



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

**“Diseño de un Extrusor de Impresión 3D  
para el Reciclado de Plástico”**

**Autor:**

**González López, Carlos**

**Tutor: Mansilla Gallo, Alberto**

Dpto. Ciencia de los Materiales e Ingeniería  
metalúrgica, Expresión gráfica en la  
ingeniería, Ingeniería Cartográfica, Geodesia  
y fotogrametría, Ingeniería Mecánica e  
ingeniería de Procesos de Fabricación.

**Valladolid, Julio 2021.**



## RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado se centra en la verificación de componentes y posterior diseño de un extrusor para plástico reciclado destinado a impresión 3D.

Durante este proyecto se llevará a cabo una investigación de mercado sobre las diferentes extrusoras de plástico existentes; se analizarán y combinarán los conceptos más convenientes de cada extrusora; se realizará un estudio del proceso de extrusión; y se determinarán sus parámetros más importantes.

El objetivo final es el diseño de una extrusora de plástico reciclado capaz de caracterizar con exactitud el fundido de plástico. Por ello, se diseñará y equipará la extrusora con los elementos necesarios para un correcto análisis.

Este estudio será una pieza clave de un proyecto a mayor escala, en el que se reciclarán plásticos para darles una nueva vida útil.

**PALABRAS CLAVE** Sostenibilidad – Extrusora – Reciclaje – Plástico – Reometría

## ABSTRACT

The present End of Studies Project is focused on the verification of components and later design of an extruder meant to study the extrusion process of plastic.

A market survey of the different types of plastics extruders currently available on the market will be done. It will be analyzed and combined the most convenient concepts of each extruder. A study of the extrusion process will be carried out and its most important parameters will be determined.

The final objective is the design of a recycled plastic extruder capable of accurately measuring the most important parameters of the process. For this, the extruder will be designed and equipped with the necessary elements for a correct analysis.

This study will be a key part of a bigger project, where waste plastic products will be recycled, giving them a new life.

**KEY WORDS** Sustainability – Extruder – Recycling – Plastic – Sizing – Rheometry



# ÍNDICE

<b>1. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS</b> .....	7
<b>2. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO</b> .....	11
2.1. Introducción .....	11
2.2. Contexto del proyecto.....	12
2.3. Parte de un proyecto mayor.....	13
2.4. Condicionantes y Limitaciones.....	14
<b>3. OBJETIVOS DEL PROYECTO</b> .....	15
<b>4. ESTADO DE LA TÉCNICA</b> .....	16
4.1. DEFINICIÓN DE EXTRUSORA .....	16
4.2. TIPOS DE EXTRUSORAS.....	16
4.3. COMPONENTES DE UNA EXTRUSORA .....	17
4.4. PARÁMETROS .....	22
4.5. ESTUDIO DE MERCADO .....	29
<b>5. PLÁSTICO COMO FLUIDO</b> .....	41
5.1. DEFINICIÓN DE REOLOGÍA.....	41
5.2. VISCOSIDAD.....	41
5.3. MEDIDA DE VISCOSIDAD .....	43
<b>6. MODELO DE CARACTERIZACIÓN DEL PLÁSTICO</b> .....	50
6.1. VISCOSIDAD.....	50
6.2. PRESIÓN Y TEMPERATURA .....	50
6.3. <i>MELT FLOW INDEX</i> O ÍNDICE DE FLUJO .....	51
6.5. CALOR DE GENERACIÓN VISCOSO .....	52
<b>7. DISEÑO MECÁNICO</b> .....	53
7.1. BARRIL Y HUSILLO .....	54
7.2. ALIMENTACIÓN.....	78
7.3. MOTOR Y REDUCTOR.....	79
7.4. CONTROL .....	84
<b>8. MATERIALES</b> .....	87
<b>9. MANTENIMIENTO</b> .....	89
9.1. REDUCTOR .....	89

9.2.	EQUIPO ELÉCTRICO.....	89
9.3.	HUSILLO Y BOQUILLA.....	90
<b>10.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL PLÁSTICO .....</b>	<b>90</b>
<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEA FUTURA.....</b>	<b>94</b>
11.1.	CONCLUSIONES .....	94
11.2.	LÍNEA FUTURA .....	95
<b>12.</b>	<b>ANEJOS .....</b>	<b>101</b>

# 1. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Producción mundial de plásticos. [1] .....	12
Figura 2: Diagrama de flujo para el reciclado de plásticos. Elaboración propia. .....	13
Figura 3: Extrusora Mono husillo. [6].....	16
Figura 4: Extrusora Doble Husillo. [6].....	16
Figura 5: Extrusora RAM. [6] .....	17
Figura 6: Componentes de una Extrusora. [6] .....	17
Figura 7: Secciones de un husillo. [7] .....	18
Figura 8: Tornillo Mono Husillo. [6].....	19
Figura 9: Tornillo de Mezclado. [6] .....	19
Figura 10: Tornillo de Barrera. [7].....	20
Figura 11: Extrusora con Venteo. [7].....	20
Figura 12: Tornillo de dos etapas con Mezclador. [7].....	21
Figura 13: Tolva de Secado Novatec. [8] .....	21
Figura 14: Control en lazo cerrado de presión. [6].....	23
Figura 15: Localización Estándar de Sensores de Presión. [6] .....	23
Figura 16: Medida directa de Presión. [11] .....	24
Figura 17: Medida por deformación de Material. [11].....	25
Figura 18: Boquilla convencional. [10].....	25
Figura 19: Conexión Sensores de presión Sick Sensor Intelligence. [Suministrado por Sick Sensor Intelligence]. .....	26
Figura 20: Valor de densidad de algunos plásticos [6].....	29
Figura 21: Tronzadora Precious Plastic. [14].....	30
Figura 22: Extrusora Precious Plastic. [15].....	30
Figura 23: Inyectora Precious Plastic. [16] .....	31
Figura 24: Prensadora Precious Plastic. [17] .....	31
Figura 25: Extrusora 3Devo. [18].....	32
Figura 26: Extrusora 3Devo. [20].....	32
Figura 27: Tronzadora 3Devo. [21].....	33
Figura 28: Extrusora Noztek Xcalibur. [23] .....	34
Figura 29: Extrusora Noztek Pro Filament Extruder. [24] .....	34
Figura 30: Extrusora Filaestruder. [26] .....	35
Figura 31: Recicladora con cortadora y compactadora HNT-V. [27].....	36
Figura 32: Recicladora SNT-V. [29].....	37
Figura 33: GigabotX. [30] .....	38
Figura 34: Pùlsar Pellet Extruder. [31] .....	39
Figura 35: Extrusora Mahor V4. [32] .....	39
Figura 36: Relación Esfuerzo y Velocidad de deformación. [34].....	42
Figura 37: Variación de Viscosidad. [34].....	42

Figura 38: Tipos de Fluidos en función de su comportamiento viscoso. [34].	43
Figura 39: Reómetro de Tubo capilar. [35]	44
Figura 40: Estructura básica de un viscosímetro rotacional de cilindros coaxiales. [36]	45
Figura 41: Sensor de Presión MDT467F-1/2-3,5C-25/46-SIL2. [Suministrada por Dynisco]	51
Figura 42: Diseño Inicial. Elaboración propia	53
Figura 43: Modificaciones de Mezclado. [6]	55
Figura 44: Tornillo Precious Plastic. [Suministrado por Precious Plastic]	56
Figura 45: Tornillo Pulsar Pellet Extruder. [Suministrado por Dyce Design]	57
Figura 46: Tornillo Mahor V4. [Suministrado por Mahor]	57
Figura 47: Husillo. Elaboración propia.	58
Figura 48: Barril Acanalado. [36]	59
Figura 49: Bloque de Calentamiento sin sensor. Elaboración propia.	60
Figura 50: Bloque de Calentamiento con sensor. Elaboración propia.	61
Figura 51: Bloques de calentamiento Pulsar. [31]	61
Figura 52: Bloque de calentamiento Ultimaker. [Suministrado por Ultimaker]	62
Figura 53: Barril Mahor. [Suministrado por Mahor]	62
Figura 54: Extrusor Gigabot X. Suministrado por Re3D.	62
Figura 55: Fijación con Tornillo. Elaboración Propia.	63
Figura 56: Fijación por Rosca. Elaboración propia.	64
Figura 57: Fijación Continua. Elaboración Propia.	65
Figura 58: Fijación con abertura. Elaboración propia.	66
Figura 59: Elementos de Aluminio a 300°C. Elaboración propia.	67
Figura 60: Esquema pérdidas de calor por conducción. Elaboración propia.	69
Figura 61: Esquema pérdidas de calor por convección. Elaboración propia.	70
Figura 62: Resistencias de cartucho cerámicas. [37]	72
Figura 63: Elemento de calentamiento con Sensor con Abertura. Elaboración propia.	73
Figura 64: Alargamiento del barril. Elaboración propia.	74
Figura 65: Boquilla estándar de 0.8 mm. Elaboración propia.	75
Figura 66: Barril. Elaboración propia	75
Figura 67: Acanalado Interior del barril. Elaboración propia.	76
Figura 68: Conexión Sensor de Presión. [CatSensors]	76
Figura 69: Conexión Sensor de Presión al proceso. Elaboración propia.	77
Figura 70: Ventilador EBMPAPST	77
Figura 71: Fijación de la tolva. Elaboración propia.	78
Figura 72: Rejilla de PLA. Elaboración propia.	78
Figura 73: Cuerpo de Alimentación. Elaboración propia.	78
Figura 74: Arandela y Placa de Unión barril-Alimentación. Elaboración propia.	79
Figura 75: Motor Beckhoff AG2250-+PLE40-M01-10. [38]	80



Figura 76: Unión Husillo-Reductor. Elaboración propia. ....	80
Figura 77: Unión Cuerpo-Reductor. Elaboración propia.....	81
Figura 78: Diseño final. Elaboración propia.....	82
Figura 79: Prototipo por impresión 3D. Elaboración propia. ....	83
Figura 80: Tarjeta ELM7211-9016. [39].....	84
Figura 81: Tarjeta EL2784. [40] .....	85
Figura 82: Tarjeta EL3214. [41] .....	85
Figura 83: Tarjeta IE3112. [42] .....	86
Figura 84: Viscosidad en Función de Par. Elaboración propia. ....	91
Figura 85: Viscosidad frente a Velocidad de Cizalla. Elaboración propia. ....	92
Figura 86: Calor de Generación Viscoso frente Velocidad de Cizalladura. Elaboración propia. ....	93
Figura 87: Caudal frente a Presión en el cabezal. Elaboración propia. ....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Índices de flujo típicos en distintos procesos. [7].....	51
Tabla 2: Distribución de temperatura ideal para cada plástico. [36] .....	67
Tabla 3: Elementos normalizados de tornillería. Elaboración Propia.....	86
Tabla 4: Materiales y su conductividad térmica. [41] .....	88
Tabla 5: Comparación Aluminio Puro y Nitruro de Aluminio. [37] [38] .....	89



## **2. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

El presente documento constituye la memoria del proyecto elaborado por Carlos González López; Estudiante en Grado de Tecnologías, durante el curso 2020/2021, en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid.

Se propone diseñar y desarrollar un extrusor de Pellets que sea capaz de operar con plásticos reciclados en una impresora 3D. Dicho material es suministrado a través de otras máquinas con el objetivo de conseguir una nueva vida útil para el plástico con el menor coste posible.

El resultado final constará de un motor con su determinado acople, un barril y un husillo que, junto con los elementos necesarios, tales como sensores y sistemas de calentamiento, cumplirán con la función de extrusora. Contará con un cuerpo central al que se podrá acoplar una tolva de alimentación y la fijación de la máquina.

En este documento se recoge el enunciado del proyecto y una descripción detallada del mismo, especificando aspectos técnicos y funcionales del producto final, así como una justificación para cada una de las soluciones implementadas.

## 2.2. CONTEXTO DEL PROYECTO

La extrusora propuesta es una máquina destinada al procesado de plásticos reciclados, pensada desde un primer momento con el objetivo de dar una nueva vida útil a los desechos generados por la sociedad actual.

Actualmente, el diseño eco-sostenible se establece como una necesidad imperante, tanto en los hogares cotidianos como en la industria. Esta necesidad es clave, dado que supone una búsqueda de la sostenibilidad y la persecución de la “huella cero” como parte intrínseca del producto, no un añadido. En este contexto, el presente proyecto, apuesta por la reutilización de materiales, concretamente el plástico.

Uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la sociedad actualmente y seguirá haciéndolo en un futuro, es precisamente este material. Constituye uno de los desperdicios más contaminantes y que cuenta con mayor tiempo de biodegradado. Todo esto es sumado al exponencial crecimiento de su producción en las últimas décadas [1].

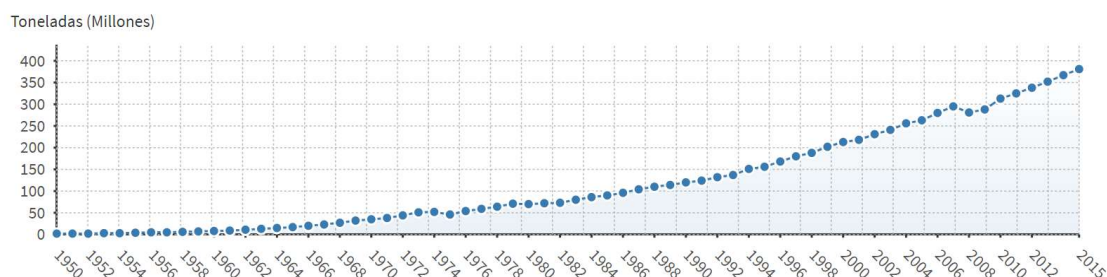


Figura 1: Producción mundial de plásticos. [1]

Cabe mencionar que el 79% de plástico desechado se encuentra en vertederos o en el ecosistema y que solamente el 12% se incinera, dejando un 9% para reciclaje [2]. Para dar aún más contexto, cada segundo más de 200 Kg de plástico acaban en mares y océanos [3].

España es uno de los países que más plástico demanda de la unión europea, pero en cambio, no existen muchas iniciativas que fomenten el reciclaje en esta industria. Por esos motivos queda a la cola de Europa en cantidad de Plástico Reciclado [4].

### 2.3. PARTE DE UN PROYECTO MAYOR

Este proyecto forma parte de un proyecto aún mayor, pensado para animar a reciclar a todo tipo de personas, independientemente de su edad u otros factores sociales. La idea principal es ofrecer una experiencia en la que, aportando los propios desechos plásticos cotidianos, el usuario pueda obtener un producto u objeto funcional listo para ser utilizado.

Hoy por hoy, el proyecto cuenta con una trituradora desarrollada en la Uva, la Spiker, la primera de la serie de máquinas del diagrama de flujo que tendrá que seguir el plástico que entre en el ciclo como se muestra en la *Figura 2*.

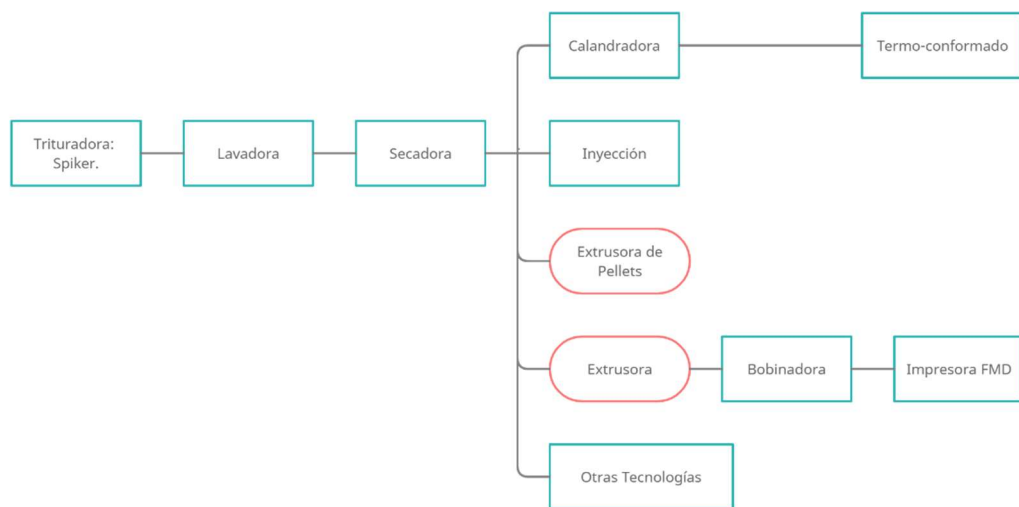


Figura 2:Diagrama de flujo para el reciclado de plásticos. Elaboración propia.

Como se puede observar, el plástico triturado que pase por la extrusora tendrá como objetivo último la impresión 3D del material, bien será en una Impresora FMD o en una de pellets, donde no se requiere bobinadora, puesto que es una impresión directa. Existen otras posibles formas de reciclado de plástico como una calandradora para posterior termo-conformado, moldeo por inyección, etc..

Debido a su ya existente estudio más profundo, la instrumentación y estudio de una Extrusora destinada a proporcionar filamento a una bobinadora no concierne a este proyecto. Por ello, resulta de mayor interés las Extrusoras de Pellets, puesto que su investigación y desarrollo no está tan extendido. Este tipo de máquinas están destinadas a una impresión directa del material con el fin de ahorro de pasos para el reciclado de plástico, desembocando en un ahorro de costes.

En resumen, se desarrollará un Extrusor capaz de alimentarse de Pellets de plástico triturado, siendo esta una creciente necesidad ante el gran desecho de plásticos de la sociedad moderna.

## 2.4. CONDICIONANTES Y LIMITACIONES

Una primera limitación que se presenta es el proceso previo al que se ha sometido el plástico. Es importante saber el rango de granza que se va a suministrar a la extrusora en la alimentación. Una definición de tamaño y material es vital para un correcto estudio.

La extrusora ha de ser de un tamaño pequeño, pues su uso está enfocado al de una impresora 3D de uso a pequeña escala, limitando la geometría de los componentes, significando en un aumento de coste de algunos de los sensores o del propio diseño mecánico de componentes.

Este hecho hace que la mayoría de sistemas de extrusión que son capaces de caracterizar el plástico que estás procesando sean de índole industrial, no llevando a cabo este sistema de control en extrusoras dedicadas a la impresión 3D, la cual hace que no se tenga en cuenta cómo variarán las propiedades del fluido con las distintas velocidades que presenta una impresora 3D.

Otra de las limitaciones es el hecho de que se va a pensar en soluciones a bajo costo. Es importante tener en cuenta la industria de la zona, lo que ofrecen y los distintos precios que ofrecen, así como los distintos materiales a los que pueden acceder.

A esto hay que sumar el hecho de que hay un gran vacío en el mercado de sensores y elementos adecuados para el tipo de extrusoras de las características con las que se quiere contar, siendo la mayoría de carácter industrial.

El estudio de fluidos No-Newtonianos es otra de las limitaciones más importantes, puesto que su estudio y comportamiento son de carácter complejo, por lo que se realizarán varias hipótesis.

Una vez ejecutado el proyecto se podrá verificar si dichas hipótesis se asemejan lo suficiente al modelo real o necesitan reconsiderarse.

Un último condicionante el proyecto ha sido la pandemia, que ha condicionado diferentes aspectos. Uno de ellos ha sido la comunicación con proveedores, pues no ha sido tan fluida como se esperaba.

### **3. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

El objetivo principal de este proyecto es el diseño y desarrollo de un extrusor de plástico reciclado para impresión 3D.

Se tomará de base el estado del arte y, posteriormente, se analizarán y estudiarán los conceptos primordiales para el correcto funcionamiento de una extrusora; además, se buscará una forma de parametrizar dichos conceptos y se buscarán los elementos necesarios para lograrlo.

También se verificarán los elementos que vayan a implementarse tal cual se encontraron en otras máquinas, para así asegurar que van a cumplir con las exigencias que demande este proyecto.

Una vez establecida la tesis general del proyecto se realizará un estudio de mercado y, basándose en el mismo, se combinarán los conocimientos obtenidos con el análisis paralelo del proceso de extrusión para dar solución al diseño final. Durante todo el desarrollo del proyecto se mantendrá contacto con los talleres y proveedores.

Asimismo, se realizará un modelo 3D, planos y toda la documentación necesaria para su adquisición y fabricación.

Finalmente se realizará un primer prototipo con el que se buscará verificar el diseño mecánico.

Adicionalmente, se adaptará el modelo a las limitaciones de la industria local y se obtendrá un presupuesto de fabricación.

Existen gran variedad de ensayos y pruebas que se podrán realizar con esta herramienta, por lo que la fabricación y posterior ensayo y obtención de datos se alejan del objetivo principal del proyecto.

La idea general del proyecto es el desarrollo de una herramienta capaz lograr un extruido de calidad para plásticos reciclados y, consecuentemente, un mejor entendimiento del proceso de extrusión para lograr la mejora de un ecosistema de reciclaje circular.

Este proyecto, basado en la reutilización de desechos plásticos para dotarles de una segunda vida útil, es una iniciativa que puede fomentar vehementemente la cultura de reciclado en todos los sectores de la sociedad.

Se considerarán los límites ya mencionados para acotar el proyecto y poder ejecutarlo satisfactoriamente.

## 4. ESTADO DE LA TÉCNICA

### 4.1. DEFINICIÓN DE EXTRUSORA

La definición de extrusora es simple; extruir es expulsar. El material es forzado a través de una abertura llamada dado de extrusión, obteniendo así el plástico la geometría de la abertura [5]. La función principal de un extrusor es proporcionar suficiente presión como para forzar el material. Dicha presión depende de la geometría de la abertura, así como de las propiedades del material y de la tasa de flujo o caudal. Podríamos asemejar el funcionamiento de una extrusora con el de una bomba [6].

### 4.2. TIPOS DE EXTRUSORAS

Existen tres tipos de extrusoras según la casuística usada para lograr la extrusión [6].

- Extrusoras Mono husillo: Constan de un solo tornillo de extrusión

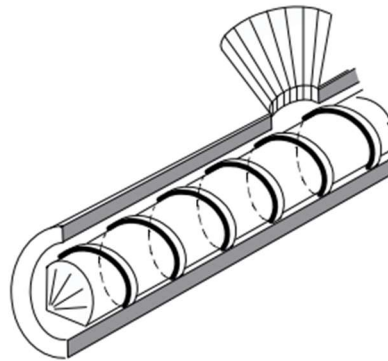


Figura 3: Extrusora Mono husillo. [6]

- Extrusoras de doble tornillo: El transporte de materia se logra a través de dos tornillos de extrusión

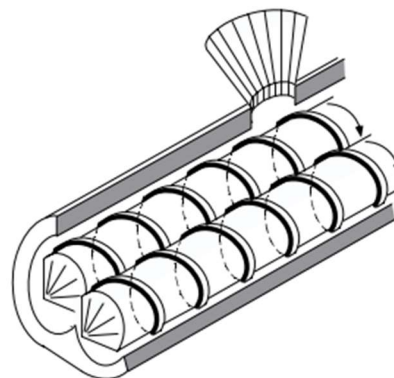


Figura 4: Extrusora Doble Husillo. [6]



- Extrusoras de RAM: El movimiento de la fuerza impulsora, el pistón, es unidireccional y cuenta con la misma dirección y sentido que el flujo de plástico fundido.

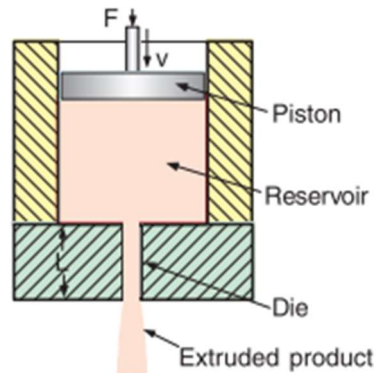


Figura 5: Extrusora RAM. [6]

### 4.3. COMPONENTES DE UNA EXTRUSORA

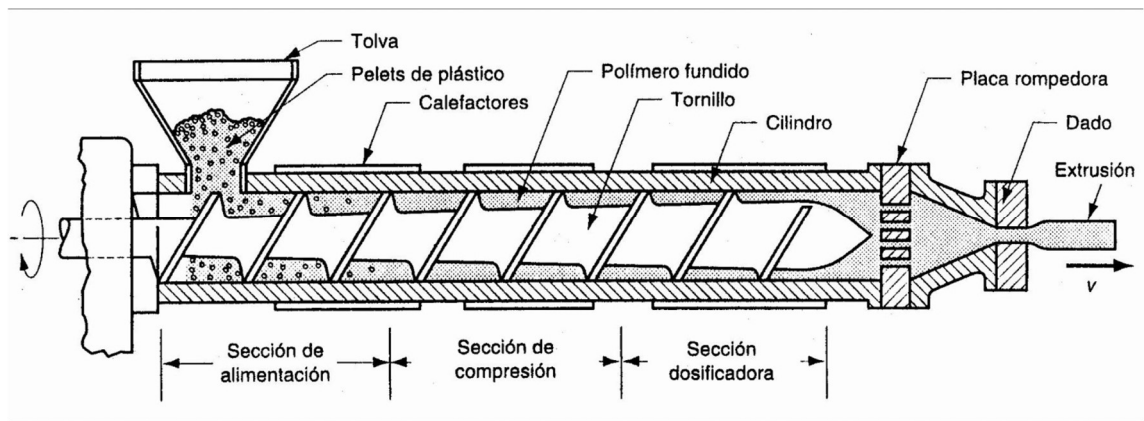


Figura 6: Componentes de una Extrusora. [6]

### 4.3.1. TORNILLO

El corazón de una extrusora es el tornillo o husillo. Esta importancia es debida a que el transporte, fundido y mezclado del plástico está mayoritariamente determinado por éste. La estabilidad y la calidad de un buen diseño dependen de un buen diseño del husillo [7].

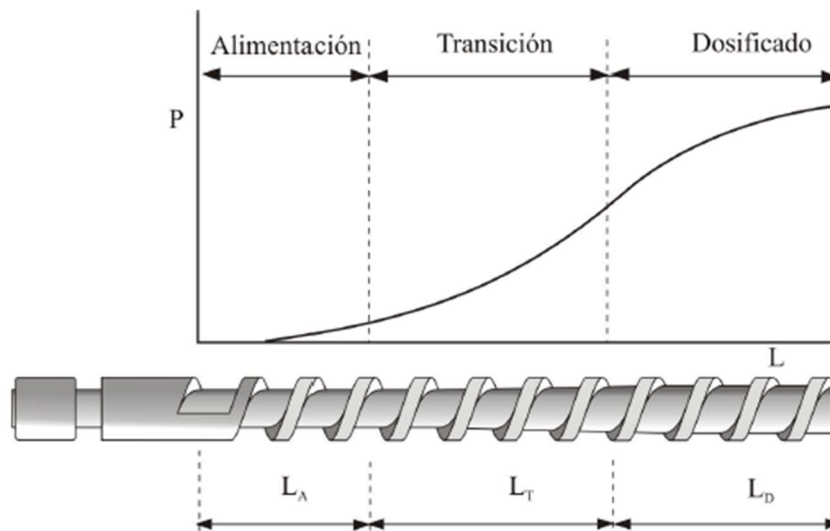


Figura 7: Secciones de un husillo. [7]

Como se puede observar en la *Figura 7*, existen zonas claramente diferenciadas a lo largo del husillo.

- Zona de Alimentación: Como indica su nombre es la zona donde se sitúa la entrada de pellets sólidos, por lo que cuenta con un diámetro reducido en comparación con el resto de la geometría del tornillo.
- Zona de Compresión: A medida que el plástico avanza por el canal del tornillo, éste se va fundiendo y la geometría del tornillo aumenta gradualmente hacia un diámetro más pequeño, forzando la fricción de los pellets sobre el barril exterior que rodea el tornillo.
- Zona de Dosificación: En esta zona el polímero está completamente fundido, por lo que es aquí donde se completa la mezcla y la zona que dota homogeneidad al producto final.

El tornillo debe de tener un acabado pulido para evitar la mayor fricción plástico-husillo. El mayor calor generado por el proceso se debe a la fricción entre barril y el plástico, el denominado Calor de generación viscoso, por lo que debemos reducir la fricción cualquier otro elemento con el que haga contacto directo el material plástico fundido [6].

Existen muchos tipos de husillos que, según conveniencia, se usarán en determinadas aplicaciones. Como su número es demasiado grande para un

estudio general, se van a mencionar los principales tipos que, además, podrán ser de utilidad para este proyecto [7]:

- Tornillo de uso general: Es el llamado tornillo estándar dentro de la industria.

Con su único vuelo lo convierte en un buen transportador de pellets sólidos. Esta gran utilidad se ve acompañada por que este tipo de tornillo dota al fundido de una mezcla uniforme, siendo capaz de mezclar la mayoría de los plásticos.

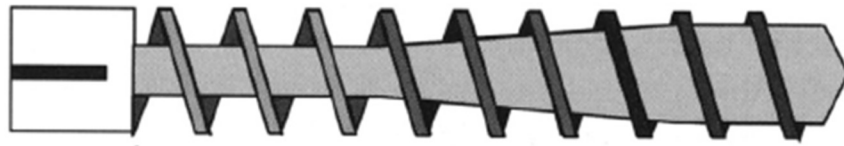


Figura 8: Tornillo Mono Husillo. [6]

Cuenta con varias limitaciones a destacar: El ratio de producción se limitado por que el tornillo funde más lentamente el polímetro que otros tipos de tornillos, además de que una alta velocidad de cizalladura producirá un alto calor viscoso.

- Tornillo de mezclado: Existen muchos diseños enfocados a lograr una mezcla adecuada para los diferentes plásticos existentes. Este tipo de tornillos se caracterizan por llevar incorporados un sección única para lograr los mejores resultados. Muchas empresas patentan este tipo de diseños, dependiendo del ratio de producción, el proceso y los materiales a procesar.

