. A diferencia de otras fabricaciones, posee un componente sustractivo; ésto debido a que un haz debe cortar las secciones no requeridas para la estructura.

- Deposición asistida por robot o "Robocasting" (DIW): Técnica de extrusión aplicada con pasta pseudoplástica y mezcla cerámica. Similar a la fabricación por filamento fundido, los movimientos de la boquilla y la extrusión dependen de la programación y el CAD aplicado; pero el acabado de la impresión depende de la pseudo-plasticidad del material y no de la solidificación de ésta.

3.3.2 Líquido

- Estereolitografía (SLA): Es un tipo de fabricación con resina, el cual es curado y solidificado utilizando luz ultravioleta, a través de sucesivas capas. Las resinas más utilizadas en esta fabricación son las acrílicas, epoxi y de cera.

- Prototipado por congelación rápida (RFP): Técnica de extrusión capa por capa con agua o salmuera. El agua es colocada de manera tal que su punto de congelación sea alcanzado en el instante que es colocado, creando capas de hielo superpuestas.

- Procesado de luz digital (DLP): Tipo de fabricación por fotopolimerización, similar a la estereolitografía, en el cual una fuente de luz es utilizada junto a un lente; reflejando la luz a una sección acotada, lo cual permite economizar la resina al ser depositado localmente.

- Modelado por inyección múltiple (MJM): Impresión de fotopolímeros, los cuales pasan a través de una luz ultravioleta para su curado y son desplazados a través de plataformas móviles para la realización capa por capa.

3.3.3 Polvo

- Inyección 3D (3DP): Técnica de fabricación con polvo y aglutinante, en el que un pistón eleva una cama de polvo mientras que un aglutinante es depositado a través de boquillas, adhiriendo el polvo durante en el proceso.

- Fusión por haz de electrones (EBM): Un proceso similar al SLS, difiriendo en 2 aspectos: El haz de electrones disparado es de alto voltaje, entre 30 a 60 [KV]; y las condiciones ambientales están dadas en una cámara de vacio, evitando problemas generados por oxidación de material durante las operaciones. Este tipo de fabricación es particularmente estudiado para la elaboración de estructuras en el espacio exterior.

- Sinterizado selectivo por láser (SLS): Usando un haz de dióxido de carbono, el material es calentado sin llegar al punto de fusión y es colocado en una cama controlada por un pistón, el cual baja dependiendo del grosor de la capa de material. El SLS es admisible para materiales plásticos, vidrios y cerámicas, permitiendo una versatilidad que otros sistemas de manufactura aditiva no poseen.

- Derretimiento por láser selectivo (SLM): Proceso de fabricación mediante derretimiento con láser. A diferencia del SLS, el material es calentado hasta el punto de fusión. Se suele utilizar para materiales metálicos y aleaciones para manufactura.

- Formación de polvo por láser (LENS): La fabricación de objetos se genera en una cámara cerrada con argón en su interior, derritiendo el material con un haz de alta potencia. Este proceso es principalmente utilizado en metales:

Acero inoxidable, aleaciones de niquel y cobre, titanio-6 aluminio-4 vanadio, acero para herramientas; entre otros. También es utilizado para la alúmina.

- Prometal: Proceso basado en la utilización de acero inoxidable, mediante la inyección de un líquido aglutinante que permite la cohesión de material durante la extrusión. Al igual que otros procesos, la cama es regulada por un pistón que baja verticalmente, dependiendo de las capas a generar y sus alturas.

- Depositación de material con láser (LMD): Generalmente utilizado con un brazo robótico, el polvo es depositado desde una boquilla en movimiento, la que simultáneamente direcciona un rayo láser que derrite el material.

4. Metodología

En este capítulo se exponen los procedimientos llevados a cabo para el desarrollo del sistema compensado. En la sección de Materiales se establecen qué materiales fueron ocupados y en la sección Instalación de Equipos se establecen los dispositivos ocupados y cómo fueron colocados para la puesta en marcha. En la sección Diseño se indican las consideraciones y uniones efectuadas para el funcionamiento sincronizado entre cada aparato, y adicionalmente se han planteado alternativas del método ocupado en Diseños Planteados. En la sección Ensayos se mencionan y especifican los experimentos llevados a cabo para comprobar el comportamiento del sistema ante distintas operaciones.

4.1 Materiales

La fabricación digital depende de materia prima que es insertada de forma continua, de manera que la impresión se lleve a cabo de forma efectiva. Se han utilizado tapas de botellas plásticas, las cuales fueron recolectadas, almacenadas y periódicamente suministradas al sistema FAB-LAB, dadas las condiciones del extrusor y evitando el colapso en la inserción. Para procurar los procedimientos requeridos, se implementó una trituradora, capaz de cortar y tamizar el material con un ancho no mayor 10 [mm]. A continuación se presentan los tipos de materiales involucrados:

4.1.1 Polipropileno

El polipropileno es un material termoplástico utilizado en distintos productos de uso cotidiano, como las tapas de las botellas, juguetes, materiales de construcción, vasos, ropa, electrodomésticos, entre otros. En la manufactura aditiva, sus propiedades permiten una aplicación eficiente en distintos tipos de fabricación. Con un punto de fusión de alrededor de 160 °C, el polipropileno es un material, proveniente de las tapas trituradas, que cumple con los requisitos para ser fundido a través del proceso.

4.1.2 Polietileno

Es un polímero termoplástico de fabricación económica, en comparación a otros tipos de plástico. Al no ser un buen conductor de calor ni de electricidad, es útil para cables y aislantes. Además, el polietileno posee una densidad variable, el cual se clasifica a través de 2 tipos: Polietileno de Baja Densidad (PEBD) o de Alta Densidad (PEAD). Generalmente es usado para envasado y ocupa una porción de las tapas de botellas utilizadas. Con un punto de fusión entre 105 a 115 °C para la baja densidad y hasta 140 °C para la alta densidad, se considera aceptable para los ensayos.

4.2 Instalación de Equipos

El sistema FAB-LAB implementado se compone de 3 partes principales: El extrusor, el brazo compensador y el brazo robótico UR5. La disposición de dichos sistemas esta sujeta a los requerimientos de diseño e impresión de los objetos a producir. Para los ensayos preliminares y la comprobación del desarrollo general del sistema, se ha ocupado un área de trabajo de 40 [cm] de largo por 20 [cm] de ancho. Para ello se han establecido uniones que permitan la interacción cooperativa entre las partes, y se ha asegurado una posición de trabajo que cumpla con los requerimientos de ensayo. En las siguientes subsecciones se detallan los dispositivos ocupados y se establecen los parámetros para los ensayos preliminares:

4.2.1 Extrusor

El alimentador, diseñado y fabricado por el ingeniero Ascan Aldag [8], permite la extrusión de material termoplástico a temperaturas superiores a los 200 °C, correspondiente al proceso de fabricación por filamento fundido. El sistema completo se compone de un extrusor conectado a una placa de hardware Arduino, que permite el encendido, apagado, regulación de motor y temperatura interior del alimentador; y un control con interfaz que permite configurar los parámetros anteriormente mencionados. El extrusor se compone de un revestimiento de poliuretano que permite contener el motor para la fusión del material a imprimir.

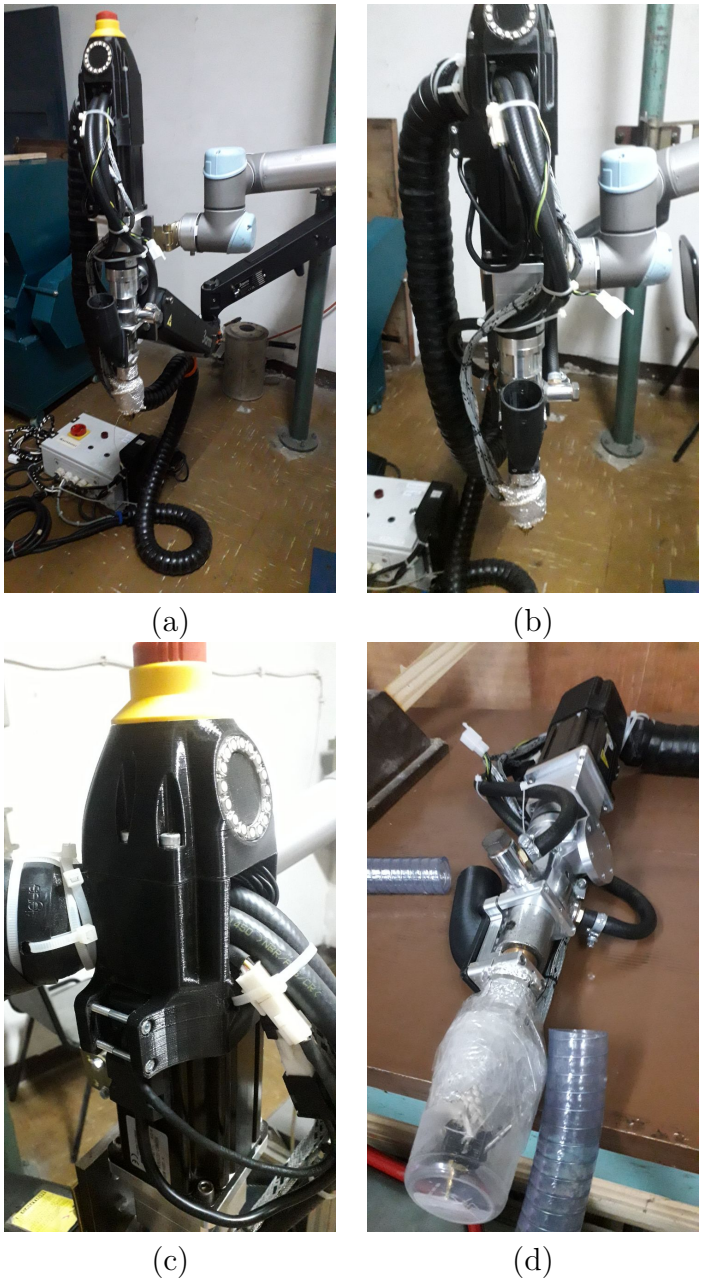


Figura 4.1: Extrusor conectado al brazo robótico y compensador en (a) y (b). Parte superior de extrusor en (c). Extrusor desacoplado en (d).

A través de una boquilla plástica, específicamente diseñada para pellets de PET, es posible incorporar el material con un flujo de 2 [kg] por hora. Mediante un tornillo sin fin, dependiente del motor, el plástico desciende hacia la boquilla, aplicando la temperatura deseada para su posterior depositación. Las boquillas disponibles para el dispositivos varían entre 1, 2, 2.5 y 3 [mm] de abertura.



Figura 4.2: Boquillas para el extrusor.

