



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de interfaz de
comunicación para
implementar un proceso de
manufactura aditiva
mediante un brazo robótico**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A (N)

Cabrera Ayala Ricardo Ayzú
Hernández Bolaños Christopher Alberto

DIRECTOR(A) DE TESIS

M.I. Armando Sánchez Guzmán



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Agradecimientos generales

A la facultad de ingeniería y a la UNAM, por proveer las herramientas necesarias para nuestra formación y regalarnos experiencias únicas en cada aula y espacio que la conforman.

A nuestro director de tesis, Mtro. Armando Sánchez, por la oportunidad que nos brindó al desarrollar este proyecto, por su tiempo y asesoría.

Al Mtro. Valentín Talavera, por guiarnos durante nuestra tesis, ofreciendo siempre un consejo útil para encauzar nuestros esfuerzos.

Al departamento de materiales y diseño, por facilidades prestadas para la realización de este proyecto.

Agradecimientos Ricardo Cabrera

A mis padres: Odila Ayala Ortega y Jaime Cabrera Zúñiga, por su amor infinito y apoyo incondicional. Mamá, porque siempre estuviste ahí, acompañándome en las noches de desvelos, cuidando de mí, porque siempre tuviste para mí un abrazo en los momentos difíciles y la sonrisa que me motivó a dar todo para seguir adelante. Papá, por marcar el camino a seguir, por ampliar mis horizontes y creer en mí, por enseñarme que nunca hay que perder de vista el objetivo.

A mi familia por ser de quienes aprendí las primeras lecciones, con quienes crecí y comparto hermosos recuerdos, a los que permanecen y los que ya están más allá del destino.

A mi amigo Christopher Hernández, por ser para mí como un hermano, por enseñarme siempre cosas nuevas, por la paciencia y compromiso que tuvo en cada proyecto en que participamos y la motivación de enfrentar nuevos retos.

A mis amigos, principalmente a Irene y Mario, por las risas y alegrías, por brindar siempre un cálido abrazo y un consejo sincero.

A quien me ha acompañado durante todo este viaje, por aparecer en el momento indicado y quedarse a enfrentar a la vida junto a mí. Por el inmenso cariño para conmigo y todas las aventuras que hemos tenido y las que están por venir.

Agradecimientos Christopher Hernández

A mis padres: Beatriz Bolaños y Alberto Hernández, por todo su apoyo en es mis años como estudiante que están por concluir. Juntos disfrutamos y sufrimos los momentos más amargos, gracias por siempre tener una palabra que me hiciera seguir adelante, por estar pendiente de mí en esas largas noches de desvelos y sobre todo por disfrutas conmigo este logro, sin ustedes no hubiera sido posible.

A las mujeres que siempre confiaron en mí: Kenia Hernández y Fernanda Pruneda, gracias por ofrecer su ayuda incondicional a pesar de tener sus propias ocupaciones y quehaceres, cuando me vieron a punto de abortar tenían detalles que alegraban mi día y mis noches. Yo confío en ustedes de la misma manera que confiaron en mí, nunca duden en pedirme ayude y cuando yo se las brinde tengan la confianza en aceptarla.

A mi amigo Ricardo Cabrera, desde aquella primera clase que tuvimos juntos nos adaptamos a nuestras formas de ser y juntos aprendimos a explotar nuestras fortalezas, agradezco que me hayas enseñado lo que se me dificultaba y a resistir aquellas épocas de frustración donde teníamos que revisar nuestro trabajo para encontrar los errores.

A mis amigos, Mario, Rey, Marco, Alvaro, Dary, Alanis y a todos aquellos que hicieron que el tiempo en la universidad fuera más ameno, con muchos de ustedes me divertí, reí, discutí pero principalmente disfrute de una buena plática y de un buen consejo.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO	2
HIPÓTESIS	3
JUSTIFICACIÓN	4
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	5
1.1 MANUFACTURA ADITIVA	6
1.1.1 <i>Antecedentes</i>	6
1.1.2 <i>Categorías de la manufactura aditiva.</i>	8
1.1.3 <i>Materiales empleados.</i>	13
1.1.4 <i>Componentes de una máquina de manufactura aditiva por FDM.</i>	14
1.2 BRAZOS ROBÓTICOS	17
1.2.1 <i>Antecedentes</i>	18
1.2.2 <i>Conceptos básicos de robótica</i>	20
CAPÍTULO 2. EQUIPO UTILIZADO	26
2.1 SCORA ER 14	26
2.2 CONTROLADOR ESHED ROBOTEC CONTROLLER-B ACL	29
2.3 REPARACIONES REALIZADAS	30
2.3.1 <i>Primera fase: Reparación eje 3 y 4.</i>	30
2.3.2 <i>Segunda fase: Reparación eje 1 y 2.</i>	32
2.3.3 <i>Tercera fase: Reparación del eje 2.</i>	31
2.3.4 <i>Cuarta fase: Mantenimiento general del sistema.</i>	32
CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE LA IMPRESORA	34
3.1 SISTEMA DE CÓMPUTO	35
3.1.1 <i>Printrun</i>	35
3.1.2 <i>ATS</i>	35
3.2 SISTEMA DE INTERFAZ	36
3.2.1 <i>Arduino Mega</i>	36
3.2.2 <i>Marlin</i>	37
3.2.3 <i>RAMPS V1.3</i>	38
3.3 SISTEMA DE IMPRESIÓN	38
3.3.1 <i>Base</i>	39
3.3.2 <i>Motores NEMA 17</i>	40
3.3.3 <i>Mecanismo de extrusión</i>	41
3.3.4 <i>Cama caliente</i>	42
CAPÍTULO 4. COMUNICACIÓN, ADAPTACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS	44
4.1 COMUNICACIÓN SISTEMA DE CÓMPUTO – INTERFAZ	44
4.2 COMUNICACIÓN SISTEMA DE INTERFAZ – IMPRESIÓN	47
4.3 ADAPTACIÓN DEL EFECTOR FINAL	49
4.4 CALIBRACIÓN DE LA IMPRESORA.	50
CAPÍTULO 5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
5.1 PRUEBA 1. LÁMINA CUADRADA	56
5.2 PRUEBA 2. LÁMINA CUADRADA	57
5.3 PRUEBA 3. CAJA CUADRADA	58

5.4	PRUEBA 4. SÓLIDO CUADRADO	59
5.5	PRUEBA 5. LÁMINA CUADRADA	59
5.6	PRUEBA 6. CAJA CUADRADA	60
5.7	PRUEBA 7. SÓLIDO CUADRADO	61
5.8	PRUEBA 8. CAJA CUADRADA	62
5.9	PRUEBA 9. SÓLIDO CUADRADO	62
5.10	PRUEBA 10. CAJA TRIANGULAR	63
5.11	PRUEBA 11. SÓLIDO TRIANGULAR	64
5.12	APLICACIÓN SISTEMA EMBEBIDO	65
ÍNDICE DE FIGURAS		75
ÍNDICE DE TABLAS		78
ANEXOS		79
	ANEXO 1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ROBOT	79
	ANEXO 2: DIMENSIONES ESPECÍFICAS Y CAMPO DE TRABAJO DEL ROBOT	80
	ANEXO 3: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CONTROLADOR	83
	ANEXO 4: CONEXIONES RAMPS V1.3	86
	ANEXO 5. PLANOS	87
	ANEXO 6. ESPECIFICACIONES DEL MOTOR NEMA 17	95
	ANEXO 7. ESPECIFICACIONES DEL MECANISMO DE EXTRUSIÓN MK8	96
	ANEXO 8. ESPECIFICACIONES DE LA CAMA CALIENTE.	97
	ANEXO 9. PROGRAMAS PARA CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS.	98

Introducción

El presente trabajo forma parte de un proyecto dirigido por el Departamento de Ingeniería de Diseño y Manufactura de la División de Ingeniería Mecánica e Industrial (DIMEI), el cual busca adaptar el brazo robótico Scora ER14 como sistema de manufactura aditiva.

En el capítulo primero se presentan los antecedentes de la manufactura aditiva y de los brazos robóticos, las diferentes tecnologías existentes en este proceso de manufactura, los materiales que se pueden utilizar y la estructura básica de las impresoras que utilizan el modelado por deposición fundida. Adicional, se describen los conceptos básicos de robótica utilizados en este trabajo.

En el capítulo segundo se muestra el detalle funcional y estructural del robot Scora ER14, las especificaciones del controlador Eshed Robotec Controller-B ACL, así como el proceso de las reparaciones realizadas al robot.

En el capítulo tercero se describe el funcionamiento y los elementos que integran los sistemas principales para que el brazo robótico Scora ER14 se adapte y sea capaz de realizar el proceso de manufactura aditiva.

En el capítulo cuarto se dan a conocer los parámetros necesarios para que los elementos de cada sistema se integren y realicen su función adecuadamente, se muestra la forma en que interactúan los sistemas y de qué forma se comunica con el robot.

Finalmente, en el capítulo quinto se muestran los diferentes resultados que se obtuvieron de las impresiones realizadas, variando uno o más parámetros entre cada prueba.

Objetivo

Obtener una interfaz de comunicación digital-analógica para un proceso de manufactura aditiva en el brazo robótico Scora-ER 14®.

Objetivos específicos

1. Diseño y manufactura de superficie de impresión.
2. Acoplamiento del sistema de extrusión de plásticos al brazo robótico.
3. Configuración de software y parámetros de impresión.
4. Manufactura de piezas con geometrías básicas.

Hipótesis

Al final del proyecto se obtendrá un sistema de manufactura aditiva con tecnología FDM, producto de la adaptación de los elementos que conforman una máquina de impresión tridimensional y el brazo robótico Scora ER-14.

Se logrará establecer comunicación entre los sistemas diseñados mediante una interfaz que asocie las distintas tecnologías presentes, reduciendo la brecha existente debido a los avances y desarrollos tecnológicos alcanzados actualmente, permitiendo aprovechar al máximo los recursos presentes en el Laboratorio de Manufactura Avanzada para la implementación de los procesos de fabricación más recientes.

Justificación

Actualmente, la facultad cuenta con máquinas de manufactura aditiva comerciales, a las cuales se tiene acceso limitado para la comunidad universitaria, principalmente por el riesgo que conlleva un mal uso de los equipos; debido a que el costo de refacciones y reparación de estos equipos es elevado, un daño en ellos podría dejarlos inutilizables. Por tal razón, el presente proyecto busca acercar al alumno en el manejo de esta tecnología, aprovechando los elementos ya existentes en el laboratorio de manufactura avanzada e integrando un módulo de prototipado rápido en la celda de manufactura flexible, que permita su funcionamiento en un entorno didáctico, sencillo y robusto.

El diseño del mismo debe permitir que el usuario sea capaz de operar la máquina de forma fácil, sin requerir conocimiento previo en el área.

Al finalizar dicho proyecto, el brazo robótico debe ser capaz de imprimir figuras simples como cubos o prismas, permitiendo ampliar el alcance posterior a temas como el análisis y mejoramiento de la calidad.

Capítulo 1. Marco teórico

La manufactura aditiva es un proceso que ha cobrado mucha importancia en los últimos años, siendo las áreas de materiales y biomédica las que más han aprovechado los beneficios que ésta presenta frente a los otros métodos de manufactura. Inicia en 1983 con la invención de la Estereolitografía (SLA por sus siglas en inglés), posteriormente aparecen el Sinterizado Selectivo Laser (SLS por sus siglas en inglés) o cama de polvo, la Manufactura de Objetos Laminados (LOM por sus siglas en inglés) y finalmente el Modelado por Deposition Fundida (FDM por sus siglas en inglés). [1] [2] [3]

Esta se compone de tres actividades primordiales (figura 1), las cuales son:

- **Razonamiento del ser humano para decidir si este proceso de manufactura es el recomendable.** Existen diversas formas de manufacturar un modelo, para esto se deben considerar las propiedades físicas del material de construcción para considerarlo funcional.
- **Modelado de la pieza en software de cómputo.** Se debe utilizar un software para dibujar el modelo en tres dimensiones, que sea capaz de convertirlo en formato “.stl” ya que este formato segmenta el CAD en una colección de triángulos que facilitan su posterior traducción a código G. Se puede considerar como vista previa a lo que se desea manufacturar.
- **Maquinado.** Se crea el modelo a partir de la tecnología seleccionada, todas tienen diferentes especificaciones, lo cual también se debe tomar en cuenta en la decisión de fabricación.



Figura 1: Etapas de la impresión tridimensional

Actualmente se está utilizando esta tecnología para obtener modelos de bajo volumen, ya sea para mostrar una aplicación, estudiar geometrías o de forma permanente si el producto final soporta las condiciones a las que esté sometido.

1.1 Manufactura aditiva

La norma ISO/ASTM 52900:2015 define la manufactura aditiva como:

Proceso de unión de materiales para hacer piezas a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa por capa, en oposición a metodologías de fabricación sustractiva y de fabricación formativa. [4]

1.1.1 Antecedentes

Tiene orígenes en el año de 1983 cuando su creador Charles Hull (figura 2) inventa el proceso de Estereolitografía (patentado en 1984), siendo la primera tecnología de manufactura aditiva en ser comercial. Charles se vuelve co-fundador de la empresa *3D Systems®* y en 1986 se inicia la industria del prototipado rápido. [5]



Figura 2: Charles Hull, creador de la impresión tridimensional

En la línea cronológica (figura 3) se mencionan los sucesos más importantes en el área de la manufactura aditiva hasta 1993. [6]

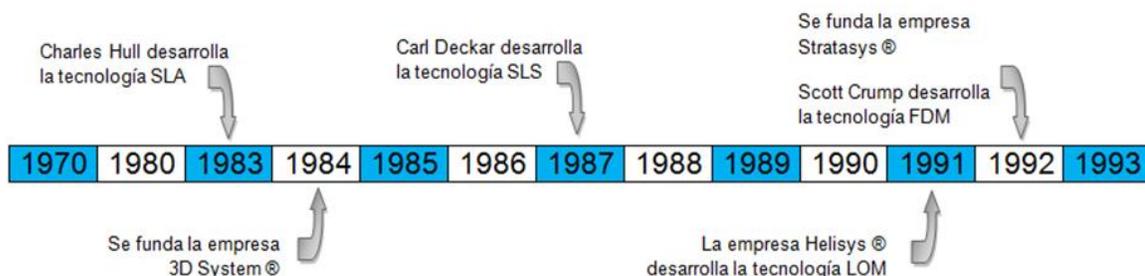


Figura 3: Desarrollo de la impresión tridimensional

A partir de entonces se lograran los siguientes avances: [7] [8]

- 1995. Desarrollo del Fundido Selectivo Laser (SLM por sus siglas en inglés) y de la inyección con aglutinante de metal (*Binder Jetting*).
- 2000. Se introduce la tecnología de fusión selectiva por láser.
- 2002. El Instituto de Medicina Regenerativa de la *Wake Forest University* imprime el primer órgano en 3D: Un riñón completamente funcional.
- 2005. Invención de la Fusión por haz de electrones (EBM por sus siglas en inglés).
- 2006. Sale al mercado un software de diseño patentado, basado en escaneado, para la ingeniería inversa.

- 2009. Sale al mercado el primer dispositivo en forma de kit.
- 2010. Inicia el desarrollo del prototipado rápido empleando materiales orgánicos como suministro.
- 2011. Inicia la aplicación de esta tecnología para fabricar alimentos.
- 2013. Se añade la manufactura directa en metal a las tecnologías existentes, siendo la Deposición Láser de Metal (LMD por sus siglas en inglés) la más reciente.
- 2014. La NASA envía a la Estación Espacial Internacional su impresora cero gravedad.
- 2016. En la Universidad de Connecticut se imprime el primer riñón artificial, este es capaz de filtrar las toxinas de la sangre.

Actualmente los proyectos de investigación están enfocados a optimizar las tecnologías existentes para garantizar la calidad y aprovechamiento máximo de los recursos que se emplean en la fabricación de productos, así como expandir los horizontes que actualmente se tienen, probando materiales inusuales u orgánicos para general utensilios de valor.

1.1.2 Categorías de la manufactura aditiva.

En general, se consideran siete tecnologías de manufactura aditiva, siendo la de extrusión de polímeros la más común y popular de todas ellas. Cada una está diseñada para aplicaciones y materiales diferentes, teniendo la posibilidad de utilizar polímeros, metales, cerámicos, resinas, entre otros. A continuación, se muestra el nombre general y una breve descripción de cada categoría: [9] [10]

EXTRUSIÓN DE MATERIAL. Las piezas se construyen capa por capa al calentar el material utilizado hasta un estado “casi” líquido y extruido según trayectorias controladas (figura 4). Esta tecnología es de bajo costo, permite la variedad de colores en un mismo

modelo y se puede utilizar en ambientes poco controlados. Se pueden utilizar filamentos termoplásticos, pellets y algunos metales.

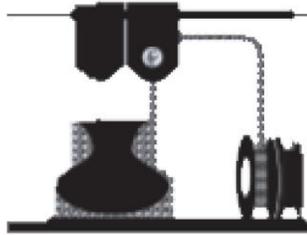


Figura 4: Extrusión de material.

FOTOPOLIMERIZACIÓN. Este proceso utiliza la exposición selectiva de luz (vía láser o proyector) para que la materia prima inicie la polimerización y solidifique las áreas afectadas (figura 5). Esta tecnología tiene alto nivel de precisión y complejidad, se puede utilizar para modelos de gran tamaño y es de acabado superficial suave. Se utilizan únicamente resinas fotocurables UV.

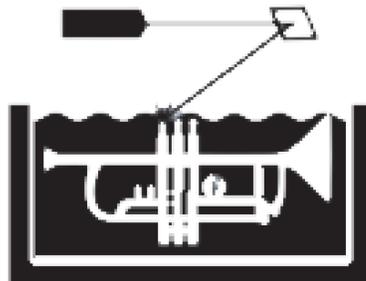


Figura 5: Fotopolimerización.

INYECCIÓN DE MATERIAL. La tecnología es similar a la impresión por inyección de tinta, pero en vez de suministrar gotas de tinta en papel estos equipos inyectan chorros de resina fotocurable y curado con rayos UV o materiales fundidos que después solidificarán a temperatura ambiente (figura 6). Esta tecnología cuenta con alto nivel de preci-

sión, permite piezas de varios colores, así como múltiples materiales en un solo modelo. Los materiales más comunes son fotopolímeros, polímeros y ceras.

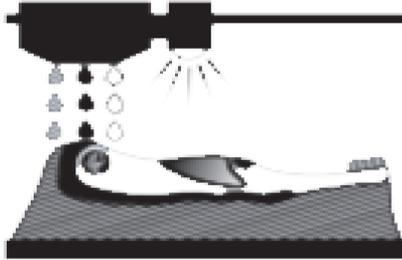


Figura 6: Inyección de material.

FUSIÓN DE LECHO DE POLVO. Esta técnica utiliza una fuente de calor de alta potencia para fundir pequeñas partículas de materia prima pulverizada creando así modelos tridimensionales (figura 7), el polvo no fundido que rodea la pieza sirve como material de soporte. Su característica principal es que se puede utilizar con amplio rango de materiales; polímeros, metales, polvos cerámicos y arena.

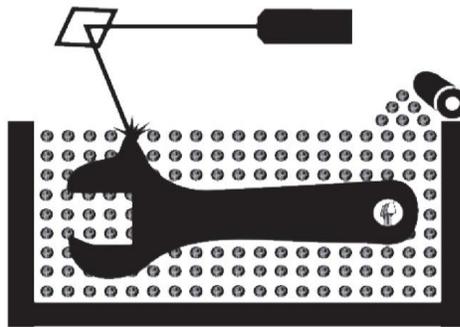


Figura 7: Fusión de lecho de polvo.

LAMINACIÓN DE HOJAS. En este método las láminas de material se fusionan en conjunto utilizando adhesivos, químicos, soldadura ultrasónica o soldadura con bronce, dependiendo el material que se esté utilizando, luego se cortan las zonas no deseadas capa por capa, para ser retiradas cuando el modelo esté terminado (figura 8). Esta tecnología permite la producción en masa bajando los costos de fabricación (únicamente para políme-

ros y papel) y facilita la obtención de componentes embebidos. La materia prima con la que se puede utilizar esta tecnología es papel, polímeros y metal.

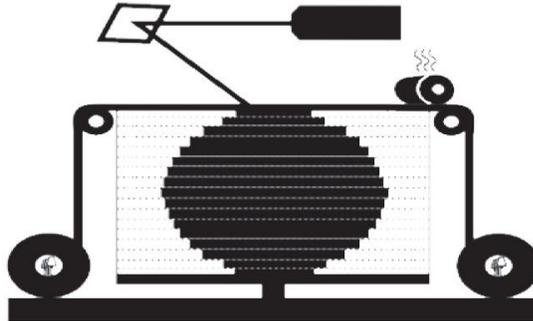


Figura 8: Laminación de hojas.

DEPOSICIÓN DIRECTA DE ENERGÍA. Esta tecnología emplea fuente de energía de alta potencia, como láser o haz de electrones, que funde capa por capa la materia prima que se va alimentando (figura 9), el proceso es, en esencia, una forma de soldadura. Esto produce modelos extremadamente densos y fuertes, teniendo tasas de deposición más altas en un punto único, volviéndolo efectivo para reparaciones o adiciones. Los materiales utilizados son polvo o alambre metálico.

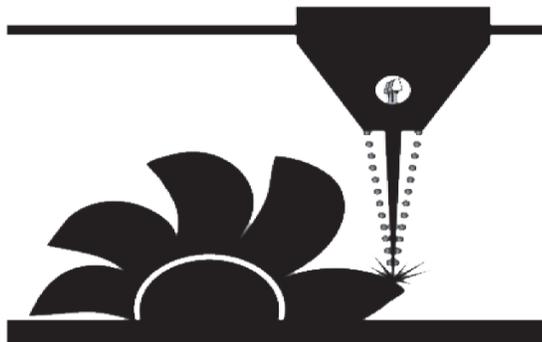


Figura 9: Deposición directa de energía

INYECCIÓN POR AGLUTINANTE. Esta técnica deposita el polvo de la materia prima en delgadas capas y un aglutinante es expulsada del cabezal de impresión, para que cada capa quede adherida a la anterior (figura 10). El producto es bastante frágil porque

está lleno de aire y es muy poroso, por lo que debe ser sometido a un proceso de curado donde se evapora la humedad y endurece la unión de las capas. También se puede introducir material de relleno como el bronce para aumentar su resistencia. El método permite alta productividad y se puede utilizar con amplio rango de materiales; polímeros, metales, cerámicos, vidrio y arena (todos presentados en polvo).

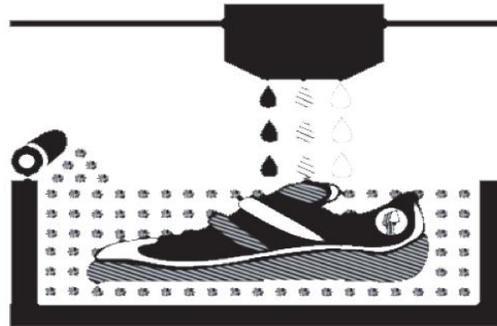


Figura 10: Proceso EBM

HIBRIDOS. Existen tecnologías híbridas como la AMBIT (figura 11), la cual deposita la materia prima por medio de la deposición directa de energía mediante un mecanizado CNC, permitiendo tener manufactura aditiva y sustractiva en una misma máquina. Esto permite tener procesos automáticos, elimina el tiempo utilizado en cambiar el modelo de una máquina a otra y se obtienen piezas finales sin procesos adicionales.



