



UNIVERSIDAD UTE

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE EXTRUSOR PARA
IMPRESIÓN 3D DE CHOCOLATE**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

RONNIE ALEXANDER ORDÓÑEZ PESÁNTEZ

DIRECTOR: ING. DANIEL MIDEROS

Quito, Marzo 2019

© Universidad UTE 2019.

Reservados todos los derechos de reproducción.

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	172094672-0
APELLIDO Y NOMBRES:	ORDÓÑEZ PESÁNTEZ RONNIE ALEXANDER
DIRECCIÓN:	AV. MIGUEL ÁNGEL S6-307 Y MAGNOLIAS
EMAIL:	ronnieordonez93@gmail.com
TELÉFONO FIJO:	02-3551-095
TELÉFONO MOVIL:	0987819403

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE EXTRUSOR PARA IMPRESIÓN 3D DE CHOCOLATE
AUTOR O AUTORES:	RONNIE ALEXANDER ORDÓÑEZ PESÁNTEZ
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	15/03/2019
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	ING. DANIEL MIDEROS
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN MECATRÓNICA
RESUMEN: Mínimo 250 palabras	<p>El estudio fue propuesto con la finalidad de obtener un prototipo de extrusor capaz de imprimir figuras 3D de chocolate cumpliendo con los requerimientos de diseño y normativas propias en la fabricación de maquinaria para la industria de alimentos. Se inició realizando una investigación sobre las características físicas y reológicas del chocolate, así como de tecnologías existentes en la impresión del mismo. En base a los fundamentos teóricos, se realizó un diseño mecánico de los componentes que formaron parte del extrusor. La tecnología seleccionada es conocida como ChocALM y utiliza un tornillo extrusor. Las dimensiones del mecanismo fueron seleccionadas de forma que puedan reemplazar el extrusor de plástico de la Anet A6, una de las principales impresoras Reprap. A continuación, se realizó la selección de componentes eléctricos y electrónicos; que se encargan de mover el mecanismo de deposición de chocolate, así como mantener la temperatura</p>

del mismo a 32°C. Luego, se construyó el prototipo con el cual se realizaron pruebas enfocadas a demostrar el cumplimiento del alcance y calidad dimensional de las figuras impresas. Con esta información, se concluyó que el extrusor fue capaz de imprimir piezas en 3D con diferentes tipos de chocolate de forma satisfactoria. Además, se obtuvo una definición elevada en figuras de una altura no superior a 1mm, las cuales presentaron un error dimensional menor al 2% en relación al dibujo en CAD. Por otro lado, para figuras de mayor altura y complejidad este error dimensional aumentó; aunque no resulta un problema mayor ya que la diferencia en el peor resultado fue de 3.6mm. Para finalizar, se comprobó la altura máxima a la cual podía imprimirse obteniendo como mejor resultado 82.1mm.

PALABRAS CLAVES:

Impresión 3D, ChocALM, Reprap.

ABSTRACT:

The study was proposed in order to obtain a prototype of extruder able to print 3D chocolate figures accomplishing the design requirements and regulations for food processing machinery. It started with an investigation about the physical and rheological characteristics of chocolate, as well as existing technologies for printing it. Based on the theoretical foundations, a mechanical design of the components of the extruder was made. The technology selected is known as ChocALM and used an extruder screw. The mechanism dimensions were selected so that they can replace the plastic extruder of the Anet A6, one of the main Reprap printers. Next, the selection of electrical and electronic components was made; they are in charge of moving the chocolate deposition mechanism, and maintaining its temperature at 32 ° C. Then, the prototype was built and it was tested in order to demonstrate the compliance of the scope and the dimensional quality of the printed figures. With this information, it was concluded that the extruder was able to print pieces in 3D with different types of chocolate in a satisfactory way. In addition, a high definition was obtained in figures that are not higher than 1mm, which presented a dimensional error of less than 2% in relation to the CAD drawing. On the other hand, for figures of greater height and complexity this dimensional error increased; although it is not a major problem since the difference in the worst result was 3.6mm. Finally, it was checked the maximum height at which it could

KEYWORDS	be printed, obtaining 82.1mm as the best result.
	3D printing, ChocALM , Reprap.

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f:  _____

ORDÓÑEZ PESÁNTEZ RONNIE ALEXANDER

172094672-0

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **ORDÓÑEZ PESÁNTEZ RONNIE ALEXANDER**, CI 172094672-0 autor del proyecto titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE EXTRUSOR PARA IMPRESIÓN 3D DE CHOCOLATE** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN MECATRÓNICA** en la Universidad UTE.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad UTE a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, 15 de marzo de 2019

f: _____



ORDÓÑEZ PESÁNTEZ RONNIE ALEXANDER

172094672-0

DECLARACIÓN

Yo, **Ronnie Alexander Ordóñez Pesántez**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en éste documento.

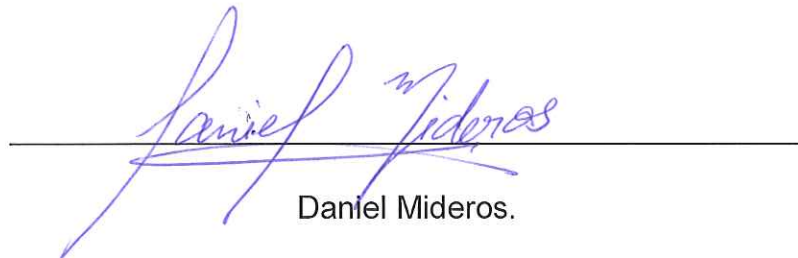
La Universidad UTE puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



ORDÓÑEZ PESÁNTEZ RONNIE ALEXANDER
C.I. 172094672-0

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título "**Diseño e implementación de extrusor para impresión 3D de chocolate**", que, para aspirar al título de **Ingeniero en Mecatrónica** fue desarrollado por **Ronnie Alexander Ordóñez Pesántez**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la ingeniería e Industrias; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 19, 27 y 28.



Daniel Mideros.

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I. 1713177325

DEDICATORIA

A mis padres que han sido parte fundamental de este logro, mi educación mis valores y mi formación personal son el reflejo de sus enseñanzas.

A mi novia Raquel cuyo apoyo y cariño fueron un impulso especial para la realización de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

A las personas que me dieron la vida, Galo y Sylvana. Sería impensable no agradecerles por este logro con el cual cierro una etapa más de mi formación profesional. Gracias por sus enseñanzas, valores inculcados, cuidados y apoyo incondicional.

A mis hermanas, mis abuelitas y abuelitos, por estar siempre pendientes de mí, alegrarse con mis logros y apoyarme de forma constante.

A mi novia Raquel, por su cariño y apoyo durante estos tres años que llevamos juntos. En especial por trabajar junto a mí en este proyecto que unió el campo de estudio de ambos.

A mis profesores de la carrera, por todo el conocimiento transmitido a través de años de estudio.

A mi director de tesis, Ingeniero Daniel Mideros, por su apertura y apoyo para sacar este proyecto adelante desde la idea inicial hasta su culminación.

A mi tío, padrino, compadre y amigo Luis Pesántez, por su apoyo constante a lo largo de toda mi vida. No existe una etapa en la cual no haya contado con tu ayuda y consejos. Gracias por todo lo que has hecho y sigues haciendo por mí.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. METODOLOGÍA Y DISEÑO	9
2.1. METODOLOGÍA MECATRÓNICA.....	9
2.2. DISEÑO CONCEPTUAL.....	10
2.3. PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	11
2.4. DISEÑO ESPECÍFICO	13
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXOS	45

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1. Nomenclaturas utilizadas para nombrar las diferentes formas cristalinas de la manteca de cacao y sus temperaturas de formación.	7
Tabla 2. Lista de materiales extrusor de chocolate.	14
Tabla 3. Consumo de elementos electrónicos Anet A6 y extrusor de chocolate.	31
Tabla 4. Especificaciones técnicas extrusor de chocolate.	32
Tabla 5. Análisis de costos extrusor de chocolate.	32
Tabla 6. Tiempo de calentamiento cañón extrusor.	33
Tabla 7. Datos de enfriamiento del chocolate.	34
Tabla 8. Datos de prueba de caudal.	35
Tabla 9. Datos de prueba unidimensional.	36
Tabla 10. Datos de prueba bidimensional.	37
Tabla 11. Datos de prueba tridimensional.	38
Tabla 12. Datos de la prueba de altura.	39

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Datos de viscosidad a diferentes temperaturas.....	4
Figura 2. Diagrama de requerimientos extrusor de chocolate.	10
Figura 3. Diagrama general del sistema extrusor de chocolate.	10
Figura 4. Definición de elementos de extrusor de chocolate.	11
Figura 5. Unidades requeridas del sistema.	11
Figura 6. Vista explosionada extrusor de chocolate.	14
Figura 7. DCL, fuerza cortante y momento flexionante para una viga fija....	16
Figura 8. Dimensiones y DCL del soporte vertical.....	17
Figura 9. DCL, fuerza cortante y momento flexionante para el soporte inferior.....	19
Figura 10. Vista superior acople extrusor a impresora.	20
Figura 11. Geometría y parámetros de un tornillo extrusor.	22
Figura 12. Dimensiones tornillo extrusor de chocolate.	22
Figura 13. Dimensiones del cañón extrusor.	24
Figura 14. Esquema gráfico de caída de temperatura en el cañón extrusor.....	25
Figura 15. Diagrama eléctrico extrusor de chocolate.	28
Figura 16. Calefactor flexible 12V.	29
Figura 17. Interfaz de monitoreo Anet A6.....	30
Figura 18. Prueba de enfriamiento de chocolate.	34
Figura 19. Prueba de caudal.	35
Figura 20. Líneas impresas de 80mm de longitud.....	36
Figura 21. Cuadrados de chocolate de 20mm de lado.	37
Figura 22. Cajas de prueba en tres dimensiones.	38
Figura 23. Medición prueba de altura.....	39

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO 1. Planos de elementos mecánicos	45

RESUMEN

El estudio fue propuesto con la finalidad de obtener un prototipo de extrusor capaz de imprimir figuras 3D de chocolate cumpliendo con los requerimientos de diseño y normativas propias en la fabricación de maquinaria para la industria de alimentos. Se inició realizando una investigación sobre las características físicas y reológicas del chocolate, así como de tecnologías existentes en la impresión del mismo. En base a los fundamentos teóricos, se realizó un diseño mecánico de los componentes que formaron parte del extrusor. La tecnología seleccionada es conocida como ChocALM y utiliza un tornillo extrusor. Las dimensiones del mecanismo fueron seleccionadas de forma que puedan reemplazar el extrusor de plástico de la Anet A6, una de las principales impresoras Reprap. A continuación, se realizó la selección de componentes eléctricos y electrónicos; que se encargan de mover el mecanismo de deposición de chocolate, así como mantener la temperatura del mismo a 32°C. Luego, se construyó el prototipo con el cual se realizaron pruebas enfocadas a demostrar el cumplimiento del alcance y calidad dimensional de las figuras impresas. Con esta información, se concluyó que el extrusor fue capaz de imprimir piezas en 3D con diferentes tipos de chocolate de forma satisfactoria. Además, se obtuvo una definición elevada en figuras de una altura no superior a 1mm, las cuales presentaron un error dimensional menor al 2% en relación al dibujo en CAD. Por otro lado, para figuras de mayor altura y complejidad este error dimensional aumentó; aunque no resulta un problema mayor ya que la diferencia en el peor resultado fue de 3.6mm. Para finalizar, se comprobó la altura máxima a la cual podía imprimirse obteniendo como mejor resultado 82.1mm.

Palabras clave: Impresión 3D, ChocALM, Reprap.

ABSTRACT

The study was proposed in order to obtain a prototype of extruder able to print 3D chocolate figures accomplishing the design requirements and regulations for food processing machinery. It started with an investigation about the physical and rheological characteristics of chocolate, as well as existing technologies for printing it. Based on the theoretical foundations, a mechanical design of the components of the extruder was made. The technology selected is known as ChocALM and used an extruder screw. The mechanism dimensions were selected so that they can replace the plastic extruder of the Anet A6, one of the main Reprap printers. Next, the selection of electrical and electronic components was made; they are in charge of moving the chocolate deposition mechanism, and maintaining its temperature at 32 ° C. Then, the prototype was built and it was tested in order to demonstrate the compliance of the scope and the dimensional quality of the printed figures. With this information, it was concluded that the extruder was able to print pieces in 3D with different types of chocolate in a satisfactory way. In addition, a high definition was obtained in figures that are not higher than 1mm, which presented a dimensional error of less than 2% in relation to the CAD drawing. On the other hand, for figures of greater height and complexity this dimensional error increased; although it is not a major problem since the difference in the worst result was 3.6mm. Finally, it was checked the maximum height at which it could be printed, obtaining 82.1mm as the best result.

Keywords: 3D printing, ChocALM, Reprap.

1. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D marcó una revolución desde el momento en que apareció en la década de 1980. Uno de los primeros métodos para la generación de piezas impresas, empleaba una técnica que se basaba en la fabricación por capas de resina polimérica. Desde esa concepción hasta el día de hoy no se ha modificado en gran medida el concepto de la impresión 3D. En sus inicios, el tema se utilizó para el diseño de modelos y confección de prototipos en las áreas de manufactura de piezas y arquitectura. Posteriormente, la utilidad de esta tecnología se expandió a áreas como la medicina, donde se diseñaban partes de prótesis y acoples. En los últimos años, una de las industrias que ha ingresado en esta área es la de alimentos. La idea es que una máquina pueda generar cualquier tipo de alimento con formas programadas por un sistema computacional de diseño (Vazhnov, 2013).

El proceso de impresión 3D se encuentra dentro de un grupo de manufactura conocido como prototipado rápido de capas aditivas, *additive layer manufacturing* (ALM). Este comienza con el dibujo de una pieza en un software CAD, el cual la transformará a un formato por capas o STL, donde se crea un patrón de coordenadas. Estas son receptadas por el controlador de la impresora 3D, que las utiliza para enviar una secuencia de movimiento hacia los motores que disponga. Estos son capaces de mover a un cabezal en relación a una cama donde se depositará el material hasta formar la pieza deseada. Mientras esto sucede del cabezal se expulsa material fundido el cual debe enfriarse al contacto con la cama de deposición para que se solidifique y sea adherido verticalmente a la capa siguiente, así hasta concluir con todas las capas generadas (Vazhnov, 2013).

Las ventajas de este proceso incluyen la flexibilidad en la manufactura, ya que sin necesidad de cambios físicos en la máquina se puede generar diferentes tipos de piezas. Además, estas no requieren de un post procesamiento extenso y en su mayoría no requieren de uno. Como desventajas se encuentra que los tiempos de producción son mayores a los de una línea en serie lo cual limita el número de piezas que se pueden producir, aumentando su costo (Groover, 2015). Pese a esta limitación, para lotes pequeños de producción o piezas únicas, la disminución en tiempos y costes de preparación convierten a la tecnología ALM en la mejor opción de manufactura.

Entre los ingredientes que la impresión 3D en la industria alimenticia ha intentado utilizar se encuentra el chocolate, para lo cual se utiliza un método de manufactura conocido como chocALM (Hao *et al.*, 2010). Este material forma parte de una clasificación la cual se denomina como materiales nativos para impresión, los cuales tienen la característica de poder extruirse suavemente a través de una boquilla de diámetro reducido. Además, no requieren de un post procesamiento de la pieza generada en 3D lo cual

disminuye el tiempo de fabricación. Entre otros materiales de este tipo se encuentran el humus y el hidrogel (Sun, Peng, Yan & Hong, 2015).

Las características reológicas del chocolate toman un papel predominante en su procesamiento. Al pasar por su punto de fusión, el cual empieza alrededor de los 32°C, el chocolate se comporta como un fluido no newtoniano. Esto significa que su viscosidad varía dependiendo de las condiciones de temperatura y tensión cortante a las que esté expuesto. En el proceso de impresión 3D, esta característica debe considerarse al momento de trasladarlo por los diferentes mecanismos de extrusión, manteniéndolo en movimiento y a una temperatura adecuada. Si no se controla estas variables, el chocolate puede presentar una solidificación superficial, la cual aumentará su viscosidad e impedirá que pueda ser extruido. Esto se puede apreciar de mejor manera en la Figura 1, donde se presenta una gráfica que muestra la variación de la viscosidad para el chocolate de leche de marca comercial Cadbury. Los datos muestran una gran variación de viscosidad entre los 30 y 32°C. Después de este punto, la variación se reduce entre valores de 4 a 7 Pa*s, con diferencia de 2°C hasta llegar a los 40°C (Hao *et al.*, 2010).

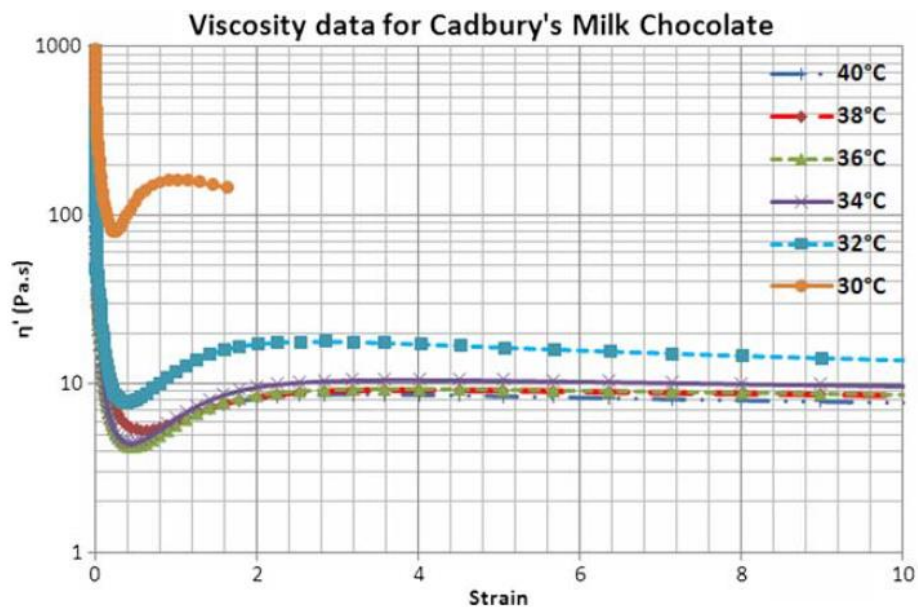


Figura 1. Datos de viscosidad a diferentes temperaturas. (Hao *et al.*, 2010).

Actualmente, se han desarrollado varios prototipos de impresoras 3D de chocolate. Uno de los primeros en comercializarse, derivó del trabajo liderado por L. Hao, que junto a estudiantes de la universidad de Exeter lanzaron ChocEdge. De igual forma, en 2014 fue presentado ChocJet, el cual es un proyecto conjunto entre 3D Systems y la compañía Hershey. Otro ejemplo es Foodini, la cual aplica la impresión 3D no solo a chocolate, sino a varios tipos de alimentos. Estos ejemplos, tienen en común la utilización de extrusión de

material fundido como tecnología para crear figuras sólidas en 3D (Godoi, Prakash, & Bhandari, 2016).

