

# Índice general

<b>1. Estado del arte</b>	<b>5</b>
1.1. Impresoras 3D . . . . .	5
1.2. Tecnologías de fabricación aditiva . . . . .	6
1.3. Fabricación de modelado por deposición fundido . . . . .	8
1.3.1. Materiales usados en impresión 3D . . . . .	10
1.4. Extrusión de polímeros . . . . .	11
1.4.1. Reprap . . . . .	13
1.4.2. Reprap en España . . . . .	15
<b>2. Introducción</b>	<b>18</b>
<b>3. Objetivos</b>	<b>20</b>
<b>4. Desarrollo</b>	<b>22</b>
4.1. Búsqueda de información . . . . .	22
4.2. Arquitectura planteada . . . . .	24
4.3. Elección del PLC . . . . .	26
4.4. NO SE COMO LLAMARLOOOO . . . . .	27
4.5. Montaje Filastruder . . . . .	29
4.6. Montaje armario PLC . . . . .	34
4.7. Sensor de diámetro DIY . . . . .	37
4.8. Programación del PLC . . . . .	43
4.8.1. Controlar temperatura extrusor . . . . .	45

# Índice de figuras

1.1.	Aproximación de una pieza con fabricación aditiva. Fuente [1]	5
1.2.	Principio de la fabricación con filamento fundido. Fuente [2]	8
1.3.	Esquema de la patente de S. Scott Crump. Fuente [3]	9
1.4.	Detalle de un extrusor realizando una pieza. Fuente [3]	10
1.5.	Esquema básico de una extrusora. Fuente [4]	11
1.6.	Pellets de PLA	12
1.7.	Características de un husillo.	13
1.8.	Distintos ejemplos de extrusión. Fuente [5]	13
1.9.	Darwin, primera impresora 3D del tipo Reprap	14
1.10.	Impresora Reprap Prusa Mendel I2. Fuente [6]	15
1.11.	Impresora Reprap Prusa Mendel I3	15
1.12.	Impresoras distribuidas por bq. Fuente [7].	16
1.13.	Distintos filamentos de BQ. Fuente [7]	17
2.1.	Ejemplo de bañera usada en enfriamiento por inmersión	18
2.2.	Carrete con filamento bobinado	19
2.3.	Muestra de filamento con problemas en el diámetro	19
4.1.	Variador Optidrive	22
4.2.	Sensor de diámetro y perifería	23
4.3.	Perifería distribuida	23
4.4.	Pantalla HMI	23
4.5.	Sensores de temperatura	24
4.6.	Programa que almacena las medidas tomadas en el sensor de diámetro	25
4.7.	Arquitectura propuesta	26
4.8.	Maqueta de filastruder montada	28
4.9.	Maqueta de filastruder funcionando	29
4.10.	Maqueta de filastruder funcionando	29
4.11.	Controlador PID de temperatura Sestos	30
4.12.	Se ancla la estructura a la base	30
4.13.	Calefactor en la alimentación y cañón	31
4.14.	Sensor PT100 de temperatura	31
4.15.	Filastruder montado	32
4.16.	Presentación de los componentes en el lugar adecuado.	32
4.17.	Atornillamos las canaletas y guías a la madera.	33
4.18.	Cableamos los componentes según los esquemas.	33
4.19.	Aspecto final cuadro eléctrico maqueta.	33
4.20.	Lámina, canaleta y guía donde irá el PLC.	34
4.21.	Cortamos la guía y canaleta según las necesidades.	34
4.22.	Comprobamos que entra dentro del armario.	35
4.23.	Cableamos los dispositivos entre sí.	35
4.24.	Cableamos las entradas-salidas del PLC.	36

4.25. Regletero con acceso a los pines del PLC. . . . .	36
4.26. Cuadro terminado. . . . .	37
4.27. Sensor CCD lineal. . . . .	38
4.28. Fichero gerber de la pcb. . . . .	39
4.29. PCB ya fabricada. . . . .	39
4.30. Materiales necesarios para soldar . . . . .	40
4.31. Soldando el microcontrolador. . . . .	40
4.32. Soldando componentes SMD. . . . .	40
4.33. Placa con los componentes soldados. . . . .	41
4.34. Sensor midiendo un filamento de 1.75mm. . . . .	41
4.35. Gráfica con regresión lineal. . . . .	42
4.36. Splash Screen del Automation Builder . . . . .	43
4.37. Diagrama de estados . . . . .	44
4.38. Sistema con un regulador PID . . . . .	45
4.39. Respuesta del sistema en lazo abierto . . . . .	45
4.40. Ajuste de la recta . . . . .	46
4.41. Respuesta del sistema con PID. Iteracción 1 . . . . .	47
4.42. Respuesta del sistema con PID. Iteracción 2 . . . . .	47
4.43. Respuesta del sistema con PID. Iteracción 3 . . . . .	48
4.44. Respuesta del sistema con PID. Iteracción 4 . . . . .	49

# Índice de tablas

1.1. Distintas tecnologías AM. Fuente [8] . . . . .	8
4.1. Dispositivos disponibles . . . . .	25
4.2. Especificaciones PLC . . . . .	26
4.3. Presupuestos de los tres distribuidores . . . . .	27
4.4. Características filastruder. Fuente[9] . . . . .	28
4.5. BOM sensor de diámetro . . . . .	38
4.6. Mediciones con el sensor . . . . .	42

# Capítulo 1

## Estado del arte

### 1.1. Impresoras 3D

En los últimos años ha tenido un gran auge las denominadas impresoras 3D. Máquinas capaces de crear un objeto físico de cero 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 cliente final).[1]

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 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.

Una de las ventajas de la fabricación aditiva es su rapidez [10], 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.

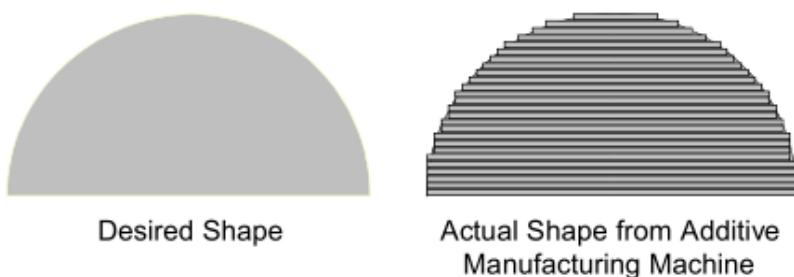


Figura 1.1: Aproximación de una pieza con fabricación aditiva. Fuente [1]

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 quisieramos 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 en nuestras manos. Una vez en nuestro

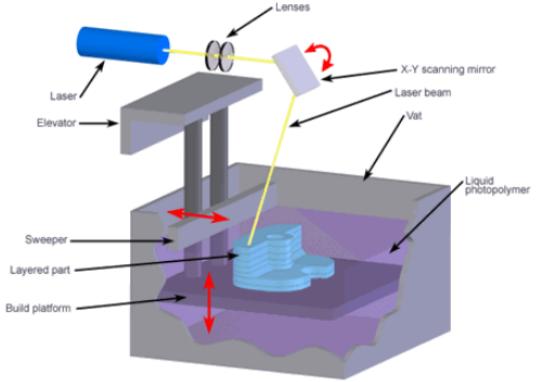
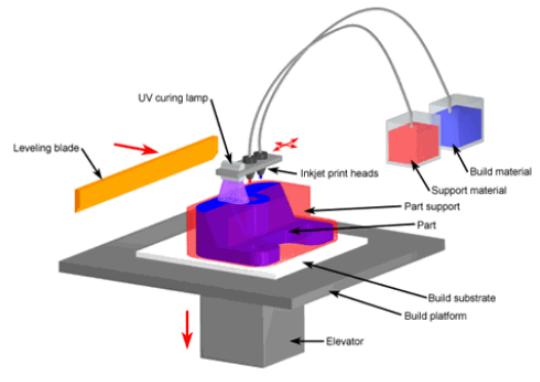
poder, deberíamos comprobar que la pieza cumple con nuestras especificaciones y ver que no nos equivocáramos a la hora de tomar alguna medida y saber las tolerancias de la máquina. Gracias a la tecnología aditiva, el tiempo se ha acortado, y como veremos más adelante, a día de hoy, no es necesario acudir 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 3Dsystems, Stratatasys 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 [3] es la que desarrolló **S. Scott Crump** co-fundador de Stratasys, la cual expiro en 2009 y permitió que pudiera extenderse el uso de esta tecnología.

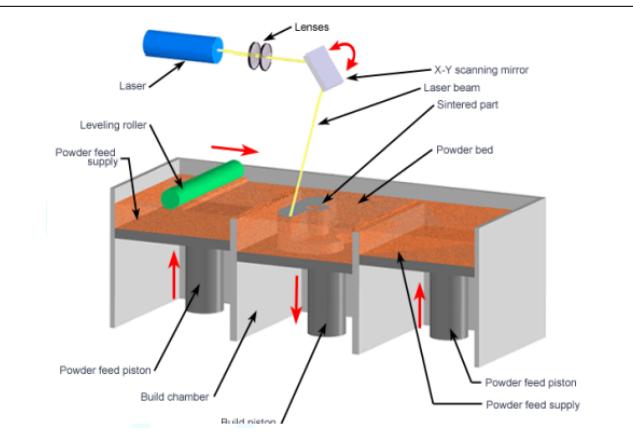
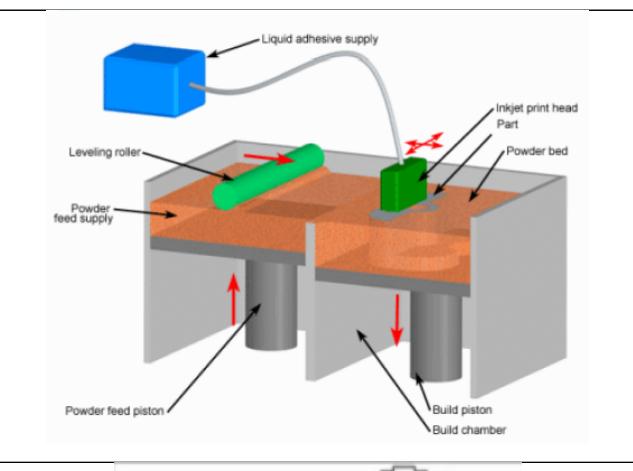
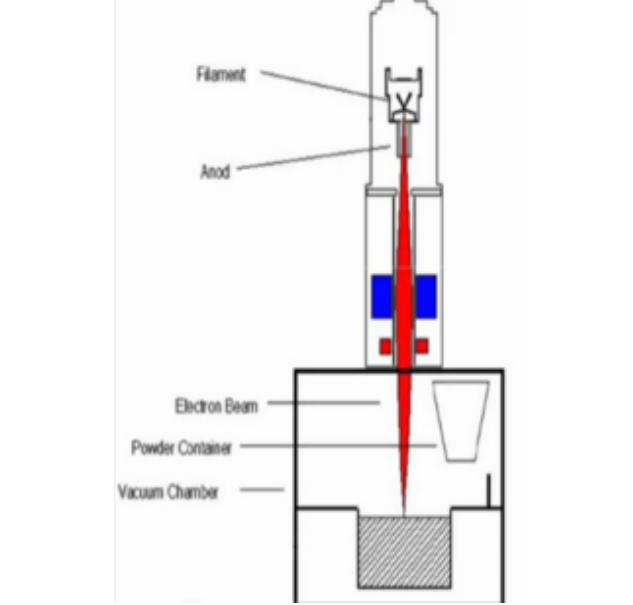
## 1.2. Tecnologías de fabricación aditiva

Dentro de la fabricación aditiva, existen varios modelos de máquinas, en las que el principio de funcionamiento es el mismo, pero la forma de materializar la pieza final son distintas.