4.2.2 Brazo Compensador

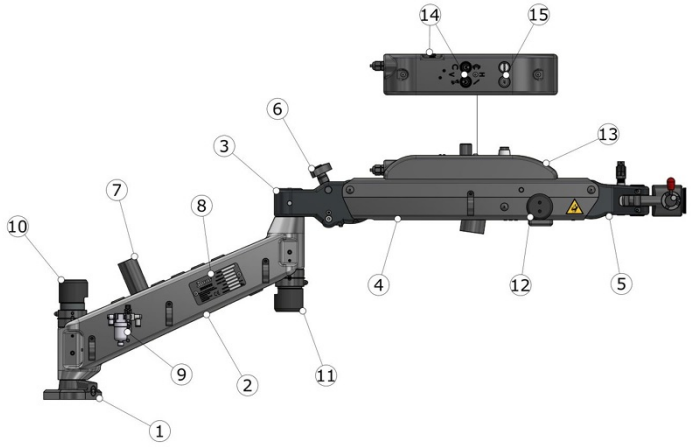
El brazo compensador 3arm SERIES 3 cumple la función la asistencia de operaciones en procesos de manufactura y producción en general. Con una capacidad de carga máxima de 35 [kg], tiene los requisitos necesarios para su despliegue con el extrusor. El brazo se compone de una base y 2 extensiones: Un brazo radial o interno, sujeto a la base, y el brazo basculante o externo, conectado al radial. A continuación se presentan las especificaciones técnicas del brazo 3arm SERIES 3:

- Rango de pesos: 0 - 19 [kg] a 0 - 35 [kg], según la configuración de brazos escogida.
- Radio máximo: 1,145 [mm] - 1,960 [mm] + cabezal seleccionado.
- Distancia vertical: 710 [mm] - 1,130 [mm].
- Fijación en sobremesa o en techo.
- Bloqueo o freno: Disponible con sistema manual o neumático.
- Peso del brazo: 14 - 21 [kg] según combinación de brazos.
- Resistencia de desplazamiento: 0.5 [kg]

- Fabricado en aluminio y duraluminio.



Figura 4.3: Brazo compensador.



1.- Base
2.- Brazo radial
3.- Cruz
4.- Brazo basculante
5.- Cabezal
6.- Conjunto regulación
7.- Parking
8.- Chapa identificativa
9.- Filtro de aire i acometida
10.- Bloqueo radial base
11.- Bloqueo radial cruz
12.- Bloqueo basculante
13.- Tapa de mandos
14.- Control bloqueos
15.- Control elevador

Figura 4.4: Partes principales del brazo compensador.



Figura 4.5: Especificaciones del brazo 3arm SERIES 3.

El modelo PS+BS+B3+L00 posee la siguiente configuración:

- PS: Brazo radial - Sobremesa: 450 [mm].
- BS: Brazo basculante - 500 [mm].
- B3: Cabezal vertical plano B.
- L00: Sin bloqueos.

ESPECIFICACIONES TECNICAS GENERALES		
Capacidad de carga[1]		
(Carga bruta: Herramienta + cabezal)	Rango de carga bruta[2] (BS)	0-35 Kg *(77 lbs)*
	Rango de carga bruta[2] (BM)	0-19Kg *(41 lbs)*
Par de reacción[3]		
Par máximo	Trabajo en vertical MAX.	650 Nm *(479 ft lb)*
	Trabajo en Horizontal MAX.	250 Nm *(184 ft lb)*
	Trabajo en cualquier Angulo MAX.	200 Nm *(148 ft lb)*
Otros		
	Resistencia a la manipulación	0,5 kg *(1.1 lb)*
Especificaciones neumáticas[4]		
	Fluido de alimentación	Aire a presión
	Presión máx. de alimentación	0,8 MPa *(8 bar)*
	Presión máx. de trabajo	0,7 Mpa *(7 bar)*
Condiciones de trabajo		
	Temperatura	-10 ºC a + 50 ºC
	Humedad relativa	Máx. 70%
	Ambiente	Entornos industriales

Figura 4.6: Especificaciones técnicas adicionales del brazo compensador.

4.2.3 Brazo robótico UR5

El brazo robótico UR5, robot UR5 o Cobot UR5 de la compañia Universal Robots realiza las trayectorias requeridas para la depositación de material, de

acuerdo a las instrucciones entregadas por el operador. A continuación se presentan las especificaciones técnicas generales del robot:

- Peso: 18,4 [kg]
- Carga: 5 [kg]
- Alcance: 850 [mm]
- Rango giro articulaciones: +/- 360°
- Velocidad: Articulación: Máx. 180°/s. Herramienta: Típico 1 [m/s]
- Repetibilidad: +/- 0,1 [mm]
- Espacio necesario: Ø149 [mm]
- Grados de libertad: 6 articulaciones giratorias
- Tamaño de la caja de control: (ancho x alto x largo) 475 [mm] x 423 [mm] x 268 [mm]



Figura 4.7: Robot UR5.

La operación del sistema robotizado fue implementado mediante la utilización de 3 programas:

- Autodesk Inventor: Programa utilizado para diseño asistido por computadora.
- Programa Universal Robots: Inherente al sistema UR5, permite la operación básica y de seguridad para control directo.
- Ultimaker Cura: Software que permite traducir el diseño en 3D a código G.
- RoboDK: Programa transmite el código G al robot para la realización de los procedimientos requeridos.

4.3 Diseño

4.3.1 Consideraciones

Para el óptimo funcionamiento del extrusor y la impresión general, fue necesario un estudio preliminar para su operación. El brazo robótico UR5 de Universal Robots ha sido utilizado para efectuar los movimientos requeridos en la fabricación. Dados los requerimientos de diseño y solicitaciones generadas por el extrusor, el brazo compensador cumple la función de soporte mecánico.

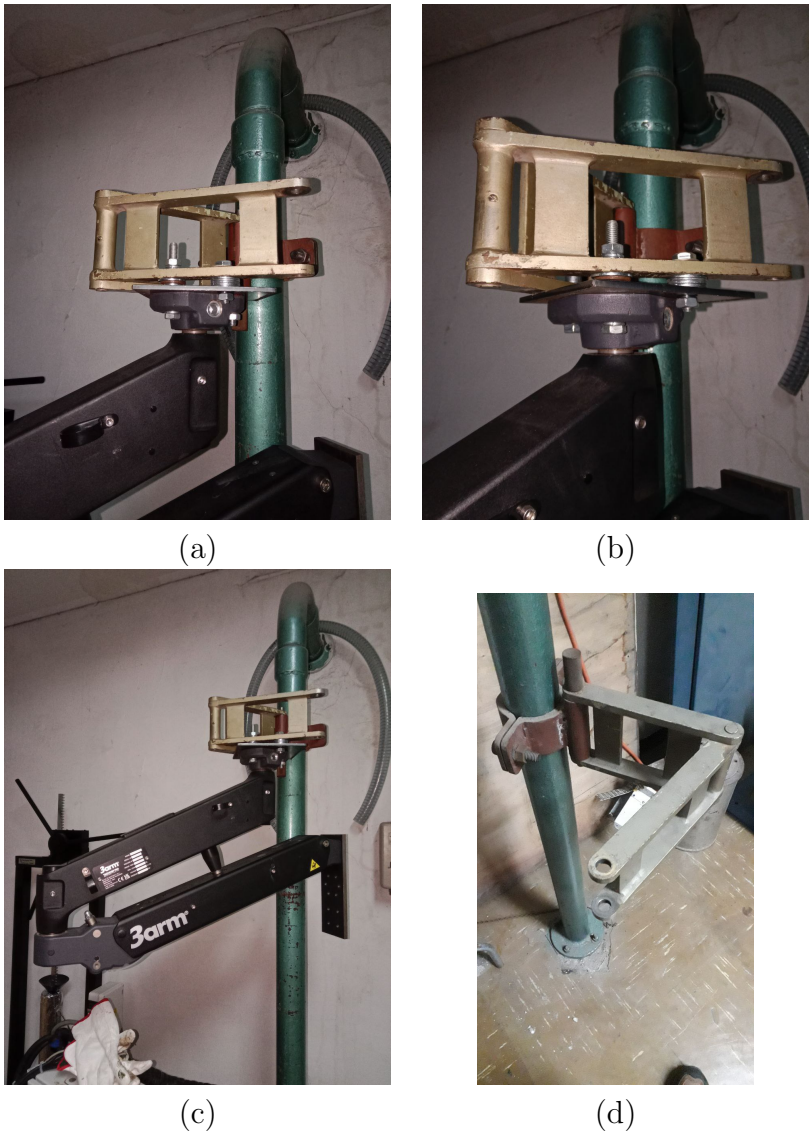
Cabe destacar las siguientes restricciones referidas al funcionamiento del sistema completo:

- El movimiento del brazo mecánico UR5 no debe ser restringido por el brazo compensador y viceversa.
- El brazo mecánico UR5 debe poder girar en 360° horizontalmente y alcanzar una altura máxima de 2 [m].
- El brazo compensador no debe entorpecer la operación del sistema, evitando colisiones.
- La extensión máxima de descenso del brazo compensador es de 530 [mm].
- La altura máxima del brazo mecánico UR5 es de 1830 [mm]

Por los motivos anteriormente mencionados, se considera que el sistema debe ser establecido adicionando una estructura, tal que permita el movimiento del brazo compensador, en conjunto con el brazo robótico y el extrusor. El peso del extrusor y los esfuerzos generados entre cada subsistema durante la operación deben ser considerados, dependiendo del tipo de impresión que se quiera realizar; y la velocidad a usar en cada proceso va a variar dependiendo de las trayectorias requeridas.

4.3.2 Etapa preliminar

Para la realización de pruebas iniciales, se ha utilizado una columna de acero como soporte estructural para el brazo compensador y su despliegue. Una unión móvil entre soporte y brazo sirve como anclaje entre ambas partes, permitiendo el giro del brazo compensador no sólo desde su brazo basculante, pero también permitiendo el grado de libertad en su base; de esta manera el brazo compensador evita la restricción del brazo radial en los giros extensos, producto de las operaciones del brazo robótico UR5. El anclaje permite la traslación vertical para el posicionamiento del brazo compensador y el extrusor, con respecto a la superficie de impresión. Adicional a ello, una placa de acero ha sido colocada para nivelar la base del brazo compensador, de tal manera que las operaciones trabajen al nivel deseado durante la programación y ejecución del proceso.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 4.8: Soporte acoplado a columna y brazo compensador.

La configuración establecida no permite el giro completo del brazo robótico, dado que la columna de acero es un impedimento para este tipo de movimiento. Los ensayos fueron realizados en una superficie de impresión de una impresora 3D Ender, con recorridos que no superan los 400 [mm]. Por ello, la restricción fue adecuada para los alcances de este trabajo.