Figura 11: Tecnologías híbridas.

Gracias a estas tecnologías ahora es posible fabricar piezas con geometrías complejas (figura 12) dotadas de excelentes propiedades físicas, que hace 30 años eran inimaginables.

También facilita la elaboración de piezas, en baja producción, que antes era muy complicado de elaborar aun con las máquinas CNC más recientes del mercado.



Figura 12: Elaboración de piezas complejas

1.1.3 Materiales empleados.

La manufactura aditiva utiliza una gran cantidad de insumos para producir objetos que van desde herramientas y prototipos hasta alimentos y órganos funcionales. En la primera columna de la Tabla 1 se presentan los principales tipos de impresión, en la segunda la tecnología disponible para cada tipo específico y en la tercera columna los materiales empleados en ellas. [11] [12]

Tabla 1: Tecnologías de impresión 3D y materiales empleados

Tipo	Materiales
Extrusión de material	Termoplásticos
	Metales y aleaciones
	Materiales comestibles
	Orgánicos
Laminación de hojas	Papel
	Metal
	Polímeros
Fotopolimerización	Resina fotocurable

Inyección de materiales	Fotopolímeros
	Ceras
	Polímeros
Deposición directa de energía	Polvos
	Alambre metálico
Fusión de lecho de polvo	Polímeros
	Metales
	Polvos cerámicos
	Arena
Inyección por aglutinante	Polímeros
	Metales
	Cerámicos
	Vidrio

Termoplásticos más comunes:

- Policarbonato
- ABS
- PLA

Metales y aleaciones:

- Acero inoxidable y herramental
- Aluminio

Fotopolímeros más comunes:

- Polipropileno
- ABS Digital
- Resinas compuestas
- Titanio
- Cobalto-cromo
- Níquel-cromo

Es importante considerar que las características y aplicación que tendrá el modelo definen el tipo de tecnología a emplear, así como el material adecuado para su correcto funcionamiento. El costo de producción está determinado por estos aspectos, sin embargo, hace falta considerar las dimensiones del producto y el tiempo empleado en la fabricación del mismo.

1.1.4 Componentes de una máquina de manufactura aditiva por FDM.

Existen una gran cantidad de máquinas de prototipado rápido por FDM, siendo las más comunes las de movimiento en paralelo debido a que su desplazamiento por los tres ejes los realiza de forma simultánea, pero en general se considera que cualquiera de ellas está compuesta por los siguientes subsistemas: [13]

Subsistema A. Estructura y sistema de movimiento.

La estructura tiene como función proporcionar soporte a los componentes móviles y estáticos y asegurar que estos mantengan una alineación adecuada. Por otro lado, el sistema de movimiento está conformado por los ejes X-Y-Z y los sistemas de guiado que permitirán al equipo seguir la trayectoria adecuada para fabricar el modelo (figura 13).

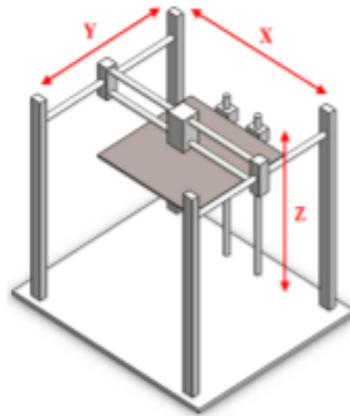


Figura 13: Sistema de movimiento general de una impresora tridimensional.

Subsistema B. Mecanismos de transmisión.

Es el responsable de transmitir el par de los motores a los elementos móviles que realizan la tarea de manufactura. Las distintas tecnologías empleadas para este fin incluyen elementos como: actuadores, poleas–correas de sincronización, tornillo-tuerca, piñón-cremallera entre otros.

Subsistema C. Mecanismo de extrusión.

Es el subsistema crítico de la máquina, debido a que de él dependerá la calidad del modelo, la cual está en función de parámetros como la velocidad y temperatura del mismo, así como de las dimensiones del diseño.

Subsistema D. Base de deposición.

Es la superficie sobre la cual se depositan las capas de material extruido durante la fabricación. Dependiendo el modelo de la impresora, la base puede estar conformada por una cama caliente que ayuda a mejorar la adherencia entre los filamentos extruidos.

Subsistema E. Electrónica.

Son los componentes electrónicos que conforman los circuitos del dispositivo. Está integrado principalmente por elementos eléctricos (resistencias, capacitores, interruptores) y electrónicos (diodos, transistores, circuitos integrados, microcontroladores y sensores).

Subsistema F. Sistema de control.

Permite llevar a cabo la interpretación y transformación de la información digital que proporciona la computadora. Funciona como un enlace entre el software de diseño y los elementos mecánicos de la impresora (figura 14).

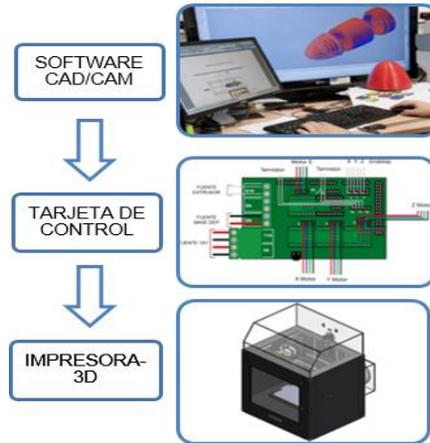


Figura 14: Función del sistema de control en el proceso de impresión 3D.

1.2 Brazos robóticos

Para establecer una definición de brazo robótico es conveniente separar las palabras que lo integran y conocer el significado de cada una.

La norma ISO 8373:2012 define *robot* como: [14]

Mecanismo accionado programable en dos o más ejes con un grado de autonomía, moviéndose dentro de su entorno, para realizar las tareas previstas.

Y la definición de *robot industrial* proporcionada por la misma norma indica que es:

Manipulador multifuncional, controlado automáticamente, reprogramable en tres o más ejes, que puede estar fijo o móvil para uso en aplicaciones de automatización industrial.

El diseño de este mecanismo hace referencia al miembro superior de la anatomía humana que está integrado por el brazo, antebrazo y la mano. Las partes importantes a considerar son las articulaciones conformadas por: hombro, codo y muñeca (figura 15).

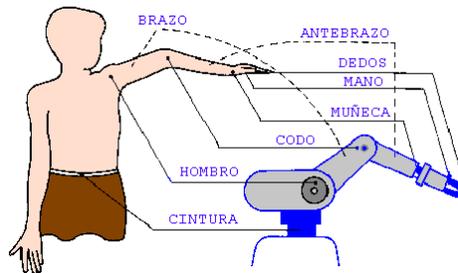


Figura 15: Partes de un brazo robótico y su equivalente en la anatomía humana

Entonces, un brazo robótico es un tipo de robot con funciones similares a las de un brazo humano, el cual puede ser la suma total del mecanismo o formar parte de una máquina más compleja. Sus componentes están interconectados a través de juntas mecánicas (también llamados pares cinemáticos), permitiendo movimiento rotacional y traslacional.

1.2.1 Antecedentes

La robótica ha estado presente prácticamente desde el inicio de la civilización, donde se mencionan míticos seres mecánicos dotados de vida. Los griegos diseñaron y construyeron figuras que podían moverse usando poleas y sistemas hidráulicos con fines artísticos y estéticos, pero sobretodo, religiosos. Sin embargo, los griegos no desarrollan la robótica para alcanzar el objetivo principal que ésta persigue: satisfacer una necesidad por medio del uso de la tecnología. [15]

La civilización árabe concibe el primer robot como un elemento para el confort del ser humano. Como ejemplo está la “Fuente del Pavo Real” (figura 16). Este invento es un lavamanos capaz de medir el nivel de agua vertida en un recipiente para que, al alcanzar un

cierto umbral, apareciera una figura con forma de sirviente portando jabón. Después de cierto tiempo el mecanismo era accionado para que una segunda figura apareciera portando una toalla. [16]

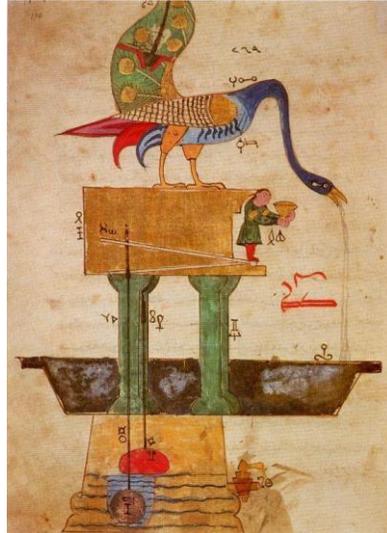


Figura 16: Fuente del Pavo Real, antecedente de los robots modernos.

Durante el Renacimiento y gracias a los estudios de anatomía humana que realizaron Leonardo Da Vinci y otros científicos, se aportó un valioso conocimiento para desarrollar de forma más eficiente la mecánica del robot, principalmente en el diseño y construcción de juntas y articulaciones y en el desarrollo modular de máquinas complejas.

En 1800 surge de manera científica el concepto de autonomía y con él la inteligencia artificial. Sin embargo, el término robótica aparece en Praga durante el año 1921, y es acuñado por el escritor checo Karel Capek, en su obra *Rossum's Universal Robots*. El término deriva de la palabra checa *robot*, que define un trabajo forzado o de carácter feudal. La robótica, como ciencia que estudia el robot y su uso, se concibió en 1942 cuando el escritor ruso Isaac Asimov escribió el relato corto *Runaround*. [17]

Hoy en día, los robots han alcanzado un alto grado de desarrollo y sofisticación, pero la flexibilidad operativa de éstos aun es limitada, lo que motiva la creación de herramientas más versátiles para lograr realizar tareas más complejas y, por tanto, ocupar mayor cantidad de espacios en áreas como la industria, la medicina y la recreación.

1.2.2 Conceptos básicos de robótica

Actualmente la robótica es un área en desarrollo y descubrimiento. Día con día se realizan nuevas aportaciones al campo de estudio de la misma y, por tanto, no se ha logrado una unificación de los conceptos, dada la gran cantidad de investigaciones realizadas. En el presente escrito vamos a considerar lo siguiente.

Un robot está formado por los siguientes elementos:

- **Estructura mecánica.** Serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos.
- **Transmisiones.** Son los elementos encargados de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones. Incluye también a los reductores, encargados de adaptar el par y la velocidad de la salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot.
- **Sistema de accionamiento.** Conformado por los actuadores, los cuales pueden ser de diversos tipos como son: hidráulicos, neumáticos o eléctricos. La aplicación del robot determina las características requeridas y por tanto la presencia o ausencia de ciertos tipos de actuadores.

- **Sistema sensorial.** Permite al robot obtener información relacionada con su estado (fundamentalmente la posición de sus articulaciones) así como de su entorno. Los más utilizados son: de posición, velocidad y presencia.
- **Sistema de control.** Constituido por software y dispositivos electrónicos, es el encargado de recibir, interpretar y enviar al sistema de accionamiento las instrucciones que el operador programa a través de un equipo de cómputo.
- **Elementos terminales.** Conocidos también como efectores finales, son los encargados de interactuar directamente con el entorno del robot. Estos pueden ser tanto elementos de sujeción como herramientas. Muchos de ellos son diseñados para realizar una función específica.

Otro concepto importante es el de grados de libertad (GDL) ya que es el número de parámetros independientes que se requieren para definir de manera única la posición en el espacio en cualquier instante de tiempo (figura 17). Aplicándose al análisis de un brazo robótico, los grados de libertad se pueden dividir en: [18]

Grados de libertad principales. Son los tres primeros grados de libertad que definen la posición. Establecen el espacio de trabajo donde el robot puede moverse y se controlan mediante los actuadores situados en el cuerpo del mismo.

Grados de libertad redundantes. Se localizan cerca del punto central de la herramienta utilizada y sirven como “muñeca” del robot. Controlan la pinza u orientación de la herramienta.

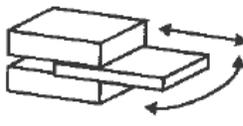


Figura 17: Brazo robótico de 6 GDL.

El concepto de GDL está asociado al de junta cinemática o par cinemático, que se define como la unión entre dos piezas rígidas que permite el movimiento relativo entre ellas. Existen seis tipos de pares, pero generalmente en robots manipuladores solo se utilizan dos de ellos: rotación y prismático. La Tabla 2 muestra en la primera columna los distintos tipos de pares cinemáticos existentes y los grados de libertad que tienen asociados, así como una ilustración de cada uno de ellos. [19]

Tabla 2: Tipos de pares cinemáticos

Junta cinemática	GDL	Esquema
Rotación	1	
Prismática	1	
Helicoidal	1	
Cilíndrica	2	

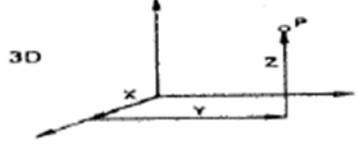
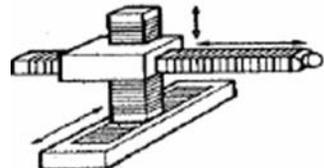
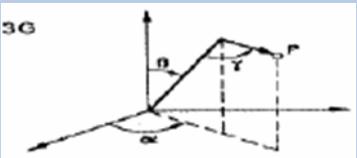
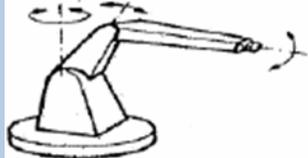
Planar	2	
Esférica (rotula)	3	

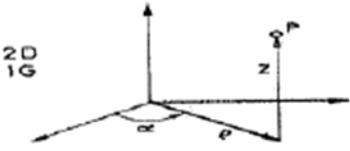
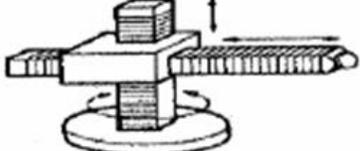
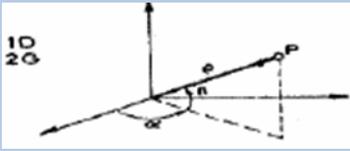
El movimiento del robot se logra al accionar al menos tres ejes, por lo tanto, existen cuatro tipos de sistemas de coordenadas que se utilizan para su análisis:

- Cartesiano: 3 ejes de traslación
- Angular: 3 ejes de rotación
- Cilíndrico: 2 ejes de traslación más 1 eje de rotación
- Esférico: 1 eje de traslación y 2 de rotación

Los diferentes tipos de sistemas de coordenadas con **los** parámetros más importantes de cada uno de ellos se muestran en la Tabla 3. [20]

Tabla 3: Tipos de sistemas coordenados

Sistema de coordenadas	Representación	Ejemplo
Cartesiano		
Angular		

Cilíndrico		
Esferico		

El conjunto de puntos que puede alcanzar el elemento terminal del robot se conoce como: espacio de trabajo. Este espacio está restringido por:

- Configuración física del robot.
- Dimensiones de los componentes del cuerpo, brazo y muñeca.
- Límites de movimiento de las articulaciones del robot.

La comunicación y el control se llevan a cabo mediante el uso de un dispositivo llamado controlador. Este proporciona la “inteligencia” necesaria para que el robot actúe conforme a las indicaciones del operador (figura 18). Consiste en: [21]

- Almacenamiento de información en la memoria como posiciones prefijadas o un programa.
- Interpretación de datos por medio del secuenciador.
- Procesamiento de la información obtenida (a través de cálculos) en el CPU.
- Obtención de datos del entorno mediante sensores o sistemas de visión.
- Regulación del movimiento de los actuadores.
- Comunicación auxiliar con unidades externas o dispositivos de control.

- Aprendizaje de posiciones u operaciones a partir de una consola o botonera.

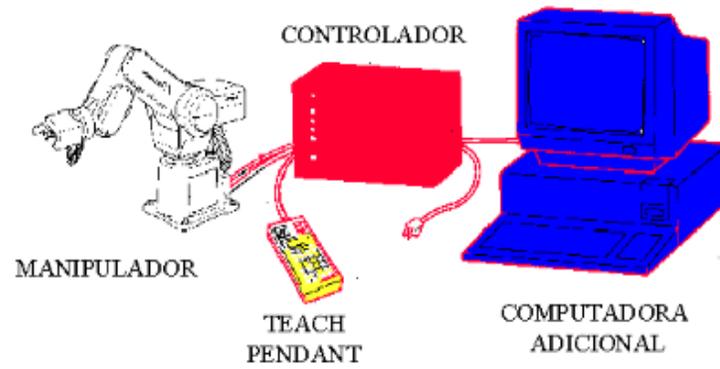


Figura 18: Sistema de control de un brazo robótico.

Capítulo 2. Equipo utilizado

Para el desarrollo del proyecto, se utilizó el brazo robótico *Scora ER14* con el controlador *Eshed Robotec Controller-B ACL*. Se eligió este robot por la longitud y estabilidad que tiene del centro de la base al centro del efector final, aumentando el área de impresión respecto a los equipos comerciales, obteniendo modelos de gran tamaño en una sola pieza, estos actualmente se tienen que dividir en dos o más partes y después ser ensamblados, complicando el diseño ya que se deben de tener consideraciones de diseño por ensamble.

2.1 Scora ER 14

La arquitectura mecánica de este robot manipulador es del tipo SCARA (*Selective Compliant Assembly Robot Arm* por sus siglas en inglés), el cual posee una configuración plana que les proporciona sencillez desde el punto de vista cinemático, así como velocidad y precisión en tareas de manipulación e inserción. La figura 19 muestra los diferentes elementos mecánicos que propician su funcionamiento. [22]

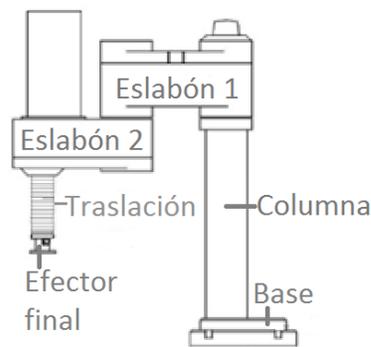


Figura 19: Elementos mecánicos del robot

El movimiento de los ejes del robot se especifica en la Tabla 4, los dos primeros y el último (rotacionales) determina la posición del efector final en el plano XY y el tercero (traslación) determina la altura del mismo elemento, en la figura 20 se muestra la posición de los ejes.

Se debe considerar por separado la altura del efector final, de no hacerlo pueden ocurrir impactos inesperados en este, afectando la herramienta o el trabajo que se esté realizando.

Tabla 4: Movimiento de los ejes del robot

Número de ejes	Movimiento	
1	Eslabón 1	Rotación en el plano horizontal (XY)
2	Eslabón 2	Rotación en el plano horizontal (XY)
3	Efector final	Traslación en el eje vertical (Z)
4	Efector final	Rotación en el plano horizontal (XY)

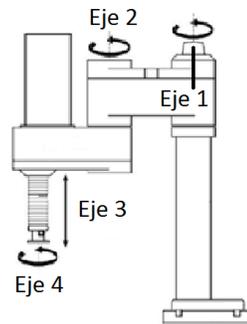


Figura 20: Posición de los ejes

Las especificaciones técnicas se detallan en la Anexo 1, donde se mencionan la longitud de los eslabones, los grados máximos de las rotaciones de cada eje, los elementos terminales que tiene de fábrica y la carga máxima que soporta el efector final [23]. Esta información es de utilidad para delimitar el campo de trabajo del robot y no sobrecargar el efector final, ya que puede realizar movimientos incompletos o dañar alguno de los motores. En el Anexo 2 se muestran imágenes con dimensiones específicas del robot en vista lateral y superior, así como el campo de trabajo del robot desde la vista superior.

Los cuatro ejes del robot son operados por motores de DC, estos actuadores convierten las señales del controlador (energía eléctrica) en rotaciones del eje del motor (energía mecánica). La Tabla 5 muestra las especificaciones de los motores del robot las cuales deben to-

marse en cuenta para evitar calentamientos y sobrecargas. En la figura 27 se muestra la ubicación de los mismos, la cual es importante conocer para verificar el estado en que se encuentran, junto con los sensores y demás componentes que intervienen en el movimiento. Cada motor lleva instalado un *encoder* para su control en lazo cerrado.

Tabla 5: Especificaciones de los motores del robot

Especificaciones	Motor Eje 1 y 2	Motor Eje 3 y 4
Par máximo	1.01Nm	0.2Nm
Par con fricción	0.23Nm	0.9Nm
Velocidad máxima	4000rpm	4500rpm
Peso	1.29kg	0.28kg

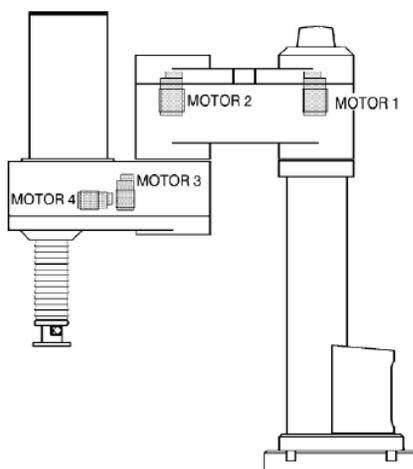


Figura 21: Ubicación de los motores

El robot también posee microinterruptores (final de carrera) que se utilizan para limitar el movimiento de los eslabones y para la posición *Home* del robot. El interruptor es parte de un circuito eléctrico del brazo del robot y es independiente del controlador, esto con la finalidad de evitar colisiones o daño en algún motor que excede su área de trabajo.

2.2 Controlador Eshed Robotec Controller-B ACL

Para operar el robot es necesario contar con un dispositivo específico, para el Scora ER14 se utiliza el *Eshed Robotec Controller-B ACL* versión 1.9 (figura 28) el cual establece la comunicación entre el brazo robótico y la computadora mediante el software *ATS*. En el Anexo 3 se muestran sus especificaciones, donde se destaca el tipo de movimiento que proporciona al robot, la velocidad, los parámetros de control, el lenguaje de programación, el sistema de posicionamiento y el sistema de coordenadas. [24]

El controlador permite al robot desarrollar siete tipos de rutas, destacando la de punto a punto y la trayectoria continua. El controlador recibirá las instrucciones de la trayectoria, las cuales interpretará a través del lenguaje de programación y moverá los ejes 1 y 2 hasta las coordenadas en el plano XY que hayan sido recibidas, la velocidad del movimiento es controlable en porcentaje del total.



Figura 22: Controlador Eshed Robotec Controller-B ACL

2.3 Reparaciones realizadas

Como parte del desarrollo del proyecto, se tuvo la necesidad de realizar diversas reparaciones al brazo robótico las cuales se encuentran divididas en 4 fases: reparación eje 3 y 4, reparación eje 1 y 2, reparación eje 2, mantenimiento general del sistema. Estas reparaciones fueron surgiendo de forma intermitente, por este motivo no se podía realizar una sola reparación general.

2.3.1 Primera fase: Reparación eje 3 y 4.

Esta primera fase se llevó a cabo al inicio, en las pruebas iniciales y familiarización con el ambiente de trabajo, se descompusieron simultáneamente estos dos ejes. Surgiendo esta primera necesidad, se decidió desmontar completamente el efector final y el elemento dedicado a la traslación.

