



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TFG

SCADA Y MODELADO PARCIAL DE SISTEMA DE
EXTRUSIÓN DE FILAMENTO

Alumnos: Santiago López Pina
Tutor: Víctor González Pacheco

Índice general

0.1.	Filastruder-sensor diámetro-Tractora	5
0.1.1.	Resultados	9
0.2.	Regulador experto	15
0.2.1.	Ensayo 1	16
0.2.2.	Ensayo 2	17
0.2.3.	Ensayo 3	19

Índice de figuras

1.	Esquema de producción	5
2.	Diseño del eje de giro de la tractora	7
3.	Diseño de la tractora	7
4.	Pieza de la tractora.	8
5.	Tractora con filamento	8
6.	Montaje final filastruder-tractora-sensor	9
7.	Gráfica con los datos de la producción	10
8.	Encoder instalado en la filastruder.	10
9.	Velocidad de la extrusora.	11
10.	Mezcla de granza con pellets reciclados.	12
11.	Diseño y montaje de una tolva de mayor capacidad.	12
12.	Diagrama de cajas	13
13.	Grafica con los datos obtenidos	14
14.	Mezcla incorrecta de la filastruder	15
15.	Reglas a utilizar en el sistema experto	15
16.	Datos graficados del ensayo 1 con regulador experto	17
17.	Diagrama de cajas del ensayo 1 con regulador experto	17
18.	Datos graficados del ensayo 2 con regulador experto	19
19.	Diagrama de cajas del ensayo 2 con regulador experto	19
20.	Datos graficados del ensayo 23 con regulador experto	21
21.	Diagrama de cajas del ensayo 3 con regulador experto	21

Índice de tablas

1.	Resolución del driver en función del micropaso elegido	5
2.	Valores para controla la velocidad de giro del motor paso a paso	6
3.	Datos obtenidos en el ensayo del día 20 de Julio	9
4.	Datos del ensayo con distintas tolvas	13
5.	Datos obtenidos en el ensayo 1	16
6.	Datos obtenidos en el ensayo 2	18
7.	Datos obtenidos en el ensayo 2	20

0.1. Filastruder-sensor diámetro-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 trata de investigar en esta linea, diseñar un sistema capaz de traccionar el filamento a medida que va saliendo de la boquilla.

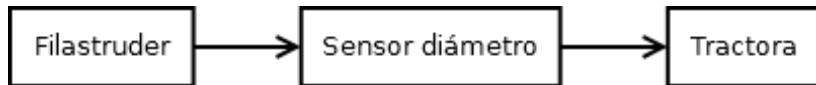


Figura 1: Esquema de producción

Con el conocimiento adquirido al diseñar la peletizadora (ver capítulo ?? de la página ??) 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. El material del que dispondremos será el siguiente.

- **Arduino Mega:** Microcontrolador encargado de mover un motor y regular su velocidad.
- **RAMPS:** Placa auxiliar colocada encima del arduino Mega, la cual dispone de un driver A4988 para controlar varios motores paso a paso.
- **Motor paso a paso:** Dispositivo electromagnético, que transforma una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares.

Se vuelve a elegir un motor paso a paso como unidad de tracción, debido a las mismas razones por las que se eligió en la peletizadora.

El principio de funcionamiento de un motor paso a paso es sencillo. En el interior del mismo se dispone de dos bobinas giradas 90° entre sí [1] las cuales, en función de una secuencia de excitación, generarán campos magnéticos que hará que el rotor del mismo gire un determinado ángulo. Para la realización de la tractora, se usará una técnica denominada de micropasos con la que conseguimos que nuestro motor de 1.8° de giro pueda alcanzar grados de 0.225° . Para poder controlar el motor con esta técnica y conseguir una velocidad de rotación constante, será necesario que el microcontrolador genera una señal cuadrada, en la que dependiendo de la frecuencia de esta señal, el motor girará a una velocidad distinta. El nivel alto de esta señal cuadrada, se la denominará paso. Por cada paso que reciba el motor, girará 1.8° dividido el número de micropasos configurados en el driver:

MS1	MS2	MS3	Resolución de micropaso
L	L	L	Paso completo (1)
H	L	L	Medio paso (1/2)
L	H	L	Un cuarto de paso (1/4)
H	H	L	Un octavo de paso (1/8)
H	H	H	Un dieciseisavo de paso (1/16)

Tabla 1: Resolución del driver en función del micropaso elegido

Para el caso que nos ocupa, elegiremos la configuración de un dieciseisavo de resolución, es decir:

$$\text{Pasos por vuelta} = \frac{360^\circ}{1.8^\circ \cdot \frac{1}{16}} = 3200 \text{ pasos}$$