4.3.3 Unión entre sistemas

Asegurada la posición del brazo compensador, la conexión entre éste y el brazo UR5 se establece de tal manera que ambos queden conectados al extrusor; permitiendo la transmisión de movimiento del brazo UR5 al compensador y al extrusor.

El brazo compensador permite la configuración de una variedad de cabezales, en este caso utilizamos el cabezal "Vertical plano B" de 3arm, el cual posee 4 hilos para pernos M8. Por otro lado, el cabezal único del brazo UR5 posee 4 hilos para pernos M6.

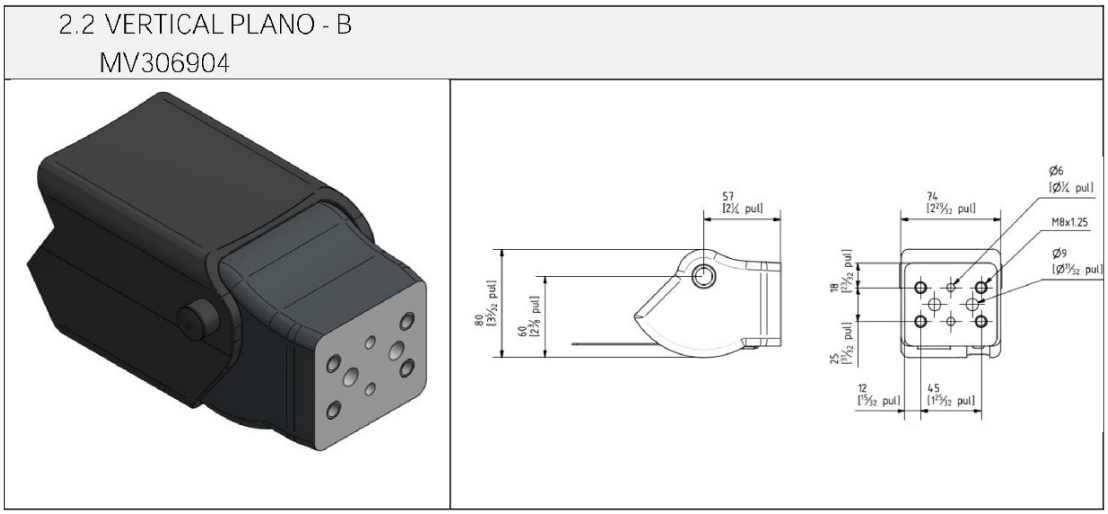


Figura 4.9: Cabezal Vertical Plano - B

El extrusor, por su parte, posee una sección cilíndrica donde se pueden colocar 6 pernos M6.

El diseño inicial para la unión de todos estos elementos consistió en una pletina de acero, con las siguientes características:

- Dimensiones de pletina: 250 [mm] x 85 [mm] x 10 [mm]
- Pernos utilizados: 10x pernos M6 + 4x pernos M8

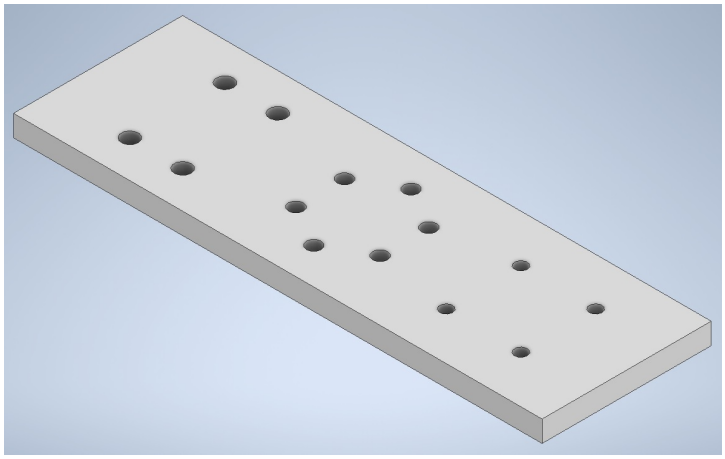


Figura 4.10: Pletina en Autodesk Inventor.



Figura 4.11: Pletina de acero

Para los ensayos iniciales realizados, la sección superior de la pletina fue apernada al brazo compensador, el brazo UR5 fue colocado en la sección inferior y el extrusor en el centro. En los ensayos finales, la posición del compensador y el UR5 fue invertida.



Figura 4.12: Columna, brazo compensador y pletina.

Además de las configuraciones mencionadas, se colocó una bisagra entre el brazo robótico UR5 y la pletina, tal como se muestra en la figura 4.13. De esta manera, los esfuerzos entre el brazo compensador y el brazo robótico fueran mermados. El brazo compensador sigue trayectorias radiales, mientras que el brazo UR5 permite el desplazamiento recto y curvo.



(a) (b)

Figura 4.13: Bisagra en configuración inicial.

4.4 Diseños Planteados

Dado los diseños de configuración inicial establecidos, se plantea la posibilidad de diseños más elaborados en las siguientes etapas del proyecto, como alternativas que permiten optimizar las operaciones y expandir las opciones de impresión.

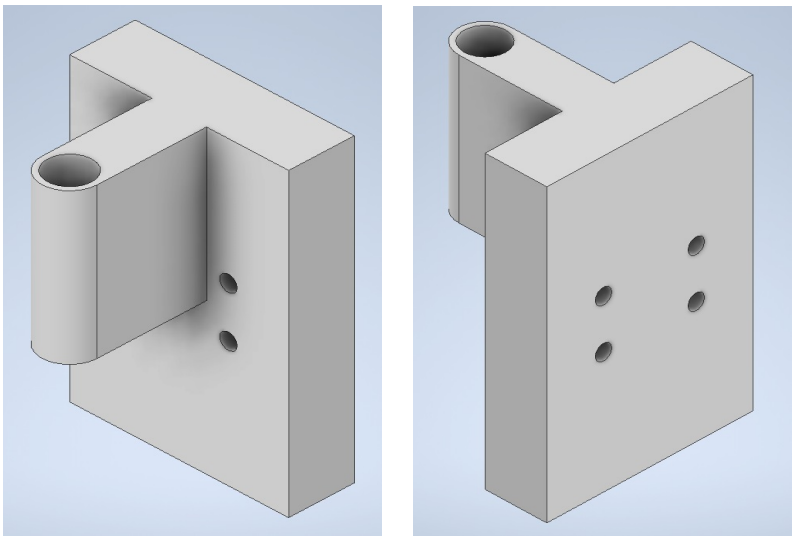
Se considera el diseño en 2 aspectos en particular. Por un lado, se plantea el diseño de una unión que permite una mejor transmisión cinemática entre el brazo compensador y el robot UR5. Por el otro lado, mediante un trípode se tiene una mayor disposición del brazo compensador con respecto al brazo robótico, permitiendo ser posicionado para una impresión a 360°.

4.4.1 Unión tipo pomel

Se sugiere la disposición de un cilindro que permite la rotación entre placas para el reemplazo de la bisagra. De esta forma se mejora el posicionamiento del brazo conectado, permitiendo que ambos queden anclados en el mismo eje vertical. Considerando latón o poliamida, una unión más rígida y directa permitiría una mayor vida útil. En caso de que se fabricara de acero, se debe considerar la reducción de espesor en las placas, para que su peso no sea un detrimento para las operaciones.

En este caso se muestran 2 variantes colocadas en el brazo compensador:

Variante 1



(a) (b)

Figura 4.14: Placa con buje.

En la primera, las placas conectadas al cilindro poseen un buje central que llega hasta la mitad de la placa, como se muestra en la figura 4.14.

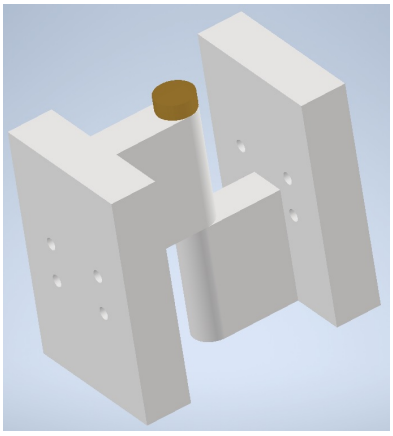
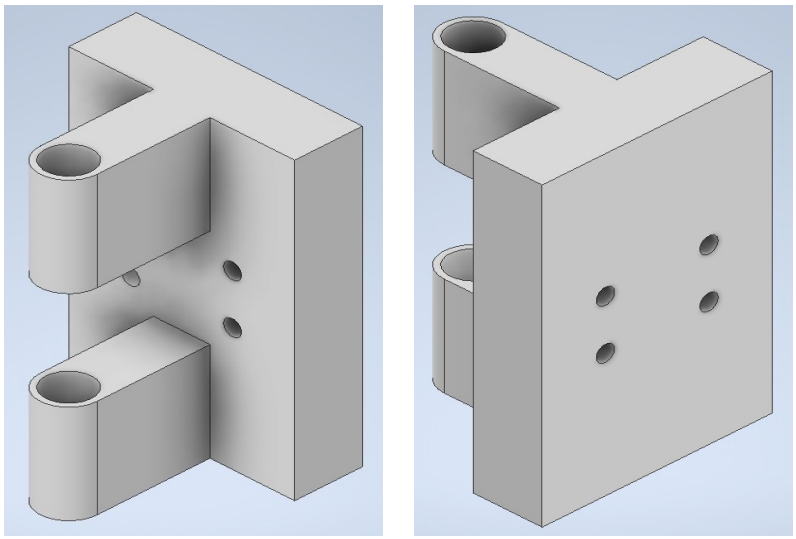


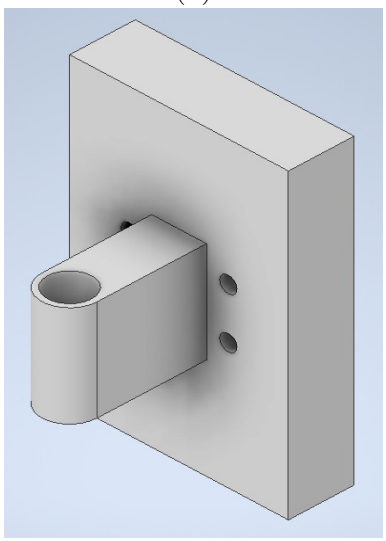
Figura 4.15: Variante 1.

Variante 2

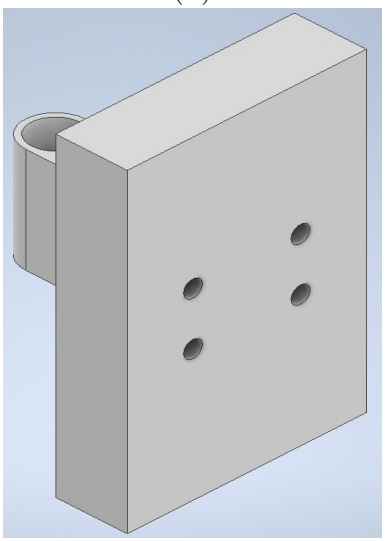


(a)

(b)



(c)



(d)

Figura 4.16: Placas con bujes.