Después de revisar el funcionamiento de estos dos elementos, se detectó que los problemas eran:

- **Nula captura de datos por el *encoder* óptico 4**, figura 23. Para determinar donde se encontraba el problema, se realizó un escaneo en la comunicación del controlador y el *encoder* sin tener éxito, posteriormente se decidió revisar si el disco ranurado se encontraba en condiciones óptimas para desempeñar su función y si existía continuidad en el *IR LED* y el fototransistor (encargados de mandar señal cada que se detecta una interrupción entre ellos), obteniendo como resultado que el fototransistor tenía un cable careciente de conexión. Se procedió a investigar en donde debería hacer contacto y se colocó en el lugar correcto para obtener nuevamente la información necesaria.

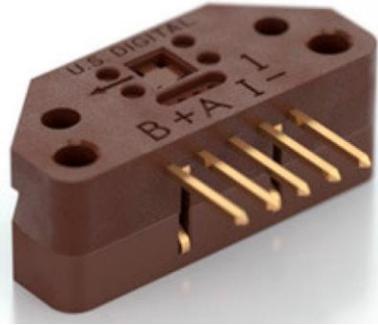


Figura 23: *Encoder* óptico incremental

- **Desbocamiento de la traslación en el tren superior**, figura 24. En esta parte del robot existen dos elementos de control, el primero que se encarga de avisar al controlador cuando la traslación se encuentra en el límite superior (sensor infrarrojo) y el segundo para detener de emergencia el motor 3 (*switch* fin de carrera), evitando colisiones del efector final con el eslabón 2. Al comienzo se creía que se tenía el mismo problema que en el *encoder*, pero se determinó lo contrario debido a que se detectó luz en *IR LED* y cuando se interrumpía la señal este tenía un diferencial de voltaje, lo que indica su correcto funcionamiento. Analizando más a detalle su funcionamiento se detectó que el problema era causado por una falla física, ya que la pestaña encargada de obstruir la señal en el sensor infrarrojo no se encontraba en la posición correcta. Bastó con ubicarlo correctamente y hacer suficientes pruebas para determinar si la pestaña se traslada de lugar con el uso o si estaba asegurada incorrectamente, después de 50 pruebas se determinó que fue un incidente ocasional y difícilmente llegará a ocurrir nuevamente.



Figura 24: Tren superior de la traslación

2.3.2 Segunda fase: Reparación eje 1 y 2.

Al estar realizando las pruebas para verificar el funcionamiento de las reparaciones realizadas, se comenzaron a presentar fallas en el eje 2 e inmediatamente después en el eje 1. Realizando un análisis funcional a los elementos externos del robot, se decidió desarmar completamente el mismo para realizar estudios en los elementos internos y la electrónica, ya que no se encontró ninguna falla externa.

Las fallas presentadas eran causadas por un HCF4050BE (hexa buffer no inversor, figura 25), montado en la tarjeta Eshed Robotec PC-4000 (figura 26), quemado y con las pistas de conexión discontinuas, posiblemente causado por una sobre carga eléctrica.



Figura 25: HCF04050BE



Figura 26: Eshed Robotec PC-4000

Lo que causaba esta falla era que el *encoder 2* llegara a su cuenta máxima y al no recibir el motor 2 señal de alto se aceleraba causando colisión del eslabón 2 con el eslabón 1, deteniendo de forma brusca y repentina la trayectoria del robot. Otra falla originada por el problema descrito anteriormente era que el eslabón 1 no encontraba su límite y éste continuaba su movimiento hasta que se realizara un paro de emergencia de forma manual, además de que se salía de sus referencias y había que calibrarlo cada que ocurría esta situación.

Al examinar la placa, se notaba claramente que ya habían sido reparar con anterioridad sin lograrlo correctamente, lo que nos indica que este problema es recurrente y se debe de poner atención en él para no dañar al robot. El componente en mal estado se reemplazó por uno similar y se rehicieron las pistas que no tenían continuidad, se limpió la placa retirando el exceso de polvo y se colocó nuevamente en su lugar, con las conexiones correspondientes para verificar el funcionamiento de los ejes en cuestión.

2.3.3 Tercera fase: Reparación del eje 2.

Esta reparación fue la más difícil de identificar, ya que en un principio se había detectado que el problema se encontraba en la homologación de las tierras; tanto de la computadora, como del controlador y del robot en general. Después de realizar esta homologación funcionó con un detalle mínimo por un par de días; este era que a la mitad del recorrido se detenía momentáneamente y después realizaba un salto continuando con normalidad, al realizar el mismo recorrido en sentido contrario, se notaba que ocurría lo mismo, pero en diferente punto. Al no considerarlo normal, se decidió desarmar por tercera ocasión el robot y revisar que el lugar donde se habían acomodado los cables y la tarjeta no afectaran al recorrido del mismo, de esta forma se fueron descartando posibles problemas, se fue profundi-

zando y desarmando el robot. El problema se localizaba en la zona donde se realiza el movimiento de rotación, se encontró un tornillo de una pulgada que obstaculizaba el desplazamiento y estaba generando desgaste en el disco.

2.3.4 Cuarta fase: Mantenimiento general del sistema.

Este mantenimiento se realizó como continuación de la homologación de tierras y la limpieza de la tarjeta que se encontraba en el eslabón 2. Antes de la cuarta fase se tenían identificados tres inconvenientes que no requerían de demasiada atención.

- **Desconexión de la computadora con el controlador.** Esta desconexión no generaba tanto problema y era fácil de arreglar, ya que bastaba con reconectar el cable de datos y generar la conexión.
- **Fallo en los fusibles del controlador.** Al indicarle al robot que realizara un movimiento largo o donde se involucraran varios ejes al mismo tiempo, este demandaba demasiada corriente y los fusibles se quemaban. Notamos que esto no era normal ya que el robot está diseñado para trabajar de forma continua en un determinado volumen, el cual no se estaba excediendo.
- **Comunicación del robot con el controlador.** Aunque ya se hubiera generado comunicación, era muy simple que esta se perdiera por algún movimiento de la mesa o del mismo robot. También el controlador olvidaba las configuraciones iniciales y con ellas los programas guardados en su memoria.

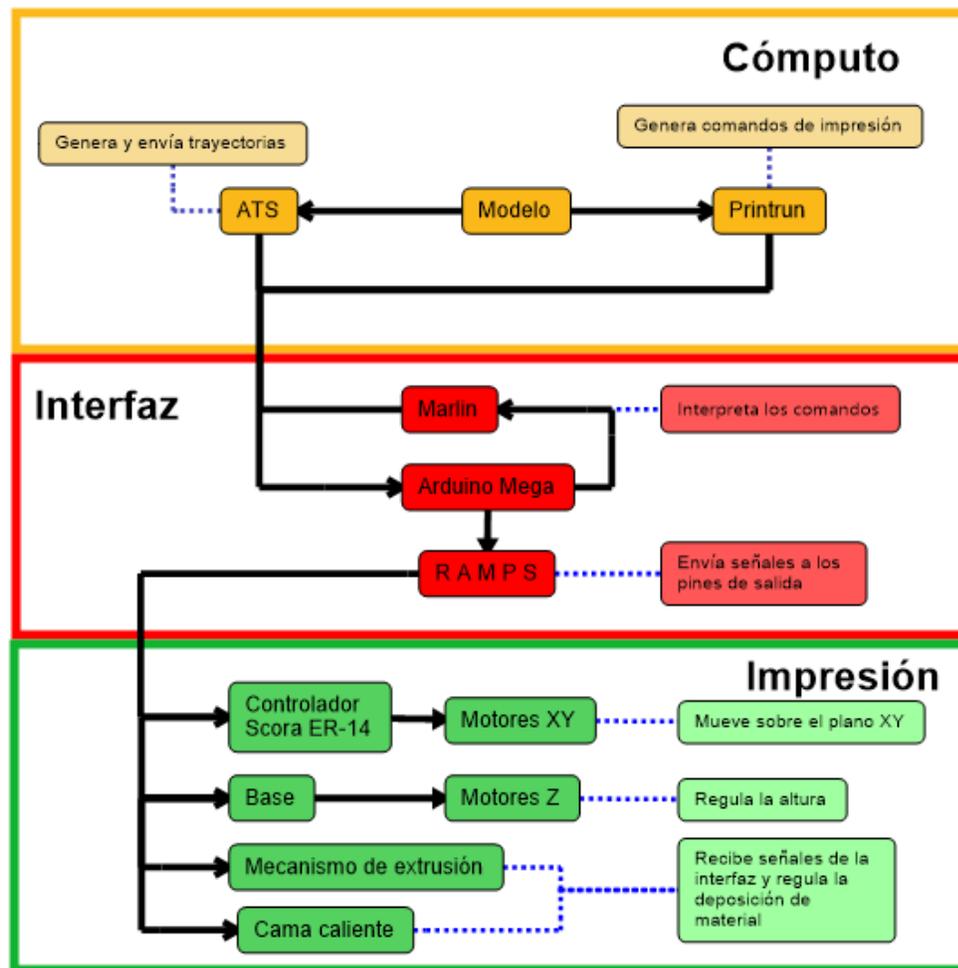
Esto se resolvió quitando el exceso de polvo que existía en el controlador, generando que se sobrecalentara y ocurrieran los errores antes mencionados, esta limpieza sirvió no solo para

tener comunicación estable, sino para que se lograran guardar puntos, trayectorias y programas en la memoria del controlador.

Capítulo 3. Sistemas de la impresora

El presente proyecto utiliza los elementos de la tecnología FDM como base de desarrollo. Esto se debe a la facilidad para acceder a los componentes que utilizan estos equipos y a lo práctico que resulta su ensamble. En este capítulo se muestran los sistemas involucrados, los cuales son: cómputo, interfaz e impresión. A su vez, están subdivididos para precisar los elementos que los conforman y las funciones que desempeñan.

La interacción entre los sistemas es de forma unidireccional, existiendo realimentación por sistema únicamente. En la figura 27 se aprecia con claridad la forma en que los sistemas envían y reciben información entre ellos, para interpretarla y realizar las funciones específi-



cas que tienen asignadas.

Figura 27: Interacción entre sistemas

3.1 Sistema de cómputo

Este sistema tiene tres funciones diferentes: cargar el modelo, generar las trayectorias y enviar la información al siguiente sistema. Para realizar esta función se utilizan dos programas de software libre: *Printrun* y *ATS*.

3.1.1 Printrun

Printrun (figura 28) es un software gratuito de código abierto, fue creado por Kliment Yanev en el 2012, [25]. El programa está integrado por diversos elementos, siendo *Pronterface* el más robusto. Puede realizar diferentes operaciones, siendo las más importantes: configurar los parámetros de la impresora, establecer conexión con la misma, controlar el movimiento de los ejes, establecer la temperatura del extrusor y cama caliente, establecer la cantidad de filamento, así como la velocidad de extrusión y mostrar vistas previas de la impre-



sión.

Figura 28: Printrun

3.1.2 ATS

El software de terminal avanzado (ATS por sus siglas en inglés) mostrado en la figura 29, permite la programación y configuración del controlador para accionar el brazo robótico desde un equipo de cómputo [26]. Utiliza comandos ASCII, trabajando a 9600 baudios (Numero de símbolos transmitidos por segundo) y 8 bits de datos. Entre sus funciones des-

tacan el movimiento de los ejes, así como la elección de velocidad de desplazamiento, grabado de posiciones, programación de trayectorias, gestión de recursos de memoria y la compatibilidad con distintos modelos de brazos robóticos.

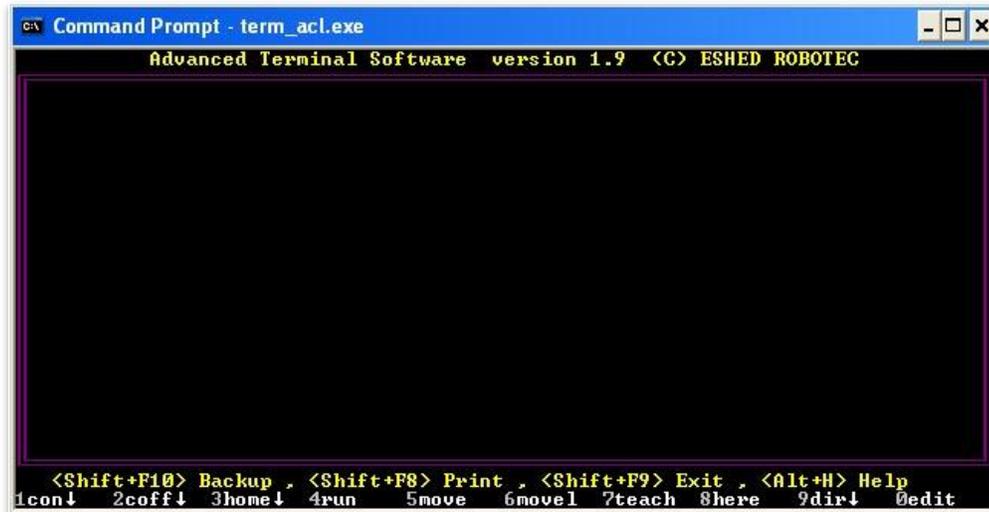


Figura 29: Ventana principal del software ATS

3.2 Sistema de interfaz

La interfaz está compuesta por tres elementos: la tarjeta de desarrollo Arduino Mega, el *Shield* RAMPS V1.3 y el programa Marlin, los cuales están encargados de traducir las instrucciones del software y enviar las señales a los pines de salida donde van conectados los motores del eje Z, el extrusor y la cama caliente, así como los comandos programados en el software ATS para el controlador del Scora ER-14.

3.2.1 Arduino Mega

Es una tarjeta *open-source* (figura 30) construida con un microcontrolador modelo Atmega2560, se programa en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje *Processing/Wiring*. Se puede utilizar en objetos interactivos autónomos o comunicarse a través del puerto serial (conversión con USB) con una computadora [27]. Se encarga de la comunica-

ción entre la computadora y el programa albergado en el microcontrolador, para después enviar señales discretas a los puertos de salida de la tarjeta y así controlar los motores.



Figura 30: Arduino Mega

3.2.2 Marlin

Es el *firmware* de código abierto con la comunidad más activa de desarrolladores (figura 31), dedicado a la traducción de trayectorias y a la configuración de los parámetros necesarios para el correcto funcionamiento de cada impresora 3D. Tiene la capacidad de mover los motores correspondientes al sistema cartesiano, extrusor, cama caliente, ventilador y tomar las lecturas de los termistores para tener la temperatura ideal. Cuenta con un sistema de planificación de velocidades, esto sirve para conseguir el acabado que se le está pidiendo a la máquina; lo logra calculando la aceleración ideal en el principio y fin de cada sección recta, teniendo en cuenta el comando anterior y el comando siguiente.



Figura 31: Firmware Marlin

3.2.3 RAMPS V1.3

Es una placa modular (figura 32), se coloca encima del Arduino Mega para otorgarle funcionalidades extras. Permite la conexión de diferentes elementos (Anexo 4) de la impresora 3D, siendo estos: el motor del eje X, el del eje Y, dos motores para el eje Z, los finales de carrera para cada motor, dos motores para extrusión, dos calentadores de extrusión, los respectivos termistores para tomar las temperaturas, una cama de calentamiento y el termistor para la misma.



Figura 32. RAMPS V1.3

3.3 Sistema de impresión

Los elementos que lo componen son el robot Scora ER-14, su controlador, la base de apoyo, la cama caliente y el extrusor. El funcionamiento adecuado de sus partes permite obtener modelos cuyas características varían de acuerdo a ciertos parámetros como son la velocidad de desplazamiento, la temperatura de extrusor y de cama caliente y la altura entre capas, solo por mencionar algunos.

3.3.1 Base

Se diseñó una base o mesa de apoyo (figura 33) que define el campo de trabajo de la impresora, también será donde descansa la cama caliente y sobre ésta el modelo a fabricar. Se optó por este aspecto debido a la naturaleza del movimiento del robot, ya que este se mueve de forma radial, teniendo así mayor área de trabajo y menor volumen total del robot como impresora 3D.

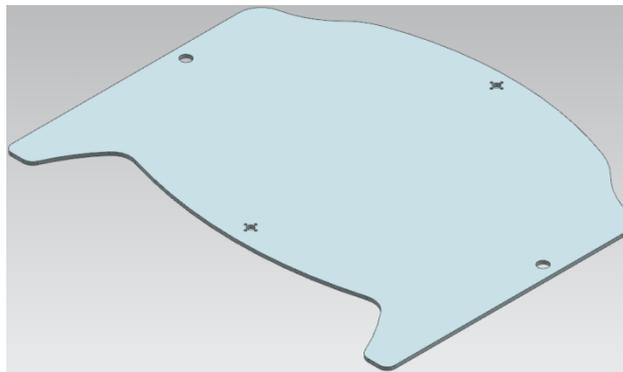


Figura 33: Mesa de apoyo - Modelo CAD

Se seleccionó acrílico como material para la base debido a sus propiedades físicas y térmicas [28]. Ya que tiene un peso promedio de 3.8kg para un metro cuadrado de placa de 3mm lo que lo hace 50% más liviano que el vidrio, su deformación interna es mínimo (2.8%) y su temperatura de ablandamiento VICAT es de 125°C aproximadamente. Se considera que la base no va a tener cargas significativas debido a que solo estará en contacto con el filamento.

La mesa de apoyo cuenta con dos orificios en el centro, dos en la parte transversal y dos en la parte longitudinal (ver planos en Anexo 5). Los orificios centrales sirven para fijar la cama caliente, mientras que los longitudinales son los ejes de los motores para proporcionar movimiento lineal sobre el eje Z a la base, el resto de los orificios cuentan con un buje cada uno el cual sirven de apoyo para que la mesa no pierda la perpendicularidad con el mecanismo de extrusión.

Igualmente, se requirió la forma de limitar el movimiento de los elementos restantes, para lo cual se diseñó una caja (figura 34) donde descansarán los motores y una estructura tubular (figura 35) para el buje, las cuales estarán ancladas a la mesa de madera donde se encuentra el robot. Los planos de estos elementos de apoyo para limitar la movilidad y reducir vibraciones se encuentran en el Anexo 5.

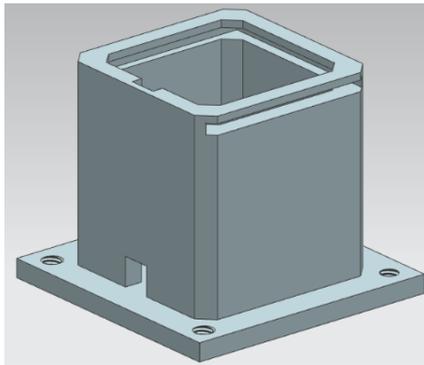


Figura 34: Caja para motores - Modelo CAD

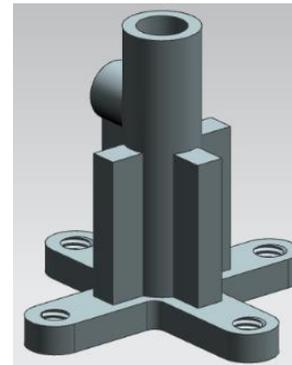


Figura 35: Estructura tubular - Modelo CAD

3.3.2 Motores NEMA 17

El movimiento de la base se logra mediante dos motores *NEMA 17*, modelo SL42STH40-1684a (figura 36), los cuales tienen adaptado un cople flexible en cada eje (figura 37) que compensa la falta de alineación en la flecha, y absorbe moderadamente los choques de cargas recibidas por el motor [29]. Las especificaciones técnicas del motor se encuentran en el

Anexo 6, donde se destaca el par de 3.2 kg/cm. Por otro lado, las especificaciones del cople son:

- Diámetro = 19mm



- Altura = 25mm

- Material: Aluminio
- Medidas: 6 x 6.35 m



Figura 36: Motores de la base

Figura 37: Cople flexible de aluminio

3.3.3 Mecanismo de extrusión

El dispositivo empleado en el proyecto es un *MK8* (figura 38). Este mecanismo es compatible con diversos tipos de impresoras, es fácilmente adaptable y actualmente es el más utilizado en las impresoras tridimensionales del mercado, por lo cual se pueden conseguir reparaciones rápidamente, el costo es moderado y se evitan los pedidos al extranjero, ya que estos suelen tardar mucho tiempo en ser entregados.

Está fabricado con aleación de aluminio, funciona a 12 V, adaptable a diversos tipos de boquillas, permite utilizar PLA o ABS y alcanza temperaturas entre 170 - 260 °C. Las especificaciones técnicas se encuentran en el Anexo 7.



Figura 38: Extrusor MK 8

3.3.4 Cama caliente

Se consideró incluir una cama caliente en caso de ser necesario para mejorar la calidad de la impresión 3D. El modelo seleccionado es *MK2B Dual Power* (figura 39), es fácilmente adaptable ya que puede funcionar a 12V o 24V. Sus dimensiones son 214 mm x 214 mm y el calentamiento es rápido y uniforme. En el Anexo 8 se encuentran las especificaciones



técnicas completas. **[30]**

Figura 39. Cama caliente MK2B Dual Power

Capítulo 4. Comunicación, adaptación y calibración de los sistemas

La parte sustancial del proyecto radica en la adaptación apropiada de los sistemas involucrados. Para que la impresora tridimensional funcione adecuadamente, cada sistema debe ser capaz de recibir información, interpretarla y transmitirla al siguiente de manera correcta. Sin embargo, es importante considerar las diferencias presentes en la comunicación entre los dispositivos que la conforman, debido principalmente al avance y modernización de la tecnología, ya que existe una brecha entre los protocolos recientes y los que controlan al robot.

De igual forma, la integración de los elementos físicos presenta el mismo inconveniente. Por tal razón, es necesario realizar adecuaciones previas como en el caso del mecanismo extrusor y el brazo robótico, debido a que éste último fue diseñado para herramientas específicas.

4.1 Comunicación Sistema de Cómputo – Interfaz

Para el correcto funcionamiento del Sistema de Cómputo, es necesario configurar el módulo *Pronterface* del software *Printrun* (figura 40), el cual cuenta con distintas funciones que requieren ser personalizadas. La primera de ellas es la conexión con el Arduino Mega realizada a través de un puerto USB, (en este caso fue el COM6) a 115200 Baudios. Las temperaturas por defecto del mecanismo de extrusión y de la cama caliente se establecen de acuerdo a las especificaciones técnicas del filamento, en este caso PLA, indicadas por el proveedor, las cuales son: 210 °C y 60 °C respectivamente [31]. Por último, el volumen de trabajo se establece dentro de las dimensiones de la cama caliente, en 200 mm de ancho,

200 mm de largo y 100 mm de altura. El resto de parámetros conserva los mismos valores establecidos por defecto.