Algunas de las tecnologías más usadas son las siguientes:

	<p><b>Estereolitografía (SLA)</b></p> <p>Considerada la primera técnica de fabricación aditiva. Fue patentada en 1986 y fabricada por 3d Systems en 1987. El principio de funcionamiento es la polimerización de una resina fotocurable. Puede alcanzar un espesor de capa de <math>100\mu\text{m}</math>.</p>
	<p><b>Polyjet</b> De la empresa Israelí Objet. Patentada a finales de los 90 Resina fotocurable de base acrilato. Necesita soportes.</p>

Continua en la siguiente página

	<p><b>Selective Lase Sintering (SLS)</b>      Patentada en 1979. Procesado de polímeros, metales y cerámicos. Puede alcanzar un espesor de capa de <math>100\mu m</math>. Necesidad de recubrimiento en metales y cerámicos para ser sinterizados.</p>
	<p><b>Three Dimensional Printing</b>      Patentada en el MIT. Para mezclas de cerámicos. Se usa en modelos y maquetas.</p>
	<p><b>Electron Beam Melting (EBM)</b>      Fabricada y comercializada por Arcam (1997). Funde polvo metálico de varias aleaciones, incluyendo las de Titanio. Alta velocidad de producción por la potencia del haz de electrones y la posibilidad de guiarlo cambiando el campo magnético a través del cual pasa el haz.</p>

Continua en la siguiente página

	<p><b>Fused Deposition Modelling (FDM)</b> Comercializada por Stratasys en 1991. Extrusión de filamento (Polímeros). Tecnología más extendida Necesita soportes. Varios tipos de termoplásticos.</p>
--	--

Tabla 1.1: Distintas tecnologías AM. Fuente [8]

Sin embargo la tecnología mas divulgada en la sociedad es la de material extruido, ya que es la tecnología más sencilla de realizar de manera doméstica. En el siguiente capítulo se detallará en profundidad su funcionamiento, puesto que es la tecnología que se abordará en este proyecto.

### 1.3. Fabricación de modelado por deposición fundido

La fabricación de modelado por deposición fundido (**FDM®** en inglés) 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, y poseedor de la patente en la que se detalla su funcionamiento [3]. Por ello, se usa el término equivalente, fabricación con filamento fundido (**FFF**).

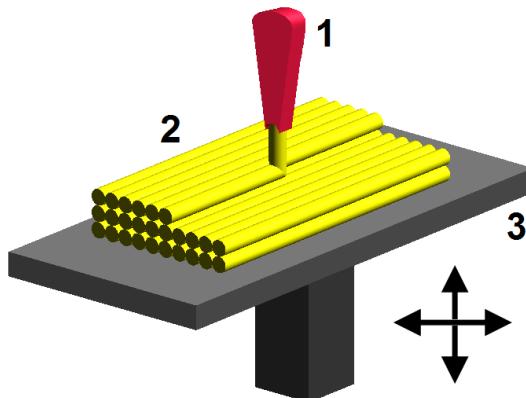


Figura 1.2: Principio de la fabricación con filamento fundido. Fuente [2]

En la imagen 1.2 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.

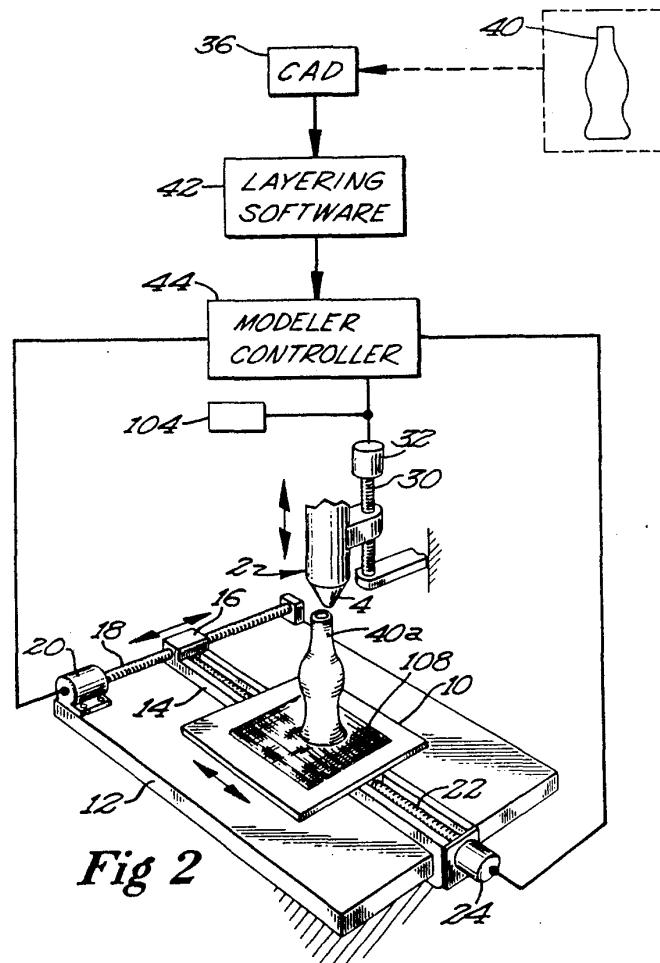


Figura 1.3: Esquema de la patente de S. Scott Crump. Fuente [3]

Este sistema de fabricación, tiene tres pasos definidos:

- **Pre-procesado:** Un software especial lamina 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, la impresora pone material que posteriormente 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[11]. 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 imagen 1.4) y genere las trayectorias necesarias para realizar cada capa. Este programa, almacenará las trayectorias en un fichero GCODE, que sí se podrá mandar a la impresora.

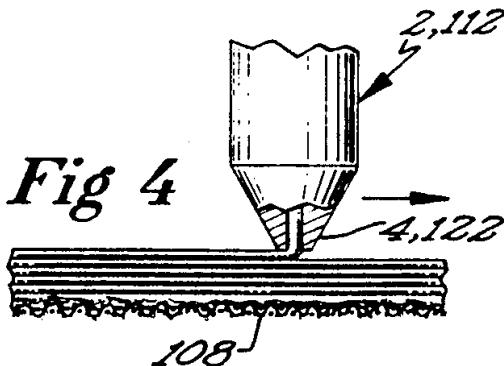


Figura 1.4: Detalle de un extrusor realizando una pieza. Fuente [3]

Según explica Stratasys en su página web [12], 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.

Según podemos leer en la patente S. Scott Crump [3] 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*

### 1.3.1. 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:

- **ABS** o acrilonitrilo butadieno estireno.
- **PLA** o poliácido láctico.
- **PVA** o alcohol de polivinilo.
- **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[13]. Por ello, en función de la utilidad que se vaya a dar a la pieza final, será recomendable usar un polímero u otro. 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 de ese modo 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.

## 1.4. 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.

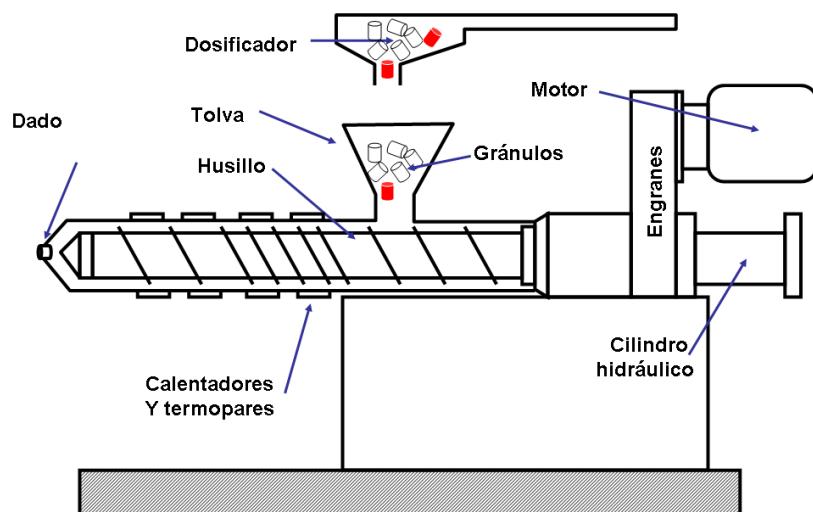


Figura 1.5: Esquema básico de una extrusora. Fuente [4]

Las principales variables de control que influyen en el acabado del producto final, son la velocidad de extrusión y la temperatura del cilindro hidráulico afectando estos en la calidad final del producto.

La velocidad 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 repercute 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 por contra, influye en la viscosidad del polímero, este parámetro repercute directamente en la resistencia al fundido. Lo cual es bastante importante, por que en el caso que nos ocupa, el material obtenido será posteriormente fundido en una impresora 3D.

En la imagen 1.5 podemos observar los distintos elementos que conforman la extrusora:

- **Dosificador:** es el encargado de suministrar el polímero, normalmente en forma de granza, a la tolva garantizando un suministro constante.



Figura 1.6: Pellets de PLA

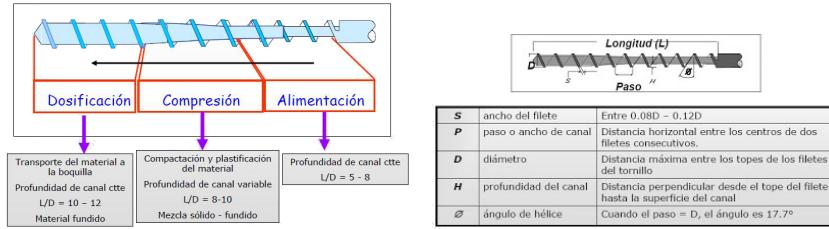
- **Tolva:** depósito en el que cae la granza proveniente del dosificador. Debe proveer un flujo constante al extrusor para evitar cortes en el objeto que se está construyendo.

Su diseño es muy importante, y en función del tipo de material que esté suministrando deberá ser de una manera u otra, debido a 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 debe ser más duro que el material que se está extruyendo, para lograr una larga duración.
- **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 1.7a 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.



(a) Forma de un husillo. Fuente [14] (b) Parámetros de un husillo. Fuente [15]

Figura 1.7: Características de un husillo.

- **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.
- **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.

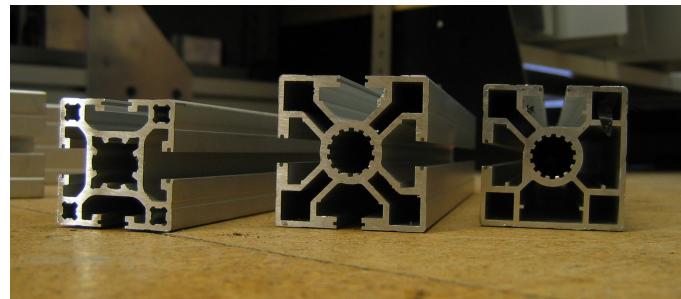


Figura 1.8: Distintos ejemplos de extrusión. Fuente [5]

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.

#### 1.4.1. Reprap

El proyecto Reprap lo inicia Adrian Bowyer y su equipo en 2006 desde la Universidad de Bath [16]. Nace con la idea de facilitar toda la información necesaria para crear y distribuir libremente una máquina de prototipado rápido.

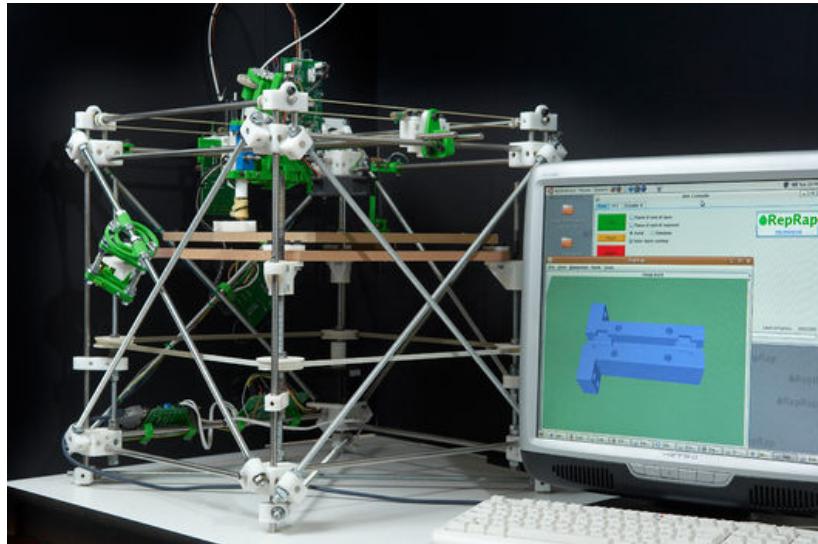


Figura 1.9: Darwin, primera impresora 3D del tipo Reprap

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 posee. 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. A pesar 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 había hecho y le añadió algunas mejoras, tales como:

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

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

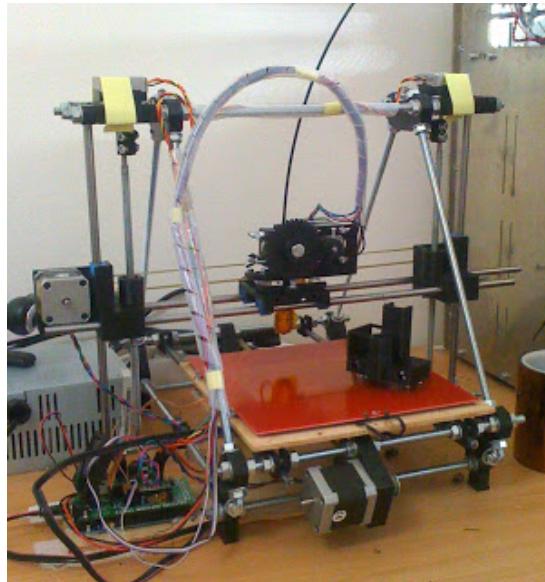


Figura 1.10: Impresora Reprap Prusa Mendel I2. Fuente [6]

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 sostenía todo el peso de la impresora, dándole estabilidad y robustez. Para muchas personas, fue un 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 1.11: Impresora Reprap Prusa Mendel I3

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.