La extrusión por material fundido comparte, con otras tecnologías de impresión 3D, las etapas preparatorias del proceso y el movimiento de los mecanismos de impresión controlados mediante procesadoras. Primero, se tiene un modelo 3D el cual será convertido a un formato de múltiples capas o un archivo STL. A continuación, las coordenadas de estas capas son codificadas por el controlador el cual envía las señales a los motores que desplazan al cabezal por la ruta de impresión. El cabezal recorre cada capa, en su totalidad, dispensando material previo a continuar con la siguiente capa. Al final, cada capa se une a su antecesora y se solidifica en una sola forma 3D (Sun, Peng, Yan & Hong, 2015).

La diferencia entre la extrusión por fusión y otras tecnologías utilizadas en impresión 3D radica en la forma de preparación del material. Para esto, se eleva la temperatura del mismo apenas sobre su punto de fusión, sin que lo sobrepase de forma abundante para evitar problemas de solidificación y anomalías micro estructurales. Para el caso del chocolate los parámetros de temperatura se deben mantener entre los 32°C (Mantihal, Prakash, Godoi & Bhandari, 2017). El material derretido pasa por el mecanismo de extrusión, se deposita sobre una cama lo cual inicia el proceso de solidificación. Esto deja al chocolate en un estado dónde puede mantener su forma, al mismo tiempo que permite que capas posteriores puedan adherirse una sobre otra para obtener una pieza sólida.

Dentro de este proceso, pueden existir tres variantes dependiendo del tipo de mecanismo que aplica la fuerza para que el chocolate salga por la boquilla de extrusión. Una forma de realizarlo es mediante un método conocido como desplazamiento positivo; este produce una fuerza descendente mediante un pistón que se mueve gradualmente por acción de un motor. Otra forma se conoce como dispensador por presión, en la cual se aplica aire a presión al material de forma que la diferencia de presiones hace que el material salga por la boquilla del extrusor. Estas dos posibilidades tienen la característica común que todo el material ingresado debe ser extruido antes de que pueda ser llenado nuevamente (Mantihal *et al.*, 2017). Además, para mejores resultados este debe colocarse fundido en el extrusor, esto indica que se debe asegurar previamente que la cantidad de materia prima ingresada es suficiente como para crear toda la pieza.

Por último, se encuentra el método mediante tornillo extrusor. Este cumple dos funciones principales, la primera, es mover el chocolate a través de un cañón el cual posee calefactores que lo llevan hasta su punto de fusión. La

segunda, es ejercer una presión para que pueda fluir a través del dado de extrusión (Mantihal *et al.*, 2017). Este método presenta ciertas ventajas en relación a los descritos anteriormente. Una de ellas, es que la materia prima ingresa de forma sólida, lo cual disminuye el tiempo de preparación. Además, es posible reponerla fácilmente de ser necesario para realizar piezas de mayor tamaño o fabricar varias al mismo tiempo. Finalmente, el chocolate es agitado en todo momento por medio de las espiras del tornillo, esto ayuda a que posea una mejor fluidez a lo cual favorece la impresión.

Para la creación de figuras en chocolate la variable más importante a tener en cuenta es la temperatura, de la cual se deriva la viscosidad. Controlar estas características físicas y reológicas que permitirán realizar el proceso de extrusión y posterior impresión. Pero, para obtener una pieza de calidad que presente un brillo agradable para el consumidor; además de buen sabor. Es necesario tener un cuidado especial en la forma de procesamiento que tiene el chocolate desde su estado sólido, pasando por la etapa de derretimiento y su solidificación final (Mantihal *et al.*, 2017). Esto aportará con una buena apariencia y sabor, factores indispensables en la impresión de alimentos.

Existen varios tipos de chocolate, pero para ser conocidos por este nombre deben tener ciertas características en común. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en su norma Codex Stan 87-1981: NORMA PARA EL CHOCOLATE Y LOS PRODUCTOS DEL CHOCOLATE; especifica las características que poseen según el tipo y propósito. De esta forma, se puede decir que los componentes del chocolate en su mayoría son manteca de cacao y extracto seco magro de cacao, a excepción del chocolate blanco el cual no posee este extracto. La variación en los porcentajes de estos elementos y el añadir otros como materia grasa de leche, almidones, harinas, azúcares y aditivos alimentarios, producirán las diferentes variaciones del mismo.

A pesar de existir diferentes tipos de chocolate, la mayoría de su grasa debe ser manteca de cacao lo que provoca que ciertas características como punto de fusión, densidad y viscosidad se encuentren entre parámetros similares. Pero, el control de esta sustancia al momento de producirlo es una tarea complicada; ya que se compone de varios triglicéridos que solidifican a diferente temperatura y velocidad. Casi en su totalidad son ácido oleico en un 35%, ácido esteárico en un 34% y ácido palmítico en un 26%; juntos suponen el 95% de los ácidos grasos presentes. A su vez, estos pueden cristalizarse en seis formas de empaquetamiento diferentes. La dificultad radica en que solo una de estas le aportará al chocolate el brillo y el sonido de ruptura característico que es apreciado por el consumidor (Beckett, 2015).

Las grasas presentan una característica conocida como polimorfismo, la cual supone que su estructura puede cristalizar en modos diferentes. La manteca de cacao presenta seis formas, dependiendo del ángulo con el cual se han encajado y agrupado las cadenas de moléculas. Existen dos nomenclaturas por las que se conoce a este tipo de formas cristalinas, la primera fue definida por Lutton y Wille donde las nombra de forma ascendente utilizando números romanos de I a VI. La segunda, utiliza las letras griegas Υ , α y β que describió Larsson. En la Tabla 1, se puede apreciar la relación de nomenclaturas, así como la temperatura a la cual se forman (Beckett, 2015).

La estabilidad en la agrupación de las cadenas está directamente relacionada con una compactación en las mismas y se incrementa con el aumento de la temperatura, siendo las formas V y VI las más estables. En la fabricación de chocolate, el fabricante debe asegurarse de obtener una estructura que esté en su mayoría en su forma V. De esta manera, se obtendrá un buen brillo y un chasquido al morder que es apreciado por el consumidor (Beckett, 2015).

Tabla 1. Nomenclaturas utilizadas para nombrar las diferentes formas cristalinas de la manteca de cacao y sus temperaturas de formación.

Nomenclatura por Lutton y Wille	Nomenclatura de Larsson	Temperatura de formación (°C)
I	Υ	16-18
II	α	22-24
III	β 2'	24-26
IV	β 1'	26-28
V	β 2	32-34
VI	β 1	34-36

(Beckett, 2015).

En base a la información descrita hasta el momento, el proyecto debe centrarse en dos ámbitos predominantes que son el método de extrusión y la temperatura de funcionamiento. Para el primer factor, queda claro que el tornillo extrusor es el mecanismo que presenta mayores ventajas, esto gracias a que el calentamiento y fusión del chocolate se realizan dentro del mismo. Con respecto a la temperatura de trabajo, se debe tener en cuenta que la mayoría de chocolates comerciales buscan que sus productos se encuentren en la forma V. Por lo cual es recomendable que la máquina no sobrepase el valor de temperatura de 32°C para que no pierda su característica de templado. El control requerido para el movimiento del extrusor no presenta mayores inconvenientes. Por otro lado, la temperatura debe ser medida con precisión para evitar que el producto final se estropee.

Dados estos antecedentes, se plantea como objetivo general del proyecto el diseñar e implementar un extrusor de chocolate para impresión en 3D, que posea un control y monitorización del proceso de manufactura. Para dar cumplimiento al mismo se derivan tres objetivos específicos. Primero, se debe

diseñar el sistema mecánico que debe componerse de un mecanismo de almacenamiento de materia prima, el acoplador a impresora 3D y el extrusor que permita la expulsión de chocolate fundido. Por otro lado, se tiene que diseñar un sistema de monitoreo y control de temperatura para el chocolate fundido y para su enfriamiento rápido al ser depositado. Para finalizar, es necesario implementar un prototipo del extrusor diseñado para validar el funcionamiento en impresión 3D.

2. METODOLOGÍA Y DISEÑO

2.1. METODOLOGÍA MECATRÓNICA

Para el diseño y construcción del proyecto se utilizará la metodología mecatrónica basada en el modelo en V. Esta metodología tiene como punto de partida la recolección de especificaciones que vendrán dadas por las normativas nacionales e internacionales las cuales aportan requerimientos obligatorios que una máquina que produce alimentos debe cumplir. Posteriormente, se realiza la recolección de requerimientos de todos los posibles interesados del proyecto; entre las cuales pueden estar: dimensiones, costo máximo, peso y temperatura de funcionamiento (VDI, 2004).

En base a las especificaciones y requerimientos obtenidos se analizarán las posibles restricciones del extrusor provenientes de normativas y estándares. Una vez detallados estas dos fases se tendrá los parámetros de borde para poder realizar una primera definición de los componentes que formarán parte del sistema. Estos a su vez se agruparán en los diferentes subsistemas que trabajarán a la par para cumplir con el objetivo del proyecto. Se analizará las relaciones entre los mismos y se tendrá un concepto estructural del proyecto en su totalidad.

Una vez definido el marco conceptual del extrusor. Se procederá a realizar diseños de los dos subsistemas básicos del proyecto que son la parte mecánica y de control. Se diseñará todos los componentes de la parte mecánica la cual se compone de la recepción de materia prima, elemento de acoplamiento y extrusor de chocolate. A la par, será diseñado el sistema de control y monitoreo de temperatura de materia prima. Estos diseños se juntarán con la ayuda de software de modelado en una simulación virtual la cual junto con cálculos de ingeniería permitirán dimensionar todos los componentes mecánicos y electrónicos que formen parte del extrusor.

Al final, se construirá un prototipo basado en los diseños realizados. El prototipo ensamblado servirá para realizar pruebas de validación, que permitan verificar el cumplimiento del objetivo y alcance del proyecto. Estas pruebas estarán enfocadas a la realización de varias mediciones de temperaturas de trabajo, enfriamiento, flujo y espesor de material durante el proceso de manufactura; además de dimensiones y masa en la pieza terminada. De las cuales se podrá obtener valores estadísticos que permitan comprobar si se cumplió con el alcance del proyecto. Para que el prototipo pueda ser entregado como un producto final debe ser capaz de imprimir piezas de chocolate de hasta 200 gr añadiendo capas de material con una definición de espesor de entre 0.4mm a 1mm y un flujo entre los 12mm³/s hasta los 16mm³/s.

2.2. DISEÑO CONCEPTUAL

En base a la información obtenida sobre el comportamiento del chocolate, dimensiones de varias impresoras 3D comerciales, normativas nacionales e internacionales; surgieron varios requerimientos los cuales se encuentran esquematizados en la Figura 2 junto con las relaciones entre ellos (Delligati, 2013). La función de los mismos es limitar las opciones de diseño de donde se tienen los parámetros de borde para el desarrollo del mecanismo. De esta manera, se puede representar en la Figura 3 un esquema general básico del sistema mecatrónico para el extrusor de chocolate. Este detalla de manera rápida la relación entre los subsistemas mecánico, electrónico y de control.

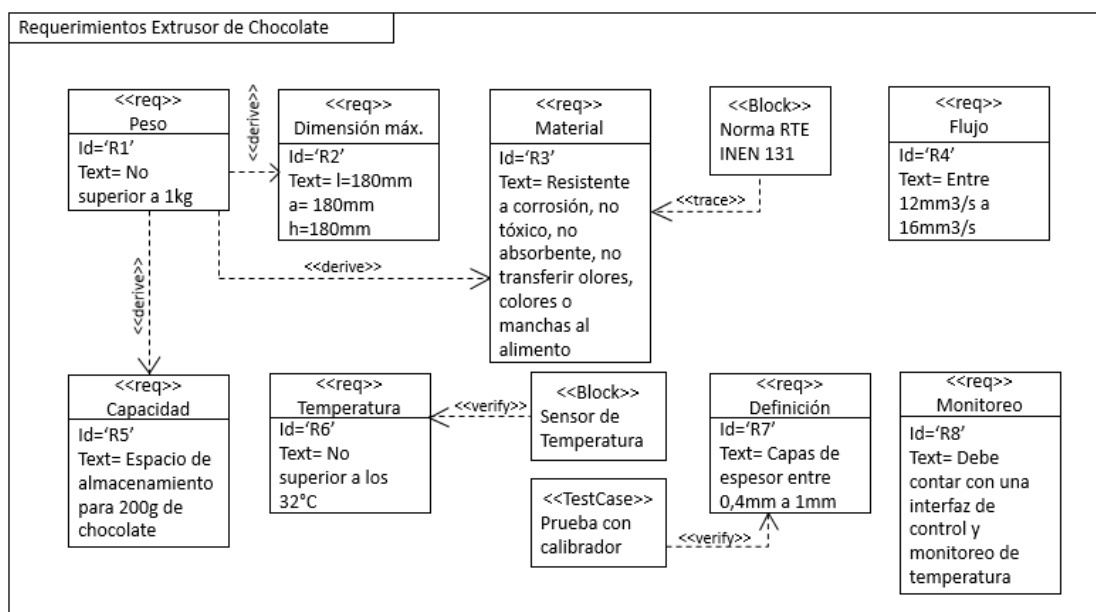


Figura 2. Diagrama de requerimientos extrusor de chocolate.

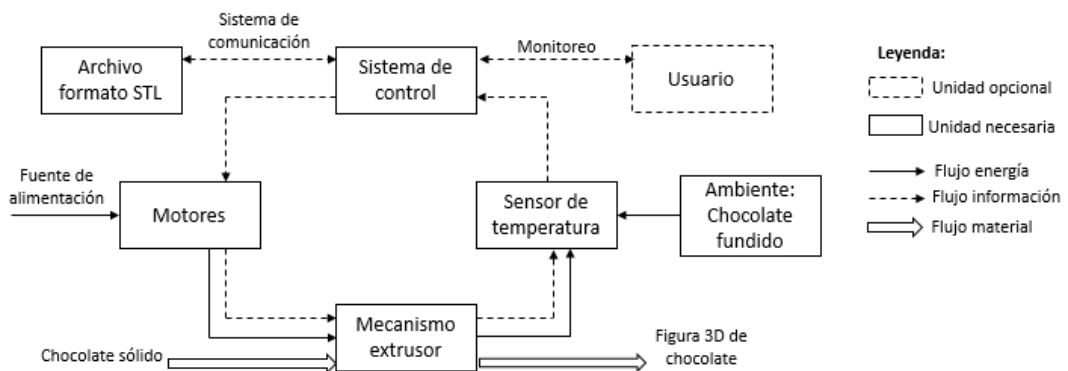


Figura 3. Diagrama general del sistema extrusor de chocolate.

Después, se puede ahondar dentro del diagrama mostrado para especificar las partes generales que formarán cada subsistema. La parte mecánica

necesita un espacio de almacenamiento para el chocolate que pueda contener al menos 200 gramos del mismo. Además, requiere un tornillo extrusor que realice la presión necesaria para que el material fundido salga por la boquilla. Por otro lado, el subsistema eléctrico y electrónico comprende un motor, calefactores, sensores de temperatura y enfriadores. Finalmente, todos estos componentes deben estar bajo un control de temperatura y movimiento. De esto se encargará el subsistema de control que además debe mostrar la información del proceso hacia el usuario. La Figura 4, muestra de forma esquemática los elementos que forman parte del extrusor y se apoya de las magnitudes mostradas en la Figura 5.

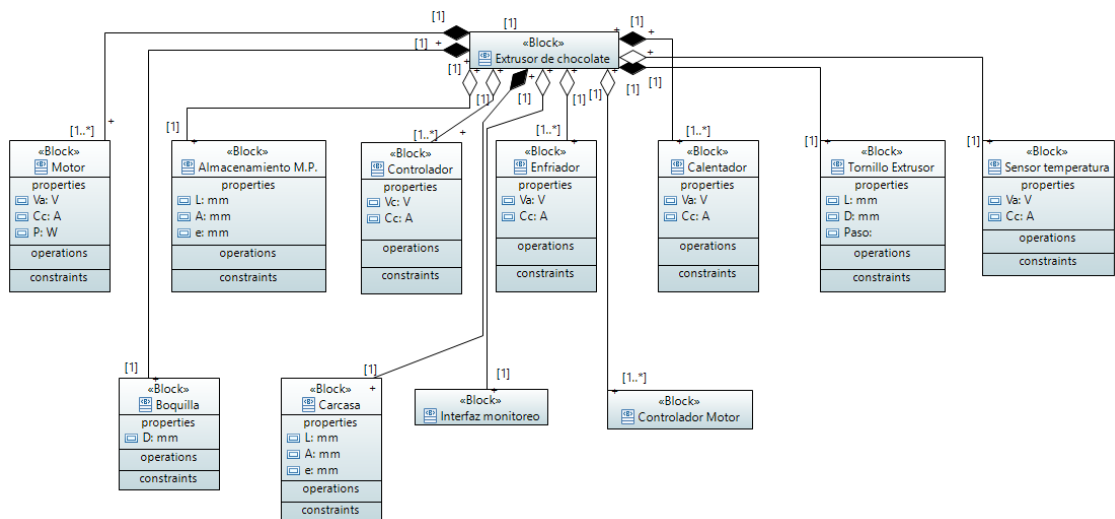


Figura 4. Definición de elementos de extrusor de chocolate.

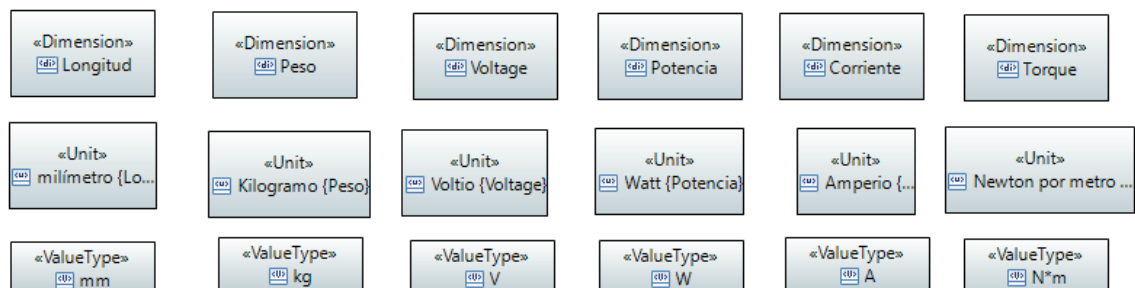


Figura 5. Unidades requeridas del sistema.

2.3. PROTOCOLO DE PRUEBAS

Para comprobar el correcto funcionamiento del extrusor se plantea una serie de pruebas que medirán el cumplimiento del alcance y objetivos del sistema propuesto. Los puntos de mayor importancia dentro del proceso son el control

de temperatura, la velocidad de rotación del tornillo sin fin, el grosor de las capas de chocolate y las dimensiones finales de la pieza de chocolate.