En la segunda, se dispone de más bujes para dar simetría y un menor desgaste producto de los esfuerzos cortantes que se pueden generar producto de los desplazamientos durante las operaciones, reduciendo y dividiendo las cargas puntuales entre cilindro y bujes.

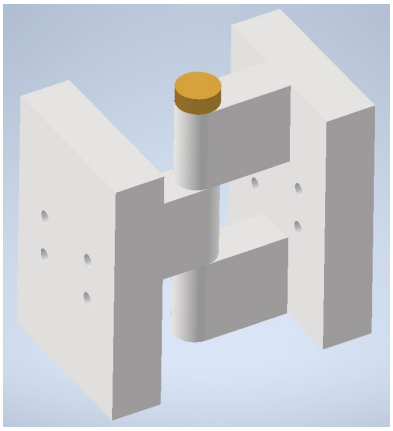


Figura 4.17: Variante 2.

En este sentido, el enfoque de este diseño es asegurar una unión económica, pero efectiva y fácil de reemplazar para el usuario.

4.4.2 Tripode

La incorporación de una estructura que sostenga el brazo compensador por encima del brazo UR5, liberando las restricciones de giro, permitiría impresiones en 360°. Para ello, se requiere un trípode de al menos 3 [m] de altura, que permita el giro completo horizontal del brazo UR5. A continuación se presenta un bosquejo básico del diseño planteado:



Figura 4.18: Estructura básica.

Para la fabricación de la estructura, se requiere de al menos acero comercial

(SAE 1020 o superior), para poder cargar el brazo compensador sin que el trípode colapse. En la sección superior central del trípode, unos tornillos se aplican a la base del brazo compensador.

Las bases del trípode pueden estar sujetas a una placa o secciones L con tornillos, para un asegurar un agarre y estabilidad con la superficie.

4.5 Ensayos

4.5.1 Condiciones iniciales generales

En las pruebas realizadas, el robot UR5 y el brazo compensador están acoplados a la pletina de acero. El brazo robótico es conectado con una bisagra a la pletina, mitigando la imprecisión producto de los recorridos divergentes que pueden generarse entre brazos. El brazo compensador esta construido para realizar trayectorias radiales, limitando los movimientos rectos del brazo robótico. En la figura 4.19 se encuentra el sistema desplegado para los ensayos.



Figura 4.19: Sistema establecido para ensayo.

4.5.2 Condiciones de extrusor y superficie

La activación del extrusor es regulada por una consola conectada al sistema Arduino, mostrada en la figura 4.20, en el cual la temperatura y la velocidad del motor pueden ser modificados. La velocidad del motor, referida al husillo que permite el traslado de material a la boquilla, fue utilizada entre los 1500 y 3000 [RPM]. En cuanto a la temperatura, el material reciclado se comporta adecuadamente a las exigencias del trabajo entre los 210 [°C] a 230 [°C], por lo que se predispone el sistema a estos valores. A diferencia de la velocidad del motor, la configuración de temperatura debe ser programada de forma gradual, dado que la traspaso calórico no es instantáneo, por lo que inicialmente se debe esperar unos 5 a 10 minutos para alcanzar la temperatura deseada.



Figura 4.20: Consola de extrusor.

La superficie de trabajo es calentada a 70°C, de tal manera que el material depositado adquiera una adherencia efectiva con el material entrante y evitando el desprendimiento. Este parámetro es directamente controlado desde la consola, mostrada en la figura 4.21 de la impresora 3D.



Figura 4.21: Consola de impresora 3D.

4.5.3 Tipos de ensayo

Para un óptimo despliegue del sistema de fabricación digital, se han realizado los siguientes ensayos:

- Ensayo de funcionamiento: Con la configuración de condiciones iniciales anteriormente mencionadas, se llevó a cabo el inicio de una impresión de un cilindro de 50 [mm] de diámetro, una altura dada por 2 capas con 3 [mm] de altura cada una y una base; suministrando pellets de PET. Posterior a ello, se ocupa material reciclado. En ambas situaciones se efectúan cambios graduales de velocidad y temperatura del extrusor para verificar el comportamiento final del material impreso y la efectividad de la operación, en términos preliminares.

- Ensayo de precisión: Se realizaron una serie de cordones impresos de material reciclado, dadas condiciones específicas de velocidad de motor, temperatura y velocidad de traslación del robot UR5. Se midieron las dimensiones de alto y ancho, de manera que se pudiera verificar una relación entre las variables que fueron consideradas y los resultados obtenidos.

- Ensayo de sincronización: Fabricación de anillos cilíndricos con diferentes capas, cerciorando el funcionamiento continuo del sistema completo, con el objetivo de verificar la efectividad de la impresión y detectar irregularidades entre lo que diseñado y lo fabricado.

En la siguiente tabla se establecen los factores de interés por cada ensayo, para su posterior análisis:

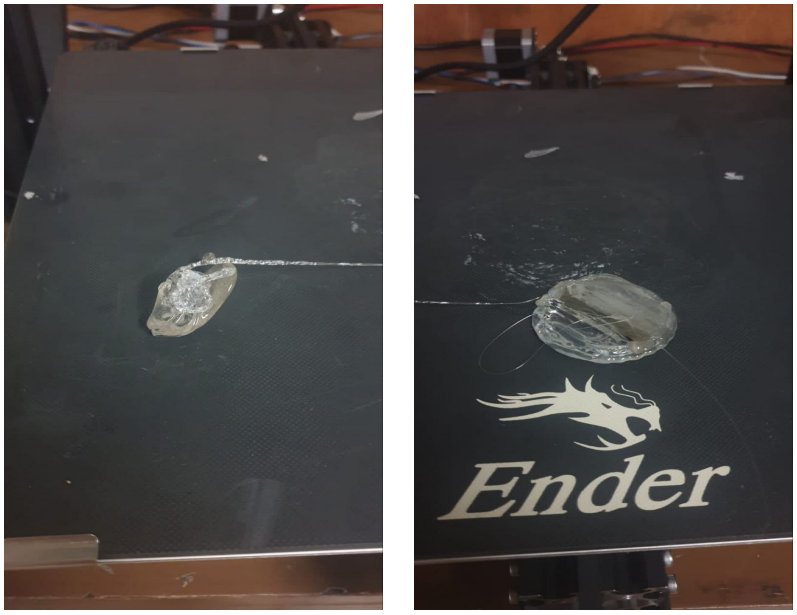
Ensayos		
Funcionamiento	Precisión	Sincronización
- Verificación funcional - Consideraciones imprevistas - Problemas de operación	- Dimensiones de muestras - Incidencia entre variables	- Geometrías de impresión - Detección de imperfecciones - Aspecto estético de muestras

Tabla 4.1: Variables y factores relevantes en los ensayos.

5. Resultados

5.1 Ensayo de funcionamiento

Durante la operación, la disminución de velocidad del motor implicó una acumulación de material a través del husillo; mientras que un aumento de velocidad disminuyó la eficiencia. En cuanto la temperatura, si el material pasante no recibe la suficiente temperatura para el derretimiento, se solidifica y genera acumulación a través del husillo. Por el otro lado, si la temperatura es muy alta el material se fusiona de tal manera que fluidez de material no conserva la geometría requerida, formando una estructura maleable al tacto.



(a) (b)

Figura 5.1: Ensayos iniciales con pellets de PET.

Para la realización de los primeros ensayos, se ocupan pellets de PET y en la figura 5.6 se muestran los resultados de las primeras impresiones. En la figura 5.6(a) se realiza una prueba inicial para ver la consistencia del material con las configuraciones iniciales. En la 5.6(b) se procede a generar un anillo cilíndrico con una base sin finalizar.

Como se ha mencionado previamente, el material reciclado utilizado se compone de tapas de botellas plásticas. Sin embargo, en el transcurso de los ensayos, encontramos trazas metálicas que generaron una serie de obstáculos en el momento de restablecer una operación.

La incorporación de un material no deseado impidió la depositación de material, estancándolo a través del husillo.



Figura 5.2: Material derretido.

En primera instancia, se aumentó una temperatura entre 230[°C] a 250[°C] para poder retirar el material, esperando que el material fluya, sin éxito. Al no poder visualizar el tamaño de la pieza metálica, se tuvo que extraer el remanente desarmando una sección del extrusor. En la figura 5.2 se puede apreciar el material derretido producto del aumento de temperatura, después de haber retirado la boquilla.



Figura 5.3: Entrada expuesta con husillo contaminado.

Se extrajó la entrada de recolección de material y se desarmó la sección intermedia del extrusor, tal como se muestra en la figura 5.3.



Figura 5.4: Husillo extraido para limpieza.

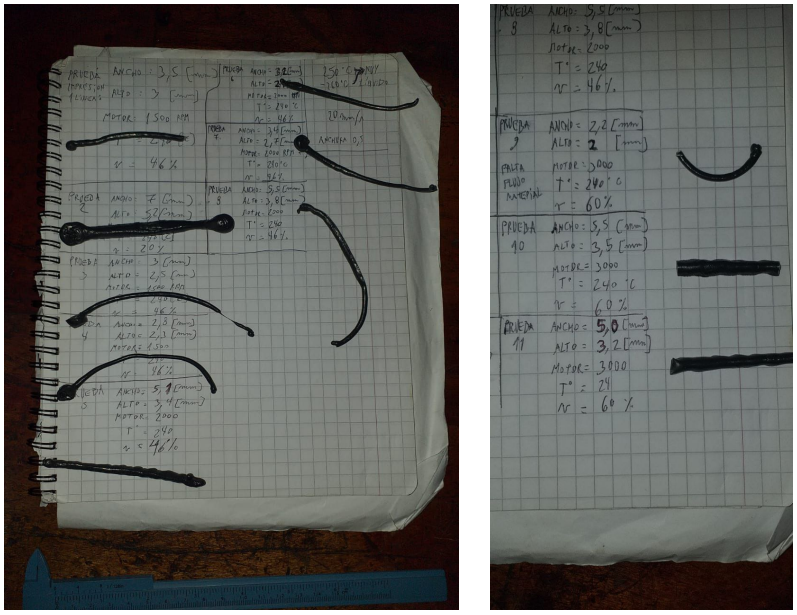
En la figura 5.4 se expone el husillo para su limpieza. Cabe destacar la concentración solidificada de material en la sección superior del husillo.

5.2 Ensayos de precisión

5.2.1 Variables relevantes de precisión

En los ensayos de precisión se ha medido el ancho y alto de cordones impresos de plástico reciclado, bajo las condiciones de velocidad del motor del husillo en el extrusor, temperatura de extrusión, y el porcentaje de velocidad del robot aplicado al estándar de 20 [mm/s] durante la operación. Se utilizó una temperatura constante de 240 °C durante la operación. Se verifica la existencia de relación entre velocidades y dimensiones obtenidas.