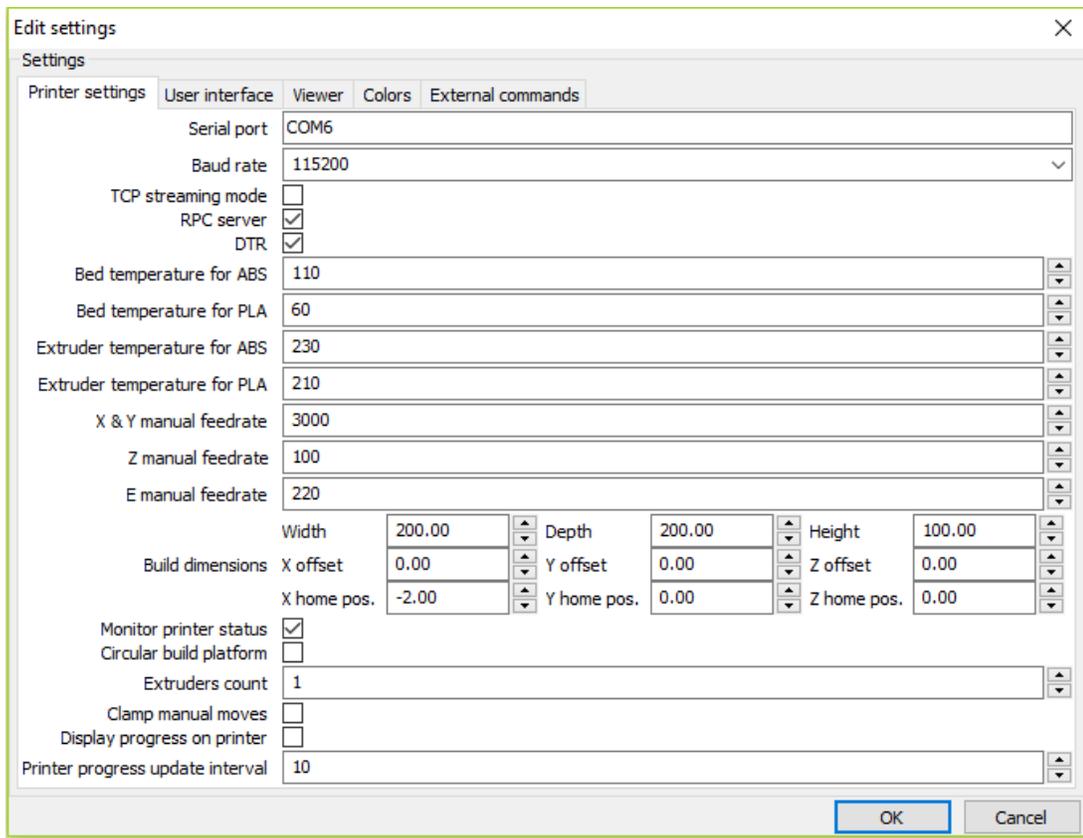


Figura 40. Configuración de Printrun Pronterface

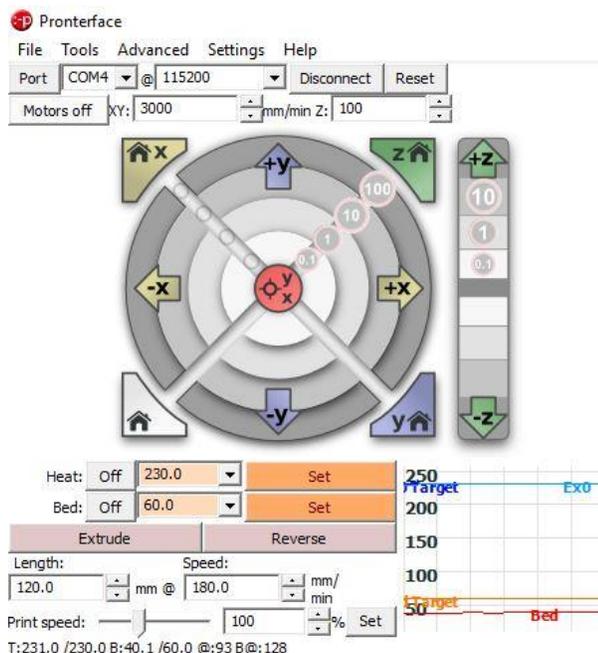
La gestión de la memoria del controlador se realiza a través del software ATS (figura 41), con el fin de disponer de los recursos necesarios para realizar el grabado de posiciones y, por consiguiente, el desarrollo de trayectorias que permitan obtener un modelo. Los parámetros modificados son: número de líneas por programa, fijado en 6000; cantidad de variables disponibles, determinada en 4000 y número de puntos que el usuario puede grabar en el grupo A (donde se almacenan datos referentes a los ejes del brazo robótico) cuyo valor asignado es 8600, dejando en consecuencia los grupos B y C en cero, ya que éstos almacenan posiciones de elementos periféricos que no serán utilizados en el presente proyecto. Es importante mencionar que, aunque no se utiliza la totalidad de memoria precisada en la

configuración, los valores establecidos evitan posibles conflictos al realizar la programación.



Figura 41. Asignación de memoria mediante ATS

El usuario podrá interactuar con la impresora a través del módulo *Pronterface* (figura 42) para controlar el mecanismo de extrusión y la cama caliente. Las trayectorias se realizan utilizando ATS, partiendo de las posiciones grabadas con el brazo robótico y programando

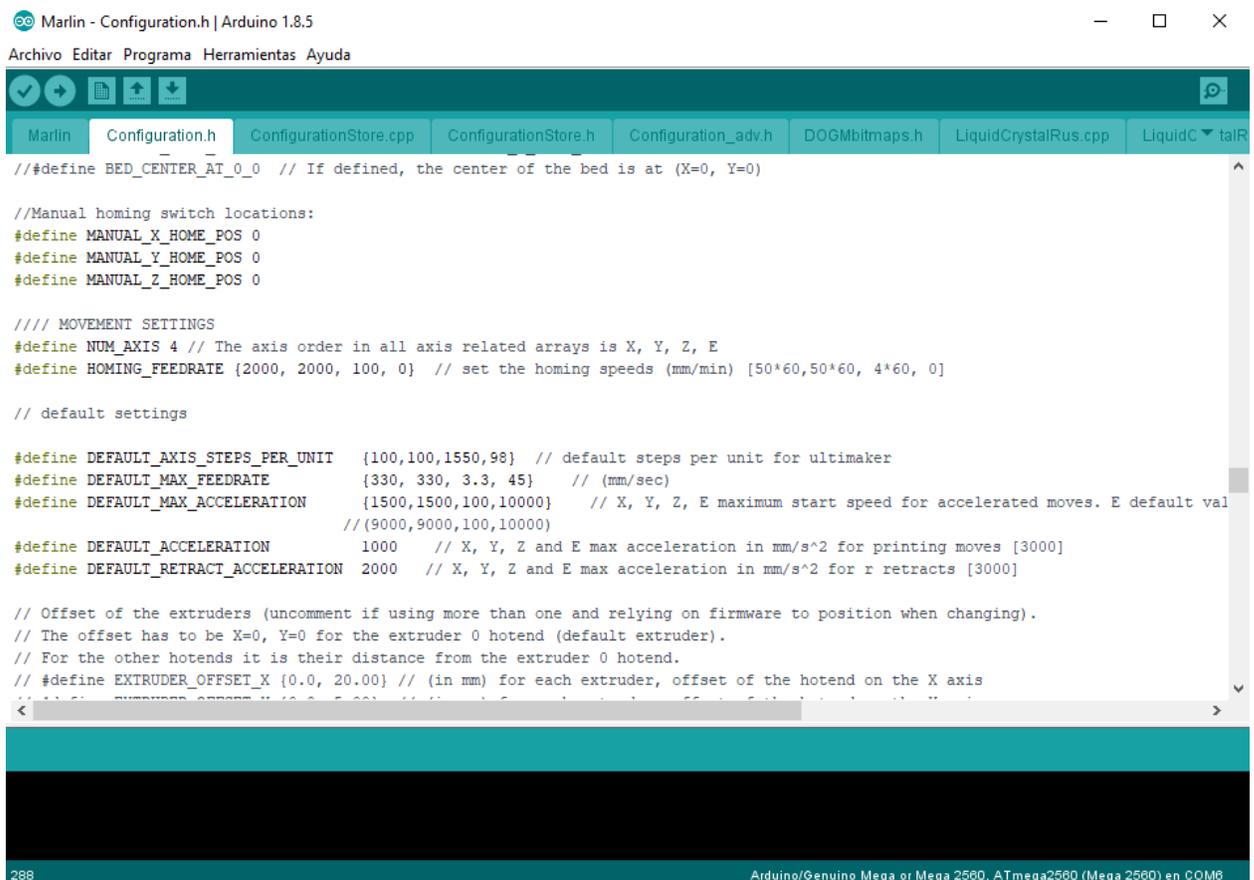


la secuencia de puntos que formen el prototipo.

Figura 42. Ventana principal de Pronterface

4.2 Comunicación Sistema de Interfaz – Impresión

Para que el robot y el mecanismo de extrusión funcionen es necesario transformar las instrucciones que el usuario envía por medio de la computadora en señales digitales que el hardware de la impresora pueda interpretar. El programa Marlin realiza esta tarea. El software consta de múltiples secciones (figura 43) donde se controlan elementos como la temperatura del mecanismo de extrusión, movimiento de los ejes de la impresora, así como la conversión necesaria de la información digital a señales analógicas para la RAMPS, solo por mencionar algunas. El código es libre, razón por la cual resulta una alternativa viable para la implementación del proyecto, ya que evita costos elevados por software especializado, debido a que la programación es genérica y fácilmente adaptable a múltiples siste-



```
Marlin - Configuration.h | Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Marlin Configuration.h ConfigurationStore.cpp ConfigurationStore.h Configuration_adv.h DOGbitmaps.h LiquidCrystalRus.cpp LiquidC...talR...
//#define BED_CENTER_AT_0_0 // If defined, the center of the bed is at (X=0, Y=0)

//Manual homing switch locations:
#define MANUAL_X_HOME_POS 0
#define MANUAL_Y_HOME_POS 0
#define MANUAL_Z_HOME_POS 0

//// MOVEMENT SETTINGS
#define NUM_AXIS 4 // The axis order in all axis related arrays is X, Y, Z, E
#define HOMING_FEEDRATE {2000, 2000, 100, 0} // set the homing speeds (mm/min) [50*60,50*60, 4*60, 0]

// default settings

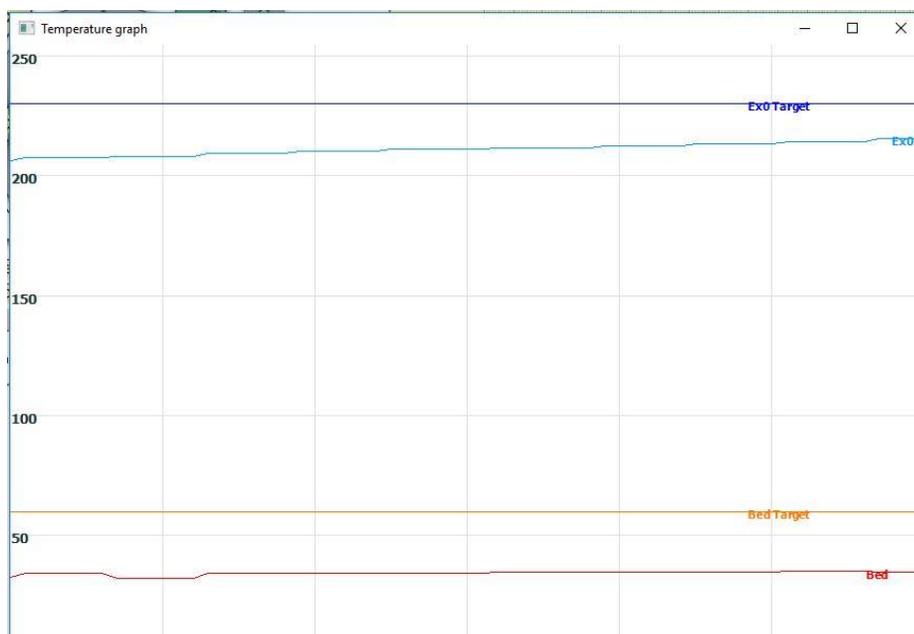
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {100,100,1550,98} // default steps per unit for ultimaker
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {330, 330, 3.3, 45} // (mm/sec)
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {1500,1500,100,10000} // X, Y, Z, E maximum start speed for accelerated moves. E default val
// (9000,9000,100,10000)
#define DEFAULT_ACCELERATION 1000 // X, Y, Z and E max acceleration in mm/s^2 for printing moves [3000]
#define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 2000 // X, Y, Z and E max acceleration in mm/s^2 for r retracts [3000]

// Offset of the extruders (uncomment if using more than one and relying on firmware to position when changing).
// The offset has to be X=0, Y=0 for the extruder 0 hotend (default extruder).
// For the other hotends it is their distance from the extruder 0 hotend.
// #define EXTRUDER_OFFSET_X {0.0, 20.00} // (in mm) for each extruder, offset of the hotend on the X axis
<
288 Arduino/Genuino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) en COM0
```

mas. Se puede acceder a los recursos Marlin a través de su sitio web.

Figura 43. Ventana principal de Arduino con el código Marlin

El software Marlin actúa en conjunto con la tarjeta Arduino Mega, la cual se conecta a la RAMPS por medio de los pines que fueron diseñados especialmente para acoplarse a la misma. La función principal de la RAMPS consiste en enviar y recibir información directamente del sistema de impresión, estableciendo realimentación para controlar sus componentes. Las conexiones de la tarjeta se realizan siguiendo el diagrama mostrado en el Anexo 4. Los termistores ubicados en el mecanismo de extrusión y cama caliente detectan la temperatura y envían su lectura al software, el cual genera una gráfica donde se presenta su comportamiento al usuario. (Figura 44). El control de este parámetro es sumamente importante ya que con él se asegura que el filamento se derrita correctamente y logre la adhesión necesaria para construir el modelo. Es importante mencionar que existe una restricción en el módulo *Pronterface* para evitar que el mecanismo de extrusión funcione si no se ha lle-



gado a la temperatura adecuada.

Figura 44: Grafica de temperatura generada por Printron.

De la misma forma, la señal para el movimiento del eje Z, que controla la base de la impresora y la del motor encargado de empujar el filamento a través del extrusor son enviadas por medio de la RAMPS. El movimiento de los motores es simultáneo debido a su configuración en paralelo, permitiendo que la base de impresión se eleve uniformemente. Se agregó un interruptor con el cual se posicionan los motores en *Home*, evitando colisiones y estableciendo una referencia para la calibración.

4.3 Adaptación del efector final

Como se mencionó anteriormente, el robot no fue diseñado para admitir un mecanismo de extrusión como efector final, razón por la cual se fabricó un sujetador preliminar de acero (figura 45) fijado al dado del Scora ER-14 por medio de tornillos.



Figura 45: Sujetador preliminar del mecanismo de extrusión

Posteriormente, debido a la vibración generada al accionar el brazo robótico, este sujetador fue sustituido por uno creado especialmente para mejorar su funcionamiento. La figura 46 presenta el diseño y la pieza ensamblada, la cual se fabricó en plástico, posee mayor grosor

respecto a la lámina y ofrece sujeción por ambos lados, a diferencia de la anterior que solo se acoplaba por un extremo del mecanismo de extrusión. El plano del modelo se presenta en el Anexo 5. Se agregó además una cubierta de yeso dental para aislar el extrusor y evitar que el calor fluya hacia las láminas, afectando el plástico.

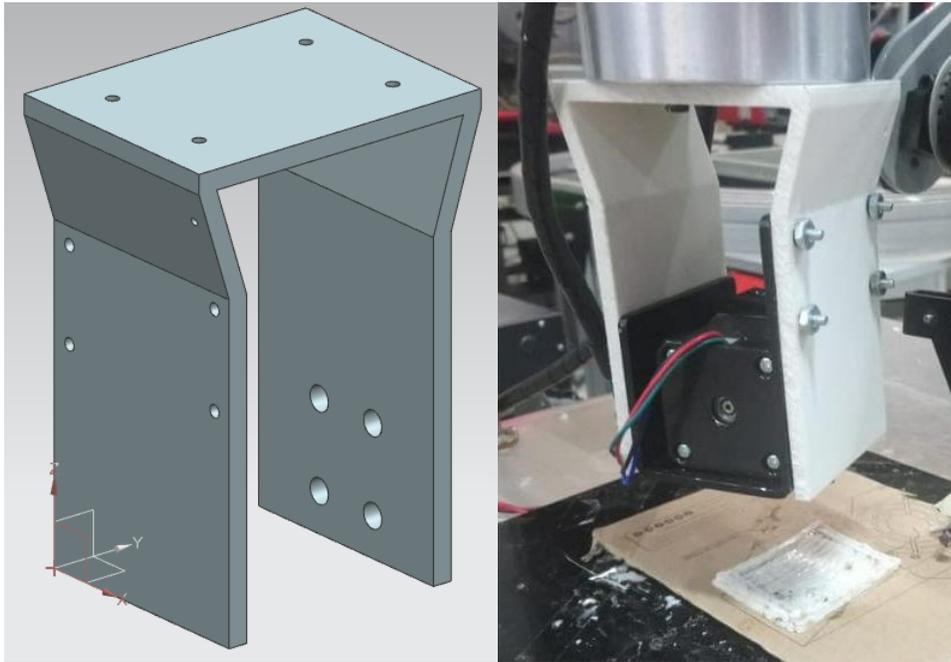


Figura 46. Sujetador para el mecanismo de extrusión.

4.4 Calibración de la impresora.

Para que el robot pueda accionarse correctamente lo primero que se debe hacer es ejecutar la rutina *home* en cada uno de sus ejes, con la finalidad de posicionarlos en su referencia y, a partir de su ubicación, realizar cada uno de sus siguientes movimientos. La rutina *home* se cumple siguiendo la trayectoria más corta posible desde la posición donde se está ejecutando, sin tener la certeza de cuales movimientos realizará cada eje, abriendo la posibilidad de colisionar con elementos como las barras de apoyo o el eje de los motores, ocasionando daños permanentes. Para evitar lo anterior se realizaron dos programas en ACL que regulan estos movimientos. Se creó un vector llamado RAYAS para grabar las posiciones y generar

tales códigos, el primero es CENTR (figura 47) el cual manda el efector final del robot al centro de la mesa de impresión y el segundo HOMER (figura 48) que posiciona al robot muy cerca del *home* de cada eje.



Figura 47: Posición CENTR

Figura 48: Posición HOMER

Los programas mencionados se presentan a continuación:

CENTR		MOVE	RAYAS[2]
		MOVE	RAYAS[1]
SPEED	10	MOVE	RAYAS[3]
MOVE	RAYAS[1]	MOVE	RAYAS[4]

```

MOVE RAYAS[5]
MOVE RAYAS[6]
SPEED 5
MOVE RAYAS[7]
END

```

```

HOMER

```

```

SPEED 5

```

```

MOVE RAYAS[6]
SPEED 10
MOVE RAYAS[5]
MOVE RAYAS[4]
MOVE RAYAS[3]
MOVE RAYAS[1]
MOVE RAYAS[2]
MOVE RAYAS[1]
END

```

Se establecieron velocidades de desplazamiento bajas para las rutinas, con la finalidad de responder oportunamente ante un movimiento inesperado. Las posiciones ocupan las primeras siete localidades de memoria asignadas al vector RAYAS el cual puede almacenar hasta 450 datos.

Para delimitar el espacio de trabajo se diseñó una malla de 5x5 cm. con espaciado de 2 mm. entre punto y punto (figura 49), similar al grosor del filamento utilizado que es de 1.75 mm. Esta pieza representa solo un cuadrante del área total, la cual se determinó en 100 cm². Se grabaron 264 posiciones por cuadrante con ayuda de la malla de puntos (figura 50) y el porta bolígrafo (figura 51) ambos planos se encuentran en el Anexo 5.

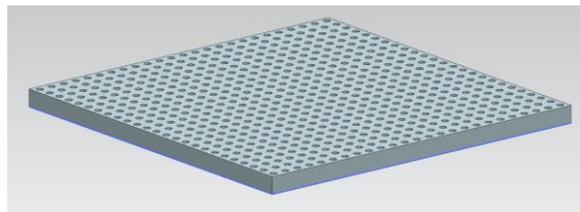


Figura 49: Malla de puntos

Los primeros 431 puntos se guardaron en el vector RAYAS, los restantes en un nuevo vector llamado RAYA2. Las primeras 10 posiciones del vector RAYAS corresponden al programa CENTR y HOMER, por lo cual se encuentran restringidas.

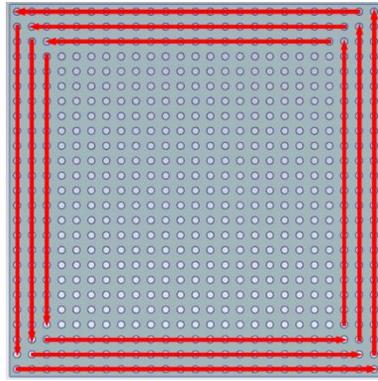


Figura 50: Posiciones grabadas por cuadrante

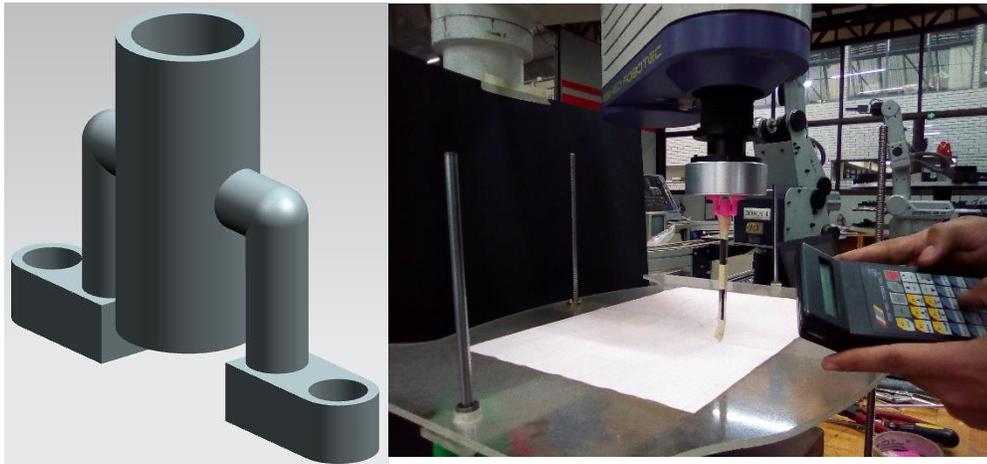


Figura 51. Porta bolígrafo y grabado de posiciones

El mallado de las 1056 posiciones del área de trabajo quedan distribuidos de la forma mostrada en la figura 52, simultáneamente se puede observar el lugar donde se encuentra cada cuadrante. El contorno de la figura cuenta con tres líneas de puntos y el centro con una cruz con seis líneas, con esta disposición se pueden lograr distintas geometrías simples.

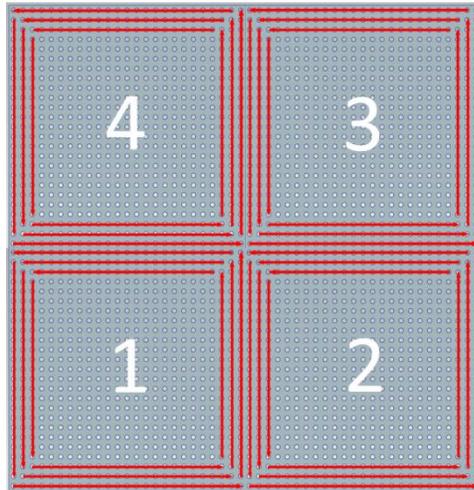


Figura 52: Cuadrantes del área de trabajo

La altura de la base se homologó utilizando un nivel de precisión, asegurando que ambos motores mantienen la superficie completamente horizontal para la impresión. Por último, se crearon otros programas auxiliares para calibrar la velocidad de desplazamiento óptimo para el mecanismo de extrusión, así como para verificar la trayectoria del robot.