#### 1.4.2. 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 Repra en España. Como el propio Juan dice en su web[17]:

*"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[18] y comenzando 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.

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

En 2013, Juan Gonzalez y Alberto Valero entraron a trabajar en el departamento de innovación y robótica de BQ para realizar impresoras 3D. A día de hoy, BQ comercializa dos modelos de impresoras 3D: Witbox una impresora 3D ya hecha, pero que es 100 % libre, toda la documentación de como está fabricada están disponibles en su web; y la prusa Hephestos, una impresora derivada de la Prusa I3 en formato DIY, para que el usuario final sea quien realice el montaje.



(a) Witbox

(b) Hephestos

Figura 1.12: Impresoras distribuidas por bq. Fuente [7].

A día de hoy, BQ también distribuye su propio filamento el cual tiene las siguientes características:

- **Tipo de polímero:** PLA.
- **Diámetro Medio:** 1.75mm.

---

- **Temperaturas de extrusión** 195-220 °C.

- **Peso:** 1Kg.



Figura 1.13: Distintos filamentos de BQ. Fuente [7]

La fabricación es subcontratada a otra empresa, la cual se encarga de realizar la extrusión del filamento, su bobinado y empaquetado final. Aunque a día de hoy el filamento de BQ es de gran calidad, el proceso de fabricación está en constante mejora y desde BQ se trabaja para que la calidad del filamento y sobre todo el índice de producción del mismo, sea alto.

Como veremos a continuación, esta es la principal premisa de este proyecto, realizar un sistema, capaz de controlar toda la etapa de fabricación del filamento, registrando las temperaturas de funcionamiento y el diámetro final con el que es extruido.

# Capítulo 2

## Introducción

En la actualidad se disponen de dos líneas de extrusión encargadas de la producción del filamento de PLA (Poliácido láctico) que vende y distribuye la empresa bq. Este filamento, es usado en la actualidad como consumible para las impresoras 3D.

Cada línea de extrusión, está formada por los siguientes elementos:

- **Extrusora:** Es la encargada de convertir la materia prima, que es introducida en forma de granza, a un hilo continuo denominado filamento. La granza son pequeños cilindros de PLA que son convertidos en filamento al salir de la extrusora. ( Ver imagen 1.6)  
En la instalación sobre la que vamos a implementar el desarrollo contenido en este proyecto, la forma final es cilíndrica. Aunque existen multitud de modelos de boquilla para extruir el material con disintas formas. (Ver imagen 1.8)
- **Enfriamiento por inmersión:** A la salida de la extrusora se coloca una bañera de enfriamiento que, como su propio nombre indica, se encarga de enfriar el material de forma gradual. Se usa una 'bañera' llena de agua con una temperatura controlada para lograr el enfriamiento del filamento según salga de la extrusora. Es un método habitual en este tipo de tecnología de fabricación debido a las altas velocidades de producción que podemos llegar a adquirir.



Figura 2.1: Ejemplo de bañera usada en enfriamiento por inmersion

- **Unidad tractora:** mediante la que se hace avanzar el filamento desde la salida de la extrusora hasta la entrada de la bobinadora. Siendo responsable del adelgazamiento del filamento, que aún se encuentra templado en la bañera de refrigeración.

- **Unidad de almacenamiento:** al tratarse de un proceso continuo es necesario un sistema que actúe como buffer de filamento mientras se realiza el cambio de carrete en la bobinadora.
- **Bobinadora:** Es la encargada de enrollar el filamento en bobinas para su posterior distribución. Estás bobinas también son las usadas normalmente en la impresión 3D, aunque existe algún intento de estandarización al respecto, cada fabricante tiene su carrete. Y no todos son compatibles entre si. En esta parte de la instalación, es donde se tiene un control del diámetro final que adquiere el filamento, ya que es la última parte antes de su almacenaje.

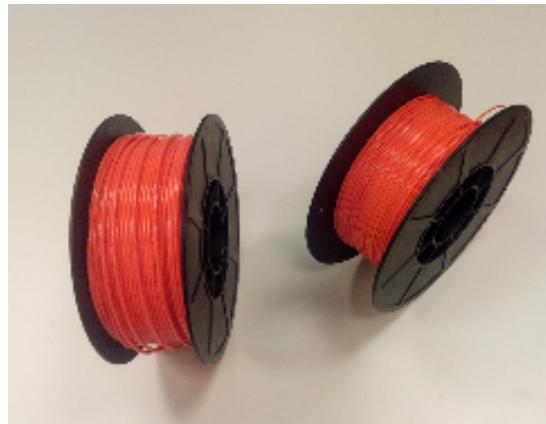


Figura 2.2: Carrete con filamento bobinado

En la línea de fabricación existente la unidad tractora, la de almacenamiento y la bobinadora están integradas en una única máquina. En la actualidad el sistema es completamente funcional. Aunque los parámetros de entrada de cada uno de sus componentes (extrusora, bañera y bobinadora) se operan en lazo abierto y de forma manual. No es un producto adquirido de una vez. Por ello, no se dispone de comunicación directa, por ejemplo, entre la bobinadora y la velocidad de extrusión, en consecuencia, si hay algún tipo de error debe ser el operario encargado de la supervisión en parar todo el proceso y volver a arrancar.

La extrusión del filamento, es un proceso en el que influyen muchas variables como pueden ser la temperatura de la granza en el interior de la extrusora y la velocidad de extrusión. Estos problemas derivan en el producto final en que no se consigue un diámetro omogeno, en nuestro caso 1.75mm, como se puede comprobar en la imagen 2.3.

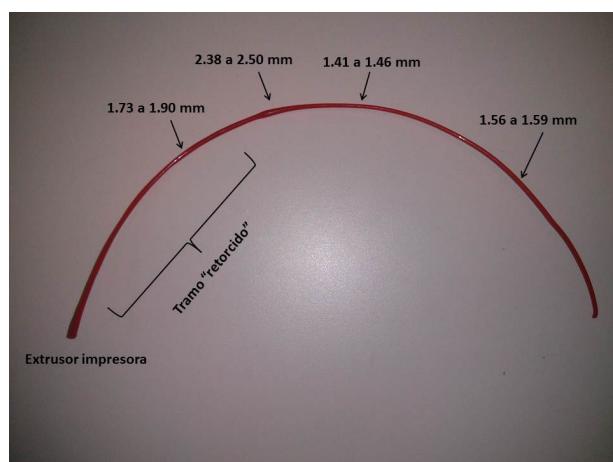


Figura 2.3: Muestra de filamento con problemas en el diámetro

# Capítulo 3

## Objetivos

Como se ha comentado a lo largo del capítulo introductorio, para el correcto funcionamiento de la línea es necesario un operador que controle y supervise el funcionamiento de la misma, realice la carga de granza en la extrusora y la carga y descarga de los carretes en la bobinadora. Debido a ello se generan errores en la producción que sólo son visibles una vez que el producto ha sido almacenado y es sometido a las convenientes pruebas de calidad, almacenando así un producto que no es de la calidad necesaria para comercializarlo.

Para minimizar el error humano, se propone la implementación de un sistema de aquisición y procesamiento de datos (SCADA) que permita el análisis durante y posterior la producción, de los diferentes parámetros del sistema. Con el fin de modelar parcialmente el mismo para tratar de cerrar el lazo de control entre la unidad tractora y el sistema de control del diámetro. De esta manera, podemos ver los aspectos que influyen en el diámetro y que el propio sistema sea capaz de corregirlo en tiempo real durante la producción.

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. Ya que actualmente disponemos de instrumentación que no hemos elegido nosotros, deberemos adquirir toda la documentación para poder lograr conseguir la automatización del sistema y ver cómo funciona individualmente cada uno.
- Defición 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 seis sensores de temperatura que dispone la planta (cinco de ellos en extrusora y uno en bañera de enfriamiento), y 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.

---

La segunda fase del proyecto, consistirá en la implementación en planta de los distintos reguladores diseñados y probados en la fase anterior. Como primera aproximación la salida a controlar será el diámetro del filamento y la entrada la velocidad de extrusión, ya que es la variable que influye directamente en el diámetro a conseguir. 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.

Para el completo desarrollo de esta segunda fase, y poder demostrar el correcto funcionamiento en la línea, necesitaremos la aprobación de la empresa que explota la línea de extrusión. Aunque se tratará de un sistema modular que será fácil de integrar en otras líneas de producción parecidas. Siendo el sistema totalmente compatible y escalable para futuras líneas de extrusión que se adquieran.

A continuación, se detallan los objetivos a conseguir en el proyecto y un diagrama de gant con la planificación inicial del proyecto:

- Documentación de la instrumentación de la planta.
- Definir la arquitectura para la comunicación del PLC y la instrumentación
- Definir requisitos del PLC a adquirir.
- Programación del PLC.
- Realización del armario eléctrico para montar en la fábrica.
- Estudio de los datos adquiridos y desarrollo del modelo teórico de la planta.
- Comprobar qué regulador se amolda a nuestras necesidades.
- Puesta en marcha del regulador en planta y comprobar resultados.

# Capítulo 4

## Desarrollo

### 4.1. Búsqueda de información

Desde la fábrica, no nos facilitan un listado con el hardware instalado en la línea de extrusión, ya que no existe, por tanto, el primer paso es identificar el hardware que disponemos con ayuda de las fotos tomadas:



Figura 4.1: Variador Optidrive



Figura 4.2: Sensor de diámetro y perifería



Figura 4.3: Perifería distribuida

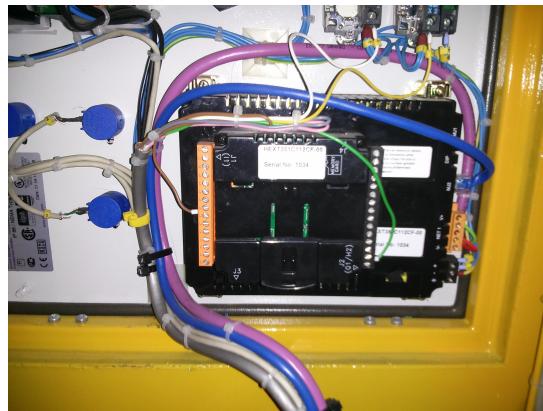


Figura 4.4: Pantalla HMI



Figura 4.5: Sensores de temperatura

Con ayuda de los responsables de la fábrica y buscando los números de serie que aparecen en las fotos anteriores, llegamos a la conclusión de que el hardware que disponemos es el siguiente:

- **Reguladores temperatura Extrusora:** 5x Eroelectronic LFS
- **Regulador temperatura bañera:** 1x OMRON E5CC
- **Bobinadora: IO distribuidas:**
  - SmartStix I/O: HE559DQM706B y HE559DI710B
  - HMI: HE-XT351C112CF
  - Variador (control tractora): Optidrive rrp2 ODP-24400-SP
  - Sensor diámetro: conectado a módulo Adam 6066
    - Omron ZX-GIF41 (RS232)
    - Omron ZX-GTC41 (Controlador)
    - Omron ZX-GT28S41 (sensor)
  - Relés: OMRON MY2IN

Así mismo, disponemos de los datasheet y sabemos qué tipo de comunicación podemos disponer con cada uno, información necesaria para poder establecer la arquitectura del sistema.