5.2.2 Resultados de precisión



(a) (b)

Figura 5.5: Muestras de impresión tomadas para ensayo de precisión.

En la figura 5.5 se muestran los cordones obtenidos durante las operaciones. Dados los cambios de temperaturas, las muestras revelan pandeos; sin embargo ésto no afecta las mediciones. Las pruebas arrojaron los siguientes resultados:

N° Prueba	Ancho [mm]	Alto [mm]	Motor [RPM]	Temperatura [°C]	Porc. Velocidad
1	3.5	3.0	1500	240	46
2	7.0	5.2	1500	240	20
3	3.0	2.5	1500	240	46
4	2.8	2.3	1500	240	46
5	5.1	3.4	2000	240	46
6	3.2	2.7	2000	240	46
7	3.4	2.7	2000	240	46
8	5.5	3.8	2000	240	46
9	2.2	2.0	3000	240	60
10	5.5	3.5	3000	240	60
11	5.0	3.2	3000	240	60

Tabla 5.1: Ensayos a 20 [mm/s]

Mediante un análisis de varianza (ANOVA), se han clasificado las dimensiones obtenidas por las diferentes velocidades de motor; de tal manera que se pueda encontrar una tendencia.

1500 RPM	2000 RPM	3000 RPM
3.5	5.1	2.2
7.0	3.2	5.5
3.0	3.4	5.0
2.8	5.5	2.0
3.0	3.4	3.5
5.2	2.7	3.2
2.5	2.7	-
2.3	3.8	-

Tabla 5.2: Dimensiones por velocidad de motor

Se verifica la hipótesis mediante la distribución F. Tomando el número de grupos k = 3 y total de datos N = 22, se obtiene la tabla 5.2.2:

Fuente variación	Suma cuadrados (SS)	Grados de libertad	-	Cuadrados medios	-
Factor:	0.086	k-1:	2	T:	0.043
Error:	36.247	N-k:	19	E:	1.908
Total:	36.333	N-1:	21	-	-

Tabla 5.3: Tabla de análisis de varianza

Se obtienen las medias de cada grupo y se obtienen las sumas de cuadrados:

$$\sum_{i}^{n_i}\sum_{j}^{n_j}(y_{ij}-\overline{y})^2 = n\sum_{i}^{n_i}(y_i-\overline{y})^2 + \sum_{i}^{n_i}\sum_{j}^{n_j}(y_{ij}-y_i)^2$$

$$SS_{Total} = SS_{Factor} + SS_{Error}$$

Con:

$$T = \frac{SS_{Factor}}{k-1}$$

$$E = \frac{SS_{Error}}{N-k}$$

$$F = \frac{T}{E} = 0.023$$

Distribución F con un nivel de significancia del 5%:

$$F_{(0.05)(2,19)} = 3.522 > 0.023$$

Por lo que no hay una diferencia significativa entre las medias al variar de RPM.

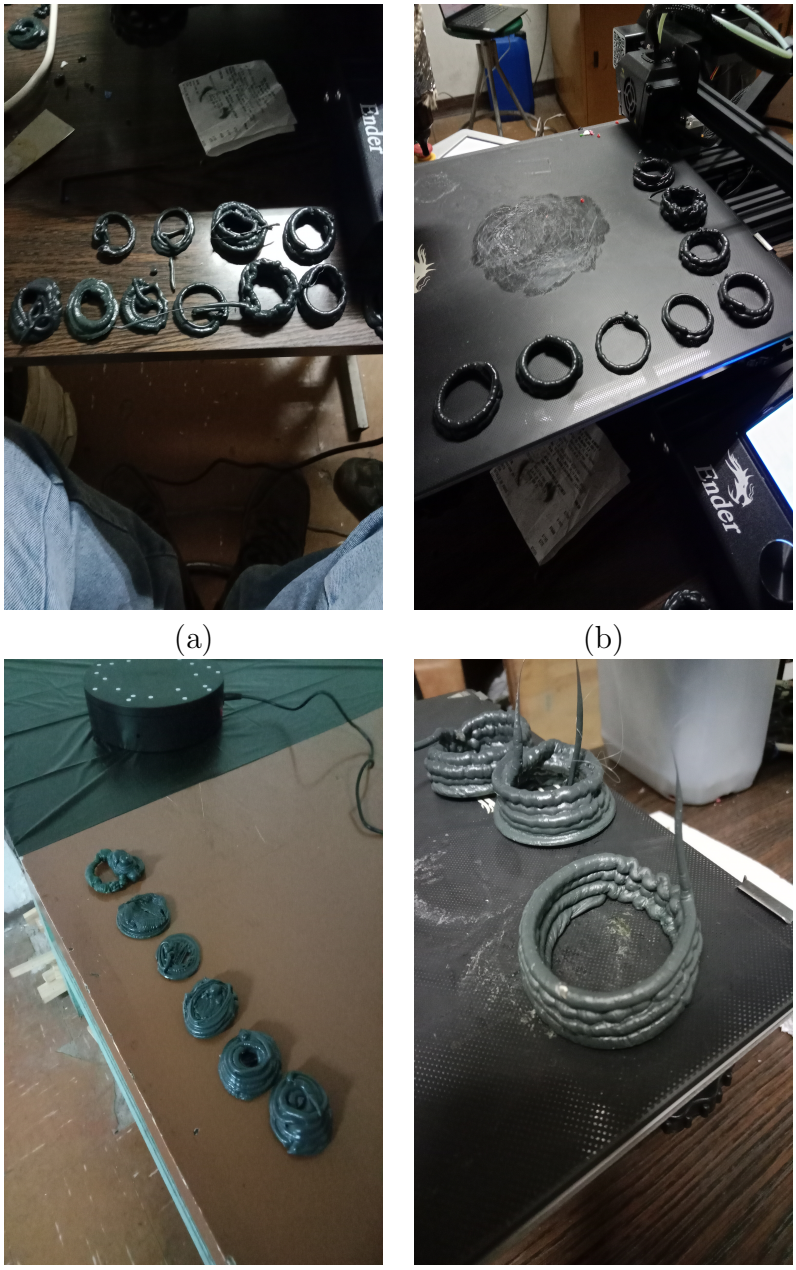
5.3 Ensayos de sincronización

5.3.1 Variables relevantes en sincronización

Los ensayos de sincronización consisten en ensayos cualitativos para poder verificar la implementación simultánea entre el brazo compensador y el brazo robótico. Se considera la calidad de la impresión en términos cualitativos: La morfología obtenida en contraste con la deseada, la consistencia entre las dimensiones establecidas en la impresión y el aspecto visual.

5.3.2 Resultados de ensayos de sincronización

Utilizando el diseño de un anillo cilíndrico de 50 [mm] de diámetro, 3 [mm] de espesor, capas superiores o pisos de 3 [mm] de alto y los parámetros de operación anteriormente referidos en los ensayos de funcionamiento, se obtuvieron los siguientes registros visuales:



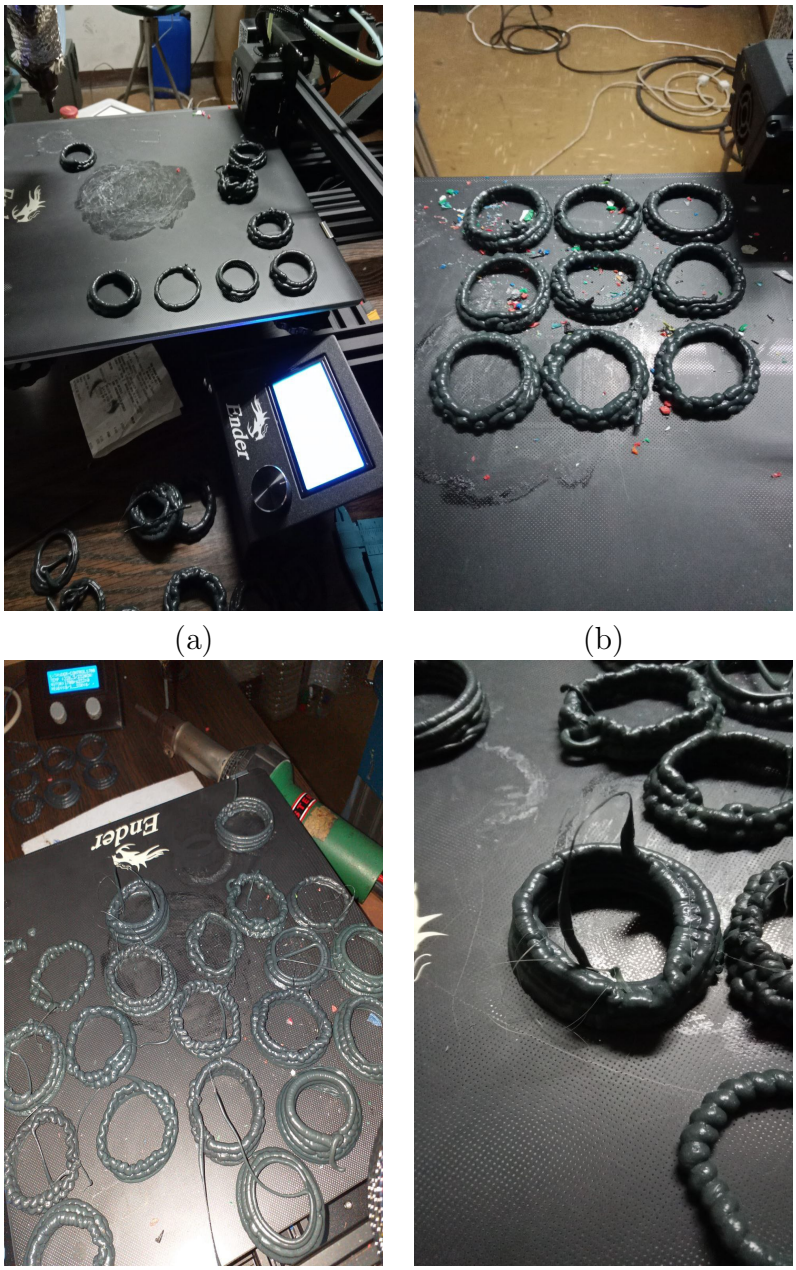
(a) (b)

(c) (d)

Figura 5.6: Ensayos generales de sincronización.

En la figura 5.6(a) se muestran los resultados producto de cambios de temperatura entre el intervalo de 200[°C] a 240[°C], siguiendo un escalonado continuo. La figura 5.6(b) muestra ensayos realizando 1 a 2 pisos. En la figura 5.6(c) se muestran los resultados con 3 o más circuitos. En la figura 5.6(d) se muestran los resultados utilizando un ventilador sobre la impresión, externamente, durante

todo el proceso.