Primero, para el control de temperatura, la zona crítica es la salida por la boquilla de extrusión. Por consiguiente, se propone medir el tiempo requerido por la máquina para que esta zona avance desde su temperatura ambiente hasta que el chocolate alcance los 32°C. Esta prueba se realizará utilizando el sensor de temperatura de la boquilla junto con un termómetro infrarrojo que posee un rango de medida de -50 a 330°C con una precisión de 0.1°C. La medición de las temperaturas de ambos sensores debe ser la misma. Esta prueba será repetida en 10 ocasiones, obteniendo 10 tiempos. Estos no deben superar el 5% de variación entre su valor promedio para encontrarse dentro del intervalo de confianza del 95% (Ciro, 2016).

De manera conjunta, es necesario verificar el tiempo de enfriamiento del chocolate luego de ser extruido. Para ello, se dejará fluir chocolate sobre un recipiente durante dos minutos. Con la ayuda de un cronómetro se medirá el tiempo en el cual el chocolate alcance la solidificación a una temperatura ambiente de aproximadamente 24°C. Esta prueba se realizará por 10 ocasiones. Al igual que en la prueba anterior los tiempos obtenidos no deben superar el 5% de variación entre su valor promedio.

La velocidad de rotación del tornillo extrusor está relacionada de manera directa con el caudal del sistema. Para probar este parámetro, se hará funcionar al extrusor durante un minuto y se recogerá en un vaso de medición el chocolate vertido. En primera instancia, se modificará la velocidad del motor para que el flujo se encuentre entre los 12mm³/s y 16mm³/s, este será el parámetro de control. Una vez alcanzado este valor, se realizarán 10 mediciones cada una del flujo producido en un minuto, la variación que exista entre las diferentes muestras no debe superar el 5%. De esta prueba se obtendrá como resultado el parámetro de velocidad del motor y se corroborará que se mantenga el mismo flujo durante el proceso de impresión.

Es necesario verificar la calidad dimensional de las figuras obtenidas. Para comprobar el grosor de las capas que sean depositadas, se acoplará el dispositivo a la impresora 3D, y se enviará a producir 5 líneas de 8 cm de largo y que tengan el grosor del diámetro de la boquilla. Luego, con la ayuda de un calibrador se medirá las dimensiones verificando que no existan anomalías dimensionales con relación a los parámetros de dibujo (Hao, 2010). A continuación, se analizará la precisión del extrusor en dos dimensiones para lo cual se realizará un similar a la prueba anterior esta vez con cuadrados de 3 cm de lado. Para la siguiente prueba, se repetirá el proceso con la diferencia que se enviará a imprimir una caja cuadrada de 3cm de lado, 1 cm de alto y

una pared de 3mm. Como resultado, la diferencia dimensional al compararlas con el dibujo enviado no debe superar un 5% de error (Hao, 2010). Para finalizar con las pruebas dimensionales, es necesario conocer el valor máximo de altura que se puede imprimir. Así, se enviará a imprimir la caja de prueba de 3cm la cual tendrá una altura de 10cm. De ser necesario, se detendrá el proceso de impresión cuando este empiece a fallar. Se realizarán tres repeticiones las cuales arrojarán el valor de altura máxima recomendado para el extrusor.

Al final, se debe comprobar que el extrusor no presente problemas al utilizar diferentes tipos de chocolate. Para esto se propone realizar las pruebas dimensionales con dos tipos diferentes. Primero, se utilizará un chocolate de cobertura comercial y, posteriormente se realizará lo mismo con un chocolate amargo. Debido a la diferencia en la formulación de estos chocolates, se podrían generar variaciones en los resultados de la impresión. El objetivo de esta última prueba es registrar esas diferencias y, de ser necesario, realizar modificaciones en el extrusor para obtener resultados similares con ambos tipos de chocolate.

2.4. DISEÑO ESPECÍFICO

En base al diseño conceptual se creó un bosquejo aproximado de los elementos y sistemas que forman parte del extrusor. Para continuar con este desarrollo se debe presentar una solución mecánica, eléctrica y electrónica que permita cumplir con los objetivos planteados. Para esto, es necesario dividir el proyecto en los mencionados subsistemas y crear un diseño específico para cada uno. En conjunto, la máquina debe cumplir además con lo establecido en la norma INEN RTE 131: *“Seguridad E Higiene De Maquinaria Para Procesamiento De Alimentos”*.

En la Figura 6 se puede observar los componentes de la parte mecánica del extrusor, es necesario revisar la lista de materiales especificados en la Tabla 2 para identificarlos correctamente. En el diseño se incluyó al principal actuador, el motor NEMA 17 y a los ventiladores laterales que pese a ser componentes eléctricos son necesarios para entender al sistema mecánico en su totalidad. Además, su masa es considerable para fines de cálculos estáticos de las piezas estructurales.

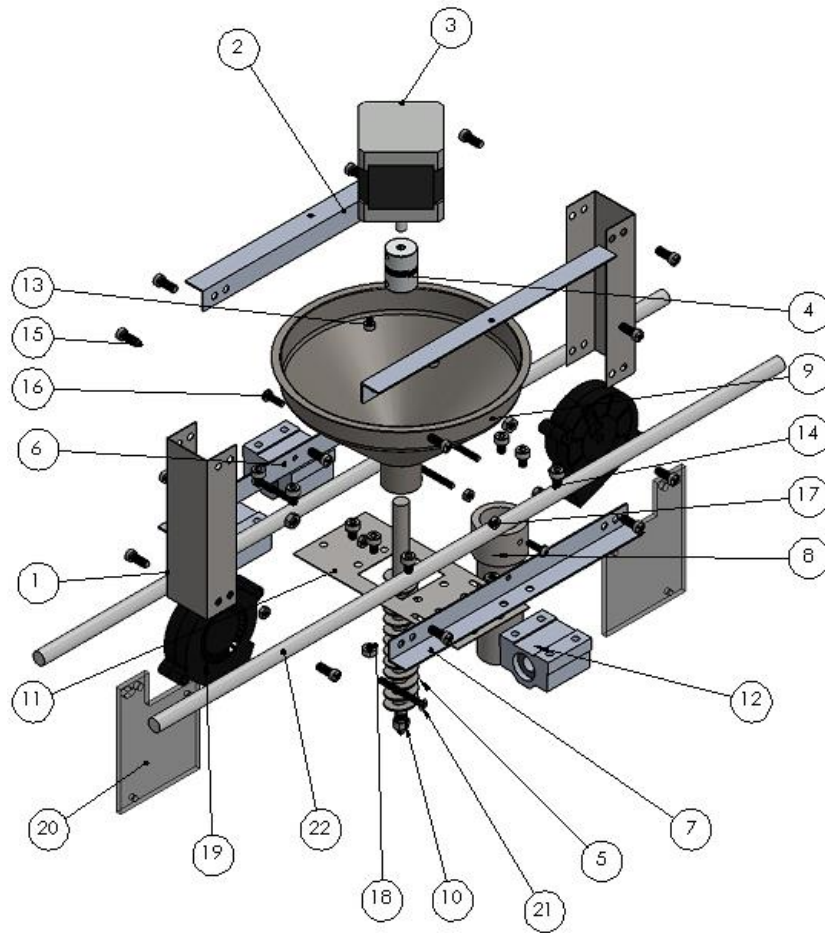


Figura 6. Vista explosionada extrusor de chocolate.

Tabla 2. Lista de materiales extrusor de chocolate.

Nº de Elemento	N. de Pieza	Cantidad
1	Soporte vertical	2
2	Soporte horizontal superior	2
3	NEMA 17	1
4	Acople 5mm a 8mm	1
5	Tornillo extrusor	1
6	Soporte horizontal izquierdo inferior	1
7	Soporte horizontal derecho inferior	1
8	Cañón	1
9	Embudo	1
10	Boquilla	1
11	Acople extrusor a impresora	1
12	SC8UU	3
13	M3-0.5 x 3	2
14	M4-0.7 x 6	10
15	M4-0.7 x 10	16
16	M3-0.5 x 10	2
17	Tuerca M3	6
18	Tuerca M4	4
19	Ventilador lateral	2
20	Soporte ventilador	2
21	M3-0.5 x 30	4
22	Viga eje X	2

Para empezar con el diseño de elementos mecánicos, se debe entender que el sistema reemplazará al extrusor en una impresora 3D comercial. Para efectos de diseño se seleccionó una de las impresoras más populares del mercado, la Anet A6. Esta presenta un movimiento cartesiano y es una de varios tipos de impresoras que descendieron del proyecto RepRap. El cual tiene como objetivo crear una máquina 3D auto replicable de fuente abierta (Lanzotti, Martorelli & Staiano, 2015). El extrusor de polímero con la que cuenta dicha impresora está apoyado sobre dos vigas circulares de acero inoxidable AISI 304. Es necesario calcular que dichas vigas no fallarán al instalar el extrusor de chocolate.

Para este análisis se considerará el caso donde toda la carga se encuentre situada sobre una sola viga en su posición media. Se tiene que una viga que es estáticamente indeterminada, por lo que se resolvió basándose en la Figura 7. En ella se encuentra el diagrama de cuerpo libre de una viga fija con sus respectivos diagramas de fuerza cortante y momento flector (Mott, 2006). Como datos se conoce que la viga tiene una longitud de 298mm con un diámetro de 8mm. Además, la masa del extrusor es de 870g y al añadirle la carga máxima de chocolate será de 1070g. Para el cálculo se aproximó este valor a 1100g.

$$L = 298 \text{ mm}$$

$$P = 1.1 * 9.81 = 10.79 \text{ N}$$

$$E_{AISI304} = 193000 \text{ MPa}$$

$$R_A = R_C = \frac{P}{2} = \frac{10.79}{2} \quad [1]$$

$$R_A = R_C = 5.4 \text{ N} \quad [2]$$

$$M_A = M_C = M_B = \frac{PL}{8} = \frac{10.79 * 0.298}{8} = 0.4 \text{ N.m} \quad [3]$$

La viga es de sección circular por lo que su inercia es:

$$I = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{\pi(8)^4}{64} = 201.062 \text{ mm}^4 \quad [4]$$

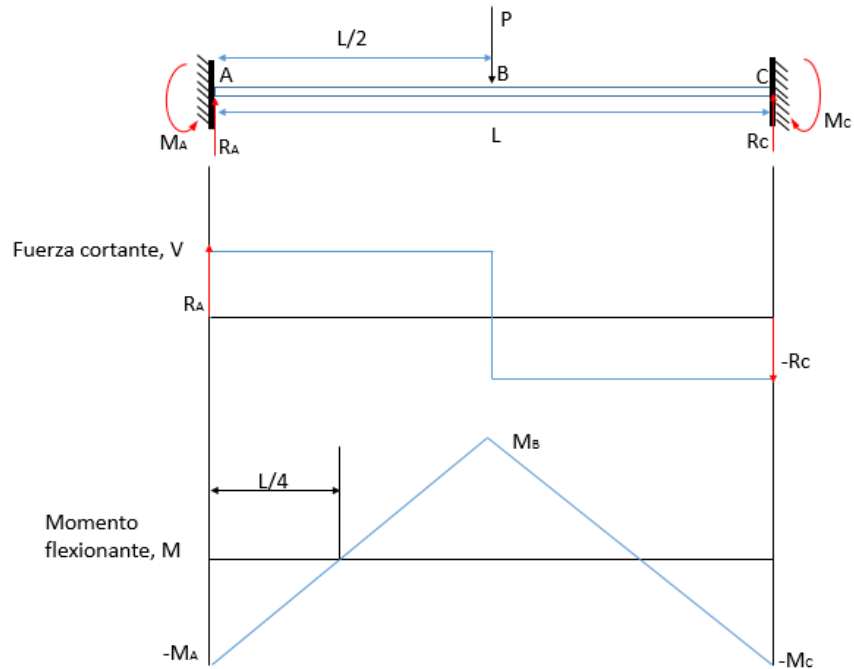


Figura 7. DCL, fuerza cortante y momento flexionante para una viga fija. (Mott, 2006).

Deflexión máxima

$$y_B = y_{m\acute{a}x} = -\frac{PL^3}{192EI} \quad [5]$$

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{10.79 * 298^3}{192 * 193000 * 201.062} \quad [6]$$

$$y_{m\acute{a}x} = -0.038mm$$

Posterior a comprobar que las vigas de la impresora presentarán una flexión mínima al colocar el extrusor se verificará que los principales elementos del mismo soporten las cargas a las cuales estarán sometidos. El material se seleccionó en base a la Norma UNE-EN 1672-2:2006+A1:2009: “*Maquinaria para procesado de alimentos. Conceptos básicos. Parte 2: Requisitos de higiene*”. Los soportes verticales se encuentran dentro de la zona de salpicadura, mencionada en dicha norma. Por lo cual, están fabricados en acero inoxidable AISI304, el cual cumple con el requerimiento mostrado en la Figura 2. Además, están sometidos a una carga axial de compresión. Por esta razón, se los puede diseñar con un análisis de columna. Las medidas de los mismos fueron escogidas por requerimientos geométricos, por lo tanto, el análisis se enfocará en encontrar su carga crítica la cual debe ser mayor a la carga real. La cual está dada por la masa del motor, soportes horizontales superiores, acople y tornillo extrusor.

La Figura 8 muestra las medidas del soporte, las cuales son necesarias para encontrar el centro de masa, su inercia y radio mínimos. Se considera que los apoyos de la columna son empotrado-empotrado.

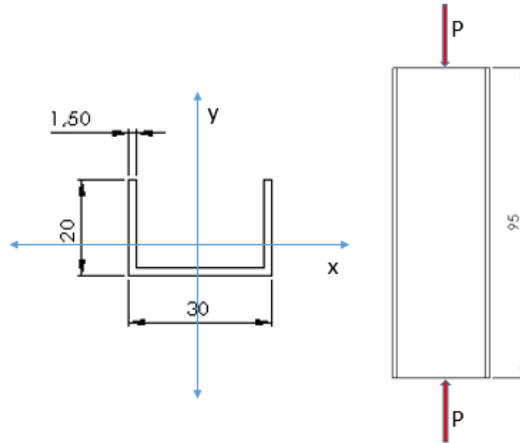


Figura 8. Dimensiones y DCL del soporte vertical.

$$L = 95 \text{ mm}$$

$$P = 0.38 * 9.81 = 3.73 \text{ N}$$

$$E_{AISI304} = 193000 \text{ MPa}$$

$$S_y = 207 \text{ MPa}$$

La inercia mínima se encuentra en torno al eje xx' para lo cual se debe conocer las coordenadas del centro de masa.

$$Y_{c.g} = \frac{\sum_{i=1}^n (A * x_i)}{\sum_{i=1}^n A} \quad [7]$$

$$Y_{c.g} = \frac{2*20*1.5*10 + 27*1.5*0.75}{2*20*1.5 + 27*1.5}$$

$$X_{c.g} = 6.27 \text{ mm} \quad [8]$$

$$I_{xx} = \sum_{i=1}^n (I_{g_i} + A_i d_i^2) \quad [9]$$

$$I_{xx} = 2 \left(\frac{20^3 (1.5)}{12} + (10 - 6.27)^2 (20 * 1.5) \right) + \frac{27 (1.5)^3}{12}$$

$$+ 27 (1.5) (4.77)^2$$

$$I_{xx} = 4076.42 \text{ mm}^4 \quad [10]$$

$$r_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} = \sqrt{\frac{4076.42}{100.5}} \quad [11]$$

$$r_{min} = 6.37 \text{ mm} \quad [12]$$

Para escoger el tipo de análisis a realizar se debe encontrar la relación de esbeltez y la constante de columna. Con una $k=0.65$.

$$R_E = \frac{kL}{r_{min}} = \frac{0.65 * 95}{6.37} = 9.69 \quad [13]$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 (193000)}{207}} = 135.66 \quad [14]$$

Como R_E es menor que C_c se realiza el análisis de columna corta de Johnson (Mott, 2006).

$$P_{cr} = A \cdot S_y \left[1 - \frac{S_y \left(\frac{KL}{r_{min}} \right)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad [15]$$

$$P_{cr} = 100.5 * 207 \left[1 - \frac{207 \left(\frac{0.65 * 95}{6.37} \right)^2}{4\pi^2 * 193000} \right] = 20798N \quad [16]$$

Al comparar la carga crítica con la carga a la cual está sometido el soporte se puede apreciar que es muy superior, por lo cual se sabe que la pieza no va a fallar.

El soporte horizontal superior será calculado como una viga fija por lo que se podrá utilizar la Figura 7 para su análisis. Los soportes no tienen contacto con el alimento, pero se debe seleccionar un material que sea anticorrosivo y lavable (AENOR, 2009). En consecuencia, el elemento es un ángulo de aluminio del fabricante Cedal, escogido por su disponibilidad en el mercado y geometría acorde al requerimiento. La carga será el peso del motor, acople y tornillo extrusor.

$$L = 165 \text{ mm}$$

$$P = 0.35544 * 9.81 = 3.49 \text{ N}$$

$$E_{Al} = 70000 \text{ MPa}$$

$$R_A = R_C = \frac{P}{2} = \frac{3.49}{2} \quad [17]$$

$$R_A = R_C = 1.745 \text{ N} \quad [18]$$

$$M_A = M_C = M_B = \frac{PL}{8} = \frac{3.49 * 0.165}{8}$$

$$M_A = M_C = M_B = 0.072 \text{ N.m} \quad [19]$$

La inercia de esta forma no viene dada por el fabricante por lo cual se debe calcular basándose en sus dimensiones, este es un ángulo de lados iguales de 12.4mm por 1mm de espesor.

$$Xc.g = \frac{\sum_{i=1}^n (A * x_i)}{\sum_{i=1}^n A} \quad [20]$$

$$Xc.g = \frac{11.4(6.7)+12.4(0.5)}{12.4+11.4}$$

$$Xc. g. = 3.47mm \quad [21]$$

$$I_{xx} = \sum_{i=1}^n (I_{g_i} + A_i d_i^2) \quad [22]$$

$$I_{xx} = \frac{11.4(1)^3}{12} + 11.4(3.47 - 0.5)^2 + \frac{(12.4)^3}{12} + 12.4(6.2 - 3.47)^2$$

$$I_{xx} = 352.81mm^4 \quad [23]$$

Deflexión máxima

$$y_B = y_{m\acute{a}x} = -\frac{PL^3}{192EI} \quad [24]$$

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{3.49 * 165^3}{192 * 70000 * 352.81}$$

$$y_{m\acute{a}x} = -0.0033 mm \quad [25]$$

Los soportes inferiores estan fabricados del mismo ángulo de aluminio, pero deben soportar la carga de toda la estructura distribuidas como se muestra en la Figura 9.

