

# Índice general

<b>1. Introducción y objetivos</b>	<b>2</b>
1.1. Organización de este documento . . . . .	5
<b>2. Conceptos previos</b>	<b>6</b>
2.1. Impresoras 3D . . . . .	6
2.2. Fabricación de modelado por deposición fundido . . . . .	7
2.3. Materiales usados en impresión 3D . . . . .	9
2.4. Extrusión de polímeros . . . . .	10
2.5. Reprap . . . . .	12
2.6. Reprap en España . . . . .	14
<b>3. Estado del arte</b>	<b>16</b>
<b>4. Desarrollo de la solución propuesta</b>	<b>19</b>
4.1. Planificación . . . . .	19
4.2. Herramientas empleadas . . . . .	20
4.2.1. GitHub . . . . .	20
4.2.2. GNU Octave . . . . .	20
4.2.3. Autodesk Inventor . . . . .	20
4.2.4. Cura 15.02.1 . . . . .	21
4.2.5. IPython . . . . .	21
4.3. Elección de los componentes . . . . .	22
4.4. Programación del PLC. . . . .	26
4.4.1. Control de la temperatura del extrusor . . . . .	26
4.4.2. Lectura de datos del sensor de diámetro . . . . .	29
4.4.3. Almacenar la información registrada en un medio físico . . . . .	30
4.4.4. Acceso remoto a los datos de producción . . . . .	31
<b>5. Experimentos realizados</b>	<b>33</b>
5.1. Validación del sistema sin tractora . . . . .	33
5.1.1. Condiciones del ensayo . . . . .	34
5.1.2. Análisis de los resultados obtenidos . . . . .	34
5.2. Validación del sistema con tractora . . . . .	36
5.2.1. Condiciones del ensayo . . . . .	37
5.2.2. Análisis de los resultados obtenidos . . . . .	37
5.3. Lazo de control para regular el filamento . . . . .	41
5.4. Discusión de los resultados obtenidos . . . . .	44
<b>6. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>45</b>
6.1. Cumplimiento de los objetivos . . . . .	45
6.2. Líneas de trabajo abiertas en BQ a raiz de este TFG . . . . .	45
6.3. Mejoras . . . . .	46
6.4. Valoración final. . . . .	46

# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

En la actualidad, la empresa BQ se ha especializado en fabricar y distribuir impresoras 3D junto con sus consumibles. En 2013, se creó un departamento de Innovación y Desarrollo, encabezado por Juan Gonzalez y Alberto Valero. En ese comienzo se distribuye material relacionado con las impresoras 3D para que cualquier persona pueda construirse una impresora 3D. Este material no es fabricado por BQ directamente, tan solo realiza la tarea de distribuidor.

A medida que BQ adquiere experiencia en el mercado, empieza a crear una línea de investigación para desarrollar sus propias impresoras 3D, como es el caso de la impresora Witbox y la impresora Prusa Hephestos (ver Figura 1.1). En este caso BQ tiene un papel importante a lo largo del desarrollo del producto, desde la elección de las características finales del mismo, así como el aspecto final del packaging, es decir, BQ pasa de tener un papel de distribuidor a ser la parte principal del desarrollo del producto.



Figura 1.1: Impresoras fabricadas por BQ. Podemos ver las dos impresoras que desarrolla BQ, a la izquierda, Witbox impresora que ya se vende montada. A la derecha, Prusa Hephestos, se vende en formato kit para que el usuario final la monte (DIY). Fuente [1].

A la vez que se venden las impresoras 3D, BQ también vende el principal consumible para que las impresoras 3D puedan funcionar, plástico en forma de filamento. Este plástico se distribuye en unas bobinas (ver Figura 1.2), en las que está almacenado un hilo continuo de plástico con un diámetro específico, en este caso, 1,75mm, así mismo, cada filamento tiene un color distinto. Este consumible, es creado por otras empresas y BQ simplemente distribuye. Una vez que BQ tiene un puesto en el mercado de las impresoras 3D, decide entonces crear su propio filamento y tener más controlado la calidad del filamento que vende.

Sin embargo, la fabricación del filamento es más complicada que la construcción de las impresoras 3D. Se necesitan máquinas capaces de fundir plástico y darle la forma de filamento, estas máquinas son las ex-



Figura 1.2: Distintos filamentos de BQ. Fuente [1].

trusoras, de las cuales BQ no dispone ninguna y no se tiene previsión de que al comprar una se pueda llegar a amortizar su compra. Por ello, se decide sub-contratar el proceso de fabricación a una empresa experta en la extrusión de plásticos.

La empresa PESL es especialista en extrusión de perfilería de plástico. BQ y PESL empiezan a trabajar en la fabricación de un filamento que cumpla las características necesarias para las impresoras 3D. En una primera aproximación estas características son, el material y el diámetro final. Después de pruebas de fabricación del filamento por parte de ambas empresas, BQ empieza a vender filamento fabricado por PESL.

Aparte de vender el filamento que fabrica PESL, BQ también hace uso de él en sus instalaciones y desarrollo de proyectos, se empieza a detectar entonces un problema, no todas las bobinas del mismo lote de fabricación tienen la misma calidad, llegando a darse el caso que en una misma bobina, no todo el filamento es igual. Los problemas detectados tienen que ver con el aspecto visual del filamento, la mezcla de color no es homogénea, y provoca que se genere un degradado de color en las piezas impresas. Así mismo, y mucho más importante, el diámetro del filamento no es constante (ver Figura 1.3).

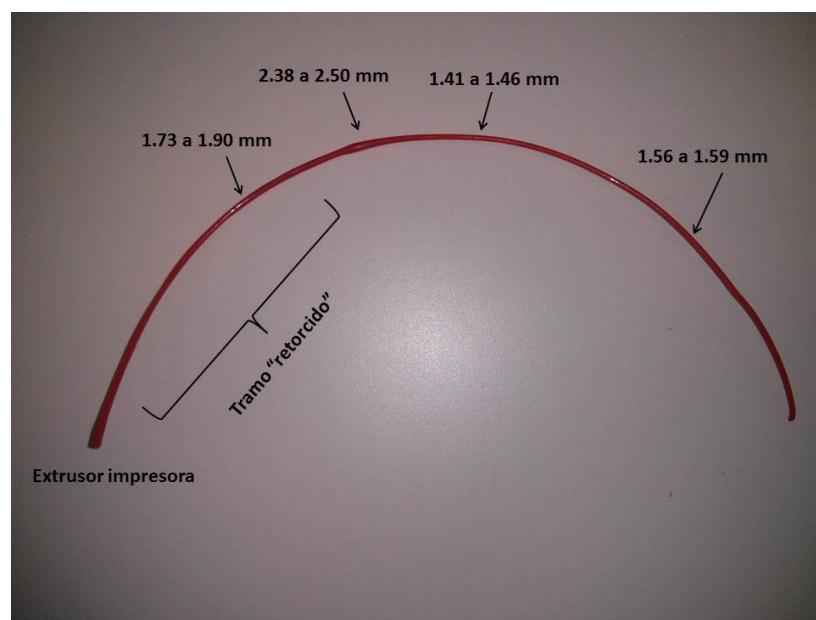


Figura 1.3: Muestra de filamento con problemas en el diámetro. Podemos observar cómo en un tramo de filamento, el diámetro no es constante.

---

El problema que se tiene en el color, es algo secundario, ya que puede considerarse visual y no afecta al funcionamiento de los componentes de la impresora. No pasa lo mismo con el problema del diámetro, ya que la manera en la que se descubre, es que las impresoras dejan de imprimir pasado un tiempo, puesto que si el diámetro nominal del filamento sale de un determinado rango de valores, tanto por exceso como por déficit, se producen atascos en la impresora. Estos atascos, en el mejor de los casos, sólo supone la limpieza del extrusor de la impresora y se puede volver a utilizar, pero en ocasiones el atasco puede dejar inservible el extrusor y es necesario reemplazarlo.

No tardan en llegar las primeras reclamaciones de clientes, en las que su impresora deja de imprimir de forma temporal o incluso que el uso del filamento de BQ daña las impresoras 3D de los clientes, suponiendo un gasto extra tanto para BQ, ya que ofrece una garantía por su producto, como para PESL, que no todo el filamento que fabrica reporta beneficios. Es por ello que se pone en aviso a PESL y se toman decisiones para mejorar este problema.

A pesar de que PESL es especialista en extrusión de perfiles de plástico, es la primera vez que se dedican a la extrusión de filamento. Aunque de forma teórica no hay ninguna diferencia, si lo hay en el uso final que se va a dar al plástico. En el caso de un perfil extruido, su uso será rematar obras, recubrimiento aislante y tuberías. El uso final que se le va a dar al filamento de plástico va a suponer un refundido del material, proceso en el cual influye la manera en cómo se fabricó. Igualmente el material con el que se trabaja para fabricar filamento, no es el mismo que el que se utiliza para extruir perfiles y requiere de otros tratamientos de fabricación.

Para minimizar estos problemas, se incorpora a la línea de fabricación un elemento mecánico, por el cual pasa el filamento, y si este supera un diámetro se parte y la producción es parada. También se empieza a registrar el diámetro del filamento y las temperaturas de fabricación en un ordenador para intentar tener un mejor control de la trazabilidad de las bobinas, y así acotar el problema que haya en la fabricación.

Tras estas mejoras, las reclamaciones de los clientes siguieron llegando a BQ y PESL y, con ellas, las pérdidas para ambos. Gracias a que cada bobina contiene un código QR en el que se incluye el número de lote de fabricación, se solicitan los registros del lote de fabricación a PESL para intentar ver posibles causas. Sin embargo, el tiempo desde que se piden hasta que son dados, es demasiado largo. Una vez que se tiene el registro, se comprueba que faltan datos de temperaturas, puesto que estos valores son introducidos a mano al no estar conectados con el ordenador que registra la información del diámetro. Y el muestreo de los datos no es siempre constante, por lo que hay tramos de la bobina de los que no se tienen información.

Desde BQ se decide entonces tomar una solución para tener todos los registros de una manera cómoda y fiable. Se piensa en desarrollar un sistema automático en el cual estén conectados todos los elementos que componen la línea de extrusión y así poder acceder a los datos de:

- Fecha de fabricación.
- Diámetro final del filamento.
- Temperaturas de todo el proceso.
- Velocidad de extrusión.

Así mismo, esta información será almacenada en una base de datos, la cual se podrá acceder de manera remota. De esta manera, se quita carga de trabajo a PESL para que se dediquen a fabricar filamento, y desde BQ se puedan analizar los datos para ver causas de fallo.

El trabajo realizado para conseguir un primer demostrador de un sistema de adquisición de datos y comprobar que puede ser útil para solucionar el problema que tenemos, pasa por diferentes etapas en las que se encuentra buscar qué dispositivo es el más adecuado para llevar el control y, que este, sea estable, robusto y lo más versátil posible, para poder implementarlo en cualquier línea de extrusión. Una vez conseguido la unidad

---

central de control, el siguiente paso será realizar la programación para que el sistema, de forma automática, adquiera los datos que se le indiquen y guarde la información en un medio físico para su posterior análisis.

Una vez que el sistema diseñado es capaz de almacenar la información, será necesario instalarlo en una línea de extrusión para demostrar que el sistema es válido ayudando a minimizar el error que se genera en la fabricación del filamento, y aumentar el porcentaje de bobinas con un filamento que cumpla los requisitos de calidad impuestos por BQ.

A continuación, se detallan los objetivos a conseguir en el proyecto:

- Realizar un sistema capaz de leer la información más importante en la fabricación del filamento
- Que el sistema de adquisición pueda ser fácilmente adaptado a cualquier línea de extrusión.
- Estudio de los datos adquiridos y desarrollo del modelo teórico de la planta.

## 1.1. Organización de este documento

En este primer capítulo hemos visto el problema que se presenta a la hora de obtener un filamento de calidad y la importancia de obtener una herramienta capaz de ayudarnos a entender cuales son las causas que provocan fallos durante la producción en la línea de extrusión. Vemos también la solución que se propone, realizar un sistema de adquisición de datos para el posterior análisis de los mismos.

En el Estado del arte se analizan las soluciones que otras empresas proponen para el mismo problema y cómo nuestro sistema puede mejorar los distintos sistemas disponibles en el mercado.

El capítulo 4, Desarrollo de la solución propuesta, muestra el trabajo realizado para cumplir el objetivo principal: Planificar las distintas tareas necesarias para el desarrollo del sistema, detallar las herramientas utilizadas y por qué se han decidido usar; y se verá la instalación del sistema en una línea de extrusión de pequeñas dimensiones, para poder comprobar como de válido es nuestro sistema

En Validación del sistema veremos los ensayos realizados para dar validez a que el sistema desarrollado es válido para minimizar el error presentado en la introducción del proyecto.

Por último, hablaremos de si el sistema desarrollado cumple el objetivo principal marcado. También veremos los aportaciones que se han derivado a la hora de realizar el proyecto, en forma de pequeños sistemas capaces de solucionar otros problemas que en un primer lugar no eran ámbito de este trabajo final de grado.

# Capítulo 2

## Conceptos previos

### 2.1. Impresoras 3D

En los últimos años ha tenido un gran auge las denominadas impresoras 3D. Máquinas capaces de crear un objeto físico mediante un proceso de fabricación aditiva. Este tipo de fabricación está siendo una nueva revolución, de igual manera que pasó hace unos años con la conocida web 2.0, en la que el usuario era capaz de generar contenido para la propia página. Con la fabricación aditiva, pasaremos de la fabricación 1.0 (producción de objetos físicos por grandes empresas y expertos) a la fabricación 2.0 (producción de los objetos por el usuario) [2].

La fabricación aditiva es una colección de procesos que unen materiales para crear objetos físicos en 3D directamente desde un diseño en ordenador. Estos procesos, se caracterizan en que van añadiendo distintas capas que conforman el elemento final (ver Figura 2.1), que es todo lo contrario al mecanizado, en la que se conforma la pieza por eliminación de material, ya sea por arranque de viruta o por abrasión.

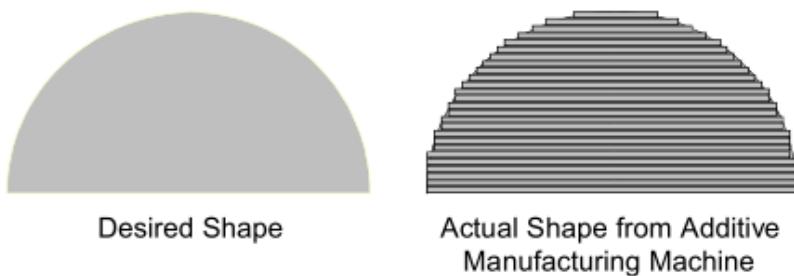


Figura 2.1: Aproximación de una pieza con fabricación aditiva. A la izquierda podemos observar la forma final deseada. A la derecha la forma final obtenida y como la pieza está formada por un número determinado de capas. Fuente [2].

Una de las ventajas de la fabricación aditiva es su rapidez [3], dependiendo de la complejidad de la pieza puede suponer un par de horas de fabricación, frente a una jornada completa de trabajo con las máquinas de mecanizado. Por ello, también se conocen a este tipo de máquinas, como máquinas de prototipado rápido.

Antiguamente, cuando sólo las grandes empresas disponían de ordenadores y se quería hacer algún tipo de cálculo numérico o tratamiento de información, era necesario ir a los centros de cálculos con los datos requeridos, para que, después de días o incluso semanas, obtener nuestros resultados y en el mejor de los casos, haber realizado correctamente el ensayo y no tener que volver a repetirlos, si los resultados no eran los deseados, se debería volver a repetir la operación.

Con la fabricación de las piezas pasa algo similar. En el caso de que quisiéramos diseñar alguna pieza para cubrir nuestras necesidades, debíamos acudir a empresas que dispusieran de las máquinas necesarias para tratar los materiales, y pasado cierto tiempo tendríamos la pieza. Una vez en nuestro poder, deberíamos

comprobar que la pieza cumple con nuestras especificaciones y ver que no nos equivocáramos a la hora de tomar alguna medida y saber las tolerancias de la máquina. Gracias a la tecnología aditiva, el tiempo se ha acortado, y como veremos más adelante, a día de hoy, no es necesario acudir a ninguna empresa para poder realizar nuestras propias piezas.

La tecnología aditiva lleva muchos años usándose y sin embargo no ha sufrido muchos cambios desde que empresas como 3D Systems, Stratasys o incluso el MIT, la usaran a mediados de los años 80. A pesar de ello, no ha sido hasta hace unos pocos años (2009) cuando la tecnología ha llegado al público en general. Se debe a que el funcionamiento de este tipo de tecnologías estaban protegidas por patentes. La principal patente es la que desarrolló S. Scott Crump co-fundador de Stratasys [4], la cual expiro en 2009 y permitió que pudiera extenderse el uso de esta tecnología. En la Figura 2.2 podemos ver una imagen extraida de la patente.

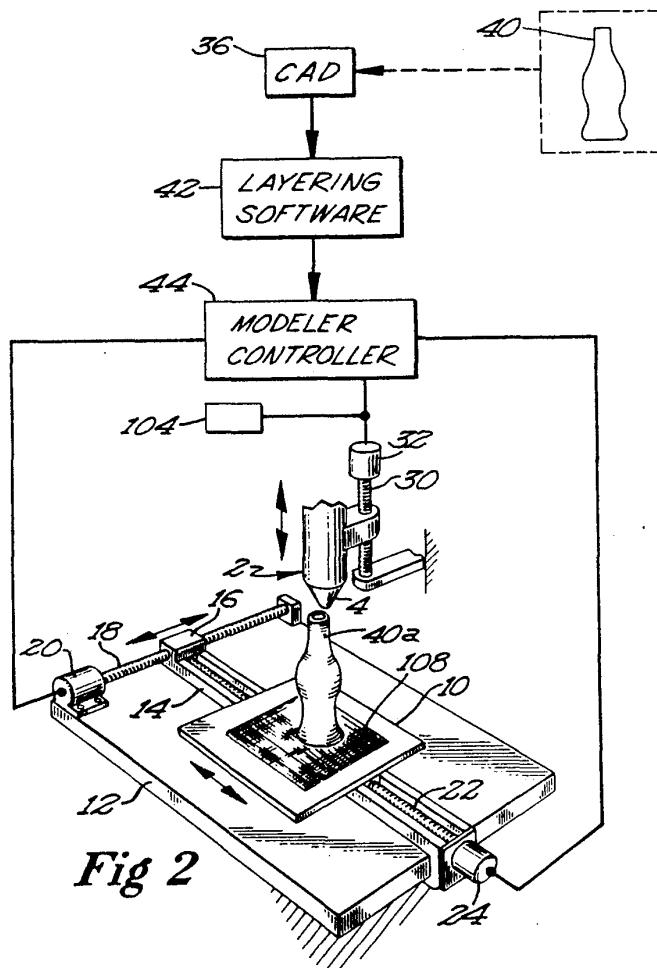


Figura 2.2: Esquema de la patente de S. Scott Crump en el que se detallan los distintos elementos que conforman un sistema capaz de fabricar un modelo físico a partir de un diseño generado por ordenador. Fuente [4].