## 4.2. Arquitectura planteada

Antes de plantear la arquitectura, deberemos establecer el protocolo de comunicaciones y el medio físico por el que irán conectados entre sí. El protocolo establece las reglas necesarias para que dos dispositivos se comuniquen correctamente, haciendo un símil con la realidad, sería el idioma que usan dos personas para hablar. Si dos personas mantienen una conversación en un distinto lenguaje, no se entenderán. Y el medio físico, es cómo se hará la comunicación. Mirando las especificaciones de los componentes llegamos a la siguiente conclusión

Dispositivo	Protocolo	Medio
Senores temperatura	Modbus	RS485
Pantalla HMI	Modbus	RS485
Adam	Modbus-TCP	RS485
Sensor diámetro	-	RS232
Variador	Modbus-TCP	RS485
Perifería distribuida	CsCAN	Modbus
Bobinadora		Cableado

Tabla 4.1: Dispositivos disponibles

Todos los dispositivos usan protocolos de comunicaciones industriales, como son Modbus y CsCAN. El sensor de diámetro por ejemplo, está conectado a un PC mediante RS232, en el que un software almacena en una base de datos SQLITE (ver imagen 4.6) las medidas que se van tomando, por ello, será necesario acceder a esa base de datos.



Figura 4.6: Programa que almacena las medidas tomadas en el sensor de diámetro

La bobinadora, no usa ningún protocolo de comunicaciones, mediante señales de entrada salida, ese va realizando la comunicación.

Por tanto, con esta información, podemos establecer la arquitectura del sistema.

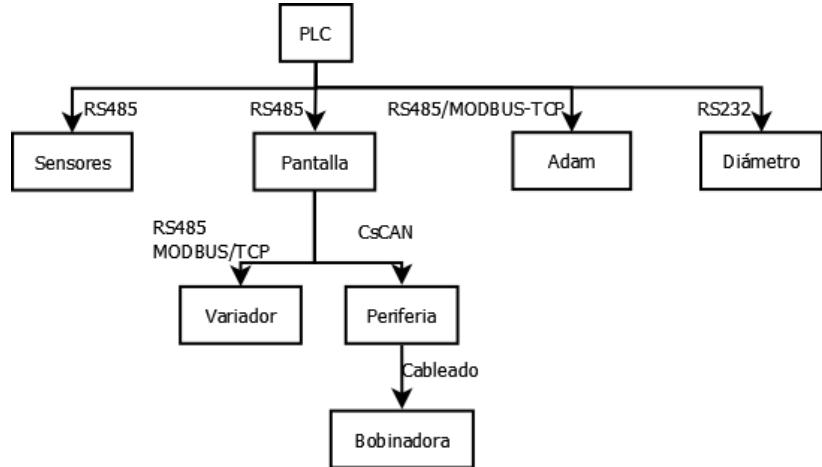


Figura 4.7: Arquitectura propuesta

Debemos buscar por tanto, un autómata programable industrial (PLC) que cumpla con las siguientes especificaciones:

Característica	Descripción	Cantidad
Comunicaciones industriales	Ethernet	1
	RS485	1
	RS232	1
Software	Acceso R/W a tabla SQL	
Almacenamiento externo	USB o SD	1
Periferia digital	Entrada	8
	Salida	0
Periferia analógica	Entrada	4
	Salida	1

Tabla 4.2: Especificaciones PLC

### 4.3. Elección del PLC

También se intentará buscar una marca 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, conseguiremos 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.

Se habla con cada uno de los distribuidores que ofrecen los productos en España, pidiendo un presupuesto con el material necesario para suplir las necesidades del proyecto:

Distribuidor	Precio (€)
Unitronics	390
Wago	1374
Abb	506

Tabla 4.3: Presupuestos de los tres distribuidores

Debido al alto presupuesto que nos propuso Wago se descartó, ya que en una primera aproximación, se eligió por que ofrecían alternativas baratas a grandes empresas como Siemens y ABB, sin embargo en el caso que nos ocupa y como se puede ver en la tabla 4.3 el precio de ABB es muy competitivo. De hecho es la marca que se elige, debido a que el coste con la marca Unitronics no supone un gasto excesivo y la fiabilidad de los autómatas y el software que provee es mejor. Además trae de serie un servidor web con el que podremos hacer una interfaz en la que veremos el estado de la fábrica de forma remota. Por ello, el hardware que se decide adquirir es el siguiente:

- PM564-RP-ETH CPU AC500-eCo, 128kB, 6DI/6DO-R/2AI/1AO, 24VDC. ETH y WEB SERVER. (Requiere: conectores 9+11 polos)
- AI562 Módulo S500-eCo, 2AI PT100/1000, Ni100/1000, Resist. 150/300 ( Requiere conector 11 polos)
- MC502 SD Memory Card 512 MB
- MC503 Adaptador para tarjeta SD de memoria AC500-eCo.

#### 4.4. NO SE COMO LLAMARLOOOO

Una vez realizado el pedido del PLC y disponibles los datasheet de los sensores, desde la fábrica de filamento nos informan que no desean continuar con el proyecto y que no nos facilitarán más información acerca del proceso de fabricación. Por ello, el sentido de este proyecto cambia, ya que no podremos tener acceso a los sensores ni ninguna instrumentación de la fábrica.

Desde BQ se tienen planes de investigación en lo referente a los polímeros usados en la impresión 3D para poder mejorar en el producto que ofrecen, y hay intención de adquirir dos extrusoras propias:

- Extrusora industrial.
- Extrusora de laboratorio.

Con cualquiera de estas dos extrusoras se podría implementar el sistema propuesto para este proyecto, sin embargo el principal problema son los tiempos de adquisición que no se tiene planeado comprarlas hasta el último trimestre de 2015, con lo que el plazo de entrega del presente proyecto se alargaría.

---

Podría realizarse el proyecto sin tener ninguno de los materiales, únicamente con el PLC y simuladores del protocolo MODBUS, pero no sería algo completo. En el departamento de robótica e innovación de BQ se dispone de un KIT DIY de una extrusora de filamento, filastruder.

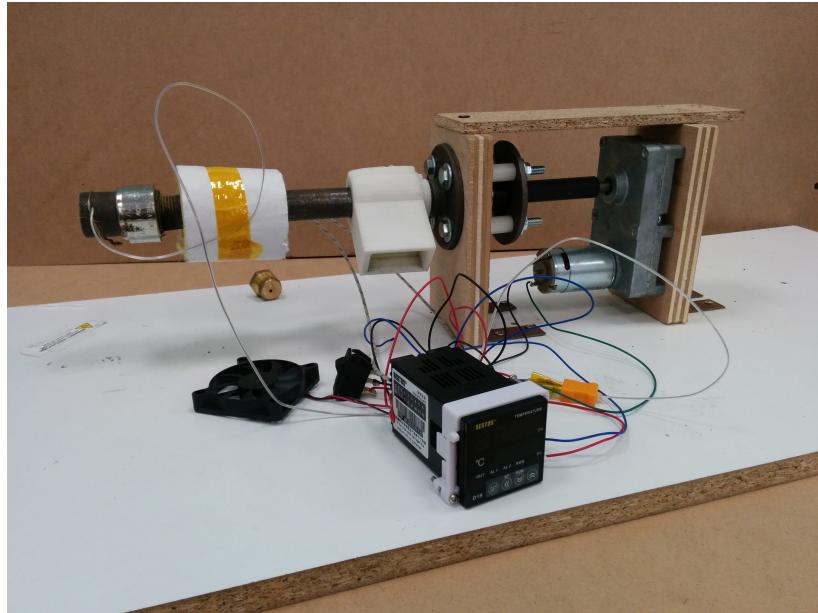


Figura 4.8: Maqueta de filastruder montada

Filastruder se presenta como proyecto en Noviembre de 2012 [19] y consiguió recaudar 212,278\$ en una campaña de kickstarter. Es un extrusor de baja capacidad y de bajo coste, liberado como Open Source. 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:

<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 4.4: Características filastruder. Fuente[9]

La filastruder que disponemos, trae un controlador PID que mediante una resistencia de potencia y un termopar tipo J, consigue regular la temperatura del dado de la extrusora. Así mismo, trae un motor de continua, con una etapa reductora, para poder mover el husillo y hacer avanzar los pellets de PLA por el cañón.

La maqueta lleva parada alrededor de un año y no se sabe muy bien si su funcionamiento es el correcto, por ello, se monta con una fuente de alimentación y se comprueba si al menos es capaz de mover el husillo y calentar el cartucho.

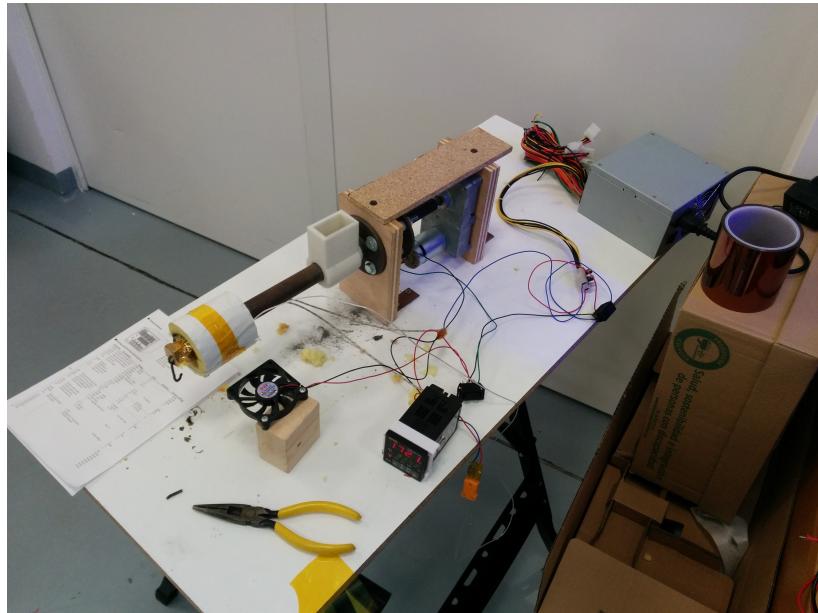


Figura 4.9: Maqueta de filastruder funcionando



Figura 4.10: Maqueta de filastruder funcionando

Después de vaciar y limpiar correctamente el cañón, comprobamos que el funcionamiento del filastruder puede sernos útil para al menos, hacer un proyecto a escala reducida de lo que originariamente se pensó. Por tanto, los objetivos vistos en el capítulo 3, página 20, no cambian y decidimos continuar usando el filastruder como herramienta.

En este punto, tenemos accesibles los materiales necesarios para la realización del proyecto, así podremos avanzar en el proyecto sin necesidad de pedir permisos a tercera personas, sin embargo se añaden nuevas tareas al proyecto, como la puesta en marcha de nuestra propia extrusora, lo cual añadirá una dificultad extra.

## 4.5. Montaje Filastruder

El control de temperatura del filastruder se realiza mediante un regulador PID modelo Sestos D1S. Conectándole el termopar tipo J y el cartucho calefactor, es capaz de regular la temperatura

---

que deseemos del dado, el único problema es que no dispone de comunicaciones industriales, y sólo se puede introducir la temperatura deseada mediante el display que incorpora.



Figura 4.11: Controlador PID de temperatura Sestos

Se decide entonces no usar el PID e integrar el control de temperatura en el PLC ya que, con el hardware que compramos tenemos dos entradas analógicas capaces de leer sensores de temperatura del tipo PT100. De este modo, podremos introducir dos zonas de calentamiento, una en el dado del cañón y otra en la entrada de los pellet para poder tener varios registros de temperaturas como se tenía en la idea principal, que se disponían hasta cinco sensores de temperatura.