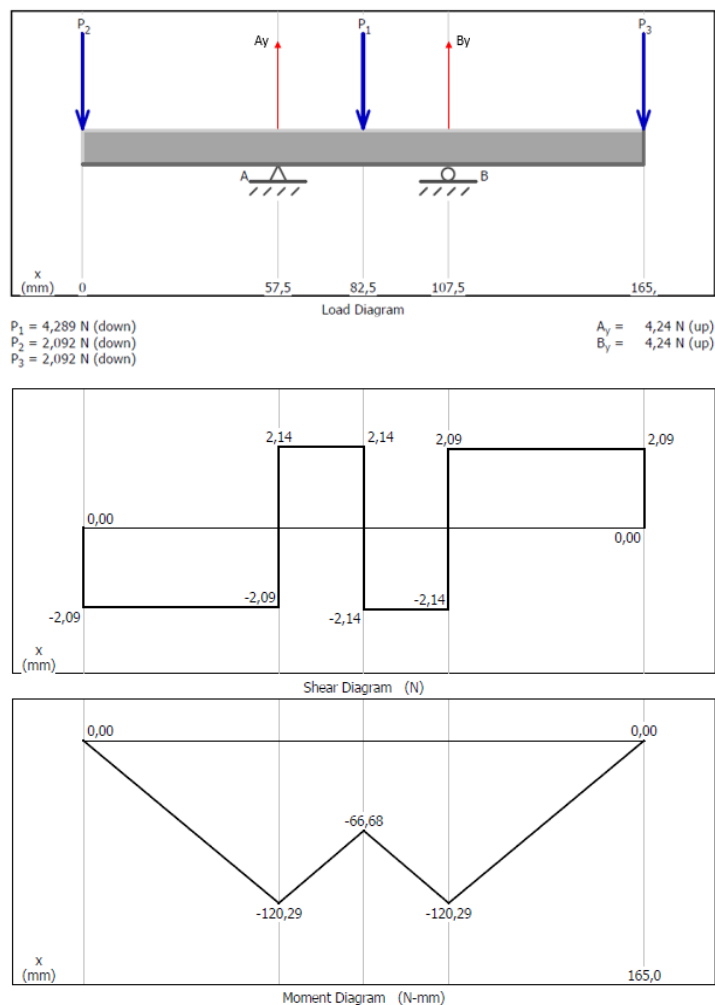


Figura 9. DCL, fuerza cortante y momento flexionante para el soporte inferior.

Con el propósito de comprobar la flexión en la situación menos favorable se asumió que solo una viga soporta a la estructura. Posteriormente, con la ayuda del software Mdsolids, se obtiene los diagramas de fuerza cortante y momento flexionante. La mayor deflexión se dará en sus extremos para lo cual se toma la ecuación de momento de la primera mitad de la viga:

$$M(x) = \begin{cases} -2.092x, & 0 < x < 57.5 \\ 2.14x - 109.87, & 57.5 \leq x < 82.5 \end{cases} \quad [26]$$

$$EI \frac{d^2x}{dy} = M(x) = -2.092x + 2.14x - 109.87 \quad [27]$$

$$EI \frac{dy}{dx} = 0.024x^2 - 109.87x + C_1 \quad [28]$$

$$EI y = 0.008x^3 - 54.935x^2 + C_1x + C_2 \quad [29]$$

Cuando $x = 57.5$; $y = 0$

Cuando $x = 82.5$; $\theta = 0$

De la ecuación 28

$$C_1 = -0.024(82.5)^2 + 109.87(82.5) = 8900.93 \quad [30]$$

De la ecuación 29

$$C_2 = -0.008(57.5)^3 + 54.935(57.5)^2 - (8900.93)(57.5) = -331696 \quad [31]$$

La deflexión máxima se dará cuando $x = 0$

$$y_{\max} = \frac{-331696}{70000 * 352.81} = -0.013mm \quad [32]$$

Para el acople del extrusor a la impresora se buscó utilizar un material resistente que no incremente demasiado las dimensiones ni el peso. Por lo tanto, este se diseñó en acero inoxidable AISI-304 el cual es utilizado para maquinaria de alimentos. La Figura 10 muestra la vista superior del acople el cual es una plancha de 0.5mm la cual posee perforaciones para asegurar los rodamientos, la banda y soportar el extrusor. Para el análisis se asumió la situación más crítica donde la carga se encuentre en la mitad de la zona de análisis. La carga será la masa del extrusor cargado de chocolate menos el peso de los rodamientos lineales.

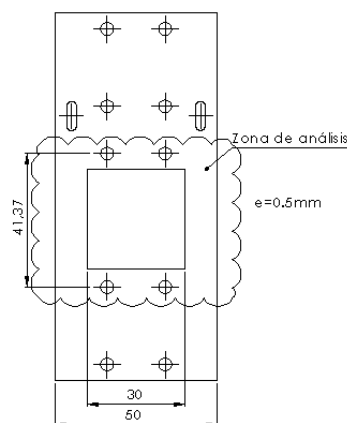


Figura 10. Vista superior acople extrusor a impresora.

El diagrama de cuerpo libre, de momento flexionante y fuerza cortante tiene la forma del utilizado en la figura 7.

$$L = 41.37 \text{ mm}$$

$$P = \frac{0.95}{2} * 9.81 = 4.66 \text{ N}$$

$$E_{AISI304} = 193000 \text{ MPa}$$

$$R_A = R_C = \frac{P}{2} = \frac{4.66}{2} \quad [33]$$

$$R_A = R_C = 2.33 \text{ N} \quad [34]$$

$$M_A = M_C = M_B = \frac{PL}{8} = \frac{4.66 * 0.04137}{8}$$

$$M_A = M_C = M_B = 0.024 \text{ N.m} \quad [35]$$

La viga es de sección rectangular por lo que su inercia es:

$$I = \frac{b * h^3}{12} = \frac{10(0.5)^3}{12} = 0.104 \text{ mm}^4 \quad [36]$$

$$y_B = y_{\text{máx}} = -\frac{PL^3}{192EI} \quad [37]$$

$$y_{\text{máx}} = -\frac{4.66 * 41.37^3}{192 * 193000 * 0.104}$$

$$y_{\text{máx}} = -0.086 \text{ mm} \quad [38]$$

El acople presenta una deflexión la cual es insignificante y no presenta problemas para el diseño.

Las piezas que tengan contacto directo con el alimento deben estar fabricadas de un material que cumpla con el requerimiento mostrado en la Figura 2. Para ello, se seleccionó acero inoxidable de uso alimentario con calidad AISI-304. El diseño completo del extrusor está basado en los modelos de extrusión de polímeros y llevado a una escala acorde para realizar una impresión 3D. Por este motivo, las dimensiones tanto del tornillo extrusor fueron seleccionadas en base a los requerimientos geométricos, complementándose con las restricciones de manufactura de los talleres de mecanizado del país.

Para futuros cálculos, es necesario conocer los parámetros que se extraen del tornillo extrusor los cuales se encuentran mostrados en la Figura 11. Por otro lado, la Figura 12 muestra las medidas del tornillo extrusor de chocolate (Gutiérrez, 2006).

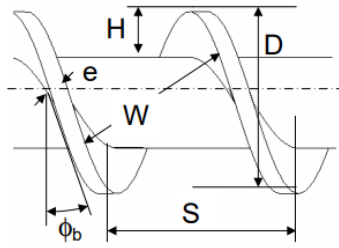


Figura 11. Geometría y parámetros de un tornillo extrusor. (Gutiérrez, 2006).

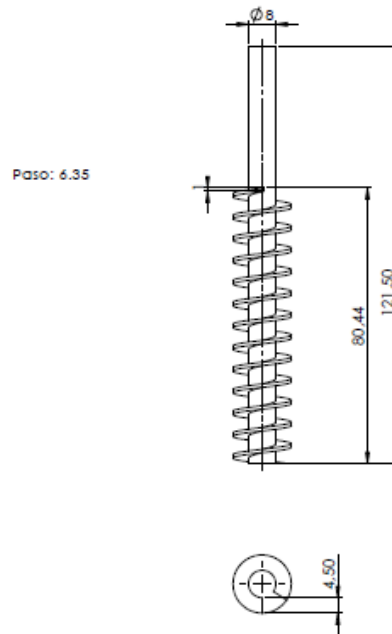


Figura 12. Dimensiones tornillo extrusor de chocolate.

Paso diámetro (S): Para este caso se puede apreciar en la Figura 12 que el valor es de 6.35mm.

Altura del filete (H): En la Figura 12 se muestra que este valor es de 4.5mm.

Ángulo de paso (ϕ_b): Este es el ángulo helicoidal del tornillo y se forma al trazar una tangente al filete y medirlo en relación a su vertical.

$$\phi_b = \tan^{-1}\left(\frac{S}{\pi * D}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{6.35}{\pi * 17}\right) = 6.78^\circ \quad [39]$$

Ancho del canal: Es la distancia perpendicular que existe entre un punto del filete y otro ubicado en el filete consecutivo.

$$W = (S * \cos\phi_B) - e = (6.35 * \cos(14.18^\circ)) - 1 = 5.3mm \quad [40]$$

Factor de dimensión (F_d): es una relación que permite corregir la suposición de un canal rectangular.

$$F_d = 1 - 0.571 \frac{H}{W} = 0.52 \quad [41]$$

Ángulo de altura media (ϕ_m): es el ángulo de hélice evaluado a la altura media del canal. Junto con la propiedad anterior otorgan una mayor precisión en los resultados al tomar en cuenta la forma trapezoidal del canal (Gutiérrez, 2006).

$$\phi_m = \tan^{-1} \left(\frac{S}{\pi(D - H)} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{6.35}{\pi(17 - 4.5)} \right) = 9.19^\circ \quad [42]$$

Estos valores serán de ayuda para calcular la presión que se va a manejar dentro del cañón de extrusión. Para esto, se realiza ciertas consideraciones las cuales simplificarán los cálculos. Se considerará al fluido como newtoniano es decir su viscosidad no cambiará con relación a su velocidad de corte y se tomará el valor promedio mostrado en la Figura 1 de 10 Pa.s. A continuación, el juego entre el filete y la pared del cañón es despreciable. Además, se considera que la velocidad es igual a cero en la pared del cañón y cercano al tornillo. Por último, el flujo se considera invariable a lo largo del tornillo, isotérmico e independiente del tiempo (Gutiérrez, 2006).

A todos los valores anteriores se debe incluir el flujo másico. Este representa la cantidad de masa que circula por el canal en unidad de tiempo. Se tomará el valor máximo de los requerimientos establecidos en la Figura 2 el cual es 16mm³/s. Conociendo la que la densidad del chocolate es aproximadamente 1277kg/m³ se lo puede calcular (Hao, 2010).

$$M_k = Q * \rho = 16 * 1277 * 10^{-9} = 2.043 * 10^{-5} Kg/s \quad [43]$$

Gutiérrez (2006), describe una ecuación en el modelo de presión que se puede utilizar para conocer la diferencia de presión a lo largo del tornillo extrusor.

$$\Delta P = \frac{-12 (Ne)\pi D \eta}{WH^3 \text{sen} \phi_m F_p} * M_k - 0.5\pi D C \text{os} \phi_m H W F_d \quad [44]$$

Donde Ne es el número de espiras evaluadas, este análisis se realiza cada media vuelta para analizar como varía la presión en las diferentes zonas del tornillo. Además, Fp se lo puede calcular:

$$F_p = 1 - 0.625 \frac{H}{W} = 1 - 0.625 \frac{4.5}{5.3} = 0.47 \quad [45]$$

Se reemplaza los valores en la ecuación 41 y se tiene:

$$\Delta P = -1.806 * 10^6 Pa = -1.806 MPa \quad [46]$$

Con el valor de presión obtenido se procede a realizar los cálculos del cañón. Este estará definido como un recipiente cilíndrico a presión. En la Figura 13 se muestran las dimensiones del cañón. Para el análisis se asume un cilindro uniforme de 70mm de largo, 22.2mm de diámetro y 2mm de espesor.

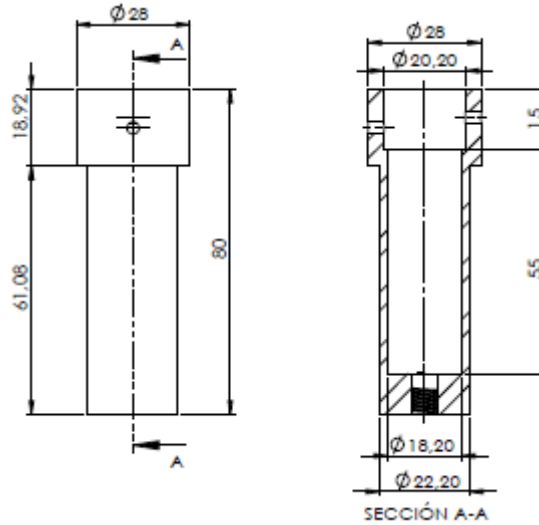


Figura 13. Dimensiones del cañón extrusor.

Se necesita determinar si el recipiente es de pared gruesa o delgada para lo cual:

$$D_m = D_o - t = 22.20 - 2 = 20.2mm \quad [47]$$

$$\frac{D_m}{t} \geq 20 \gg \frac{20.2}{2} < 20 \text{ (No cumple)} \quad [48]$$

Ya que no cumple la condición se considera un cilindro de pared gruesa por lo cual se realiza el siguiente análisis para encontrar su esfuerzo anular, longitudinal y radial (Mott, 2009).

$$\sigma_{anular} = \frac{P(b^2 + a^2)}{b^2 - a^2} \quad [49]$$

Donde a es el radio interno, b es el radio externo y P es la presión interna uniforme en todas las direcciones, que para el caso es de 1.806MPa. A esta presión se añadirá un 20% de error para compensar la consideración como fluido newtoniano.

$$\sigma_{anular} = \frac{2.17(11.1^2 + 9.1^2)}{11.1^2 - 9.1^2} = 11.07MPa \quad [50]$$

$$\sigma_{long} = \frac{Pa^2}{b^2 - a^2} \quad [51]$$

$$\sigma_{long} = \frac{(2.17)(9.1)^2}{11.1^2 - 9.1^2} = 4.45MPa \quad [52]$$

$$\sigma_{rad} = -P = -2.17MPa \quad [53]$$

Al tener restricción de material a acero inoxidable el cual se conoce que tiene una resistencia a la fluencia de 207MPa, se calcula el factor de seguridad que posee el recipiente al tomar como esfuerzo de diseño al esfuerzo anular.

$$\sigma_d = \sigma_{anular} \gg \sigma_{anular} = \frac{S_y}{N} \quad [54]$$

$$N = \frac{S_y}{\sigma_{anular}} = \frac{207}{11.07} = 18.7 \quad [55]$$

Una vez que se ha definido el sistema mecánico y comprobado mediante cálculos que este no presentará fallas. Es necesario diseñar y seleccionar los componentes del sistema eléctrico y electrónico. Este será el encargado de controlar la deposición del chocolate y mantenerlo a una temperatura adecuada. Para esto se utilizará calefactores de poliamida cuya potencia es de 12W y alcanzan una temperatura de 170°C. Adicional, se debe realizar el cálculo de la temperatura en la superficie exterior del cañón necesaria para que dentro del mismo el chocolate se encuentre a 32°C. Esto se realizará mediante un análisis de transferencia de calor en pared cilíndrica por conducción y convección. El primero, producido por la caída de temperatura entre la superficie externa e interna del cañón y la segunda por el contacto de la misma con el chocolate líquido. La Figura 14 muestra de forma gráfica la caída de temperatura desde el calefactor hasta el chocolate al interior del cañón.

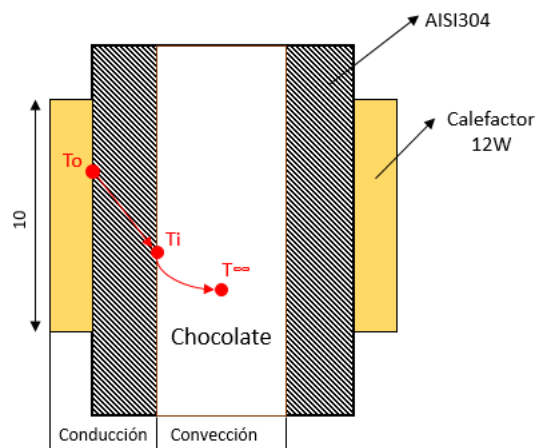


Figura 14. Esquema gráfico de caída de temperatura en el cañón extrusor.

Como características del sistema se conoce que la temperatura del chocolate debe ser 32°C, el calefactor rodea al cañón en su totalidad y este tiene un ancho de 10mm. Además, este tiene una potencia de 12W el cual es el flujo de calor del sistema. Entonces se debe comenzar el análisis desde el interior del cañón con la transferencia de calor por convección el cual se obtiene de la ecuación 56 (Cengel, 2014).

$$\dot{Q}_{conv} = 2\pi r L h (T_i - T_\infty) \quad [56]$$

Donde:

- r : radio del cilindro.
- h : coeficiente convectivo del chocolate.
- L : longitud del cilindro.
- T_i : temperatura en la superficie.
- T_∞ : temperatura del fluido.

De esta ecuación se debe encontrar el valor del coeficiente convectivo del chocolate líquido. Esto se lo puede realizar mediante el cálculo de tres números adimensionales que representan las características del fluido en movimiento dentro del cañón. Los cuales son el número de Nusselt (Nu), el número de Reynolds (Re) y el número de Prandtl (Pr). A estos se los puede relacionar mediante una función empírica dependiendo de su comportamiento. Primero, se determina si se trata de un flujo laminar o turbulento mediante el número de Reynolds. Al ser un fluido no newtoniano del tipo plástico de Bingham (Oliag, 2016), se puede calcular de igual manera que un fluido newtoniano (Gardea-Villegas, 2008).

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad [57]$$

Donde:

- ρ : densidad del chocolate.
- v_s : velocidad del fluido.
- D : diámetro de la tubería.
- μ : viscosidad dinámica del chocolate.

$$v_s = \frac{Q}{A} = \frac{16}{\pi * 9.1^2} = 0.0615 \frac{mm}{s} \quad [58]$$

$$Re = \frac{1277 * 0.0615 * 10^{-3} * 18.2 * 10^{-3}}{10} = 1.429 * 10^{-4} \quad [59]$$

Ya que el valor es menor a 2000 se dice que el flujo es laminar.

Luego es necesario calcular el número de Prandtl, el cual se lo puede hacer mediante la ecuación 60.

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{K} \quad [60]$$

Donde:

C_p : Capacidad calórica

K : Conductividad térmica.

$$Pr = \frac{1590 * 10}{0.09} = 176666.7 \quad [61]$$

Con estos valores se calcula el número de Nusselt mediante una relación empírica que funciona correctamente para un flujo laminar con temperatura de pared constante (Holman, 2003).

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668 \left(\frac{D}{L}\right) RePr}{1 + 0.04 \left(\left(\frac{D}{L}\right) RePr\right)^{\frac{2}{3}}} = 5.688 \quad [62]$$

Una vez calculado este valor se obtiene el coeficiente convectivo mediante la ecuación 63.

$$h = \frac{Nu * K}{L} = \frac{5.688 * 0.09}{10 * 10^{-3}} = 51.192 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad [63]$$

Reemplazando los valores en la ecuación 56 se tiene:

$$12 = 2\pi(9.1)(0.01)51.192(T_i - 32) \\ T_i = 32.41^\circ C \quad [64]$$

Este valor representa la temperatura interna en el de la pared del cañón. Para obtener la temperatura en su exterior se utiliza la ecuación 65, teniendo como material el acero inoxidable AISI304 (Cengel, 2014).

$$\dot{Q} = \frac{2\pi KL(T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad [65]$$
$$12 = \frac{2\pi(16.3)(0.01)(32.41 - T_o)}{\ln\left(\frac{11.1}{9.1}\right)} \\ T_o = 34.73^\circ C \quad [66]$$

Una vez realizado los respectivos cálculos mecánicos tanto estructurales como de transferencia de calor. Se puede concluir que las principales piezas no presentarán fallas debido a los esfuerzos que soportan. Además, se conoce que es necesario un calefactor que alcance los 35°C como mínimo para mantener el chocolate fundido dentro del extrusor en su temperatura de trabajo.