## 2.2. Fabricación de modelado por deposición fundido

La fabricación de modelado por deposición fundido (en inglés FDM®) es la tecnología aditiva que más se ha popularizado en los últimos años. Aunque estas siglas están registradas por la empresa Stratasys Inc. ya que su co-fundador, S. Scott Crump fue quien desarrollo esta tecnología, se usa el término equivalente,

---

fabricación con filamento fundido (FFF).

En la Figura 2.3 podemos ver en detalle el principio de funcionamiento de este tipo de impresoras. La máquina dispone de un elemento fusor (1), que está por encima de la temperatura de transición vítrea del polímero, haciendo que entre en un estado viscoso y maleable. El fusor deposita el polímero (2) en distintos niveles sobre una superficie plana (3) a la vez que se desplaza en los tres ejes cartesianos (X,Y,Z), de este modo, la pieza es creada con el filamento que solidifica al salir del fusor.

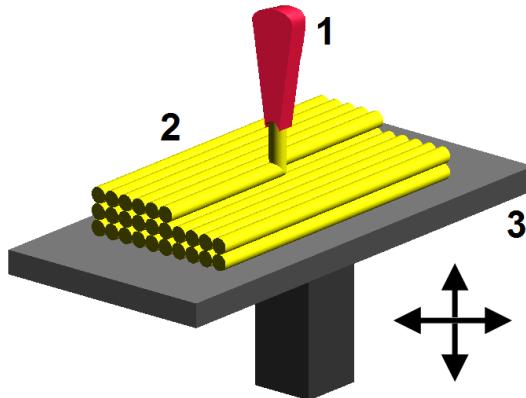


Figura 2.3: Principio de la fabricación con filamento fundido. (1) Elemento fusor o extrusor. (2) Polímero fundido. (3) Superficie capaz de desplazarse en los tres ejes cartesianos. Fuente [5].

Este sistema de fabricación, tiene tres pasos definidos:

- **Pre-procesado:** Un software especial lama en capas y calcula las trayectorias necesarias para crear el objeto que queremos fabricar.
- **Producción:** La impresora 3D calienta el termoplástico hasta alcanzar un estado viscoso y maleable y lo va depositando en capas muy finas siguiendo las trayectorias anteriormente calculadas por el software. En los sitios en los que es necesario un soporte, el software laminador hace que se incorpore material que hará de sustento para el plástico que quede al aire, el cual será quitado de la pieza final.
- **Post-procesado:** Una vez que la impresora termina, la pieza será usable. En caso de haber puesto material, el usuario deberá removerlo antes de poder dar la pieza por terminada.

El modelo en 3D que se quiera construir, primero deberá ser diseñado con un programa CAD (Computer Aided Design) el cual, será exportado en un fichero con formato STL (StereoLithography). Un fichero STL es una representación triangular de una geometría en 3D. La superficie es dividida en una serie de triángulos orientados denominadas caras. Cada cara, es definida por una normal y tres puntos [6]. Sin embargo, este fichero no puede ser interpretado por una máquina FFF ya que lo único que entiende son coordenadas.

Por ello, el fichero STL deberá ser tratado por un programa laminador que divida el modelo 3D en distintas capas (ver Figura 2.4) y genere las trayectorias necesarias para realizar cada capa. Este programa, almacenará las trayectorias en un lenguaje que se denomina G-code, que es comúnmente usado en control numérico (CNC), el cuál dirá a la impresora cómo hacer la pieza deseada.

Según explica Stratasys en su página web [7], la tecnología FFF tiene varios beneficios que la hacen idónea para fabricar:

- La tecnología es limpia y fácil de usar por el usuario.
- Los termoplásticos usados son estables mecánicamente y con el medio ambiente.
- Formas complejas que con otra tecnología serían costosas de fabricar, con FFF son mucho más prácticas de realizar.

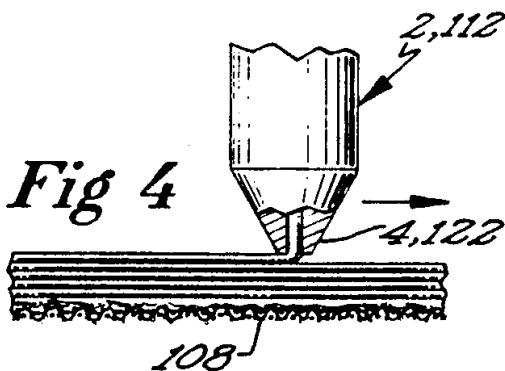


Figura 2.4: Detalle de un extrusor realizando una pieza.(2,112) Parte caliente por la que pasa el filamento y es fundido. (4,122) Boquilla por la que sale el filamento. (108) Distintas capas que conforman la pieza final. Fuente [4].

Como podemos leer en la patente de S. Scott Crump [4], una impresora FDM es:

*Aparato que incorpora un cabezal móvil dispensador (provisto de un suministro de material que solidifica a una temperatura predeterminada) y una base, los cuales se mueven relativamente entre sí a lo largo de los ejes "X", "Y" y "Z" siguiendo un patrón predeterminado para crear objetos tridimensionales mediante la deposición controlada de material descargado desde el cabezal móvil sobre la base. El aparato está preferiblemente controlado por ordenador en un proceso que emplea software de diseño y fabricación asistido por ordenador (CAD-CAM) para generar señales de control y accionar el movimiento controlado del cabezal y la base mientras el material se está depositando.*

*La creación de objetos tridimensionales es posible mediante la deposición repetida de capas de material de solidificación hasta alcanzar la forma deseada. Son susceptibles de uso materiales que se adhieran a la capa anterior con una unión adecuada tras la solidificación; tales como: ceras autoendurecibles, resinas termoplásticas, metales fundidos, epoxis bicomponentes, espumas y vidrios. La base de cada capa se define por la capa anterior, y el grosor de capa se define y controla mediante la altura a la que la punta del cabezal móvil está situada sobre la capa precedente*

Los párrafos anteriores son una traducción libre debido a que el texto original se encuentra escrito en inglés.

### 2.3. Materiales usados en impresión 3D

En la actualidad hay multitud de materiales que se pueden usar en las impresoras 3D. Siendo la mayoría de ellos polímeros termoplásticos, ya que si se les aplica una temperatura alta se vuelven deformables y al enfriarlos, pasando por un estado de transición vítrea, se endurecen.

Algunos materiales que se usan son:

- Acrilonitrilo Butadieno Estireno o **ABS**.
- Poliácido Láctico o **PLA**.
- Alcohol de Polivinilo o **PVA**
- **NYLON**.

Todos ellos tienen características que hacen idóneo su uso en diferentes campos. Por ejemplo, el ABS tiene unas propiedades mecánicas mejores que el PLA [8]. Todos los polímeros comparten la propiedad que tienen una temperatura de fusión, relativamente baja, por lo que no es necesario un aporte de calor elevado.

Por ello, en función de la utilidad que se vaya a dar a la pieza final, será recomendable usar un polímero u otro.

Los materiales que han sido más utilizados dentro del mercado de las impresoras 3D, han sido ABS y PLA debido a que sus niveles de toxicidad son tolerables para el ambiente en el que van a ser tratados y las temperaturas de trabajo son relativamente bajas( en torno a  $200 - 280^{\circ}\text{C}$ ).

Sin embargo, hay una característica principal que diferencia el uso de PLA frente al ABS. Durante la fabricación de la pieza con el ABS es necesario un aporte continuo de calor en la base donde se imprime a diferencia del PLA que no requiere de este aporte. Esto es debido a las propiedades térmicas/mecánicas de los polímeros y como, en el ABS, el enfriamiento del polímero genera tensiones que hacen que la pieza se despegue de la base de impresión. Las impresoras que ofrece BQ no incluyen de serie una base que aporte calor al material por este motivo el plástico con el que se trabajaba es PLA.

Todos estos consumibles comparten la característica de como se distribuyen. El polímero es introducido en el fusor de la impresora en forma de filamento para conseguir un hilo continuo durante la impresión. Por ello, el método de fabricación del consumible es la extrusión, ya que es el método que mejor se amolda para crear objetos con una sección transversal definida y fija.

## 2.4. Extrusión de polímeros

La extrusión de polímeros es un proceso industrial de fabricación, en el cual se hace pasar por un troquel (también denominado dado) la materia prima previamente prensada y calentada. El proceso de prensado y calentamiento, se hace en una cámara, que contiene un tornillo sin fin el cual gira y es alimentado por una tolva. Al hacer pasar el polímero por el troquel, se consigue un objeto con un perfil constante y una longitud variable, pudiendo llegar a ser de centímetros, o en algunos casos de metros.

La Figura 2.5 muestra los distintos elementos que conforman la extrusora:

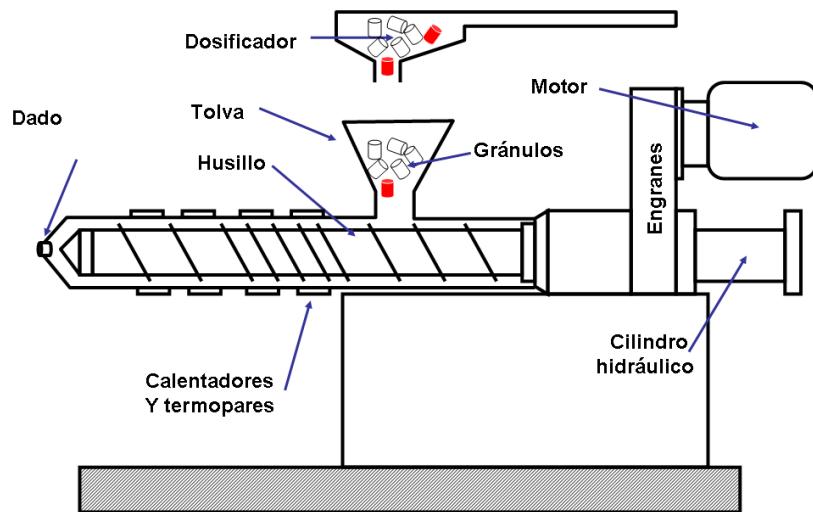


Figura 2.5: Esquema básico de una extrusora conformado por: Dosificador, tolva, motor, husillo, calentadores y dado. Fuente [9].

- **Dosificador:** Es el encargado de suministrar el polímero, normalmente en forma de granza(ver Figura 2.6), a la tolva garantizando un suministro constante.
- **Tolva:** Depósito en el que cae la granza proveniente del dosificador. Debe proveer un flujo constante al extrusor para evitar cortes en el objeto que se está construyendo. Su diseño es muy importante, y en función del tipo de material que esté suministrando deberá ser de una manera u otra, debido a



Figura 2.6: PLA en forma de pellets para su posterior procesado en una extrusora.

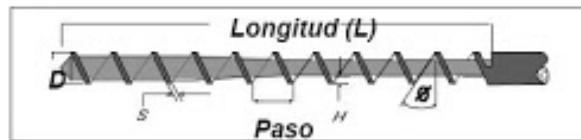
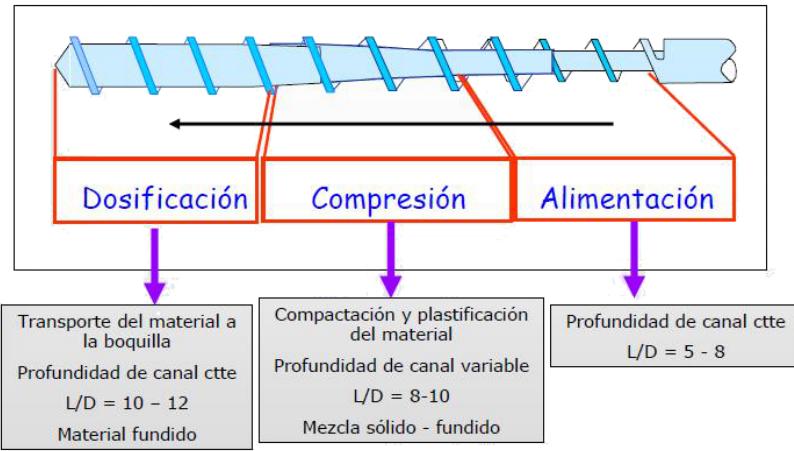
que el material puede llegar a compactarse en el fondo y no pasar a la extrusora. Algunos modelos de tolva incluyen sistemas de vibración para ayudar a que el material caiga. En la mayoría de los casos y dependiendo del material con el que estemos trabajando, será conveniente que incluya un sistema de secado para eliminar la humedad, puesto que dependiendo de la materia prima puede afectar a la hora de trabajar con el. Por ejemplo, con el uso del PLA es obligatorio su secado antes de la producción.

- **Cilindro hidráulico:** Constituye el cuerpo principal de la extrusora y en su interior está el husillo. Es en este cilindro donde se encuentran las resistencias eléctricas que aportan la energía calorífica necesaria para fundir el material. La temperatura está registrada a lo largo de las distintas zonas del cilindro, para poder tener un control sobre la temperatura de fusión del material. El cilindro debe estar fabricado con materiales especiales de tal manera, que tenga una buena transferencia de calor y sea más duro que el material que se está extruyendo, para lograr una larga duración.
- **Dado:** En función del dado que se coloque al final de la extrusora, se conseguirá un perfil distinto, en el caso que nos ocupa, el dado tiene un círculo para conseguir la forma de cilindro que deseamos.



Figura 2.7: Distintos ejemplos de extrusión con plástico. Relación de como la forma del dado influye en la forma final del material. Fuente [10].

- **Husillo:** Es el elemento más importante de la extrusora y el que determina el grado de calidad con el que la pieza saldrá de la extrusora. Como se aprecia en la Figura 2.8 tenemos tres zonas claramente definidas:
  - **Alimentación:** Esta zona, es la encargada de transportar la granza de la tolva al interior del husillo. En la Figura podemos ver como los filetes están muy separados del centro del husillo, con el fin de transportar la mayor cantidad posible de material.
  - **Compresión:** A medida que entramos en la zona de compresión, los filetes van disminuyendo y se acercan al husillo, con el fin de fundir y homogeneizar el material. Aquí se expulsa el posible aire residual que quede entre la granza.



<b>S</b>	ancho del filete	Entre 0.08D – 0.12D
<b>P</b>	paso o ancho de canal	Distancia horizontal entre los centros de dos filetes consecutivos.
<b>D</b>	diámetro	Distancia máxima entre los topes de los filetes del tornillo
<b>H</b>	profundidad del canal	Distancia perpendicular desde el tope del filete hasta la superficie del canal
<b>Ø</b>	ángulo de hélice	Cuando el paso = D, el ángulo es 17.7°

Figura 2.8: Características de un husillo. En la imagen de la izquierda vemos las distintas zonas del husillo como son: Alimentación, compresión y dosificación. A la derecha, la relación directa que hay entre cada uno de los parámetros que definen el husillo. Fuente [11].

- **Dosificación:** Conduce el material compactado hacia el dado de la extrusora. Esta zona debe garantizar que el material sale con una temperatura constante y homogéneo.

La velocidad de extrusión influye directamente en el caudal de producción de la máquina. Teóricamente, al incrementar la velocidad del husillo, obtendríamos una mayor producción en la línea, por contra repercuten en la calidad final haciendo que la mezcla del producto no sea homogénea y llegando a producirse la denominada fractura del polímero fundido, que es debido a la fricción que sufre el polímero al salir por el dado. La temperatura del husillo por contra, influye en la viscosidad del polímero, este parámetro repercute directamente en la resistencia al fundido.

Hasta ahora, hemos visto como funciona la fabricación aditiva, y los componentes más importantes que lo forman. También la evolución a lo largo de los años de las máquinas que trabajan con esta fabricación. Ahora, vamos a ver como ha sido posible que a día de hoy, podamos tener impresoras 3D a un precio mucho más bajo y competitivo que una impresora profesional.

## 2.5. Reprap

El proyecto Reprap lo inicia Adrian Bowyer y su equipo en 2006 desde la Universidad de Bath [12]. Nace con la idea de facilitar toda la información necesaria para crear y distribuir libremente una máquina de prototipado rápido (ver Figura 2.9).

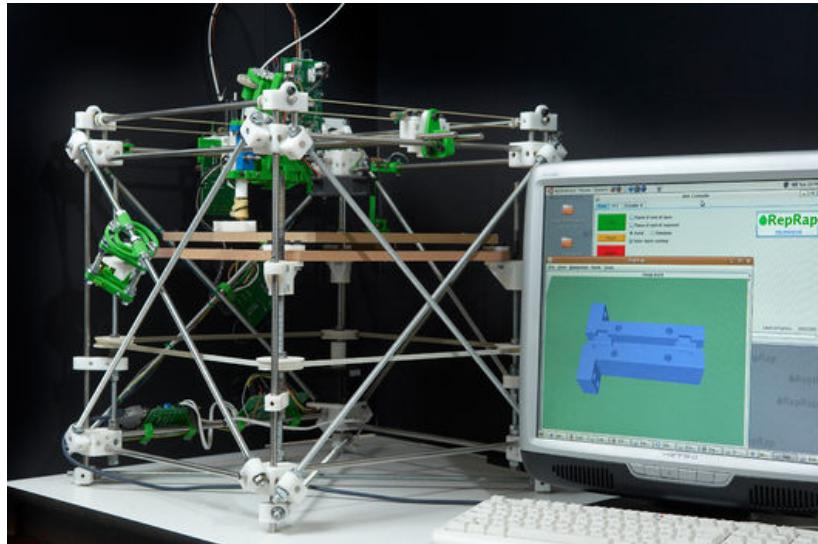


Figura 2.9: Darwin, primera impresora 3D del tipo Reprap. Se ve como en su construcción se usan materiales domésticos y como se hace el control desde un ordenador personal.