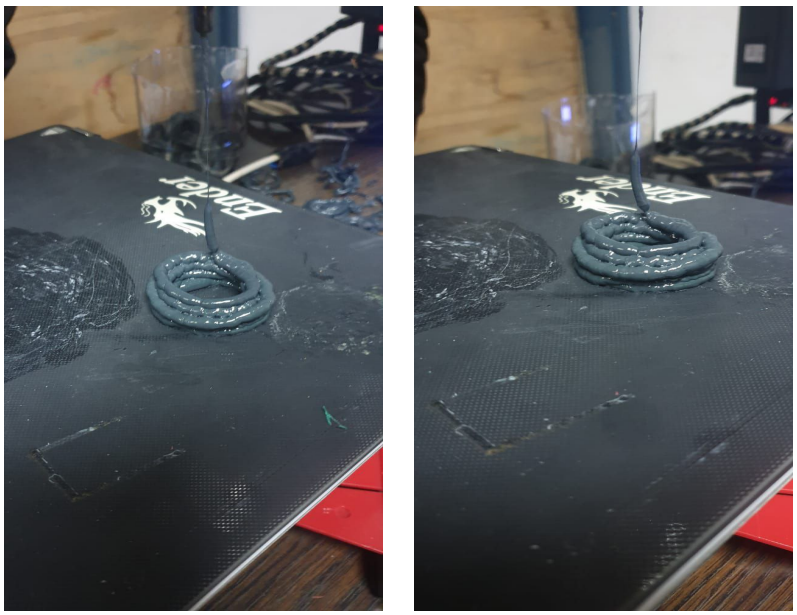
(a) (b)

(c) (d)

Figura 5.7: Ensayos de 1 a 3 capas.

En la figura 5.7 se muestran impresiones de 1, 2 y 3 capas. En la figura 5.7(b) se muestran 9 impresiones, en la filas (arriba hacia abajo) se ocupó una velocidad de robot de 20 [mm/s], 25 [mm/s] y 30 [mm/s] respectivamente; mientras que

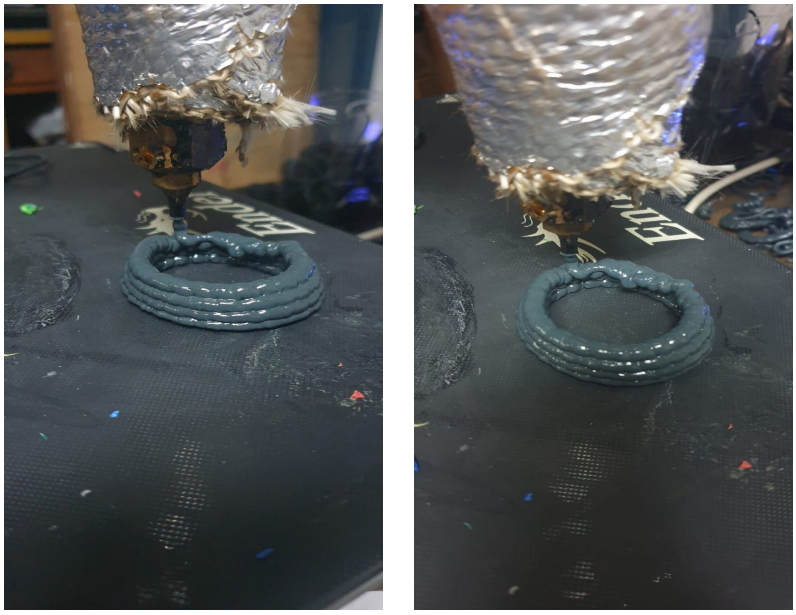
en las columnas (izquierda a derecha) se ocupó una velocidad del motor de 2000 RPM, 1750 RPM y 1500 RPM.



(a) (b)

Figura 5.8: Ensayos de 4 capas.

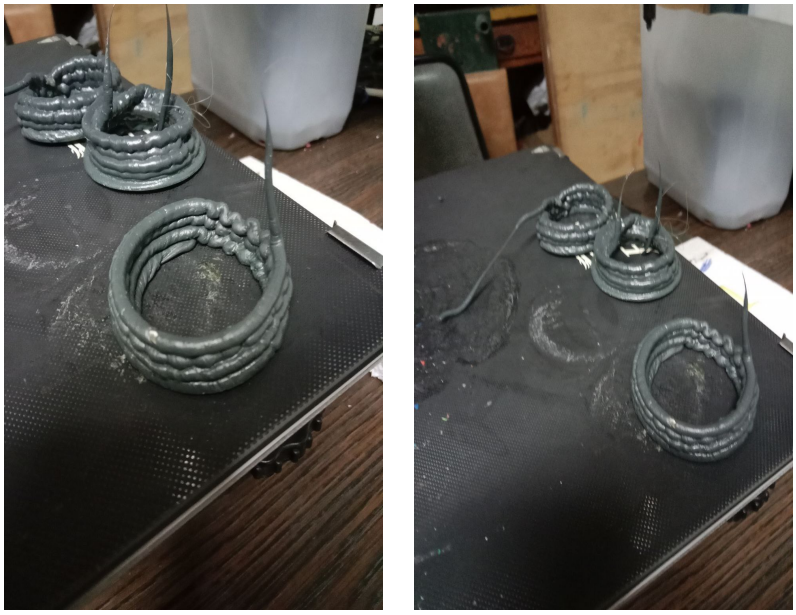
En la figura 5.8 se realizaron impresiones de 4 capas a 240 °C.



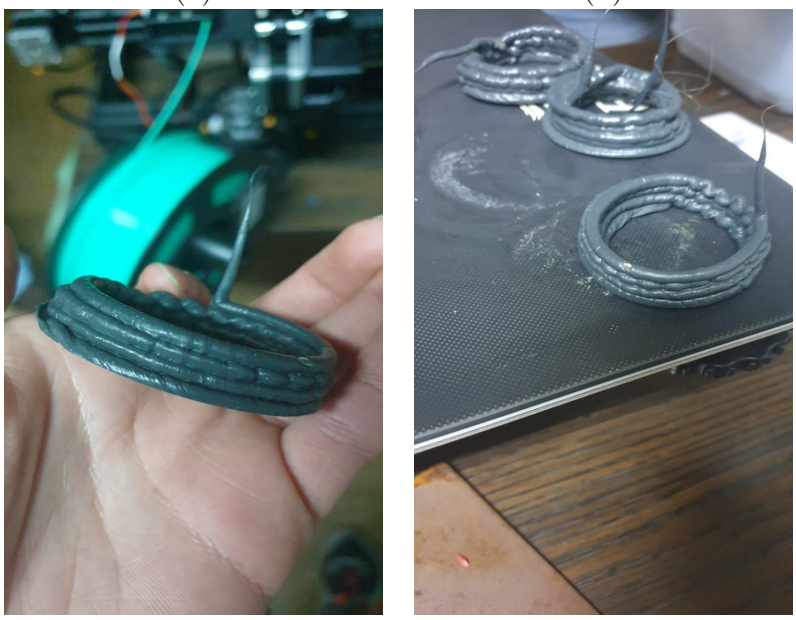
(a) (b)

Figura 5.9: Ensayos de 4 capas a 200°C.

En la figura 5.9 se fijó una temperatura de 200 °C, una velocidad de motor del husillo a 1750 RPM y una velocidad del robot UR5 a 15 [mm/s]. Se ocuparon hasta 4 capas.



(a) (b)



(a) (b)

Figura 5.10: Ensayos de 4 a 5 capas.

En la figura 5.10 se muestran impresiones de 4 a 5 capas con ventilación añadida.

5.4 Análisis de Resultados

5.4.1 Ensayos de Funcionamiento

Durante la ejecución inicial del sistema conectado a la pletina, en la realización de trayectorias rectas de no más de 100 [mm] de longitud, el brazo UR5 realizó paradas de emergencia debido a solicitaciones que excedían los parámetros de seguridad nominales en el sistema. Este problema se debió a las restricciones mecánicas en los giros, efectuando simultáneamente el movimiento radial del brazo compensador y el recto generado por el UR5. Cabe destacar, durante la operación, un aumento de temperatura leve en la muñeca del brazo UR5, y vibraciones en las conexiones; consecuencia directa de la ejecución de ambos brazos y el esfuerzo generado en el brazo robótico UR5.

La implementación de un elemento de giro colocado entre el brazo UR5 y la pletina permitió una mejor transmisión cinemática entre las partes.

5.4.2 Ensayos de Precisión

En los ensayos donde se verifica la precisión de acuerdo a los cambios de configuraciones, los resultados no son concluyentes. La variación de velocidades de motor y las dimensiones no demuestran cambios significativos. La utilización de una temperatura constante fue condicionada durante las pruebas de sincronización, al ver variaciones visiblemente notorias y no deseadas en las dimensiones, por las propiedades mecánicas del material. De forma similar ocurre con la velocidad del robot UR5, al permitir menos material depositado al tener mayor velocidad y viceversa.

5.4.3 Ensayos de Sincronización

En los ensayos de sincronización, las impresiones de 1 a 2 capas reflejaron la formación de anillos con protuberancias, debido a la acumulación de material saliente. En las impresiones mayores a 3 capas se revelan dificultades. Durante los procedimientos, el material tiende a dispersarse, producto de la fluidez de éste, la

cual no permite la consistencia requerida para mantener su forma. No obstante, el ensayo en el cual se ocupa un ventilador externo permite evitar esta situación, enfriando el material lo suficiente para que se solidifique adecuadamente a los requisitos de diseño. En general, y con mayor visibilidad en impresiones de 3 o más capas, las impresiones muestran singularidades similares como las que se ven en la figura 5.6(d), donde una sección en particular de la impresión posee un zigzagueo debido al cambio de capa; la trayectoria diagonal tomada por la boquilla, elevándola, hace que el material pierda contacto con la superficie y se deslice a los extremos.

6. Conclusiones y Recomendaciones

A través de los ensayos, se ha comprobado la efectividad del desarrollo de un sistema compensado; reduciendo las solicitaciones concentradas en el brazo robótico UR5 y permitiendo que este último pueda desempeñar las funciones de movimiento sin la utilización de un robot de mayor envergadura y motor, economizando los costos asociados a la puesta en marcha de una impresión 3D con extrusión de alto volumen.

El ensayo de funcionamiento se dio a conocer las posibilidades de operación del sistema. Las pruebas demostraron una velocidad de depositación e impresión superior a las impresoras comerciales. No obstante, el extrusor de alto volumen debe ser precalentado con anterioridad y requiere una constante supervisión en el control de temperatura para que el material caiga con la fluidez óptima. A medida que el material es depositado, la temperatura interior del extrusor aumenta considerablemente, lo que implica un material más fluido y menos reticente a solidificarse, deformando las geometrías deseadas.