Se pasa a instalar sobre una plancha de madera la filastruder y todo el cableado futuro que se va a usar a lo largo del proyecto:



Figura 4.12: Se ancla la estructura a la base

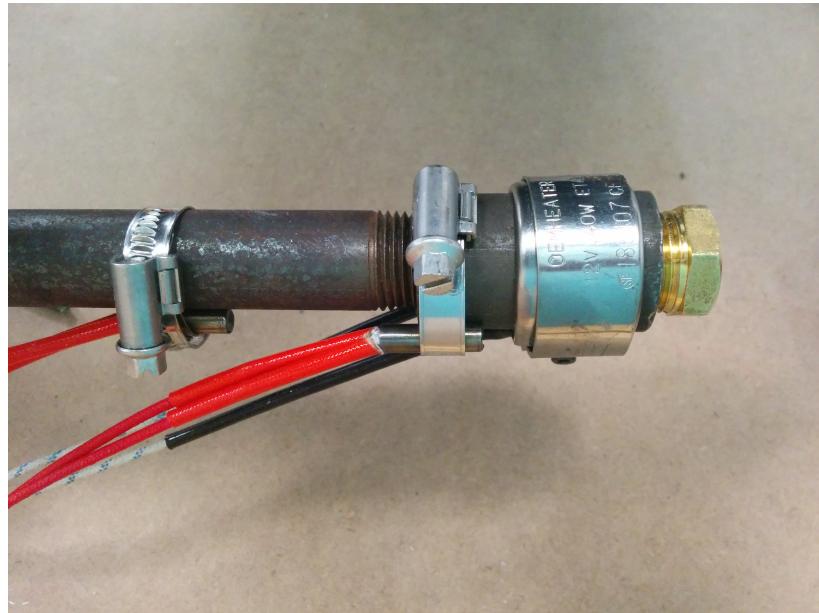


Figura 4.13: Calefactor en la alimentación y cañón

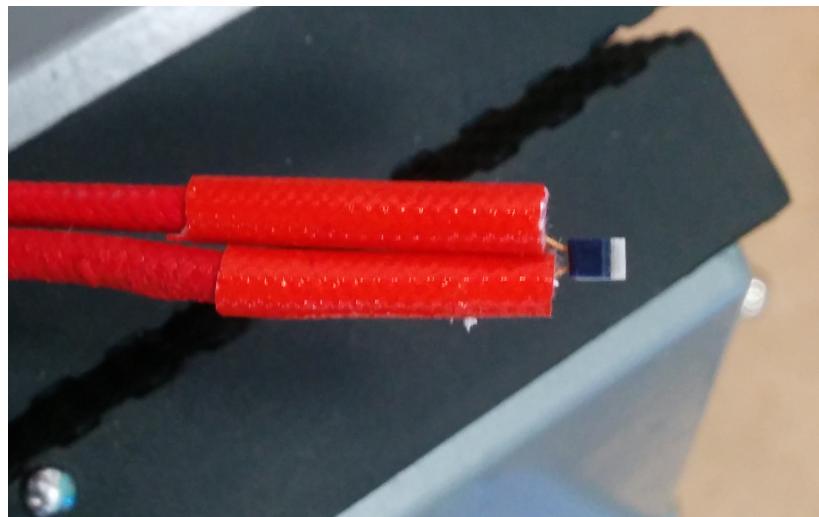


Figura 4.14: Sensor PT100 de temperatura

Una vez instalados los cartuchos y las sondas de temperatura en la filastruder, se pasa a aislar el cañón para que la disipación de calor al exterior no sea elevada y poder mantener una temperatura constante.

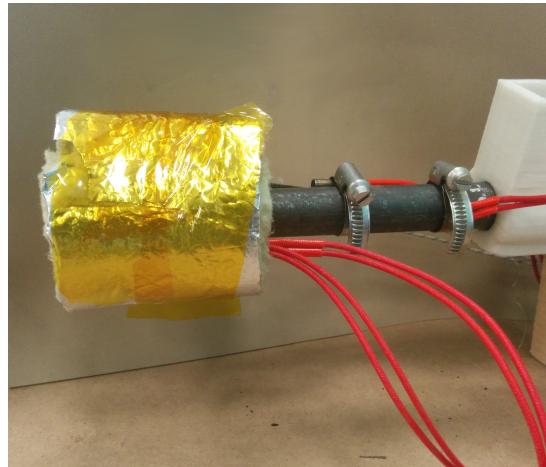


Figura 4.15: Filastruder montado

El siguiente paso es cablear todas las señales a un armario que instalaremos en la propia maqueta en el espacio reservado para ello, este armario estará conectado al armario del PLC para poder realizar el control de la maqueta:

- Sondas de temperatura.
- Reles para controlar las resistencias de potencia y el motor del husillo.

El circuito eléctrico a cablear está indicado en el Anexo ??.

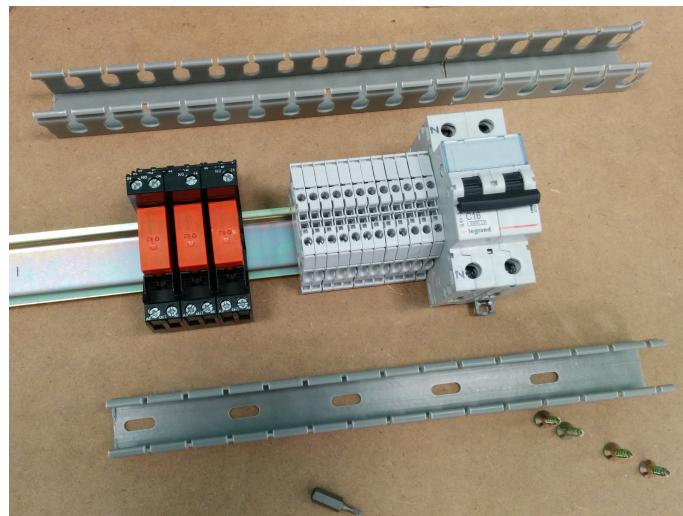


Figura 4.16: Presentación de los componentes en el lugar adecuado.



Figura 4.17: Atornillamos las canaletas y guías a la madera.

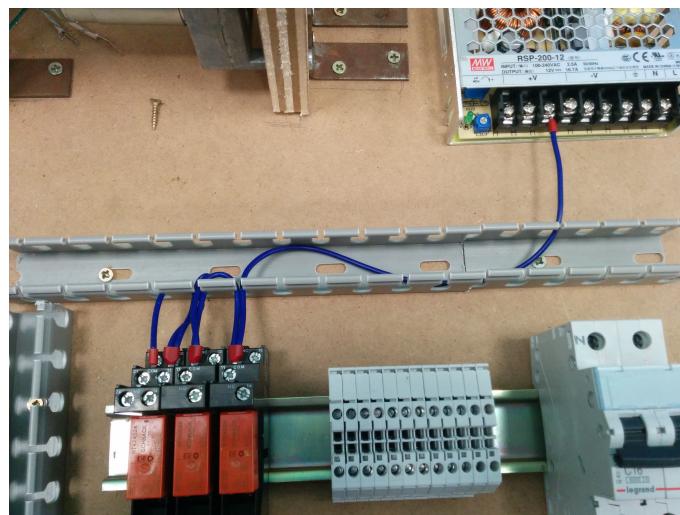


Figura 4.18: Cableamos los componentes según los esquemas.

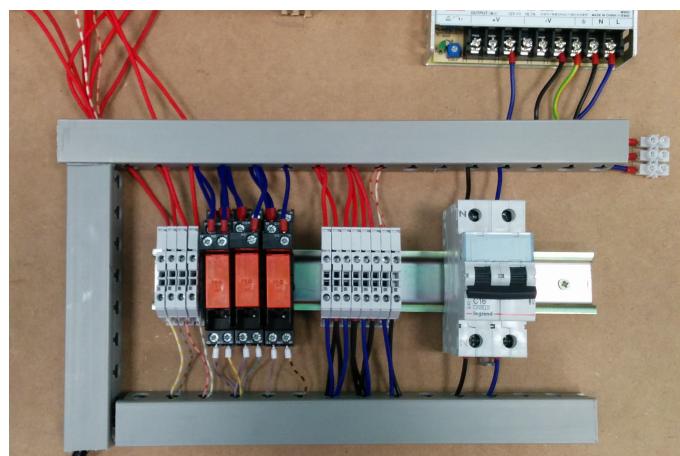


Figura 4.19: Aspecto final cuadro eléctrico maqueta.

## 4.6. Montaje armario PLC

A continuación, se va a realizar el montaje del armario eléctrico del PLC, en este armario, irá el siguiente material:

- Protecciones eléctricas.
- Fuente de alimentación para conseguir 24V de tensión continua.
- PLC y tarjeta de expansión
- Bornas de conexión.

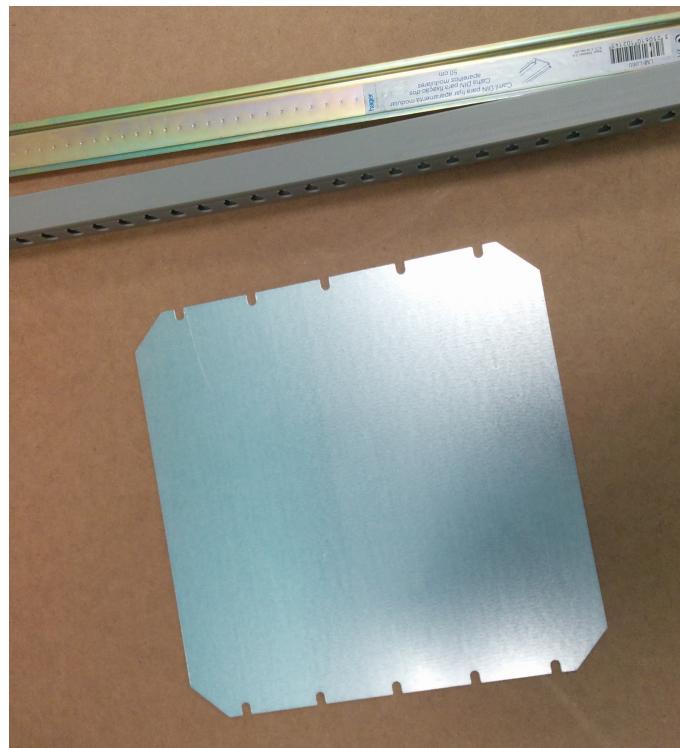


Figura 4.20: Lámina, canaleta y guía donde irá el PLC.

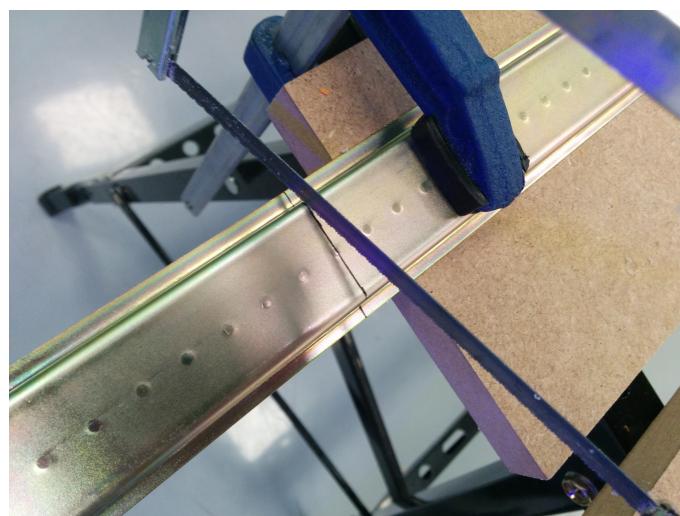


Figura 4.21: Cortamos la guía y canaleta según las necesidades.



Figura 4.22: Comprobamos que entra dentro del armario.

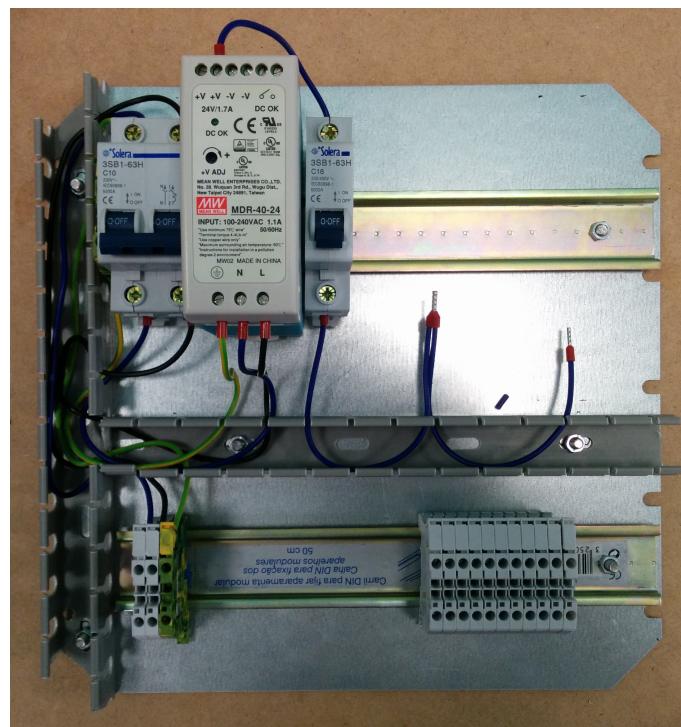


Figura 4.23: Cableamos los dispositivos entre sí.