Toda impresora Reprap, es un robot que usa fabricación con filamento fundido para hacer componentes de ingeniería y otros productos desde una variedad de polímeros termoplástico. Reprap es diseñado para que una máquina pueda ser capaz de imprimir un número importante de las piezas que contiene. El resto de piezas, serán piezas fáciles de conseguir en cualquier parte del mundo. De esta manera, se define el término autoreplicante. Toda máquina hecha dentro del proyecto Reprap será libre y open-source así, cualquiera podrá hacerse el número de máquinas que desee, ya sea desde su propia máquina Reprap, como de cualquier otra máquina.

Gracias a que Reprap fue liberado con una licencia libre, su expansión en los últimos años ha sido exponencial y ha facilitado que el uso de la fabricación aditiva llegue a las casas, tanto por que está disponible toda la documentación necesaria para realizar una impresora de este tipo desde su web<sup>1</sup>, como por la distribución a bajo costes de las máquinas.

A día de hoy existen más de 50 modelos distintos de impresoras 3D del tipo Reprap, a pesar de que el principio de funcionamiento es el mismo (FDM) cada impresora es distinta y tiene sus ventajas y desventajas. En contra del alto número de opciones disponibles, el modelo que más éxito ha tenido ha sido el denominado Prusa Mendel.

La impresora Prusa Mendel es lanzada en el año 2010 Diseñada por Josef Prusa con tan sólo 20 años, estudiante en la universidad de Praga, República Checa, y basa su diseño en la segunda impresora del proyecto Reprap, la mendel. Como se mencionó anteriormente, toda impresora liberada en Reprap es libre, por ello, Josef Prusa, tomó como base el trabajo que ya habían hecho y le añadió algunas mejoras, tales como:

- Mucho más sencilla de montar.
- Piezas impresas más sencillas.
- Fácil de reparar.
- Usa mejores componentes lo que hacen que la calidad de impresión mejore.

Tras varios años de mejoras e iteracciones en el diseño, Josef liberó en 2012 la prusa I3. La cual introducía un nuevo diseño en la estructura, pasando de usar varillas roscadas a un marco de aluminio que sostén todo el peso de la impresora, dándole estabilidad y robustez (ver Figura 2.10. Para muchas personas, fue un

<sup>1</sup><http://www.reprap.org>

---

paso atrás en la idea originaria del proyecto Reprap ya que se intentaba conseguir que la impresora fuera capaz de imprimir al menos el 90 % de sus piezas

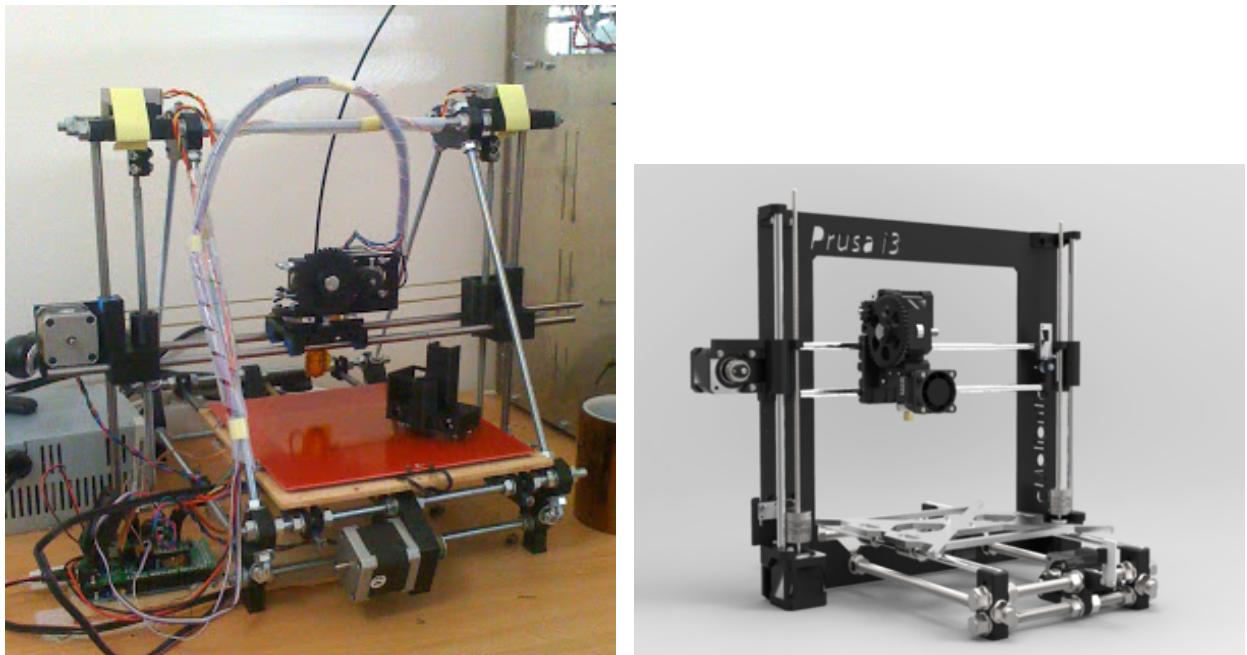


Figura 2.10: En la Figura de la izquierda vemos la Prusa I2. En la Figura de la derecha la Prusa I3. Tan sólo dos años separan a ambos modelos y se ve una mejora en la simplicidad en el diseño.

Pero la facilidad de montaje y que el coste por incluir un marco no incrementaba demasiado el precio final, ha hecho posible que la prusa I3 sea a día de hoy la impresora Reprap más extendida.

## 2.6. Reprap en España

En Febrero de 2009, Adrian Bowyer impartió una conferencia en Madrid, en el MediaLab Prado, a esa conferencia, asistió Juan Gonzalez Gomez, este era el comienzo de Reprap en España. Como el propio Juan dice en su web [13]:

*"He estado siguiendo el proyecto reprap desde hace varios años, pero sólo era una mera curiosidad. Ahora que lo he visto de cerca y he comprobado cómo son las piezas que se pueden fabricar de forma casera, estoy impactado. Estuve durante toda la charla con ese presentimiento de que estábamos al comienzo de algo grande. Es la semilla de un futuro completamente revolucionario"*

Desde ese momento, Juan empezó a investigar sobre las impresoras 3D, comprando su propia impresora 3D [14] y empezando a imprimir los primeros Printbot: Robots impresos en 3D, facilitando así el prototipado rápido. Debido a que la impresora que tenía no era muy fiable, pensó en la posibilidad de hacerse su propia impresora Reprap.

En ese momento, Juan era profesor visitante en el departamento de ingeniería de Sistemas y Automática de la **Universidad Carlos III de Madrid** junto con Alberto Valero, ambos, enseñaron a los estudiantes a trabajar con las impresoras 3D. A través de la asociación de robótica de la universidad solicitaron la compra de una impresora 3D de makerbot para que los estudiantes tuvieran acceso a una y pudieran imprimir sus propias piezas, en ese momento comenzó lo que en un futuro sería el proyecto Clone Wars<sup>2</sup>.

Juan comenzó a trabajar en la construcción de su primera impresora que fue documentando en su propio blog, para transmitírselo a los estudiantes; el 18 de Abril de 2011 se realizó la primera reunión de Clone

---

<sup>2</sup>[http://www.reprap.org/wiki/Proyecto\\_Clone\\_Wars](http://www.reprap.org/wiki/Proyecto_Clone_Wars)

---

Wars. Juan documentó todo el proceso de fabricació de una impresora Reprap en la wiki de la asociación de robótica para que de ese modo no estuviera ligado a ninguna universidad y fuera totalmente libre, más tarde toda la documentación migraría a la web oficial de Reprap.

# Capítulo 3

## Estado del arte

A la hora de tener una supervisión sobre la información producida a lo largo de un proceso productivo y poder tratarla a posteriorí, se usan sistemas software capaces de recopilar la información requerida en tiempo real del sistema y almacenarla para poder acceder a ella en un futuro.

Gracias a la informatización de la industria, estos sistemas están muy integrados dentro del proceso productivo puesto que, además de recopilar la información, se puede tener control directo en la producción. Una de las ventajas derivadas de la informatización, es que para tener el control del proceso, no es necesario encontrarse en el mismo lugar del mismo, gracias a Internet, se puede acceder desde cualquier parte del mundo y con cualquier dispositivo.

La palabra SCADA se usa para abbreviar el término en inglés Supervisory Control And Data Acquisition o lo que es lo mismo, control supervisado y adquisición de datos. Un sistema SCADA puede ser utilizado en cualquier tipo de proceso en el cual se genere una cierta información que deba ser tratada por alguna persona, y se encuentre en un lugar remoto de la localización del proceso. En la Figura 3.1 podemos observar un ejemplo de sistema SCADA orientado a la extrusión.

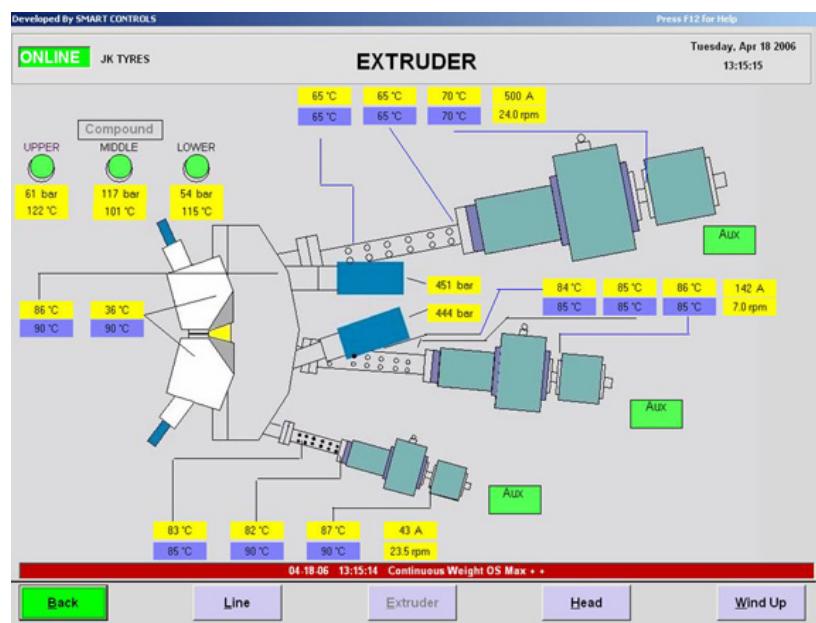


Figura 3.1: Solución SCADA de la empresa SmartControls. Podemos apreciar como desde el sistema SCADA se accede a todas las variables que intervienen en el sistema. Fuente [15].

En lo referente a este tipo de aplicaciones, se han realizado avances y empresas como: Siemens, Wonderware, ABB o Rockwell Automation, ofrecen soluciones para implementar un sistema SCADA, y a día de

---

hoy, prácticamente las soluciones son compatibles unas con otras.

Las distintas funciones que debe proveer un sistema SCADA son:

- Adquisición en tiempo real de los datos de intereses.
- Posibilidad de realizar gráficas de los datos adquiridos.
- Análisis de los datos obtenidos.
- Control sobre los distintos instrumentos del sistema.
- Acceso remoto al proceso productivo.

Debido a la versatilidad de un sistema SCADA, son pocas las empresas que se dedican a una rama en concreto, se suele trabajar bajo pedido, y se diseñan sistemas SCADAS específicos para cada caso, sin embargo empresas como Castool ofrecen soluciones sistemas SCADA capaces de controlar totalmente el proceso productivo de la extrusión, Visual Optimizer [16].

Castool ofrece un sistema de extrusión completo, suministrando tanto la maquinaria, software como personal cualificado para el uso de la línea de extrusión. Sin embargo esta solución solo sería útil en el caso que se adquiriera una línea de extrusión completa, en la mayoría de los casos no es lo habitual, puesto que siempre se suelen tener elementos de la linea de distintos fabricantes.

Son varios los fabricantes consolidados que proporcionan líneas de extrusión completas: Rondol, Everplast, Brabender, Labtech, entre otras; sin embargo buscando las soluciones SCADA que ellos proponen, no se ha encontrado en catálogo ninguna información al respecto.

En la Figura 3.2 se muestra el extrusor Lyman, actualmente la solución mas aceptada en el ámbito de las extrusoras caseras.



Figura 3.2: Extrusor casero Lyman. Solución para fabricar una línea de extrusión completa de forma casera. Fuente [17].

Esta solución provee un sistema completo de extrusión para que el usuario pueda fabricar su propio filamento de forma artesanal, incluyendo:

- Tolva para alimentar con pellets la extrusora.

- 
- Extrusora de filamento.
  - Sensor de diámetro final del filamento..
  - Unidad tractora para ir desplazando el filamento extruido.
  - Bobinadora automática para almacenar el filamento extruido.

A pesar de que el control del extrusor Lyman es totalmente automático y sería fácil realizar un sistema de adquisición de datos, no se tiene constancia de que lo haya.

Debido a que la fabricación del filamento es un proceso novedoso, todos los sistemas que se han encontrado son relativos al control del flujo de material a través de la extrusora, ninguno incluye un sistema de gestión de calidad del filamento que se produce. Los sistemas actuales tampoco son lo suficientemente versátiles como para poder trabajar en cualquier línea de extrusión sin importar el fabricante de los distintos componentes que lo formen. Así mismo, todas las líneas de extrusión encontradas, incorporan sistemas de visualización en tiempo real de los parámetros de producción sin posibilidad, de su registro en un medio físico para su posterior análisis de control de calidad.

El sistema que se propone en este trabajo final de grado suple esta necesidad, ya que se diseña desde un principio sin saber cual es el fabricante de la línea de extrusión final en el que se implementará. Así mismo, aunque el diseño inicial del sistema es para controlar una única línea de extrusión, es totalmente escalable para controlar varias líneas de extrusión al mismo tiempo.

## Capítulo 4

# Desarrollo de la solución propuesta

Una línea de extrusión completa está compuesta por distintos componentes. En la Figura 4.1 vemos los elementos que lo conforman, así mismo, vemos que en cada uno de ellos, hay diferentes valores que influyen en la calidad final del filamento.

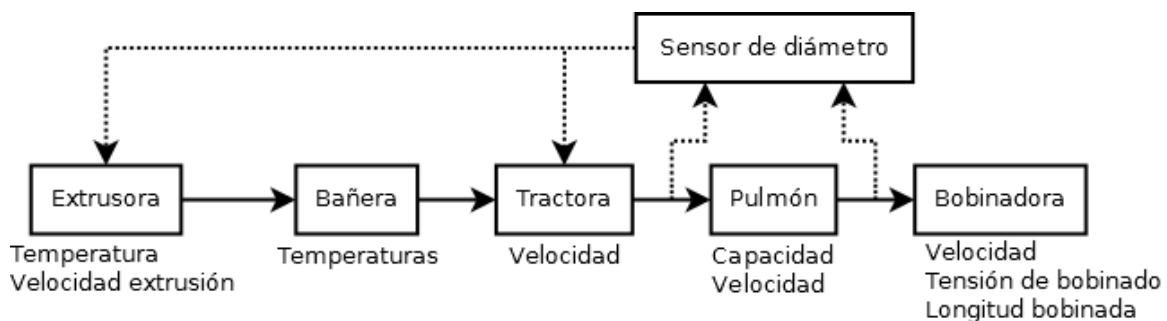


Figura 4.1: Esquema de los elementos que conforman una línea de extrusión completa. Vemos el flujo de avance del filamento según sale de la extrusora y pasa por los distintos elementos. En cada uno, se registran distintos valores.

En una línea de extrusión convencional, se tiene acceso visual a los parámetros indicados, sin embargo no queda registrado en ningún lugar de cuales han sido . Hasta que la extrusión de filamento no se ha extendido, no era necesario tener en detalle estos valores, ya que eran pocos los parámetros que afectaban a la calidad del perfil extruido. Sin embargo, en la extrusión de filamento, son muchos los valores que pueden afectar a la calidad del producto final.

Por estos motivos y poder tener una gestión de calidad del producto fabricado, se decide desarrollar un sistema de adquisición de datos para que se pueda hacer una trazabilidad completa de los parámetros de fabricación.

### 4.1. Planificación

El proyecto está definido por dos fases:

La primera fase en la que se desarrollará el sistema de adquisición de datos constará de los siguientes puntos:

- Recopilación y análisis de la documentación de todos los dispositivos de interés para el proyecto de la línea de extrusión.
- Definición de los requisitos respecto a comunicaciones necesarias entre los dispositivos de la línea y el sistema de adquisición.

- 
- Determinar los requisitos del autómata programable industrial (PLC) a utilizar.
  - Programación del PLC. Puesto que será el encargado de llevar el control de la planta, deberemos programar la adquisición de datos para establecer el control sobre la linea.

En esta fase se pondrá en marcha todo el sistema en la planta, instalando el PLC y cableando toda la red de comunicaciones y sensores que disponemos. Así mismo se almacenarán datos de los sensores de temperatura que dispone la planta y el sensor de diámetro. Con los datos adquiridos se modelará parcialmente la planta para intentar hacer un control en lazo cerrado entre la unión tractora de filamento y el sensor de diámetro del mismo. Durante esta fase se diseñará un sistema, para poder visualizar los datos adquiridos de forma remota.

De forma general, una linea de extrusión controla el filamento actuando sobre dos velocidades, la de extrusión o la de tracción. La tractora es la encargada de tirar del filamento según salga de la extrusora. Lo habitual es variar la velocidad de la tractora en función del diámetro que se tenga pero también se suele variar la velocidad de extrusión, sin embargo esto puede afectar a la calidad del filamento, puesto que no todo el material estará el mismo tiempo en la extrusora pudiendo generar una degradación en los pellets.

Para poder investigar acerca de qué método de control es mejor se realizará un estudio de diferentes sistemas de control para regular el diámetro final del filamento. Se estudiarán los beneficios de usar distintos tipos de controladores como pueden ser PID, fuzzy, etc. para posteriormente estudiar los beneficios e inconvenientes de cada uno de ellos.

Los plazos asignados a cada una de las distintas fases que componen el proyecto, se puede ver en el Anexo ??

## 4.2. Herramientas empleadas

Para el desarrollo de las distintas partes del proyecto, ha sido necesario utilizar varios programas informáticos que nos han ayudado en la consecución de los objetivos del mismo. A continuación, se introducen brevemente, los programas usados más importantes.

### 4.2.1. GitHub

GitHub es una plataforma de desarrollo colaborativo en el que se pueden alojar proyectos utilizando la herramienta de control de versiones Git. El código almacenado en esta plataforma es de dominio público, sin embargo también existe la posibilidad de crear repositorios privados creándonos una cuenta de pago.

Para la realización del proyecto se ha creado un repositorio online [18] en el que se han ido subiendo todos los ficheros que se han ido utilizando para la realización del mismo (ver Figura ??).