Como último paso de diseño, es necesario seleccionar los elementos que forman parte del sistema electrónico y de control; los cuales se encuentran esquematizados en la Figura 15. Estos se encargarán de recibir datos de temperatura, accionar el mecanismo de extrusión, accionar el sistema de enfriamiento y mostrar datos de impresión al usuario. Primero es necesario seleccionar el principal actuador, el motor del extrusor. Este debe tener una respuesta al arranque y parada precisa que proporcione una deposición adecuada de chocolate. Este motivo fue determinante al momento de decidirse por un motor a pasos. Dentro de los cuales se eligió un motor NEMA 17 KS42STH34-1504A.

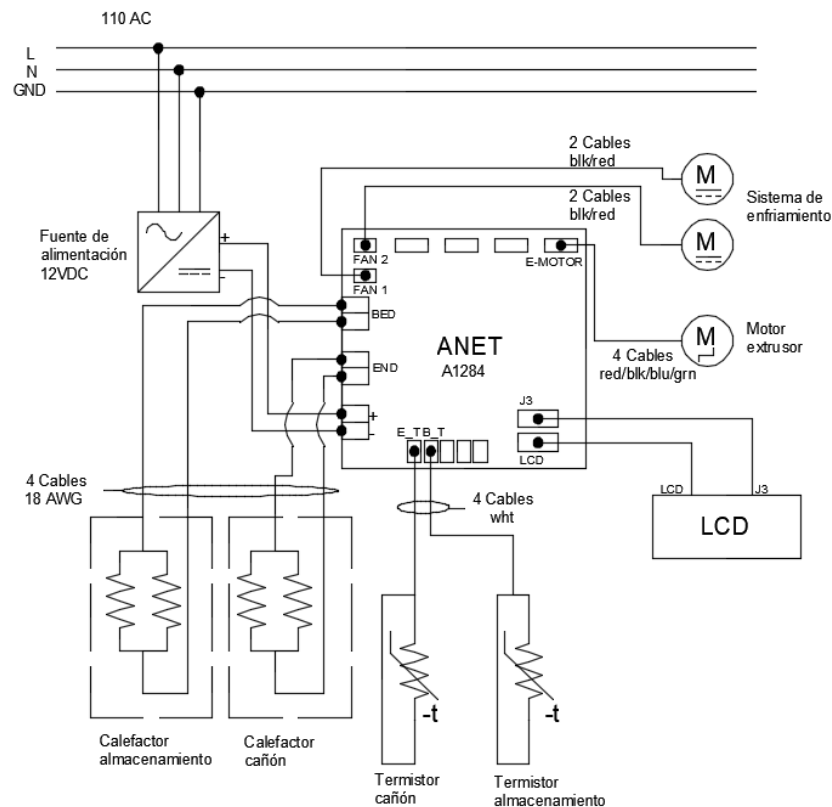


Figura 15. Diagrama eléctrico extrusor de chocolate.

La gama de motores NEMA 17 poseen un uso regular dentro de aplicaciones de impresión 3D, tanto en sus desplazamientos como para su extrusor. Esto debido al control preciso de su rotación y torque adecuado. En relación a esto último, el motor seleccionado posee un torque de 26N.cm; el cual se agrupa dentro de aplicaciones de carga ligera ya que este debe accionar el tornillo extrusor cuya masa es de 67g. Posee un ángulo por paso de 1.8° y consume una corriente de 1.5A a 2.8V.

Posteriormente, se seleccionó los actuadores que realizan la tarea de calentar y mantener la temperatura del chocolate líquido. Para esto se necesita un

calefactor de características flexibles que rodee tanto al cañón como al embudo de almacenamiento. Además, es necesario que alcance una temperatura de al menos 40°C, esto en relación a los datos obtenidos en los cálculos de temperatura. Por estos motivos se seleccionó el calefactor mostrado en la Figura 16. Es una resistencia eléctrica flexible y aislada en poliamida; cuyo consumo es de 12W a 12V y su temperatura máxima es de 170°C.



Figura 16. Calefactor flexible 12V.

La variable más importante a controlar es la temperatura para esto es necesario que el sensor mida de manera adecuada la temperatura dentro de un rango de 0°C a 50°C. Otro requerimiento importante son las dimensiones, es necesario que el sensor mantenga contacto con la pared del embudo y del cañón sin tener contacto directo con los calefactores para evitar mediciones erróneas. En base a los motivos descritos se seleccionó el termistor NTC 100Kohm, el cual posee un rango de medida de los -40°C hasta los 300°C. Su valor de precisión es del $\pm 0.2^\circ\text{C}$ de 0 a 70°C, lo cual es adecuado para la aplicación del extrusor. Por otro lado, es un sensor que mide aproximadamente 2x2x2mm, esto es de gran ayuda ya que presta facilidad en el montaje y cableado del extrusor. Como parte de sus características tiene un consumo máximo de 45mW.

Como se menciona en el documento es necesario que el chocolate se solidifique al momento de ser depositado. Para esto, que la temperatura se mantenga dentro del valor de trabajo es importante. Para complementar, se seleccionaron dos ventiladores 5015 los cuales se muestran en el explosionado de la Figura 6. Estos trabajan a un voltaje de 12V y tienen un consumo máximo de 0.48A. Su función principal es solidificar el chocolate y secar las capas que han sido depositadas.

Como elemento de control se eligió la tarjeta A1284 de la impresora Anet A6 que, como se mencionó anteriormente, es una impresora Reprap a la cual se le retiró el extrusor de plástico. La tarjeta, posee las entradas y salidas necesarias para todos los elementos seleccionados. Como principales características posee una alimentación a 12VDC, con 2 salidas digitales que fueron utilizadas para los calefactores. Además, cuenta con 2 salidas PWM

que fueron utilizadas para los ventiladores laterales. Asimismo, cuenta con una salida disponible para motor NEMA 17, esta se conecta con un driver embebido en la tarjeta lo que permite controlar velocidad, aceleración y pasos del motor. Finalmente, como elementos de comunicación cuenta con una ranura para micro SD, comunicación serial vía USB y una salida para conectarlo con una pantalla LCD.

La variable a principal a controlar por este sistema es la temperatura. El tipo de control para manejar esta señal debe ser de lazo cerrado, de tal forma que pueda medir las variaciones propias del calentamiento y, además mantenga su precisión frente a condiciones externas como cambios de temperatura ambiente (Ogata, 2016). Dentro de los tipos de control se seleccionó al controlador PID. Esto debido a que el sistema requiere que el chocolate se mantenga dentro de una banda de variación que no se aleje por más de 2°C del valor central o *set point*. El dispositivo posee dos zonas importantes de control. La zona de almacenamiento debe mantener al chocolate en estado líquido para una fluidez adecuada a través del cañón. El cañón debe encontrarse a una temperatura lo más cercana a la solidificación del chocolate para dar forma a cada una de las capas. Ambas zonas, tienen un control PID independiente con 2 calefactores y un sensor NTC 100kohm cada una. La sintonización del mismo puede ser modificado desde la interfaz del usuario en la impresora.

Para finalizar, el usuario podrá ser capaz de apreciar valores de temperaturas y tiempos de impresión. De la misma forma, debe tener la opción de realizar cambios tanto de set de temperatura, como de velocidades de rotación del extrusor. Para esto, se utilizó la interfaz incluida en la impresora Anet A6 ya que satisface estas necesidades en un ambiente intuitivo para el usuario. La Figura 17 muestra la pantalla LCD dividido en las distintas zonas de interés para el usuario.

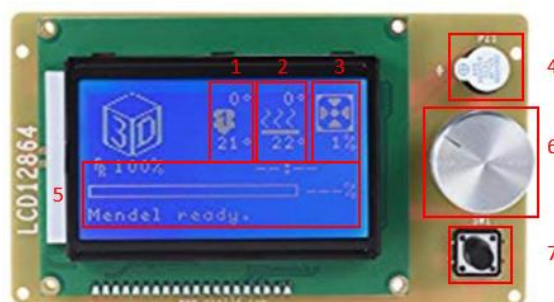


Figura 17. Interfaz de monitoreo Anet A6.

La zona 1 de la Figura 17 muestra la temperatura del cañón. El valor en la parte superior es el *set point* y el de la parte inferior es el valor real. De igual

manera, la zona 2 muestra los valores de temperatura, pero del embudo de almacenamiento de chocolate. La zona 3 muestra el porcentaje de velocidad del ventilador que enfría las capas de chocolate. Dentro de la zona 4 se encuentra una alerta sonora la cual se activa al momento de encender la impresora. La zona 5 es activada al momento de iniciar una impresión, esta muestra una barra de proceso con el porcentaje de finalización de la pieza 3D. Además, muestra el tiempo en minutos que ha tardado la pieza mencionada. La zona 6, es una perilla/pulsador que permite al usuario desplazarse por el menú de la impresora. Por medio de la cual se puede modificar las variables de impresión y navegar por los archivos dentro de la tarjeta micro SD para seleccionar la siguiente impresión. Finalmente, la zona 7 es un pulsador que permite resetear la impresora; esto es de gran ayuda en caso de ocurrir alguna anomalía y necesitar detener el proceso.

Todos los componentes eléctricos y electrónicos poseen un consumo de energía. La impresora Anet A6 utilizada cuenta con una fuente de alimentación AC-DC de 12VDC a 20A. Para la utilización de dicha fuente, es necesario comprobar con las modificaciones en el extrusor no superen el consumo permitido por la misma. La Tabla 3 muestra los principales elementos tanto del extrusor como de la impresora 3D, así como sus respectivos consumos. En base a los datos mostrados, se corroboró que la fuente satisface los requerimientos energéticos por lo que su uso se encuentra justificado.

Tabla 3. Consumo de elementos electrónicos Anet A6 y extrusor de chocolate.

Cantidad	Elemento	Consumo Total (A)
4	Nema 17 42SHDC3025-24B	7.2
1	Nema 17 KS42STH34-1504A	1.5
4	Calefactor flexible 12V	4
2	Termistor NTC 100Kohm	0.09
2	Ventilador lateral 5015	0.96
1	LCD 12864	0.25
	Total	14

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado de la investigación realizada se obtuvo el prototipo de un extrusor de chocolate cuyas características se encuentran especificadas en la Tabla 4. Además, se realizó un análisis de costos el cual se muestra en la Tabla 5. En este no se incluyeron tanto la tarjeta de control como la interfaz en LCD. La razón, es que los mismos son propios de la impresora Anet A6 y se modificarían en caso de utilizar el extrusor en otra impresora 3D.

Tabla 4. Especificaciones técnicas extrusor de chocolate.

Característica	Detalle
Peso (kg)	0.872 (aprox.)
Largo (mm)	165
Ancho (mm)	114
Altura (mm)	210
Capacidad almacenamiento de chocolate	200gr.
Material	AISI 304 / Aluminio.
Suministro eléctrico	12 Vdc
Consumo (A)	6.8
Tipo de motor extrusor	A pasos
Monitoreo	LCD

Tabla 5. Análisis de costos extrusor de chocolate.

N°	Elemento	Cantidad	V. Unitario (USD)	V. Total (USD)
1	Mecanizado de piezas	1	670.00	670.00
2	Acople flexible 5mm a 8mm	1	5.00	5.00
3	Boquillas AISI 304 0.2 – 1mm	13	0.85	11.05
4	Rodamiento lineal SC8UU	3	6.50	19.50
5	M3-0.5 x 3	2	0.20	0.60
6	M4-0.7 x 6	10	0.40	4.00
7	M4-0.7 x 10	16	0.40	6.40
8	M3-0.5 x 10	2	0.40	0.80
9	M3-0.5 x 30	4	0.40	1.60
10	Tuerca M3	6	0.20	1.20
11	Tuerca M4	4	0.20	0.80
12	Soporte ventilador	2	2.00	4.00
13	Nema 17 KS42STH34-1504A	1	22.00	22.00
14	Calefactor flexible 12V	4	2.75	11.00
15	Termistor NTC 100Kohm	2	6.00	12.00
16	Ventilador lateral 5015	2	9.00	18.00
17	Cable flexible 18 AWG 1 metro	2	1.25	2.5
18	Cinta térmica kapton 6mm	1	5.50	5.50
19	Banda Dentada 6mm 1 metro	2	4.25	8.50
			Total	804.45

A continuación, en esta sección se mostrará los datos obtenidos de las pruebas propuestas en el protocolo descrito en la sección anterior. Para comenzar, los datos de tiempos de calentamiento del cañón del extrusor están mostrados en la Tabla 6. Estos reflejan el tiempo que tarda el extrusor en pasar de 24°C, la temperatura ambiente al realizar la prueba, hasta los 32°C. Entre cada medición se dejó pasar suficiente tiempo como para que el extrusor se enfríe hasta la temperatura ambiente. Además, se comprobó que el dato

de temperatura obtenido con el sensor sea la misma que la reflejada en el termómetro infrarrojo.

Tabla 6. Tiempo de calentamiento cañón extrusor.

Medición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tiempo (s)	67.6	70.3	70.1	69.2	68.1	68.7	69.5	69.9	68.8	69.2

Con estos datos es necesario obtener una medida que indique el nivel de variación que existe entre ellos. Para esto se obtuvo la desviación estándar, la cual es una medida de dispersión utilizada en el análisis de datos estadísticos (Ciro, 2016). La ecuación 67 muestra la fórmula utilizada para calcular este valor.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad [67]$$

Donde:

\bar{x} : Promedio de los datos

x_i : Cada uno de los datos obtenidos

n Número total de muestras

$$\bar{x} = 69.14 \quad [68]$$

$$\sigma = 0.78 \quad [69]$$

Este dato indica que los tiempos se encuentran dispersos en 0.78s, lo cual es un valor bajo. Para comprobar esta afirmación se puede calcular el error estándar el cual es menor al 5%, con lo que se puede comprobar que los datos se encuentran dentro del intervalo de confianza del 95% de la distribución normal.

$$SE(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 0.24 \quad [70]$$

La siguiente prueba indicada es la velocidad de enfriamiento del chocolate extruido. Para esto, se retiró la boquilla del extrusor de forma que la cantidad de chocolate que fluya sea mayor. Además, se introdujo un recipiente de vidrio a la salida del extrusor, como se muestra en la Figura 18. Por su parte, la Tabla 7 muestra los tiempos de secado del chocolate fluido durante un minuto. Se realizaron diez muestras diferentes, las cuales se enfriaron a temperatura ambiente de 24 °C, sin contacto con el sistema de enfriamiento del extrusor.

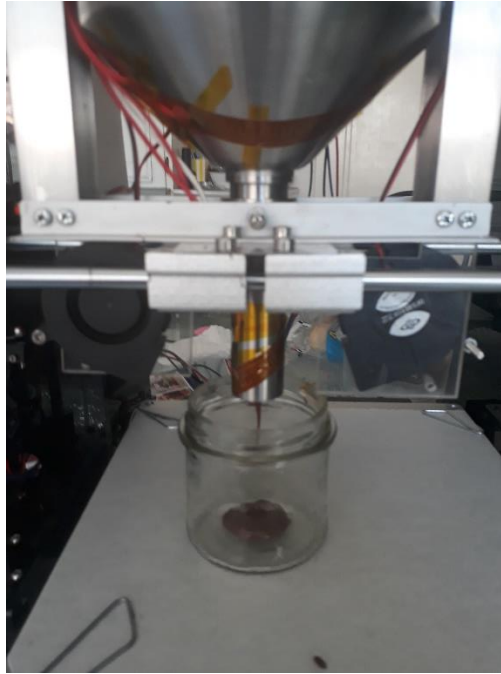


Figura 18. Prueba de enfriamiento de chocolate.

Tabla 7. Datos de enfriamiento del chocolate

Medición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tiempo (s)	138.9	128.6	132.4	135.2	130.3	133.8	134.3	138.6	131.1	130.4

Se realizó un análisis similar a la prueba anterior utilizando la ecuación 67 calculando la desviación estándar de los tiempos de secado.

$$\bar{x} = 133.36 \quad [71]$$

$$\sigma = 3.31 \quad [72]$$

Asimismo, con estos valores se obtuvo el error estándar con la ecuación 70; donde se puede apreciar que hay una mayor dispersión de los datos. Esto puede deberse a que el tiempo de secado está ligado a factores externos como la temperatura ambiente. Pese a esto, el error se encuentra dentro de los límites esperados.

$$SE(\bar{x}) = 1.047 \quad [73]$$

Para realizar la prueba sobre el caudal de salida, fue necesario encontrar la velocidad a la cual debía girar el motor. Esto se consiguió, con la ayuda de una probeta graduada, que tiene una precisión de 0.1ml, dentro de la cual se dejó que fluya chocolate durante un minuto. Los valores dentro de los cuales debe manejarse el extrusor son entre 12mm³/s a 16mm³/s; que transformado a las unidades que se puede medir son 0.72ml/min a 0.96ml/min. Se configuró la precisión del motor a un valor de 1000 pasos/mm. Esta configuración,

resultó en un volumen de 0.9ml. Posteriormente, se realizaron 10 mediciones dentro de la probeta graduada como se muestra en la Figura 19. Los datos se muestran en la Tabla 8.

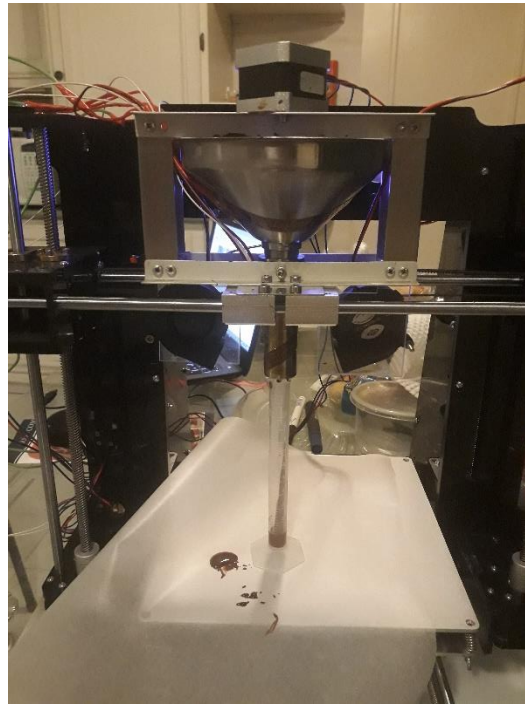


Figura 19. Prueba de caudal.