Figura 4.24: Cableamos las entradas-salidas del PLC.

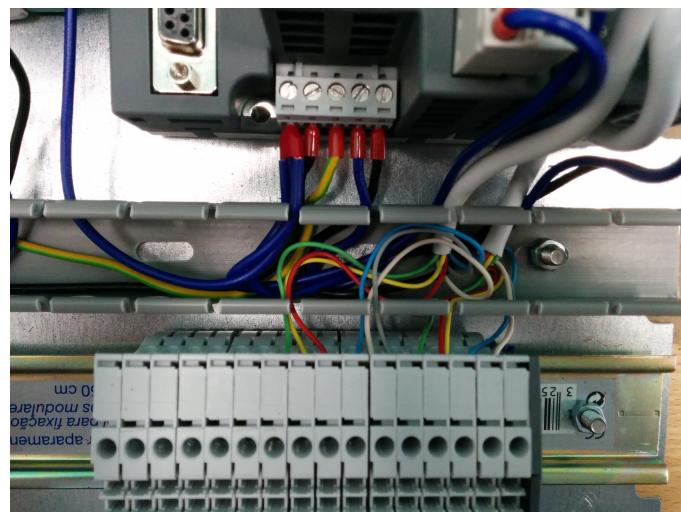


Figura 4.25: Regletero con acceso a los pines del PLC.

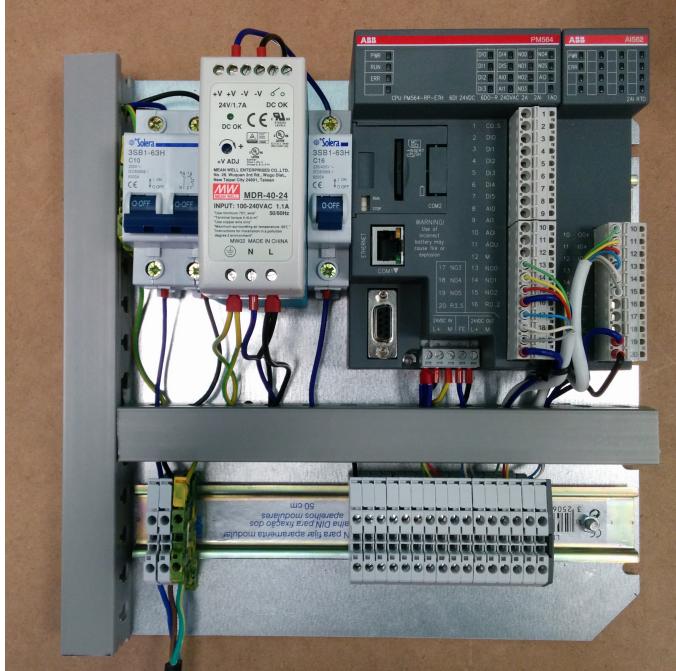


Figura 4.26: Cuadro terminado.

Hasta el momento, tenemos todo el hardware del PLC disponible así como la extrusora para poder crear el filamento, nos faltaría por adquirir un sensor de diámetro para poder registrar todas las temperaturas y llegar a uno de los objetivos planteados que es sacar el modelo de la planta.

Se buscan modelos industriales de sensores de diámetro como los que se usan en la fábrica de Huesca, sin embargo, su precio se sale del presupuesto establecido para el proyecto. Por ello, debemos buscar una alternativa barata y que sea funcional.

Buscando por internet se encuentra un proyecto en la web thingiverse [20] de un sensor de diámetro DIY con licencia Creative Commons. En el que se incluye toda la documentación necesaria para realizar un sensor de diámetro analógico el cual es capaz de medir filamentos de hasta 3mm, lo cual entra dentro de nuestro margen de trabajo (filamento de 1.75mm).

## 4.7. Sensor de diámetro DIY

El sensor funciona de la siguiente manera. Dispone de un sensor CCD lineal de 1x128 pixels (ver imagen 4.27), el cual es iluminado de forma constante por un LED de alta luminancia, el filamento, al pasar por encima del sensor, proyecta una sombra sobre él, haciendo que los píxeles tengan distinta luminosidad, de esa manera, un microcontrolador es capaz de calcular el diámetro del elemento que está por encima del sensor, una vez calculado el diámetro, usando un conversor DAC, escribe en una salida analógica un valor de tensión (comprendido entre 0-3v), teniendo una relación directa mm-V, es decir, para un diámetro de 1,75mm, obtendremos a la salida 1,75V

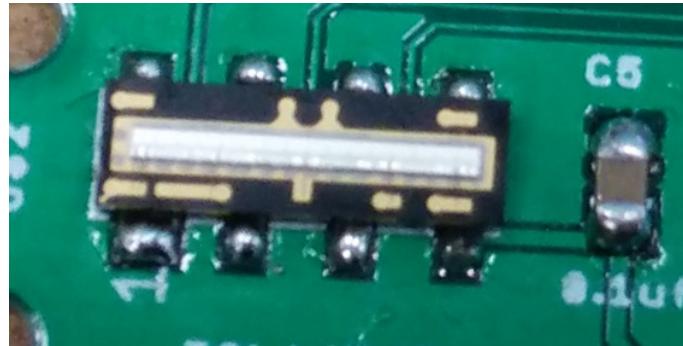


Figura 4.27: Sensor CCD lineal.

El usuario, vende los sensores a través de internet ya montados, programados y calibrados, lo cual nos interesa ya que nos ahorraría tiempo en la integración con el proyecto, sin embargo, al ir a hacer el pedido, no hay stock y el usuario no tiene planes de vender más. Pero como dijimos anteriormente, está toda la información accesible en internet para poder realizar por nosotros mismos uno, esta es una de las ventajas del Open Source, así pues, pusimos en marcha los pedidos con el material correspondiente. De esta manera también ahorraríamos dinero, ya que el precio de venta es de 60€ frente a lo 14€ si el montaje lo realizamos nosotros.

El trabajo necesario para poner en marcha el sensor es el siguiente:

- Realizar el pedido en una tienda de electrónica.
- Realizar placa de circuito impreso (PCB) del sensor.
- Soldar componentes a la PCB.
- Programar microcontrolador.
- Comprobar correcto funcionamiento.

Se realiza el pedido a la empresa Mouser, que es un distribuidor de componentes electrónicos, con el siguiente material.

Descripción	Cantidad
Condensador cerámico SMD 0,1 $\mu$ F	2
Condensador cerámico SMD 1 $\mu$ F	2
Condensador cerámico SMD 10 $\mu$ F	1
LED Trough hole Rojo	1
LED SMD Rojo	1
Resistencia SMD 1/8 WAT 150ohms	1
Resistencia SMD 1/8 WAT 300ohms	1
Resistencia SMD 1/8 WAT 1Kohms	1
Pulsadores SMD	1
8bit Microcontrolador Freescale	1
Sensor CCD 1x128 pixeles	1

Tabla 4.5: BOM sensor de diámetro

Para conseguir la PCB se usan los ficheros gerber disponibles en la web del proyecto [20]. Los ficheros gerber, contienen la información necesaria para la fabricación de la placa de circuito impreso.

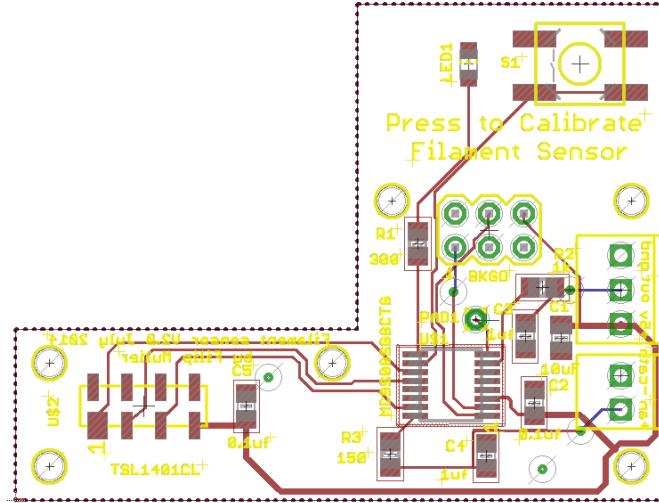


Figura 4.28: Fichero gerber de la pcb.

La única manera de realizar las PCB que disponemos es encargándola por internet<sup>1</sup>. Enviamos los gerber y tras establecer las especificaciones de la PCB en unos días recibimos el pedido.

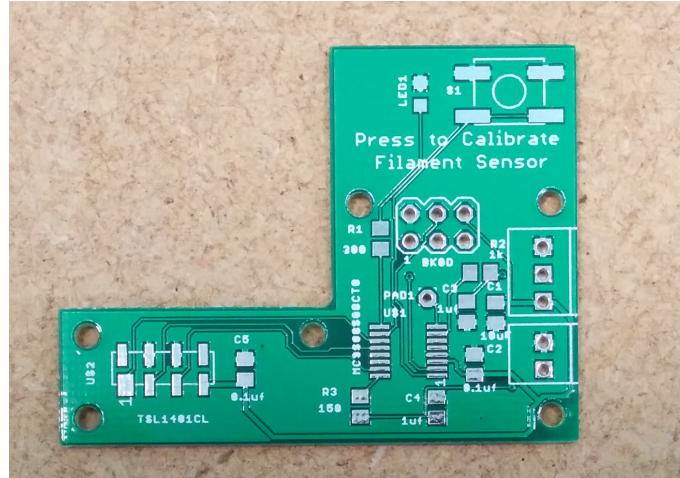


Figura 4.29: PCB ya fabricada.

El siguiente paso será soldar todos los componentes. En este caso, la mayoría de los componentes son de montaje superficial (SMD) por ello necesitaremos el siguiente material, para que la soldadura sea más fácil.

- Soldador.
- Estaño fino.
- Flux.
- Pinzas de punta fina.

<sup>1</sup><http://www.seeedstudio.com/depot/>



Figura 4.30: Materiales necesarios para soldar

El componente más complicado de soldar es el microcontrolador ya que tiene sus pines muy cercanos entre sí. Para evitar que el estaño cortocircuite dos pines, se esparcirá Flux que es un líquido que ayuda a la hora de soldar, limpiando la superficie y haciendo que sea más fácil de fundir el estaño.



Figura 4.31: Soldando el microcontrolador.

El resto de componentes SMD son fáciles de soldar y con ayuda de la pinza se irán soldando en orden.

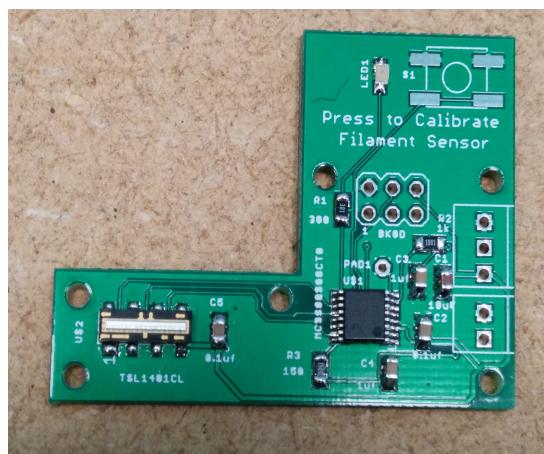


Figura 4.32: Soldando componentes SMD.