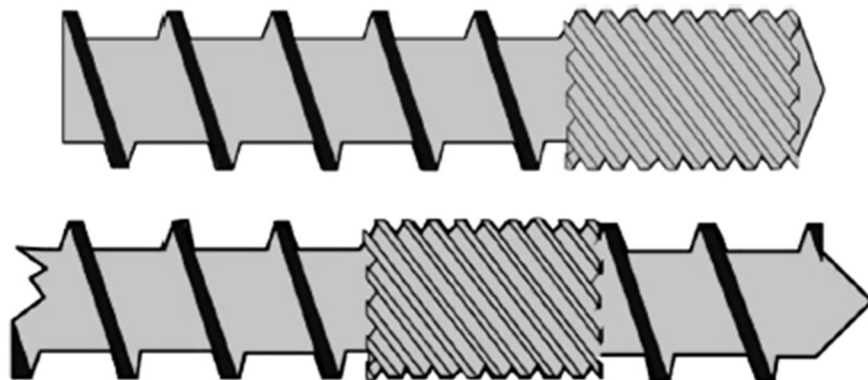


Figura 9: Tornillo de Mezclado. [6]

- Tornillo de Barrera: El tornillo de barrera es la innovación en cuanto a diseño de tornillos, se dice que en 10 años estos tornillos predominaran en la industria. Los tornillos de barrera difieren de los anteriormente nombrados al poseer un doble filete el cual forma un segundo canal, en este el material fundido es separado del sólido.

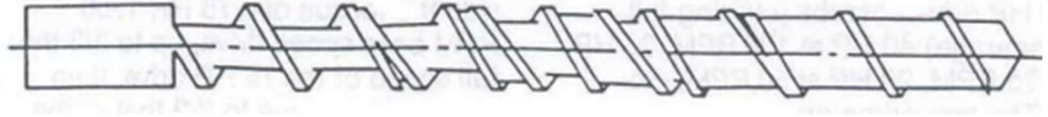


Figura 10: Tornillo de Barrera. [7]

- Tornillos de dos etapas: Este tipo de tornillos cuentan con dos secciones claramente diferenciadas. Se utilizan normalmente cuando se introducen materiales con contenidos altamente volátiles, por lo que es necesario la apertura de una sección a la atmósfera, la llamada abertura de venteo. Cuando se introduce una abertura de venteo se necesita que el material no se vea sometido a una gran presión, por lo que la sección del tornillo se ve disminuida.

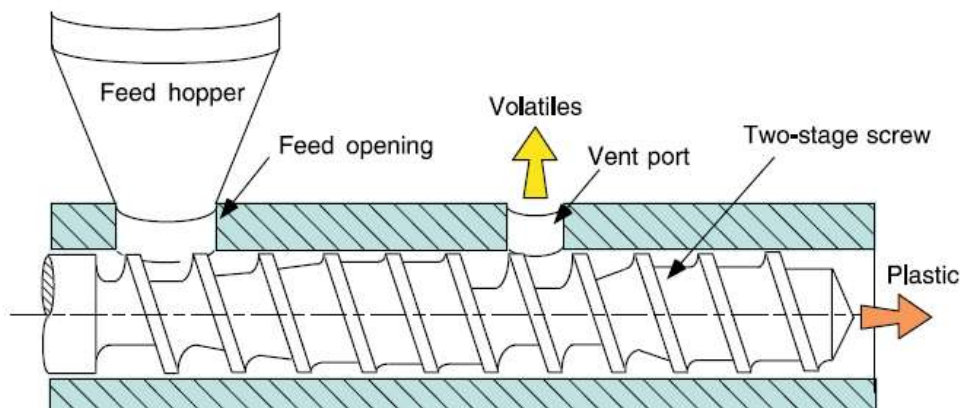


Figura 11: Extrusora con Venteo. [7]

- Otros tipos de tornillos:

Como se ha mencionado antes, existen más tipos de tornillos, incluso surgen nuevos tipos al introducirse en el diseño algunas de las características de otros. Realmente, cada tornillo tiene los elementos necesarios para lograr una extrusión adecuada para los materiales que se quieran extruir, llegando al caso de cambiar el husillo si éste no es adecuado para los plásticos a procesar.



Figura 12: Tornillo de dos etapas con Mezclador. [7]

Existen no solo una gran cantidad de tornillos, sino también de modelos matemáticos que los acompañan para justificar las diferentes secciones utilizadas. Dichos modelos matemáticos intentan modelar la fusión del polímero a lo largo del tornillo, donde se tienen en cuenta un gran número de propiedades geométricas, termodinámicas, así como de mecánica de fluidos.

#### 4.3.2. BARRIL O CAMISA

El cilindro externo, o barril, está equipado con un revestimiento ocasionalmente metálico, con alta resistencia al desgaste. Dicho material debe ser rugoso, para lograr la máxima fricción entre el plástico fundido y el barril, debido al calor de generación viscoso favorable que produce dicha fricción [6].

El barril, como se ha mencionado en el apartado anterior, puede tener una apertura para remover sustancias volátiles del proceso, alterándose así la geometría del tornillo; tornillos a dos pasos.

#### 4.3.3. TOLVA DE ALIMENTACIÓN

La tolva se conecta directamente al barril y ha de ser diseñada de tal manera que se logre una alimentación continua en el proceso. Existen varios tipos de tolvas para lograr esto: Vibratorias, Secadoras, etc.



Figura 13: Tolva de Secado Novatec. [8]

#### 4.3.4. CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO

El extrusor cuenta con un sistema de calentamiento y refrigeración para lograr una calidad de extrusión adecuada [6]. En este punto cabe destacar su elevada importancia a nivel de control como se verá más adelante en el apartado 3.6: Parámetros. La importancia de la temperatura de operación es clave para lograr una extrusión de calidad sin dañar las propiedades físicas del plástico.

#### 4.3.5. PLATO ROMPEDOR

Se sitúa al final del barril. Su geometría es la de un plato con cuantiosas pequeñas aberturas. Su función, junto a distintos filtros, es la eliminación de excedentes [6].

#### 4.3.6. DADO DE EXTRUSIÓN O BOQUILLA

La función del dado extrusor es simple; moldear el plástico en movimiento. Se pueden clasificar en función de la geometría, puesto que ésta determina la forma del material extruido [6].

#### 4.3.7. MOTOR Y REDUCTORA

El tornillo ha de estar conectado a un motor que le pueda suministrar el par y número de revoluciones por minuto necesarias para lograr una correcta extrusión. Este es el motivo por lo que la gran mayoría de extrusoras del mercado cuentan con una reductora acoplada entre el motor y el tornillo, puesto que el proceso requiere gran potencia mecánica [6].

### 4.4. PARÁMETROS

Distinguimos varios parámetros importantes que tienen lugar durante el proceso de extrusión [6]:

- Velocidad del tornillo
- Carga del motor
- Temperatura del barril
- Efecto de Corte
- Calor de generación viscoso
- Índice de fluidez.
- Presión de la mezcla

#### 4.4.1. PRESIÓN DE LA MEZCLA

A la hora de extruir plástico es importante el monitoreo de la presión por dos motivos:

- Control de proceso
- Seguridad

La presión a la salida determina el *output* de la extrusora, puesto que ha de vencer la resistencia del dado.

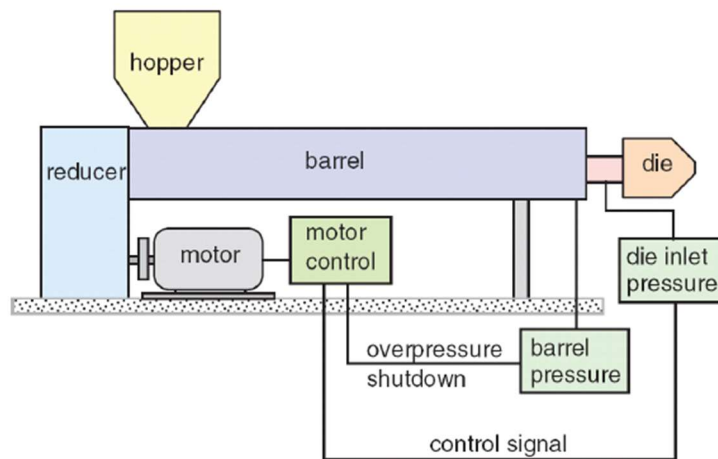


Figura 14: Control en lazo cerrado de presión. [6]

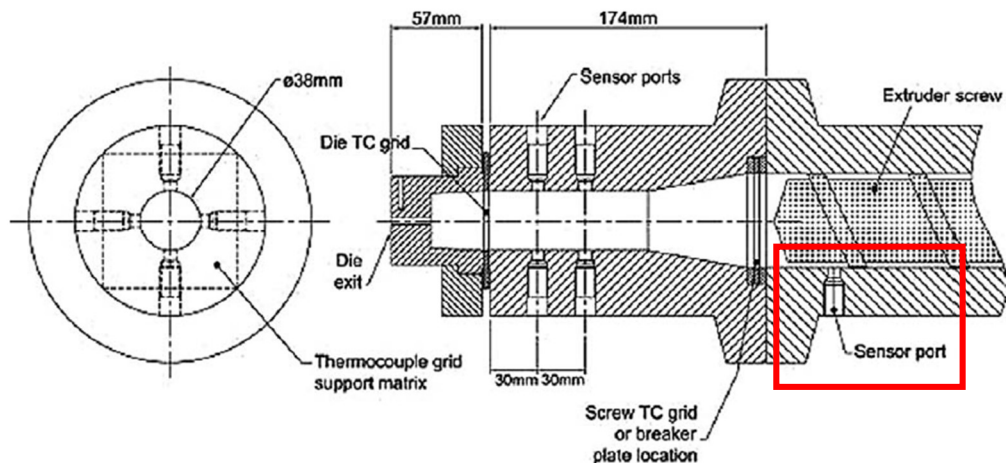


Figura 15: Localización Estándar de Sensores de Presión. [6]

Si la presión varía, variará proporcionalmente la geometría del material fundido. No nos vale con mostrar simples gráficas, pues esto no sería útil.

Transductores de presión – los más comunes en los sistemas de extrusión son los transductores de galgas extensiométricas junto con los transductores piezo-eléctricos.

Existen diferentes lugares y métodos de conexión de sensores o transductores de presión dependiendo de lo que se quiera medir y con cuanta exactitud. Se han considerado varios métodos de conexión [10]:

- Medida directa: La membrana rasante queda alineada con el fluido. Este modo nos asegura una exactitud de medida. Es el más común,

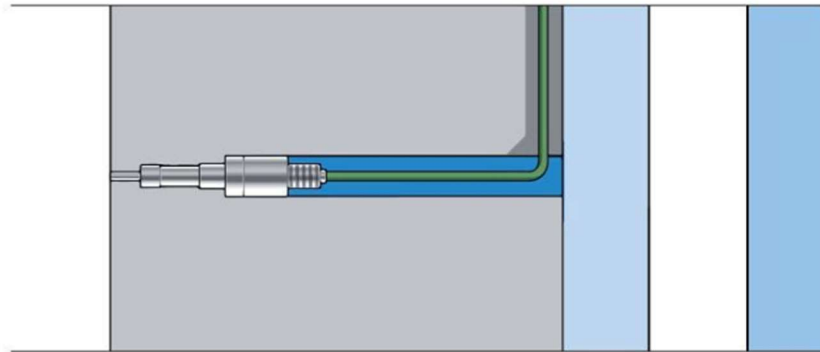


Figura 16: Medida directa de Presión. [11]

- Medida indirecta: Se utiliza una varilla de metal en contacto con el material del proceso, mientras que en el otro extremo se mide la deformación causada por dicha varilla con galgas extensiométricas para medir la presión. Ofrece una menor exactitud que la medida directa, pero es útil en situaciones en las cuales la geometría del proceso hace inviable un estudio directo.

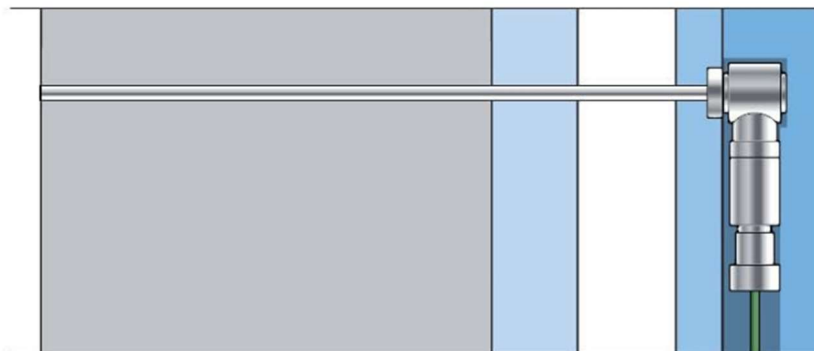


Figura 15: Medida Indirecta de Presión. [11]

- Medida por deformación de material: Utilizada cuando el material a estudio tiene unas propiedades perjudiciales para la medida directa de la presión. Ciertos fluidos corrosivos pueden dañar los sensores de presión, por lo que se recurre a esta alternativa, ofreciendo una exactitud suficiente para procesos en los que no exista dicha necesidad.



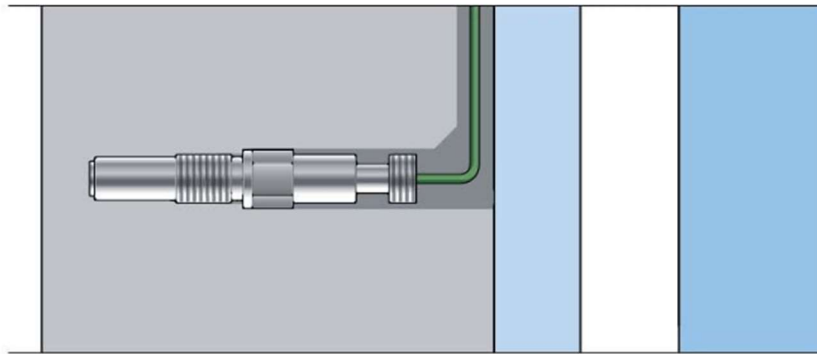


Figura 17: Medida por deformación de Material. [11]

Se necesita estudiar el lugar geométrico del proceso de extrusión donde nos interesará la medida de la presión. El fluido va aumentando su presión a medida que va avanzando a lo largo del barril, dotando así al fluido la capacidad de ser extruido en la boquilla, lugar donde se alcanza la presión máxima [10].

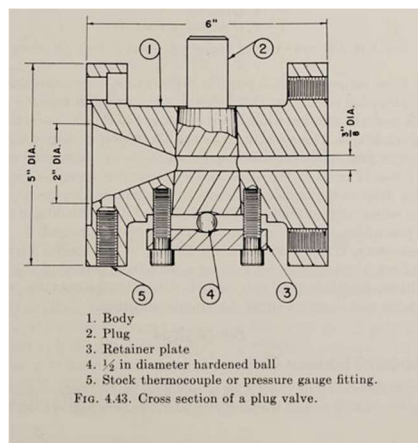


Figura 18: Boquilla convencional. [10]

En las extrusoras de índole industrial se observan distintos lugares de conexión de sensores de presión a lo largo del barril.



Figura 19: Conexión Sensores de presión Sick Sensor Intelligence. [Suministrado por Sick Sensor Intelligence].

Los sensores de presión siguen el estándar de conexión  $\frac{1}{2}$ -20UNF-2A, con una medida directa de la presión.

Como se ha mencionado antes, la medida de la presión ha de ser lo más cercana al final del proceso, aunque por falta de espacio hay casos en los que el estudio de presión se hace en lugares más alejados de la boquilla [10].

#### 4.4.2. TEMPERATURA

La temperatura está normalmente medida por termopares. Se forman por dos metales distintos con diferentes temperaturas y la diferencia de voltaje depende la diferencia de las dos temperaturas.

Otra opción son los RTD. Se basan en el cambio de resistencia de los materiales en función de su temperatura [6].

#### 4.4.3. ÍNDICE DE FLUIDEZ O *MELT FLOW INDEX* & EFECTO DE CORTE

El índice de fluidez se define como la cantidad de material en gramos que se extruyen en un período de tiempo determinada, normalmente 10 minutos. Podemos determinar que, con un MI alto, la viscosidad del plástico es baja, mientras que si el MI es bajo, la viscosidad es alta [6].

El ratio de corte es proporcional a la velocidad e inversamente proporcional a la altura del canal.

En los fluidos no newtonianos, como se verá en el apartado 5: Reología, la viscosidad cambia cuando el ratio de corte cambia. La viscosidad del plástico disminuye con el incremento del ratio de corte. Los resultados de este hecho se deben a que las moléculas del plástico son muy largas y enredadas. Esta enredación es directamente proporcional a la viscosidad.

Cuando el plástico es sometido a un ratio de corte alto, el índice de enredo entre las moléculas se reduce, y con él, la viscosidad. Esto se conoce como comportamiento pseudoplástico. El comportamiento es muy importante en los procesos de extrusión.

Si representamos la viscosidad frente al ratio de corte de manera log-log obtenemos una curva que se aproxima por la Expresión de la ley de energía.

Dicha expresión tiene dos importantes parámetros: Índice de consistencia y la expresión del Índice de energía.

El Índice de consistencia es el valor de la viscosidad a un ratio de corte de 1. La expresión del Índice de energía es la medida de la degradación del adelgazamiento por cizalla, que varía entre 0 y 1 en plásticos.

Cuando la expresión de la ley de energía es uno, la viscosidad no depende del ratio de corte, considerándose así Newtoniano.

El efecto de la temperatura en la Viscosidad. Cuando la temperatura aumenta, la viscosidad se reduce, aunque el efecto varía en algunos plásticos. En plásticos amorfos, la viscosidad disminuye de un 5 a un 20 % por cada grado que aumenta la temperatura. Para plásticos semi-cristalinos esto cambia de un 2 a 3 %. Esto nos condiciona a un mejor control de temperatura en plásticos amorfos que en semi-cristalinos.

#### 4.4.4. CALOR DE GENERACIÓN VISCOSO

Cuando el plástico fundido se corta, se genera calor en el plástico, este se le llama calor viscoso de generación. La cantidad se determina por el producto entre la viscosidad y el ratio de corte al cuadrado. Por lo tanto, a mayor viscosidad del plástico, mayor calor generado. Esto mismo pasa con el ratio de corte, sin embargo, tiene un efecto mayor debido a que está al cuadrado [6].

El mayor calor del plástico fundido se debe a la generación propia generada en el corte cuando el material es viscoso. Cuando se extruyen materiales muy viscosos, se necesita enfriar la máquina y no calentarla para mantener la temperatura de funcionamiento correcta.

#### 4.4.5. PROPIEDADES TÉRMICAS

Las propiedades térmicas del plástico son importantes para entender como de particular es el comportamiento de cada material en un extrusor. El conocimiento de dichas propiedades han de tenerse en cuenta para la selección de una maquina apropiada, seleccionar unas correctas condiciones de funcionamiento y análisis de los diferentes problemas del proceso.

Las propiedades más importantes son la conductividad térmica, el calor específico, la estabilidad térmica y tiempo de inducción, densidad, punto de fusión, y la temperatura de transición vítrea [6].

Propiedades más importantes:

- **Conductividad Térmica.** Probablemente la más importante del proceso. Es la propiedad que determina la habilidad del material de conducir calor. Los plásticos tienen una conductividad térmica baja, son considerados como aislantes térmicos.
- **Calor Específico y Entalpía.** El calor específico es la cantidad necesaria de calor para incrementar la temperatura de un material un grado. Este parámetro es comúnmente más alto en los materiales Semi-Cristalinos que en los amorfos, debido a su configuración de las moléculas. La cantidad de calor necesario para elevar un material de una temperatura de referencia hasta otra se conoce como entalpía. La entalpía se expresa en kWh/Kg. Es una energía específica, en otras palabras, energía partido masa.  
La mayor parte de la energía del proceso se utiliza para elevar la temperatura del plástico a la deseada. Si sabemos la temperatura de referencia, y la temperatura de descarga, podemos determinar la mínima energía requerida para el procesado del plástico.
- **Estabilidad térmica y Tiempo de Inducción.** Los plásticos se pueden degradar en los procesos de extrusión, las variables envueltas en la degradación son la temperatura y el tiempo de carga que el plástico se expone a altas temperaturas; a más temperatura, más rápido ocurre la degradación.  
Dicha degradación puede derivar en pérdidas de propiedades mecánicas, ópticas...  
El tiempo de inducción es la medida de la estabilidad térmica de un plástico; el tiempo de exposición a altas temperaturas que el plástico es capaz de aguantar antes de que empiece la pérdida de propiedades susodicha.  
Otro factor importante que influye en la degradación es la presencia de oxígeno.  
Este tiempo de inducción se puede medir a través de varios instrumentos como los TGA (Analizador Termogravimétrico), reómetro plato-cono, y otros.
- **Densidad.** Masa partido Volumen. La densidad en la mayoría de los plásticos ronda un valor equivalente al del agua de 1g/cm cúbico.

Plastic	Density [g/cm <sup>3</sup> ]
LDPE	0.92
HDPE	0.95
PVC	1.40
ABS	1.02
PP	0.91
Nylon-6	1.13
PETP	1.35
PS	1.06
FEP	2.15

Figura 20: Valor de densidad de algunos plásticos [6].

- **Punto de Fusión.** Es el punto donde los cristales se funden. No hay punto de fusión en plásticos amorfos, solo en semi-cristalinos. Normalmente los semi-cristalinos son procesados 50°C sobre el punto de fusión. Cuando el plástico cuenta con una gran viscosidad las temperaturas de procesado deben ser lo más altas posibles sin causar degradación en el plástico.
- **Temperatura de Transición Vítrea.** A bajas temperaturas los plásticos son rígidos, mientras que a altas temperaturas son dúctiles y flexibles, pudiendo cambiar su forma. El punto de cambio de una fase a otra se conoce como Temperatura de transición Vítrea. Si este punto se encuentra por encima de la temperatura de la sala, el plástico es duro y resistente a temperatura normal, como el Poliestireno.

## 4.5. ESTUDIO DE MERCADO

Actualmente en el mercado hay una falta de productos completamente desarrollados en el mundo del reciclado de plástico. A la hora de realizar el estudio de mercado, se ha centrado la búsqueda en diferentes empresas que tienen que ver de una manera u otra con el mundo del reciclaje de plástico.

### 4.5.1. PRECIOUS PLASTIC

Es una iniciativa de una empresa holandesa de carácter “open source” que se dedica a crear herramientas de reciclado de plástico en casa [12].

Solo con herramientas básicas, la empresa ofrece la posibilidad de reparar, construir y modificar diferentes máquinas [13]. Dichas máquinas las clasifican en versiones “básicas” y “pro”. Las máquinas que ofrecen son:

**Tronzadora:** Esta máquina se emplea para reducir trozos de plástico grandes en otros más pequeños. Esto facilitará su posterior lavado, secado, etc. El coste de los materiales (en Holanda) es de 1.100€ y pesa unos 150 kg. Emplea un motor de 2.2 kW, es alimentada a 400V y 16 A. El tamaño del plástico resultante puede ser modificado cambiando el tamiz [14]. Se puede observar en la *Figura 20* la tronzadora.



Figura 21: Tronzadora Precious Plastic. [14]

**Extrusora:** Esta máquina es denominada como de proceso continuo. Se introduce plástico granulado en la tolva, se calienta y se extruye con un husillo. De esta manera se obtiene filamento continuo, pudiéndose utilizar para impresión 3D, hacer plástico granulado, obtención de plástico para su posterior moldeo, etc. El coste ronda los 500€ y su peso es de unos 35 kg [9].

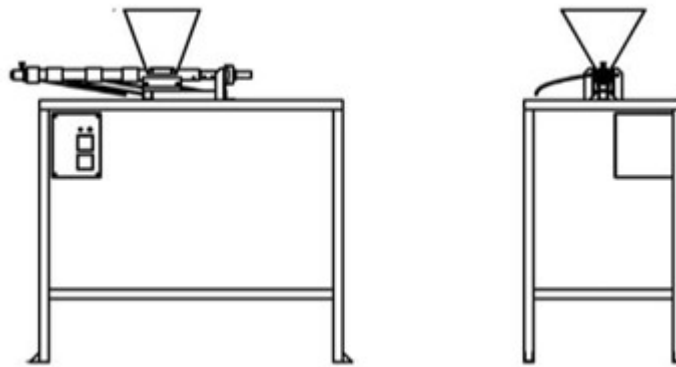


Figura 22: Extrusora Precious Plastic. [15]

Como se puede observar en la *Figura 21*, el diseño de esta máquina presenta un solo husillo, convirtiendo la máquina, a priori, en una perfecta combinación de simpleza y efectividad, aun que presenta importantes desventajas que se han de tomar en cuenta.

**Inyectora:** Con esta máquina, los residuos de plástico son calentados e inyectados en un molde, como se puede observar en la *Figura 22*. Su función principal es crear objetos pequeños, rápida y repetitivamente. Lo más costoso de este proceso será conseguir un molde con la geometría idónea para el plástico inyectado. El precio de adquisición de los materiales necesarios ronda los 300€ y su peso aproximado es 23 kg [16].

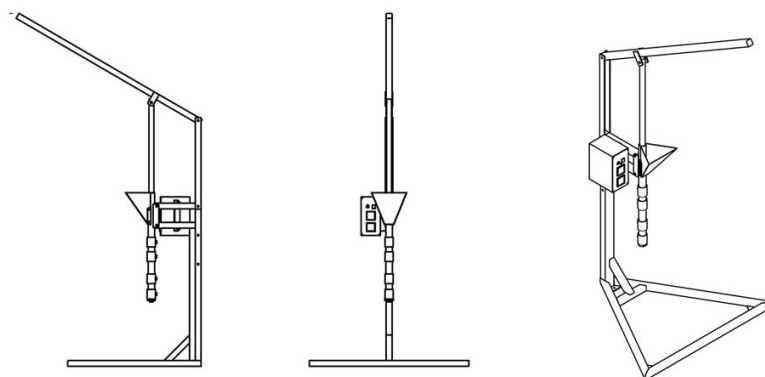


Figura 23: Inyectora Precious Plastic. [16]

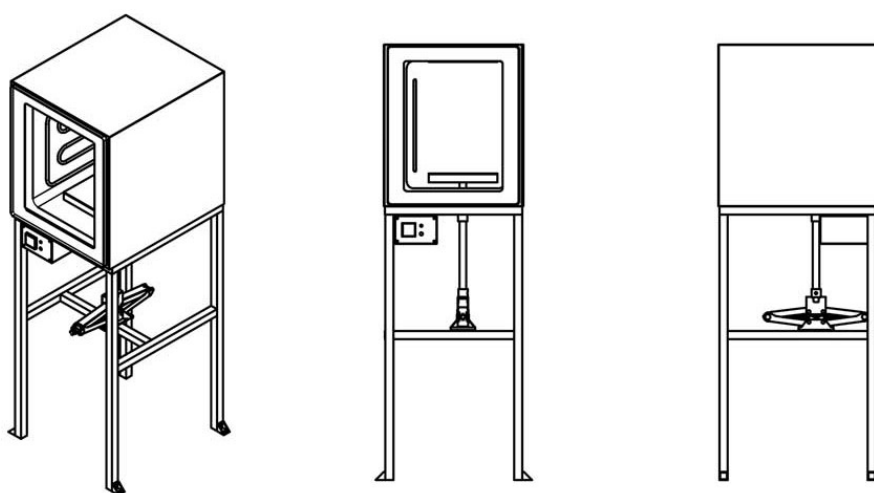


Figura 24: Prensadora Precious Plastic. [17]

**Prensadora:** Básicamente este componente es un horno con resistencias eléctricas, como se aprecia en la *Figura 23*. Se calienta el plástico y se presiona lentamente en un molde. Esta compresión la consiguen mediante un mecanismo al alcance de cualquiera, un gato de coche. El coste de la materia prima es de unos 350€ y su peso es 30 kg aproximadamente [17].

Todas las máquinas son fabricadas desde cero, para dar mayor accesibilidad, pero a su vez hace que estén en su forma más básica.

La versión “pro” de la Extrusora cuenta con mejoras sustanciales de control así como de producción.

#### 4.5.1.1. 3Devo

Esta empresa fabrica extrusoras de filamento, tronzadoras y máquinas de secado de plástico. Cuentan con una filosofía novedosa; conseguir una impresión 3D libre de residuos [18] [19].

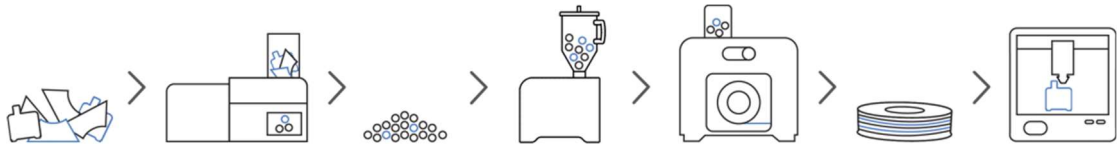


Figura 25: Extrusora 3Devo. [18]

**Extrusora:** Su enfoque está pensado para un nivel usuario. Es capaz de extruir una gran variedad de plásticos diferentes. La más barata cuesta 5350 €. Aunque su diseño es menos rudimentario que Filastruder, el precio es bastante alto para ser asequible por el público general [20]. Se puede observar la envergadura de la máquina en la *Figura 25*.



Figura 26: Extrusora 3Devo. [20]

**Tronzadora:** Shr3d it shredder. Recicla hasta 5.1 kg de plástico por hora. Diseño adaptado al usuario con posibilidad de cambiar los filtros. Se compone de un único eje que gira con las cuchillas para triturar el plástico [21].