Sin embargo, surgen problemáticas en la precisión y la calidad del producto final debido a las interacciones mecánicas que subyacen en la operación. El brazo compensador, debido a sus uniones, es limitado en grados de libertad, lo que dificulta la posibilidad de impresiones de alta complejidad. Las trayectorias radiales seguidas por el brazo compensador intervienen el continuo desplazamiento del brazo robótico, el cual puede ser recto como curvo, lo que conlleva a una deficiencia en la precisión. Los ensayos de sincronización mostraron irregularidades en sectores específicos de un mismo diseño de impresión, lo que da a entender que existe un esfuerzo irregular entre las partes, producto de las trayectorias tomadas por la programación del brazo robótico y la respuesta del brazo compensador a estas solicitaciones.

A pesar de los desafíos que involucran el funcionamiento del sistema compensado, las impresiones se efectuaron para dimensiones ocupadas en impresoras 3D comerciales no industriales, los cuales emplean una mayor precisión para los tamaños de diseño reducidos. El extrusor de alto volumen, dadas las carac-

terísticas de temperatura y velocidad de motor, permite ser utilizado para distancias superiores y, por lo tanto, esta orientado a impresiones de mayor envergadura. Con ello, se ha verificado una funcionalidad óptima para dichos trabajos.

Para futuros proyectos, se pueden ampliar las posibilidades de impresión, desplazando el brazo compensador a una posición que permita a un mayor movimiento; como se ha reflejado en el diseño de un trípode que lo soporte. Dados los grados de libertad del brazo compensador, este tipo de configuración sería idóneo para impresiones que requieran geometrías cilíndricas. Adicional a ello, la implementación de diferentes tipos de uniones podría permitir una mayor cooperación entre los sistemas, como se sugiere con la unión tipo pomel previamente mencionada en el informe. Una unión tipo cardan también podría ser útil para morfologías que no dependen de bases por cada capa superior; sin embargo se deben ocupar soportes adicionales que permitan sostener la estructura mientras adquieren la rigidez necesaria durante la depositación.

7. Anexos

7.1 Guía de Uso Rápida

La colocación del brazo compensador parte de la base y 3 pernos M8 pueden ser colocados para ser fijado. Posterior a ello, es posible realizar ajustes para su debida utilización.

Con una llave inglesa para 13 [mm] se regula la tensión vertical del brazo radial, entre 42° de ascenso y 42 de descenso.

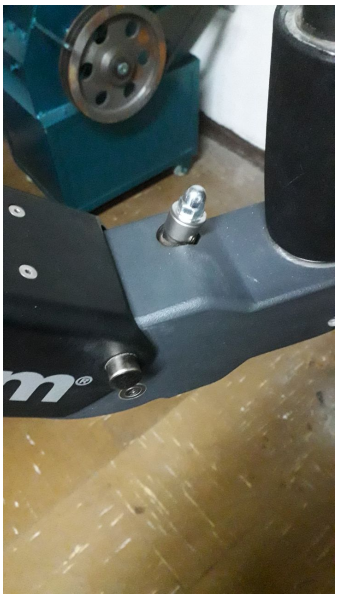
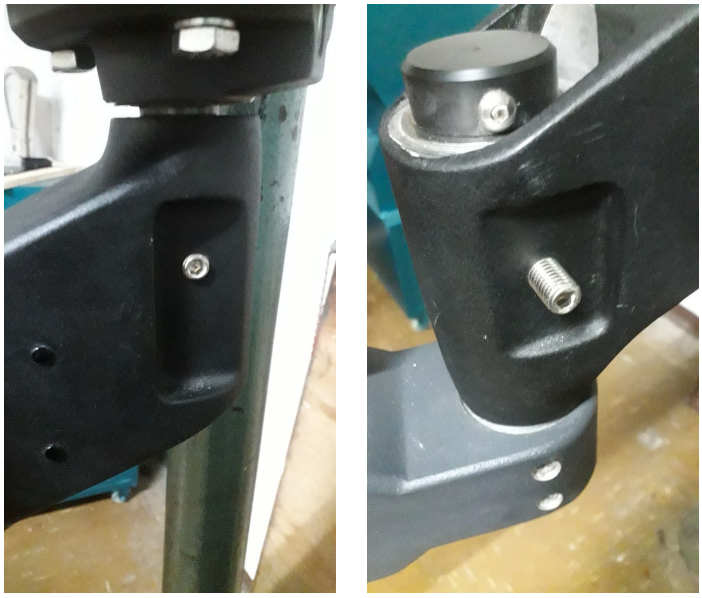


Figura 7.1: Regulación vertical.

Con una llave hexagonal de 5 [mm] se regula la tensión de giro horizontal entre el brazo radial y el basculante.



(a) (b)

Figura 7.2: Tensión para brazo radial y basculante.

Adicional a ello, el parking permite el bloqueo entre los brazos para poder efectuar su traslado.



Figura 7.3: Regulación vertical.

Precaución: Durante todas las operaciones con el Cobot iniciado, no trabajar

el brazo extendido en la zona roja mostrada en la figura.

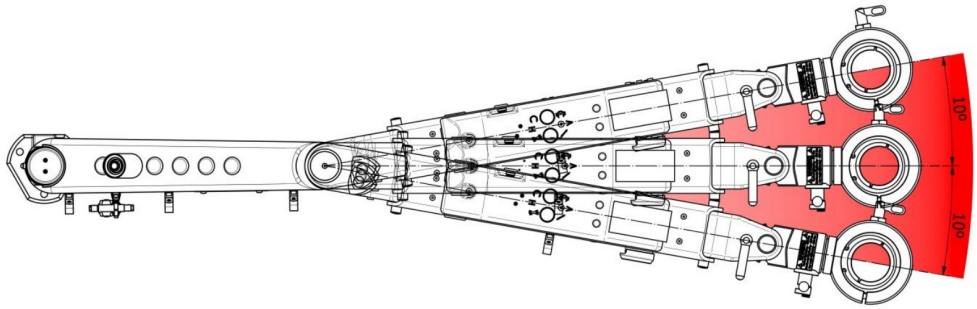


Figura 7.4: Zona roja a evitar durante operación.

Para ver más detalles consultar "MANUAL DE INSTRUCCIONES 3arm", Series 3 en la página web:

https://toolbalancerarms-3arm.com/es/manuales-y-documentacion/.

7.2 Plano de brazo compensador

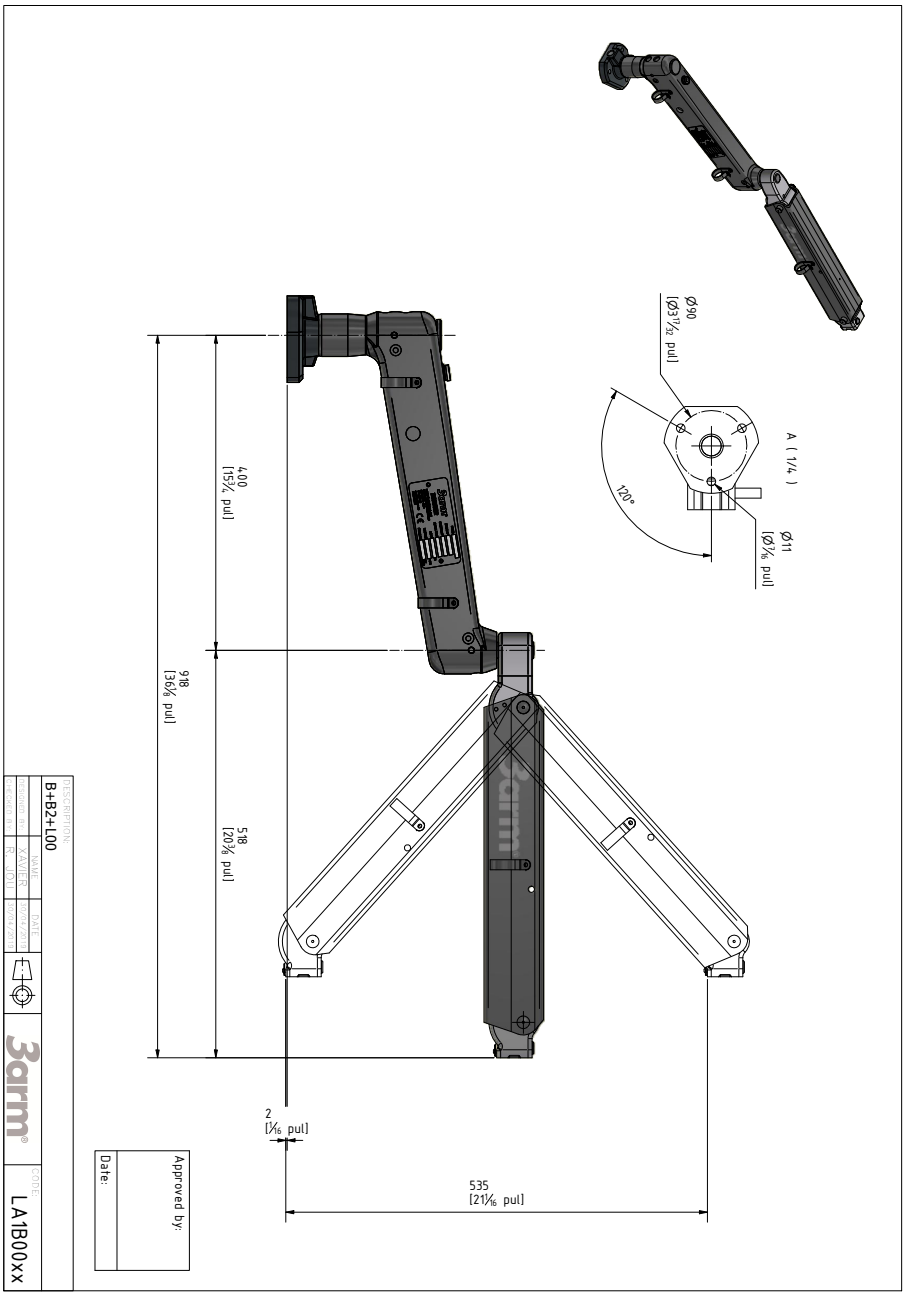


Figura 7.5: Plano de brazo compensador 3arm SERIES 3.