### 4.2.2. GNU Octave

GNU Octave es un programa libre para realizar cálculos numéricos. Ofrece un interprete de comandos, donde se van escribiendo los comandos que queramos realizar. También permite mostrar gráficas con una serie de datos numéricos. Se le considera el equivalente a Matlab [19]. Esta herramienta se ha utilizado en el proyecto para calcular el modelo matemático de un sistema, para la posterior implementación de un regulador PID.

### 4.2.3. Autodesk Inventor

Durante la ejecución del proyecto, ha sido necesario realizar piezas específicas a nuestras necesidades. Para ello se han usado impresoras 3D y diseñado las propias piezas que en cada momento han sido necesarias. El diseño de las mismas ha sido realizado en la herramienta Autodesk Inventor. Esta herramienta ofrece un paquete de modelado de sólidos en 3D profesional que compite con otros programas de diseño asistido por ordenador, como pueden ser Catia, Pro/ENGINEER y Solid Edge entre otros.

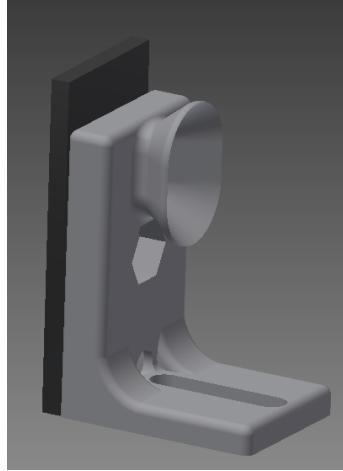


Figura 4.2: Ejemplo de pieza diseñada con Autodesk Inventor. En la Figura vemos una pieza específica diseñada para el proyecto.

#### 4.2.4. Cura 15.02.1

Para la fabricación de las piezas diseñadas, se han usado impresoras Witbox y un software capaz de laminar el fichero STL en G-code para que la impresión de la pieza sea correcta. En este software es donde se configuran los parámetros de fabricación final de la pieza.

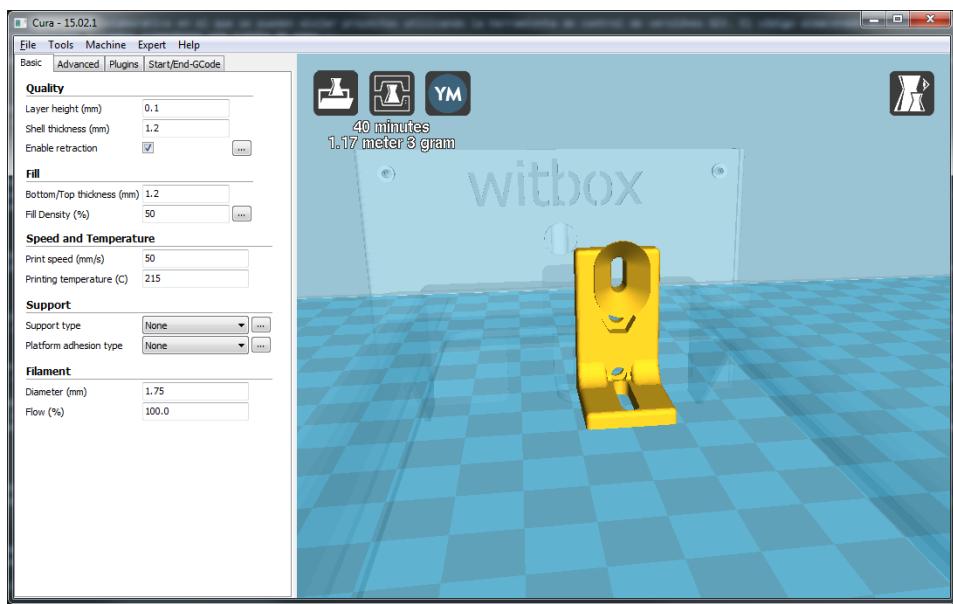


Figura 4.3: Pieza diseñada abierta en cura. Podemos ver como en el laminador se pueden configurar los distintos parámetros de fabricación de la pieza.

#### 4.2.5. IPython

IPython[20] es una consola de Python mejorada, la cual añade mejoras como puede ser resaltado de líneas, coloreado de sintaxis, autocompletado entre otras ventajas. Además ofrece una interfaz tipo notebook lo cual añade la posibilidad de combinar ejecución de código python, mostrar texto matemático, gráficas y contenido multimedia [21]. Estos notebooks son interactivos y permiten observar como se han realizado los cálculos y análisis. Podemos ver un ejemplo en la Figura 4.4

Esta herramienta se ha utilizado en el proyecto para poder calcular el modelo matemático de un sistema e implementar un regulador PID, así mismo, se han analizado los datos adquiridos durante una producción de filamento y comprobar los resultados del sistema diseñado. Los cuadernos realizados están disponibles para su consulta y descarga en el repositorio que se ha creado para el proyecto [18].

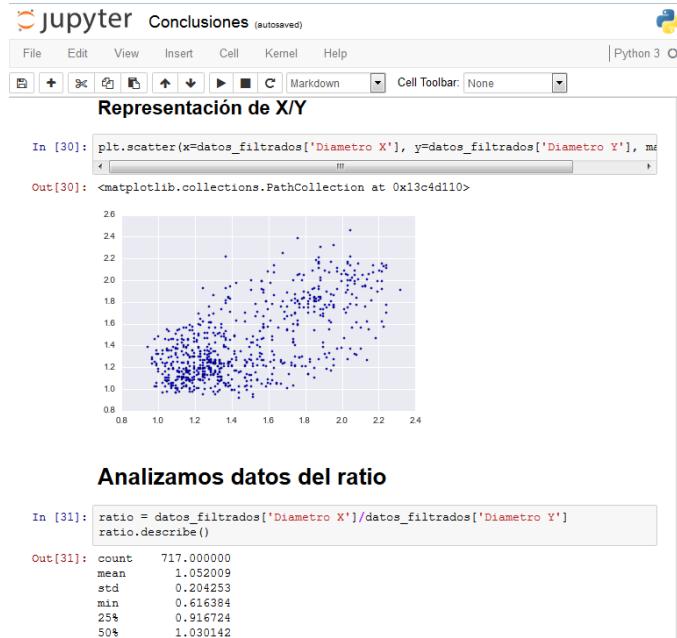


Figura 4.4: Ejemplo de iPython Notebook usado en el proyecto. En la Figura vemos, como se puede combinar texto plano, ejecución de código Python y mostrar gráficas.

### 4.3. Elección de los componentes

Se quiere desarrollar un sistema capaz de leer información de varios sensores y dado el caso activar elementos de control, todos ellos situados en un entorno industrial como es una fábrica de extrusión de polímeros. Por ello, el sistema elegido debe ser lo más robusto posible y tener capacidades de expansión por módulos para que, según la línea en la que se instale, se pueda acceder a una gran variedad de sensores.

Así mismo, el sistema debe tener la posibilidad de almacenar información en una memoria externa, ya sea, alojada dentro del mismo sistema o en un sistema externo, como puede ser un servidor de bases de datos. También, debe poder estar conectado a una red ethernet con acceso a Internet, para poder acceder de forma remota desde fuera de la fábrica.

Debido a todas estas características, se decide usar como unidad central del sistema, un autómata programable industrial (PLC) que en una primera aproximación parece ser lo más adecuado. También se intenta buscar un PLC que nos ofrezca las siguientes ventajas, no siendo estas imprescindibles, pero si ayudarán a la hora de elegir un modelo u otro:

- Licencia de desarrollo libre.
- Modelo básico con el mayor número de especificaciones necesarias.
- Capacidad de expansión de las características por medio de módulos.

De este modo, conseguimos reducir el coste total del proyecto. Partiendo de estos requisitos y buscando distintos proveedores por Internet, las empresas que mejor se ajustan son:

- **UNITRONICS:** La compañía ofrece un PLC con pantalla HMI de bajo coste, que es idóneo para pequeños proyectos que no requieran demasiada capacidad. El principal problema es que no dispone de ninguna expansión para almacenar en tarjetas SD, ni se tiene conocimiento de que se pueda conectar a una base de datos MYSQL de forma directa.
- **WAGO:** Cumple todos los requisitos que necesitamos, sin embargo, es necesario pagar una licencia para poder usar el software disponible

- **ABB:** El PLC de la gama eco trae de serie la mayoría de las cosas que necesitamos, además, si no se superan ciertas limitaciones, no es necesario pagar una licencia para poder usar el software de desarrollo.

El PLC que se adquiere es de la marca ABB debido a la gran relación calidad precio que ofrece. Una vez adquirido el PLC lo siguiente será realizar el montaje del armario donde irá colocado en la fábrica. En el anexo ?? se detalla el proceso de construcción que se ha llevado a cabo.

Para poder demostrar que el sistema a desarrollar es válido para resolver el problema planteado, se mantienen conversaciones con los responsables de PESL para poner en común cuales son los dispositivos que disponen en la fábrica, sin embargo, debido a planificaciones de producción que tienen PESL solo se disponen de dos líneas de extrusión, resulta imposible destinar una línea de fabricación para poner en marcha nuestro sistema.

Debido a ello, se decide adquirir una extrusora de laboratorio y poder implementar el sistema en ella desde su instalación por parte del distribuidor. Sin embargo, los plazos de entrega estipulados, se alejan de la fecha de presentación del presente proyecto y por ese motivo se decide usar una extrusora casera que se tiene en el departamento de robótica e innovación de BQ (ver Figura 4.5).

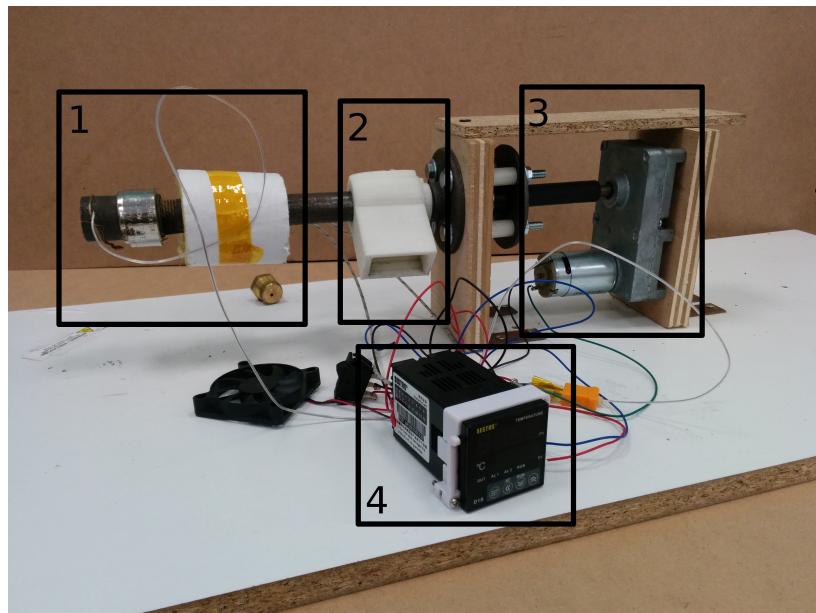


Figura 4.5: Maqueta de filastruder montada. (1) Boquilla y calefactor de la extrusora. (2) Tolva de alimentación de material. (3) Motor para mover el husillo. (4) Controlador de temperatura.

Filastruder se presenta como proyecto en Noviembre de 2012 [22] y consiguió recaudar 212,278\$ en una campaña de crowdfunding en kickstarter<sup>1</sup>. Es un extrusor de baja capacidad y de bajo coste debido a que el usuario es el que realiza el proceso de montaje, liberado como Open Source (DIY). Todo el proceso de construcción del extrusor se documentó en el foro y se creó una comunidad de usuarios interesados en los extrusores caseros.

Algunas de las características de este extrusor son:

<sup>1</sup><https://www.kickstarter.com/projects/833191773/filastruder-a-robust-inexpensive-filament-extruder?lang=es>

---

<b>Par de detenimiento del motor</b>	$12N.m$
<b>Velocidad del motor</b>	$3rpm$
<b>Tiempo para extruir 1kg</b>	$24H$
<b>Diámetro del husillo</b>	$15,875mm$
<b>Longitud del husillo</b>	$255mm$
<b>Tolerancia declarada</b>	$\pm 0,05mm$

Tabla 4.1: Características filastruder. Fuente[23]

Pese a que el funcionamiento no es el adecuado para crear un filamento de calidad, si es completamente útil para la realización del proyecto. Ya que con dos sensores de temperatura, dos cartuchos calefactores y un sensor de diámetro, podremos simular una extrusora industrial, de esta manera también, demostramos que el sistema es totalmente escalable y con cambios en el software podremos adquirir datos de cualquier extrusora. En el Anexo ?? se detalla el proceso llevado a cabo para montar la filastruder.

Se decide usar un sensor de diámetro opensource del cual, toda la información necesaria para su construcción está accesible via online [24]. En el Anexo ?? se detalla el proceso llevado a cabo para su construcción.

A la hora de obtener materia prima para poder extruir filamento, se decide construir una peletizadora (ver Anexo ??), maquina capaz de reciclar filamento que no cumple las condiciones para ser usado en una impresora 3D, de esta manera, podríamos abaratrar costes, evitando tener que usar pellets de PLA para un filamento que no sabemos si va a ser utilizable. Antes de extruir el filamento, se comprueba si los pellets reciclados son aptos para la extrusión.

Por ello, se realizan ensayos por calorimetría diferencial de barrido (DSC). El DSC es una técnica que permite el estudio de las transiciones de fase en los materiales polímeros [25] lo que es de suma importancia a la hora de establecer sus condiciones de procesado y aplicaciones tecnológicas, ya que el tipo de fases y transiciones entre ellas determinan su comportamiento físico macroscópico.

Javier Arranz Andrés, compañero del departamento, realiza un ensayo mediante DSC. Las medidas se hicieron en un calorímetro TA Instruments Q20 con sistema de enfriamiento y bajo atmósfera de nitrógeno. El aparato se calibró con Indio como sustancia de referencia ( $T_m = 156,6^{\circ}C$ ,  $\delta H = 28,45J/g$ ). En el ensayo se sometió al polímero a una fusión a  $20^{\circ}C/min$ , seguida de una cristalización y una segunda fusión, a la velocidad de  $5^{\circ}C/min$ .

Se empleó el calor de fusión del PLA 100 % cristalino,  $93 J/g$  [26]. Los errores en la determinación de las temperaturas, en el cálculo de la entalpía y en el de la cristalinidad se estimaron en  $\delta 1^{\circ}C$ ,  $\pm 4J/g$  y  $\pm 0,04$  respectivamente. El peso de las muestras osciló entre 6 y 10 mg, y las temperaturas de transición,  $T_m$  y  $T_c$  se tomaron en el punto máximo de la curva endotermica o exoterma. La  $T_g$  se tomó a la temperatura en la que se alcanza la mitad de la diferencia de calor específico existente entre el estado amorfo vítreo y el amorfo elastómero, es decir  $T_g = 0,5 \pm C_p$ .

Se incluye a continuación los resultados obtenidos en el experimento. En la Figura 4.6 se observa cómo en condiciones térmicas de temperatura de transición vítreo ( $T_g$ ) y temperatura de fusión, ambos filamentos son prácticamente iguales. Como vemos en la tabla 4.3 no ocurre lo mismo con el grado de cristalinidad del polímero, el cual difiere de uno a otro, sin embargo la diferencia está dentro del margen de error experimental. Esta diferencia puede ser un indicador de inicio de degradación, debido a que las cadenas del polímero son más pequeñas y dificultan el movimiento en sus partes extremas dificultando la cristalinidad.

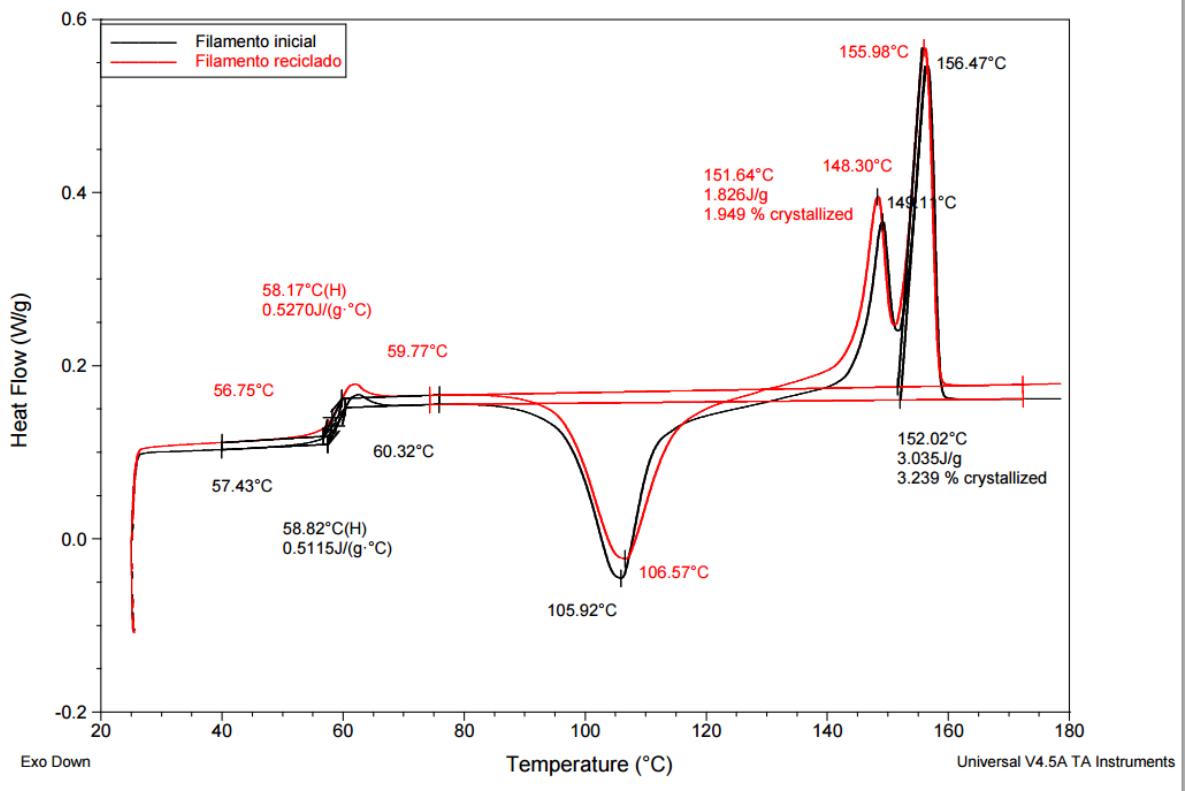


Figura 4.6: Resultado del análisis con DSC de filamento reciclado. Vemos el filamento original (color negro) comparado con el filamento reciclado (color rojo). Podemos llegar a la conclusión de que el filamento reciclado es apto para reutilizar.