---

Los últimos componentes a soldar serán los que atraviesen la placa de circuito impreso con sus pines (Trough hole) terminando así de soldar todos los componentes:

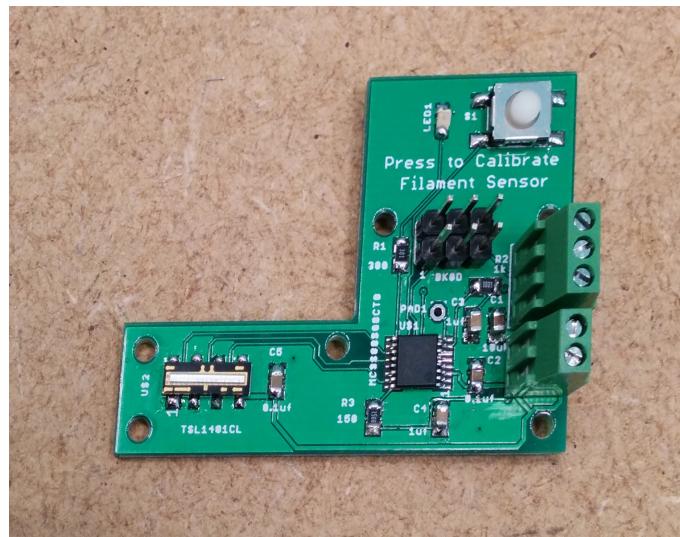


Figura 4.33: Placa con los componentes soldados.

Por último, programaremos el microcontrolador con el firmware que nos bajamos e introduciremos la PCB ya soldada, en una carcasa de plástico que imprimimos con ayuda de una impresora 3D.



Figura 4.34: Sensor midiendo un filamento de 1.75mm.

Al realizar varias medidas, se comprueba que se comete un ligero error en la medida, y eso es debido a que a la hora de calibrar no disponemos de un varilla con la misma medida con la que el usuario realizó la programación. Después de realizar unas mediciones con el sensor de unas dimensiones conocidas, estos son los valores obtenidos.

Voltaje (V)	Diametro real(mm)
0	0
1,13	1,14
1,56	1,57
1,82	1,82
1,93	1,94
2,37	2,36
2,77	2,74

Tabla 4.6: Mediciones con el sensor

Como comprobamos en la tabla 4.6 se comete un error en cada medida, por ello, se realiza una regresión lineal para intentar minimizar el error cometido.

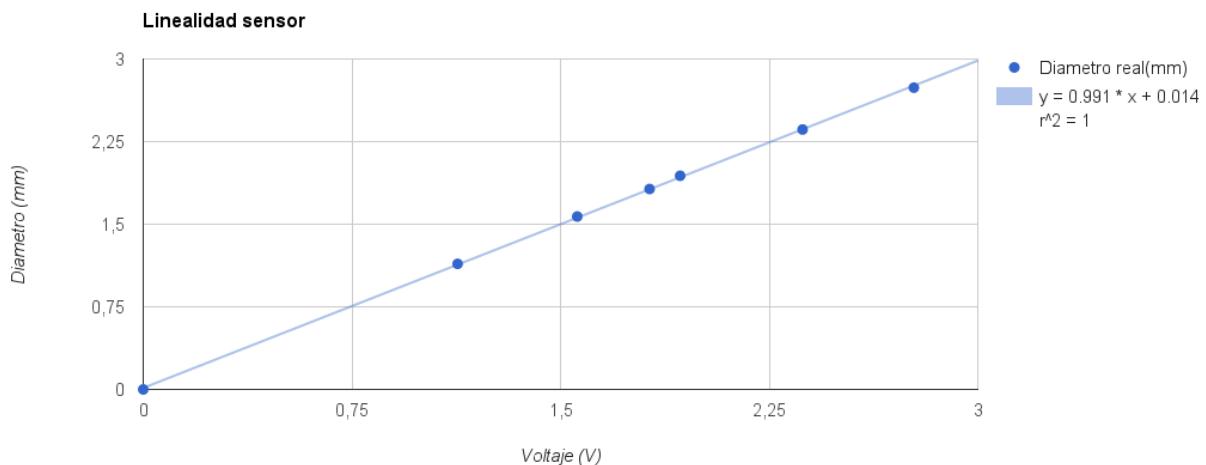


Figura 4.35: Gráfica con regresión lineal.

La ecuación de la recta que minimiza el error en la medición es:

$$y = 0,991 * x + 0,015$$

Hasta el momento, hemos conseguido los siguientes objetivos que definimos en el capítulo 3. Ver página 21.

- Documentación de la instrumentación de la planta.
- Definir la arquitectura para la comunicación del PLC y la instrumentación
- Definir requisitos del PLC a adquirir.
- Realización del armario eléctrico para montar en la fábrica.

Y nos quedaría por completar:

- Programación del PLC.
- Estudio de los datos adquiridos y desarrollo del modelo teórico de la planta.
- Comprobar qué regulador se amolda a nuestras necesidades.
- Puesta en marcha del regulador en planta y comprobar resultados.

## 4.8. Programación del PLC

Para la programación del PLC se usará el software de desarrollo que proporciona la compañía ABB en su web<sup>2</sup>. La versión usada en este proyecto del Automation Builder es la última liberada hasta la fecha, la 1.1.0.824, como se indicó en la sección 4.3 este software es gratuito para el uso que le vamos a dar.



Figura 4.36: Splash Screen del Automation Builder

Las acciones que debe realizar el PLC son las siguientes:

- 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 realizar el software que gestione el PLC, se usará una máquina de estados, en la que pasando por diversas fases, se irán ejecutando las acciones de control. Deberemos entrar en modo producción mediante la activación de una variable, con la que si estamos en producción, pasaremos por los distintos estados, mientras no estemos en producción, las salidas digitales y valores de consigna de los PID, estarán reseteados a cero como medida de seguridad. Una vez que entremos en producción, el primer paso será inicializar el programa, generaremos el nombre del fichero donde almacenaremos los datos. Se elige un nombre en el que se usa año, mes, día y minuto para identificar la producción, es decir, tendría 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, podremos 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

<sup>2</sup><http://new.abb.com/plc/automationbuilder/platform/software>

con los datos almacenados.

En esta inicialización, también se genera la 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 será 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 (X e Y).
- **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.

Los siguientes pasos dentro de la máquina de estados, será generar el fichero CSV y en caso de que no se produzca ningún error, se almacenará 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. El control del motor del husillo se hará de forma manual desde la visualización online.

Una vez que se tiene una idea de cómo va a ser el programa, se desarrolla un diagrama con la máquina de estados.

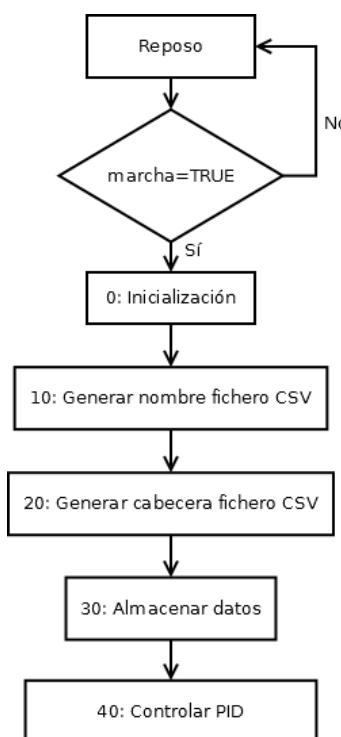


Figura 4.37: Diagrama de estados

#### 4.8.1. Controlar temperatura extrusor

Para controlar la temperatura del extrusor se va a implementar un regulador PID. Los reguladores del tipo PID, añaden tres acciones de regulación,... BLA BLA BLA BLA BLA BLA[21]

Para poder implementar correctamente un regulador PID, será necesario conocer la planta del sistema que queremos regular. En nuestro caso es el sistema de calentamiento del dado, por ello, deberemos modelar primeramente el sistema con el que estamos trabajando.

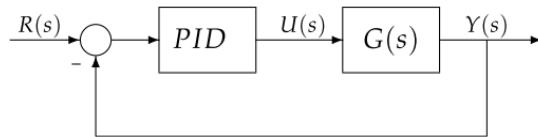


Figura 4.38: Sistema con un regulador PID

Con ayuda del programa que estamos desarrollando en el PLC haremos las siguientes tareas:

- Registrar temperaturas del dado.
- Encender de forma controlada la resistencia de calentamiento.
- Analizar los datos obtenidos.

Tenemos que ver como se comporta el sistema en lazo abierto, sin ningún tipo de control. Partiendo de una temperatura ambiente, se irán registrando 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.

Con ayuda del lenguaje de programación Python y varias herramientas de análisis de datos como son: ipython,scipy, pandas y numpy, analizaremos los datos obtenidos. Las gráficas peresentadas a continuación, así como los cálculos están realizadas con esta herramienta.

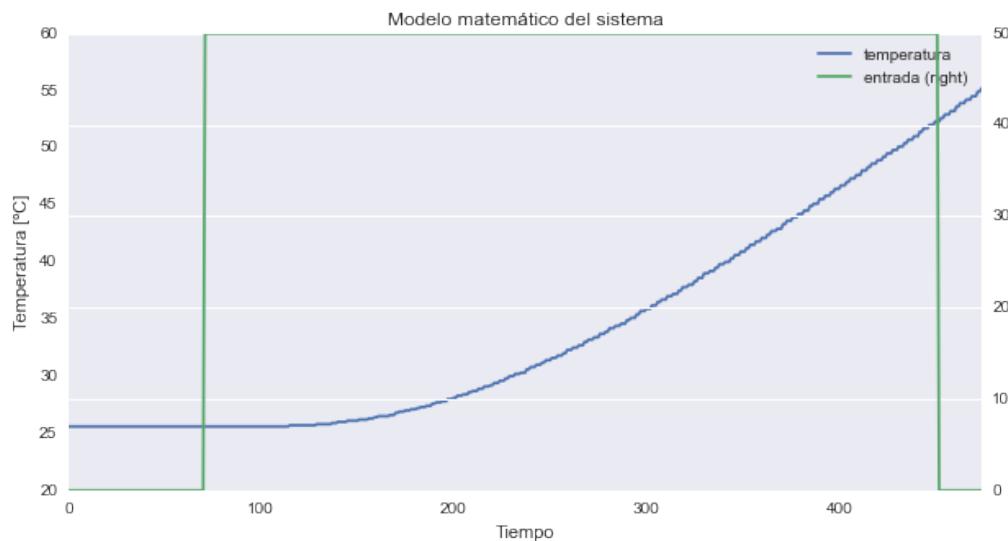


Figura 4.39: Respuesta del sistema en lazo abierto

Calcularemos cual es la ecuación que mejore se ajuste a nuestros datos y tendremos el polinomio que caracteriza nuestro sistema.

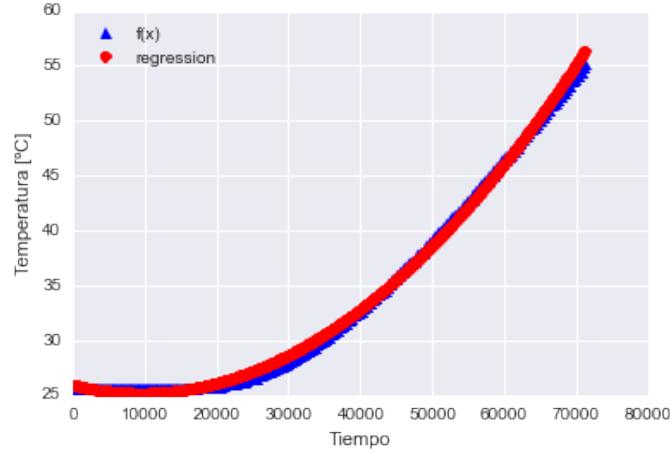


Figura 4.40: Ajuste de la recta

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

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

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

Aplicando el método de sintonización de Ziegler-Nichols basado en la curva reacción 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[21]. Nos da de manera rápida unos valores de  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  orientativos, para que podamos ajustar correctamente el controlador. Con ayuda de la herramienta Open Source Octave, calcularemos los valores de ganancia que serán los que apliquemos a nuestro regulador.

```

pkg load control
%los datos en la funcion tf() debe ser el numerador y denominador de nuestro sistema.
H=tf([25.95 0.000157333 1.63635E-8],[1 0 0 0]);
step(H);
dt=0.150;
t=0:dt:65;
y=step(H,t);
dy=diff(y)/dt;
[m,p]=max(dy);
yi=y(p);
ti=t(p);
L=ti-yi/m
Tao=(y(end)-yi)/m+ti-L
Kp=1.2*Tao/L
Ti=2*L;
Td=0.5*L;
Ki=Kp/ti;
Kd=Kp*Td;