Su precio es de 2975 €. Una vez más, el precio se ve comprometido por su diseño menos rudimentario.





Figura 27: Tronzadora 3Devo. [21]

#### 4.5.2. NOZTEK

Noztek es una empresa con sede en Reino Unido que ofrece, entre otros productos relacionados con plásticos, extrusoras. Se la conoce por sus altas prestaciones y una calidad que no deja indiferente, a demás que ofrece la posibilidad de tener un sistema completo de reciclado de plásticos, adaptando el precio, en la medida de lo posible, al usuario [22]. Su catálogo de extrusoras es muy reducido.

**Noztek Xcalibur:** Es la más alta gama de Noztek. Esta extrusora tiene unas características que se sitúan en un punto casi industrial, con un precio de 7995 Libras Esterlinas. Sus principales características son [23]:

- 3 zonas independientes de control de temperatura.
- Tornillo de Acero inoxidable de tres etapas, diseñado para generar presión.
- Motor de CC construido a mano. 35 Nm con una velocidad máxima de 35 rpm.
- Control de velocidad del motor y del ventilador.
- Velocidad de extrusión de 6-8 metros por minuto. 2Kg/h
- Tornillo de 39 cm y 5 mm de profundidad del canal.
- Gradiente de 130 mm a 200 mm
- Ángulo de hélice 22°
- Vuelo 22mm
- Arduino



**Noztek Pro Filament Extruder:** Extrusora de 995 Libras Esterlinas. Es la gama más baja de Noztek, no obstante, no deja de ser una extrusora semi industrial de altas especificaciones. Una de sus novedosas características es que puede operar horizontalmente o con un ángulo de hasta 45°, como se observa en la *Figura 28. [24]*



*Figura 29: Extrusora Noztek Pro Filament Extruder. [24]*

Sus características son:

- Temperatura de Extrusión 1-300 °C
- Diseño de tornillo a medida
- Opción de tornillo y barril de acero inoxidable disponible
- Tolerancias de filamentos 1.75mm (+ .04/ - .04)
- Dados de 1.75 y 3mm incluidas. Dados en bruto también disponibles.
- Soporte de 45°
- Extrudes at up to 2.5m per minute
- El diámetro del tornillo es de 14 mm de ancho, con un paso de 23 °, una profundidad de 5 mm y un ancho de canal de 5 mm y una longitud de 26 cm.

Hay dos extrusoras de gama media más que oferta Noztek, pero se van a omitir en este estudio pues las características son similares a la versión Pro Filament Extruder, con mejoras en la temperatura de extrusión, la cual la elevan hasta 600 °C.

### 4.5.3. FILAESTRUDER

Filastruder es una extrusora, que ronda los 299.99\$, de filamento para impresión 3D. Su tiempo de montaje es aproximadamente de 2 a 3 horas y solo se necesitan herramientas básicas [25]. Al igual que las extrusoras de Noztek, te da la opción de una boquilla sin perforar para que el cliente la mecanice con el diámetro desado. Por último, se pueden pigmentar los filamentos para dotarles de un color a conveniencia.

Recomiendan usar la boquilla de filtrado cuando se quieran conseguir diámetros inferiores a 5mm. Esta se puede comprar por separado. La función de esta boquilla es filtrar las inconsistencias del polímero. Incluye también un ventilador en la zona sellada donde se introduce el plástico [26].



Figura 30: Extrusora Filastruder. [26]

Posteriormente el filamento se puede enrollar en una bobina para darle el uso que se necesite.

Además, ofrece otras recomendaciones en el uso:

- i. Los trozos de plástico que se introduzcan en ella no pueden ser mayores de 5mm.

- ii. Recomiendan mezclar el plástico reciclado con plástico virgen ya que con cada recalentado el plástico pierde propiedades.
- iii. Antes de meter el plástico sugieren lavarlo y secarlo para prevenir posibles impurezas.

#### 4.5.4. POLYSTAR

Es una empresa que ofrece soluciones de reciclaje de plástico en un ámbito más general. Se puede adaptar a las diferentes necesidades del cliente dependiendo de la capacidad de producción, material, industrial, requerimientos de capacidad y las limitaciones del espacio [27]. Las máquinas que ofrecen son fáciles de instalar, operar y mantener.

#### Recicladora con cortadora y compactadora. Recicladora HNT-V



Figura 31: Recicladora con cortadora y compactadora HNT-V. [27]

Polystar ofrece diferentes modelos de este tipo de máquina. La productividad varía desde un mínimo de 80-140 kg/hora hasta 900-1200 kg/hora. El intervalo de diámetro de tornillo de la extrusora va de 65mm a 180mm. Este tipo de máquinas es capaz de reciclar una gran variedad de productos, como por ejemplo film de PLA, cuerdas de plástico, rollos de film de polietileno o polipropileno, bolsas de plástico, film de burbujas, etc. Los materiales que recicla son PEAD, PEBD, PELBD, PP, BOPP, EPS, PU, PC y ABS. Este puede venir en formas variadas como películas, bolsas, láminas, mallas, espumas, cintas, rafia, remolido, hojuelas, gránulos, scraps y bordes [28].

La máquina se compone de una parte donde se introduce el material, una zona de corte y compactado y una de desgasificación. Ya desgasificado el plástico, va a la zona de filtrado y de ahí a la de peletización. Se puede alimentar a través de una banda transportadora controlada automáticamente o bien alimentarse con rodillos de compresión. Existe la opción de alimentarlo de sendas maneras.

Si bien esta máquina es muy completa, se puede ver que es de carácter completamente industrial y no es el perfil buscado. El precio no está accesible de cara al público y hay que contactar con la empresa para obtenerlo. Aun así, se puede suponer que superará en gran cuantía al resto de las opciones vistas.

### **Máquina de reciclaje con triturador. Recicladora SNT-V.**

Esta máquina de reciclaje lleva incluida un triturador de un solo eje. También puede reciclar una gran cantidad de materiales como PEAD, PEBD, PELBD, PP, BOPP, EPS, PU, PC y ABS.

El diámetro del tornillo varía entre 65 y 165 mm. La productividad varía entre 100 kg y 1000 kg dependiendo del modelo de la máquina. [29]



*Figura 32: Recicladora SNT-V. [29]*

La alimentación se realiza una vez más a través de una banda transportadora y un alimentador de rodillos. El tipo de corte final es por peletizado de placa caliente (anillo de agua). Los componentes de máquina son: un molino de un solo eje, la banda transportadora, el compactador, la extrusora, la unidad de peletizado, la unidad de enfriamiento y la de secado de pellets. Además de esto posee un tanque de almacenamiento [29].

Al igual que la recicladora con cortadora y compactadora, es de carácter mucho más industrial a los que buscamos y el precio seguramente sea mucho más elevado.

#### 4.5.5. RE3D

Empresa Americana de carácter OpenSource. Cuenta con varios dispositivos entre los que se encuentra la novedosa extrusora GigabotX, que se alimenta directamente de Pellets a través de una tolva vertical de alimentación, para dar como resultado una de las impresoras 3D mejor valoradas actualmente en el mercado por su accesibilidad de precio y características. El precio total de la impresora ronda los 3000€.

En sus últimos ensayos, GigabotX se ha puesto a prueba con la mayoría de plásticos comunes reciclables, obteniendo excelentes resultados de impresión. [30]



Figura 33: GigabotX. [30]

#### 4.5.6. DYZE DESIGN: PULSAR PELLET EXTRUDER

Dyce Design es una empresa Canadiense que cuenta con una extrusora alimentada directamente de Pellets. Cuenta con una excelente velocidad de deposición de 2.5 Kg/h alimentada por un motor NEMA23. Cuenta con un sistema de control de temperatura muy utilizado en la industria; sensores PT100, llegando a temperaturas máximas de 500 °C, permitiendo la extrusión de cualquier plástico común. [31]

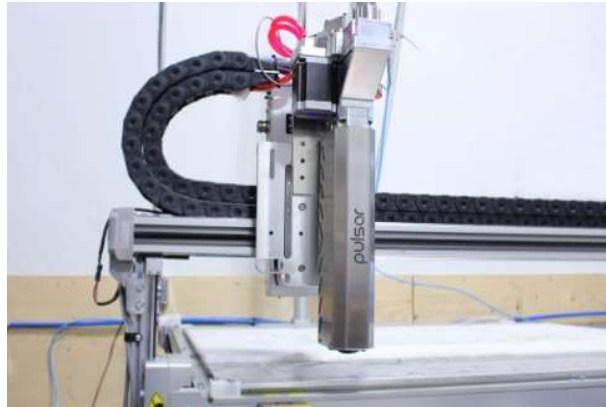


Figura 34: Pùlsar Pellet Extruder. [31]

#### 4.5.7. MAHOR

Empresa española centrada en el desarrollo de extrusoras para impresoras 3D. Cuenta con el novedoso y compacto diseño de su Pellet Extruder V4, como se aprecia en la *Figura 34* [32].



Figura 35: Extrusora Mahor V4. [32]

Su precio es de 575.04€ +IVA+Transporte, por lo que es una solución pequeña y económica.

Equipada con un motor NEMA17 de hasta 2.2 Nm de Par, junto con unas resistencias y ventiladores de alta calidad hacen de este extrusor una apuesta de calidad ante neófitos dentro del mundo de impresión 3D, pudiendo trabajar con la mayoría de plásticos. Cabe destacar que su alimentación es por medio

de Pellets, por lo que su precio por kilogramo de impresión se ve altamente reducido.

#### 4.5.8. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE MERCADO

Se concluye este apartado haciendo hincapié en el hecho de que existe un mercado exponencial en lo que se refiere a extrusoras. Actualmente, dominan las extrusoras industriales de grandes dimensiones, donde se encuentra el mayor control de proceso, siendo las extrusoras para impresoras 3D, tales como Pulsar o Mahor, objeto de mayor incertidumbre en cuanto a la calidad de extrusión. Estas últimas, además, están en pleno auge debido a la versatilidad que ofrecen y al hecho de que se alimentan por medio de Pellets para imprimir directamente, por lo que el ahorro para el usuario medio es sustancioso.

En el presente proyecto se diseñará una extrusora de este último tipo, marcando un precedente de calidad de extrusión de plásticos desechados para este tipo de máquinas.



## 5. PLÁSTICO COMO FLUIDO

### 5.1. DEFINICIÓN DE REOLOGÍA

Una paradoja reológica:

La miel podrá fluir a través del orificio de un embudo, mientras esto no ocurrirá con la mayonesa. Sin embargo, la mayonesa es mucho más fácil de esparcir sobre una rodaja de pan que la miel.

La reología se define como la rama de la física de medios continuos que dedica su estudio de la deformación y el fluir de la materia. Estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. Una de las principales metas es establecer ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los fluidos. Algunas de las propiedades reológicas más importantes son [33]:

- Viscosidad
- Coeficientes de esfuerzos normales
- Comportamiento viscoelástico lineal

### 5.2. VISCOSIDAD

Siendo la viscosidad uno de los elementos más importantes dentro del marco del estudio que se está trabajando, vamos a tratar de definirla [34].

Hay varias definiciones según los autores:

- Propiedad de transporte que cuantifica la conductividad de cantidad de movimiento a través de un medio continuo o fluido. Sinónimo de fricción interna o resistencia al flujo.
- Resistencia del fluido a fluir. Más concretamente, la viscosidad determina la velocidad de deformación del fluido cuando se le aplica un esfuerzo cortante dado.

Consideramos una partícula fluida sometida a un esfuerzo cortante de valor  $\tau$  en un plano. El ángulo  $\delta\theta$  de la deformación aumentará continuamente con el tiempo mientras siga cuando el esfuerzo cortante  $\tau$ , moviéndose la superficie superior con una velocidad  $\delta u$  mayor que la del inferior.

Los fluidos Newtonianos presentan una relación lineal entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de deformación resultante.

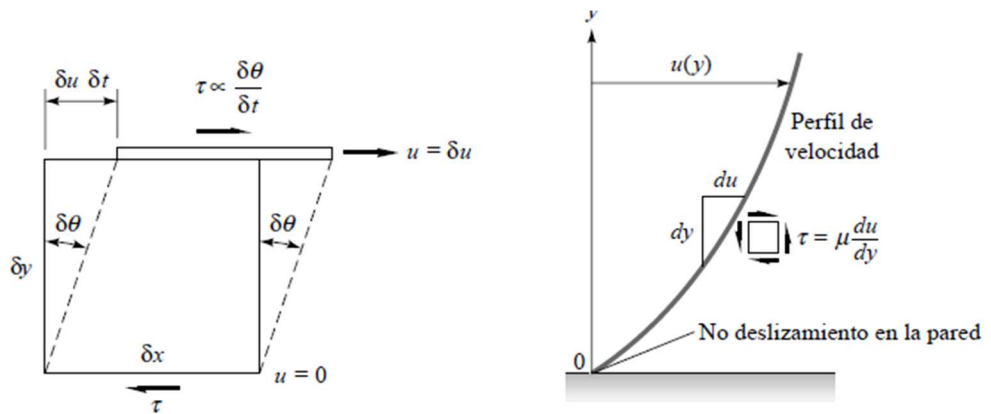


Figura 36: Relación Esfuerzo y Velocidad de deformación. [34]

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt}$$

El nombre Newtoniano debe su nombre a Sir Isaac Newton, quien propuso por primera vez esta ley en 1687.

La viscosidad de un fluido Newtoniano es una auténtica propiedad termodinámica y varía con la temperatura y la presión. La presión afecta débilmente a la viscosidad, mientras que la temperatura tiene un efecto mucho más fuerte.

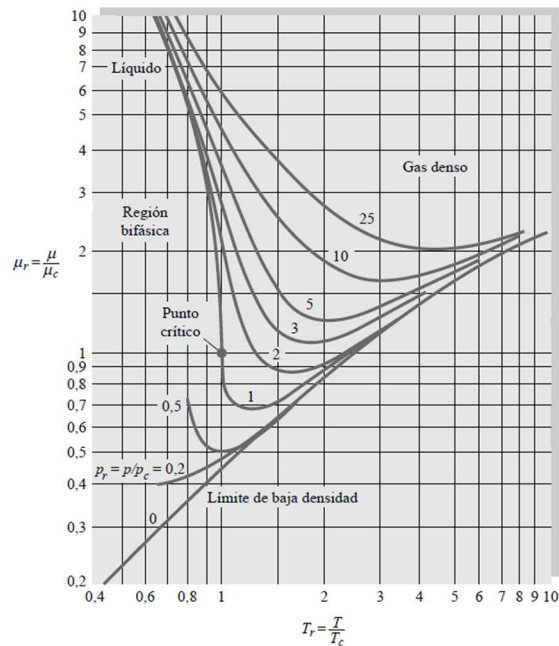


Figura 37: Variación de Viscosidad. [34]

## Fluidos No Newtonianos

Los fluidos que no siguen la ley anteriormente descrita se consideran fluidos No Newtonianos y se estudian en los libros de reología.

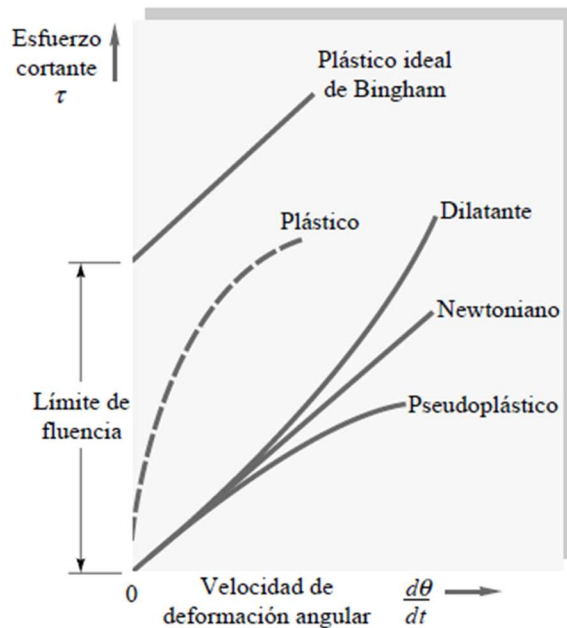


Figura 38: Tipos de Fluidos en función de su comportamiento viscoso. [34]

### 5.3. MEDIDA DE VISCOSIDAD

La forma más extendida de medir la Viscosidad y las distintas propiedades reológicas es a través de un Reómetro. Se van a estudiar los distintos tipos de Reómetros que existen [35]:

#### - REÓMETROS DE TUBO CAPILAR

El viscosímetro capilar es quizá el instrumento para la determinación de viscosidad más empleado, y también el más antiguo. En este tipo de viscosímetros un fluido es obligado a pasar a través de un tubo observándose una distribución de velocidades en el tubo de tipo parabólico, de forma que la porción del fluido que está en contacto con las paredes del capilar tiene una velocidad nula y la porción del fluido que se encuentra en el centro del tubo tiene una velocidad máxima [35].

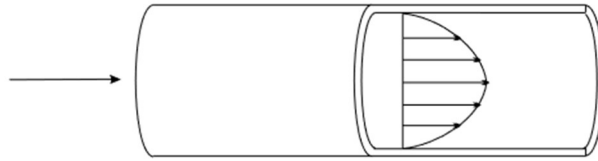


Figura 39: Reómetro de Tubo capilar. [35]

En este tipo de viscosímetros la viscosidad se mide a partir del flujo medio y la presión aplicada. La ecuación básica es la ecuación de Hagen-Poiseuille, donde  $\eta$  es la viscosidad del fluido,  $\Delta P$  es la caída de presión a lo largo del capilar,  $r$  es el radio del capilar,  $L$  la longitud del capilar y  $V$  el volumen de fluido que ha circulado en un tiempo  $t$ :

$$\eta = \frac{\Pi r^4 \Delta P t}{8 V L}$$

#### - REÓMETROS ROTACIONALES

Se basan en la resistencia a la torsión que ofrece un líquido al giro del husillo. Está acoplado con un muelle al eje de giro del motor, que gira a velocidades determinadas. El ángulo de desviación del eje se mide electrónicamente dando la medida de torsión [35].

Existen varios tipos de Reómetros rotacionales:

- Rotatorio

Se basan en el análisis de flujo constante en el espacio anular entre los cilindros largos, coaxiales. Para el caso en el que el cilindro interno sea el que rote y el externo sea fijo, la viscosidad aparente  $\eta$  puede ser relacionada con el esfuerzo de torsión requerido como siguen,

$$\eta = \frac{G}{2\pi L \Omega} \left( \frac{1}{R_1^2 - R_2^2} \right)$$

donde,  $R_1$ , es el radio externo del cilindro interno y  $R_2$  es el radio interno del cilindro externo (m),  $L$ : es la longitud mojada de los cilindros (m),  $\Omega$ , es la velocidad angular del cilindro interno (r.p.m) y  $G$ : es el módulo de rigidez del material.

Los reómetros rotatorios son convenientes para las medidas de viscosidad altas, y permiten los ajustes de la velocidad de cizalla de manera sencilla.

- Cilindro Coaxial Rotatorio (Couette)

Las fuerzas de adhesión a la superficie del cilindro exterior cuando un fluido es forzado a desplazarse entre dos cilindros concéntricos generan una fuerza de oposición al movimiento, requiriendo un par motor externo que venza dicha fuerza [36].

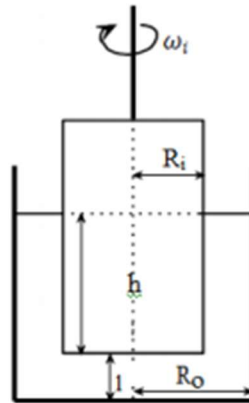


Figura 40: Estructura básica de un viscosímetro rotacional de cilindros coaxiales. [36]

De acuerdo a la Ley de Newton de la viscosidad [36]:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dy}$$

Donde:

$\mu$  = Viscosidad

$\tau$  = Esfuerzo cortante

$\frac{dv}{dy}$  = Gradiente de Velocidad

$F$  = Fuerza requerida para mover el fluido

$A$  = Área de contacto entre el fluido y la superficie.

Al aplicar un Momento exterior en el cilindro macizo interior se cumple la siguiente relación:

$$T = F \times r$$

$$T = \tau A \times r$$

$$T = \tau(2\pi r h)r$$

$$\tau = \frac{T}{2\pi h r^2}$$

Combinando la ecuación anterior con la Ley de Newton de la Viscosidad, además de cambiar las coordenadas  $dy = -dr$ , obtenemos:

$$dv = - \frac{T}{2\pi\mu h r^2} dr$$

Resolviendo la integral:

$$v_i - v_0 = \frac{T}{2\pi\mu h} \left( \frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_0} \right)$$

Donde:

$v_0 = 0$  Puesto que el cilindro Exterior permanece estacionario.

$v_i = \frac{2\pi N_i}{60} \times R_i$  donde  $N_i$  es el numero de rpm del cilindro interno.

$R_0 =$  Radio Exterior

$R_i =$  Radio interior

$$\mu = \frac{60T}{4\pi^2 N_i h} \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_i R_0} \right)$$

Esta ecuación será válida para todo caso en el que el esfuerzo sea proporcional al gradiente de velocidad.

La principal preocupación con el cilindro coaxial son los efectos finales. La ecuación se ha derivado sin considerar los efectos finales. Los efectos finales son las resistencias ofrecidas por resistencias externas. El Efecto final en la parte superior puede evitarse asegurándose de que la altura mojada no será superior a la altura del cilindro interior. Varios científicos han estado trabajando para determinar el final efecto [36].

- Cono y Placa

La característica común de un reómetro de cono y placa es que el líquido está cizallado entre una placa llana y un cono con un ángulo determinado. El sistema de cono-placa produce un flujo en el cual la velocidad de cizalla es casi completamente uniforme. Consideremos un líquido, el cual se sitúa en el espacio entre una placa y un cono con un ángulo  $\beta$ .

Típicamente, el ángulo del hueco,  $\beta$ , es muy pequeño ( $\leq 4^\circ$ ). El índice de cizalla del líquido depende del ángulo de dicho hueco,  $\beta$ , y la velocidad lineal de la placa. Si se asume que el cono es inmóvil y la placa rota con una velocidad angular constante de  $\Omega$ , la tensión de cizalla y la velocidad de cizalla se pueden calcular mediante el esfuerzo de torsión experimental medido,  $M$ , y las dimensiones geométricas [35].

$$\tau = \frac{3M}{2\pi R^3}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\beta}$$

- Magnetoreómetro

Siendo,  $F$ , la fuerza en la esfera (N),  $d$ , el diámetro de la esfera (m),  $U_1$ , la velocidad terminal del líquido (m/s) y  $\mu$ , la viscosidad del líquido (Pa-s) [35].

$$F = 3\pi d_e \mu U_1$$

La fuerza aquí puede ser la gravedad (peso) para los viscosímetros de caída de cuerpos aunque también puede ser una fuerza magnética como en este caso. La fuerza magnética se expresa como:

$$F_m = mX_m H \frac{dH}{dz}$$

La velocidad de cizalla puede ser ajustada con el uso del campo magnético. El magnetoreómetro presenta buenos resultados tanto para medidas de baja como alta viscosidad (Mattiscek y Sobczak, 1994). Comúnmente, esta técnica se limita a los fluidos de poca viscosidad.

- Reómetro magnético de esfera levitada

Es un tipo de reómetro desarrollado recientemente (Royer et. al., 2002). Se hace situar una esfera en una posición fija en el interior del líquido de prueba por obra de un campo magnético dentro de un recipiente preparado para alta presión. Moviéndose verticalmente el tubo cilíndrico en el que se encuentra la esfera, se genera un flujo de cizalla. La fuerza magnética que se necesita para mantener la posición de la esfera se relaciona con la viscosidad del líquido de prueba. La técnica requiere calibraciones especiales para medidas de viscosidad exactas [35].

$$\mu = \frac{K(I - I_0)}{U_p}$$

donde,  $I$  e  $I_0$ , son intensidades del campo magnético,  $K$ , constante especificada por la geometría del reómetro y la esfera y  $U_p$  es la velocidad del fluido en la pared del tubo.

- Reómetro de extrusión de plato deslizante

El reómetro de alta presión de extrusión con plato deslizante es un reómetro capilar de extrusión, pero con pequeñas modificaciones, es conveniente para las medidas de gran viscosidad tales como algunos polímeros fundidos. La viscosidad de un polímero fundido se calcula con las ecuaciones siguientes [35]:



Tensión de cizalla	$\tau_w = \left( \frac{-\Delta P}{L} \right) \frac{H}{2}$
Velocidad aparente de cizalla	$\dot{\gamma} = \left( \frac{6Q}{wH^2} \right)$
Viscosidad aparente	$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_{app}}$

Donde, L, es la longitud (m), W, la anchura (m), H, la altura,  $\Delta P$  la diferencia de presión (bar) y Q, el caudal volumétrico ( $mm^3 /h$ ).

El reómetro se utiliza para la medida de grandes viscosidades con control en la velocidad de cizalla y puede tener acceso a materiales con comportamientos no newtonianos. Sin embargo, no es conveniente para los sistemas que demuestran viscosidad baja.

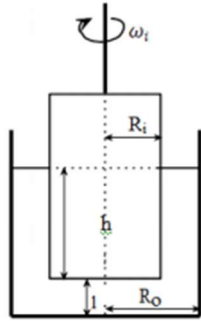
- Reómetro extensional o elongacional

El estrechamiento y posterior rotura de filamentos como consecuencia de una extensión ofrece una valiosa información acerca de las propiedades físicas del material [35].

## 6. MODELO DE CARACTERIZACIÓN DEL PLÁSTICO

### 6.1. VISCOSIDAD

Se realizará una aproximación del funcionamiento de una extrusora con un reómetro rotacional de cilindros coaxiales debido a la semejanza geométrica y de flujo entre ambos procesos como se ha visto en la *Figura 39*.



$$\mu = \frac{60T}{4\pi^2 N_i h} \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_i R_o} \right)$$

Los parámetros de Par y Velocidad del husillo se controlarán por medio de software, obteniendo los parámetros directamente del Motor acoplado, utilizando un servomotor.

La medida del radio Interior se aproximará a varias medidas del husillo para obtener la hipótesis más cercana a la realidad, haciendo las comprobaciones pertinentes.

### 6.2. PRESIÓN Y TEMPERATURA

El control de temperatura se realizará por medio de los Transductores de temperatura NTC100K. Dichos sensores controlarán unas resistencias de calentamiento junto con unos ventiladores para poder regular la temperatura del proceso.

El control de la presión es uno de los principales desafíos en este proyecto, debido a las limitaciones geométricas.

Se ha realizado un estudio de mercado de sensores de presión después de un estudio de la técnica. Se ha planteado el uso de un sensor de presión de membrana rasante preparado para la industria de Extrusión e Inyección de plástico. Se ha buscado la opción con la geometría más ajustada posible para una modificación del flujo de plástico lo menos intrusivo posible.

Se ha seleccionado un Transductor de presión MDT467F-1/2-3,5C-25/46-SIL2, con un rango de medida de 0-35 bar y una temperatura máxima de operación de 400°C. El motivo de elección no es más que por el reducido tamaño de la conexión al proceso, siendo de las más pequeñas vistas en el mercado y con temperatura y presión de operación factibles. Su precio se sitúa en torno a los 800€.

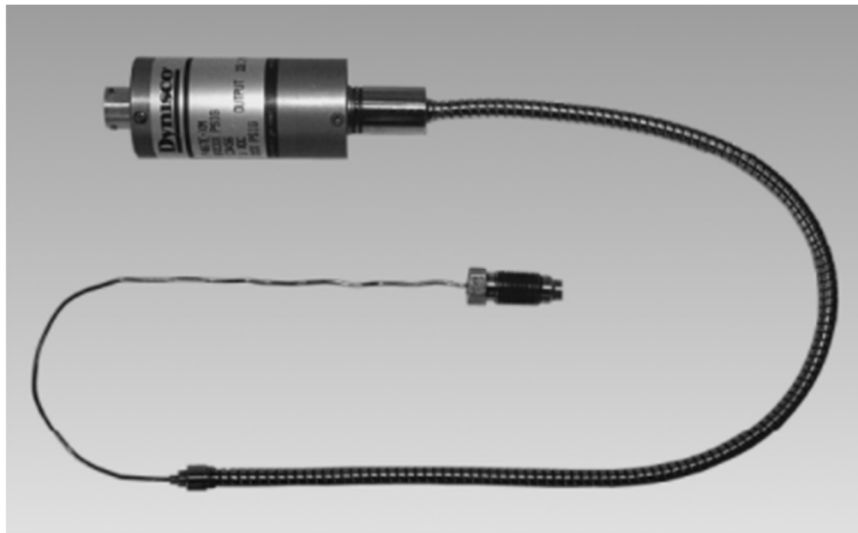


Figura 41: Sensor de Presión MDT467F-1/2-3,5C-25/46-SIL2. [Suministrada por Dynisco]

### 6.3. MELT FLOW INDEX O ÍNDICE DE FLUJO

El índice de Fluidez se define como el número de gramos extruidos en un intervalo de tiempo cerrado, generalmente 10 minutos [7].

Tabla 1: Índices de flujo típicos en distintos procesos. [7]

Proceso	Melt Flow recomendado (g/10min)
Moldeo por compresión, Calandrado y Extrusión	0.1 – 8
Inyección	5 – 100
Tubería	0.1 – 0.5
Película TWQ, Cast	7 – 11
BOPP	2 – 7
Extrusión de cintas	2 – 4
Blown Film	0.3 – 1.5
Calandrado	1.5 – 3
Multifilamento	8 – 35
Spunbond	25 – 35
Calculo de extrusión	20 – 25

Podemos determinar que con un MI alto, la viscosidad del plástico es baja, mientras que si el MI es bajo, la viscosidad es alta.