El programa VELOC, que se muestra a continuación, ayudó a establecer el parámetro *speed* del Robot en 1, lo que equivale a 5 cm/s. Este valor, en conjunto con la velocidad del mecanismo de extrusión, son sumamente importantes en la calidad del modelo fabricado.

VELOC

```
SPEED 1
MOVE RAYAS[10]
MOVE RAYAS[34]
DELAY 100
MOVE RAYAS[34]
MOVE RAYAS[10]
END
```

Se creó un vector adicional llamado CAL, que contiene 6 posiciones cuya distribución recta permite generar el programa LINEA. Con él se evaluó si la trayectoria que realiza el robot entre puntos es lineal o existen defectos de desplazamiento concluyendo que, en desplazamientos horizontales (sobre el eje x) se obtiene una tendencia lineal, en comparación al

desplazamiento vertical (sobre el eje y) donde existen vibraciones que afectan la rectitud de la trayectoria debido a que, para generar este tipo de desplazamiento, el robot precisa mover dos ejes al mismo tiempo, en lugar de solo uno, como ocurre en el primer caso.

LINEA

```
SPEED 1
MOVE CAL[4]
MOVE CAL[5]
MOVE CAL[6]
DELAY 1000
MOVE CAL[4]
END
```

Por último, se creó el programa PURGA, basado en los vectores RAYAS y RAYA2 el cual realiza una trayectoria recta, con el fin de permitir la limpieza de material remante en el extrusor, resultado de impresiones previas. De esa manera se remueve el pastico quemado que obstaculiza el paso del filamento fundido hacia el extrusor.

PURGA

```
SPEED 1
MOVE RAYA2[564]
MOVE RAYA2[588]
MOVE RAYAS[440]
END
```

Capítulo 5. Pruebas y análisis de resultados

Una vez lograda la adaptación, configuración y calibración de los sistemas involucrados, se procedió a realizar las pruebas correspondientes que consistieron en la fabricación de piezas de diversas geometrías, considerando variables como la temperatura del mecanismo de extrusión y ambiente (ya que la impresora no posee una cámara cerrada), la velocidad, el material empleado en la superficie de la base sobre la cual se adhiere el filamento y el empleo de una cama caliente en la misma. Los programas desarrollados permiten generar trayectorias cuadradas y triangulares, y de la manipulación de los mismos es posible obtener piezas solidas o prismáticas. Para el primer tipo de prototipo los programas empleados son CUBIC y RELLE, y están desarrollados a partir del vector RAYAS. El vector TRIAN fue creado para las trayectorias de este tipo, y los programas TRIAP y TRIAR permiten su construcción. En el Anexo 9 se encuentra la programación a detalle.

5.1 Prueba 1. Lámina cuadrada

Se dispuso lo siguiente:

- Temperatura ambiente: 17°C
- Temperatura de extrusión: 210°C
- Velocidad de extrusión: 120 mm/s
- Superficie de adherencia: Papel.
- Sin cama caliente.
- Geometría: cuadrada
- Cuerpo: laminar.
- Perímetro: 100 mm por capa
- Relleno: 300 mm por capa

La prueba arrojó los siguientes resultados: se determinó el ancho de hilo, que fue de 5 mm. lo cual asegura que las líneas se adhieren entre sí, evitando rupturas del material. La altura inicial de la base de impresión respecto al extrusor es de 0.5 mm. Sin embargo, existen algunos defectos en la impresión: Uno de ellos es el efecto *warping* que significa literalmente

“pandeo” y se produce al no haber adherencia en los extremos del modelo, flexionando las esquinas hacia arriba. El otro defecto es la presencia de remanentes en los bordes, la cual se puede evitar al aumentar la velocidad de extrusión a 130 mm/s. La figura 53 presenta distintas tomas del modelo obtenido en esta prueba.



Figura 53. Modelo resultante de la prueba 1

5.2 Prueba 2. Lámina cuadrada

Los parámetros son:

- Temperatura ambiente: 18°C
- Temperatura de extrusión: 210°C
- Velocidad de extrusión: 130 mm/s
- Superficie de adherencia: Papel.
- Sin cama caliente.
- Geometría: cuadrada
- Cuerpo: laminar.
- Perímetro: 110 mm por capa
- Relleno: 320 mm por capa

Como puede notarse en la figura 54, se obtuvo una mejora en la calidad de impresión, los hilos se encuentran más cercanos y la adherencia es adecuada. Se redujo la presencia de remanentes, sin embargo, persiste la flexión de las esquinas e incluso se acentuó. La prueba siguiente se realizó buscando mejorar esta condición agregando capas para aumentar el peso en las zonas flexionadas, manteniendo los parámetros establecidos.



Figura 54. Resultados de la segunda prueba

5.3 Prueba 3. Caja cuadrada

Para esta prueba se dispuso lo siguiente:

- Temperatura ambiente: 20°C
- Temperatura de extrusión: 210°C
- Velocidad de extrusión: 130 mm/s
- Superficie de adherencia: Papel.
- Sin cama caliente.
- Geometría: cuadrada
- Cuerpo: prismático
- Perímetro: 110 mm por capa
- Relleno: 320 mm por capa

La prueba no resultó satisfactoria. Las capas no pudieron construirse de manera correcta, e incluso hay zonas donde se presenta plástico quemado. El efecto *warping* persiste, aunque en menor grado. Se muestran zonas encimadas y aplastadas debido a que no se determinó la altura adecuada entre capas (figura 55). Se aumentó la velocidad para pruebas posteriores.



Figura 55. Modelo fabricado en la prueba 3

5.4 Prueba 4. Sólido cuadrado

Se determinó lo siguiente:

- Temperatura ambiente: 21°C
- Temperatura de extrusión: 210°C
- Velocidad de extrusión: 150 mm/s
- Superficie de adherencia: Papel.
- Sin cama caliente.
- Geometría: cuadrada
- Cuerpo: solido
- Perímetro: 120 mm por capa
- Relleno: 340 mm por capa

Se obtuvo una pieza en la que no hay presencia de plástico quemado, pero aún existe el efecto *warping* (figura 56). Se determinó adicionar a la base una cama caliente, que permita una mejor adherencia al mantener constante la temperatura del filamento al ser depositado, así como un incremento a la temperatura de extrusión que se establece en 220°C



Figura 56. Pieza resultante de la prueba 4

5.5 Prueba 5. Lámina cuadrada

Se definieron los siguientes valores de las variables:

- Temperatura ambiente: 20°C
- Temperatura de extrusión: 220°C
- Velocidad de extrusión: 150 mm/s
- Superficie de adherencia: Papel.
- Con cama caliente a 60°C.
- Geometría: cuadrada
- Cuerpo: laminar
- Perímetro: 120 mm por capa
- Relleno: 340 mm por capa

La lámina obtenida en esta prueba (figura 57) presenta una reducción significativa en la flexión de las esquinas. Los remantes son despreciables y la calidad es superior. Resulta evidente que el uso de la cama caliente en la base mejora de manera importante los resultados obtenidos, pues mantiene constante la temperatura al depositar material en la superficie de impresión, contrarrestando los efectos del enfriamiento debido a la ausencia de una cámara cerrada que aisle el medio y retenga el calor.



Figura 57. Lámina impresa en la prueba 5

5.6 Prueba 6. Caja cuadrada

Se realizó con los siguientes parámetros:

- Temperatura ambiente: 15°C
- Temperatura de extrusión: 220°C
- Velocidad de extrusión: 150 mm/s
- Superficie de adherencia: Papel.
- Con cama caliente a 60°C.
- Geometría: cuadrada
- Cuerpo: prismático
- Perímetro: 120 mm por capa
- Relleno: 340 mm por capa

A pesar de contar con una cama caliente en la base de impresión es evidente que los resultados no son los deseados, ya que existe flexión en las esquinas del modelo (figura 58). Por otro lado, se determinó que la altura óptima entre capa es de 0.8 mm. Se presentan algunas separaciones entre hilos, ocasionadas por las vibraciones del robot. Debido a todo esto se sustituye el papel por una superficie más rugosa para dar mayor adhesión: lija 110.

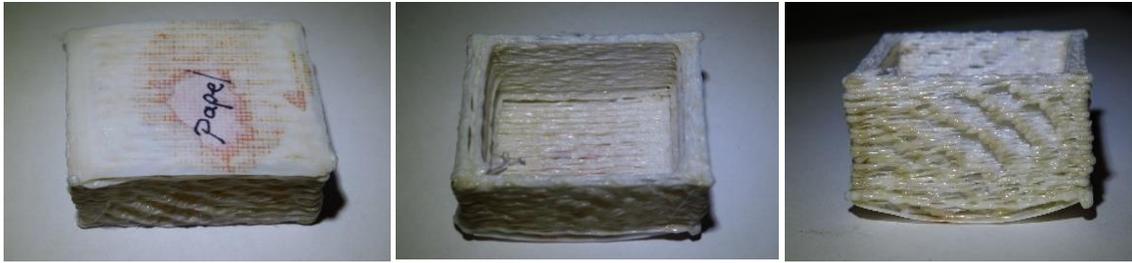


Figura 58. Prototipo de una caja fabricada en la prueba 6.

5.7 Prueba 7. Sólido cuadrado

Para esta prueba se dispuso lo siguiente:

- Temperatura ambiente: 16°C
- Temperatura de extrusión: 220°C
- Velocidad de extrusión: 150 mm/s
- Superficie de adherencia: Lija 110
- Con cama caliente a 60°C
- Geometría: cuadrada
- Cuerpo: solido
- Perímetro: 120 mm por capa
- Relleno: 340 mm por capa

La presencia de una superficie más rugosa, contrario a lo esperado, provocó que la adherencia disminuyera, ya que el efecto *warping* aumentó visiblemente en comparación a lo ocurrido en el papel. En la figura 59 se muestra como las capas se deforman conforme se construye el modelo. La temperatura ambiente también es determinante, puesto que es menor a la que se registró en pruebas anteriores. Por tanto, se sustituyó la lija por cartón y se modificó la temperatura y velocidad de extrusión para compensar estos efectos en las siguientes pruebas.



Figura 59. Prueba realizada utilizando lija como base.

5.8 Prueba 8. Caja cuadrada

Los parámetros son:

- Temperatura ambiente: 17°C
- Temperatura de extrusión: 230°C
- Velocidad de extrusión: 160 mm/s
- Superficie de adherencia: Cartón
- Con cama caliente a 55°C
- Geometría: cuadrada
- Cuerpo: prismático
- Perímetro: 130 mm por capa
- Relleno: 360 mm por capa

La prueba arrojó datos satisfactorios. La figura 60 muestra que la adherencia fue adecuada y se obtuvo una superficie más regular en comparación al papel y a la lija. Sin embargo, la presencia de remanentes en la pieza hace necesario aplicar una mayor velocidad de extrusión para corregir estos defectos.



Figura 60. Prototipo de caja fabricado en la prueba 8

5.9 Prueba 9. Sólido cuadrado

Se establecieron los siguientes valores a las variables:

- Temperatura ambiente 17°C
- Temperatura de extrusión 230°C
- Velocidad de extrusión: 180 mm/s
- Superficie de adherencia: Cartón
- Con cama caliente a 60°C
- Geometría: cuadrada

- Cuerpo: sólido.
- Relleno: 360 mm por capa
- Perímetro: 130 mm por capa

Los resultados obtenidos fueron de mayor calidad, la adherencia es adecuada y se redujo considerablemente la presencia de remanentes en la pieza fabricada, como puede notarse en la figura 61. Por tal razón se procedió a fabricar un modelo con una segunda geometría.



Figura 61. Sólido resultado de la prueba 9

5.10 Prueba 10. Caja triangular

Se determinó que:

- Temperatura ambiente 19°C
- Temperatura de extrusión 230°C
- Velocidad de extrusión: 180 mm/s
- Superficie de adherencia: Cartón
- Con cama caliente a 60°C
- Geometría: triangular.
- Cuerpo: prismático.
- Perímetro: 150 mm por capa.
- Relleno: 280 mm por capa.

Se utilizó una geometría triangular con el fin de evaluar el desempeño del robot al describir trayectorias diagonales. El triángulo mide 5 cm por lado, sin embargo, como puede verse en la figura 62, el robot no se mueve linealmente entre puntos en diagonal, sino parabólicamente. Esto puede corregirse en la configuración del controlador utilizando ATS, indicando el desplazamiento en trayectorias lineales. A pesar de ello es notable la reducción de las vibraciones que deforman la estructura de los hilos en el perímetro. La deposición se realiza

de manera más suave en líneas transversales. Por último, existe una ligera deformación en la base, debido a utilizar la impresora recién encendida, un día posterior a las pruebas ya hechas.



Figura 62. Cuerpo prismático triangular

5.11 Prueba 11. Sólido triangular

La fabricación del prototipo se realizó bajo los siguientes parámetros:

- Temperatura ambiente 20°C
- Temperatura de extrusión 230°C
- Velocidad de extrusión: 180 mm/s
- Superficie de adherencia: Cartón
- Con cama caliente a 60°C
- Geometría triangular
- Cuerpo solido
- Perímetro: 150 mm por capa
- Relleno: 280 mm por capa.

Luego de modificar el desplazamiento a través del software ATS, se obtuvo un modelo cuya calidad es óptima. El efecto *warping* es despreciable, ya que se mejoró la deposición de capas respecto al modelo anterior. La figura 63 permite notar las características de la pieza fabricada. Es importante mencionar que los remanentes pueden eliminarse mediante un post proceso como el lijado. Finalmente, los resultados pueden considerarse satisfactorios y por tanto los parámetros establecidos se asumen válidos para aplicaciones posteriores.



Figura 63. Solido resultante de la prueba 11.

5.12 Aplicación sistema embebido

Después de realizar las pruebas se realizó una aplicación sencilla de un sistema embebido con la configuración de la prueba 11, con la finalidad de tener una luz roja que sea sumergible en agua (figura 64).

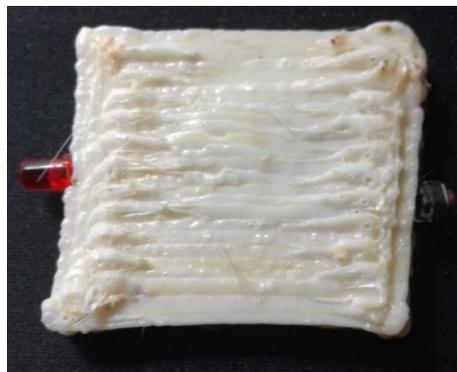


Figura 64: Aplicación sistema embebido

Esto se realizó en tres partes, la primera se refiere a la circuitería contenida en el sistema (figura 65) la cual consta de una batería de Litio tipo “botón” de 3V y 210mAh, una resistencia de 120 Ω y un *push button*.

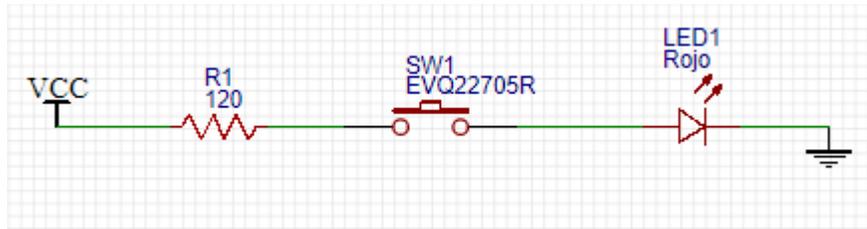


Figura 65: Circuito¹ del sistema embebido

La segunda a la impresión realizada por el brazo robótico Scora ER-14 (figura 66) y la tercera a la colocación del circuito por el brazo robótico de apoyo (figura 67).



Figura 66: Impresión base lámpara



Figura 67: Colocación del circuito

¹ El circuito se realizó con el programa *easyEDA*, software en línea de uso libre.

Se realizó esta aplicación para observar la interacción que tiene el sistema de impresión con elementos externos, como se puede observar en la figura 68 y 69, no existe ningún orificio en la parte anterior y posterior de la lámpara sumergible en agua.



Figura 68: Parte anterior



Figura 69: Parte posterior

El problema se encuentra en la parte lateral derecha (figura 70), lateral izquierda (figura 71) e inferior (figura 72). Por donde se puede filtrar una gran cantidad de agua y hacer que el equipo falle y se descomponga.



Figura 70: Parte lateral derecha



Figura 71: Parte lateral izquierda



Figura 72: Parte inferior

Los beneficios de tener esta aplicación son:

- Bajo costo de fabricación.
- Bajo costo de operación
- No se requiere ensamble.
- Tiempo reducido de maquinado.
- Circuito de fácil extracción terminada su vida útil.
- Carcasa del equipo 100% reciclable.

Las desventajas son:

- Equipo desechable.
- Si alguno de los elementos (internos o externos) llega a fallar, todo el equipo se descompone.

Como se logra ver en las imágenes, la aplicación no cumple con el requerimiento principal, que sea resistente al agua, para que esto se pueda lograr aún falta realizar bastantes pruebas al equipo, variar los parámetros y seguir experimentando para obtener la mejor resolución posible. Lo anterior se logra calibrando la velocidad del movimiento, velocidad del extrusor, temperatura del extrusor, temperatura del ambiente, el espesor de la capa y el espesor del perímetro.

Conclusiones

El objetivo del presente trabajo fue obtener una interfaz de comunicación digital-analógica para un proceso de manufactura aditiva en el brazo robótico Scora-ER 14®.

Se logró mediante la comunicación de los aplicativos Pronterface, Marlin, el hardware RAMPS V1.3 y el brazo robótico Scora-ER 14®. Ya que Pronterface es el software gráfico donde el usuario puede definir los parámetros de temperatura, velocidad de los motores y cantidad de material extruido, estos datos son transmitidos al Arduino, previamente cargado con el programa Marlin, el cual se encarga de traducirlos y enviar el valor de forma analógica al sensor correspondiente a través de la RAMPS V1.3, facilitando la conexión entre el Arduino y cada sensor o motor del sistema.

Las piezas fabricadas permitieron realizar un análisis general de la calidad obtenida, dando pie a la comparación de ventajas y desventajas entre el brazo robótico (configuración en serie) y las impresoras 3D comerciales (configuración en paralelo). Entre las principales ventajas destacan:

Mayor volumen de impresión. Se amplía el espacio de trabajo respecto a los equipos convencionales, ya que el volumen es aproximadamente 5.6 veces mayor con respecto a la DaVinci 1.0®, utilizada en el Departamento de Manufactura y Diseño. Lo cual permite obtener modelos de gran tamaño sin la necesidad de dividirlos.

Actualización del equipo disponible en los laboratorios. Acerca la tecnología utilizada en la industria a la comunidad estudiantil.

Fabricación de sistemas embebidos. Los sistemas embebidos solo se pueden producir en equipos que utilizan la tecnología de laminación de hojas, pero con la sincronización de un robot auxiliar se puede detener el proceso de impresión momentáneamente para colocar

dispositivo electrónico y finalmente terminar de imprimir. Lo anterior se muestra en la aplicación de lámpara sumergible.

Sin embargo, existen desventajas cruciales:

Defectos de impresión. Ocasionados por la falta de control en la temperatura del medio ambiente, propiciando el efecto *warping*.

Imposibilidad de generar trayectorias rectas. Por las características de movimiento del robot y la contracción del PLA al enfriarse rápidamente.

Dificultad para reparar el brazo. Las piezas son escasas y costosas debido a la antigüedad del mismo.

Trabajo a futuro

Tomando como punto de partida los modelos fabricados en el presente proyecto, el trabajo a futuro consiste en realizar el análisis y la documentación de las propiedades mecánicas, tanto de las cajas como de los sólidos obtenidos. Estas pruebas deben considerar parámetros como el tipo de trayectorias realizadas al producir la pieza, la temperatura de extrusión del filamento, la velocidad con la que se deposita el material fundido sobre la base, la superficie de trabajo y la adherencia entre capas.

Resultado de estas pruebas, se puede considerar la integración de una cámara cerrada que permita regular las condiciones del medio ambiente y mejore la calidad de la impresión, permitiendo una resolución superior y reduciendo los defectos presentados en las pruebas efectuadas durante este proyecto.

Por otro lado, se debe trabajar en la codificación del software que reciba el modelo 3D, ejecute la vectorización, genere el código G, lo envíe al microcontrolador y finalmente indique al controlador del robot, mediante las señales que reciba, los movimientos necesarios para la fabricación de los modelos, coordinando tanto los elementos del brazo robótico, el extrusor y la mesa de impresión.

Finalmente, se deberán presentar otras aplicaciones a la mostrada en el presente trabajo, buscando obtener el mayor beneficio del equipo para contribuir al aprendizaje de la comunidad.