En las Tablas 4.2 y 4.3 podemos ver los datos obtenidos:

	Glass Transition				
	Onset (°C)	Midpoint (°C)	End (°C)	Height W/g	Delta Cp (J/g°C)
Filamento Inicial	61.0	56.0	50.5	0.04	0.5
Filamento reciclado	60.5	55.5	50.5	0.04	0.5

Tabla 4.2: Datos del DSC con la transición vítrea del filamento. En los resultados podemos observar, cómo apenas se produce una degradación en las propiedades térmicas del material reciclado, siendo los valores, muy similares de una muestra a otra.

	Peak Integration			
	Midpoint (°C)	Stop (°C)	Area J/g	% crystallized
Filamento Inicial	93.0	70.0	2	3
Filamento reciclado	91.0	70.0	1	2

Tabla 4.3: El único dato que difiere de un filamento a otro, es el porcentaje de cristalinidad, sin embargo la diferencia entre ambas medidas está dentro del error experimental.

A falta de realizar un ensayo de propiedades mecánicas de ambos filamentos y con el ensayo realizado, podemos dar como válido el pellet reciclado con la peletizadora para su uso en la extrusión del mismo.

## 4.4. Programación del PLC.

Disponemos de todo el material necesario para la realización de una pequeña extrusora de filamento y la adquisición de sus datos más característicos en la producción. El siguiente paso es desarrollar la programación del PLC para realizar las tareas de control y adquisición de datos.

Los requisitos que debe tener el sistema se enumeran a continuación y se detallan en las secciones posteriores:

- Controlar la temperatura del extrusor.
- Controlar motor del husillo.
- Leer información del sensor de diámetro.
- Almacenar la información tomada en un fichero de datos.
- Visualizar en una página web el estado de la producción.

Para desarrollar el software que gestione el PLC, se usa una máquina de estados en la que pasando por diversos estados, se irán ejecutando las acciones de control. Debemos entrar en modo producción mediante la activación de una variable. Si estamos en producción, pasaremos por los distintos estados y mientras no estemos en producción, las salidas digitales y valores de consigna de los PID son reseteados a cero como medida de seguridad. Una vez que entremos en producción, el primer paso es inicializar el programa, generamos el nombre del fichero donde almacenamos los datos. Después se genera el fichero CSV y en caso de que no se produzca ningún error, se almacena la cabecera en el fichero CSV, para pasar a la producción como tal. Se controlará la temperatura del dado, se registrarán los valores de diámetros y temperaturas y se irán almacenando en el fichero CSV.

La máquina de estados se muestra en la Figura 4.7

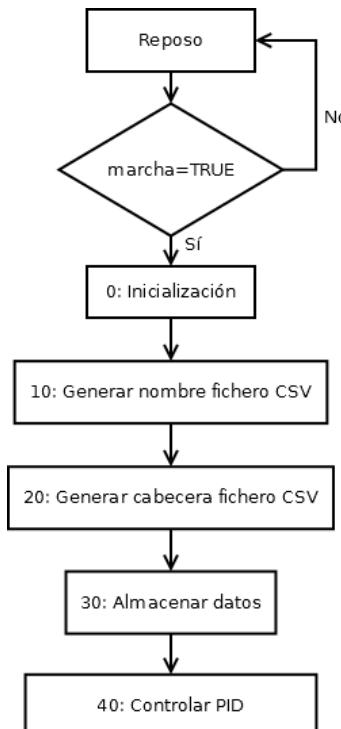


Figura 4.7: Diagrama de estados PLC.

### 4.4.1. Control de la temperatura del extrusor

Se implementa un regulador PID para regular la temperatura del extrusor. Es necesario conocer la planta del sistema que queremos regular para implementar de forma correcta el PID. En nuestro caso el sistema

a controlar es el calentamiento del dado, por ello, debemos modelar primeramente el sistema. En la Figura 4.8 podemos ver un esquema de un sistema con un regulador PID:

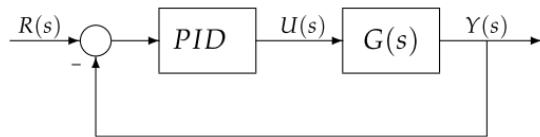


Figura 4.8: Sistema con un regulador PID. La salida del sistema tendrá una realimentación a la entrada del regulador, para tomar acción de control.

Con ayuda del programa que se desarrolla en el PLC haremos las siguientes tareas:

- Almacenar los datos de la temperatura en el dado.
- Encender de forma controlada la resistencia de calentamiento.

Una vez realizadas, analizaremos los datos guardados, para ver como se comporta el sistema en lazo abierto, sin ningún tipo de control. Partiendo de una temperatura ambiente, se registran los valores de las temperaturas para a continuación encender la resistencia de calentamiento y ver cómo la temperatura va aumentando a medida que pasa el tiempo. Una vez que la temperatura sobrepase un valor que nosotros establezcamos, pararemos el experimento.

Mediante un script programado con Python y varias herramientas de análisis de datos como: IPython, Scipy, Pandas y Numpy, analizamos los datos obtenidos, para ver cómo se comporta nuestro sistema. Las gráficas en la Figura 4.9 muestra la respuesta en el tiempo de nuestro sistema de calentamiento, sin ningún tipo de control.

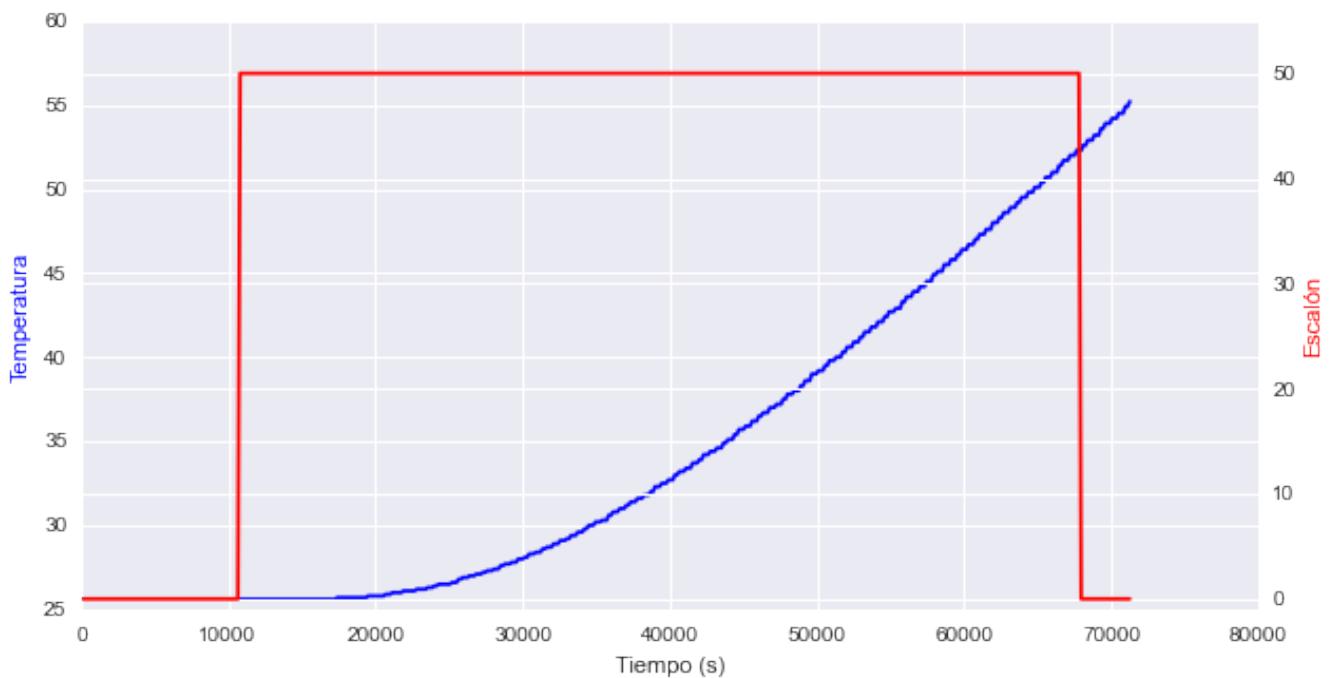


Figura 4.9: Respuesta del sistema en lazo abierto. Observamos como a medida que avanza el tiempo, también lo hace la temperatura de manera exponencial.

Para poder controlar de forma óptima el sistema, es necesario calcular la ecuación matemática que mejor se ajuste a nuestros datos y con ella el polinomio que caracteriza nuestro sistema. Na Figura 4.10 muestra una curva ajustada

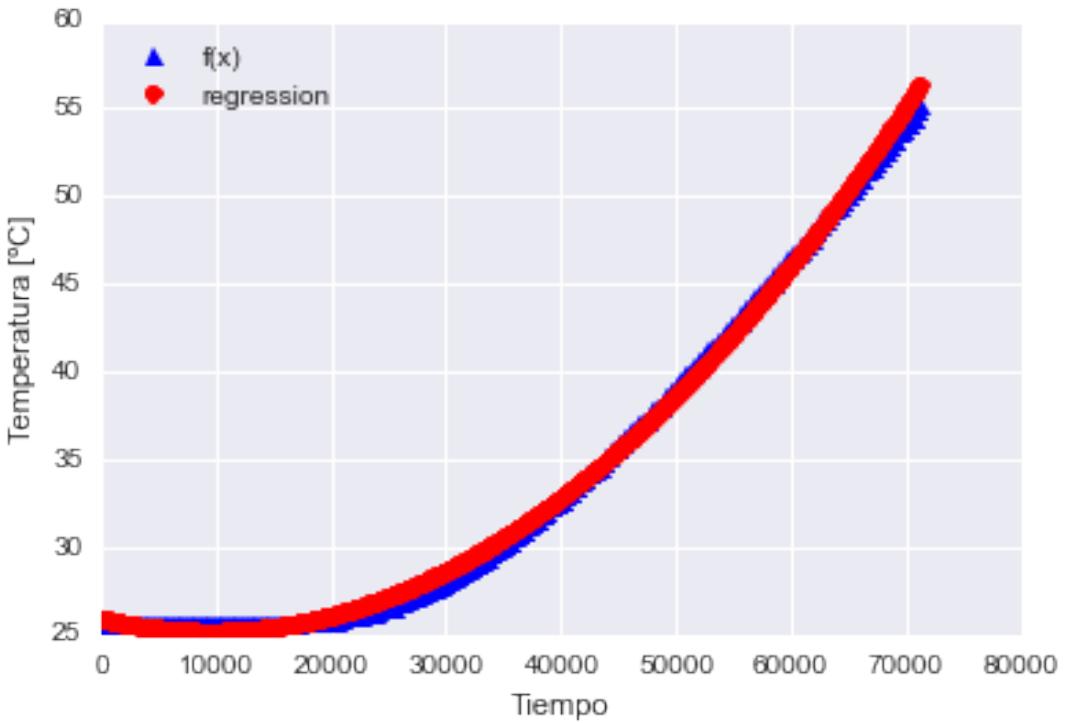


Figura 4.10: Ajuste de la recta. Calculamos el polinomio que mejor se adapte a nuestros datos.

$$P_x = 25,9459 - 1,5733 \cdot 10^{-4} \cdot X - 8,18174 \cdot 10^{-9} \cdot X^2 \quad (4.1)$$

Si calculamos la transformada de Laplace del sistema, obtenemos la planta de nuestro sistema, con la cual podremos implementar el regulador PID:

$$G_s = \frac{25,95 \cdot S^2 - 0,00015733 \cdot S + 1,63635 \cdot 10^{-8}}{S^3} \quad (4.2)$$

Aplicando el método de sintonización de Ziegler-Nichols [27] basado en la curva de respuesta, calcularemos el PID para poder regular correctamente el sistema. Este método consiste en estudiar el sistema en lazo abierto con escalón unitario, calculamos parámetros como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y establecemos con ellos las ganancias del controlador PID [28]. Este método no facilita de manera rápida unos valores de  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  orientativos, para que podamos ajustar correctamente el controlador.

La Figura 4.11 muestra la respuesta al sistema una vez que se ha implementado un regulador PID para controlar la temperatura.

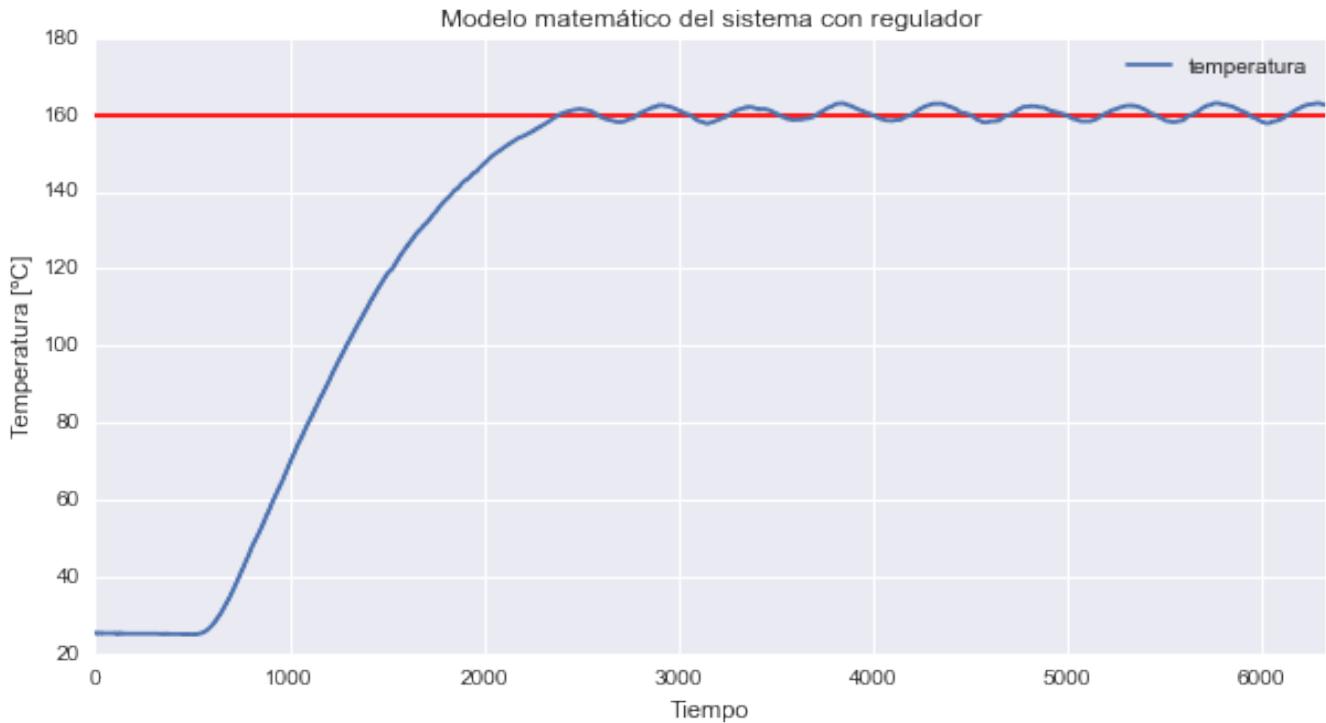


Figura 4.11: Respuesta del sistema con PID. En la gráfica se aprecia como la temperatura oscila sobre un valor.

La sobreoscilación que presenta el sistema la calculamos mediante:

$$M_p = \frac{T_{max} - Setpoint}{Setpoint} \cdot 100 = \frac{163 - 160}{160} \cdot 100 = 1,88 \% \quad (4.3)$$

Por lo tanto, el regulador que cumple con las especificaciones deseadas tiene la siguiente ecuación característica:

$$G_s = \frac{150 \cdot S^2 + 6082,6 \cdot S + 121,64}{S} \quad (4.4)$$

#### 4.4.2. Lectura de datos del sensor de diámetro

Los sensores de diámetro están conectados a dos entradas analógicas de tensión del PLC. Será necesario unir la señal de masa (GND) del PLC con la del sensor, para que la referencia al nivel de tensión 0V sea la misma, posteriormente, la salida del sensor de diámetro, se conectarán con la entrada analógica del PLC.

El PLC convierte el valor de tensión comprendido entre un rango de 0-10V a un valor numérico, a través de un conversor analógico a digital (ADC) de 10bits, es decir, tenemos una resolución de:

$$\text{Resolución} = \frac{V_{max}}{2^{10}} = \frac{10}{1024} = 9,76mV \quad (4.5)$$

En la Tabla 4.4, se observan los valores que asigna el ADC:

Intervalo	0 ... 10V	Valor digital
Desbordamiento	>11.7589	32767
	11.7589	32511
Valor de medición demasiado alto	.	.
	10.0004	27649
Intervalo normal	10.000	27648
	.	.
	0.0004	1

Tabla 4.4: Valores de conversión del conversor analógico a digital. Para un valor de tensión dado, se le asigna un valor decimal.

Se va a trabajar con el rango de intervalo normal. Para poder saber el diámetro que está midiendo el sensor, se debe leer la entrada analógica y convertir el valor decimal a un valor de tensión, es decir, convertir el valor digital a analógico (DAC), para ello, con los valores del intervalo normal se calcula la ecuación de la recta que lo caracteriza que en este caso es (ver Figura 4.12)

$$Y = 3,6168 \cdot 10^{-4} \cdot X \quad (4.6)$$

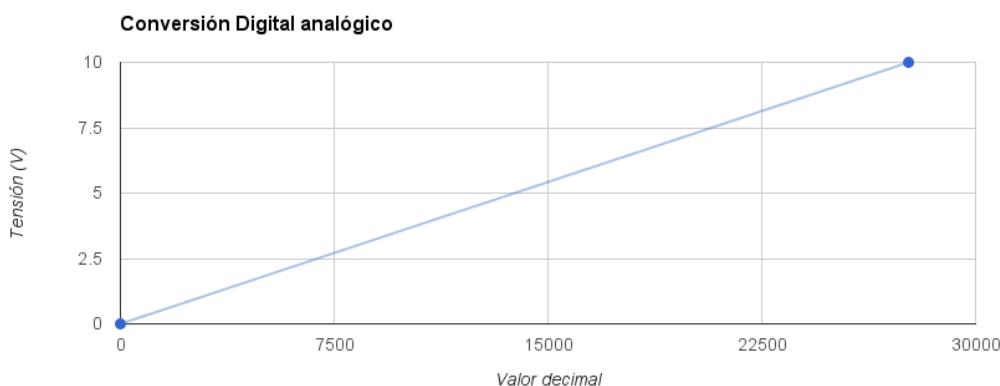


Figura 4.12: Recta característica del ADC. Con su ecuación característica, podemos convertir el valor de tensión a un valor de diámetro.