Tabla 8. Datos de prueba de caudal

Medición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volumen (ml)	0.9	0.88	0.91	0.91	0.9	0.9	0.92	0.91	0.9	0.9

Se realizó un análisis similar a las pruebas anteriores de los cuales se aprecia que la desviación estándar es cercana a cero. Por consiguiente, el error estándar es igualmente bajo. La razón principal, es la precisión del giro del motor el cual por su modo de funcionamiento debe girar la misma cantidad de pasos en la misma unidad de tiempo.

$$\bar{x} = 0.903 \quad [74]$$

$$\sigma = 0.01 \quad [75]$$

$$SE(\bar{x}) = 0.0032 \quad [76]$$

Una vez terminado las pruebas de parámetros del extrusor, se continuó con las enfocadas a la calidad de las piezas realizadas. Estas se realizaron tanto con un chocolate de cobertura comercial de la marca Bon Ami, así como con un chocolate amargo que tiene un 50% de cacao. Es importante destacar que la boquilla utilizada es de 0.8mm, la cual fue el menor diámetro al cual no se presentó problemas de taponamiento. Primero, se mandó a imprimir 5 líneas

de 80mm de longitud. Con la ayuda de un calibrador, como se aprecia en la Figura 20, se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 9. Además, se encontró el error relativo de cada medida utilizando la ecuación 77.

$$E_r = \frac{|V_{real} - V_{medido}|}{V_{real}} * 100\% \quad [77]$$

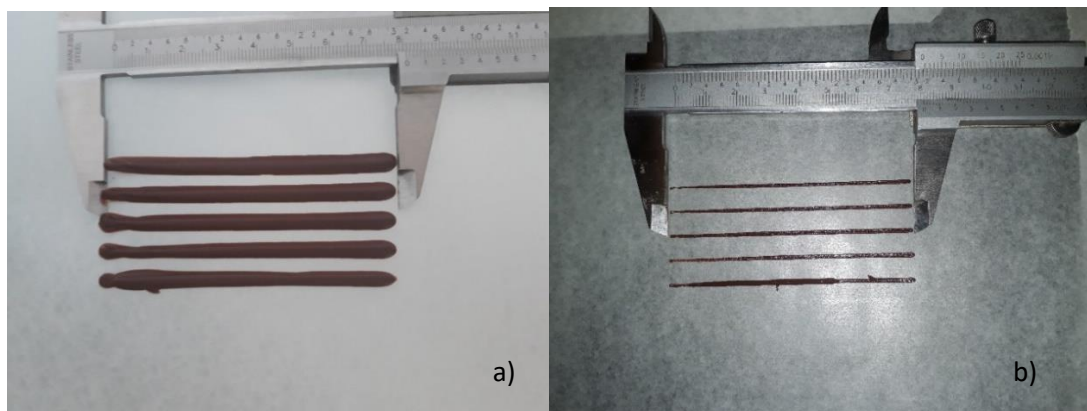


Figura 20. Líneas impresas de 80mm de longitud con a) chocolate de cobertura y b) chocolate amargo.

Tabla 9. Datos de prueba unidimensional.

Chocolate de cobertura						
DIMENSIÓN	CONTROL	1	2	3	4	5
Largo (mm)	80	81.2	80.6	80.8	81.1	80.9
Error relativo (%)		1.5	0.75	1	1.37	1.12
Chocolate amargo						
DIMENSIÓN	CONTROL	1	2	3	4	5
Largo (mm)	80	80.3	80.5	80.2	79.9	80.1
Error relativo (%)		0.375	0.625	0.25	0.125	0.125

De la Tabla 9, se pudo corroborar que las medidas no superan el 5% de error para estar dentro del intervalo de confianza lo cual indica que el extrusor realizó de forma exitosa la prueba. Además, se muestra que existe mejor definición en chocolate amargo esto debido a que es más espeso que el de cobertura. Por otro lado, esta característica también incide en un taponamiento más frecuente. Para eliminar este problema se aumentó en 2°C la temperatura del cañón.

A continuación, se realizó la prueba de calidad en dos dimensiones donde, se imprimieron cuadrados de 20 mm de lado que se pueden apreciar en la Figura 21. El análisis de los datos fue similar a la prueba anterior y estos se encuentran mostrados en la Tabla 10. De ellos se pudo destacar que dimensionalmente se encuentran dentro del intervalo de confianza descrito en el protocolo de pruebas.

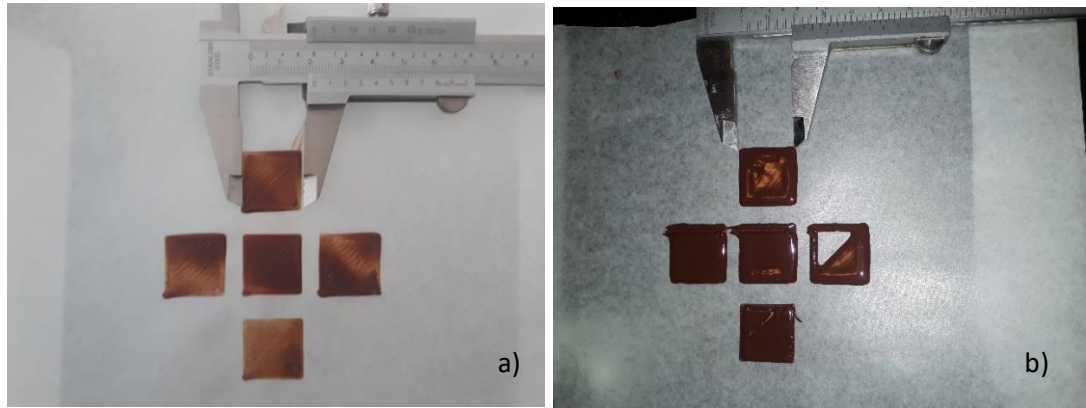


Figura 21. Cuadrados de chocolate de 20mm de lado con a) chocolate de cobertura y b) chocolate amargo.

Tabla 10. Datos de prueba bidimensional.

Chocolate de cobertura						
DIMENSIÓN	CONTROL	1	2	3	4	5
Largo (mm)	20	20.4	20.14	20.24	20.5	20.3
Error relativo (%)		2	0.7	1.2	2.5	1.5
Ancho (mm)	20	20.2	20.2	20.3	20.4	20.24
Error relativo (%)		1	1	1.5	2	1.2
Chocolate amargo						
DIMENSIÓN	CONTROL	1	2	3	4	5
Largo (mm)	20	20.8	20.4	20.54	20.6	20.5
Error relativo (%)			2	2.7	3	2.5
Ancho (mm)	20	20.7	20.36	20.6	20.48	20.4
Error relativo (%)		3.5	1.8	3	2.4	2

Además, entre las diferencias principales se notó una variación de intensidad de relleno con el chocolate de cobertura que puede deberse a una ligera falla en la calibración de la mesa de la impresora 3D; pese a esto no se apreció espacios sin chocolate. Por otro lado, en esta prueba el chocolate amargo tuvo un desempeño inferior que el chocolate de cobertura. La razón principal es que presenta una tasa de enfriamiento más lenta por lo cual se incrementa en mayor medida las dimensiones finales. También, se observó el problema antes mencionado. Al realizar el último cuadrado el chocolate tapó la boquilla por lo cual se aprecia una figura con relleno incompleto. Pese a este inconveniente, se pudo medir el contorno de todas las impresiones.

Luego se realizó la prueba de calidad sobre piezas en tres dimensiones. Para lo cual, se utilizó una caja la cual tiene 30mm de ancho, 30mm de largo, 10mm de altura y un ancho de pared de 3mm. En la Figura 22 se puede observar la medición de una de las 5 cajas impresas para cada tipo de chocolate. Los datos con su respectivo análisis se encuentran indicados en la Tabla 11.

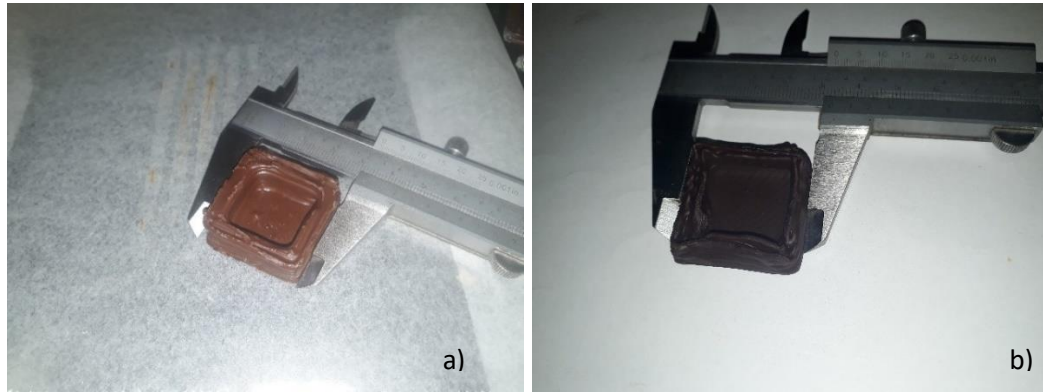


Figura 22. Cajas de prueba en tres dimensiones con a) chocolate de cobertura y b) chocolate amargo.

Tabla 11. Datos de prueba tridimensional.

Chocolate de cobertura						
DIMENSIÓN	CONTROL	1	2	3	4	5
Largo (mm)	30	33.6	33.2	32.1	33	33.3
Error relativo (%)		12	10.6	7	10	11
Ancho (mm)	30	32.4	32.6	32.4	32	32.3
Error relativo (%)		8	8.6	8	6.6	7.6
Altura (mm)	10	10.1	10.3	10.2	10.1	10.28
Error relativo (%)		1	3	2	1	2.8
Ancho Pared (mm)	3	5.2	5.5	4.6	4.3	5
Error relativo (%)		73.3	83.3	53.3	43.3	66.6
Chocolate amargo						
DIMENSIÓN	CONTROL	1	2	3	4	5
Largo (mm)	30	32	33.3	34.3	33	32.8
Error relativo (%)		6.67	11	14.3	10	9.3
Ancho (mm)	30	32.6	33.3	34.2	33.1	32.5
Error relativo (%)		8.67	11	14	10.3	8.3
Altura (mm)	10	8.9	9.7	8.4	9	9.2
Error relativo (%)		11	3	16	10	8
Ancho Pared (mm)	3	4.8	4.7	5.4	4.2	4.5
Error relativo (%)		60	56.67	80	40	50

Del análisis que se realizó, se aprecia que el error supera en casi todas las medidas al permitido con ambos chocolates. Asimismo, tuvieron desempeños similares tanto en largo como ancho. Pero, existen diferencias importantes de forma específica en la altura y ancho de pared. Para la altura, se mostró una ventaja del chocolate de cobertura el cual presentó incluso valores dentro del rango aceptado para la prueba. Por otro lado, el ancho de pared tuvo un resultado mejor al realizarse con chocolate amargo; aunque, no lo suficiente como para obtener un error dentro de lo aceptado. Además, para obtener un mejor resultado con este chocolate fue necesario disminuir la velocidad del motor del extrusor y prescindir de los ventiladores de enfriamiento.

La razón por la cual se obtuvieron errores tan altos en la prueba tridimensional es debido al ensanchamiento propio del material luego de ser extruido. Esto

tuvo mayor incidencia conforme se fueron añadiendo capas una tras otra. Aunque, en un análisis global ninguna medición supera los 4.3mm de diferencia en relación al dibujo en CAD. Además, se comprobó el cambio realizado sobre la velocidad del motor ya que el chocolate de cobertura presentó errores similares en ancho y largo, pero una altura cercana al valor de control a diferencia del chocolate amargo.

Para finalizar con las pruebas dimensionales, se realizó la prueba de altura. Se realizaron tres repeticiones dónde se buscó alcanzar la mayor altura y, se detuvo la impresión cuando era observada una falla que impida seguir depositando capas de chocolate. En la Figura 23 se muestra la medición del mejor resultado obtenida para cada chocolate. Asimismo, en la Tabla 12 muestra las medidas de todas las impresiones.

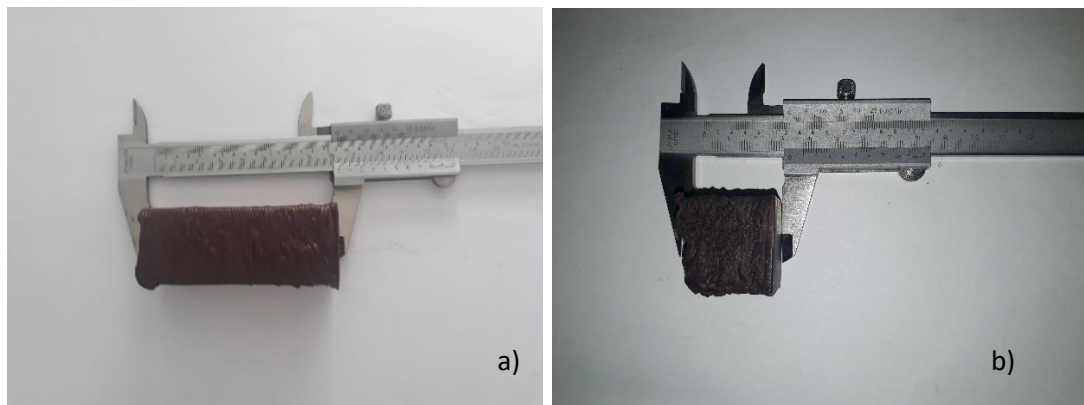


Figura 23. Medición prueba de altura con a) chocolate de cobertura y b) chocolate amargo.

Tabla 12. Datos de la prueba de altura.

Chocolate de cobertura			
IMPRESIÓN	1	2	3
ALTURA (mm)	56.2	82.1	64.3
Chocolate amargo			
IMPRESIÓN	1	2	3
ALTURA (mm)	33.8	32.2	35.1

De los datos obtenidos en la Tabla 12, se pudo concluir de forma evidente que el chocolate de cobertura presenta una ventaja al imprimir figuras de mayor altura. Esto se debe a su mayor velocidad de enfriamiento lo cual permite que las capas sean depositadas sobre una superficie más estable. Esta característica recae sobre las diferencias en la composición en ambas fórmulas, especialmente en el uso de grasas vegetales. Por su parte, el chocolate amargo no superó la altura de 35.1mm ya que conforme se iba aumentando capas la distancia entre la figura y la boquilla era mayor, terminando en un fallo de impresión. Es importante mencionar, que ambas tuvieron los mismos parámetros de impresión respectivamente. La única

diferencia fue la temperatura ambiente, variable sobre la que no se tiene un control total.

Los resultados obtenidos del protocolo de pruebas permitieron verificar que el extrusor funciona con diferentes tipos de chocolate. Además, se observó que existe una expansión hacia todas las direcciones al depositarse una capa sobre su predecesora. Es así que, para obtener una figura con las medidas deseadas es recomendable disminuir sus medidas desde el archivo CAD en aproximadamente 2mm. También, para obtener paredes de 3mm de ancho o inferiores utilizando chocolate de cobertura, es recomendable utilizar el menor número de líneas para realizarla. Esto se puede modificar desde el programa que obtiene el código g. En definitiva, conocer las ventajas y desventajas de cada tipo de chocolate permite variar tanto los parámetros de dibujo como del extrusor para obtener piezas las piezas deseadas.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El sistema de extrusión mediante tornillo pudo depositar hilos de 0.8mm de grosor para crear piezas en 3D, teniendo como ventaja la facilidad de reponer material e imprimir sin la necesidad de detener el proceso. Aunque, existe un desperdicio inevitable de chocolate el cual queda dentro del cañón al vaciarse la tolva de almacenamiento.
- El diseño mecánico se realizó de forma que se pueda cambiar la boquilla del extrusor, de las que se probaron con grosor 0.6mm, 0.8mm y 1mm. En base a la experiencia, se escogió un diámetro de 0.8mm la cual fue el diámetro menor al cual no se presentó problemas de taponamiento. La de 1mm funcionó de forma similar, pero presenta una definición inferior.
- El control de temperatura utilizado con su respectiva interfaz de visualización mantuvo el valor en 32°C en el cañón, para chocolate de cobertura, y 34°C para chocolate amargo. Valores que se escogieron al calcular que la diferencia entre la temperatura real del chocolate y la medida con el sensor es de 2°C aproximadamente.
- Se utilizó una velocidad de impresión de 7mm/s. Este valor está ligado a la tasa de enfriamiento del chocolate. Para figuras con una superficie de capa mayor a las utilizadas en este proyecto se podría aumentar esta variable y disminuir así el tiempo de impresión. Por otro lado, disminuir la velocidad de impresión brinda más tiempo para que las capas anteriores se solidifiquen, aunque no aporta beneficios si estas se depositan con diferencias superiores a los 130 segundos entre sí.
- Realizar impresiones dentro de los valores de temperatura adecuados para mantener fluido el chocolate y no sobrepasar su temperatura de templado. La cual acorde a la experiencia de este proyecto es de 32 a 34°C.
- Realizar la impresión en un cuarto con un ambiente controlado mejorará los resultados de impresión ya que es una variable sobre la cual no se tuvo control en este proyecto. Pero, se apreció que un clima de 17°C producía mejores impresiones que un clima de 24°C.
- Observar el proceso de impresión es importante para evitar que una imperfección debida a taponamiento de la boquilla. En caso de ocurrir es recomendable pausar la impresión para arreglar el problema.

- Para chocolates con mayor contenido de cacao se recomienda introducirlos en un congelador después de ser impresos para acelerar su proceso de enfriamiento y así obtener mejores resultados.
- Imprimir figuras con un área de capa mayor a los 30mm² es de gran ayuda para obtener mejores resultados. Esto debido a que la capa anterior tiene mayor tiempo de secado hasta que se deposite la capa siguiente.