7.3 Especificaciones Cobot UR5

SP 04/2016

UNIVERSAL ROBOTS

UR5 Especificaciones técnicas No. Artículo 110105

Brazo robótico de 6 ejes con un radio de funcionamiento de 850 mm

Peso:	18,4 kg
Carga:	5 kg
Alcance:	850 mm
Rango giro articulaciones:	+/- 360°
Velocidad:	Articulación: Máx. 180°/s. Herramienta: Típico 1 m/s
Repetibilidad:	+/- 0,1 mm
Espacio necesario:	Ø149 mm
Grados de libertad:	6 articulaciones giratorias
Tamaño de la caja de control: (ancho x alto x largo)	475 mm x 423 mm x 268 mm
Puertos de E/S:	Caja de control / Conector herramienta Entradas digitales 16 / 2 Salidas digitales 16 / 2 Entradas analógicas 2 / 2 Salidas analógicas 2 / -
Fuente de alimentación de E/S:	24 V 2A en caja de control y 12 V/24 V 600mA en herramienta
Comunicación:	TCP/IP 100 Mbit: IEEE 802.3u, 100BASE-TX Ethernet socket & Modbus TCP
Programación:	Interfaz gráfica de usuario PolyScope en pantalla táctil de 12" con soporte
Ruido:	Relativamente silencioso
Clasificación IP:	IP54
Consumo de energía:	Aprox. 200W utilizando un programa típico
Funcionamiento colaborativo:	15 Funciones de seguridad avanzadas Operaciones colaborativas de acuerdo con: EN ISO 13849:2008 PL d EN ISO 10218-1:2011, Cláusula 5.4.3
Materiales:	Aluminio, plástico PP
Temperatura:	El robot puede funcionar en un intervalo de temperaturas de 0-50°C
Fuente de alimentación:	100-240 VAC, 50-60 Hz
Cables:	Cable entre el robot y la caja de control (6 m) Cable entre la pantalla táctil y la caja de control (4,5 m)



Universal Robots A/S
Energivej 25
DK-5260 Odense S
Dinamarca
+45 89 93 89 89

www.universal-robots.com
sales@universal-robots.com

Copyright © 2009-2016 by Universal Robots A/S. All rights reserved.

Figura 7.6: Especificaciones técnicas Cobot UR5

7.4 Planos de uniones tipo pomel

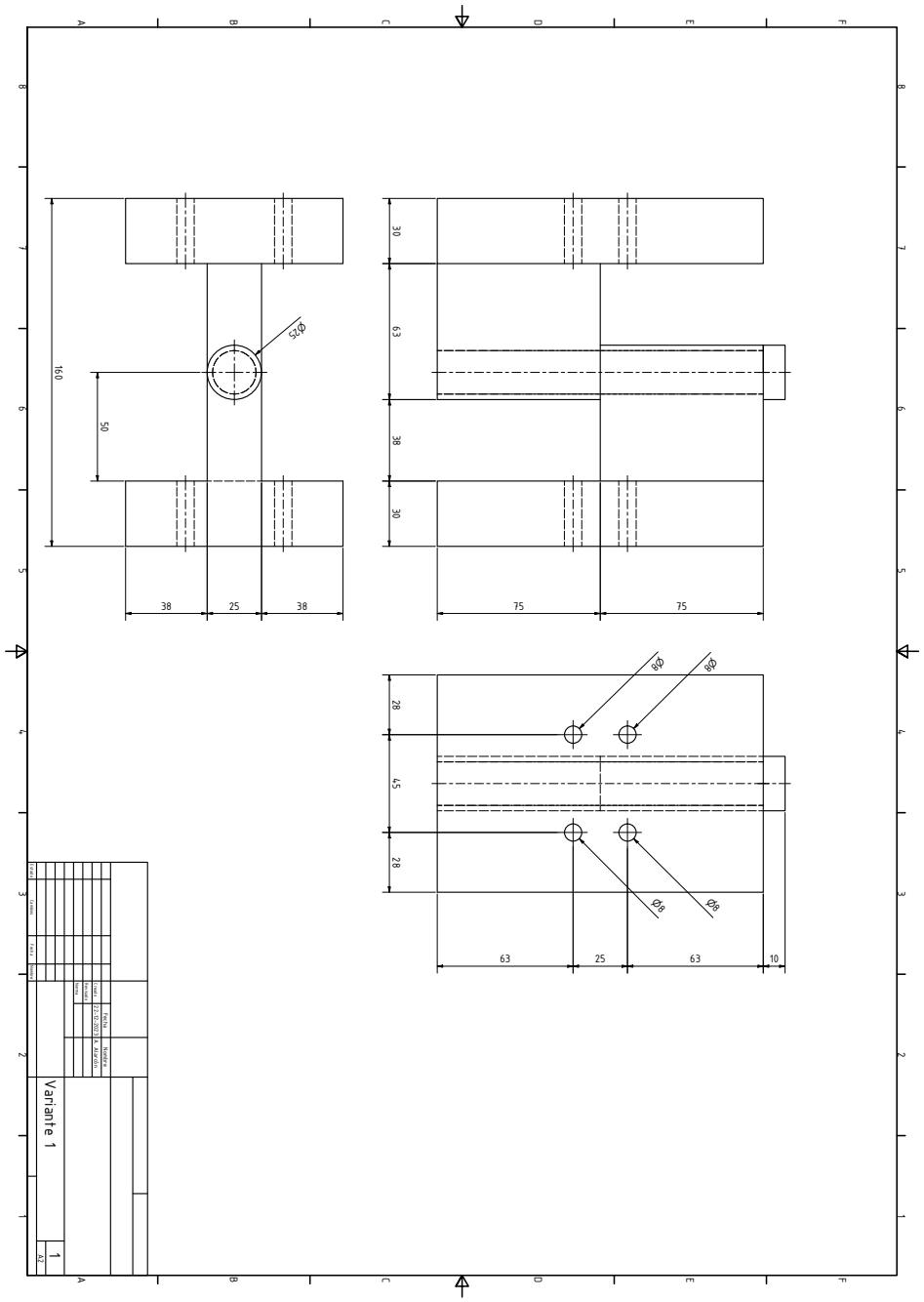


Figura 7.7: Unión variante 1

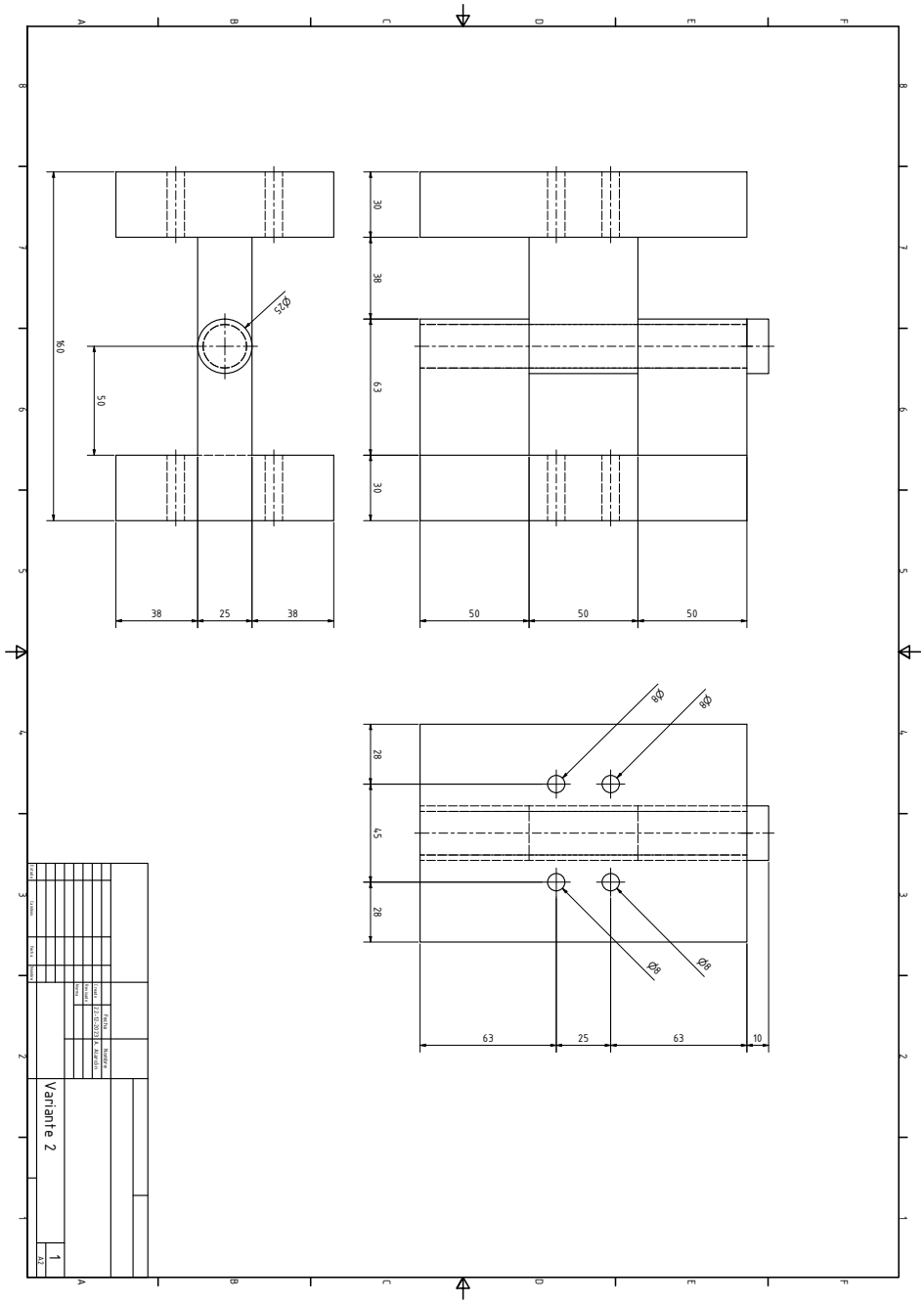


Figura 7.8: Unión variante 2

Referencias

[1] Osama Abdulhameed, Abdulrahman Al-Ahmari1, Wadea Ameen, and Syed Hammad Mian. Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(2):27, 2019.

[2] Mohammad Safeea, Richard Bearee, and Pedro Neto. An integrated framework for collaborative robot-assisted additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 81(1):406–413, 2022.

[3] Abdullah Alhijaily, Zekai Murat Kilic, and A. N. Paulo Bartolo. Teams of robots in additive manufacturing: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1):28, 2023.

[4] Mª Elena García-Ruiz and Francisco Javier Lena-Acebo. Movimiento fablab: Diseño de investigación mediante métodos mixtos. *OBETS. Revista de Ciencias Sociales*, 14(2):373–406, 2019.

[5] Jingchao Jiang, Xun Xu, and Jonathan Stringer. Support structures for additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(4):23, 2018.

[6] Rainer Christoph, Romeo Muñoz, and Ángel Hernández. Manufactura aditiva. *Realidad y Reflexión*, 16(43):97–109, 2016.

[7] Kaufui V. Wong and Aldo Hernandez. A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012(208760):10, 2012.

[8] Alex Owen-Hill. How to supersize 3d printed art with a robot [en línea] <https://robodk.com/blog/supersized-robot-3d-printing/>[Marzo, 2019].