Con la Ecuación 4.6, se puede tener acceso al valor del diámetro que tiene el filamento. El siguiente paso entonces, será realizar el almacenamiento de los datos de la producción en un fichero para su posterior análisis.

#### 4.4.3. Almacenar la información registrada en un medio físico

Se elige un nombre de fichero en el que se usa año, mes, día y minuto para identificar la producción, es decir, tiene un formato *YYMMDDmm.CSV*. El formato elegido para almacenar la información es el de valores separados por coma (CSV). El motivo por el cual se elige este formato es debido a su estandarización y que almacena los datos de forma tabular en texto plano. Gracias a esto, se puede abrir el fichero CSV con cualquier editor de texto y otros programas de hojas de cálculo, para el posterior análisis de los datos, que es uno de los objetivos del proyecto. Por lo tanto, el formato CSV es el idóneo para poder trabajar en el futuro con los datos almacenados.

En el programa del PLC se genera una cabecera del fichero CSV, que es la primera fila del fichero, en donde indicará la información que contiene cada columna. La información almacenada en el fichero CSV es la siguiente:

- **Time Stamp:** Es una secuencia de caracteres en las que se indican hora y fecha de un evento ocurrido. Se almacena con el formato YY-MM-DD HH:MM:SS. Con esta información podremos tener una trazabilidad del filamento almacenado y en caso de producirse un error, ver el momento concreto del mismo.
- **Temperaturas:** Valores con las temperaturas del dado y el husillo en la zona de alimentación. De esta manera se comprueba que la temperatura no sufre algún cambio drástico durante el proceso, que puede ser causante de un problema en la calidad final del filamento.
- **Diámetros:** Se almacenan los diámetros medidos por el sensor. En este caso se van a poner dos sensores de diámetro para hacer una medición en los dos ejes del filamento.
- **Información varia:** Se puede almacenar cualquier información que nosotros deseemos en un futuro (X e Y).

En la tabla 4.5 se ve un ejemplo de los datos almacenados en un fichero csv:

time	Tmp Husillo	Tmp Nozzle	Diámetro X	Diámetro Y
2015-8-13 11:11:1	67.5	150.4	1.71	1.49
2015-8-13 11:11:2	67.5	150.4	1.82	1.51
2015-8-13 11:11:4	67.5	150.5	1.91	1.52
2015-8-13 11:11:5	67.4	150.5	1.94	1.55
2015-8-13 11:11:7	67.4	150.5	1.91	1.56
2015-8-13 11:11:9	67.4	150.6	1.92	1.58
2015-8-13 11:11:10	67.4	150.6	1.97	1.71
2015-8-13 11:11:12	67.4	150.6	2.02	1.89
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

Tabla 4.5: Muestra de un fichero CSV con datos de producción. Están registrados los datos más importantes de la producción como son. Time Stamp, Temperaturas y Diámetros.

#### 4.4.4. Acceso remoto a los datos de producción

La información se almacena en la tarjeta SD interna del PLC y para poder acceder a ella, se usa un servidor de transferencia de ficheros (servidor FTP) con el que se transfieren ficheros desde el PLC al ordenador mediante una conexión de red, de esta manera, se accede a la SD de forma remota, sin tener que sacar la SD del PLC. Para ello se usa el servidor FTP que facilita la herramienta de ABB. En el ordenador, con ayuda de un software cliente FTP se accede a la IP del PLC que se encuentra en la misma red y se descarga el fichero csv para su posterior estudio.

Para poder visualizar el estado de la producción, se usa una herramienta que incorpora de serie el programa de Abb. Esta herramienta, provee un servidor de páginas WEB en la que se puede acceder al estado de variables del programa y se pueden añadir gráficos (ver Figura 4.13) que simulen físicamente la planta. Desde esta visualización web se puede:

- Visualización en tiempo real temperaturas de Husillo y Dado.
- Iniciar y parar producción.
- Controlar marcha del motor del husillo.
- Visualizar la ruta del fichero en el que se almacenará la información.

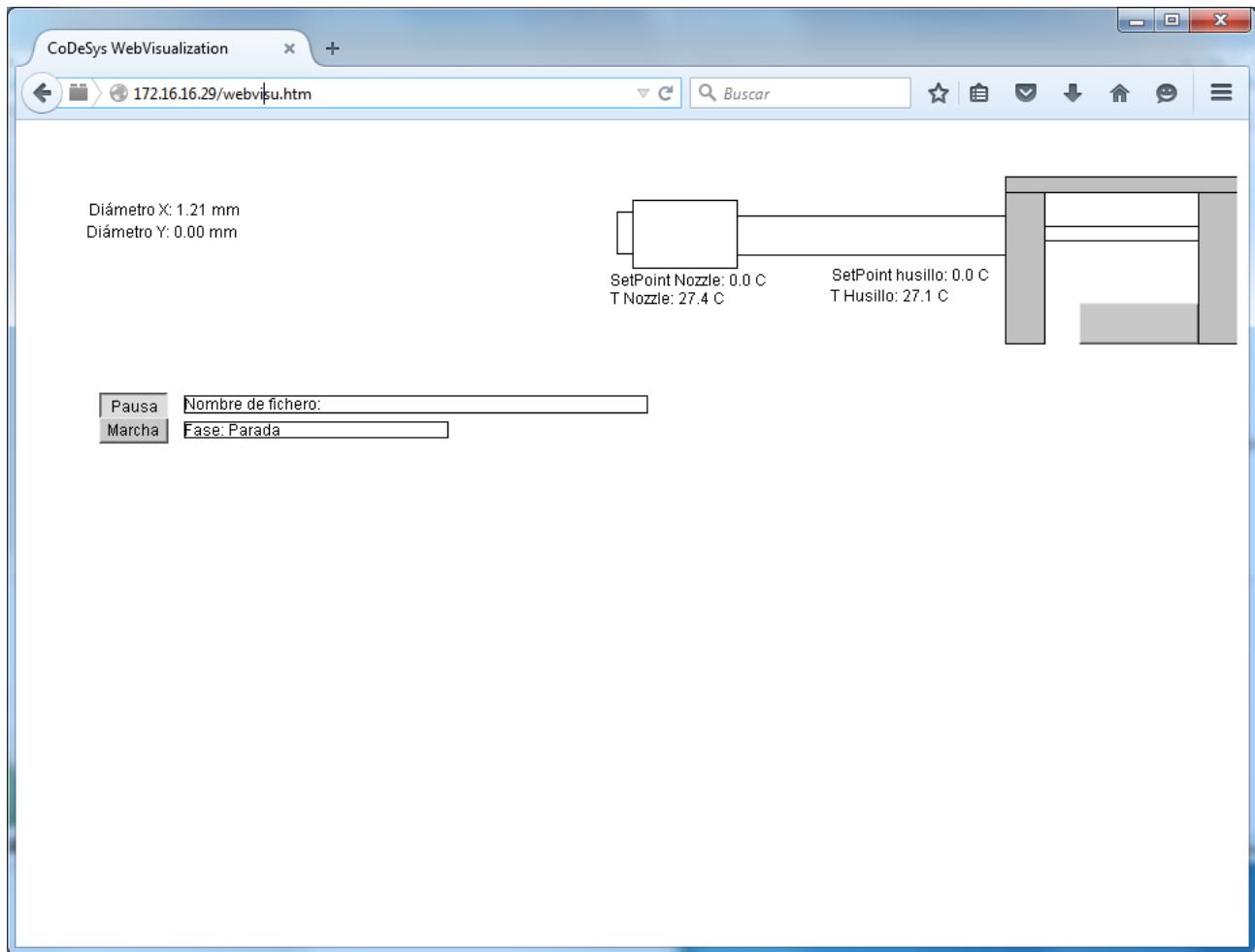


Figura 4.13: Visualización online del sistema. Desde una página web, tenemos acceso a las variables que controlan el proceso.

# Capítulo 5

## Experimentos realizados

Como se ha mostrado hasta ahora, hemos desarrollado un sistema capaz de registrar la información de una serie de sensores y crear un fichero con esa información. Cuando se incia el planteamiento de este proyecto, el paso final del mismo es implementar el sistema en una linea de extrusión industrial sin embargo a la hora de implementar el funcionamiento del mismo, la empresa PELS no puede ceder una de sus líneas de extrusión para la puesta en marcha del sistema debido a la planificación de producción; se adquiere una extrusora de laboratorio pero los plazos de entregan se alargan y no se tiene acceso a ella a la hora de validar el sistema.

Por estos motivos, se decide hacer uso de una maqueta de extrusora de filamento para poder comprobar cómo con el sistema diseñado podemos realizar un estudio avanzado de los problemas que tenemos a la hora de fabricar filamento. De esta manera, podremos validar nuestro sistema y adquirir la experiencia necesaria para cuando el sistema se implemente en una línea de extrusión industrial.

A continuación, vamos a ver distintos ensayos que se han realizado con el sistema. El objetivo de estos ensayos es demostrar que nuestro sistema es válido para registrar la información que le indiquemos y su posterior análisis. Así mismo, se abre una investigación sobre la influencia de distintos tipos de regulador sobre el tamaño del diámetro final (lazo de control), a pesar de que no es el objetivo principal del proyecto, si es un objetivo secundario que ha surgido con la realización del mismo.

### 5.1. Validación del sistema sin tractora

Como primera aproximación e intentando asemejar el esquema de producción vista en el capítulo 4 se va a seguir el esquema mostrado en la Figura 5.1.

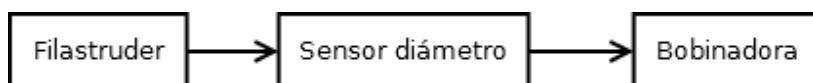


Figura 5.1: Esquema de producción sin tractora. Se tienen los elementos: Extrusora, sensor de diámetro y bobinadora.

La boquilla de la filastruder es de 3mm. De esta manera se tiene margen suficiente para regular el filamento aplicando una fuerza de tracción según sale de la extrusora y se va enfriando. A la hora de trabajar con una técnica de conformado como es ésta, es muy importante que la velocidad de salida sea lo más constante posible y también hay que tener en cuenta que se producen cambios en el material tanto de tamaño como de forma según sale de la extrusora [29]. Tres de estos cambios que afectan al material son:

- **Tensionado:** Habitualmente, el material es recogido por sistemas de almacenamiento consistentes en rodillos que aplican una tensión. Esto hace que el tamaño del material varíe en función de esa tensión. Nos ayudaremos de esta característica para intentar regular el diámetro final del filamento. El tamaño del diámetro tendrá una relación inversamente proporcional a la velocidad.

- **Relajación:** Dentro de la extrusora, el material soprtá esfuerzos normales y al salir por la boquilla se relaja. Esta relajación será mayor, en función del gradiente de temperatura que haya entre la boquilla y el ambiente. La Figura 5.2 muestra un ejemplo de la deformación sufrida por el material.

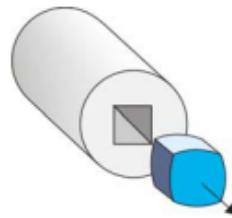


Figura 5.2: Cambio de tamaño debido a la relajación del material. Fuente [29]

- **Enfriamiento:** A medida que el material se va enfriando, se va generando una contracción en el perfil del mismo. Esta contracción depende de la velocidad de enfriamiento del material. Por ello, no habrá la misma contracción en una zona gruesa donde haya más material, que en una fina. La Figura 5.3 muestra un ejemplo de la deformación sufrida por el material.

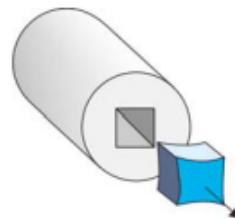


Figura 5.3: Cambio de tamaño debido a la contracción del material. Fuente [29]

### 5.1.1. Condiciones del ensayo

Vamos a comprobar el funcionamiento del sistema con el control de regulación de la propia filawinder, en la que intenta mantener el filamento en una determinada altura y en función de esa altura, aplicar más o menos velocidad de bobinado. Para este primer ensayo se usarán todos los pellets reciclados como materia prima, no se mezclará con PLA transparente, para así ver si el funcionamiento de la filastruder es el correcto.

Una vez llegado a la consigna de temperatura de 150°C se comienza a extruir PLA reciclado y se almacena en la bobina. A simple vista, se ve que la velocidad mínima de bobinado hace que el filamento salga demasiado delgado y se generan demasiadas tensiones en el bobinado del mismo. No obstante, analizaremos los resultados obtenidos. Para el análisis del fihero CSV generado, se usará la herramienta IPython con las librerías, Numpy y Scipy, con los que de manera rápida obtendremos unas conclusiones.

Las condiciones iniciales del ensayo son:

- Duración: 30 min
- Establecer una temperatura de 135°C en el extrusor.
- Llenar la tolva que incluye de serie la extrusora con 42gr de pellets reciclados.
- Extruir filamento registrando los datos para su posterior análisis.

### 5.1.2. Análisis de los resultados obtenidos

Las medidas obtenidas en el ensayo se muestran en la Tabla 5.1, así como en las Figuras 5.4 y 5.5.

	Diámetro X	Diámetro Y
Muestras	1110.000000	1110.000000
Media (mm)	1.17	0.91
Desviación estandar	0.39	0.51
Mínimo (mm)	0.01	0.00
Máximo (mm)	1.92	1.74

Tabla 5.1: Resultados obtenidos con un sistema sin tractora.

Cómo podemos comprobar obtenemos una media aritmética de filamento de  $\bar{x} = 1,17\text{mm}$  mm con una desviación estandar  $\sigma = 0,39$ . Representando las medidas de los ejes X e Y podemos comprobar que el resultado no es el deseado:

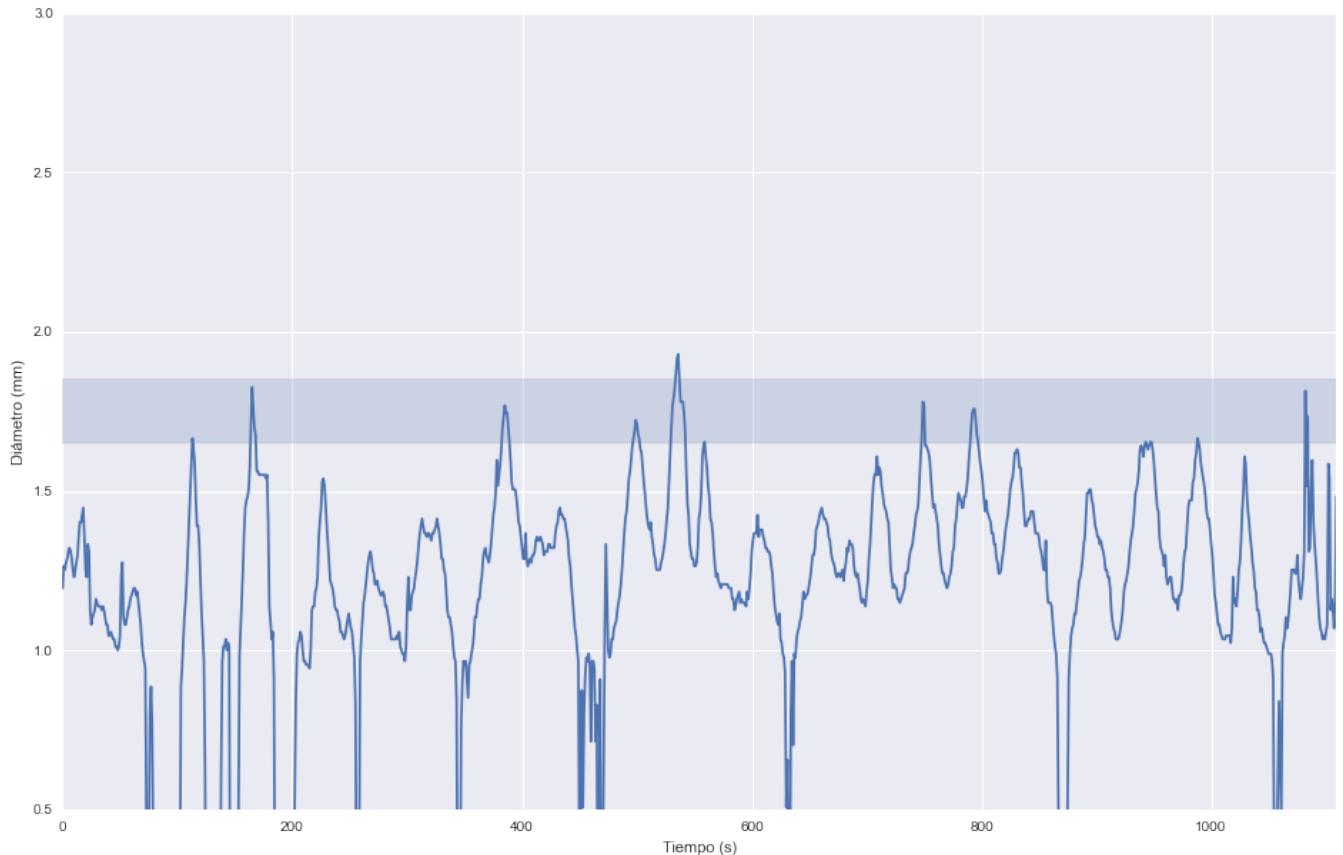


Figura 5.4: Representación de las medidas del diámetro de los ejes X e Y. En el gráfico se muestra una banda de tolerancia, en las que el diámetro filamento se da por válido.

Sólo un pequeño número de muestras están por dentro de los márgenes de calidad establecidos por BQ ( $\text{Max} = 1.85\text{mm}$  ;  $\text{Min} = 1.65\text{mm}$ ). Además, si representamos los datos en un diagrama de cajas (ver Figura 5.5), vemos que hay mucha variación entre los dos ejes.