Referencias

- [1] Impresión XYZ, «Materiales para impresión 3D,» 2017. [En línea]. Available: <http://impresion3d.xyz/materiales-para-impresion-3d/>. [Último acceso: 15 Octubre 2017].
- [2] 3D Systems, «Direct metal 3D print process overview and comparison,» 2018. [En línea]. Available: <https://es.3dsystems.com/on-demand-manufacturing/direct-metal-printing>. [Último acceso: 16 Enero 2018].
- [3] Stratasys, «Tecnología FDM, acerca del modelado de fusión por deposición,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.stratasys.com/mx/impresoras-3d/technologies/fdm-technology>. [Último acceso: 16 Enero 2018].
- [4] ISO/ASTM International , «52900:2015 Additive manufacturing - General principles - Terminology,» [En línea]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en:term:2.6.1>. [Último acceso: 16 Enero 2018].
- [5] 3D Systems, «Charles W. Hull Co-Founder and Chief Technology Officer,» 12 Diciembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.3dsystems.com/sites/default/files/downloads/3D-Systems-Charles-W-Hull-Executive-Bio.pdf>. [Último acceso: 23 Enero 2018].
- [6] J. Cervantes, «Teoría y práctica de impresión 3D convencional,» de *Curso DGAPA*, México, 2017.
- [7] J. López, «Nota de futuro 2/2016 Impresoras 3D,» Centro de análisis y prospectiva. Gabinete técnico de la guardia civil, Madrid, 2016.
- [8] T. Wohlers y T. Gornet, «History of additive manufacturing,» Wohlers Associates, Colorado, 2014.
- [9] Plastics Technology México, «Conceptos básicos de manufactura aditiva,» 1 Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.pt-mexico.com/articulos/conceptos-bsicos-de-manufactura-aditiva>. [Último acceso: 16 Enero 2018].
- [10] O. Miyamoto, «Impresión 3D. Hágalo usted mismo,» *¿Cómo ves?*, vol. 17, nº 203, pp. 10-15, Octubre 2017.
- [11] Imaginarium, «Impresión en 3D. El futuro,» de *Imaginieer Be a Maker*, Zaragoza, 2015.
- [12] Stratasys, «Materiales para impresión 3D,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.stratasys.com/mx/materiales>. [Último acceso: 16 Enero 2018].
- [13] S. Chancusi y P. Navarrete, Diseño y construcción de una impresora 3D auto-replicable controlada inalámbricamente para el prototipado de piezas plásticas de bajo costo, mediante software libre, Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas, 2014.
- [14] ISO, «8373:2012 Robots and robotic devices - Vocabulary,» [En línea]. Available:

- <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>. [Último acceso: 16 Enero 2018].
- [15] Á. Gómez, Diseño de una plataforma software interactiva para la simulación cinemática de robot manipuladores en entorno MatLab, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2008.
- [16] Antiquitas, «Autómatas,» 20 Junio 2010. [En línea]. Available: <http://historiaautomatas.blogspot.mx/2010/06/s-xii-al-jazari.html>. [Último acceso: 16 Enero 2018].
- [17] A. Barrientos Cruz, Fundamentos de robótica., Madrid: McGraw-Hill, 2007.
- [18] R. L. Norton, Diseño de maquinaria, México: McGraw-Hill, 2009.
- [19] L. A. Mejía, «Conceptos basicos de mecanismos,» Septiembre 2012. [En línea]. Available: <http://blog.utp.edu.co/adriamec/files/2012/09/CAPITULO-1-conceptos-básicos.pdf>. [Último acceso: 16 Enero 2018].
- [20] A. Herrera, «Sistemas de coordenadas en 3D,» Universidad Veracruzana, Xalapa, 2014.
- [21] V. Bernal, «Guía 2: Como trabajar un robot,» Instituto Técnico Industrial Francisco José de Caldas, Bogotá, 2016.
- [22] Intelitek, «Brazo Mecánico Scora-ER 14Pro,» Intelitek, Manchester, 2011.
- [23] Intelitek, «Scora-ER 14Pro - User manual,» Intelitek, Manchester, 2011.
- [24] Eshed Robotec INC., «Controller B ACL version 1.9 User's Manual,» Eshed Robotec, Manchester, 1995.
- [25] Printron, «Printron: About us,» Printron, [En línea]. Available: <http://www.pronterface.com/>. [Último acceso: 21 Junio 2018].
- [26] Eshed Robotec INC., «ATS Software Terminal Avanzado, Guia de referencia,» Eshed Robotec, Manchester, 1995.
- [27] Arduino, «Arduino Mega 2560 R3,» [En línea]. Available: <http://arduino.cl/arduino-mega-2560/>. [Último acceso: 21 Junio 2018].
- [28] La casa del celuloide, «Información técnica - Acrilicos,» Acrilicos OnLine - Una división de la casa del celuloide, [En línea]. Available: <https://www.acrilicosonline.com.ar/acrilicos/planchas/informacion-tecnica/>. [Último acceso: 17 Julio 2018].
- [29] Siemens AG, «Coples flexibles,» Siemens, 2018. [En línea]. Available: <https://w5.siemens.com/cms/mam/industry/md/reductores-de-velocidad/coples-acoplamiento/coples-flexibles/pages/coples-flexibles.aspx>. [Último acceso: 6 Agosto 2018].

- [30] RepRap, «PCB Heatbed - RepRap,» 24 Junio 2018. [En línea]. Available: https://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed. [Último acceso: 25 Junio 2018].
- [31] Verbatim Americas LLC, «3D Printing,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.verbatim-latinoamerica.com/prod/3D-printing/PLA%20Filament%203mm/verbatim-pla-filament-1.75mm-black-sku-55250/#techspecs>. [Último acceso: 10 Agosto 2018].
- [32] 3D Systems, «Nuestra historia 3D Systems,» 2018. [En línea]. Available: <https://es.3dsystems.com/our-story>. [Último acceso: 16 Enero 2018].
- [33] 3D Systems, «Sinterización selectiva por laser,» 2018. [En línea]. Available: <https://es.3dsystems.com/on-demand-manufacturing/selective-laser-sintering>. [Último acceso: 16 Enero 2018].
- [34] H. Mejia, «Ventajas y desventajas de las impresoras 3D,» *Revista Tecnológica*, vol. 12, nº 18, pp. 30-34, 22 Julio 2016.

Índice de figuras

Figura 1: Etapas de la impresión tridimensional. <i>Autoría propia</i>	6
Figura 2: Charles Hull, creador de la impresión tridimensional. <i>Recuperado de: makeR "Chuck Hull Archives". [En línea] en: https://somosmaker.com/tag/chuck-hull/</i>	7
Figura 3: Desarrollo de la impresión tridimensional. <i>Autoría propia</i>	7
Figura 4: Extrusión de material. <i>Recuperado de: Plastics Technology Mexico, "Las 7 familias de la manufactura aditiva". [En línea] en: https://www.pt-mexico.com/cdn/cms/Las_7_familias_de_la_manufactura_aditiva.pdf</i>	9
Figura 5: Fotopolimerización. <i>Recuperado de: Plastics Technology Mexico, "Las 7 familias de la manufactura aditiva". [En línea] en: https://www.pt-mexico.com/cdn/cms/Las_7_familias_de_la_manufactura_aditiva.pdf</i>	9
Figura 6: Inyección de material. <i>Recuperado de: Plastics Technology Mexico, "Las 7 familias de la manufactura aditiva". [En línea] en: https://www.pt-mexico.com/cdn/cms/Las_7_familias_de_la_manufactura_aditiva.pdf</i>	10
Figura 7: Fusión de lecho de polvo. <i>Recuperado de: Plastics Technology Mexico, "Las 7 familias de la manufactura aditiva". [En línea] en: https://www.pt-mexico.com/cdn/cms/Las_7_familias_de_la_manufactura_aditiva.pdf</i>	10
Figura 8: Laminación de hojas. <i>Recuperado de: Plastics Technology Mexico, "Las 7 familias de la manufactura aditiva". [En línea] en: https://www.pt-mexico.com/cdn/cms/Las_7_familias_de_la_manufactura_aditiva.pdf</i>	11
Figura 9: Deposición directa de energía. <i>Recuperado de: Plastics Technology Mexico, "Las 7 familias de la manufactura aditiva". [En línea] en: https://www.pt-mexico.com/cdn/cms/Las_7_familias_de_la_manufactura_aditiva.pdf</i>	11
Figura 10: Proceso EBM. <i>Recuperado de: Plastics Technology Mexico, "Las 7 familias de la manufactura aditiva". [En línea] en: https://www.pt-mexico.com/cdn/cms/Las_7_familias_de_la_manufactura_aditiva.pdf</i>	12
Figura 11: Tecnologías híbridas. <i>Recuperado de: Plastics Technology Mexico, "Las 7 familias de la manufactura aditiva". [En línea] en: https://www.pt-mexico.com/cdn/cms/Las_7_familias_de_la_manufactura_aditiva.pdf</i>	12
Figura 12: Elaboración de piezas complejas. <i>Recuperado de: 3D natives, "¿Qué es la impresión 3D de metal?". [En línea] en: https://www.3dnatives.com/es/guia-impresion-3d-metal/</i>	13
Figura 13: Sistema de movimiento general de una impresora tridimensional. <i>Recuperado de: Autómatas, "S. XII: Al-Jazari". [En línea] en: http://historiaautomatas.blogspot.com/2010/06/s-xii-al-jazari.html</i>	15
Figura 14: Función del sistema de control en el proceso de impresión 3D. <i>Autoría propia</i>	17
Figura 15: Partes de un brazo robótico y su equivalente en la anatomía humana. <i>Recuperado de: Platea, "Estructura de un robot industrial". [En línea] en: http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/sistema/morfologia.htm</i>	18
Figura 16: Fuente del Pavo Real, antecedente de los robots modernos. <i>Recuperado de: Autómatas, "S. XII: Al-Jazari". [En línea] en: http://historiaautomatas.blogspot.com/2010/06/s-xii-al-jazari.html</i>	19
Figura 17: Brazo robótico de 6 GDL. <i>Recuperado de: Inteligencia Artificial, "Grados de libertad". [En línea] en: https://freedomforlife.wordpress.com/grados-de-libertad/</i>	22
Figura 18: Sistema de control de un brazo robótico. <i>Recuperado de: Platea, "Estructura de un robot industrial". [En línea] en: http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/sistema/morfologia.htm</i>	25
Figura 19: Elementos mecánicos del robot. <i>Autoría propia</i>	26
Figura 20: Posición de los ejes. <i>Autoría propia</i>	27
Figura 21: Ubicación de los motores. <i>Autoría propia</i>	28
Figura 22: Controlador Eshed Robotec Controller-B ACL. <i>Autoría propia</i>	29

Figura 23: Enconder óptico incremental. Recuperado de: Desing News, "EM2 Transmissive Optical Encoder Module". [En línea] en: https://directory.designnews.com/em2-transmissive-optical-encoder-module-prod008107.html	31
Figura 24: Tren superior de la traslación. Autoria propia	32
Figura 25: HCF04050BE. Autoria propia	32
Figura 26: Eshed Robotec PC-4000. Autoria propia	32
Figura 27: Interacción entre sistemas. Autoria propia	35
Figura 28: Printrun. Recuperado de: Printrun 3D. [En línea] en: http://www.pronterface.com/	35
Figura 29: Ventana principal del software ATS. Autoria propia	36
Figura 30: Arduino Mega. Recuperado de: Electronica embajadores, "Arduino Mega 2560". [En línea] en: https://www.electronicaembajadores.com/es/Productos/Detalle/LCA1010/modulos-electronicos/modulos-arduino/arduino-mega-2560-rev-3-original	37
Figura 31: Firmware Marlin. Recuperado de: Marlin, [En línea] en: http://marlinfw.org/	37
Figura 32. RAMPS V1.3. Recuperado de: RepRap, "RAMPS 1.3". [En línea] en: https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.3	38
Figura 33: Mesa de apoyo - Modelo CAD. Autoria propia.....	39
Figura 34: Caja para motores - Modelo CAD. Autoria propia.....	40
Figura 35: Estructura tubular - Modelo CAD. Autoria propia.....	40
Figura 36: Motores de la base. Recuperado de: Indiamart, "NEMA Stepper Motor". [En línea] en: https://www.indiamart.com/proddetail/nema-17-4-2-kg-cm-stepper-motor-7566119773.html	41
Figura 37: Cople flexible de aluminio. Recuperado de: Mercado Libre, "Cople de aluminio". [En línea] en: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-654201847-cople-flexible-de-aluminio-5-x-8-mm-_JM	41
Figura 38: Extrusor MK 8. Recuperado de: Aliexpress, "Anet A8 3d impresora". [En línea] en: https://es.aliexpress.com/item/Anet-A8-3d-printer-Accessories-MK8-extruder-kit-Prusa-i3-single-jet-nozzle-A8-extruder-print/32829417022.html	42
Figura 39. Cama caliente MK2B Dual Power. Recuperado de: Inven, "Cama caliente MK2B". [En línea] en: https://inven.es/electronica-3d/7-heatbed-cama-caliente-mk2b-r1-dual-power-1224v-con-termistor-integrado.html	43
Figura 40. Configuración de Printrun Pronterface. Autoria propia	45
Figura 41. Asignación de memoria mediante ATS. Autoria propia	46
Figura 42. Ventana principal de Pronterface. Autoria propia	47
Figura 43. Ventana principal de Arduino con el código Marlin. Autoria propia.....	48
Figura 44: Grafica de temperatura generada por Printrun. Autoria propia.....	49
Figura 45: Sujetador preliminar del mecanismo de extrusión. Autoria propia.....	49
Figura 46. Sujetador para el mecanismo de extrusión. Autoria propia.....	50
Figura 47: Posición CENTR. Autoria propia	51
Figura 48: Posición HOMER. Autoria propia	51
Figura 49: Malla de puntos. Autoria propia	52
Figura 50: Posiciones grabadas por cuadrante. Autoria propia	53
Figura 51. Porta bolígrafo y grabado de posiciones. Autoria propia	53
Figura 52: Cuadrantes del área de trabajo. Autoria propia	54
Figura 53. Modelo resultante de la prueba 1. Autoria propia.....	57
Figura 54. Resultados de la segunda prueba. Autoria propia.....	58
Figura 55. Modelo fabricado en la prueba 3. Autoria propia	58
Figura 56. Pieza resultante de la prueba 4. Autoria propia	59
Figura 57. Lámina impresa en la prueba 5. Autoria propia	60
Figura 58. Prototipo de una caja fabricada en la prueba 6. Autoria propia	61
Figura 59. Prueba realizada utilizando lija como base. Autoria propia	62
Figura 60. Prototipo de caja fabricado en la prueba 8. Autoria propia	62
Figura 61. Sólido resultado de la prueba 9. Autoria propia.....	63
Figura 62. Cuerpo prismático triangular. Autoria propia.....	64

Figura 63. Solido resultante de la prueba 11. <i>Autoria propia</i>	65
Figura 64: Aplicación sistema embebido. <i>Autoria propia</i>	65
Figura 65: Circuito del sistema embebido. <i>Autoria propia</i>	66
Figura 66: Impresión base lámpara. <i>Autoria propia</i>	66
Figura 67: Colocación del circuito. <i>Autoria propia</i>	66
Figura 68: Parte anterior. <i>Autoria propia</i>	67
Figura 69: Parte posterior. <i>Autoria propia</i>	67
Figura 70: Parte lateral derecha. <i>Autoria propia</i>	67
Figura 71: Parte lateral izquierda. <i>Autoria propia</i>	67
Figura 72: Parte inferior. <i>Autoria propia</i>	67

Índice de tablas

<i>Tabla 1: Tecnologías de impresión 3D y materiales empleados</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2: Tipos de pares cinemáticos</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3: Tipos de sistemas coordenados.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 4: Movimiento de los ejes del robot.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 5: Especificaciones de los motores del robot.....</i>	<i>28</i>

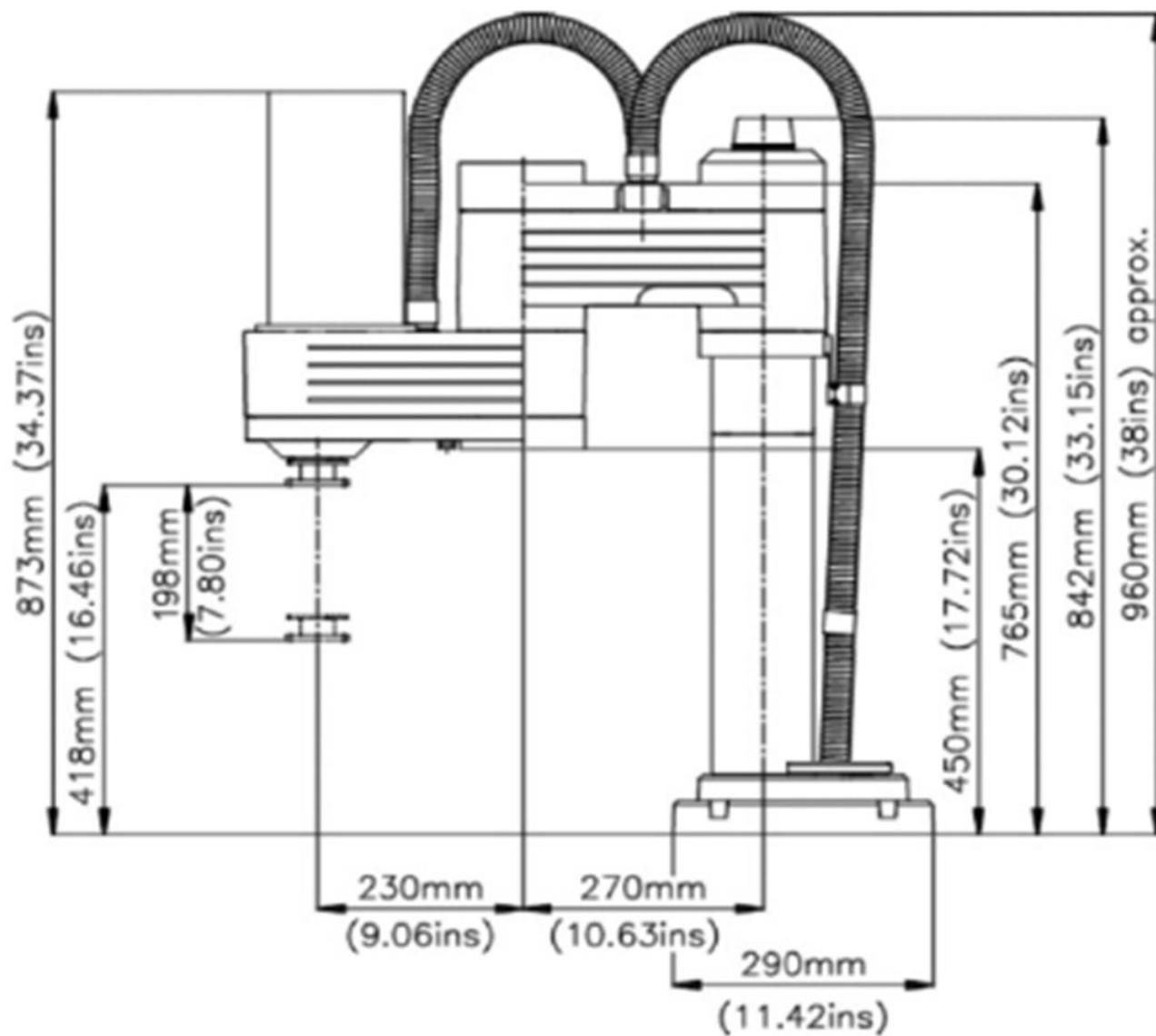
Anexos

Anexo 1: Especificaciones técnicas del robot

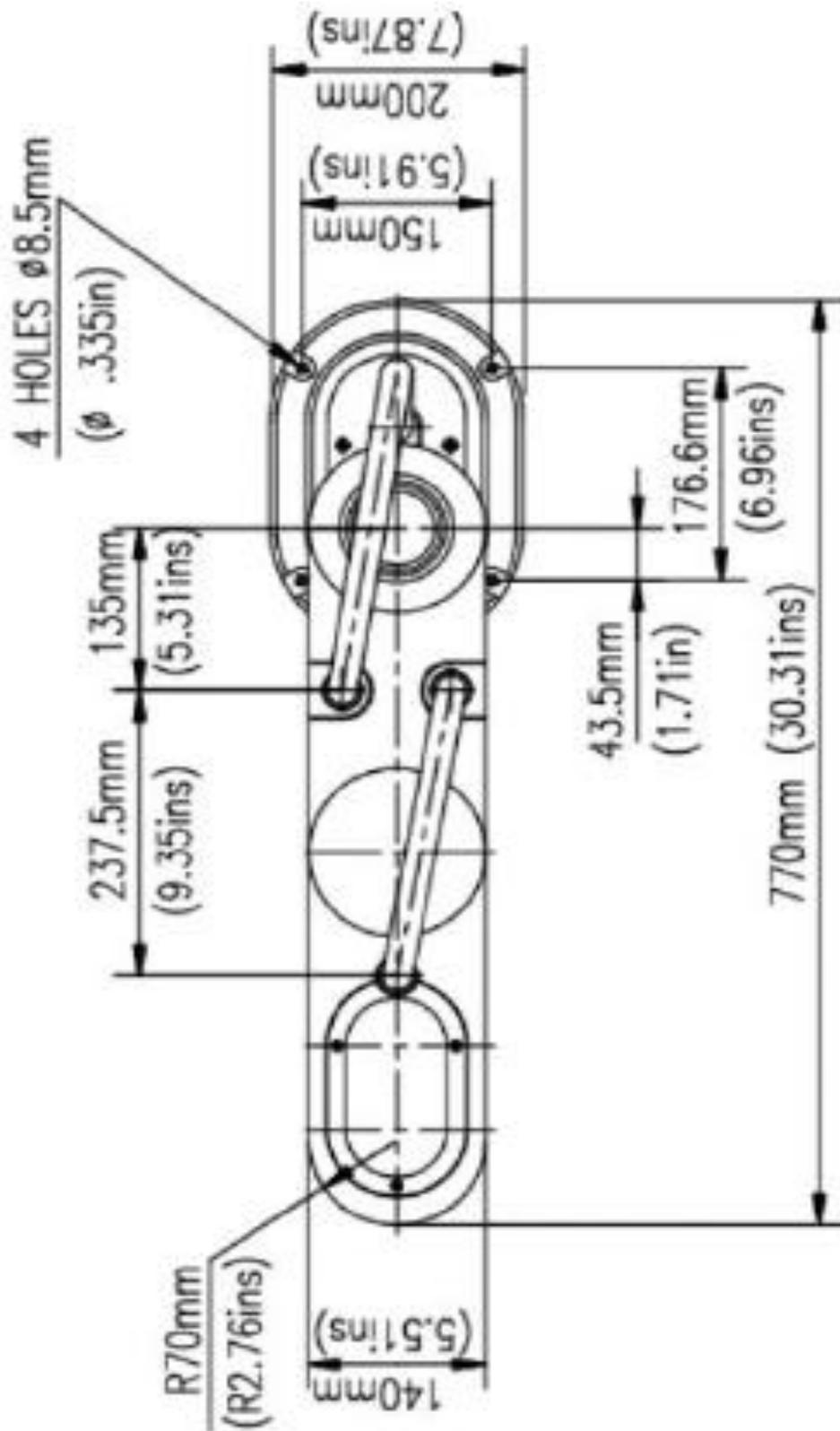
Estructura mecánica		Robot de articulación horizontal (SCARA)
Longitud del brazo	Eslabón 1	270mm
	Eslabón 2	230mm
Movimiento de ejes	Eje 1: Rotación	301.5°
	Eje 2: Rotación	230.5°
	Eje 3: Traslación	198mm
	Eje 4: Giro	Sin restricción (sin cable en la pinza)
$\pm 572^\circ$ (con cable en la pinza)		
Rango de operación		Mínimo 250mm
		Máximo 500mm
Elemento terminal		Pinza neumática
		Pinza eléctrica servo controlada
Inicio (referencia)		Posición fija en cada eje, hallada por medio de microinterruptores
Realimentación		Codificadores ópticos en cada eje
Actuadores		Servo motores de DC
Transmisión		Sistema de engranes armónicos
		Correas dentadas
Carga de trabajo		Máxima 3kg, incluye la pinza y baja aceleración
Peso		45kg
Rango de temperatura		2°C - 40°C