Por tanto, si quisieramos girar el motor a una velocidad de $1RPM$ tendríamos que da un total de:

$$\frac{1RPM \cdot 3200\text{pasos}}{60s} = 53\text{pasos/s}$$

O lo que es lo mismo, un paso cada $18,86ms$. Esta separación temporal, va inversamente relacionada con la velocidad de giro deseada, cuanta más velocidad de giro queramos, menor será el tiempo entre pasos. Para poder generar el tren de pulsos, se usará una interrupción del microcontrolador, que se ejecutará cada $10\mu s$ e irá incrementando un contador, el cual, al llegar a un valor máximo determinado por la velocidad de giro, efectuará un escalón. El valor máximo del contador viene dado por la fórmula:

$$Valor_{Max} = \frac{\text{Separación temporal de ticks}}{\text{Tiempo de interrupción}}$$

En nuestro caso, para girar el motor a una velocidad de $1RPM$ con una interrupción de $10\mu s$ deberíamos contar el siguiente número:

$$Valor_{Max} = \frac{18,75ms}{10\mu s} = 1875$$

Por especificación del filastruder, determinamos que la velocidad de tracción deberá ir entre el rango de $1RPM$ y $3RPM$, por tanto, con ayuda de una hoja de cálculo de excel, determinamos los valores máximos a contar en función de la velocidad de giro.

RPM	TICKS/S	Separacion ticks (s)	Ticks a contar por ISR
0	-1	-1	-1
1	53	0,01875	1875
2	107	0,009375	938
3	160	0,00625	625

Tabla 2: Valores para controla la velocidad de giro del motor paso a paso

Por tanto, cuando el contador llegue a los valores máximos establecidos, se generará un pulso, haciendo que el motor avance los grados determinados. A su vez, la velocidad de giro, vendrá dada por el PLC el cual, en función de un tensión de 0 a 5 V hará que el motor gire a una velocidad distinta.

Una vez establecida la arquitectura del software, se pasa a diseñar las piezas necesarias para crear la unidad tractora. Como la vez anterior, usaremos la herramienta Autodesk Inventor. Como unidad tractora, se diseñará una pieza que irá acoplado al eje de giro del motor, la cual irá recubierta por una goma para aumentar la fricción con el filamento. Con ayuda de un rodamiento haciendo presión por la otra parte del filamento, conseguiremos que se desplace de forma lineal

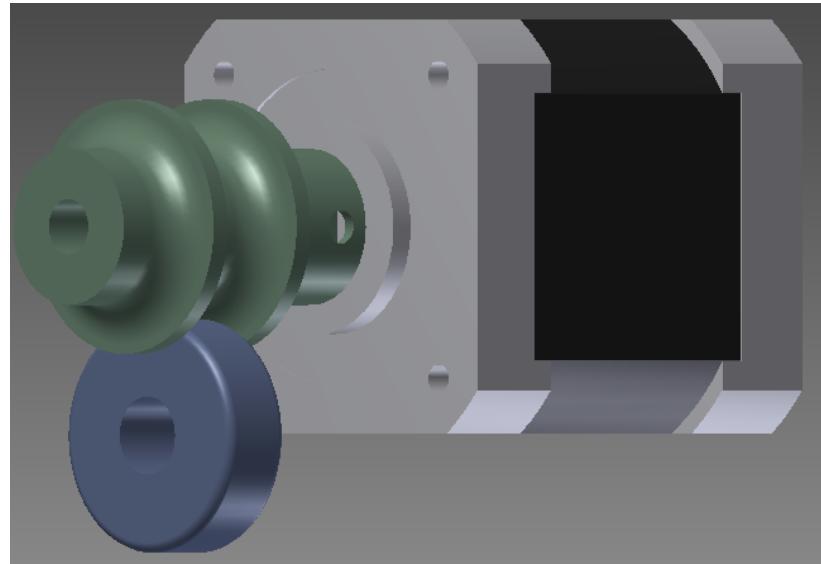


Figura 2: Diseño del eje de giro de la tractora

La pieza que soporte el rodamiento, deberá ir apretada por un muelle, para conseguir que asuma los cambios de diámetro y pueda hacer desplazar cualquier filamento sin importar el diámetro.