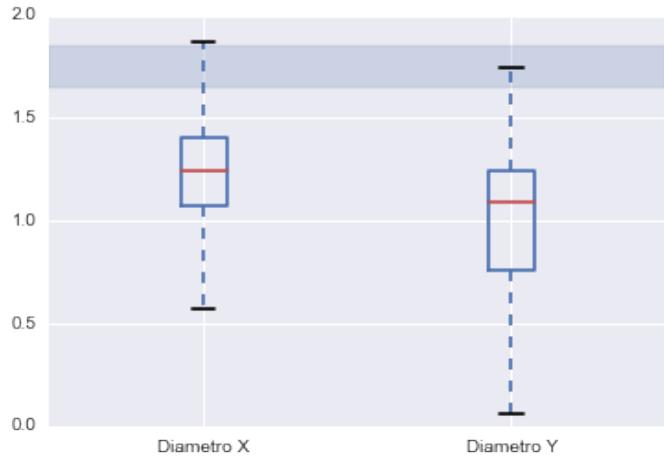


Figura 5.5: Diagrama de cajas de las medidas de los ejes X e Y.

Después de los resultados obtenidos en el experimento, descartamos que con este esquema de producción y los materiales disponibles, lleguemos a regular el diámetro de salida de una forma óptima, por tanto se trata de obtener otro esquema de producción para garantizar mejores resultados.

## 5.2. Validación del sistema con tractora

En una de las pruebas de extrusión de filamento, se va estirando a mano según va saliendo de la filastruder y se comprueba que, traccionando del hilo a una distancia cercana de la boquilla y una vez enfriado, se puede llegar a regular el diámetro final. Por ello se diseña un sistema capaz de traccionar el filamento a medida que es extruido, para comprobar si es posible obtener un filamento con mejor calidad.



Figura 5.6: Esquema de producción con tractora. Se tienen los elementos: Extrusora, sensor de diámetro, tractora y bobinadora.

Con el conocimiento adquirido al diseñar la peletizadora (ver Anexo ??), se diseña una unidad tractora que irá colocada después de la filastruder, la cual, deberá ir traccionando del filamento independientemente del diámetro del mismo. Así mismo, deberemos ser capaces de regular la velocidad de una forma más precisa que como lo hicimos con la peletizadora. En el Anexo ?? se detalla el proceso seguido al diseñar la tractora.

Una vez se tiene un primer prototipo de la tractora, podemos instalarla en la maqueta (ver Figura 5.7).

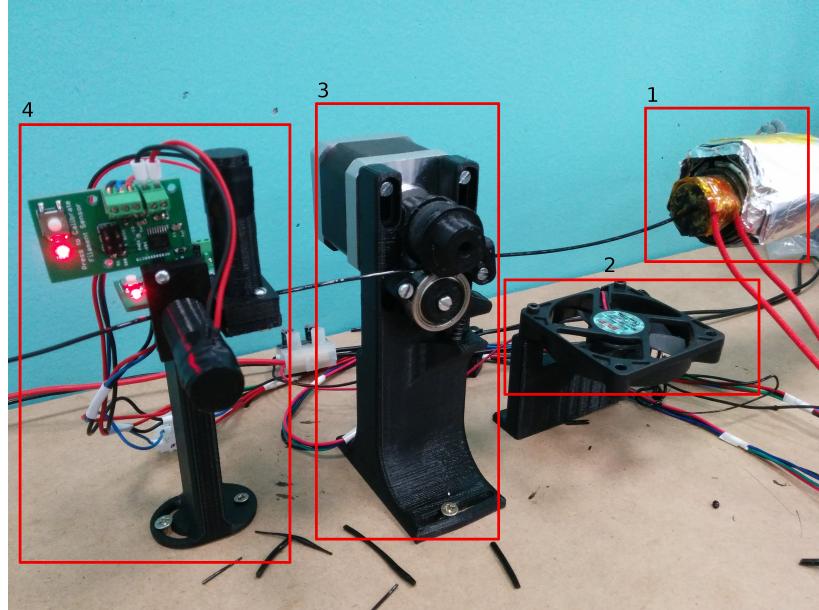


Figura 5.7: Montaje final del sistema con tractora. (1) Filastruder. (2) Sistema de enfriamiento del filamento. (3) Unidad tractora. (4) Sensor de diámetro.

### 5.2.1. Condiciones del ensayo

Usando pellets reciclados y así confirmar que son válidos para extruir, se realiza una producción de filamento, para comprobar que el diseño de la tractora es el correcto. El ensayo realizado consiste en:

- Duración: 5min
- Establecer una temperatura de 135°C en el extrusor.
- Llenar la tolva que incluye de serie la extrusora con 42gr de pellets reciclados.
- Extruir filamento registrando los datos para su posterior análisis.
- Cambiar la velocidad de tracción para comprobar la relación final en el diámetro. Se establecerá una velocidad de 1RPM y 3RPM

Durante seis minutos de producción, el filamento empieza a aumentar el diámetro, provocando que este no pueda pasar a través del sensor de diámetro parando la producción, sin embargo podemos estudiar los datos obtenidos.

### 5.2.2. Análisis de los resultados obtenidos

Tras el ensayo, los resultados obtenidos son los siguientes:

	Diámetro X
Muestras	203
Media (mm)	1.59
Desviación estandar	0.25
Mínimo (mm)	1.08
Máximo (mm)	2.19

Tabla 5.2: Resultados obtenidos en un sistema con tractora.

En la Figura 5.8 vemos los datos obtenidos del diámetro del eje X. Se puede observar, que hay una variación muy pronunciada al tener una velocidad de tracción constante, esto es un problema en el diseño de la filastruder ya que, a una velocidad de tracción constante, el diámetro debería serlo también.

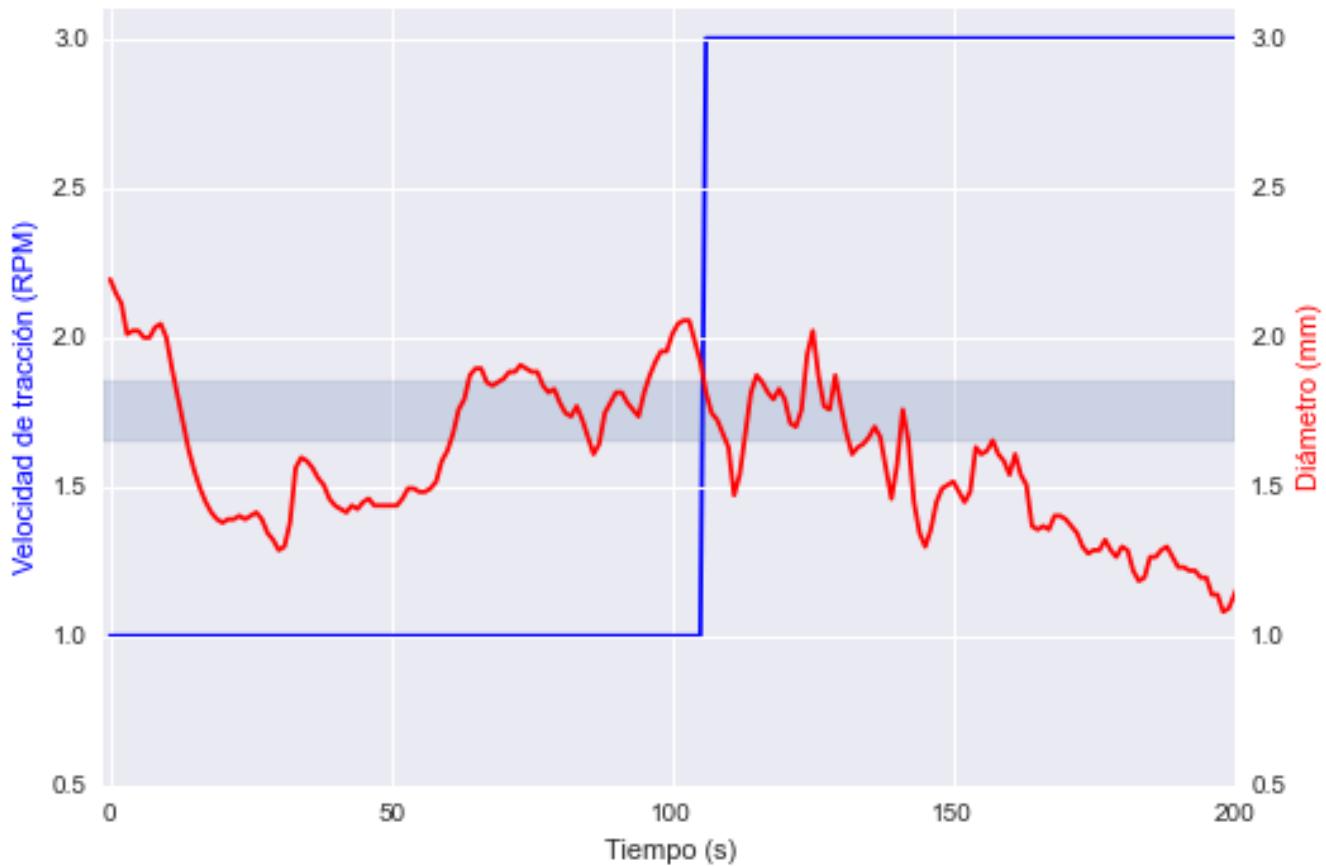


Figura 5.8: Gráfica con la relación entre la velocidad de tracción y el diámetro final.

Durante el ensayo, se ha percibido que la extrusión no es constante, por ello, pensamos que el funcionamiento de la filastruder, que a simple vista parecía correcto, no puede llegar a proporcionarnos los resultados que necesitamos. Para comprobar esto, instalamos un encoder mediante un imán, un sensor de efecto hall y un arduino a la filastruder, para cerciorarnos de que la velocidad es constante.

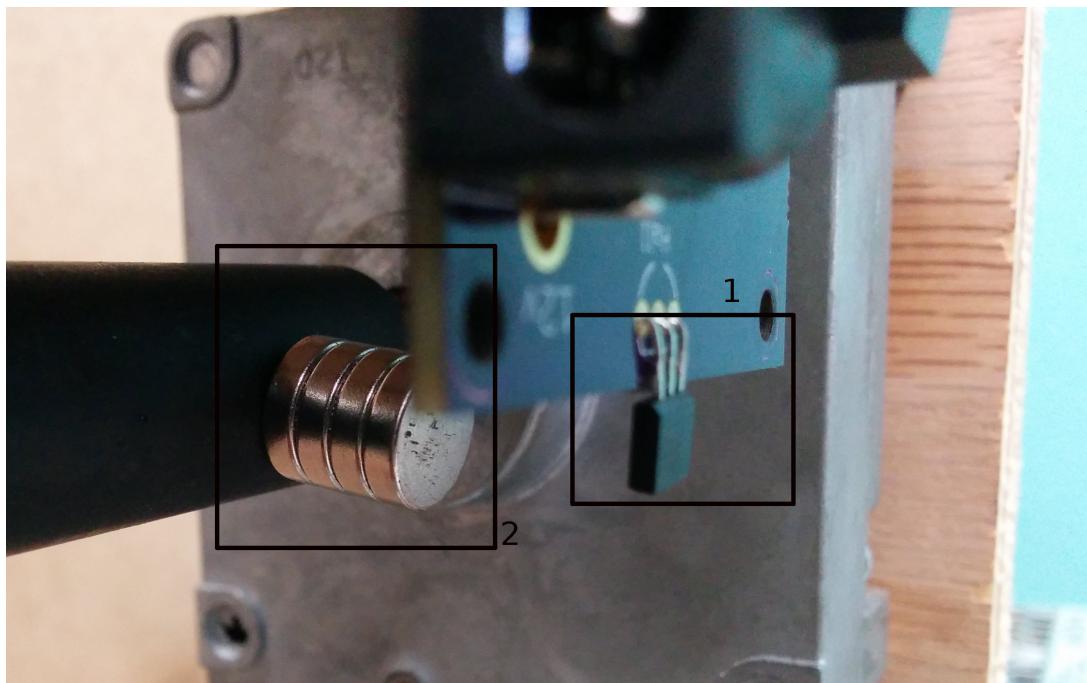


Figura 5.9: Encoder instalado en la filastruder. (1) Imanes que giran solidarios al husillo. (2) Sensor de Efecto Hall para detectar el paso de un campo magnético.

---

Se extruye una cantidad de filamento sin medir el diámetro, tan sólo registrando la velocidad con la que gira el husillo y los datos proporcionados son los siguientes La Figura 5.10 muestra que la velocidad de giro no es constante, variando entre 1 y 2 RPM.

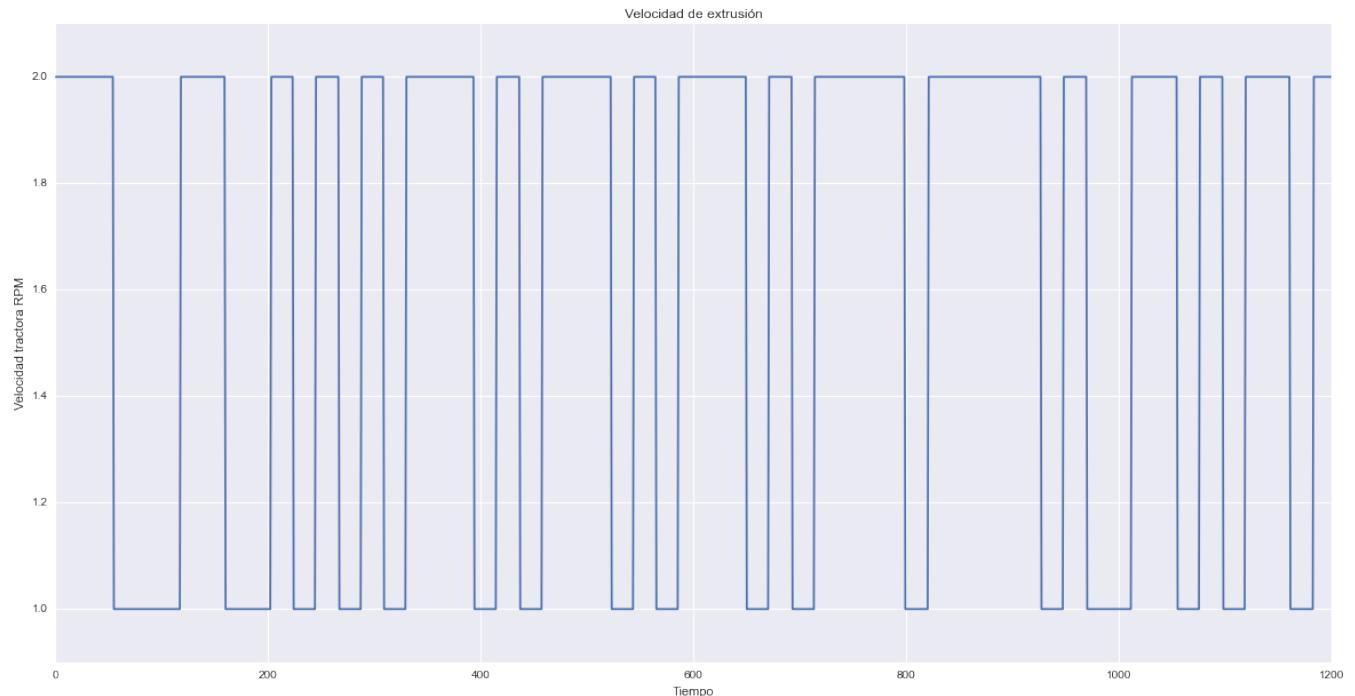


Figura 5.10: Velocidad de la extrusora. Los datos reflejan como con un valor de referencia fijo de velocidad, esta sufre variaciones de las cuales no se tienen control.

El motor que hace girar el husillo está conectado directamente a 12V y no se tienen ningún control sobre él. Además mecánicamente, el motor está conectado al husillo mediante una caja reductora, la cual no es posible cambiar.

Para solventar estos problemas, se van a tomar las siguientes medidas:

- Usar una mezcla de granza de PLA natural (70 %) con pellets reciclados de filamento (30 %) (ver Figura 5.11). Se usará granza de PLA natural, el cual tiene una forma más redondeada que los pellets reciclados, haciendo más fácil el avance dentro del cañón. Se usa una mezcla con los pellets reciclados, ya que el sensor de diámetro que usamos, no funciona con filamento transparente, por ello, debemos tintar el filamento



Figura 5.11: Mezcla de granza con pellets reciclados.

- Antes de hacer una producción de filamento, la granza de PLA que se vaya a usar, se va a secar en un horno a una temperatura de 80°C durante, al menos, tres horas antes de la producción. Esto es debido a que si el PLA tiene un alto porcentaje de humedad, hará que la extrusión del material no sea el adecuado, afectando directamente en el acabado final.
- Se diseña una tolva de alimentación mayor, para que la capacidad de granza aumente, y se ejerza mayor presión a la entrada del extrusor, para que de ese modo, la alimentación de la granza sea lo más constante posible. El tamaño de almacenamiento máximo ha pasado de 42gr a 150gr (ver Figura 5.12).



Figura 5.12: Diseño y montaje de una tolva de mayor capacidad.(1) Tolva que incluye de serie Filastruder, (2)La tolva que se ha diseñado añade mayor capacidad de pellets.