Anexo 2: Dimensiones específicas y campo de trabajo del robot

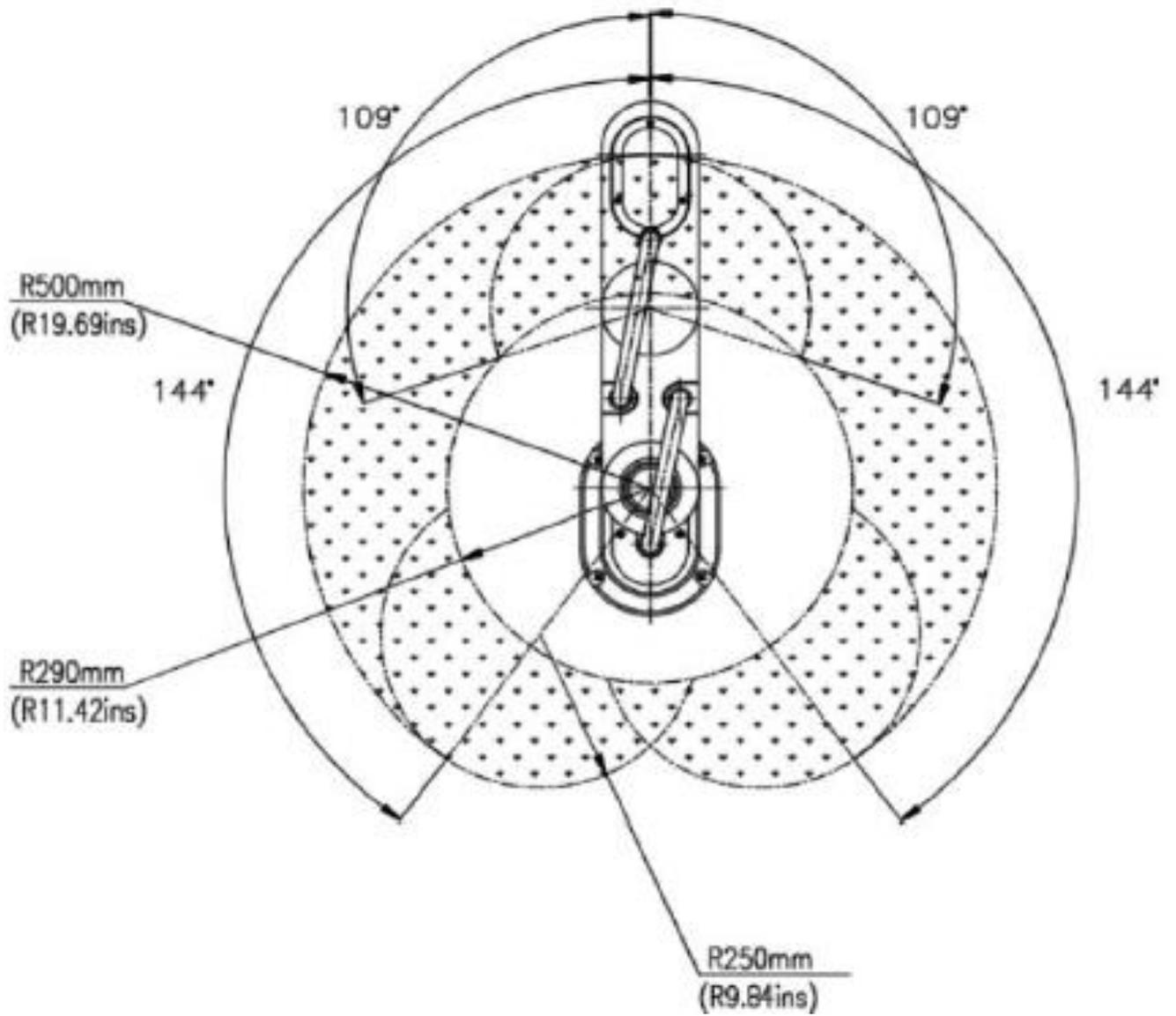
Dimensiones - vista lateral



Dimensiones - vista superior



Campo de trabajo – vista superior



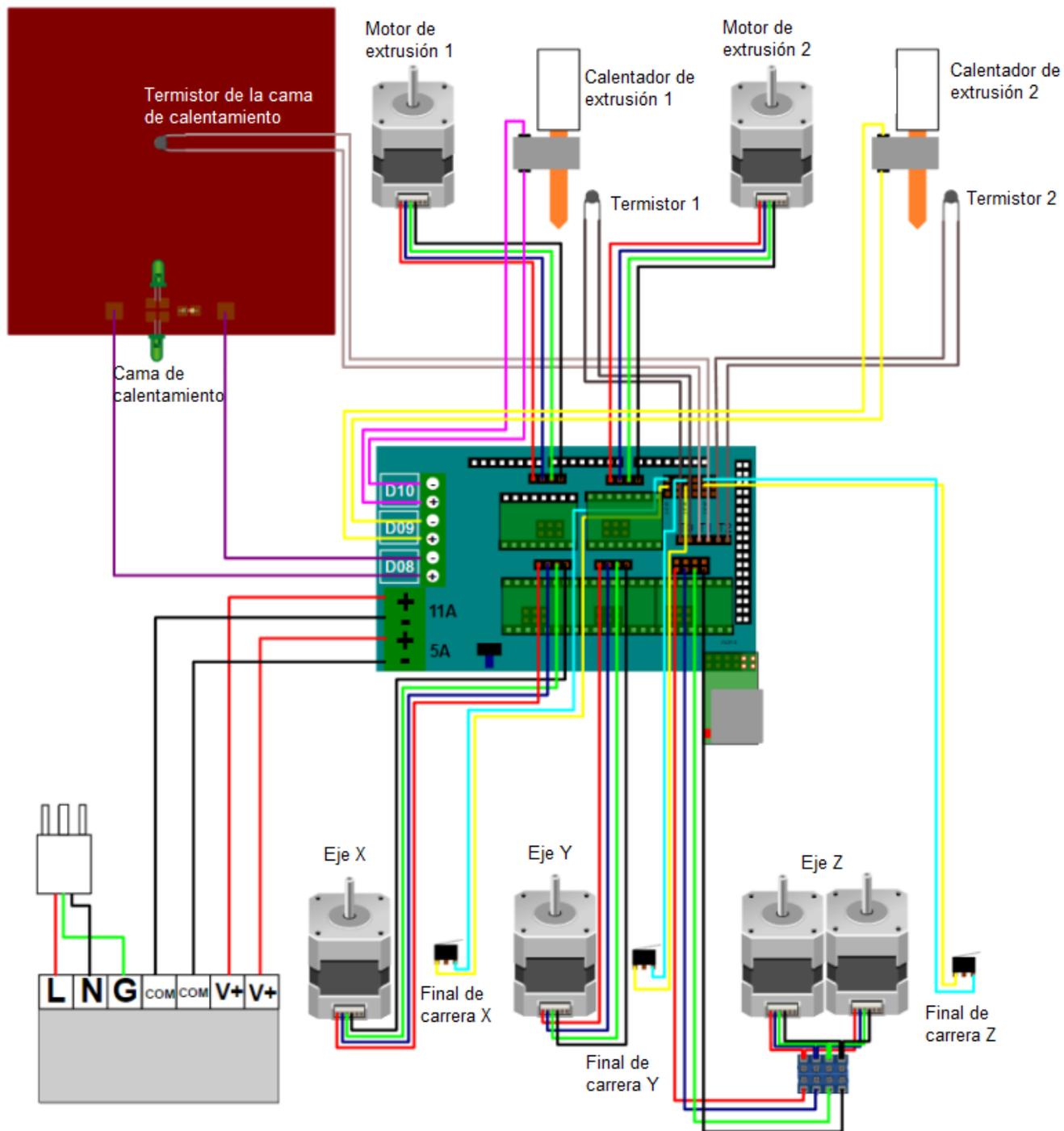
Anexo 3: Especificaciones técnicas del controlador

Sección	Especificaciones	Notas
Tipo de control	Autónomo	PC o terminal necesario para comunicarse con el controlador
	Tiempo real	
	Multitarea	
	PID (proporcional, integral diferencial)	
	PWM (modulación de ancho de pulso)	
Número de ejes	Máximo 12 ejes	
Número de grupos	Grupo A (brazo)	Cada grupo tiene control independiente Interpolación de ejes en los grupos A y B
	Grupo B	
	Grupo C (ejes independientes)	
Tarjetas driver de ejes	Driver PWM en "puente H" 33KHz/A estándar, 10A.	
	Opcional 33-42V (dependiendo de la carga) con realimentación	
Control de movimiento	PTP (punto a punto)	Ciclo de control 10ms Aceleración/Desaceleración PID controlada por software
	CP (trayectoria continua)	
	<i>Joint</i> (ejes)	
	Lineal	
	Circular	
	Predefinido	
	Coordenadas de la herramienta	
Control de trayectoria	Paraboloide	
	Sinusoidal	
	En lazo abierto	
Control de velocidad	Control de velocidad en el trayecto	Velocidad programable en tanto por ciento

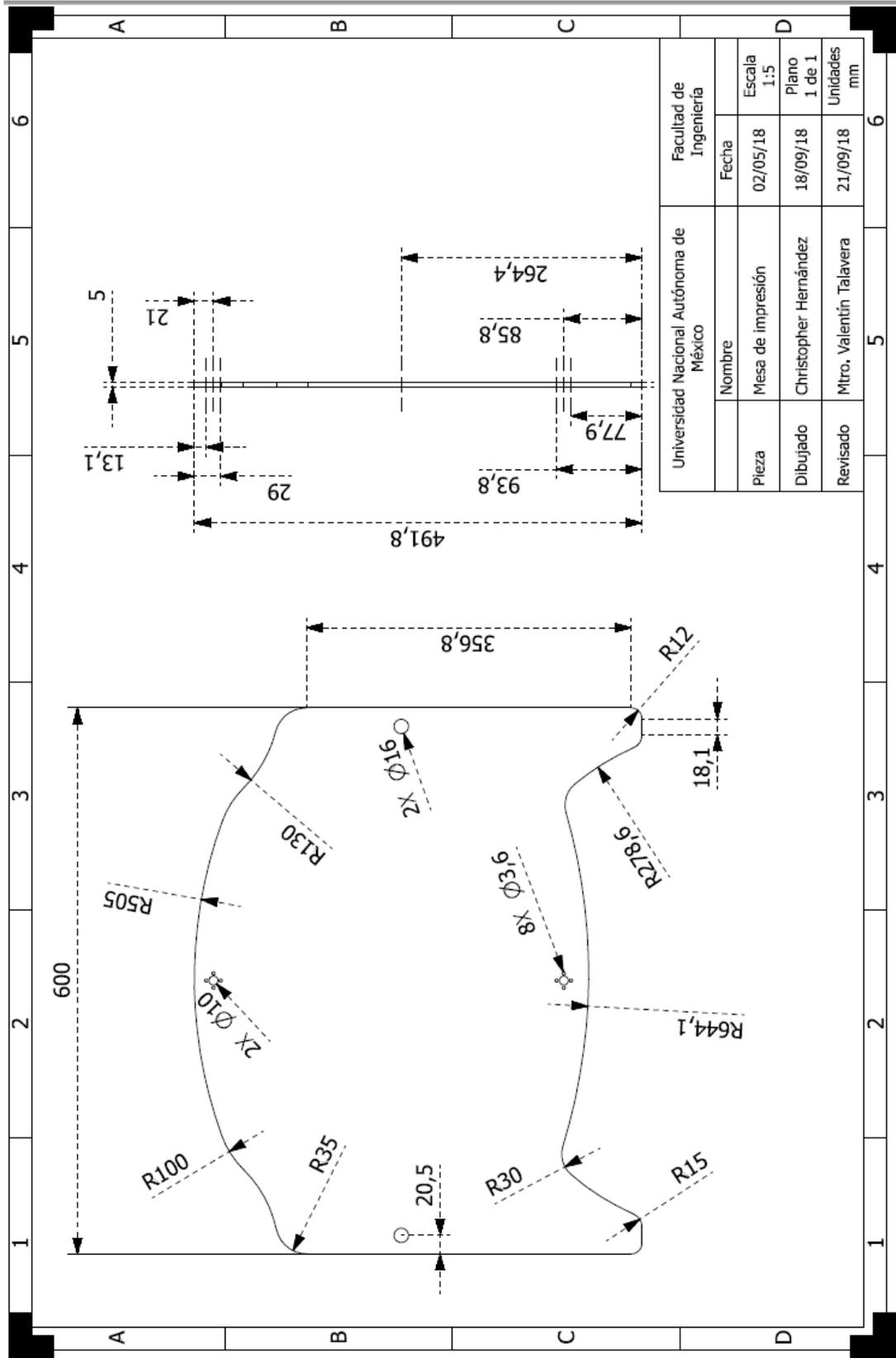
Sección	Especificaciones	Notas
Parámetros de control	Servo control	
	Velocidad	
	Perfil de velocidad	
	Amortiguamiento	
	Error de posición	
	Operación de la pinza	
	Protección térmica de impacto y límite	
	<i>Homing</i>	
	Interfaz de codificadores	
	Cálculos cartesianos	
Requerimientos de potencia	1,500 W máx.	
Fuente de alimentación	Servo: 33-42V, 22A	
	Digital: 5V / 12V / 24V	
	Usuario: 12V, 2A / 24V, 1.5A	
Peso	36Kg	
Dimensiones	Largo: 479mm	
	Ancho: 490mm	
	Alto: 206mm	
Temperatura ambiente de operación	2° - 40° C	
Entradas	16	
Salidas	16	
BUS interno	32 bits de datos, dirección 24 bits	
Lenguaje de programación	ACL (Lenguaje de Control Avanzado)	Usando PC
Multitarea	Ejecuta simultáneamente hasta 40 programa independientes	
Sistema de posicionamiento	Codificadores ópticos incrementales	
Sistema de coordenadas	Coordenadas XYZ	
	Coordenadas de ejes	
Indicadores LED	Rojo Alimentación principal entradas/salidas Alimentación servo Emergencia	
	Verde Potencia en ejes	

Sección	Especificaciones	Notas
Características de seguridad	Interruptor de emergencia	
	Interruptor de potencia en motores	
	Límite de corriente ajustable	
	Protección de cortocircuito	
	Límite de hardware <i>Watchdog</i>	
	Protección de software por falla:	
	Térmica	
	De impacto	
	Límites	
Expansión	Conector para servos remotos	
	Conexión RS232	
	BUS para periféricos inteligentes	
Botonera de enseñanza	30 teclas de función múltiple	
	2 líneas de pantalla LCD	
	Características de control total	