#### 6.4. VELOCIDAD DE CORTE

$$Q = k \frac{\Delta P}{\mu} = \frac{\pi R^4}{8L} \frac{\Delta P}{\mu}$$

$$k = \text{Factor mde Resistencia} = \frac{\pi R^4}{8L}$$

$$\Delta P = 2\tau \frac{L}{R}$$

$$\mu = \frac{\pi R^4}{8L} \frac{\Delta P}{Q}$$

$$\gamma = \frac{4Q}{\pi R^2}$$

$\gamma$  = Ratio de Corte ( $\frac{1}{s}$ )

$Q$  = Caudal volumétrico

$R$  = Radio del barril

#### 6.5. CALOR DE GENERACIÓN VISCOSO

Por lo tanto, a mayor viscosidad del plástico, mayor calor generado. Esto mismo pasa con el ratio de corte, sin embargo, tiene un efecto mayor debido a que está al cuadrado.

El mayor calor del plástico fundido se debe a la generación propia generada en el corte cuando el material es viscoso. Cuando se extruyen materiales muy viscosos, se necesita enfriar la máquina y no calentarla para mantener la temperatura de funcionamiento correcta [7].

$$\text{Calor Viscoso} = \mu \dot{\gamma}^2$$

Cuando el plástico fundido se corta, se genera calor en el plástico, este se le llama calor viscoso de generación.

## 7. DISEÑO MECÁNICO

Una vez realizado el estudio de mercado y el estado del arte, se necesitará un estudio de los componentes y las tecnologías usadas por distintas empresas para elaborar el diseño del extrusor.

Se concibe un diseño inicial, como esquema a seguir a la hora de ver los elementos necesarios para lograr el proceso de extrusión, en el que destacan sus componentes principales:

- Conjunto Barril+Husillo
- Alimentación
- Cpnjunto Motor+Reductor
- Elementos de control

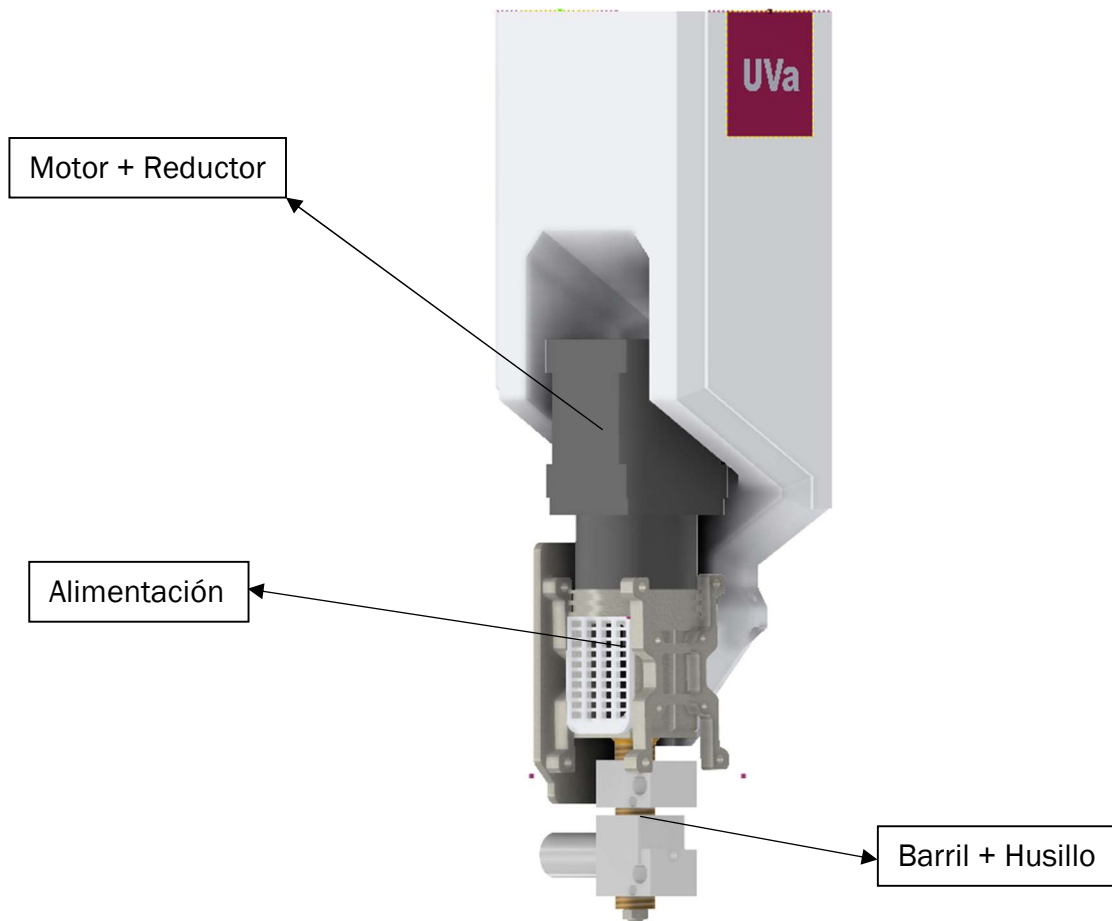


Figura 42: Diseño Inicial. Elaboración propia

## 7.1. BARRIL Y HUSILLO

### 7.1.1. OPCIONES DE DISEÑO DEL TORNILLO

Se ha determinado una geometría del tornillo basándonos en extrusoras de plástico de una índole similar a la del presente proyecto [31][32].

El tornillo tiene 3 zonas características. Cada zona cumple una función y sus requerimientos son diferentes para cada zona [6][7][36].

#### - Zona de Alimentación

La zona de alimentación es especialmente importante ya que afecta a la velocidad de alimentación y por lo tanto, puede controlar la producción.

Cuando un material se alimenta a la tolva, es atrapado por el tornillo y empujado a través del cilindro, donde se plastifica lo suficiente para continuar su viaje hasta la boquilla. El calor se genera por fricción cuando el tornillo gira y el plástico roza con las superficies del cilindro y tornillos; El calor de generación viscoso.

En esta zona, los filetes son muy pronunciados con el objeto de transportar una gran cantidad de material al interior del extrusor, aceptando el material sin fundir y aire que está atrapado en el material sólido. Esta zona también se conoce como zona de transporte, las partículas alimentadas siguen trayectorias rectas y paralelas al eje del tornillo.

Se definen los requisitos de esta zona:

- ❖ Bajo coeficiente de fricción polímero – tornillo
- ❖ Alto coeficiente de fricción polímero – barril.
- ❖ Canal profundo.

#### - Zona de Compresión o Transición

En esta zona, la profundidad del canal decrece. Esta zona tiene diferentes funciones y se la conoce como zona de compresión o transición. El plástico se comprime y se calienta hasta su punto de fusión.

Se expulsa el aire atrapado entre los gránulos originales; seguido de una mejora de transferencia de calor desde las paredes del barril calentando con forma el material se vuelve menos espeso; posteriormente, se da el cambio de densidad que ocurre durante la fusión.

Se definen los requisitos de esta zona:

- ❖ La profundidad del tornillo decrece gradualmente para lograr la compactación.
- ❖ Se expulsa el aire atrapado entre los gránulos.

- Zona de Dosificación

Una vez más se encuentra una profundidad de husillo constante y la profundidad del canal es mínima. Mediante la reducción de área se hace el efecto de una bomba, con lo que el material es obligado a salir de manera constante y sin turbulencia.

Su función es la de homogeneizar el material fundido y con ello suministrar a la región de la boquilla material de calidad homogénea a temperatura y presión constantes.

Se definen los requisitos de esta zona:

- ❖ Ejercer presión sobre el material para dosificarlo en la boquilla.
- ❖ Garantizar que el material salga de la extrusora de manera homogénea. (Misma temperatura, presión, etc.)

En la zona de dosificación del extrusor se presenta el flujo laminar, esto provoca que a veces no se haga una buena mezcla y puedan quedar pellets en un estado sólido. Esto da como resultado que el plástico no sea uniforme, las propiedades no sean las deseadas y en caso de utilizar un color, que este no sea homogéneo en todo el producto. La solución que han presentado los diferentes fabricantes de husillos es, desarrollar en la zona de dosificación dispositivos para mejorar el mezclado. Se adaptan a los extrusores modificaciones para evitar el estancamiento del material y mejorar el mezclado. Dichas modificaciones provocan que el material fluya hacia atrás a través de las roscas ranuradas, esto aumenta el tiempo de residencia y proporciona una mejor homogeneización del material, además de una disminución de los esfuerzos contantes, evitando la degradación.

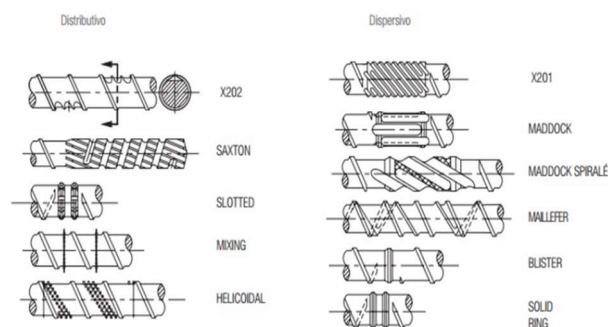


Figura 43: Modificaciones de Mezclado. [6]

El diámetro del tornillo es la dimensión que influye directamente con la capacidad de producción de la máquina. Generalmente crece en función de la longitud del equipo. A diámetros mayores, la capacidad en Kg/h es presumiblemente superior. Comercialmente las relaciones L/D más comunes van desde 16:1 a 31:1.

Se han estudiado las soluciones propuestas por otros fabricantes:

✓ Precious Plástico

Es una extrusora destinada al bobinado de filamento, por lo que las dimensiones no se acercan al presente proyecto, no obstante, podemos obtener información acerca de las tecnologías empleadas por dicha empresa.

Cuenta con un tornillo de Acero 1.8509 (38MoAIA), de longitud de 790 mm de los cuales la parte útil es de 600 mm. Su diámetro nominal es de 30 mm por lo que su relación L/D es de 20, relación de vital importancia como se vio en el apartado 4.3.1: Tornillo.

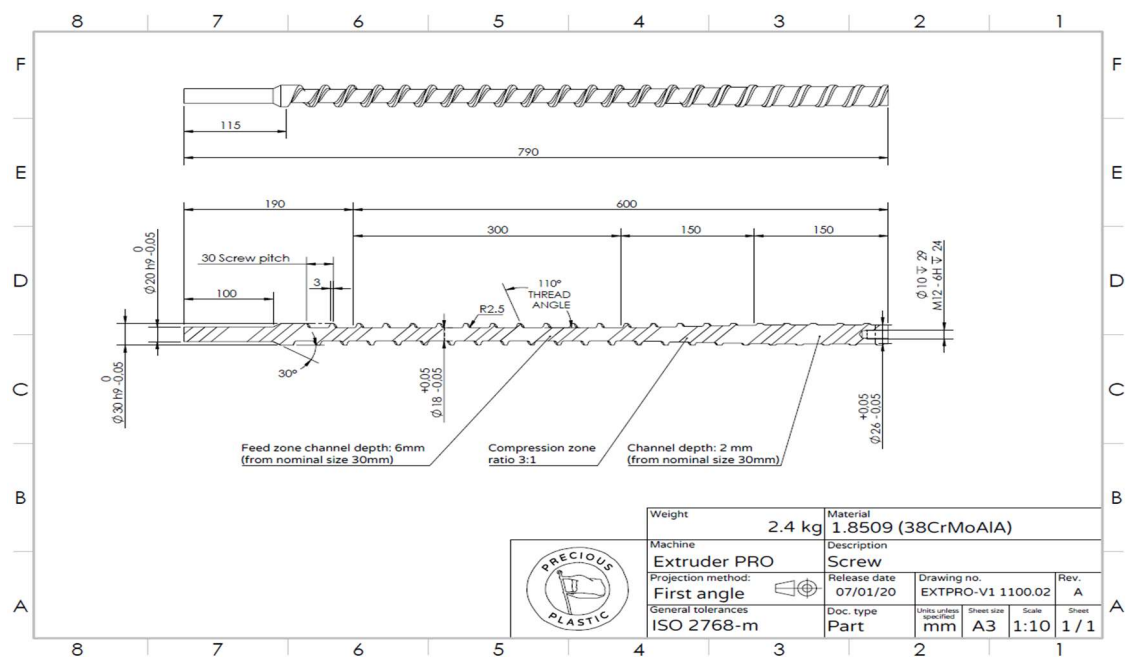


Figura 44: Tornillo Precious Plastic. [Suministrado por Precious Plastic]

El tornillo es de tipo barrera, el cual mejora el transporte del flujo, discriminando entre sólido y fluido. Al llevar a cabo dicha discriminación, se requerirá un menor par motor y se logrará una mejor homogeneización de la mezcla.

Son tornillos especiales difíciles de encontrar a un buen precio dentro del mercado, pudiendo llegar a costar un 200% más que un tornillo simple de las mismas dimensiones.



✓ Dyce Design: Pulsar Pellet Extruder

Pulsar Pellet Extruder es un extrusor de características cercanas al objetivo de este proyecto, por lo que el estudio de la tecnología adoptada por Dyce Design es realmente interesante.

El tornillo de extrusión tiene una longitud de 90 mm, siendo de estos útiles 75mm. Es un tornillo de tipo simple con un diámetro nominal de 5.6, obteniendo una relación de  $L/D= 16$ .



*Figura 45: Tornillo Pulsar Pellet Extruder. [Suministrado por Dyce Design]*

✓ Mahor V4

Al igual que Pulsar Pellet Extruder, el extrusor de la empresa española Mahor, es un extrusor para impresoras 3D que parte de plásticos reciclados.

Su tornillo es de tipo simple aun emplea una de las modificaciones de mezclado vistas en la *Figura 41*, la X202, que consiste en un ranurado en el canal principal para mejorar la homogeneización y transporte de la mezcla.

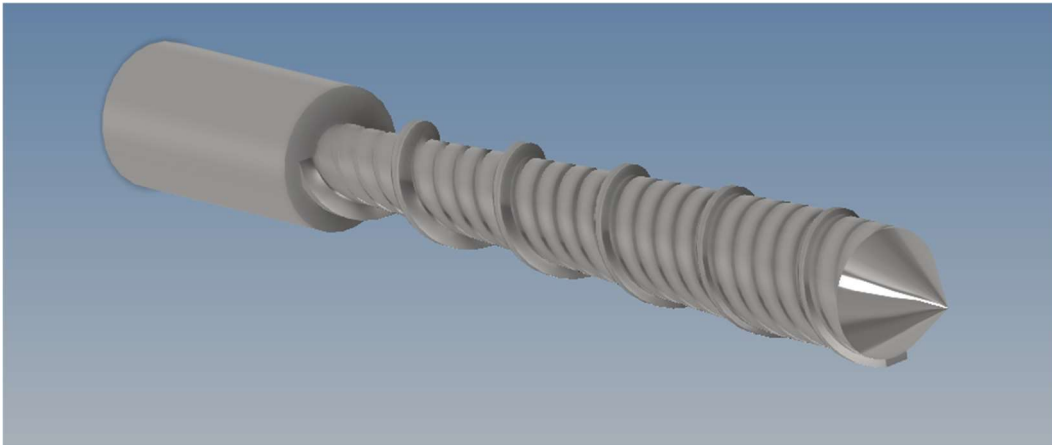
El tornillo consta de un diámetro de 8 mm junto con una longitud de 80 mm, de los cuales solo 50mm serán útiles. El diámetro interior será de 4 mm en la zona de alimentación, aumentando hasta los 7.2 mm en la zona de dosificación.



*Figura 46: Tornillo Mahor V4. [Suministrado por Mahor]*

### 7.1.2. DISEÑO DEL TORNILLO

El tornillo será, en primera instancia, un tornillo estándar o simple, elegido así por su amplia versatilidad a la hora de trabajar con diferentes plásticos, así como de su buen índice de transporte, como se habló detenidamente en el apartado 4.3.1 Tornillo.



*Figura 47: Husillo. Elaboración propia.*

El tornillo cuenta con una zona ancha no útil en la que se realizará el acople al motor reductor a través de dos tornillos prisioneros, técnica de acople bastante utilizada por extrusoras de esta índole.

Además, contará con canales dentro del canal principal para lograr un mejor transporte del sólido a lo largo del tornillo.

El ancho del canal principal es de 6 mm, por lo que podrá operar con graza triturada de hasta 6mm de dimensión.

A la hora del diseño del diseño se ha dado prioridad al aumento progresivo del diámetro interior para lograr una extrusión lo más uniforme posible, basándose en los principales diseños de tornillos de extrusión del mercado.

Los canales interiores, siguiendo la geometría de mezclador X202, se han colocado para lograr un mejor transporte del plástico fundido a lo largo del husillo [6], así como una mejor homogeneización del producto que mejorará el extruido de plásticos reciclados.

### 7.1.3. OPCIONES DE DISEÑO DEL BARRIL Y BLOQUES DE CALENTAMIENTO.

A la hora del diseño del barril debemos tener en cuenta factores como los bloques de calentamiento que vamos a usar, se llevará a cabo el diseño en paralelo de todos los elementos que deban ir conectados al barril. Además, la geometría se ve limitada por la fijación del barril con la alimentación.

El barril básicamente es un cilindro de gran espesor, para que pueda soportar las presiones generadas en su interior por el husillo y el plástico... Se encarga de transmitir el calor de las resistencias al polímero [36].

Los barriles o cañones, como también se les llama, de aleaciones de acero nitrurado se utilizan para los plásticos considerados suaves (PE, PP, PET, PS, Acetatos) y medios (ABS, PVC, SAN, PC, PA, Acrílicos, poliésteres).

Si el plástico es severo (resinas de hasta 30% de fibra de vidrio, cargas y aditivos), se emplean cañones bimetálicos estándares xaloy 101.

Los cañones bimetálicos premium, xaloy 800 son utilizados para plásticos críticos (Fluoropolímeros, fenólicos, resinas con hasta 30% de vidrio, cargas y rellenos).

En el diseño de todo cilindro de extrusión se busca:

- ✓ Máxima durabilidad
- ✓ Alta transferencia de calor
- ✓ Mínimo cambio dimensional con la temperatura.

Actualmente se construyen cilindros con una relación de L/D en torno a 20 y 24. Los barriles se diseñan para soportar  $700 \text{ kg/cm}^2$  de presión y resistentes a efectos térmicos para aguantar las temperaturas de hasta  $400^\circ\text{C}$ .

Para lograr mejores resultados se diseñan cilindros con zonas acanaladas, promoviendo la dispersión de aglomerados y la finalización de la fusión. Los cañones con zonas acanaladas en la etapa de alimentación suelen ser utilizadas para favorecer el procesamiento de resinas de bajo coeficiente de fricción. Dichas ranuras provocan que el plástico sólido le sea más difícil avanzar a través de la camisa a la misma velocidad que el tornillo, por lo que se favorece el calentamiento de estos.



Figura 48: Barril Acanalado. [36]

Al barril se le acoplarán dos elementos de calentamiento, conocidos como “Heating block”, que serán los encargados de calentar uniformemente el largo del barril mientras que, además, se encargan de lograr la sujeción de los elementos de control tales como los sensores de temperatura PT100.

Se proponen dos opciones para el acople del sensor de presión.

a. Unión del Sensor a un Bloque de calentamiento.

Ventajas:

Distribución del calor a la altura del cañón deseada por el usuario.

Presión medida al final del tornillo; Presión máxima

Bloque de calentamiento más grande; más calor de conducción al barril.

Desventajas.

Bloque de calentamiento más grande; más pérdidas convectivas de calor.

Cabezal del sensor a alta temperatura.

Fijación del bloque de calentamiento; Dificultad de fijación a la altura deseada.

Uno de los principales problemas que se encuentran al decantarse por esta opción es la fijación del elemento al que se acopla el sensor de presión, puesto que se realizará una abertura al barril por donde encajará el sensor.

Se plantea la geometría mínima necesaria para garantizar las necesidades de los dos elementos.

El primero de estos elementos estará en contacto con el barril a lo largo de  $527 \text{ mm}^2$  de área de contacto. Al tratarse de un elemento de aluminio de geometría tan pequeña, se asume que su resistencia al calor es prácticamente despreciable, por lo que todo el área de contacto se situará a la temperatura de la resistencia en un régimen estacionario de transferencia de calor.

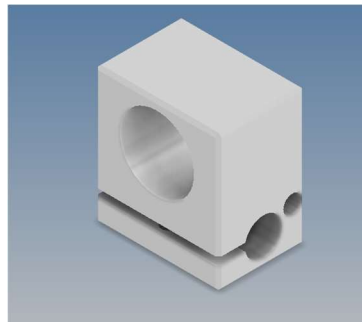


Figura 49: Bloque de Calentamiento sin sensor. Elaboración propia.

El segundo elemento de calentamiento se ha propuesto con un área de contacto más amplia, en concreto  $773 \text{ mm}^2$ , debido a que el acople del sensor de presión ha resultado ser un problema debido al espacio tan limitado con el que se cuenta. Se medirá la presión en el momento en el que el flujo entre a la boquilla de salida, aguas abajo del tornillo de extrusión. Teniendo en cuenta el estándar de conexión de sensores de presión, junto con los planos suministrados por Dynisco se ha diseñado una entrada del sensor con una rosca  $\frac{1}{2}$  - 20UNF-2A.



Figura 50: Bloque de Calentamiento con sensor. Elaboración propia.

Para asegurar la posición de altura deseada, junto con un óptimo acople del sensor de presión, se ha estudiado cual es el estado del arte en otros extrusores ofertados en el mercado.

- Tornillo Pasante: Ceality: Fijación al elemento más cercano por un tornillo.
- Continuo: Dyce Design: Pulsar Pellet Extruder.



Figura 51: Bloques de calentamiento Pulsar. [31]

En Dyce Design aseguran la distribución uniforme del calor por medio de láminas de aluminio distribuidas a lo largo del barril.

- Roscado: Mahor, Ultimaker

Tanto Mahor como Ultimaker utilizan un barril roscado para la fijación de los elementos de calentamiento.



Figura 52: Bloque de calentamiento Ultimaker. [Suministrado por Ultimaker]



Figura 53: Barril Mahor. [Suministrado por Mahor]

- Abertura: Re3D

GigabotX emplea una fijación a través de un tornillo pasante a través de una abertura para su fijación.

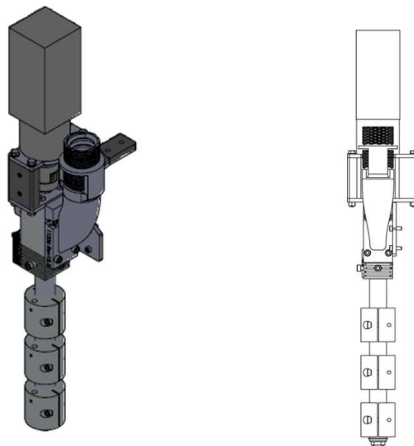
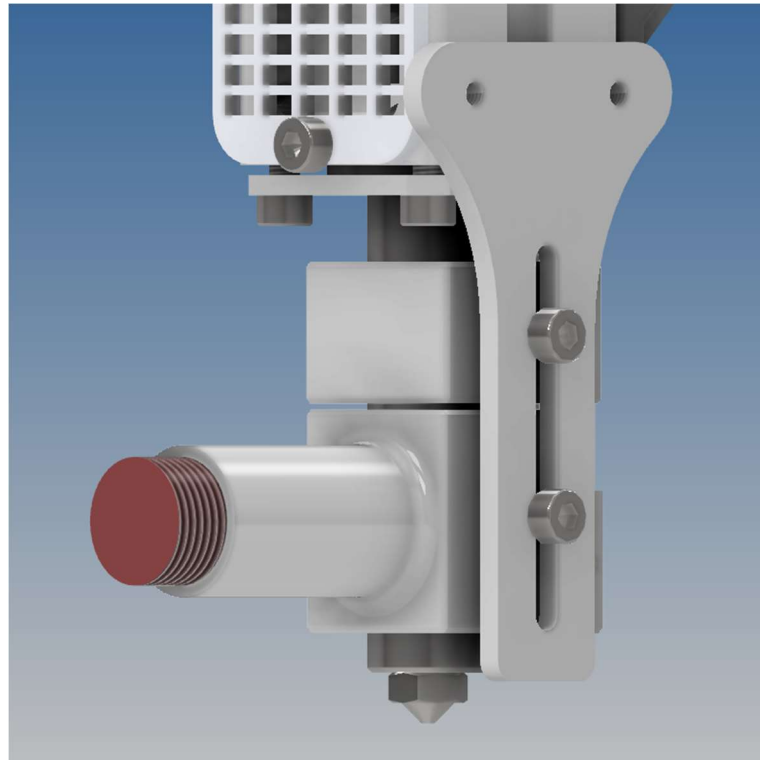


Figura 54: Extrusor Gigabot X. Suministrado por Re3D.

- Tornillo

Realmente la propuesta de Creality, adoptada por la mayoría de empresas que desarrollan extrusores de pequeñas dimensiones para impresoras 3D, no es aplicable a este proyecto, por que se usa únicamente cuando hay un solo bloque de calentamiento. Sin embargo, se plantea una solución similar adaptada; El uso de un elemento de sujeción externo.



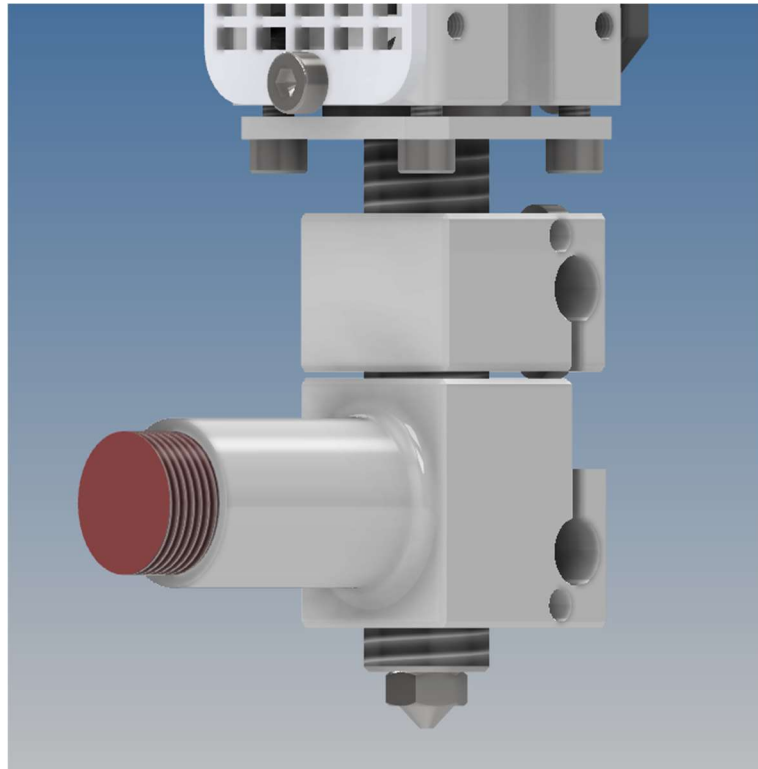
*Figura 55: Fijación con Tornillo. Elaboración Propia.*

Las ventajas son claras; Simpleza de fabricación y montaje y, por lo tanto, precio.

Las desventajas del uso de este método de fijación son: una mayor pérdida de calor por conducción en la sujeción, a la par que la conexión indirecta de los dos bloques de calentamiento, por lo que uno puede verse influenciado por el otro. Además, se requiere más espacio y puntos de apoyo para mantenerlo en su sitio.

- Roscado

Tanto Mahor como Ultimaker utilizan un acople por roscado de los elementos de calentamiento al barril. Esto es una solución sencilla a priori, el área de contacto entre bloque - barril es prácticamente máxima y la fijación es absoluta. Además, el coste de fabricación es bajo, puesto que el roscar el cilindro se podrá llevar a cabo fácilmente en taller.



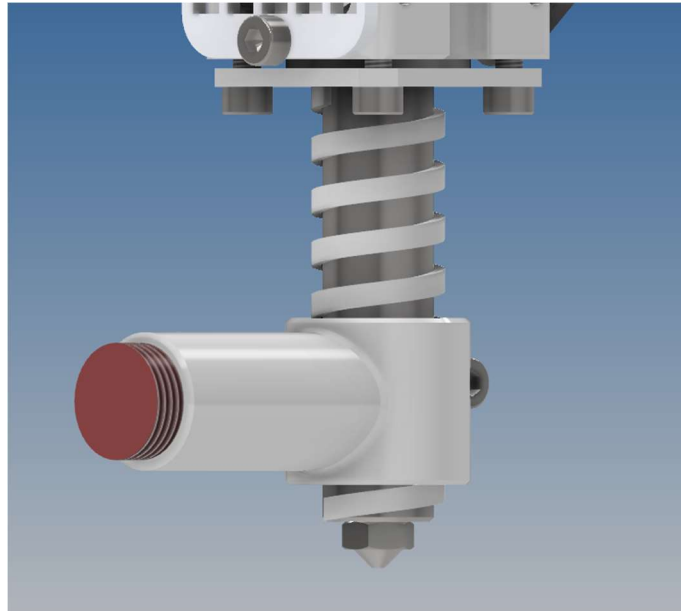
*Figura 56: Fijación por Rosca. Elaboración propia.*

La principal desventaja reside en el alineamiento de los ejes de la abertura del barril con sensor de presión. El hecho de utilizar una rosca implicaría usar una de paso muy fino y aún así no se podría asegurar la correcta alineación.