La Tabla 5.3 muestra los resultados obtenidos en el ensayo:

	Tolva Grande	Tolva pequeña
Muestras	2000	2000
Media (mm)	1.63	1.55
Desviación estandar	0.14	0.15
Mínimo (mm)	1.02	0.01
Máximo (mm)	2.20	2.40

Tabla 5.3: Datos del ensayo con distintas tolvas

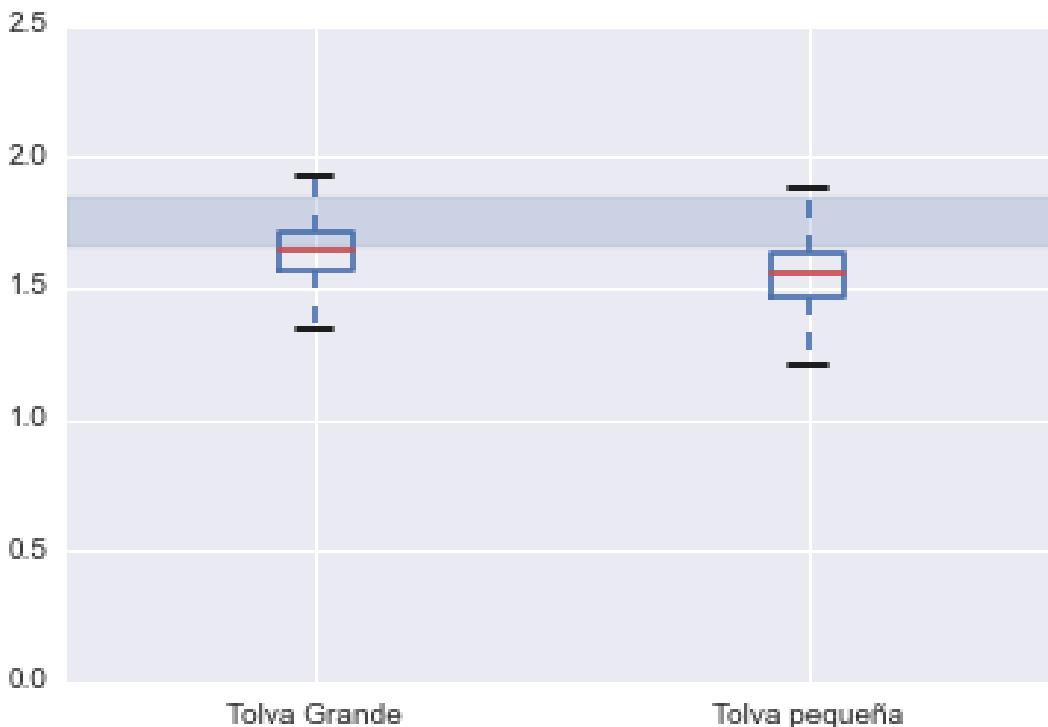


Figura 5.13: Diagrama de cajas

Como se ve en la Figura 5.13, en el que se representa la distribución de los datos, los datos obtenidos en el ensayo con la tolva grande, son algo más estables, por lo tanto, podemos confirmar, que las medidas tomadas para intentar mejorar la producción son acertadas, sin embargo, se sigue teniendo una variación y una desviación muy alta en el sistema, lo cual es un problema para intentar integrar un regulador del tipo PID. Por ello, se decide implementar un regulador experto para intentar controlar de forma más precisa el diámetro.

### 5.3. Lazo de control para regular el filamento

Durante las producciones realizadas anteriormente, se ha notado que existe una relación entre la velocidad de tracción y el diámetro final del filamento, sin embargo, el sistema que se dispone carece de la robustez necesaria para poder trabajar con un regulador del tipo PID, en el que es necesario conocer de manera lo más exacta posible, la distribución de la planta con la que se trabaja. Además el número de perturbaciones que afectan a nuestro sistema es demasiado amplio y no se puede llegar a tener control de todas y cada una de ellas.)

Como se puede ver en la Figura 5.14, la salida de filamento que proporciona el filastruder no es constante y en ocasiones, no está bien mezclada:



Figura 5.14: Mezcla incorrecta de la filastruder. Algunos trozos de granza no son mezclados de forma correcta antes de salir del extrusor.

Por ello, se decide no usar un regulador PID e intentar implementar un regulador experto, el cual, imitará las acciones que un humano tomaría para resolver el problema. Este tipo de reguladores se basan en un conocimiento previamente adquirido por una persona, que ha trabajado con el sistema. Para implementar este sistema, se definen una serie de reglas, en las que acotaremos los diámetros del filamento en regiones, y dependiendo, de si el diámetro crece o decrece, se actuará sobre la velocidad de tracción. La Figura 5.15 muestra en más detalle las reglas que se van a utilizar en el regulador.

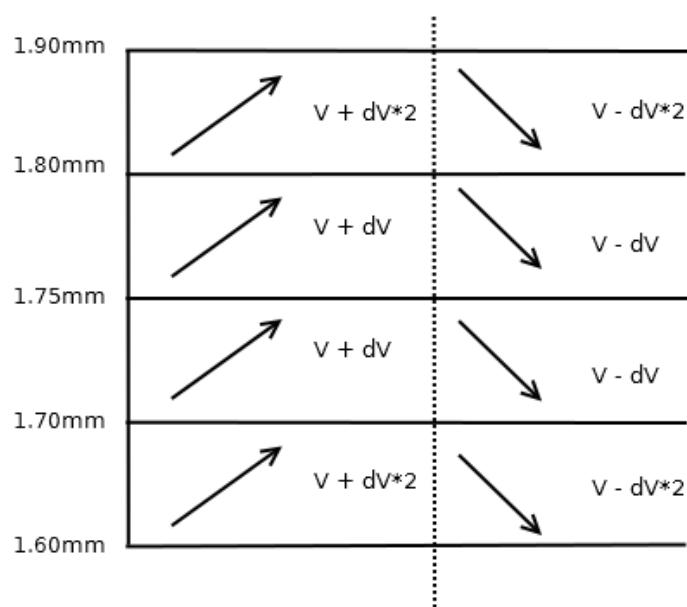


Figura 5.15: Reglas a utilizar en el sistema experto. En función de la zona en la que estemos aplicaremos un incremento positivo o negativo a la velocidad.

Separamos en cuatro tramos los diámetros comprendidos entre 1,60mm y 1,90mm, así mismo, también diferenciamos el sentido de avance entre las zonas, tanto si es descendente como ascendente. De esta manera podremos tener un control más preciso sobre la velocidad, pudiendo diferenciar tramo y la tendencia que toma el diámetro.

En el Anexo ?? se detallan diferentes experimentos que se han realizado modificando estas reglas del regulador, para comprobar su influencia en el diámetro.

Tomando los datos obtenidos en el experimento número 212123123121 ?? de la página ?? vamos a pasar a compararlos con los datos obtenidos de dos fabricantes distintos de filamento, en la Tabla 5.4.

	BQ	FormFutura	Filastruder
Medidas	291	291	291
Media (mm)	1.75	1.70	1.74
Desviación estandar	0.01	0.05	0.21
min(mm)	1.67	1.64	1.01
max(mm)	1.77	1.71	2.14

Tabla 5.4: Tabla comparativa de los resultados obtenidos



Figura 5.16: Comparativa filamentos distintos fabricantes

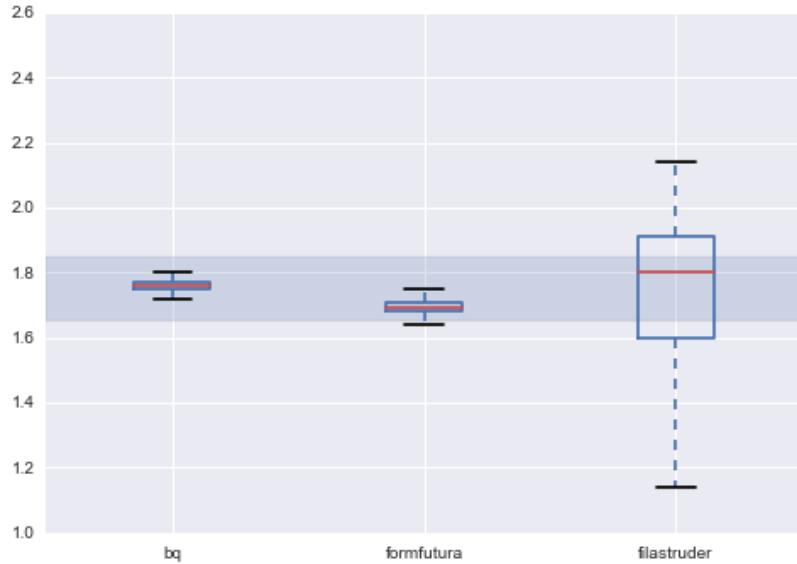


Figura 5.17: Diagrama de cajas con diámetros de distintos fabricantes

Como podemos observar en los datos, el diámetro de los filamentos que proporcionan empresas como BQ y formfutura, tienen unos valores mucho más estables que los obtenidos con Filastruder. Lo cual es normal debido a la maquinaria y condiciones de trabajo en los que se han realizado en los experimentos. Como se aprecia, el filamento de BQ cumple exactamente las condiciones requeridas en un principio, tener un diámetro nominal de  $1,75\text{mm}$  y estar comprendido entre los márgenes de  $1,65\text{mm}$  y  $1,85\text{mm}$ . Sin embargo, no podemos olvidar que el objetivo principal de nuestro proyecto era crear un sistema de adquisición de datos para gestionar la calidad del filamento, es por eso, que para realizar la comparación se ha escogido una bobina que cumplía los requisitos, pudiendo así comprobar la fiabilidad de nuestro sistema.

No obstante, el problema de calidad que se tiene en las bobinas es una realidad, y debido a que no se tiene una completa trazabilidad de los datos de producción, es muy difícil localizar qué bobinas son las que están defectuosas hasta que son usadas en una impresora.

## 5.4. Discusión de los resultados obtenidos

Tras los distintos experimentos que hemos realizado, podemos concluir que los datos adquiridos por el sistema de adquisición de datos, nos han sido útiles para comprobar cómo funcionaba la extrusora, y en caso de detectar un error, hemos sido capaces de encontrar los motivos ayudándonos del mismo.

Uno de los errores detectados ha sido la variación en el flujo mísico de salida en el extrusor. Para ello, fuimos capaces de realizar las medidas necesarias para comprobar que había un error y analizando los datos obtenidos, llegar a la conclusión de dónde estaba el problema.

A pesar de conocer el error que existía en la extrusora, no se ha decidido invertir tiempo en su reparación debido a que no suponía un impedimento en la realización del objetivo principal del proyecto. De haber sido parte crítica en la consecución del objetivo, hubieramos planteado su solución, incluso hubieramos llegar a pensar en el diseño propio de una extrusora.

También hemos podido realizar un pequeño estudio de la influencia de un regulador experto en el diámetro del filamento, no podemos afirmar que el regulador funcionó ya que en las pruebas realizadas la extrusora usada no funcionaba correctamente, pero si podemos afirmar, que los datos obtenidos con nuestro sistema de adquisición de datos, nos han sido útiles para poder obtener un modelo de nuestro sistema.

# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo, se discutirá el trabajo realizado durante el proyecto, así como el trabajo que queda por realizar desde la división de automatización y materiales de BQa medio-largo plazo.

### 6.1. Cumplimiento de los objetivos

Al finalizar el proyecto, nos encontramos con un sistema capaz de obtener los datos más importantes que caracterizan la calidad de un filamento. Con estos datos podremos trabajar a posteriori y tener una trazabilidad del filamento completa en caso de que se reciba alguna reclamación por parte de los clientes.

En el momento de plantear la idea de este proyecto, BQ tiene acceso a tres líneas de extrusión de filamento, pudiendo instalar el sistema en una de ellas. Sin embargo en el momento de realizar la puesta en marcha, no se pudo ceder esa línea debido a temas de planificación en la producción de filamento.

Para solucionar esto se adquiere una extrusora de laboratorio en la cual también es válido el sistema de adquisición de datos, pero hay retrasos en la entrega y no hacen posible disponer de ella antes de la entrega de este proyecto.

En el departamento de Innovación y Robótica, se tiene una maqueta de una extrusora casera la cual es totalmente válida para demostrar el funcionamiento de nuestro sistema. A pesar de que la extrusora produce plástico de poca calidad, es válida para comprobar nuestro sistema de control de calidad.

Por tanto, al terminar el proyecto, podemos afirmar que se han acometido todas las fases del proceso de fabricación del PLA. Al tener la extrusora casera, se han fabricado las herramientas necesarias para generar pellets de filamento reciclado (peletizadora) y poder comprobar su correcto uso a la hora de extruirlo.

### 6.2. Líneas de trabajo abiertas en BQ a raíz de este TFG

Durante la realización del proyecto, en la división de automatización y materiales, se ha usado el sistema de adquisición de datos para realizar un estudio de la degradación del PLA con el paso del tiempo. Después de recibir varias reclamaciones de los clientes se está investigando sobre cómo puede afectar el correcto almacenamiento de una bobina de PLA en el diámetro del mismo. Para ello, el estudio consta de las siguientes partes:

- Medir el diámetro de una longitud determinada de una bobina recién sacada de su embalaje
- Someter al filamento a diversas pruebas. Las cuales consiste en almacenar el filamento en unas condiciones de temperatura extremas, tanto en un congelador para enfriar, así como en un horno a una temperatura alta.
- Volver a medir el diámetro y estudiar los cambios

---

Gracias a esto, se están empezando a caracterizar estos problemas y obtener una solución rápida al cliente en caso de que los síntomas sean parecidos.

Así mismo, y algo que era un trabajo a realizar en el futuro en el departamento, se ha diseñado un sistema capaz de reciclar las bobinas de filamento que no eran útiles para un uso final en impresoras 3D y cómo hemos visto, el material reciclado obtenido es completamente válido para volver a realizar filamento.

Este proyecto de adquisición de datos no termina con la defensa de esta memoria. Desde BQ se va a seguir mejorando e incluyendo nuevas características que harán más versatil el sistema. Se pasan a continuación a detallar las líneas de trabajo en este proyecto:

### 6.3. Mejoras

Derivado a estos trabajos, se requieren las siguientes mejoras en las que se va a empezar a trabajar lo antes posible:

- Almacenamiento de la información en una base datos MYSQL. En lugar de almacenar la información en una tarjeta SD, se plantea almacenar toda la información en un servidor para poder realizar informes en tiempo real de la producción.
- Incorporar una impresora para generar pegatinas con códigos QR. De tal manera, si el sistema determina que el filamento extruido no cumple unos requisitos mínimos, automáticamente al ver la pegatina, se sepa si esa bobina pasa el control de calidad.
- En el año 2016 se tiene previsión de adquirir varias líneas de extrusión por tanto y gracias a que nuestro sistema es escalable en prestaciones, se puede realizar un sistema de supervisión superior en el que se tenga acceso del estado de la fábrica en la que se encuentre cada línea de extrusión y su información. En este caso, la información ya no se almacenaría en el sistema local, si no que haría falta un sistema de tratamiento de datos online.

### 6.4. Valoración final.

El resultado final del proyecto ha sido satisfactorio, presenteando un sistema versatil y capaz de solucionar el problema que se plantea al inicio. A raiz de la elaboración del proyecto, han surgido nuevos problemas los cuales se han afrontado como pequeños proyectos necesarios para la consecución del objetivo principal.

La realización de este trabajo final de grado ha llevado consigo el aporte de nuevos conocimientos en diversas materias como son: ingeniería mecánica, ingeniería de materiales, análisis de datos, trabajo en grupo y gestión de proyectos.

# Bibliografía

- [1] Página oficial de bq. <http://bq.com/es/>, August 11 2015.
- [2] Brent Stucker. Additive manufacturing technologies: Technology introduction and business implications. pages 1–11, August 7 2015.
- [3] Dan Mishek. How and when to choose between additive and subtractive prototyping]. pages 1–2, August 7 2015.
- [4] S.S. Crump. Apparatus and method for creating three-dimensional objects. <https://www.google.com/patents/US5121329>, June 9 1992. US Patent 5,121,329.
- [5] Zureks. Fundamento fdm. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AFDM\\_by\\_Zureks.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AFDM_by_Zureks.png), June 9 2008.
- [6] D. Rypl and Z. Bittnar. Triangulation of 3d surfaces recovered from stl grids. page 1, August 7 2015.
- [7] Stratasys. Fdm technology. <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>, June 9 2015.
- [8] Antonio Alberto Relaño Pastor. Estudio comparativo de piezas de abs y pla procesadas mediante modelado por deposición fundida. pages 83–93, August 12 2015.
- [9] Gran Loco. Diseño genérico de un extrusor. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Disenio\\_de\\_un\\_extrusor.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Disenio_de_un_extrusor.png), June 9 2006.
- [10] Roechling plastics. Distintos ejemplos de perfiles de extrusión. <http://www.roebling-plastics.es/>, June 9 2007.
- [11] Santiago Ferrández. Parámetros de un husillo de extrusora. [https://lh4.googleusercontent.com/-38dQ\\_PeujTE/TYCjbjVFSxI/AAAAAAAAB8/0gy301i\\_KCo/s1600/14.JPG](https://lh4.googleusercontent.com/-38dQ_PeujTE/TYCjbjVFSxI/AAAAAAAAB8/0gy301i_KCo/s1600/14.JPG), June 9 2012.
- [12] Rhys Jones, Patrick Haufe, Edward Sells, Pejman Iravani, Vik Olliver, Chris Palmer, and Adrian Bowyer. Reprap—the replicating rapid prototyper. *Robotica*, 29(01):177–191, 2011.
- [13] Juan Gonzalez Gomez. Conferencia de adrian bowyer en medialab. <http://www.iearobotics.com/blog/2009/02/04/conferencia-sobre-el-proyecto-reprap-en-madrid/>, August 10 2015.
- [14] Juan Gonzalez Gomez. Ficha técnica de r1. primera impresora de juan gonzalez gomez. [http://www.iearobotics.com/wiki/index.php?title=Makerbot\\_Cupcake:\\_R1](http://www.iearobotics.com/wiki/index.php?title=Makerbot_Cupcake:_R1), August 10 2015.
- [15] SMART CONTROLS. Solución scada de la empresa smart controls. <http://bottomlineindia.com/smart/triplex-extruder-scada.html>, September 11 2015.
- [16] CASTOOL. Página oficial de castool. <http://www.castool.com/es/product/visual-optimizer>, September 11 2015.
- [17] Página en thingiverse con información del proyecto de lyman extruder. <http://www.thingiverse.com/thing:380987>, September 9 2015.
- [18] Santiago López Pina. Repositorio online del proyecto. <https://github.com/darkomen/TFG>, September 9 2015.

- [19] Página oficial de gnu octave. <http://www.gnu.org/software/octave/>, September 9 2015.
- [20] Fernando Pérez and Brian E. Granger. IPython: a system for interactive scientific computing. *Computing in Science and Engineering*, 9(3):21–29, May 2007.
- [21] Wes McKinney. *Python for Data Analysis*. O' Relly, 2 edition, 2012.
- [22] T. Elmore. Filastruder developement thread. <http://www.soliforum.com/post/4783/#p4783>, August 14 2015.
- [23] D. Trapero. Diseño, construcción y control de un extrusor de filamento para impresoras 3d. page 37, August 14 2015.
- [24] flipper. Filament width sensor prototype version 3. <http://www.thingiverse.com/thing:454584>, August 14 2015.
- [25] V. A. Bershtein and V. M. Egorov. “differential scanning calorimetry of polymers”. pages 1–6, August 31 2015.
- [26] E. W. Fischer, H. J. Sterzel, and G. Wegner. Investigation of the structure of solution grown crystals of lactide copolymers by means of chemical reactions. *Kolloid Z Z Polym* 1973, September.
- [27] Finn Haugen. Ziegler-nichols’ closed-loop method. pages 2–4, September 2015.
- [28] Virginia Mazzone. Controladores pid. pages 1–11, August 17 2015.
- [29] Maribel Beltrán and Antonio Marcilla. Temario de la asignatura tecnología de polímeros. pages 137–139, August 27 2015.