BIBLIOGRAFÍA

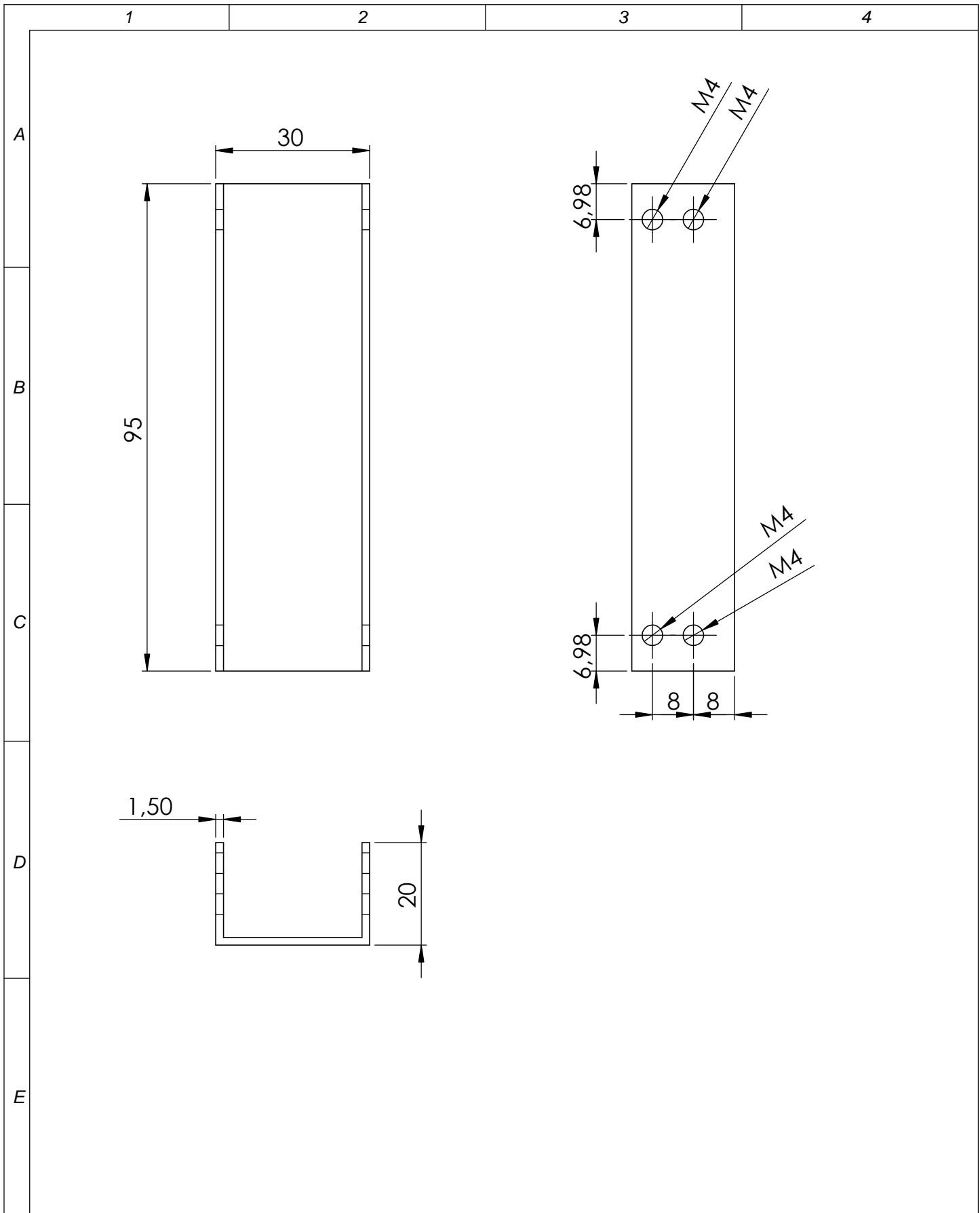
- AENOR. (2009). *Maquinaria para procesado de alimentos. Conceptos básicos. Parte 2: Requisitos de higiene.* (UNE-EN 1672-2:2006+A1:2009).
- Beckett, S. T. (2015). *The science of chocolate.* Royal Society of Chemistry.
- Cengel, Y. (2014). *Heat and mass transfer* (5th ed.). Boston, Mass.: McGraw-Hill.
- Ciro, M. B. (2016). *Estadística básica aplicada.* Ecoe Ediciones.
- Delligatti, L. (2013). *SysML distilled: A brief guide to the systems modeling language.* Addison-Wesley.
- FAO. (2016). *Norma para el Chocolate y los Productos de Chocolate* (CODEX STAN 87-1981)
- Gardea-Villegas, H. (2008). Dos propuestas para el proyecto del bombeo de fluidos no newtonianos. Caso de los lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas negras. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 9(2), 87-97.
- Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). *3D printing technologies applied for food design: Status and prospects.* *Journal of Food Engineering*, 179, 44-54.
- Groover, M. (2015). *Fundamentals of Modern Manufacturing* (6th ed.). New York: Wiley.
- Gutiérrez, P., & Bornacelli, J. (2006). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo* (Bachelor's thesis, Universidad Autónoma de Occidente).
- Hao, L., Mellor, S., Seaman, O., Henderson, J., Sewell, N., & Sloan, M. (2010). *Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing.* *Virtual and Physical Prototyping*, 5(2), 57-64.
- Holman, J. (2003). *Transferencia de calor* (10th ed.). México: CECSA.
- INEN. (2014). *SEGURIDAD E HIGIENE DE MAQUINARIA PARA PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS* (INEN RTE 131). Quito: Ecuador.
- Lanzotti, A., Martorelli, M., & Staiano, G. (2015). Understanding process parameter effects of rewrap open-source three-dimensional printers through a design of experiments approach. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(1), 011017.
- Mantihal, S., Prakash, S., Godoi, F. C., & Bhandari, B. (2017). *Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling.* *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 44, 21-29.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* (4a. ed.). Naucalpan de Juárez: Pearson Educación.
- Mott, R. (2009). *Resistencia de Materiales* (5th ed.). México: Pearson.


- Ogata, K. (2016). *Modern control engineering*. [Delhi]: Pearson.
- Oliag, P. T. (2016). *Caracterización del comportamiento reológico de un alimento fluido plástico*.
- Sun, J., Peng, Z., Yan, L., Fuh, J. Y. H., & Hong, G. S. (2015). *3D food printing an innovative way of mass customization in food fabrication*. *International Journal of Bioprinting*, 1(1), 27-38.
- Vazhnov, A. (2013). *Impresión 3D: Como va a cambiar el mundo*. 1st ed. Baikal.
- VDI. (2004). *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme -- Design methodology for mechatronic systems*. Vdi 2206, (June), 118. <https://doi.org/10.1002/mawe.19740050417>

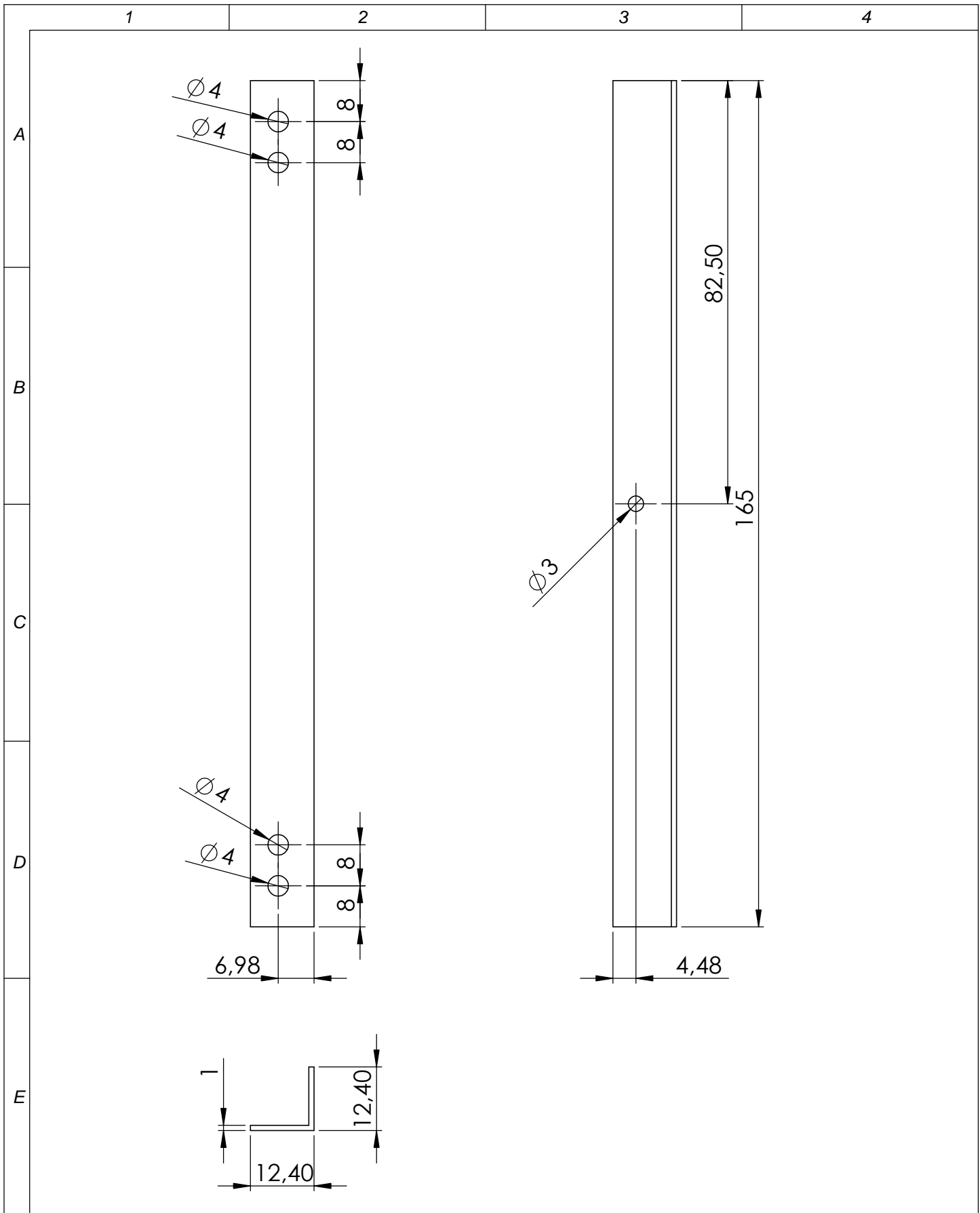
ANEXOS


ANEXO 1.

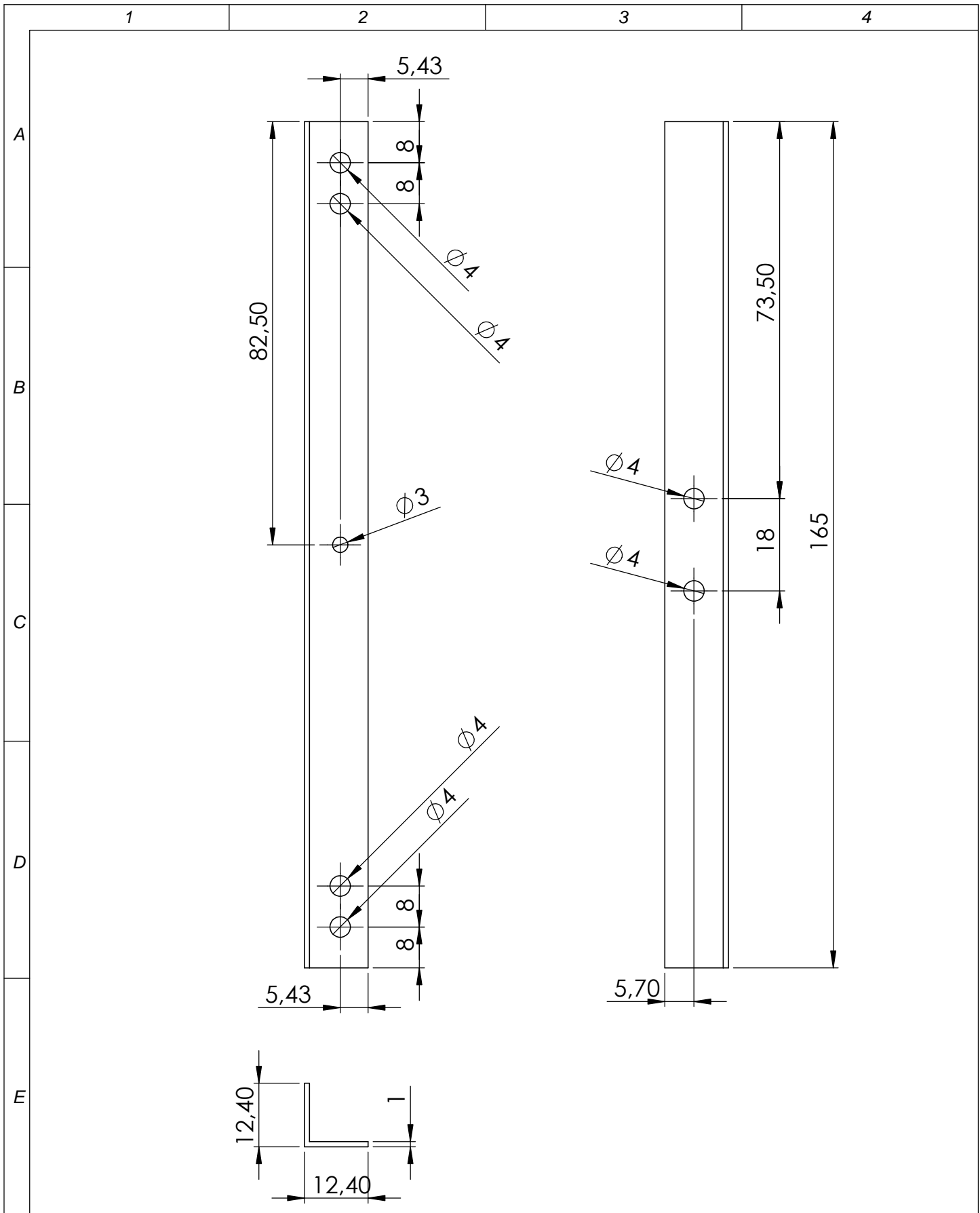
Planos de elementos mecánicos.



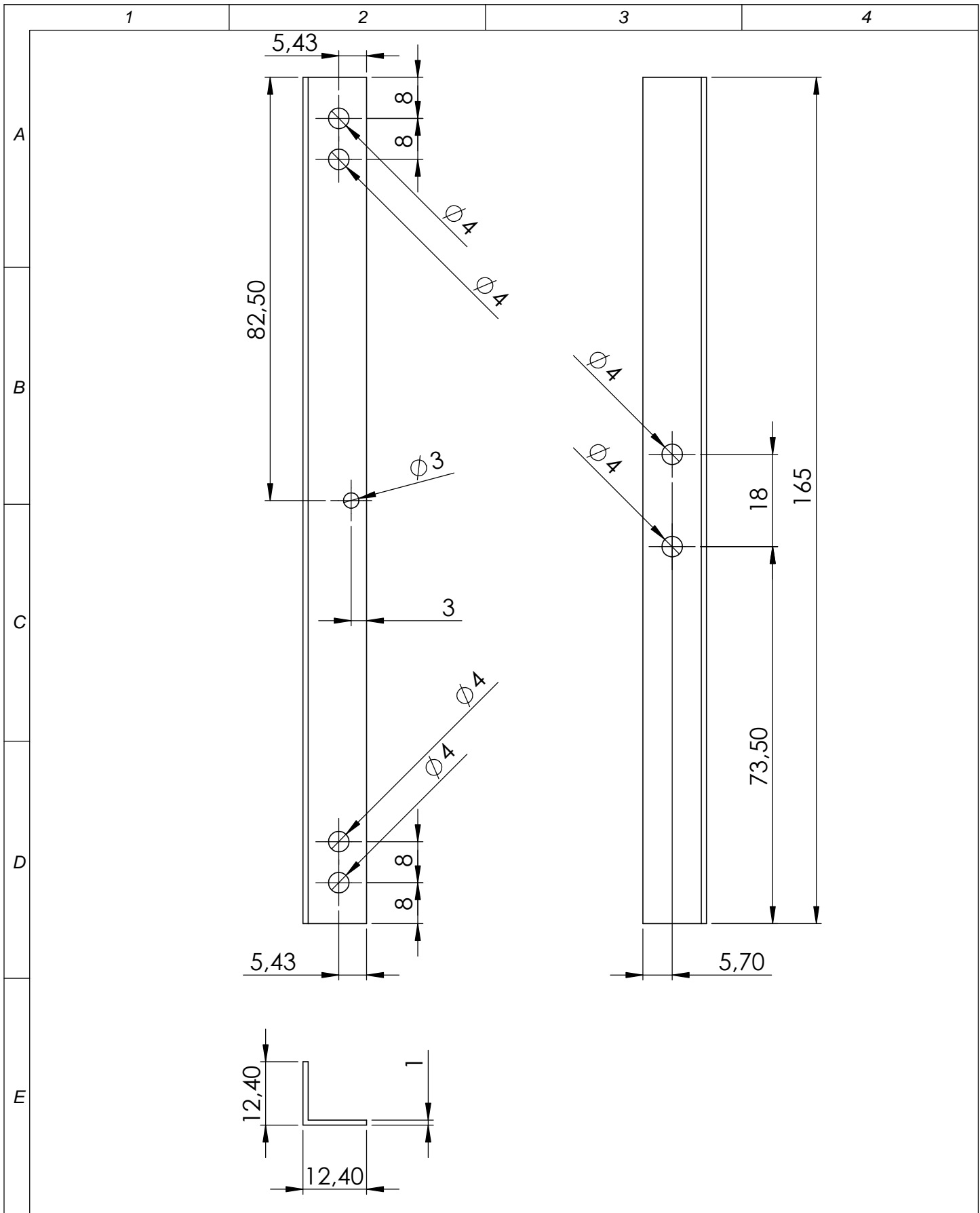
				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:			
				± 0.1	0.075	AISI 304			
				Fecha	Nombre	Soporte vertical	ESCALA:		
				Dibujado 27/02/2019	ORDÓÑEZ R.		1:1		
				Revisado					
				Aprobado					
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	HOJA:		
						EXTCHC-1	A4		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			NÚMERO DE HOJA:			
						1 de 9			




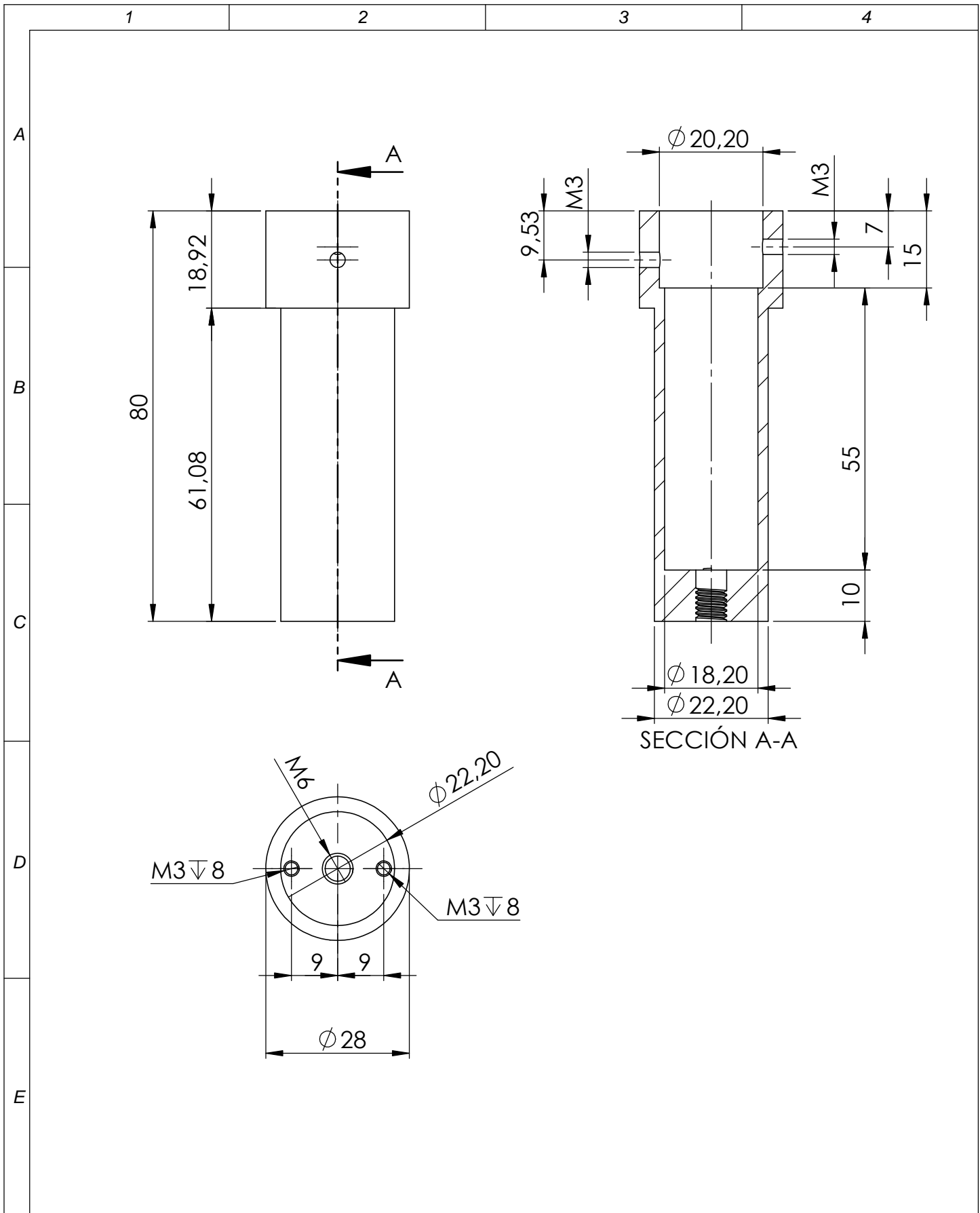
				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO [Kg]: 0.010	MATERIAL: ALUMINIO	
				Fecha	Nombre	Soporte horizontal sup.	ESCALA: 1:1
				Dibujado 27/02/2019	ORDÓÑEZ R.		
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº: EXTCHC-2	HOJA: A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			NÚMERO DE HOJA: 2 de 9	