- Continuo

El método de calentamiento del barril que utiliza Dyce Design para su extrusor Pulsar es uno de los más novedosos, totalmente adaptable a la altura deseada, otorgando, además, uniformidad en la distribución de calor en todo el barril.



*Figura 57: Fijación Continua. Elaboración Propia.*

Si bien esto se ve como la solución más factible, realmente presenta un problema de aplicación en nuestro proyecto; el diseño de dichos elementos flexibles y adaptables es propia de Dyce Design, por lo que la compra no es una opción, en cambio habrá que mandarlo a fabricar a taller, buscando un material adecuado para el uso. Dicha fabricación elevaría los costes de fabricación de la máquina.

No solo esa es la única desventaja, igualmente se deberá conectar un elemento de fijación para el sensor de presión, por lo que aumentará aún más el precio de fabricación.

- Abertura

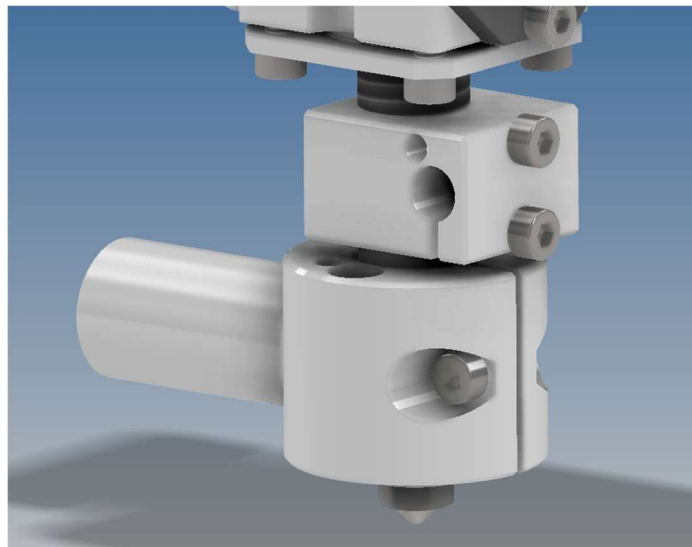
Re3D utiliza bloques de calentamiento cilíndricos con una abertura en ellos, siendo cerrada posteriormente por un tornillo pasante.

Las ventajas de su uso son claras, así como sus desventajas.

Se puede adaptar en altura a conveniencia fácilmente, por lo que el montaje y fabricación son sencillos, abaratando costes. Se asegura el alineamiento del sensor con la abertura del barril.

En contra partida, el reparto de calor no es uniforme, perdiéndose en la abertura calor de conducción al barril y aumentando el calor necesario neto que se deberá suministrar al bloque de calentamiento.

Como el principal problema de conexión de altura se encuentra en el elemento de transmisión con acople del sensor de presión, solo se modificaría la geometría en éste último, fijando el bloque sin sensor con otro de los métodos vistos.



*Figura 58: Fijación con abertura. Elaboración propia.*

Con el fin de establecer un criterio de elección, entre otros, se realizará un balance de energía a los elementos de aluminio en función del material y de las diferentes soluciones mecánicas propuestas.

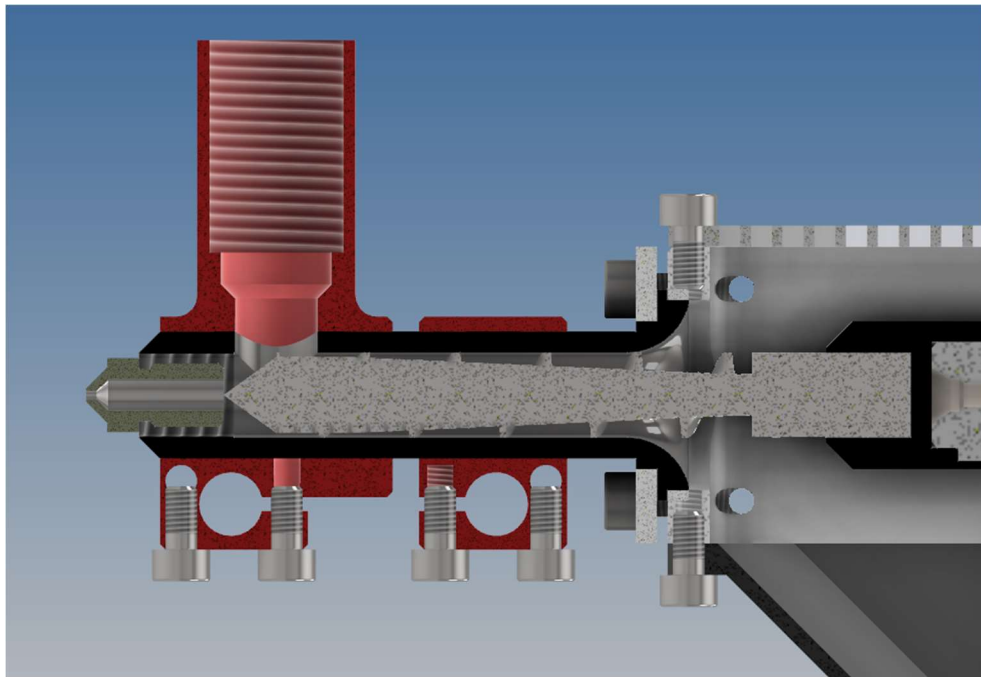


Figura 59: Elementos de Aluminio a 300°C. Elaboración propia.

Se ha decidido usar dos zonas de temperatura puesto que el flujo de extrusión variará con estas temperaturas, necesitando un control por separado para marcar la temperatura de las diferentes zonas del proceso.

Tabla 2: Distribución de temperatura ideal para cada plástico. [36]

MATERIAL	Relación de compresión del husillo	Zona de alimentación (°C)	Zona de transición (°C)	Zona de dosificación (°C)	Zona de dado (°C)
ABS	2.75:1	204	219	227	238
Nylon 6	3.9:1	216	238	249	260
LDPE	3.5:1	171	180	185	191
LLDPE		149	163	185	210
HDPE	3:1	171	193	204	204
PP	3:1	190	210	221	221
PS	3:1	177	204	227	232
PVC Flexible	2.5:1	130	171	181	181
PVC rígido	2.5:1	149	160	171	181
PC	2.25:1	266	277	288	293

Al ponerse en marcha las resistencias, como se ha mencionado, todo el elemento de aluminio se calentará a una temperatura similar, por lo que calentará el barril a conveniencia del usuario de una manera distribuida y uniforme a lo largo de la superficie de contacto. La superficie en contacto con el aire generará pérdidas de calor por convección, mientras que la superficie de contacto con el barril, por conducción directa, será realmente la energía útil.

Por ende, el balance de energía en un volumen de control fijo que se disponga alrededor de la superficie de los elementos de aluminio:

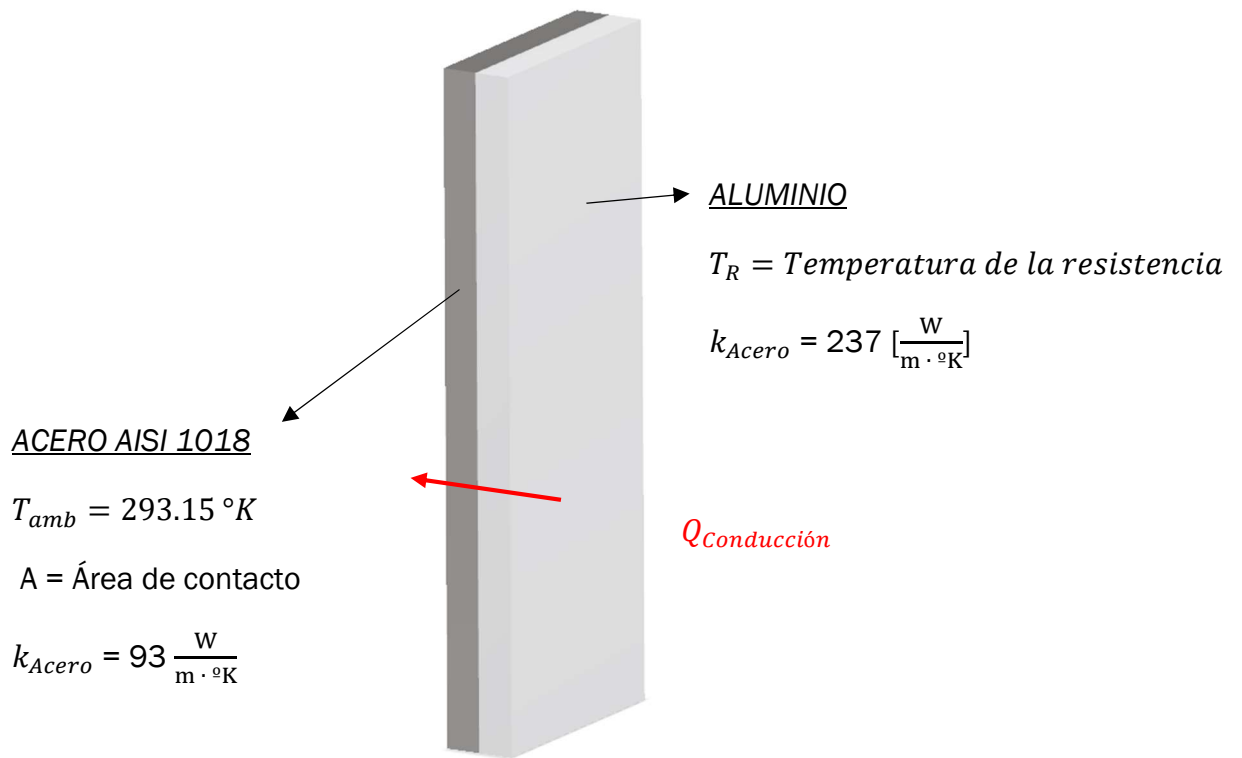
$$Q_{Resistencias} = Q_{Convección} + Q_{Conducción}$$

Se va a asumir, en primera instancia, que el área de contacto con el barril y la superficie al aire serán las de un elemento sin ningún tipo de modificación para la fijación, por lo que podremos determinar el estado más beneficioso, el de pleno contacto entre barril y bloque de calentamiento.

- Calor de Conducción

Es el calor que se transfiere como consecuencia del contacto directo de las dos piezas. Dicha superficie de contacto es un rectángulo, en el que su área dependerá de cada elemento de calor.

Se puede observar en la *Figura 47* un esquema representativo del balance de calor planteado entre el barril y un elemento de aluminio.



*Figura 60: Esquema pérdidas de calor por conducción. Elaboración propia.*

Se asume que reparto de calor será homogéneo, estacionario y unidireccional. Además, su régimen será estacionario, por lo que:

$$Q_{Conducción} = k_{Acero} \cdot A(\Delta T)$$

Se plantea el estado de puesta en marcha de la máquina, por lo tanto, el inicio del calentamiento. En este estado se encontrará el Calor máximo de transferencia.

Para el bloque de calentamiento sin acople de sensor, de menor área de contacto:

$$Q_{Conducción} = 93 \cdot 0.00052(T_R - 293.15) = 0.048T_R - 14.174$$

Para el bloque de calentamiento con acople de sensor, de mayor área de contacto:

$$Q_{Conducción} = 93 \cdot 0.000773(T_R - 293.15) = 0.0719T_R - 21.07426$$

- Calor de Convección

Es el calor que se pierde al estar la superficie en contacto con el aire. Se suele despreciar cuando la diferencia de temperatura es relativamente baja. En este caso, la diferencia de temperatura llega a ser considerable, por lo que se tendrán en cuenta.

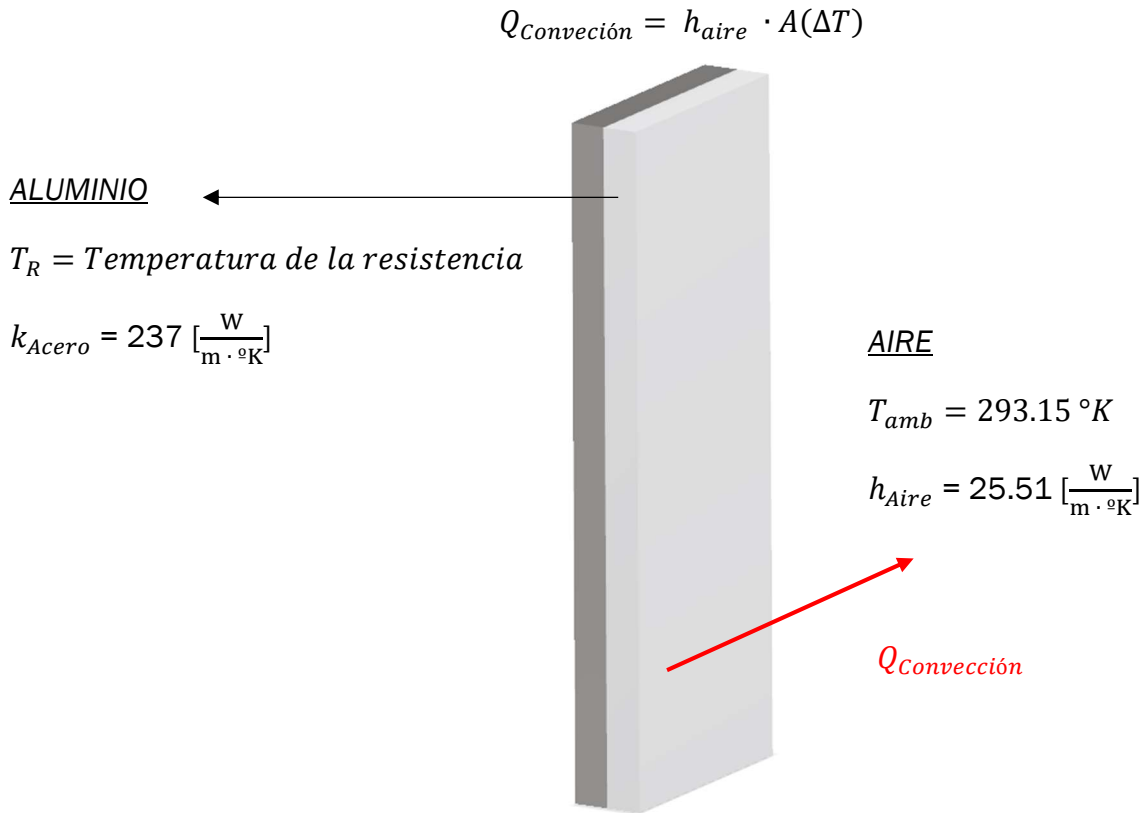


Figura 61: Esquema pérdidas de calor por convección. Elaboración propia.

Considerando el aire como seco a presión atmosférica y el A como el Area total de cada elemento de calor en contacto con el aire:

$$A = 1692 \text{ mm}^2 = 0.001692 \text{ m}^2$$

$$Q_{\text{Convección}} = 25.51 \cdot 0.001692(T_R - 293.15) = 0.043T_R - 12.65321$$

Para el elemento sin acople. En el elemento con acople de sensor:

$$A = 2558.5 \text{ mm}^2 = 0.0025585 \text{ m}^2$$

$$Q_{\text{Convección}} = 25.51 \cdot 0.0025585(T_R - 293.15) = 0.0653T_R - 19.1331$$

RESINA	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA LINEAL (23-80°C) 10 <sup>-4</sup> /k	TEMPERATURA DE PROCESO (°C)		TEMPERATURA DE USO (°C)	ABSORCIÓN DE AGUA (23°C, SATURADA)
			extrusión	inyección		
LDPE	0.914 – 0.939	2.0-2.4	210	250	Menos de 100°C	0.01 – 0.04
HDPE	0.933-0.966	1.2-1.8	180	205	Menos de 100°C	0.01 – 0.04
PP	0.894 – 0.912	1.1 – 1.8	235	255	Menos de 100°C	0.01
PET	1.38-1.40	0.70 – 0.80	250	255	Menos de 100°C	0.1
PC	1.2	0.70 – 0.80	290	300	Menos de 100°C	0.35
PVC (blando)	1.18-1.35	0.7 – 0.75	185	195	Menos de 100°C	0.1
PS	1.05	0.80	210	220	Menos de 100°C	0.1

Se ha determinado el uso de resistencias de calentamiento de 300 °K de temperatura máxima para lograr alcanzar las temperaturas requeridas para superar la temperatura de transición vítrea de la mayoría de plásticos convencionales.

En el caso de que  $T_R = 573.15 \text{ } ^\circ K$ , el elemento de menor dimensión tendrá la siguiente demanda de calor:

$$Q_{Resistencias} = 0.048 \cdot 573.15 - 14.174 + 0.043 \cdot 573.15 - 12.65321 = 25.32 \text{ W}$$

Mientras que el segundo elemento:

$$Q_{Resistencias} = 0.0719 \cdot 573.15 - 21.07426 + 0.0653 \cdot 573.15 - 19.1331 = 40.14 \text{ W}$$

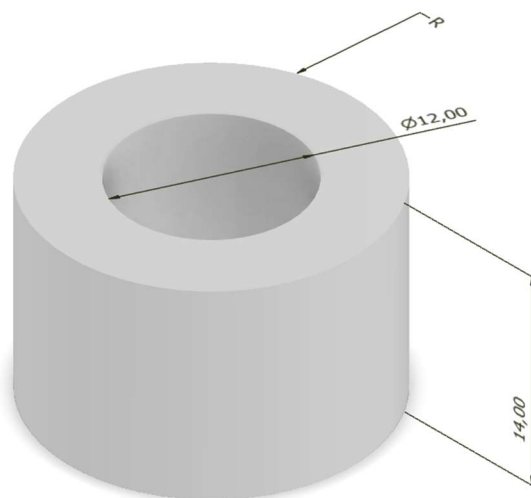
Se utilizarán por tanto resistencias tipo cartucho con una potencia máxima de 50 W cada una. En el mercado actual la gran mayoría de resistencias se sitúa entre los 25 a 50 W. La empresa suministradora de dichos elementos es 3despana, la cual se dedica a la venta de elementos relacionados con la impresión 3D [36].



Figura 62: Resistencias de cartucho cerámicas. [37]

Considerando una geometría cilíndrica similar a la usada por la empresa Re3D, se deberá tener en cuenta las pérdidas generadas por la abertura del bloque.

Se considerará un bloque cilíndrico que, sin ningún tipo de abertura, su área sea equivalente a los elementos planteados anteriormente, además, con el mismo área de contacto con el barril. Al hacer la abertura se sumará más superficie en contacto con el aire, mientras que habrá una menor superficie de contacto con el barril.





$2\pi(R^2 - 6^2) + 2\pi R \cdot 14 = 1692 \text{ mm}^2$  ; Para el elemento sin sensor.

$2\pi(R^2 - 6^2) + 2\pi R \cdot 22 - \pi \cdot 7.5^2 + 1135.68 = 2558.5 \text{ mm}^2$  ; Para el elemento con sensor.

Para el elemento más pequeño el radio exterior será:  $11.82 \text{ mm}^2$

Para el elemento con acople de sensor el radio exterior será:  $9.3655 \text{ mm}^2$

Al realizar la abertura la diferencia de áreas será:

- *Elemento sin sensor:*
  - o  $A_{\text{Conducción}} = 527 - 14 = 513 \text{ mm}^2$
  - o  $A_{\text{Convección}} = 1692 + 163 = 1855 \text{ mm}^2$
- *Elemento con sensor*
  - o  $A_{\text{Conducción}} = 773 - 22 = 751 \text{ mm}^2$
  - o  $A_{\text{Convección}} = 2558.5 + 148 = 2706.5 \text{ mm}^2$

Por lo que calcularemos el porcentaje de calor que se requiere de más para las resistencias, así como el calor perdido por conducción al barril. Se considera el elemento sin sensor:

$$\frac{Q_{\text{conducción}} - Q_{\text{cond.mod}}}{Q_{\text{conducción}}} \cdot 100 = \frac{13.54 - 13.3585}{13.54} \cdot 100 = 1.34\%$$

$$\frac{Q_{\text{Resistencias.mod}} - Q_{\text{Resistencias}}}{Q_{\text{conducción.mod}}} \cdot 100 = \frac{26.608 - 25.32}{26.608} \cdot 100 = 4.8406\%$$

Se concluye que, al utilizar este método de fijación, el barril pierde un 1.34% del calor que se le transmitiría de manera normal. A su vez, se necesitará un 4.8406% de calor para calentar el bloque.

Se determina que el primer elemento será roscado al barril con una geometría similar a la propuesta desde un principio, mientras que el que contiene un acople al sensor de presión, será, asumiendo la pérdida de calor, cilíndrico con una fijación por medio de un tornillo.



Figura 63: Elemento de calentamiento con Sensor con Abertura. Elaboración propia.

El calor que demanda esta geometría es:

$$Q_{\text{Resistencia}} = 42.082776 \text{ W}$$

b. Alargamiento del Barril. Acople del Sensor por separado.

Ventajas:

Presión medida al final del proceso; Presión máxima

Fijación del sensor como de los bloques de calentamiento sencilla.

Desventajas.

Barril más largo: Mayor pérdida de calor por convección en el fluido.

Posible acumulación de material al final del barril por enfriamiento al final del proceso.

Conexión del sensor: Pérdidas de calor por conducción.

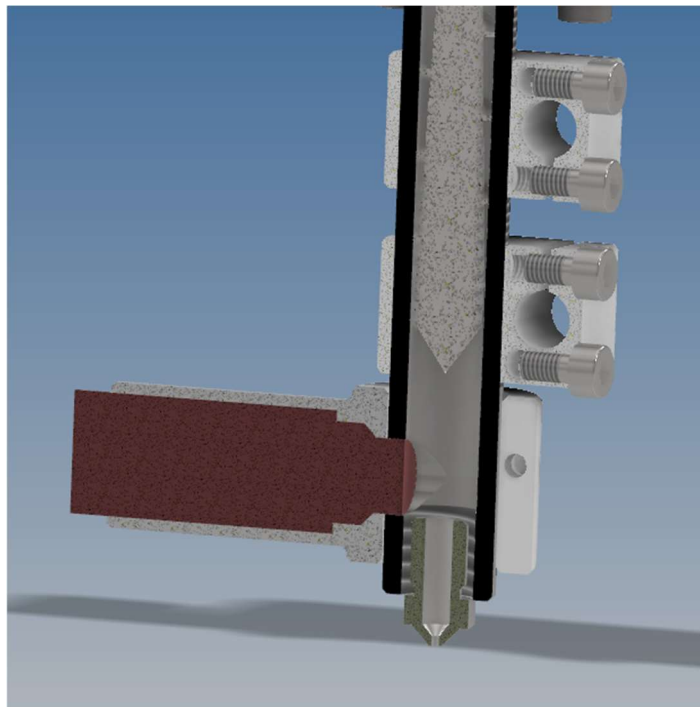


Figura 64: Alargamiento del barril. Elaboración propia.

Con el fin de determinar cuánto calor se pierde se determinarán las pérdidas conductivas y convectivas que implicarían el aumento de área en contacto con el acople del sensor y con el aire. Asumiendo un Acero estándar para el fijador:

$$Q = k_{Mat.Fijador} A_{Fijador} (T_{barril} - T_{Fijador}) + h_{aire} A_{aire} (T_{barril} - T_{aire})$$

$$Q = 50,2 \cdot 0,0005839 (573,15 - 293,15) + 25,51 \cdot 0,0005654 (573,15$$

$$Q = 16,6744 \text{ W de pérdidas conductivas y convectivas}$$

#### 7.1.4. DISEÑO DEL BARRIL Y BLOQUES DE CALENTAMIENTO.

El barril cuenta con una rosca interna M8 para el acople de boquillas estandarizadas. Se utilizarán boquillas estándar de 0.8 mm de diámetro de salida y se variará el estudio intercambiando entre boquillas estándar de 0.4mm y 2 mm de diámetro.

La conexión con el proceso se realiza mediante una rosca M8.

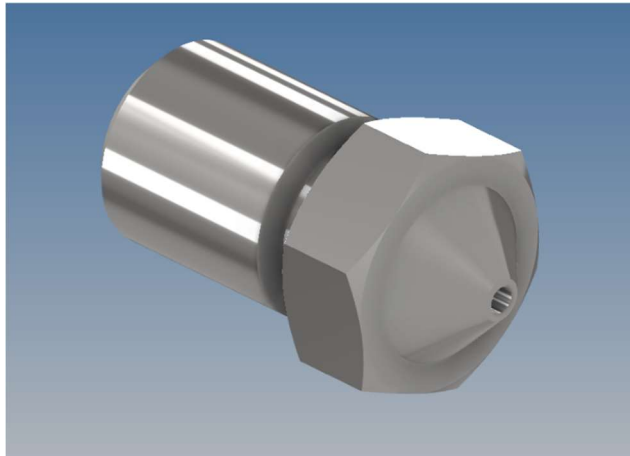


Figura 65: Boquilla estándar de 0.8 mm. Elaboración propia.

La geometría de la base está así propuesta para el lograr una fijación firme al cuerpo de alimentación por medio de una placa atornillada al cuerpo.

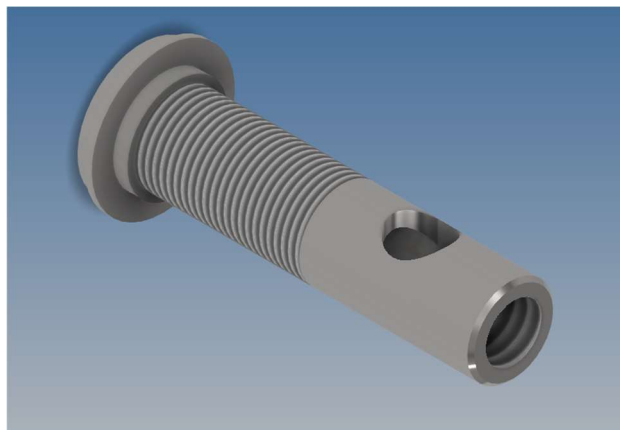


Figura 66: Barril. Elaboración propia

El espesor del barril es de 2 mm junto con un diámetro exterior de 12 mm. Un ajuste más preciso sería muy difícil de fabricar y desarrollaría demasiado calor. Tolerancias mayores son comunes en máquinas ya usadas. El motivo de esta holgura en el barril es proporcionar al flujo del fundido una vía de paso aguas abajo del tornillo, resultando de vital importancia para la reducción de presión necesaria para lograr la extrusión.

El barril cuenta con una longitud de 22.5 mm roscada desde su base. El primer bloque de calentamiento se rosca a lo largo de dicha zona inicial. Para el acople del sensor de presión se fijará por medio de una abertura con cierre de tornillo pasante, asumiendo la pérdida de calor.

El barril está acanalado en su zona de alimentación para lograr una entrada con mayor fricción entre el plástico y el barril.

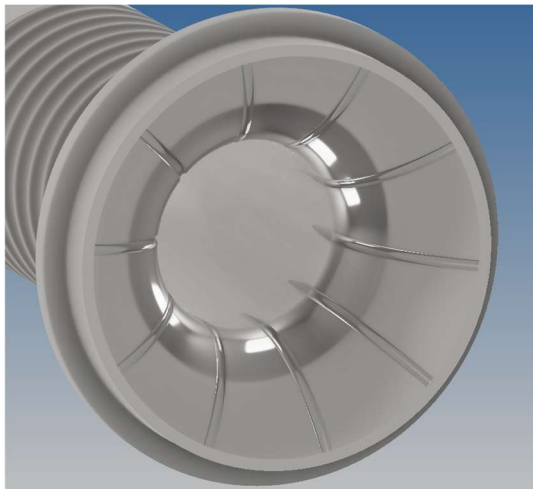


Figura 67: Acanalado Interior del barril. Elaboración propia.

Una conexión correcta del sensor de presión es aquella totalmente rasante con el flujo [Información suministrada por CatSensors].

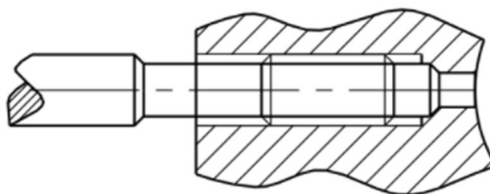
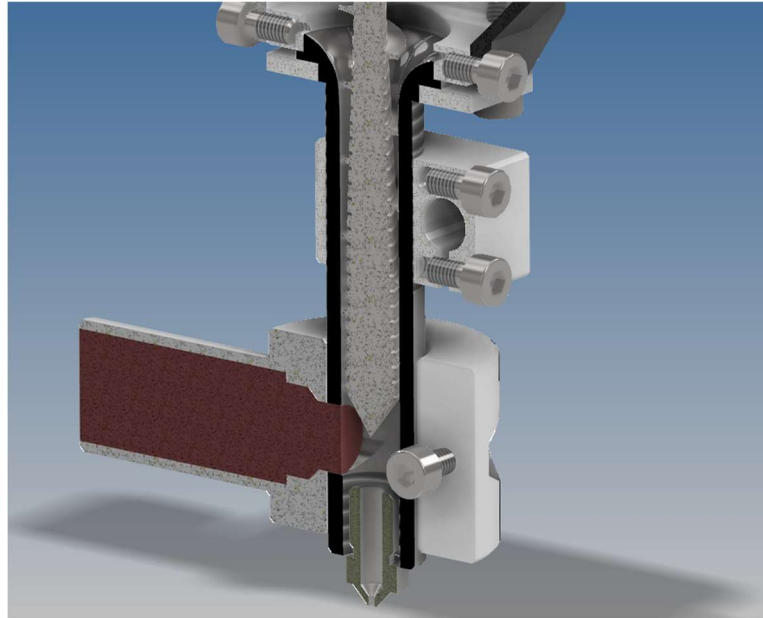


Figura 68: Conexión Sensor de Presión. [CatSensors]

La opción de diseño seleccionada con respecto a los bloques de calentamiento es la que se puede ver en la Figura 69. Alargando el barril, a la vez que se

conecta el sensor a uno de los bloques de calentamiento, de manera que el sensor no hará contacto con el tornillo por posibles problemas de *stress*, mientras que se evita un alargamiento innecesario para evitar la posible solidificación del material. La geometría del bloque de calentamiento será cilíndrica con una abertura de cierre por pasador.