```

En esta primera iteración, los datos obtenidos son los siguientes:  $K_p = 6082,6$   $K_i = 93,868$   $K_d = 38,9262$

Con lo que nuestro regulador tiene la siguiente ecuación característica:

$$G_s = \frac{38,9262 \cdot S^2 + 6082,6 \cdot S + 93,868}{S}$$

Una vez que tenemos las ganancias de nuestro regulador PID, volvemos a realizar el experimento de calentar la resistencia hasta un valor de temperatura deseado, en este caso 80°C y vemos cual es la respuesta de nuestro sistema:

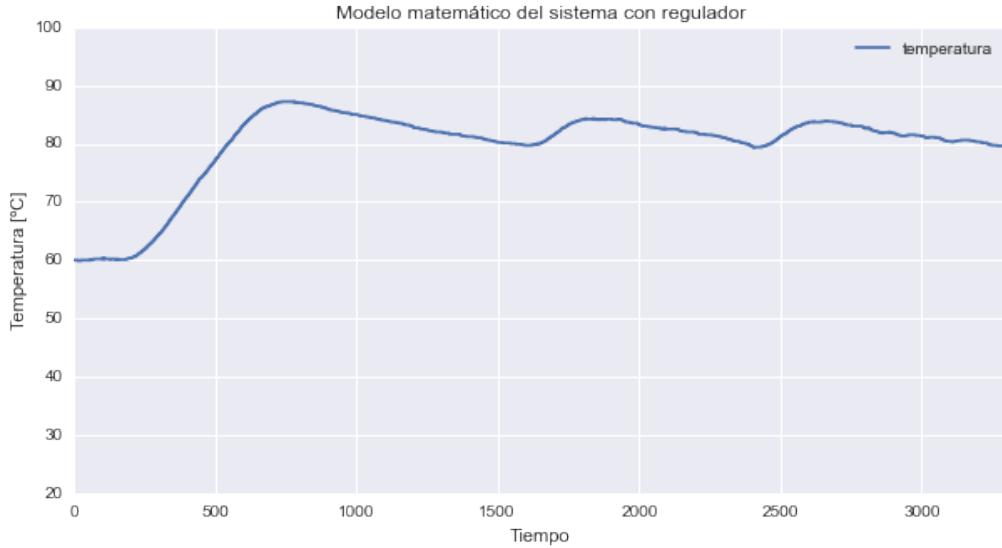


Figura 4.41: Respuesta del sistema con PID. Iteracción 1

Como podemos observar en la imagen 4.41 tenemos una sobreoscilación sobre el setpoint elevada:

$$M_p = \frac{T_{max} - Setpoint}{Setpoint} \cdot 100 = \frac{87,20 - 80}{80} \cdot 100 = 9\%$$

Siendo el error en régimen permanente de 3.70.

Una vez introducido el controlador, la temperatura tiende a estabilizarse, sin embargo tiene mucha sobreoscilación. Por ello aumentaremos los valores de  $K_i$  y  $K_d$ , siendo los valores de esta segunda iteracción los siguientes:  $K_p = 6082,6$   $K_i = 103,25$   $K_d = 51,425$

Realizando una segunda iteracción en el cálculo de nuestro regulador obtenemos lo siguiente:

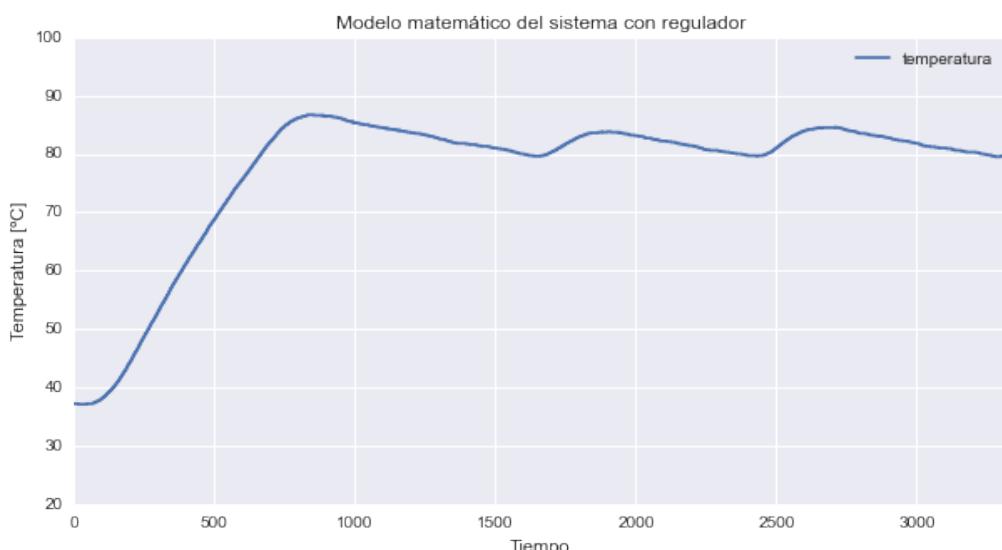


Figura 4.42: Respuesta del sistema con PID. Iteracción 2

Esta vez los resultados son algo mejores:

$$M_p = \frac{T_{max} - Setpoint}{Setpoint} \cdot 100 = \frac{86,70 - 80}{80} \cdot 100 = 8,38 \%$$

Siendo el error en régimen permanente de 3.50.

En esta segunda iteración hemos logrado bajar la sobreoscilación inicial, pero tenemos mayor error en régimen permanente. Por ello volvemos a aumentar los valores de  $K_i$  y  $K_d$  siendo los valores de esta tercera iteración los siguientes:  $K_p = 6082,6$   $K_i = 121,64$   $K_d = 60$

Realizando una tercera iteración en el cálculo de nuestro regulador obtenemos lo siguiente:

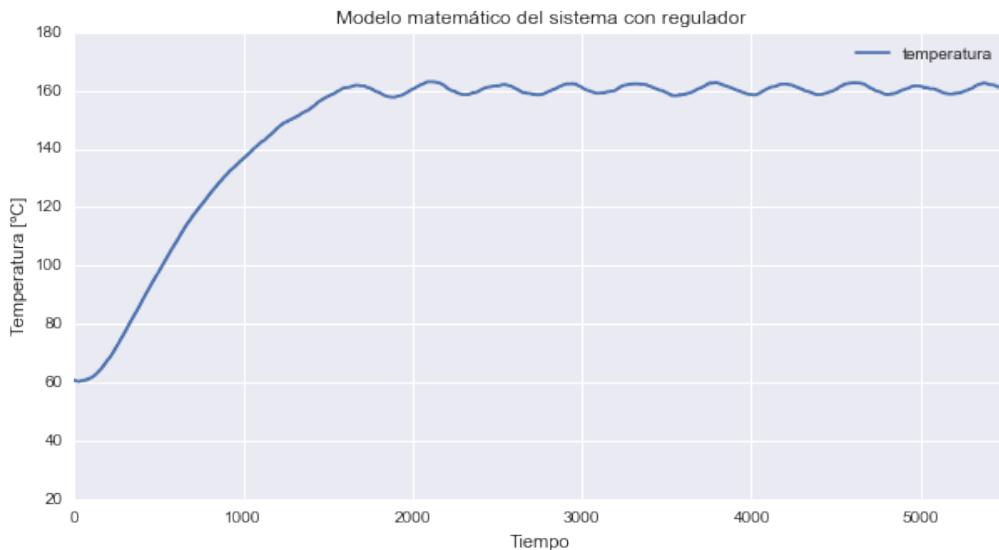


Figura 4.43: Respuesta del sistema con PID. Iteración 3

Esta vez los resultados son algo mejores:

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

Siendo el error en régimen permanente de 1.30

En este caso, se puso un setpoint de 160°C. Como vemos, la sobreoscilación inicial ha disminuido en comparación con la anterior iteración y el error en régimen permanente es menor. Para intentar minimizar el error, aumentaremos únicamente el valor de  $K_i$ . Siendo los valores de esta cuarta iteración del regulador los siguientes:  $K_p = 6082,6$   $K_i = 121,64$   $K_d = 150$

Realizando una cuarta iteración en el cálculo de nuestro regulador obtenemos lo siguiente:

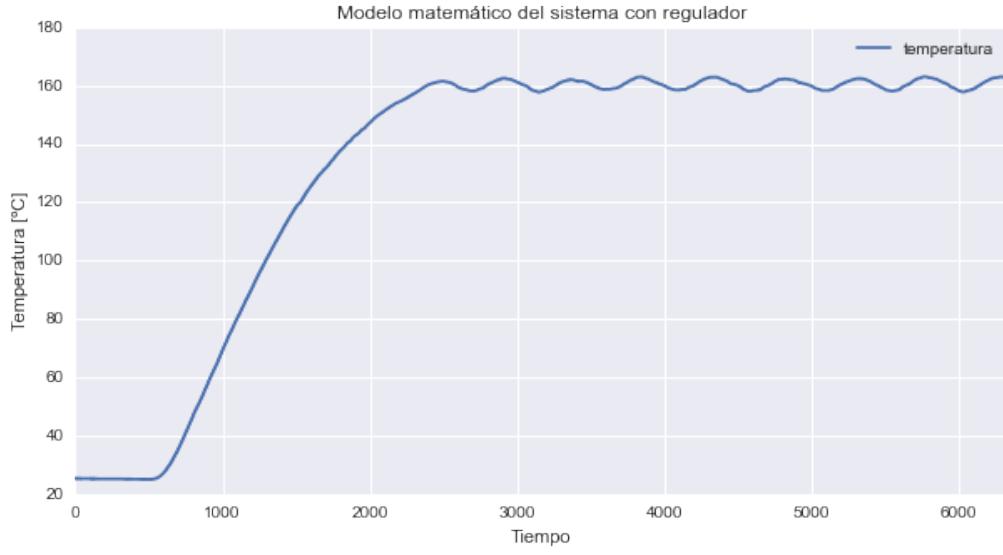


Figura 4.44: Respuesta del sistema con PID. Iteración 4

Esta vez los resultados son algo mejores:

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

Siendo el error en régimen permanente de 1.10

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

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

# Bibliografía

- [1] Brent Stucker. Additive manufacturing technologies: Technology introduction and business implications. pages 1–11, August 7 2015.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Mike1024. Distintos ejemplos de perfiles de extrusión. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ef/Extruded\\_aluminium\\_section\\_x3.jpg/1920px-Extruded\\_aluminium\\_section\\_x3.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ef/Extruded_aluminium_section_x3.jpg/1920px-Extruded_aluminium_section_x3.jpg), June 9 2007.
- [6] Josef Prusa. Imagen de una prusa i2. <http://blog.reprap.org/2010/10/story-of-simpler-mendel-pla-bushings.html>, August 10 2015.
- [7] Página oficial de bq. <http://bq.com/es/>, August 11 2015.
- [8] Dr. Guillermo Reyes Pozo. Fabricación aditiva: Tecnologías. pages 7–14, August 7 2015.
- [9] D. Trapero. Disño, construcción y control de un extrusor de filamento para impresoras 3d. page 37, August 14 2015.
- [10] Dan Mishek. How and when to choose between additive and subtractive prototyping]. pages 1–2, August 7 2015.
- [11] D. Rypl and Z. Bittnar. Triangulation of 3d surfaces recovered from stl grids. page 1, August 7 2015.
- [12] Stratasys. Fdm technology. <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>, June 9 2015.
- [13] Antonio Alberto Relaño Pastor. Estudio comparativo de piezas de abs y pla procesadas mediante modelado por deposición fundida. pages 83–93, August 12 2015.
- [14] Santiago Ferrández. Detalle de un husillo de extrusora. <http://3.bp.blogspot.com/-Z0GzL5mmFW8/TbWU01H0D5I/AAAAAAAHE/aW1dNIs0P18/s1600/21.JPG>, June 9 2012.
- [15] 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.
- [16] 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.

- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] T. Elmore. Filastruder developement thread. <http://www.soliforum.com/post/4783/#p4783>, August 14 2015.
- [20] flipper. Filament width sensor prototype version 3. <http://www.thingiverse.com/thing:454584>, August 14 2015.
- [21] Virginia Mazzone. Controladores pid. pages 1–11, August 17 2015.