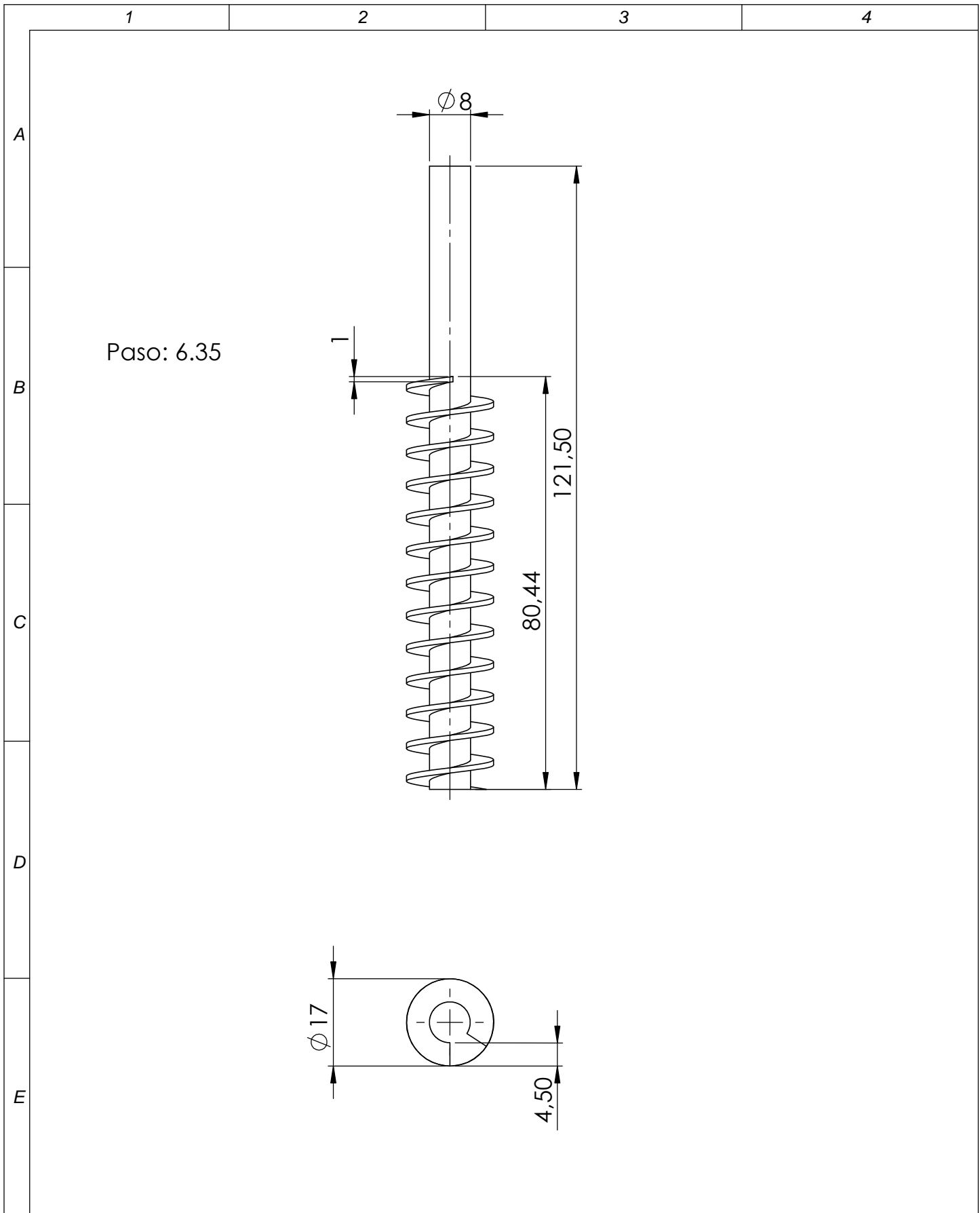
				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.1	0.010	ALUMINIO	
				Fecha	Nombre	Soporte horizontal izq. inf.	
				Dibujado 27/02/2019	ORDÓÑEZ R.		
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	ESCALA:
						EXTCHC-3	1:1
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			NÚMERO DE HOJA:	HOJA:
						3 de 9	A4




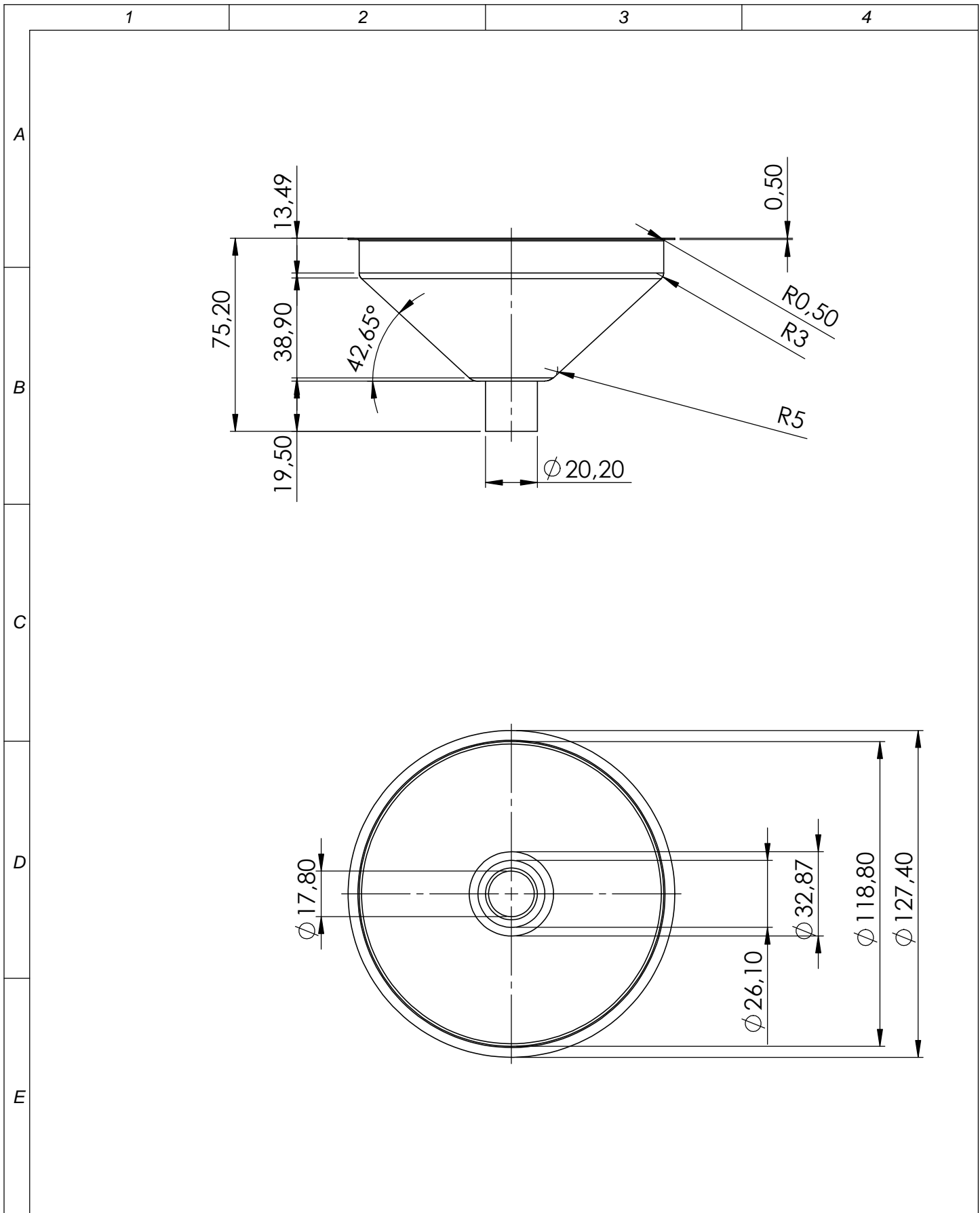
				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.1	0.01	ALUMINIO	
				Fecha	Nombre	Soporte horizontal inf. der.	
				Dibujado 27/02/2019	ORDÓÑEZ R.		
				Revisado			
				Aprobado		ESCALA:	
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	
						EXTCHC-4	
						NÚMERO DE HOJA:	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			HOJA:	
						A4	
						4 de 9	




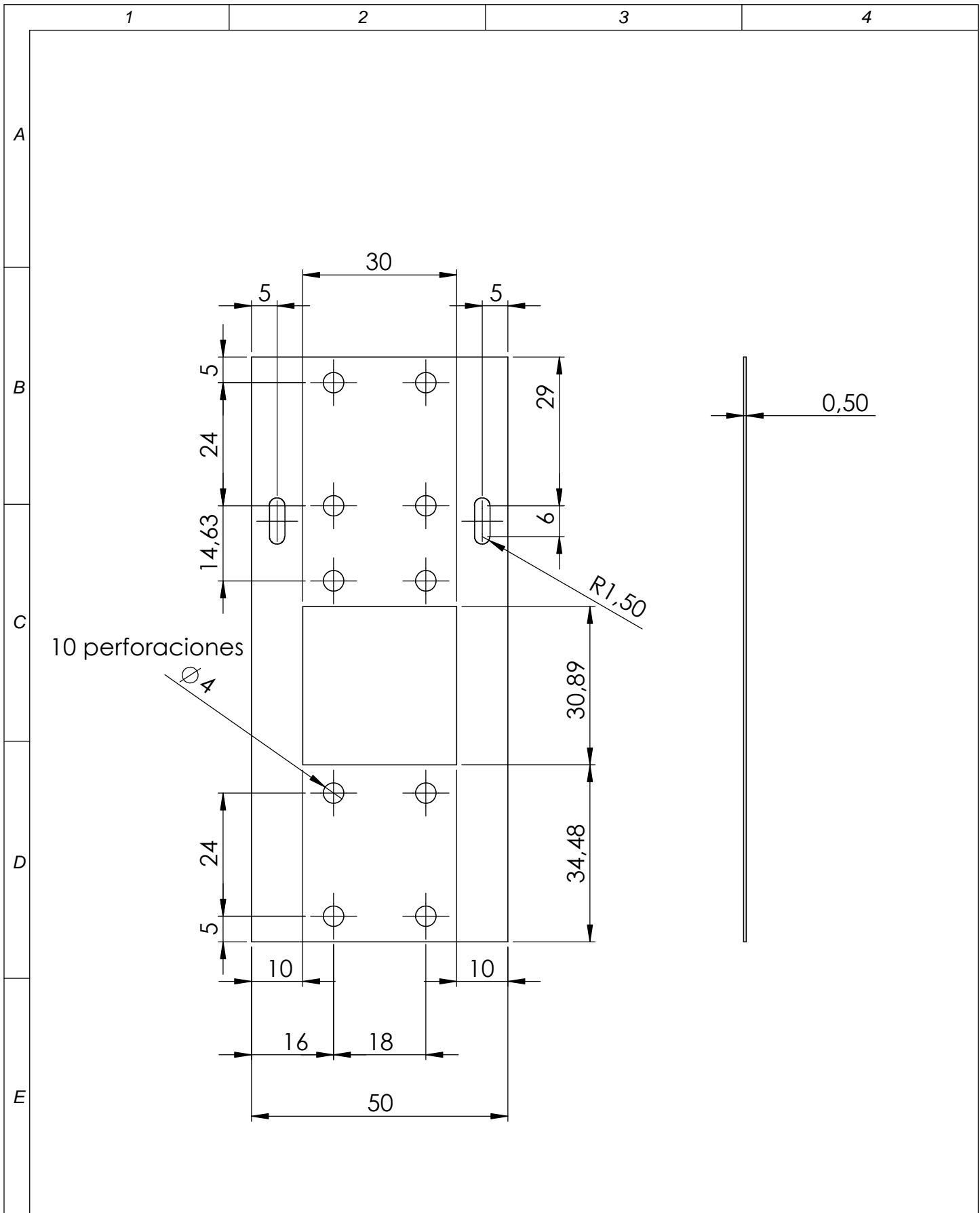
				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:		
				± 0.1	0.126	AISI 304		
				Fecha	Nombre	<h1>Cañón</h1>		ESCALA:
				Dibujado 27/02/2019	ORDÓÑEZ R.			1:1
				Revisado				
				Aprobado				
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	HOJA:	
						EXTCHC-5	A4	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			NÚMERO DE HOJA:		
						5 de 9		




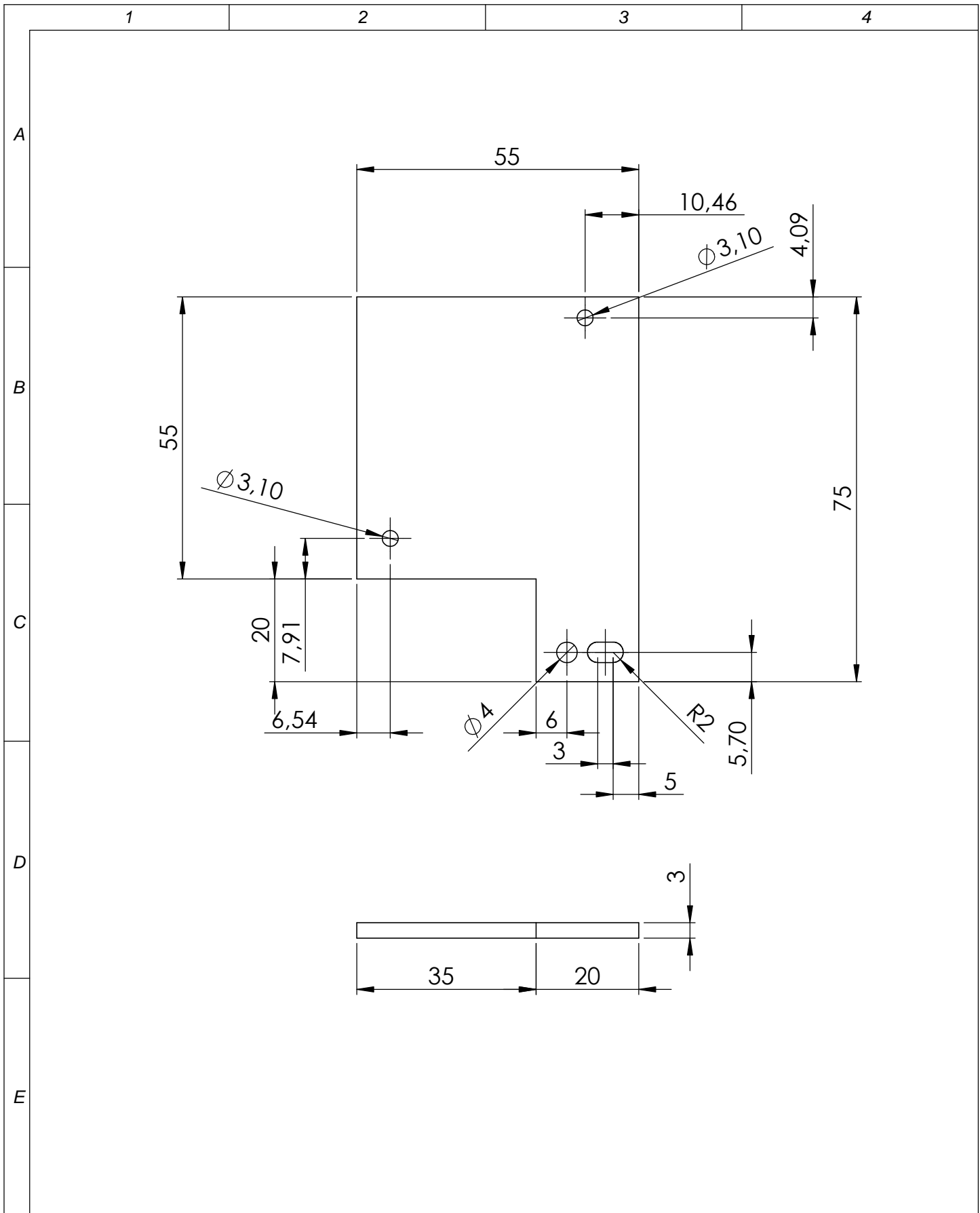
				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO [Kg]: 0.067	MATERIAL: AISI 304		
						Tornillo extrusor	ESCALA: 1:1	
				Fecha	Nombre			
				Dibujado	27/02/2019		ORDÓÑEZ R.	
				Revisado				
				Aprobado				
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº: EXTCHC-6	HOJA: A4	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			NÚMERO DE HOJA: 6 de 9		




				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO [Kg]: 0.097	MATERIAL: AISI 304	
				Fecha	Nombre	<h1>Embudo</h1>	ESCALA: 1:2
				Dibujado 27/02/2019	ORDÓÑEZ R.		
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº: EXTCHC-7	HOJA: A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			NÚMERO DE HOJA: 7 de 9	



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:		
				± 0.1	0.019	AISI 304		
				Fecha	Nombre	Acople extrusor a impresora		ESCALA:
				Dibujado 27/02/2019	ORDÓÑEZ R.			1:1
				Revisado				
				Aprobado				
				FIRMA / EMPRESA:	DIBUJO Nº:			HOJA:
					EXTCHC-8			A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre		NÚMERO DE HOJA:			
				8 DE 9				



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:		
				± 0.1	0.012	ACRÍLICO		
				Fecha	Nombre	Soporte ventilador	ESCALA:	
				Dibujado 27/02/2019	ORDÓÑEZ R.		1:1	
				Revisado				
				Aprobado				
				FIRMA / EMPRESA:	DIBUJO Nº:		HOJA:	
					EXTCHC-9		A4	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre		NÚMERO DE HOJA:			
				9 de 9				