*Figura 69: Conexión Sensor de Presión al proceso. Elaboración propia.*

Además, se añaden dos ventiladores para un óptimo control de la temperatura del proceso, en caso de que haga falta refrigeración si se ve sobrepasada la temperatura fusión del plástico en gran medida, pudiendo abrasar la mezcla e inutilizando el plástico.



*Figura 70: Ventilador EBMPAPST*

## 7.2. ALIMENTACIÓN

Se ha buscado una solución sencilla para la alimentación de los Pellets a la par que robusta y segura. Hecho de aluminio, este cuerpo dota de resistencia estructural al extrusor, uniendo el conjunto motor + reductora junto con el barril. Por uno de los laterales abiertos se atornilla una rejilla de PLA para evitar la salida de Pellets al exterior, mientras que por el lado contrario se alimentará a través de la tolva para alimentar de Pellets el proceso. Para lograr dichas uniones se han distribuido un total de 20 agujeros roscados M3x0.5.

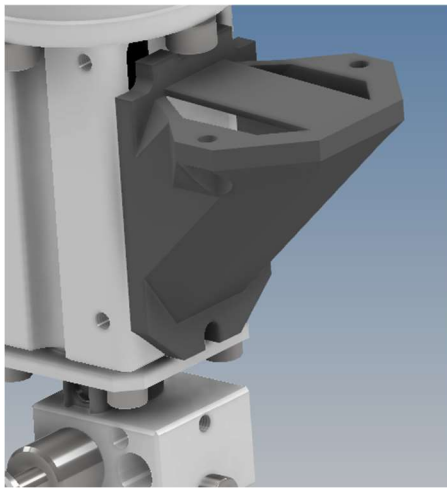


Figura 71: Fijación de la tolva. Elaboración propia.



Figura 72: Rejilla de PLA. Elaboración propia.

Los asientos que tienen los agujeros inferior y superior están hechos para un mejor acople con los elementos correspondientes que se han mencionado anteriormente; Barril junto con el conjunto motor reductor.

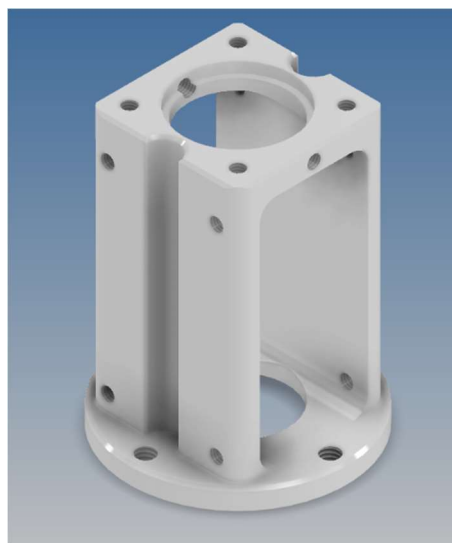


Figura 73: Cuerpo de Alimentación. Elaboración propia.

Cabe destacar que para la unión con el barril se dejará una holgura de 1mm para la disposición de una arandela que haga de efecto sellador entre el cuerpo de alimentación y el barril. Se anclará el barril al cuerpo de alimentación a través de una chapa de aluminio atornillada a sendos elementos.

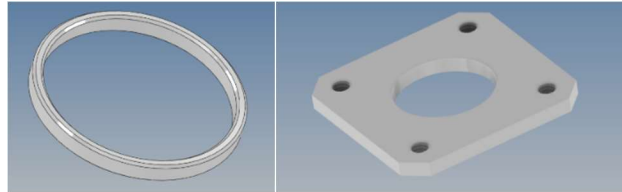


Figura 74: Arandela y Placa de Unión barril-Alimentación. Elaboración propia.

### 7.3. MOTOR Y REDUCTOR

Después del estudio sobre los motores más usados en este tipo de extrusoras se observa que se normalmente son alimentadas por motores paso a paso NEMA17-NEMA32 [31][32].

- GigabotX: NEMA23 Planetary Gearbox Par: 4.78 Nm, Intensidad: 2.8 A
- Pulsar: NEMA23: Intensidad: 2,7 A
- Mahor: NEMA17HS19-1684S-PG5: Intensidad: 1,68 A, Par: 2Nm

Se ha buscado una solución con parámetros similares mientras se buscaba que cumpliera con los requerimientos del proyecto. Dicho requerimiento principalmente consta de la posibilidad de obtención del Par motor suministrado por el motor. La opción de colocar un motor paso a paso es más que suficiente para lograr una buena extrusión, en cambio, un servomotor nos proporcionará en tiempo real el consumo de intensidad de las bobinas de alimentación, por lo que se puede obtener una relación lineal entre par motor e intensidad consumida. Dicho par motor, junto con el número de revoluciones por minuto que el servomotor también nos proporciona se usarán para el cálculo estimado de la viscosidad del fluido.

El servomotor escogido es un servomotor de la marca Beckhoff junto con una reductora procedente de la misma empresa. El Servomotor+reductor en cuestión es el AM8111-0F10-0000+AG2250-+PLE40-M01-10, el cual tiene la reductora incorporada, dotándole de 5Nm de par de salida,



Figura 75: Motor Beckhoff AG2250+PLE40-M01-10. [38]

Su alimentación es de 48V y una intensidad de fase de 2.85 A a su velocidad nominal: 4000rpm con un par de 0.5 Nm. Al acoplar un reductor de índice de transmisión = 10 se logra obtener el par nominal de 5 Nm a velocidades más bajas.

Para el acople con el husillo se ha diseñado una pieza que cuenta con dos partes, una de ellas se acopla al eje de salida de la reductora, mientras que la otra parte es conectada directamente al husillo.

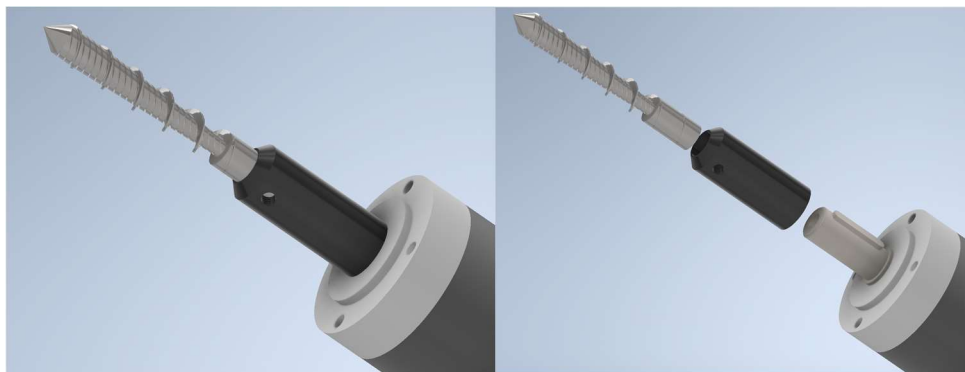
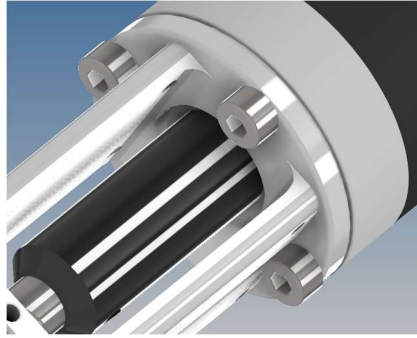


Figura 76: Unión Husillo-Reductor. Elaboración propia.

Se ha tenido en cuenta la geometría de la reductora propuesta para la unión con el cuerpo de alimentación por medio de 4 tornillos M4x10





*Figura 77: Unión Cuerpo-Reductor. Elaboración propia.*

Se concluye con un diseño final resultante que se puede ver en la *Figura 71*.



Figura 78: Diseño final. Elaboración propia

Se ha elaborado un prototipo mediante impresión 3D para la comprobación del diseño mecánico.



*Figura 79: Prototipo por impresión 3D. Elaboración propia.*

## 7.4. CONTROL

Se ha determinado el uso de un control en tiempo de real de todos los parámetros a medir, para ello, después del estudio de varias opciones, la más cercana a los intereses del proyecto es la implementación de un controlador máster que controle todos los demás controladores de cada componente. Para llevar a cabo dicho control se ha diseñado un sistema de tarjetado de entradas y salidas analógicas y digitales, junto con el controlador del motor AG2250+PLE40-M01-10. Vamos a analizar con más detalle cuáles son los parámetros para controlar y el estudio de sus conexiones.

### 7.4.1. Motor AG2250+PLE40-M01-10

Para el control del Motor se utilizará una tarjeta de la empresa Beckhoff ELM7211-9016. Cuenta con un Amperaje máximo de 4.5 A, por lo que cumplirá en el suministro de 2.85A que requiere el motor AG2250+PLE40-M01-10 junto con 48V de tensión [37]



Figura 80: Tarjeta ELM7211-9016. [39]

### 7.4.2. Ventiladores y resistencias

Las resistencias de calentamiento propuestas cuentan con 50W de potencia con 12V/24V para su conexión. Los ventiladores cuentan con una conexión 12V/24V, al igual que las resistencias.

Requeriremos un par de tarjetas EL2784 con 4 conexiones digitales todo o nada [40]

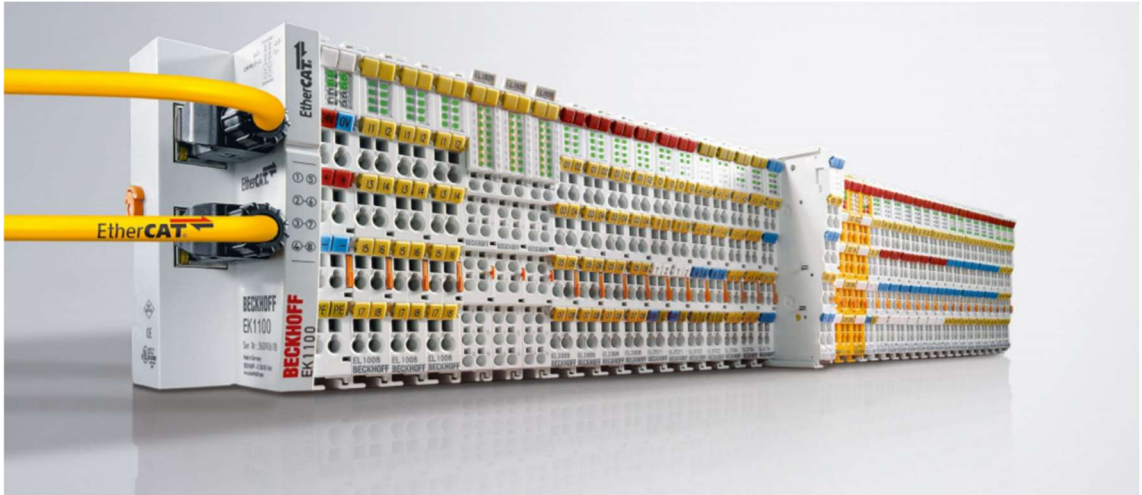


Figura 81: Tarjeta EL2784. [40]

### 7.4.3. Sensores de temperatura

Se utilizará una tarjeta EL3214 con 4 entradas para la conexión de los sensores de temperatura PT100 [41].



Figura 82: Tarjeta EL3214. [41]

#### 7.4.4. Sensor de presión

La conexión al proceso es de 4-20 mA, por lo que se usará la tarjeta de control IE3112 [42].



Figura 83: Tarjeta IE3112. [42]

### 7.5. ELEMENTOS NORMALIZADOS: TORNILLERÍA

Los elementos se han calculado y buscado siguiendo las siguientes normas:

- DIN EN ISO 4762
- DIN 976-1 A

Tabla 3: Elementos normalizados de tornillería. Elaboración Propia.

Tornillo	Cantidad	Unión
DIN EN ISO 4762 M3x10	5	Cuerpo de Alimentación - Reductor - Elemento de calentamiento
DIN EN ISO 4762 M3x6	12	Cuerpo de Alimentación- Barril- Tolva - Rejilla - Elemento de calentamiento
DIN 976-1A M4x5	2	Reductor - Husillo

## 8. MATERIALES

Haciendo un estudio más detallado de los requerimientos de cada pieza, junto con los catálogos de materiales, podemos asignar el material más adecuado para cada elemento.

Se ha llevado a cabo un estudio de los materiales utilizados frecuentemente en la industria actual, sacando los materiales que se ajusten a nuestro proyecto, se va establecer un criterio de selección en función de cada pieza.

Para el conjunto barril-husillo, se ha mencionado anteriormente la importancia del calor de generación viscosa, por lo que este será el punto de apoyo por el cual se seleccionarán los materiales, teniendo en cuenta, además, las diferentes sollicitaciones que requieran los distintos elementos. Se va a detallar los materiales del conjunto husillo-barril [6] [7]:

- El **tornillo o husillo** ha de ser lo menos rugoso posible, mientras aguanta una presión y temperatura de elevada magnitud. Después de un estudio en el cual se han analizado diferentes extrusoras del mercado, se ha obtenido información muy útil a la hora de la elección del material. Corroborando esta información con un estudio propio de cada material, se han seleccionado los mejores aceros y recubrimientos resistentes a temperaturas hasta de 400 °C además de tener propiedades anti-fricción y anti- desgaste. Además, se usará el mismo material para la boquilla.

Se ha determinado el uso de: **ACERO AISI 4140**

- El **barril**, al contrario que el husillo, ha de ser un material rugoso. Se necesita un material capaz de aguantar altas presiones y temperaturas, contando con una alta conductividad térmica. La dureza del barril se consigue utilizando aceros de diferentes tipos y cuando es necesario se aplican métodos de endurecimiento superficial de las paredes internas, que son las más expuestas a efectos de abrasión y corrosión durante la operación del equipo. Aceros al carbón como el AISI 1018, 1025, 1035, 1045, 1050 o aceros con aleaciones de sílice, cromo y molibdenos del tipo AISI 4130, 4140, 4142, 4150, aceros inoxidable del tipo 3004L, 316, 410, 17-4 PH, 440° y HK, o aleaciones especiales como el INCONEL 600 son algunos de los tipos más utilizados en la industria. Aleaciones especiales y recubrimientos se usan normalmente cuando se van a extruir plásticos severos (resinas con hasta un 30% de fibra de vidrio, cargas y aditivos). Para plásticos críticos (Fluoropolímeros, fenólicos, etc) se usan recubrimientos

Premium con tratamientos térmicos y químicos para aliviar la corrosión del barril y dotarlo de una mayor vida útil.

Se ha determinado el uso de **Acero AISI 1018**.

Necesitamos materiales de alta conductividad Térmica para los elementos transmisores de calor o bloques de calentamiento. Los materiales que mejor se adaptan a los requerimientos del proceso son:

- Aluminio
- Bronce
- Latón

Tabla 4: Materiales y su conductividad térmica. [41]

Material	W/(m·K)	Material	W/(m·K)
Acero	47 - 58	Hielo	2
Acero inoxidable	12 - 45	Hierro	80,2
Agua	0,58	Hormigón	1,7
Aire	0,025	Ladrillo	0,80
Alcohol	0,16	Ladrillo refractario	0,47 - 1,05
Alpaca	29,1	Latón	81 - 116
Aluminio puro	237	Litio	301,2
Amianto	0,04	Madera	0,04 - 0,4
Bronce	116 - 186	Mercurio	83,7
Caucho	0,16	Mica	0,35
Cemento Portland	0,29	Níquel	52,3
Cinc	106 - 140	Oro	318
Cobre	401	Parafina	0,21
Corcho	0,03 - 0,04	Piedra arenisca	2,4
Diamante	900 - 2300	Plata	429
Estaño	64,0	Plomo	35,0
Fibra de vidrio	0,03 - 0,07	Polipropileno	0,12
Glicerina	0,29	Tierra húmeda	0,8
Helio (superfluidez)	infinito	Vidrio	0,6 - 1,1



Tabla 5: Comparación Aluminio de Materiales. [37] [38]

Propiedades	Aluminio	Latón	Bronce
Conductividad Térmica	237	116	186
Densidad	2.7 g/cm <sup>3</sup>	8.73 g/cm <sup>3</sup>	8.9 g/cm <sup>3</sup>
Punto de Fusión	660°C	965°C	1020°C
€/kg	1.96 €/Kg	2.77 €/Kg	7.24 €/Kg

- **Aluminio Serie 1000** para los diferentes elementos de calentamiento mencionados. Entre sus propiedades destaca la buena conductividad térmica junto con un rango de temperatura operacional elevado. Todas estas características, junto con su precio reducido, hacen del aluminio Serie 1000, de aproximadamente un 99% de aluminio puro, la opción ideal para los diferentes elementos propuestos.

Se fabricarán elementos como el Cuerpo de Alimentación del mismo aluminio, pues sus solicitudes no son grandes y así se aligera el peso neto de la extrusora.

## 9. MANTENIMIENTO

### 9.1. REDUCTOR

Siguiendo las recomendaciones del fabricante escogido para el reductor corona-sinfín, será necesario efectuar un cambio de aceite pasadas las 50.000 horas de funcionamiento. También recomiendan efectuar una limpieza a la zona de engrane cuando se efectúe el cambio de aceite.

Advierten de no mezclar lubricantes sintéticos con lubricantes minerales.

### 9.2. EQUIPO ELÉCTRICO

Será muy recomendable hacer un mantenimiento preventivo de la paramenta eléctrica. Para ello, se recomienda hacer limpiezas periódicas al motor y demás componentes, retirando posibles restos de plástico fundido o polvo.

Por otro lado, será necesario comprobar periódicamente el correcto funcionamiento de las protecciones eléctricas. De esta forma, se verificará que los aislamientos y la puesta a tierra cumplen su función.

Tener a punto los sensores de temperatura y presión, ventiladores y resistencias de calentamiento evitarán un mal control de las propiedades del flujo del plástico. Es esencial comprobar su correcto funcionamiento periódicamente para asegurar un estudio efectivo de la reología del proceso, así como de lograr una buena extrusión.

Además, siguiendo las recomendaciones de la empresa suministradora del sensor de presión, se recomienda la revisión completa del sensor al menos una vez al año. Este sensor suele cambiarse por abrasión al menos una vez en este período de tiempo en las líneas de producción industriales. En el contexto de este proyecto el tiempo de vida útil se verá sumamente alargado.

### **9.3. HUSILLO Y BOQUILLA**

Es muy importante un mantenimiento adecuado de el conjunto Husillo-Barril, puesto que un mal comportamiento de estos elementos hará que el resultado de la extrusión se vea altamente afectado, bajando la calidad del producto extruido. Se recomienda la limpieza frecuente para evitar desechos plásticos residuales del proceso de extrusión.

## **10. CARACTERIZACIÓN DEL PLÁSTICO**

Una vez establecida la composición de componentes que forman el extrusor, se procede a la elaboración de un proceso a seguir para la lograr la caracterización del plástico a extruir.

Se ha observado que extrusores de las mismas características que el propuesto en el proyecto, al trabajar con plásticos reciclados, aparecen pequeños fallos de impresión, y es que, al no poder caracterizar el plástico, no se puede saber exactamente qué es lo que está sucediendo. Al instrumentar un extrusor, capaz de poder medir dichas propiedades del fluido, se van a obtener las principales características del plástico, pudiendo detectar fallos en el proceso de extrusión.

Anteriormente, se han parametrizado las distintas características que afectan al proceso de manera que pueden llevar a la aparición de posibles fallos que pueden ocurrir durante el proceso de extrusión y a que se deben:

Los diferentes valores geométricos quedan determinados junto con la geometría del propio extrusor. Las propiedades de Presión, Par Motor y Velocidad del Husillo se obtendrán de la instrumentación incorporada en el extrusor; Sensor de presión y Servo Motor.

Se obtendrán el Caudal, Velocidad de Corte, Calor de generación Viscoso y Viscosidad a partir de todas las medidas indicadas.

Se estudiará pues el efecto de las distintas características medidas sobre el proceso:

- Viscosidad

$$\mu = \frac{60T}{4\pi^2 N_i h} \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_i R_o} \right)$$

Manteniendo un par motor constante a 5Nm y una velocidad variable de 0 a 400 rpm, observamos un crecimiento proporcional de la viscosidad del fluido. En la *Figura 84* se observa el valor máximo que se podrá medir de viscosidad en Pascales Segundo, junto con el rango de medida.

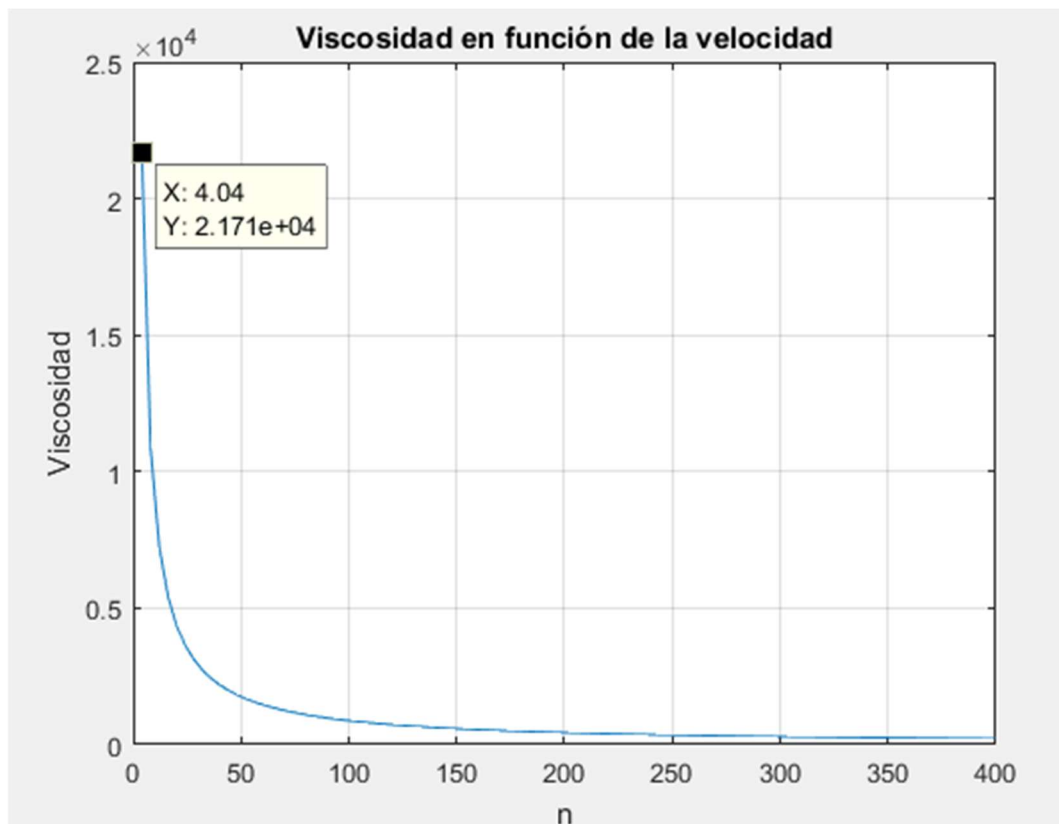


Figura 84: Viscosidad en Función de Par. Elaboración propia.

El rango máximo de los Reómetros rotacionales en el mercado se comprende entre los 6000 Pascales Segundo hasta los 320000 Pascales Segundo. [Información suministrada por Anton-Paar]

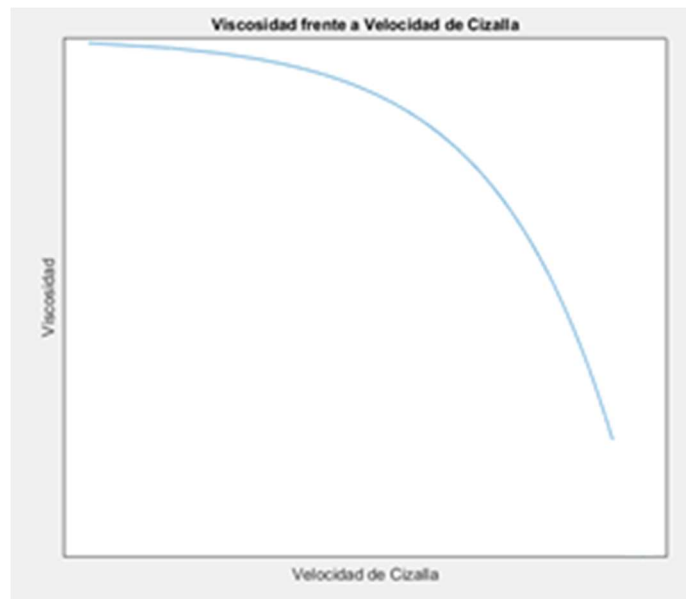
Las viscosidades del HDPE pueden llegar hasta los 800 Pascales Segundo, mientras que la viscosidad del LDPE puede llegar hasta los 20000 Pas.

La hipótesis planteada nos dará un rango máximo de medida de 21710 Pas.

- Viscosidad frente a Velocidad de Cizalla

$$\mu = \frac{\Delta P}{2L\dot{\gamma}}$$

Al tener el valor de la Viscosidad del fluido junto con el incremento de presión, se obtiene la velocidad de cizalladura o deformación del plástico. Por los diferentes estudios reológicos de los distintos plásticos, se observa el comportamiento que describirá la Viscosidad en función de la Velocidad de cizalla en la *Figura 85*.



*Figura 85: Viscosidad frente a Velocidad de Cizalla. Elaboración propia.*

Además, se podrá estudiar el efecto de la variación de presión sobre las medidas de viscosidad del fluido y la velocidad de cizalladura.

- Calor de Generación Viscoso

Se definió anteriormente el calor de generación Viscoso en función de la Viscosidad y la velocidad de cizalladura.

$$\text{Calor Viscoso} = \mu \dot{\gamma}^2$$

Al conocer el comportamiento de ambos parámetros podemos deducir el comportamiento del Calor Viscoso

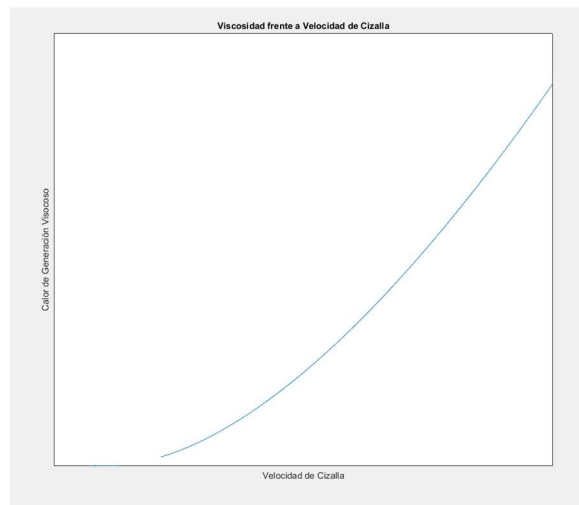


Figura 86: Calor de Generación Viscoso frente Velocidad de Cizalladura. Elaboración propia.

Al aumentar la Velocidad de cizalladura, se reduce la viscosidad. El calor de generación viscoso se ve muy afectado por la velocidad de cizalladura, creciendo exponencialmente, pudiendo llegar a dañar las propiedades del fluido si se llegan a valores altos.

- Caudal de Salida frente a la presión

$$Q = \frac{\pi R^4}{8L} \frac{\Delta P}{\mu}$$

Si se considera los valores máximos de variación de presión que puede medir el sensor de presión instalado: 350 bar, junto con la viscosidad máxima que podemos medir, el caudal máximo se observa en la Figura 87.

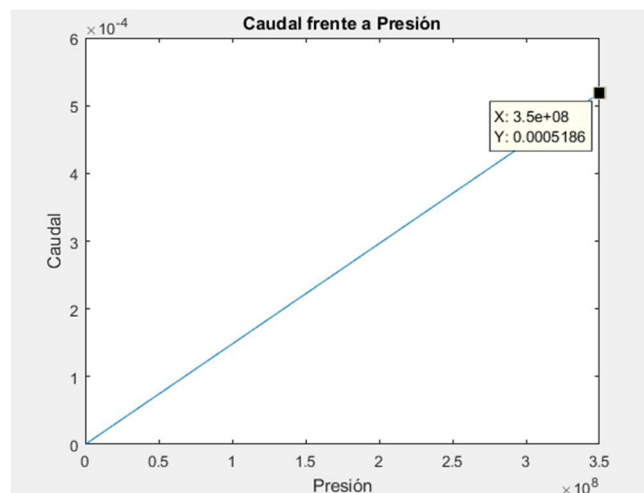


Figura 87: Caudal frente a Presión en el cabezal. Elaboración propia.

Una presión baja en el cabezal es la causa directa cuando el caudal no es homogéneo, apareciendo cavidades en la estructura del material extruido, por lo que el control de este parámetro es vital para una buena impresión.

## **11. CONCLUSIONES Y LÍNEA FUTURA**

### **11.1. CONCLUSIONES**

Al comienzo del proyecto se fijaron unos objetivos a lograr (Sección 3). A continuación, se van a resumir los objetivos y valorar el grado de cumplimiento.

Se ha realizado un completo estudio de mercado, tecnologías actuales en la industria e investigación sobre el estado actual de la producción y reciclado de plástico a nivel mundial y local.