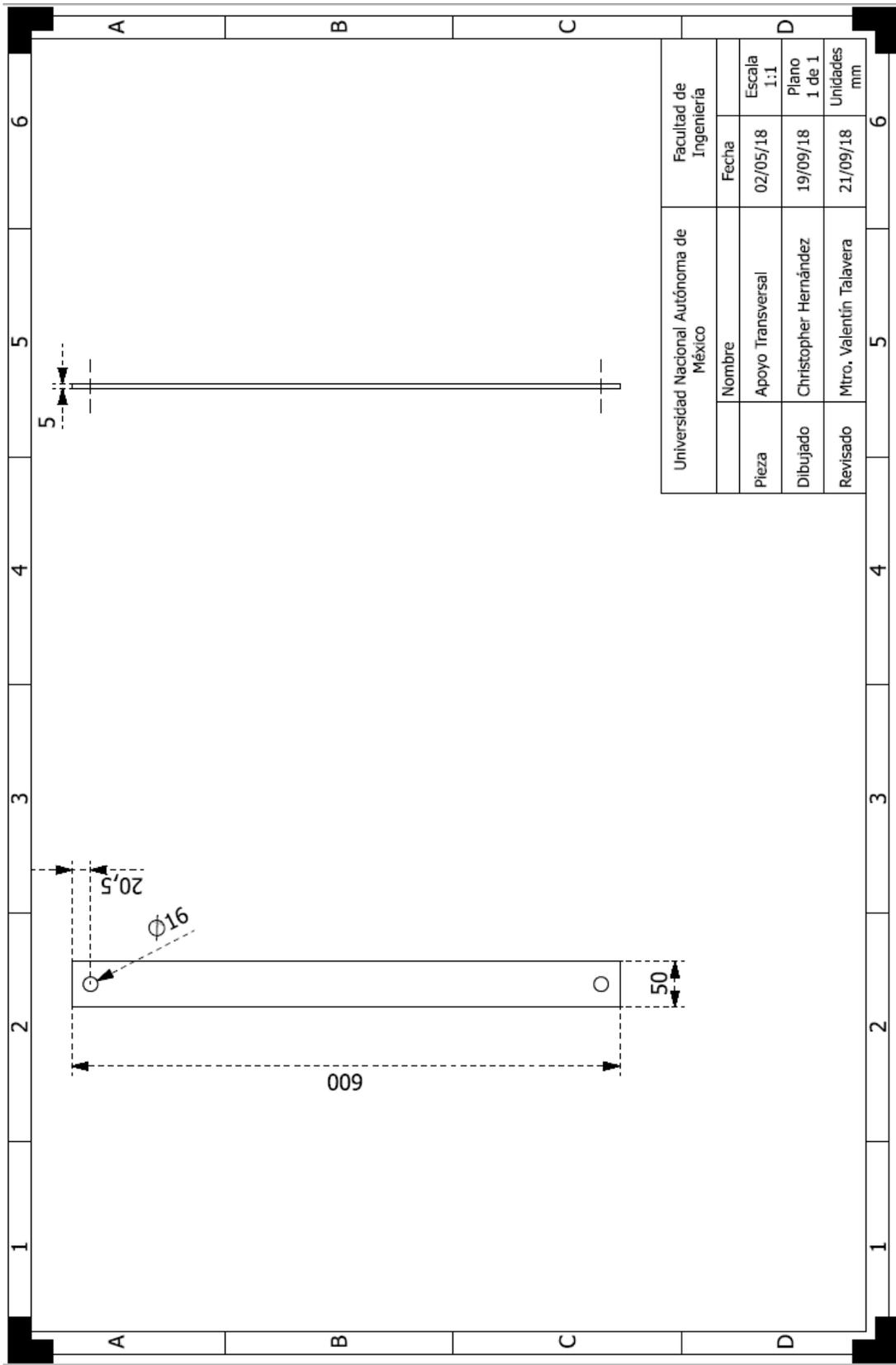
Anexo 4: Conexiones RAMPS V1.3

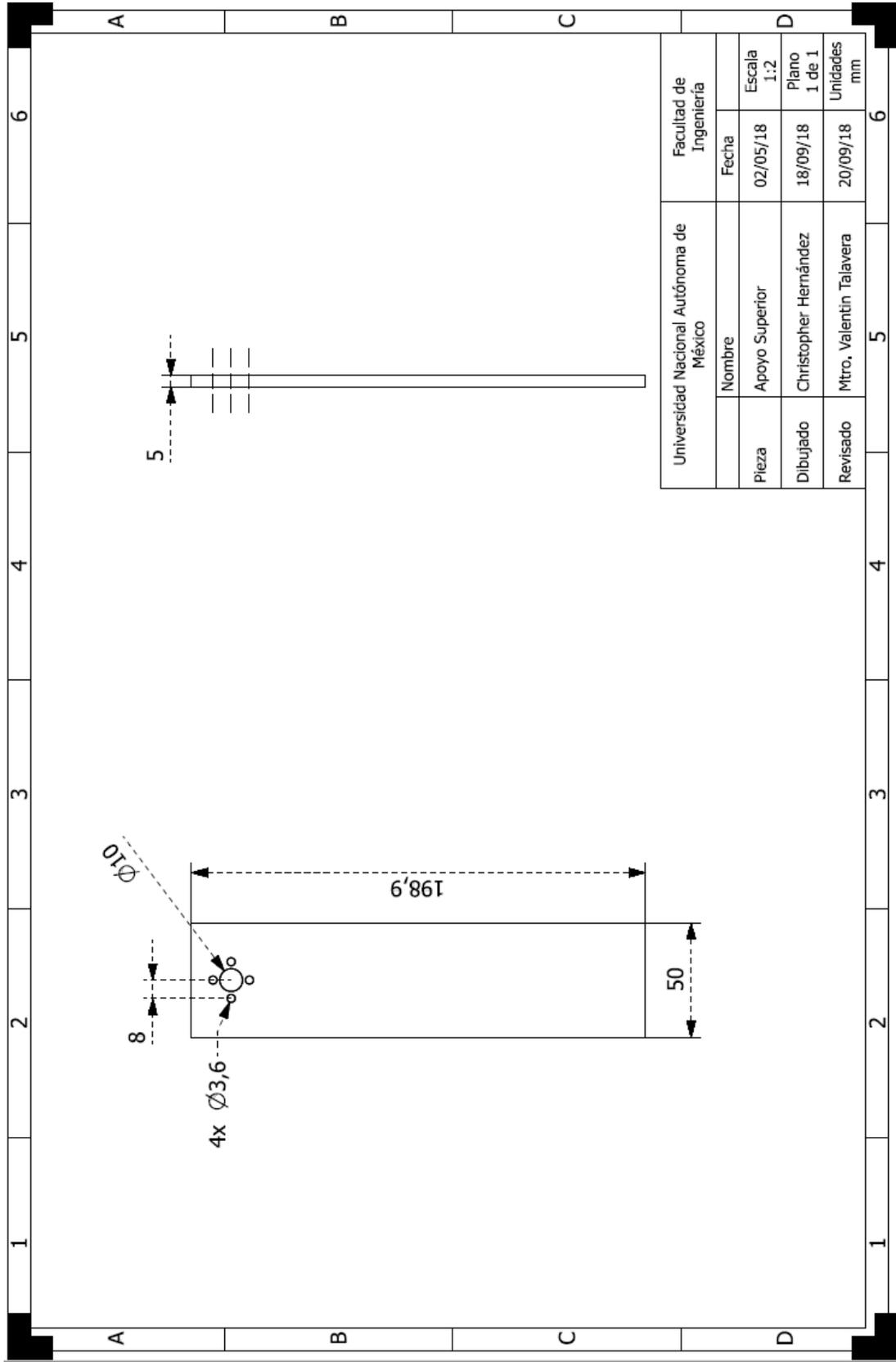


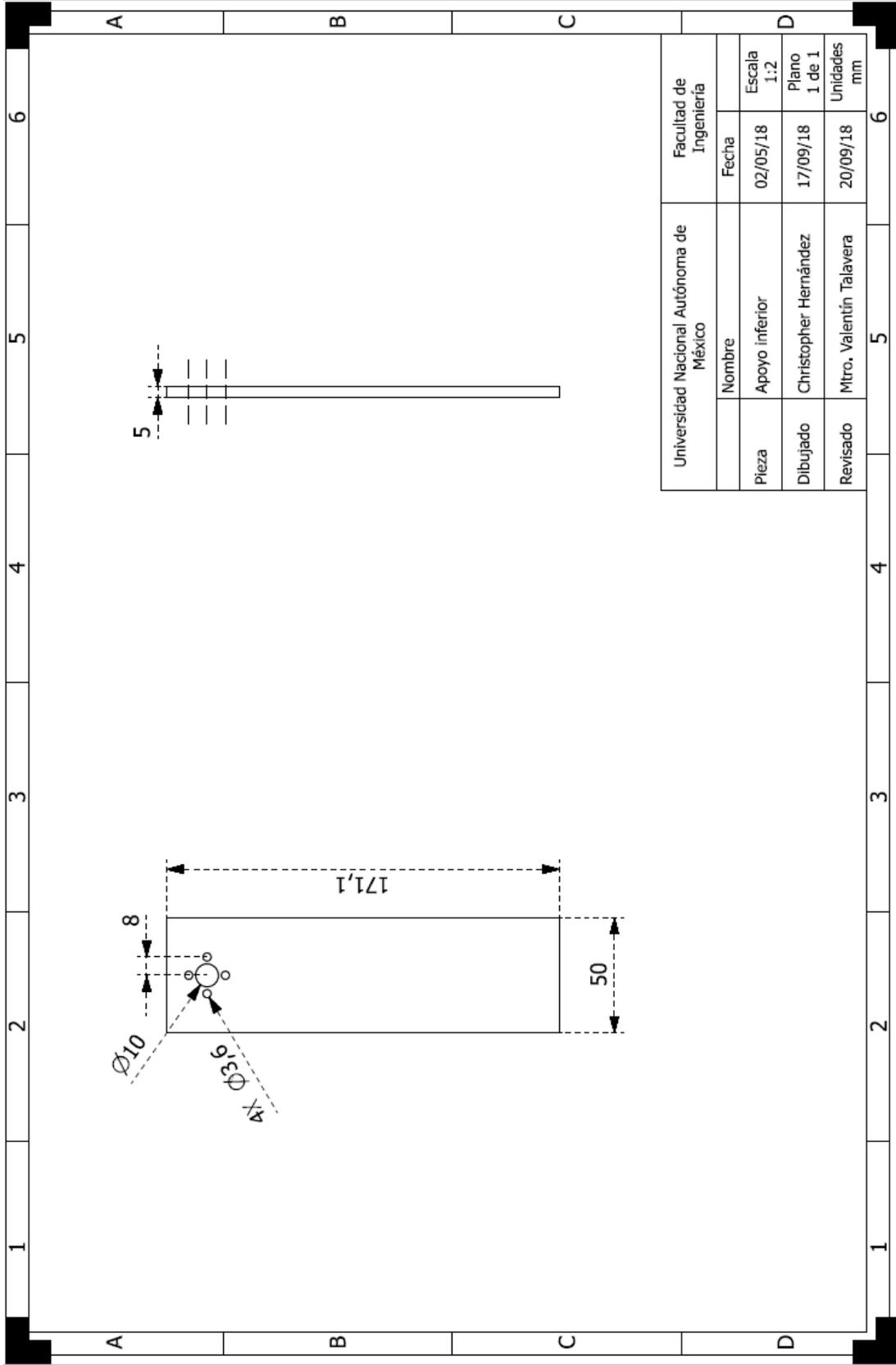
Anexo 5. Planos

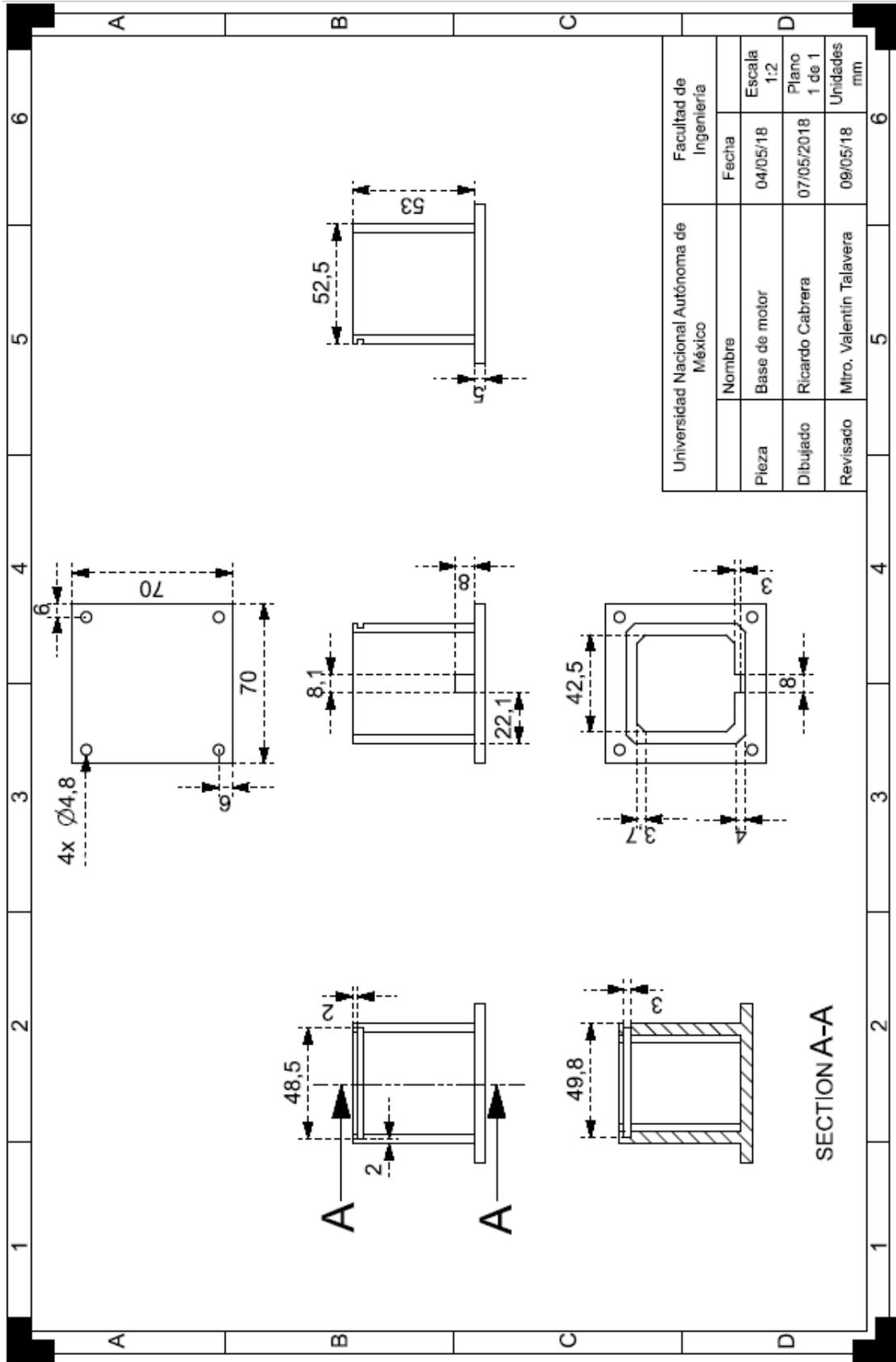


Universidad Nacional Autónoma de México		Facultad de Ingeniería	
Nombre	Mesa de Impresión	Fecha	02/05/18
Pieza	Christopher Hernández	Escala	1:5
Dibujado	Mtro. Valentín Talavera	Plano	1 de 1
Revisado		Unidades	mm

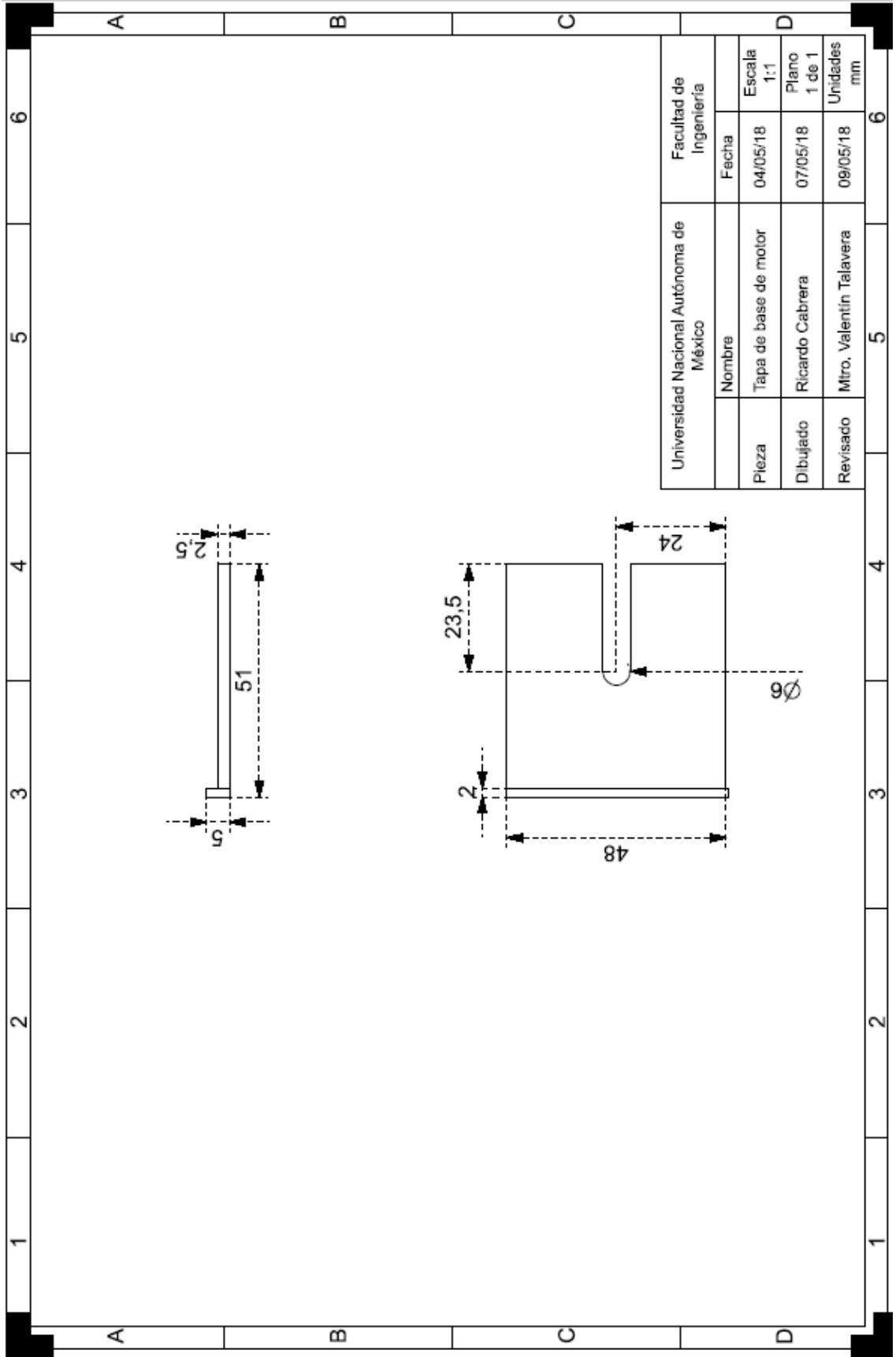


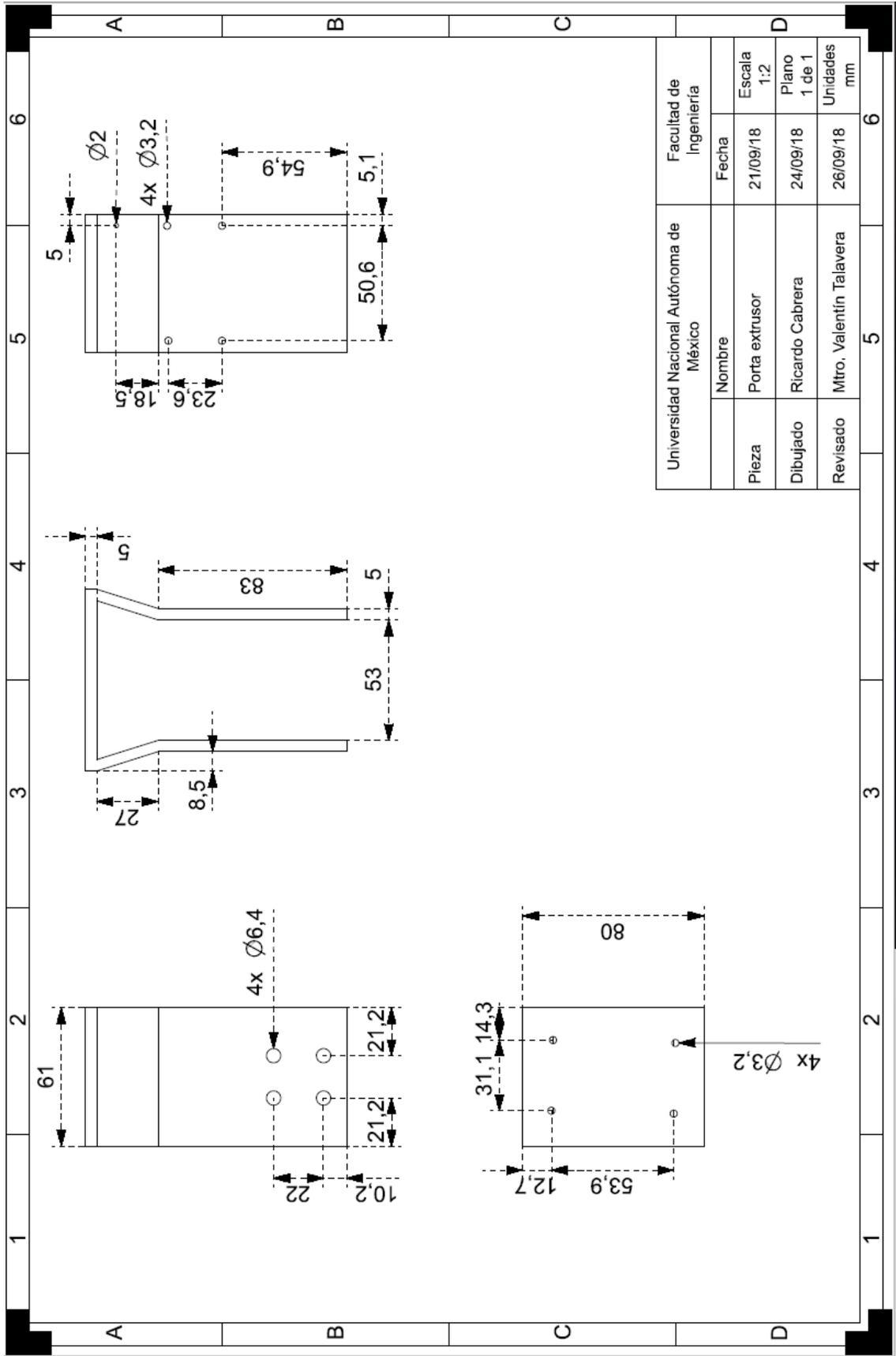




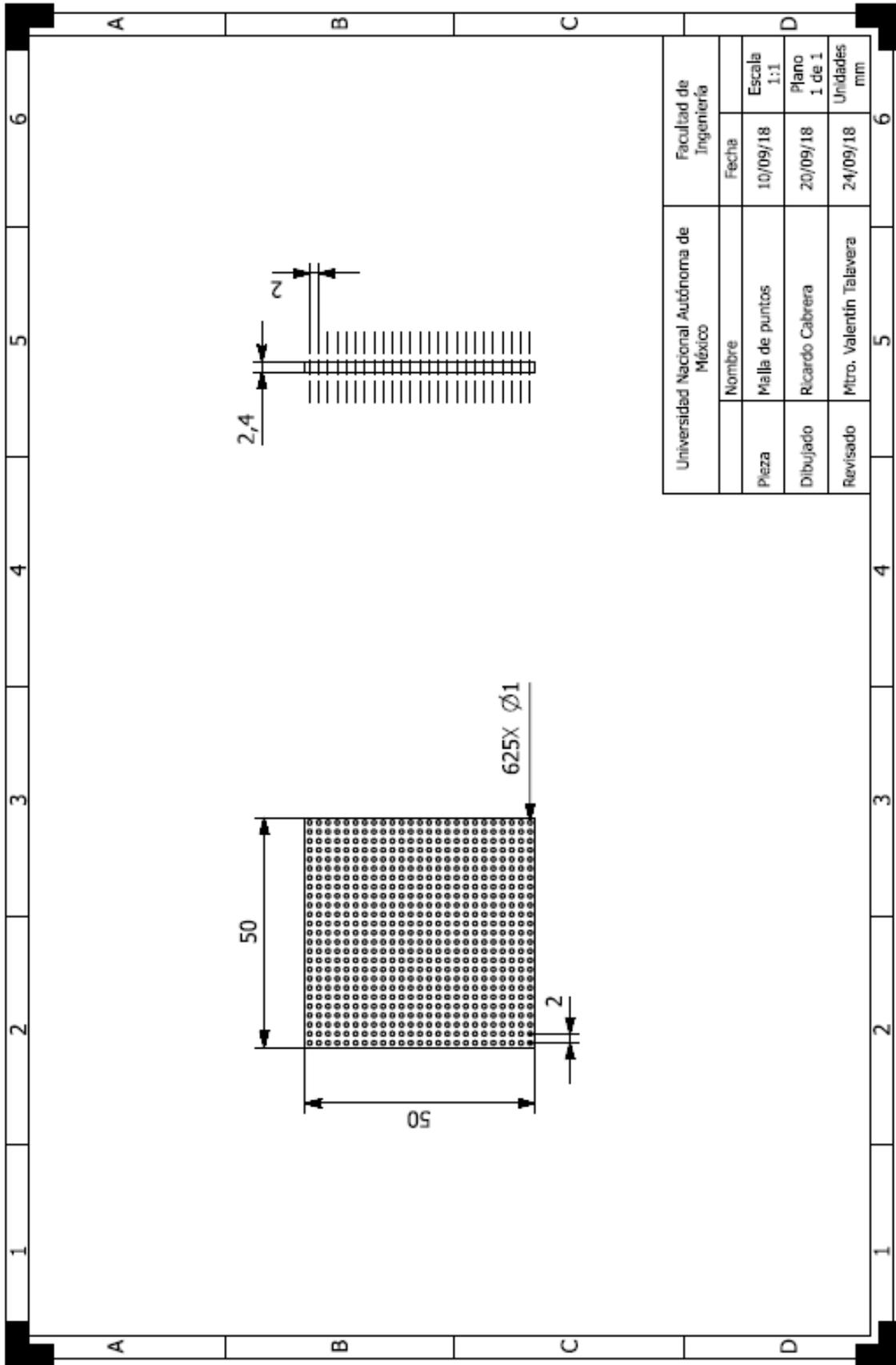


Universidad Nacional Autónoma de México		Facultad de Ingeniería	
Nombre	Base de motor	Fecha	04/05/18
Dibujado	Ricardo Cabrera	Escala	1:2
Revisado	Mtro. Valentín Talavera	Plano	1 de 1
		Unidades	mm





Universidad Nacional Autónoma de México		Facultad de Ingeniería	
Nombre		Fecha	
Pieza	Porta extrusor	21/09/18	Escala 1:2
Dibujado	Ricardo Cabrera	24/09/18	Plano 1 de 1
Revisado	Mtro. Valentín Talavera	26/09/18	Unidades mm



Universidad Nacional Autónoma de México		Facultad de Ingeniería	
Pieza	Nombre	Fecha	Escala
Malla de puntos	Malla de puntos	10/09/18	1:1
Dibujado	Ricardo Cabrera	20/09/18	Plano 1 de 1
Revisado	Mtro. Valentín Talavera	24/09/18	Unidades mm

Anexo 6. Especificaciones del motor NEMA 17

Modelo	SL42STH40-1684a
Ángulo de paso	1.8° (200 pasos por vuelta)
Precisión del ángulo de paso	± 5% (paso completo, sin carga)
Voltaje	2.8 V
Corriente por fase	1.68 A
Resistencia por fase	1.65 Ω
Exactitud de la resistencia	± 10%
Inductancia por fase	3.2 mH
Precisión de la inductancia	± 20%
Par de mantenimiento	3.6 Kg·cm (0.4 N·m)
Momento de inercia	54 g/cm ²
Peso	0.28 kg
Par	3.2 kg/cm
Dimensiones	42 x 42 mm
Longitud	40 mm
Aumento de temperatura	80 °C máx. (Corriente nominal, 2 fases activas)
Temperatura ambiente	-20 °C ~ +50 °C
Resistencia de aislamiento	100 MΩ mín., 500 VDC
Juego radial del eje	0.02 mm máx. (450 g de carga)
Juego axial del eje	0.08 mm máx. (450 g de carga)
Máxima fuerza radial	28 N (20 mm desde la brida)
Máxima fuerza axial	10 N

Anexo 7. Especificaciones del mecanismo de extrusión MK8

Material de fabricación	Aleación de aluminio
Material de trabajo	ABS, PLA
Velocidad de desplazamiento	40 mm/s
Velocidad de flujo del inyector	24 cc/h aprox.
Motor a pasos	NEMA 17 SL42STH40-1684a
Voltaje	12 V
Potencia	40 W
Diámetro de boquilla	1.75 mm
Diámetro de material	1.75 mm
Temperatura	170 – 260 °C
Temperatura ambiente	20°C – 35°C
Termopar	Tipo K, NTC 100K b=3950
Disipador	40·40·10 mm
Peso	500 g

Anexo 8. Especificaciones de la cama caliente.

Color	Rojo y negro
Grabado	35 μm cobre
Dimensiones	214 mm x 214 mm
Laminado	FR4 1.6 ± 0.15 mm
Capa	35 μm cobre
Mascara de soldadura roja	Solo un lado
Serigrafía blanca	Solo un lado
Voltaje de entrada	12 V / 24 V
Corriente	9.8 A – 8.8 A (12 V) \approx 5 A (24 V)
Resistencia	1 Ω - 1.2 Ω
Agujeros	Chapados en cobre

Anexo 9. Programas para construcción de prototipos.

CUBIC

```
SPEED 1
MOVED RAYAS[10]
MOVE RAYAS[34]
MOVE RAYAS[58]
MOVE RAYAS[82]
MOVE RAYAS[105]
MOVE RAYAS[128]
MOVE RAYAS[150]
MOVE RAYAS[173]
MOVE RAYAS[194]
END
```

RELLE

```
SPEED 1
MOVE RAYAS[215]
MOVE RAYAS[216]
MOVE RAYAS[274]
MOVE RAYAS[273]
MOVE RAYAS[217]
MOVE RAYAS[218]
MOVE RAYAS[272]
MOVE RAYAS[271]
MOVE RAYAS[219]
MOVE RAYAS[220]
MOVE RAYAS[270]
MOVE RAYAS[269]
MOVE RAYAS[221]
MOVE RAYAS[222]
MOVE RAYAS[268]
MOVE RAYAS[267]
MOVE RAYAS[223]
MOVE RAYAS[224]
MOVE RAYAS[266]
MOVE RAYAS[265]
MOVE RAYAS[225]
MOVE RAYAS[226]
MOVE RAYAS[264]
MOVE RAYAS[263]
MOVE RAYAS[227]
MOVE RAYAS[228]
MOVE RAYAS[262]
```

```
MOVE RAYAS[261]
MOVE RAYAS[229]
MOVE RAYAS[230]
MOVE RAYAS[260]
MOVE RAYAS[259]
MOVE RAYAS[231]
MOVE RAYAS[232]
MOVE RAYAS[258]
MOVE RAYAS[257]
MOVE RAYAS[233]
MOVE RAYAS[234]
MOVE RAYAS[256]
MOVE RAYAS[255]
MOVE RAYAS[235]
END
```

TRIAP

```
SPEED 1
MOVE TRIAN[1]
MOVE TRIAN[13]
MOVE TRIAN[25]
MOVE TRIAN[38]
MOVE TRIAN[49]
MOVE TRIAN[238]
MOVE TRIAN[39]
END
```

TRIAR

```
SPEED 1
MOVE TRIAN[49]
MOVE TRIAN[52]
MOVE TRIAN[62]
MOVE TRIAN[65]
MOVE TRIAN[73]
MOVE TRIAN[76]
MOVE TRIAN[84]
MOVE TRIAN[87]
MOVE TRIAN[95]
MOVE TRIAN[98]
MOVE TRIAN[106]
MOVE TRIAN[109]
MOVE TRIAN[117]
MOVE TRIAN[120]
MOVE TRIAN[126]
MOVE TRIAN[129]
MOVE TRIAN[135]
MOVE TRIAN[138]
MOVE TRIAN[144]
MOVE TRIAN[147]
MOVE TRIAN[153]
MOVE TRIAN[156]
MOVE TRIAN[162]
MOVE TRIAN[165]
MOVE TRIAN[169]
MOVE TRIAN[172]
MOVE TRIAN[176]
MOVE TRIAN[179]
MOVE TRIAN[183]
MOVE TRIAN[186]
MOVE TRIAN[190]
MOVE TRIAN[193]
MOVE TRIAN[195]
MOVE TRIAN[198]
MOVE TRIAN[201]
MOVE TRIAN[203]
MOVE TRIAN[205]
MOVE TRIAN[209]
END
```