Se ha efectuado el estudio de empresas distribuidoras de elementos de extrusión.

Se ha estudiado con profundidad el proceso de extrusión para lograr un resultado óptimo de extrusión de plástico reciclado.

Se han adoptado las correspondientes hipótesis para la posterior verificación de los componentes.

Se han concebido varias opciones de diseño con respecto al diseño de componentes, creando varios bocetos del extrusor para sentar las bases de lo que será el diseño final. Se han obtenido las ventajas y desventajas de cada una de las opciones en pos de obtener un diseño final.

Se ha adaptado el modelo a las limitaciones que presentaba el sector local. De esta forma, se han combinado los conocimientos del estado de la técnica con las posibilidades ofrecidas por la industria para ofrecer la solución final.

Se ha realizado un modelo 3D, planos y toda la documentación necesaria para su fabricación. Además, se ha realizado un prototipo impreso en una impresora 3D con el objetivo de comprobar si la documentación aportada es correcta. No solamente se ha hecho un diseño funcional, sino que se ha aportado toda la documentación necesaria para su correcto montaje y funcionamiento.

Durante todo el proyecto se ha mantenido un contacto continuo con los proveedores. Se han corroborado las distintas opciones de diseño con los distintos proveedores para obtener el diseño final.

Cabe destacar la importancia de la instrumentación necesaria para poder caracterizar el plástico que la extrusora es capaz de proporcionar.

Habitualmente este tipo de control durante la extrusión se implementa en extrusoras de índole industrial, por lo que llevar las tecnologías que se usan a un entorno de impresión 3D ha sido un estudio lento debido al contacto permanente con empresas de carácter industrial para conseguir el equipo que se ajustaba al proyecto.

Se considera que la extrusora cumple satisfactoriamente con el enfoque que se le dio en un principio, siendo esta la posibilidad de una extrusión con calidad de plástico reciclado, pudiendo caracterizar el material procesado.

A la vista de las conclusiones expuestas, se puede afirmar que se han cumplido todos los requisitos propuestos.

## 11.2. LÍNEA FUTURA

Como se comentó en la introducción de este proyecto, esta extrusora forma parte de un ciclo destinado a la recuperación de desechos plásticos, dándoles una segunda vida útil.

Por ello, habrá que seguir desarrollando el resto de los componentes mostrados en la *Figura 2*.

Además, el paso inmediatamente posterior es la construcción de la máquina, haciéndose posible así la verificación real del correcto funcionamiento de la extrusora y el modelo de caracterización del plástico.

La puesta en marcha y preparación de software para la medida de parámetros serán vitales para hacer un buen uso de las distintas soluciones mecánicas aportadas.

El control de los parámetros propuestos nos dará una idea de cómo se comporta cada mezcla de plástico reciclado introducido en la extrusora, pudiendo controlar así la calidad del fundido extruido y la determinación de propiedades tales como viscosidad, presión o temperatura del plástico.

Una mejora funcional puede ser añadir una báscula de pesaje sobre la que se podrá depositar el material a extruir, siendo un dato de vital importancia para el cálculo del índice de flujo que puede lograr aportar la extrusora.





## BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Science Advances». Disponible en: [www.epdata.es](http://www.epdata.es). [Último acceso 25 01 2021]
- [2] «La ONU advierte de que sólo el 9 % del plástico usado en el mundo se recicla,» EFE, 2019.
- [3] «Mar de plásticos: cuánto plástico hay en el mar y los océanos,» Fundación Aquae, 2019. Available: <https://www.fundacionaquae.org/mar-de-plastico-el-80-de-la-basura-en-el-mar-es-plastico/>. [Último acceso 28 01 2021]
- [4] «PlasticsEurope,» 2018. Available: [https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics\\_the\\_facts\\_2018\\_AF\\_web.pdf](https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf). [Último acceso 02 02 2021]
- [5] Processing of thermoplastic materials. Ernest C. Bernhardt. Reinhold, New York, 1959.
- [6] «Understanding-Extrusion» Chris Rauwendaal. Munich: Carl Hanser Verlag, 2019.
- [7] «Extrusion» Harold F. Giles Jr & John R. Wagner Jr. USA: William Andrew, 2013.
- [8] «Novatec». Available: <https://www.directindustry.es/prod/novatec-inc/product-74452-1516559.html> [Último acceso 03 02 2021]
- [9] «Transformación de Plásticos» V.K. Savgorodny. España: Editorial Gustavo Gili, 1973.
- [10] «Processing of Thermoplastic Materials», Ernest Bernhardt.Reinhold. USA: John Wiley & Sons, Inc. 1959.
- [11] «Técnicas de Medición de Presión» Available: <https://instrumentacionycontrol.net> [Último acceso: 02 02 2021].
- [12] «Precious Plastics,» 2019. . Available: <https://preciousplastic.com>. [Último acceso: 02 02 2021].
- [13] «Máquinas de Precious Plastics,» 2019. Available: <https://preciousplastic.com/en/machines.html>. [Último acceso: 02 02 2021].
- [14] «Tronzadora Precious Plastics,» 2019. Available: <https://preciousplastic.com/en/videos/build/shredder.html>. [Último acceso: 02 02 2021].

- [15] «Extrusora Precious Plastics,» 2019. Available: <https://preciousplastic.com/en/videos/build/compression.html>. [Último acceso: 02 02 2021].
- [16] «Inyectora Precious Plastics,» 2019. Available: <https://preciousplastic.com/en/videos/build/injection.html>. [Último acceso: 02 02 2021].
- [17] «Prensadora Precious Plastics,» 2019. Available: <https://preciousplastic.com/en/videos/build/extrusion.html>. [Último acceso: 02 02 2021].
- [18] «3Devo,» 2019. Available: <https://3devo.com>. [Último acceso: 02 02 2021].
- [19] «Ciclo 3Devo,» 2019. Available: <https://3devo.com/our-process/>. [Último acceso: 02 02 2021].
- [20] «Extrusora de filamento 3Devo,» 2019. Available: <https://3devo.com/filament-makers/>. [Último acceso: 02 02 2021].
- [21] «Shr3d it shredder,» 2020. Available: <https://3devo.com/shred-it/>. [Último acceso: 02 02 2021].
- [22] «Noztek,» Available: <https://www.noztek.com> [Último acceso: 02 02 2021].
- [23] «Noztek Xcalibur,» Available: <https://www.noztek.com/product/noztek-xcalibur/> [Último acceso: 02 02 2021].
- [24] «Noztek Pro Filament Extruder,» Available: <https://www.noztek.com/product/noztek-pro/> [Último acceso: 02 02 2021].
- [25] «Filastruder,» 2019. Available: <https://www.filastruder.com>. [Último acceso: 02 02 2021].
- [26] «Partes Filastruder Kit,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.filastruder.com/collections/filastruders-accessories/products/filastruder-kit?variant=338126128>. [Último acceso: 02 02 2021].
- [27] «Polystar,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.polystarco.com/es/about\\_C03.html](https://www.polystarco.com/es/about_C03.html). [Último acceso: 02 02 2021].
- [28] «Polystar. Recicladora con cortadora y compactadora,» 2020. [En línea]. Available:

[https://www.polystarco.com/es/products\\_i\\_Cutter\\_integrated\\_Recycling\\_Machine.html](https://www.polystarco.com/es/products_i_Cutter_integrated_Recycling_Machine.html). [Último acceso: 02 02 2021].

[29] «Polystar. Máquina de reciclaje con triturador,» 2020. [En línea].

Available:

[https://www.polystarco.com/es/products\\_i\\_Single\\_shaft\\_shredder.html](https://www.polystarco.com/es/products_i_Single_shaft_shredder.html).

[Último acceso: 02 02 2021].

[30] «Re3D. GigabotX, una impresora de Pellets». Available:

<https://re3d.org/portfolio/gigabot-x/> [Último acceso: 08 02 2021].

[31] «Dyce Design: Pulsar Pellet Extruder,» 2020. [En línea]. Available:

[https://dyzedesign.com/pulsar-pellet-extruder/?gclid=CjwKCAjwjbCDBhAwEiwAiudBy\\_X1y3X7VGKd-](https://dyzedesign.com/pulsar-pellet-extruder/?gclid=CjwKCAjwjbCDBhAwEiwAiudBy_X1y3X7VGKd-VkxQ6xT2JobuRk4o0OngycFa_OWxTy1pVa1-JOj5BoCoRcQAvD_BwE#plastics-flexible)

[VkxQ6xT2JobuRk4o0OngycFa\\_OWxTy1pVa1-JOj5BoCoRcQAvD\\_BwE#plastics-](https://dyzedesign.com/pulsar-pellet-extruder/?gclid=CjwKCAjwjbCDBhAwEiwAiudBy_X1y3X7VGKd-VkxQ6xT2JobuRk4o0OngycFa_OWxTy1pVa1-JOj5BoCoRcQAvD_BwE#plastics-flexible)

[flexible](https://dyzedesign.com/pulsar-pellet-extruder/?gclid=CjwKCAjwjbCDBhAwEiwAiudBy_X1y3X7VGKd-VkxQ6xT2JobuRk4o0OngycFa_OWxTy1pVa1-JOj5BoCoRcQAvD_BwE#plastics-flexible) [Último acceso: 08 02 2021].

[32] «Mahor V4» Available: <https://mahor.xyz> [Último acceso: 13 05 2021]

[33] «Reología aplicada a sistemas alimentarios» Raúl Díaz Ocampo. Ecuador: Universidad Técnica Estatal de Quevedo, 2018

[34] «Mecánica de Fluidos 5 Edición» Frank M. White, MCGRAW-HILL, 2020.

[35] «Tema 5. Técnicas reométricas». Juan Carlos y García Quesada. Alicante: Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería Química, 2008.

[36] «Transformación de Termoplásticos». J. Eduardo Morales Méndez  
Coordinación de la especialidad en plásticos – CETIS No 6

[37] «Cartuchos Calefactores» <https://www.3despana.com/cartuchos-calefactores/85-141-cartucho-calentador-resistencia-extrusor-50w-1224v-2-metros.html>

[38] «Motor y reductora AG2250-+PLE40-M01-10» Available:

<https://www.beckhoff.com/es-es/products/motion/planetary-gears/ag2250-planetary-gear-units-for-servo-and-stepper-motors/ag2250-ple40-m01-10.html>. [Último Acceso 22 05 2021]

[39] «Tarjeta ELM7211-9016» Available: <https://www.beckhoff.com/es-es/products/i-o/ethercat-terminals/el7xxx-compact-drive-technology/elm7211-9016.html>. [Último Acceso 22 05 2021]

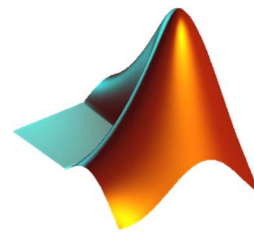
[40] «Tarjetas EL2784» Available: <https://www.beckhoff.com/en-en/products/i-o/ethercat-terminals/el2xxx-digital-output/el2784.html>. [Último Acceso 22 05 2021]

[41] «Tarjetas EL3214» Available: <https://www.beckhoff.com/es-es/products/i-o/ethercat-terminals/el3xxx-analog-input/el3214.html>. [Último Acceso 22 05 2021]

[42] «Tarjeta IE3112» Available: <https://www.beckhoff.com/es-es/products/i-o/fieldbus-box-and-io-link-box/extension-box/ie3xxx-analog-input/ie3112.html>. [Último Acceso 22 05 2021]

## 12. ANEJOS

### 12.1. SOFTWARE EMPLEADO



## 12.2. DATASHEETS “ESPECIFICACIONES DE ELEMENTOS”



Model  
MDA435  
MDA467

### Melt pressure transducer for pressure measurement in hot media and small areas



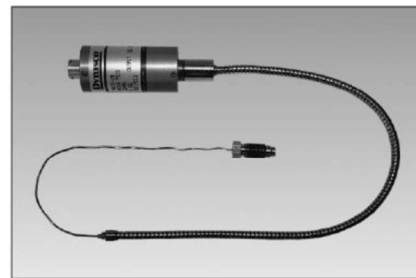
#### Description

The models MDA435 und MDA467 were designed for applications where mounting space is extremely limited. The exposed part of the capillary allows a small bending radius of 3 mm.

The specially developed snout configuration facilitates transducer installation in restricted areas. The pressure transmission from the diaphragm to the strain gauge is done through a temperature compensated liquid column.

#### Features

- Installation for media temperature up to 400 °C
- Pressure transducer for small areas
- Flexible capillary between diaphragm and housing
- Liquid-filled transmission system
- Electrical built-in calibration
- Exposed, bendable capillary
- Fits in space restricted areas



#### Technical Data / Operating Data

Pressure range	0 - 35 bar to 0 - 2000 bar	Maximum overload (without influencing operating data)	2 x pressure range but for 1000 and 1400 bar range max. 1750 bar, for 2000 bar max. 2400 bar
Accuracy	MDA435 $\pm 0.5$ % f.s.v. - up to 50 bar $\pm 1$ % f.s.v. MDA467 $\pm 1$ % f.s.v.	Burst pressure	6 x pressure range max. 3000 bar
Repeatability	MDA435 $\pm 0.1$ % f.s.v. - up to 50 bar $\pm 0.2$ % f.s.v. MDA467 $\pm 0.2$ % f.s.v.	Material in contact with media	15-5 Mat. No. 1.4545, DyMAX coated
Resolution	infinite		

#### Electrical Characteristics

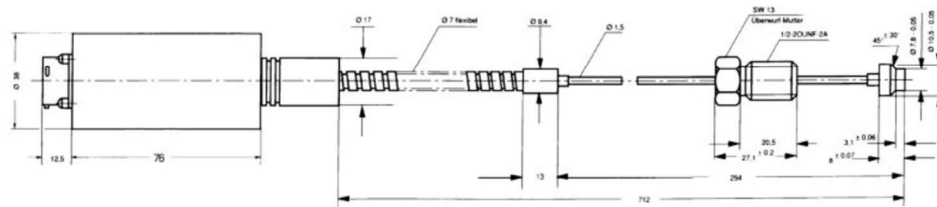
Configuration	4-arm Wheatstone bridge strain gauge (DMS)	Supply voltage	10 V DC, max. 12 V DC
Strain resistance	350 $\Omega$	Internal Shunt-Calibration	80 % f.s.v. $\pm 0.5$ % MDA435 $\pm 1.0$ % MDA467
Output signal	3.33 mV/V	Leakage resistance	1000 M $\Omega$ at 50 V DC
Zero balance	$\pm 5$ % f.s.v., MDA435 $\pm 10$ % f.s.v., MDA467		

**Temperature influence**

<b>Diaphragm</b>		<b>Housing</b>	
Max. Temperature	400 °C	Max. Temperature	120 °C
Zero shift due to temperature change	MDA435 < 0,2 bar / 100 °C MDA467 < 0,4 bar / 100 °C	Zero shift due to temperature change	MDA435 ± 0.2% f.s.v./10 °C MDA467 ± 1.0 % f.s.v./10 °C
		Sensitivity shift due to temperature change	MDA435 ± 0.1% f.s.v./10°C -up to 50 bar ±0.2 % f.s.v./10°C MDA467 ± 0.4% f.s.v./10°C

**Dimensions**

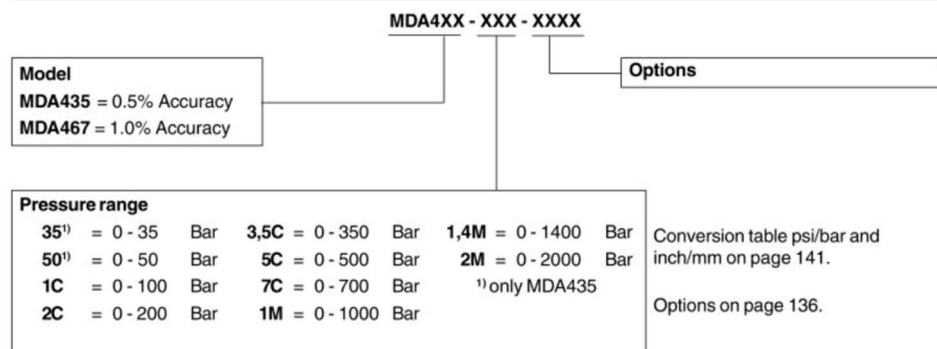
MDA435 / MDA467



**Accessories**

Indicator 1390, Process Readout UPR700, Process Controller ATC770, Cleaning Tool Kit, Machining Tool Kit

**Order specifications**

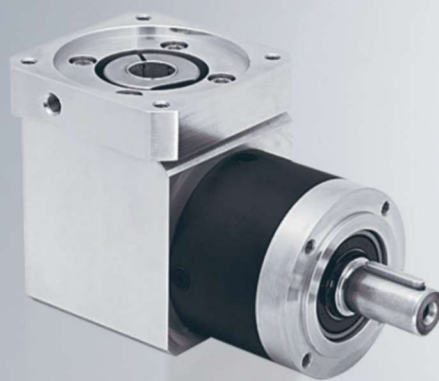


**BECKHOFF** New Automation Technology

Operating instructions | EN

AG2250

Planetary gear unit



6/14/2021 | Version 2.3



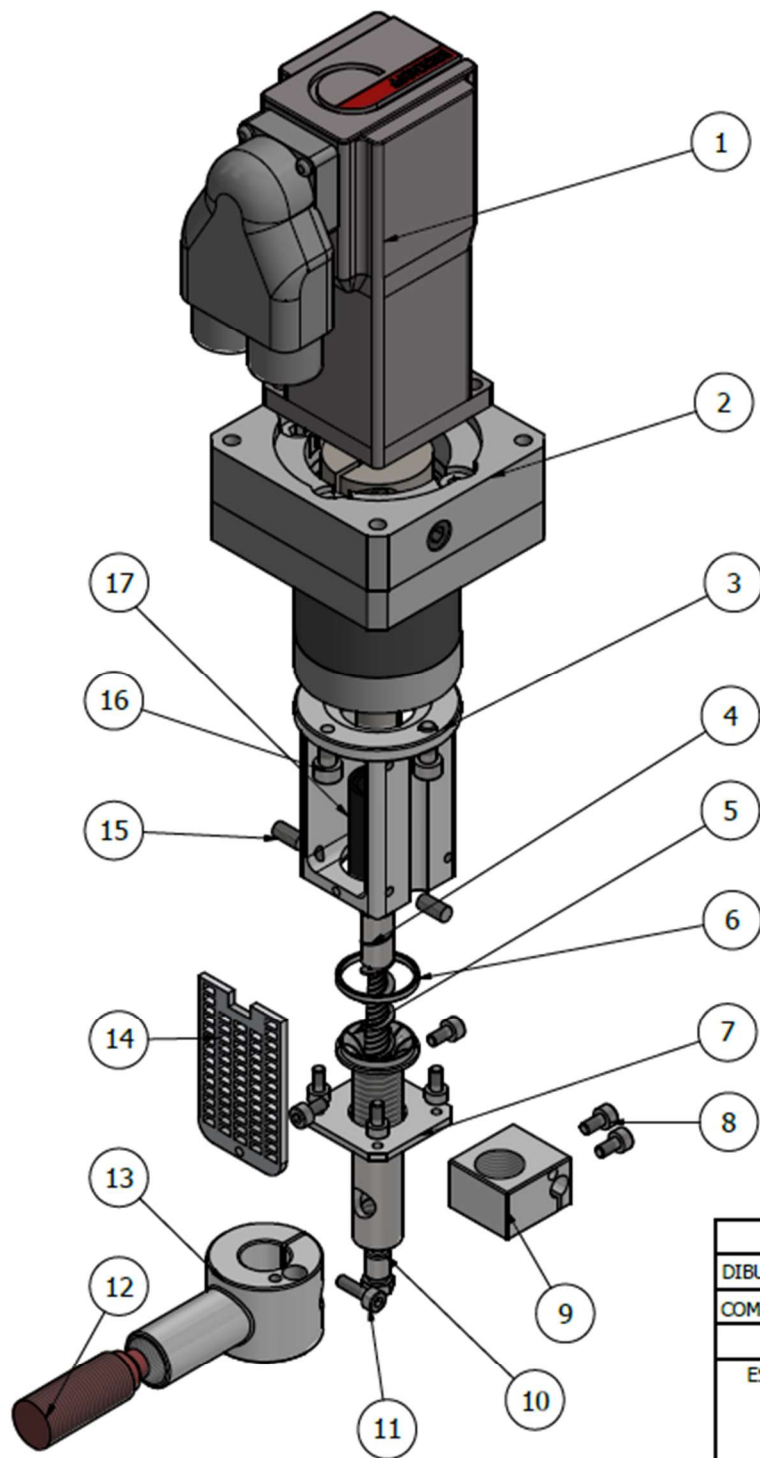
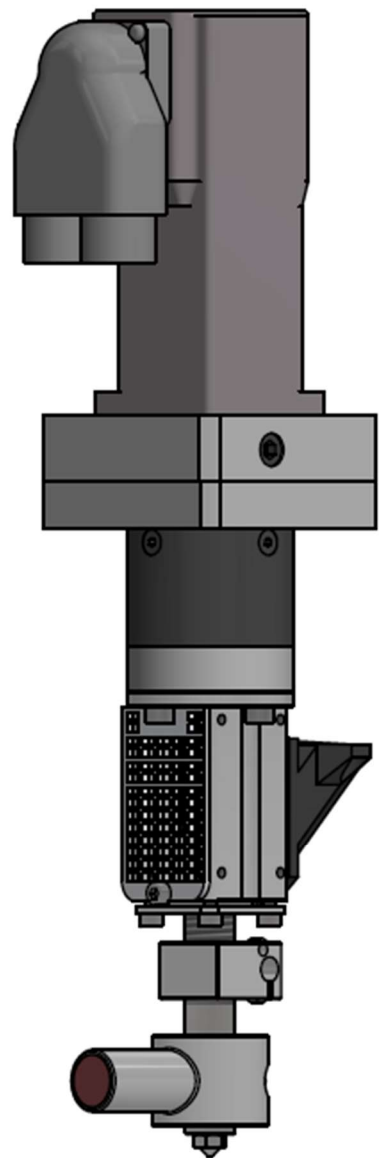
**PLE040**

Mechanical data	1-stage					
	3	4	5	7	8	10
Ratio $i$						
Efficiency under full load $\eta$ [%]	98					
Mass moment of inertia $J_i$ [kgcm <sup>2</sup> ]	0.014 to 0.027					
Running noise $Q_g$ [dB(A)] <i>Sound pressure level at a distance of 1 m: Measured at an input speed of <math>n_1 = 3000 \text{ min}^{-1}</math> without load; <math>i = 5</math></i>	58					
Weight $m_G$ [kg]	0.35					
Service life L10h tL [h]	30000					
<b>Torques and speeds</b>						
Nominal output torque $T_{2N}$ [Nm]	11	15	14	8.5	6	5
Maximum output torque $T_{2B}$ [Nm] <i>Permissible for 30000 revolutions of the output shaft</i>	17.5	24	22	13.5	10	8
EMERGENCY STOP torque $T_{2Stop}$ [Nm]	22.5	30	36	26	27	
Mean thermal input speed $n_{1N}$ [min <sup>-1</sup> ] <i>At <math>T_{2N}</math> &amp; S1</i>	5000					
Maximum input speed $n_{1Limit}$ [min <sup>-1</sup> ]	18000					
Maximum bending moment $M_b$ [Nm] <i>In relation to the gear unit drive flange</i>	3					
<b>Torsion and forces</b>						
Maximum torsional backlash $j_i$ [arcmin]	< 15					
Maximum torsional rigidity $C_{t21}$ [Nm/arcmin]	0.7 to 1.0					
Radial force for 20000 h $F_{r20000h}$ [N]	200					
Axial force for 20000 h $F_{a20000h}$ [N]	200					
Radial force for 30000 h $F_{r30000h}$ [N]	160					
Axial force for 30000 h $F_{a30000h}$ [N]	160					
Maximum axial force $F_{aStat}$ [N] <i>In relation to the shaft center at the output</i>	200					
Maximum radial force $F_{rMax}$ [N] <i>In relation to the shaft center at the output</i>	240					
Breakdown torque for 20000 h $M_{K20000}$ [Nm]	5					
Breakdown torque for 30000 h $M_{K30000}$ [Nm]	4					
<b>Housing</b>						
Properties	Anodized; heat-treated steel					
Color	Anthracite gray; RAL 7016					
Seal	Sealed bearing disks					

## Technical data

Mechanical data		2-stage								
Ratio $i$		9	12	15	16	20	25	32	40	64
Efficiency under full load $\eta$ [%]		97								
Mass moment of inertia $J_1$ [kgcm <sup>2</sup> ]		0.015 to 0.026								
Running noise $Q_g$ [dB/A] <i>Sound pressure level at a distance of 1 m: Measured at an input speed of <math>n_1 = 3000 \text{ min}^{-1}</math> without load; <math>i = 5</math></i>		58								
Weight $m_G$ [kg]		0.45								
Service life L10h tL [h]		30000								
Torques and speeds										
Nominal output torque $T_{2N}$ [Nm]		16.5	20	18	20	20	18	20	18	7.5
Maximum output torque $T_{2B}$ [Nm] <i>Permissible for 30000 revolutions of the output shaft</i>		26	32	29	32	32	29	32	29	12
EMERGENCY STOP torque $T_{2Stop}$ [Nm]		33	40	36	40	40	36	40	36	27
Mean thermal input speed $n_{1N}$ [min <sup>-1</sup> ] <i>At <math>T_{2N}</math> &amp; S1</i>		5000								
Maximum input speed $n_{1Limit}$ [min <sup>-1</sup> ]		18000								
Maximum bending moment $M_b$ [Nm] <i>In relation to the gear unit drive flange</i>		3								
Torsion and forces										
Maximum torsional backlash $j_t$ [arcmin]		< 19								
Maximum torsional rigidity $C_{t21}$ [Nm/arcmin]		0.8 to 1.0								
Radial force for 20000 h $F_{r20000h}$ [N]		200								
Axial force for 20000 h $F_{a20000h}$ [N]		200								
Radial force for 30000 h $F_{r30000h}$ [N]		160								
Axial force for 30000 h $F_{a30000h}$ [N]		160								
Maximum axial force $F_{2AMax}$ [N] <i>In relation to the shaft center at the output</i>		200								
Maximum radial force $F_{2RMax}$ [N] <i>In relation to the shaft center at the output</i>		240								
Breakdown torque for 20000 h $M_{K20000}$ [Nm]		5								
Breakdown torque for 30000 h $M_{K30000}$ [Nm]		4								
Housing										
Properties		Anodized; heat-treated steel								
Color		Anthracite gray; RAL 7016								
Seal		Sealed bearing disks								





### LISTA DE PIEZAS

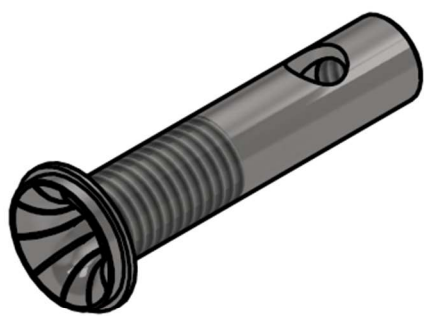
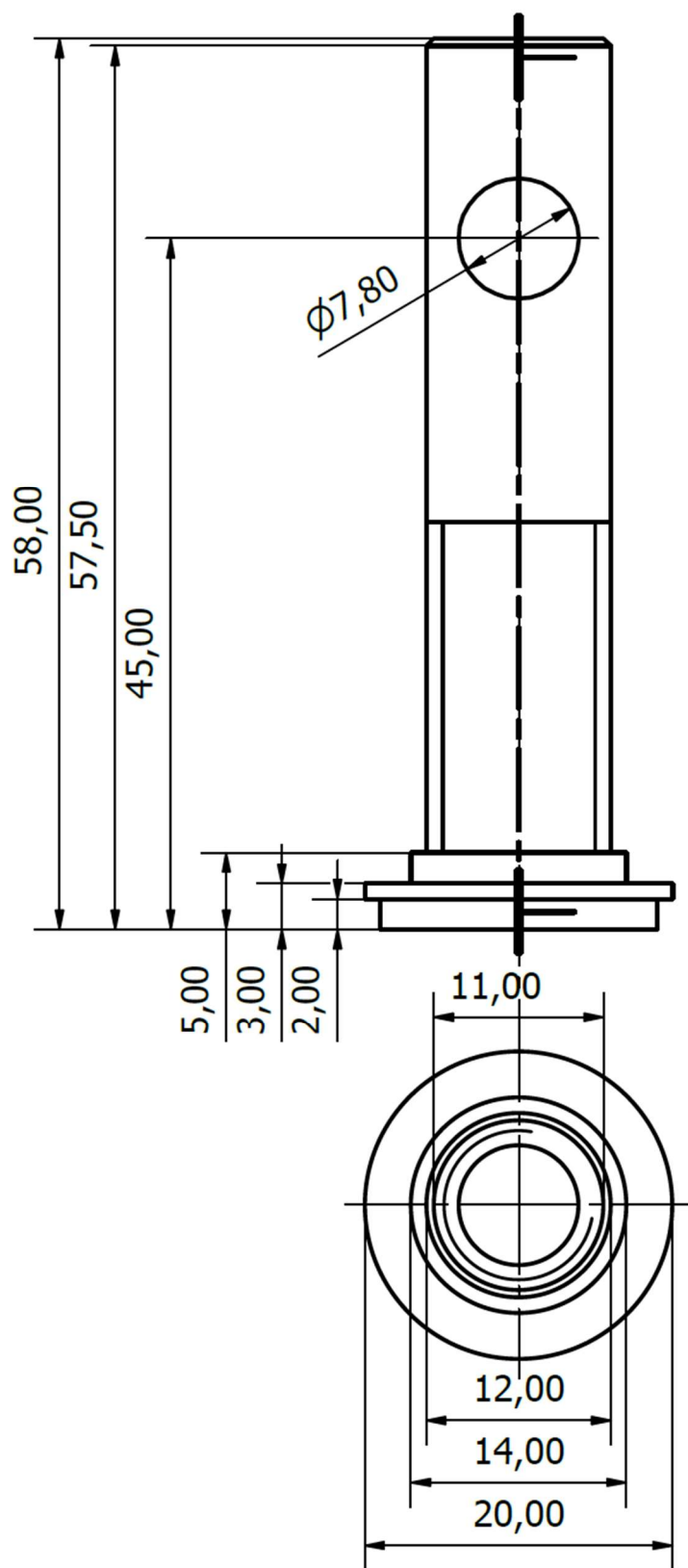
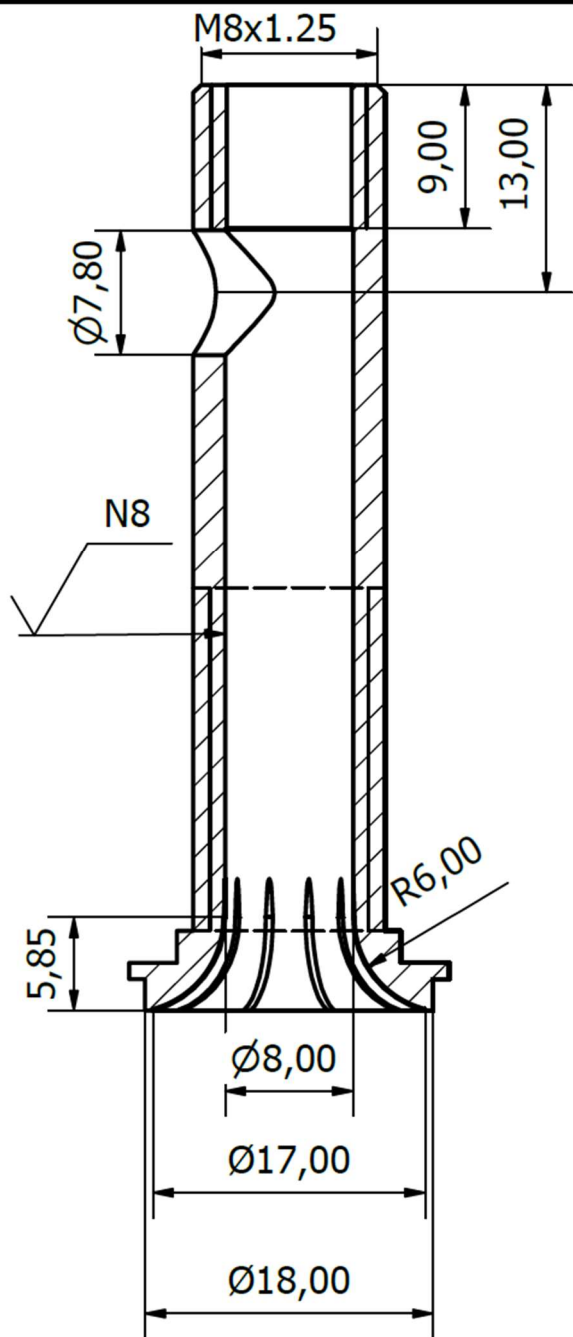
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	ServoMotor
2	1	ServoReductora
3	1	Cuerpo de Alimentación
4	1	Husillo
5	1	Barril
6	1	Arandela
7	1	PlacaSujeccion
8	8	ISO 4762 - M3 x 6
9	1	ElementoDeCalentamiento
10	1	Boquilla
11	1	ISO 4762 - M3 x 10
12	1	Sensor de Presión
13	1	ElementoDeCalentamiento_ConSensor
14	1	Rejilla
15	2	DIN 976-1 - M4 x 8 - A
16	4	ISO 4762 - M4 x 10
17	1	PiezaUnion





	FECHA	FIRMA
DIBUJO	15/05/2021	C.GONZÁLEZ
COMPROBADO	15/05/2021	C.GONZALEZ



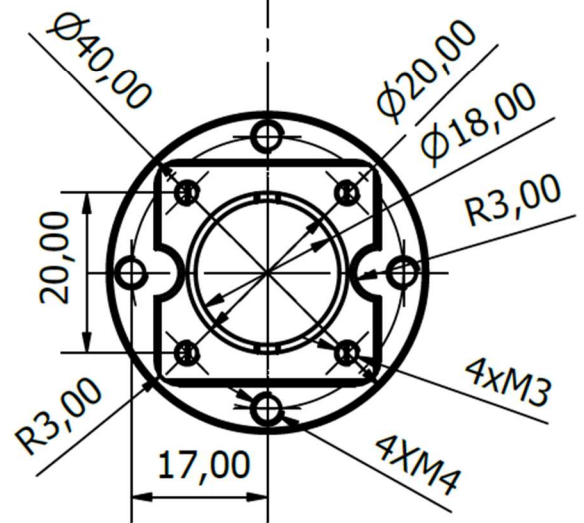
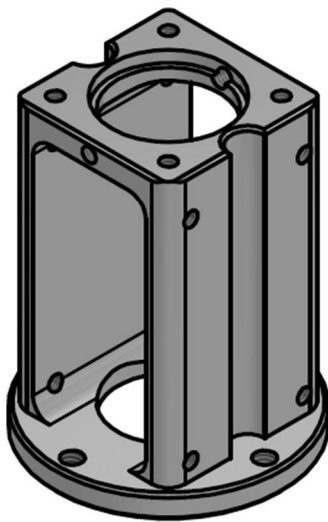
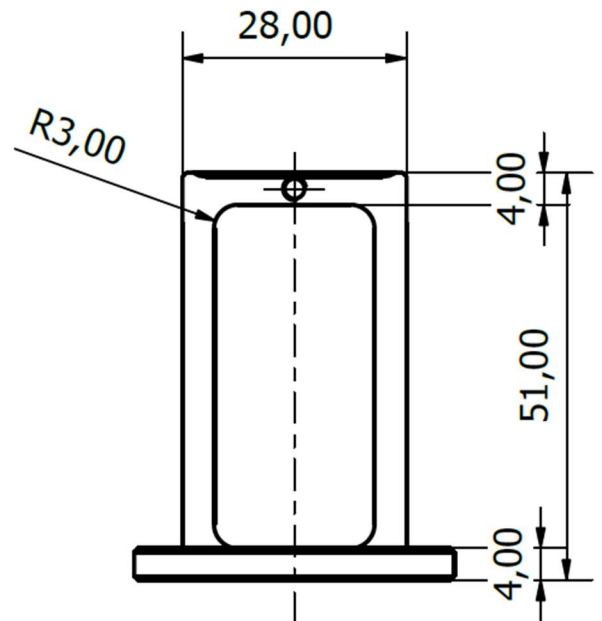
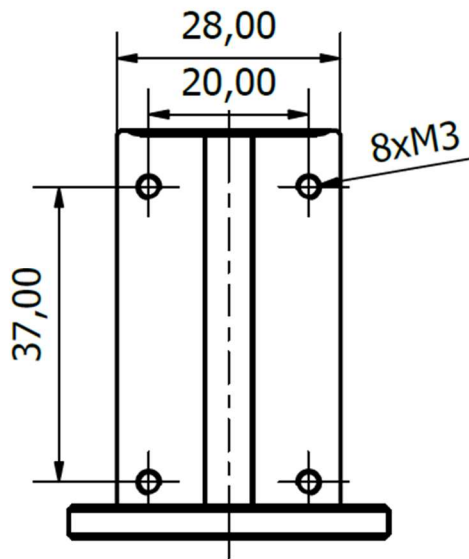
Universidad de Valladolid

ESCALA		MATERIAL
		Nº DE PLANO 1
		Nº DE HOJA





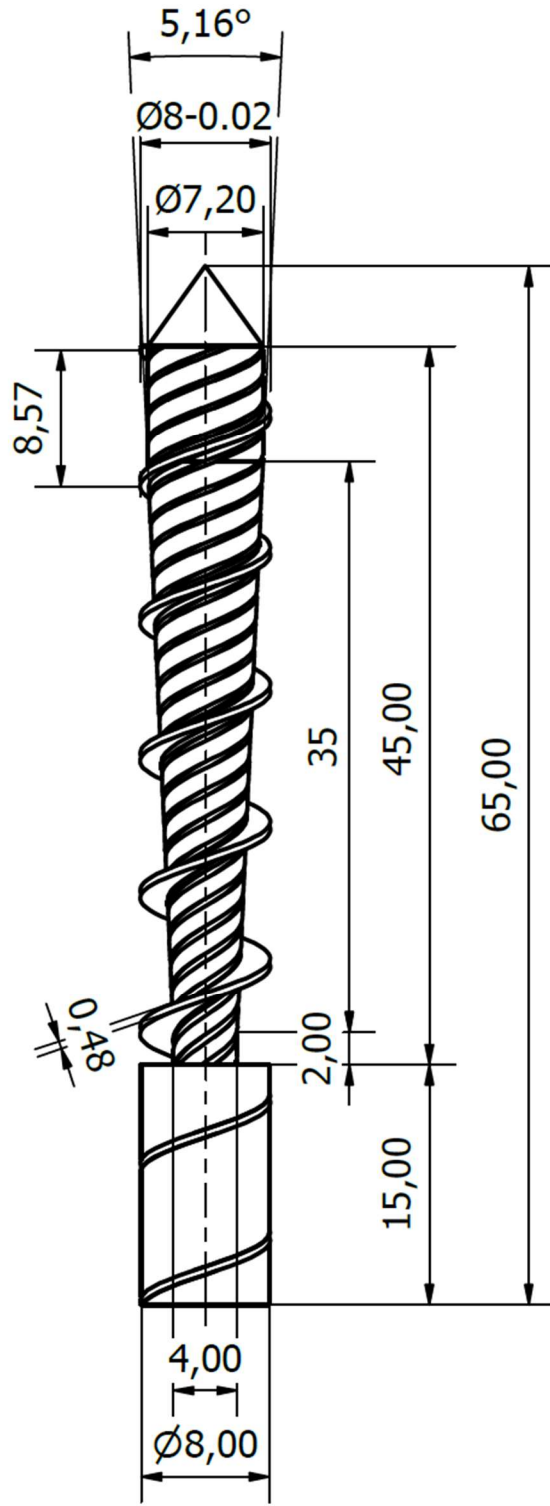
 		FECHA	FIRMA	  <b>Universidad de Valladolid</b>
DIBUJO		15/05/2021	C.González	
COMPROBADO		15/05/2021	C.González	
ESCALA				MATERIAL
<b>2:1</b>				<b>Acero AISI 1018</b>
				Nº DE PLANO <b>2</b>
				Nº DE HOJA

2:1



Chaflanes de 0.5 mm

	FECHA	FIRMA	  <b>Universidad de Valladolid</b>
DIBUJO	15/05/2021	C.González	
COMPROBADO	15/05/2021	C.González	
TOLERANCIA	ISO 2768		
ESCALA			MATERIAL
<b>1:1</b>			Aluminio Serie 1000 (A determinar)
			Nº DE PLANO 3
			Nº DE HOJA



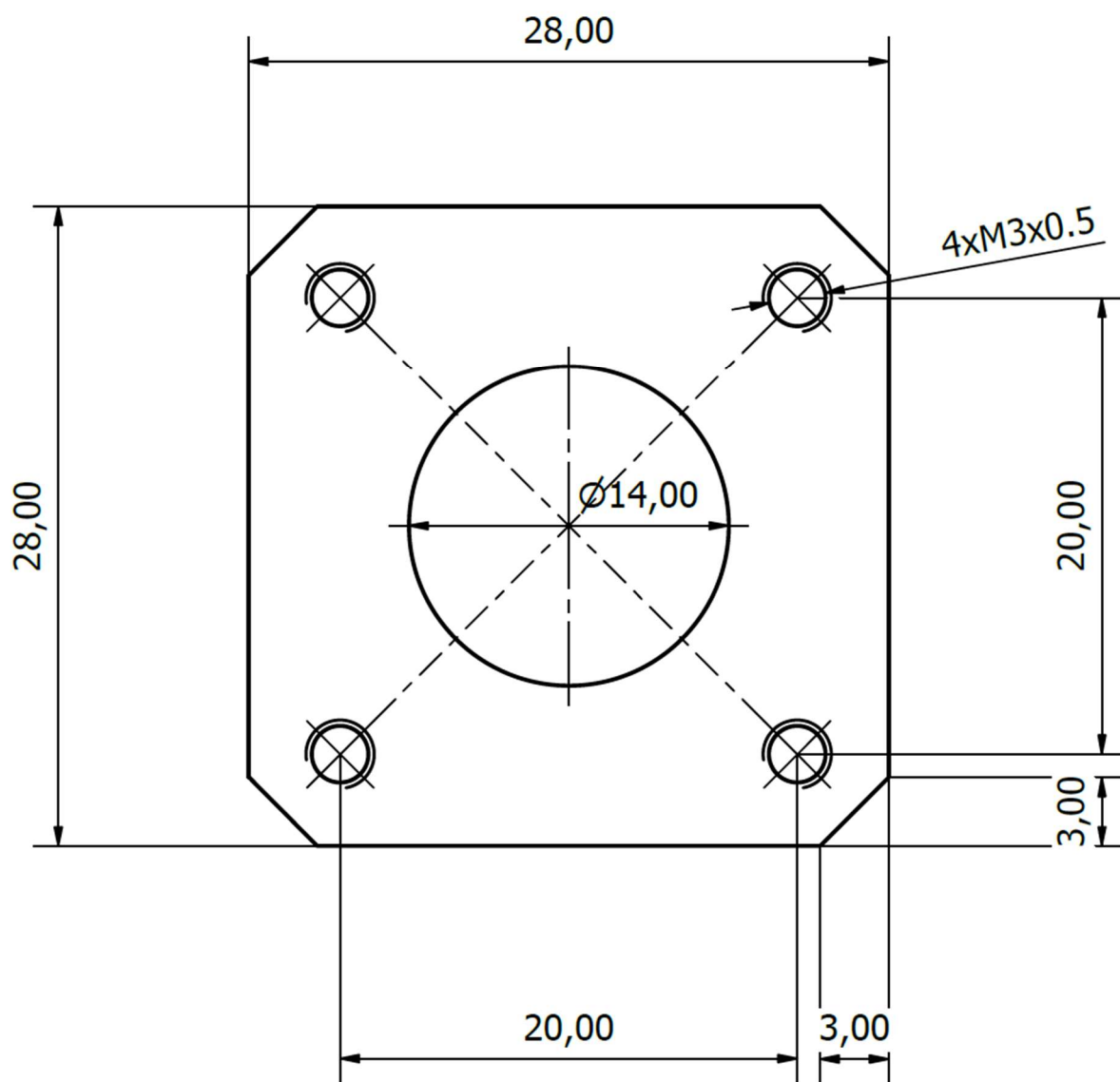
	FECHA	FIRMA
DIBUJO	15/05/2021	C.González
COMPROBADO	15/05/2021	C.González
TOLERANCIA	ISO 2768	



Universidad de Valladolid

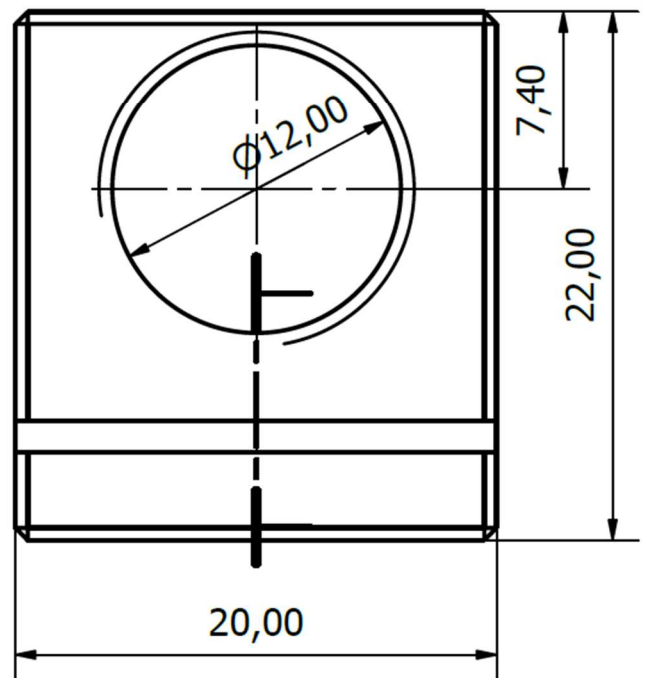
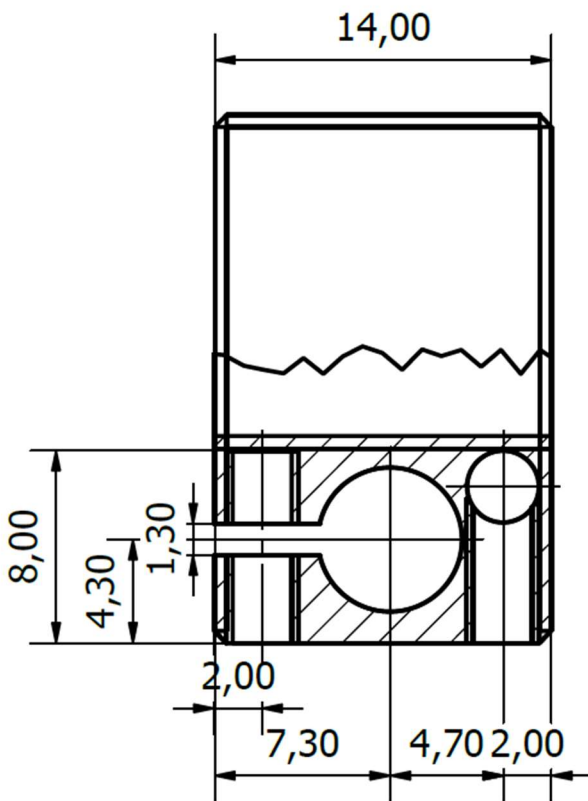
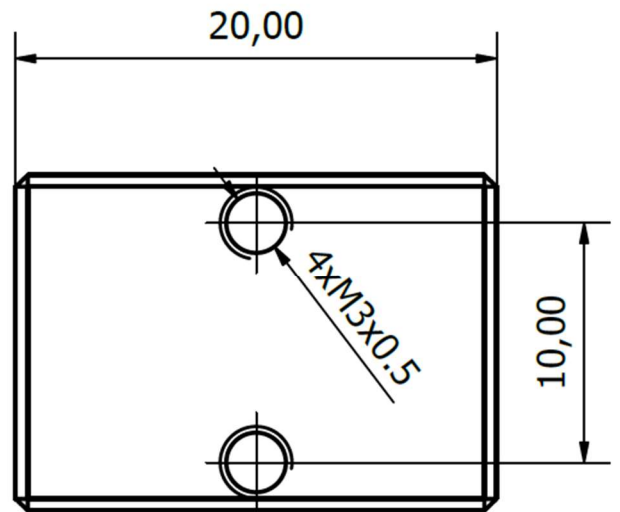
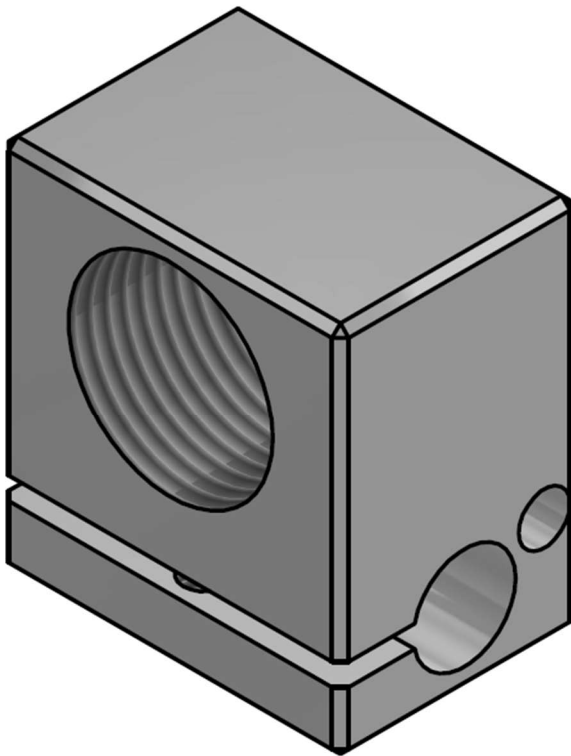
ESCALA	
<b>2:1</b>	

MATERIAL	ACERO AISI 4140
Nº DE PLANO	4
Nº DE HOJA	

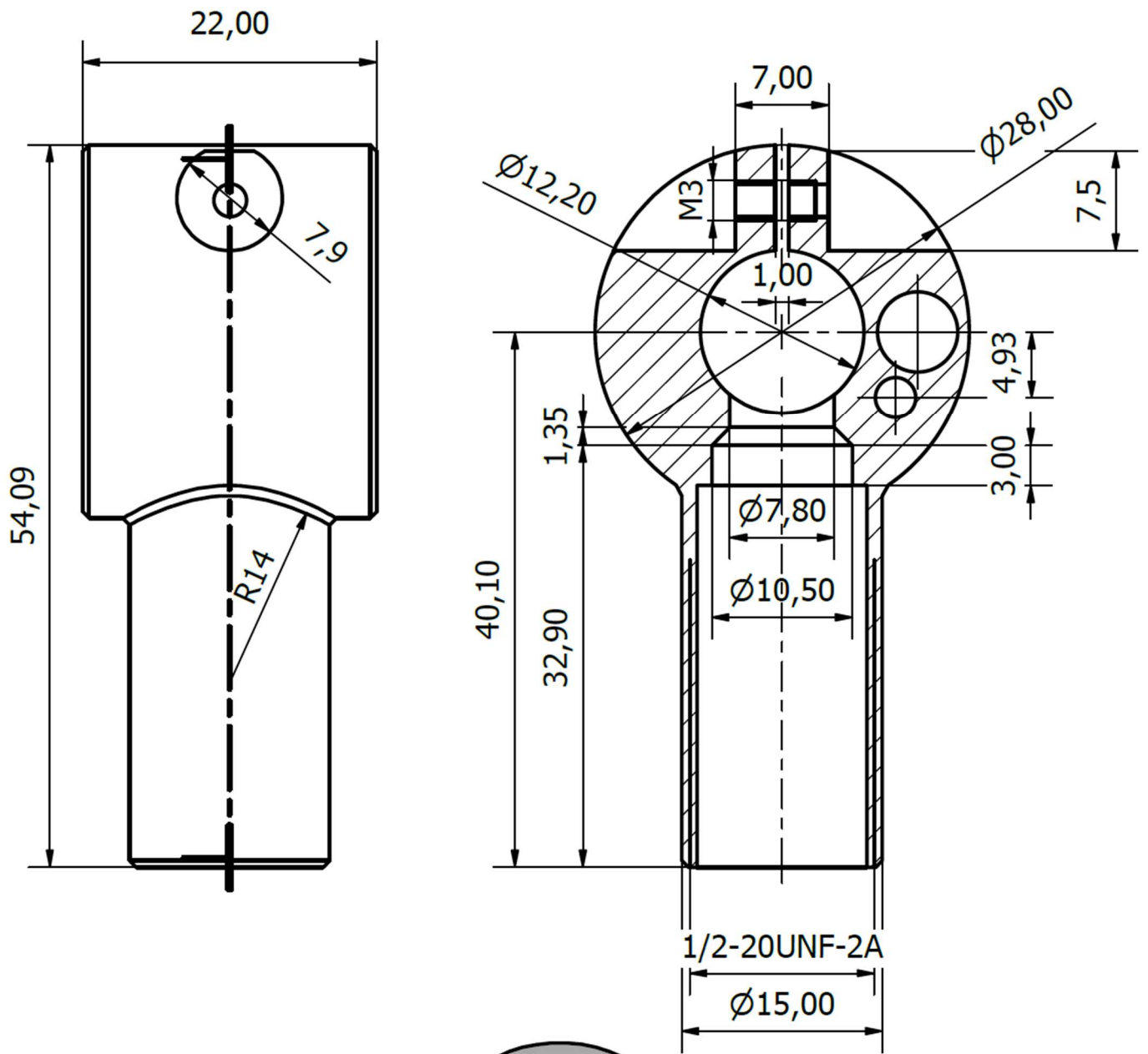


		FECHA	FIRMA		 Universidad de Valladolid
DIBUJO	15/05/2021	C.González			
COMPROBADO	15/05/2021	C.González			
TOLERANCIA	ISO 2768				
ESCALA	Espesor de 2 mm			MATERIAL	Aluminio Serie 1000
<b>3:1</b>				Nº DE PLANO	5
				Nº DE HOJA	

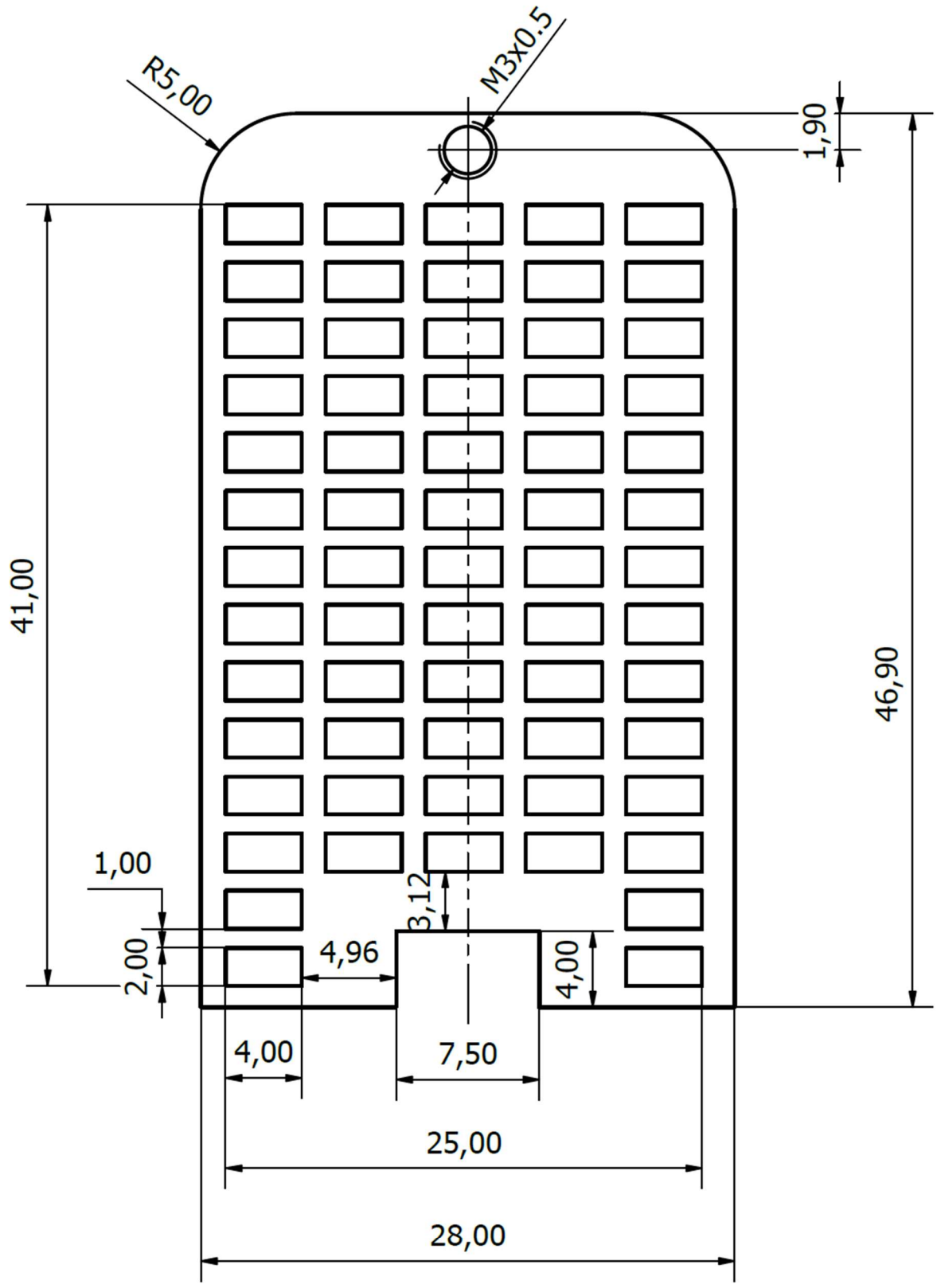




	FECHA	FIRMA	  Universidad de Valladolid
DIBUJO	15/05/2021	C.González	
COMPROBADO	15/05/2021	C.González	
TOLERANCIA	ISO 2768		
ESCALA	Chaflanes de 0.5 mm		MATERIAL
<b>3:1</b>			Aluminio Serie 1000
	Nº DE PLANO	6	
	Nº DE HOJA		



		FECHA	FIRMA	  <b>Universidad de Valladolid</b>	
DIBUJO	15/05/2021	C.González			
COMPROBADO	15/05/2021	C.González			
TOLERANCIA	ISO 2768				
ESCALA	<b>3:1</b>			MATERIAL	
				<b>Chafles de 0.5 mm</b>	
				Nº DE PLANO	7
				Nº DE HOJA	



 	FECHA	FIRMA
DIBUJO	15/05/2021	C.González
COMPROBADO	15/05/2021	C.González



Universidad de Valladolid

ESCALA <b>3:1</b>	Espesor de 2 mm	MATERIAL	PLA
		Nº DE PLANO	8
		Nº DE HOJA	