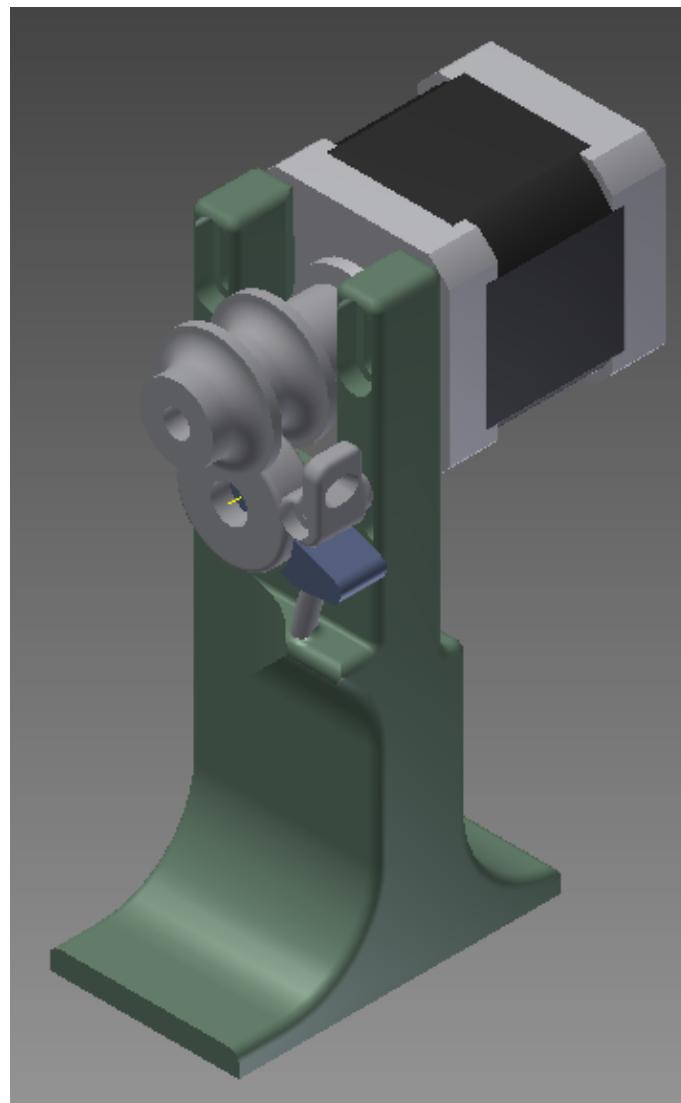


Figura 3: Diseño de la tractora

Una vez diseñadas las piezas, se pasan a imprimir en una impresora 3D

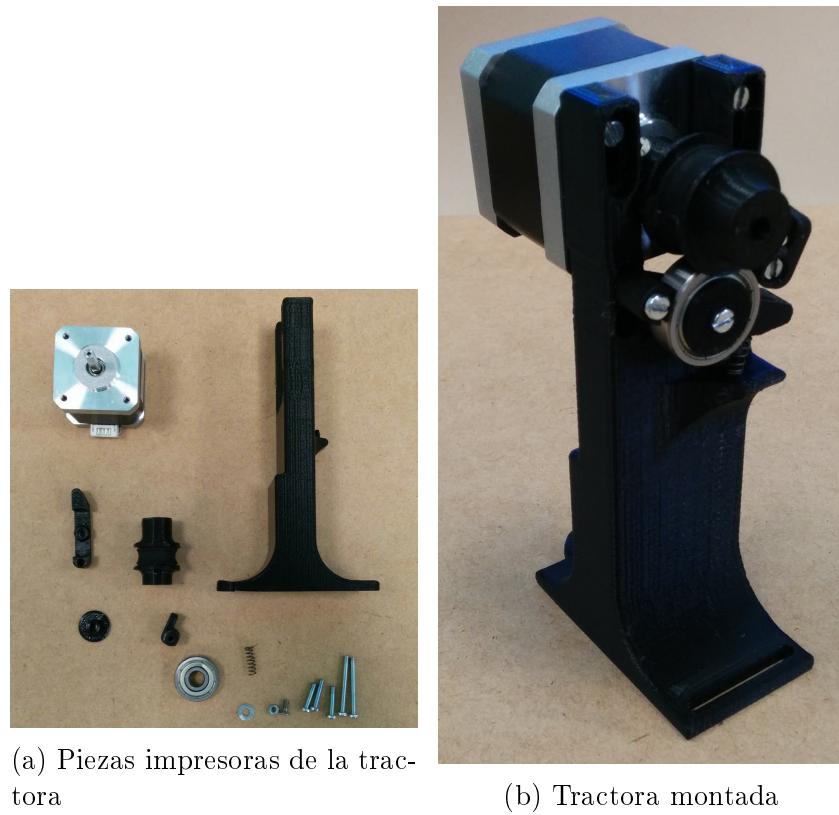


Figura 4: Pieza de la tractora.

Por último, para comprobar que el funcionamiento de la tractora es el esperado, se hace pasar una bobina de filamento através de la tractora, y comprobamos que podemos variar la velocidad de tracción y el agarre del filamento es el adecuado.

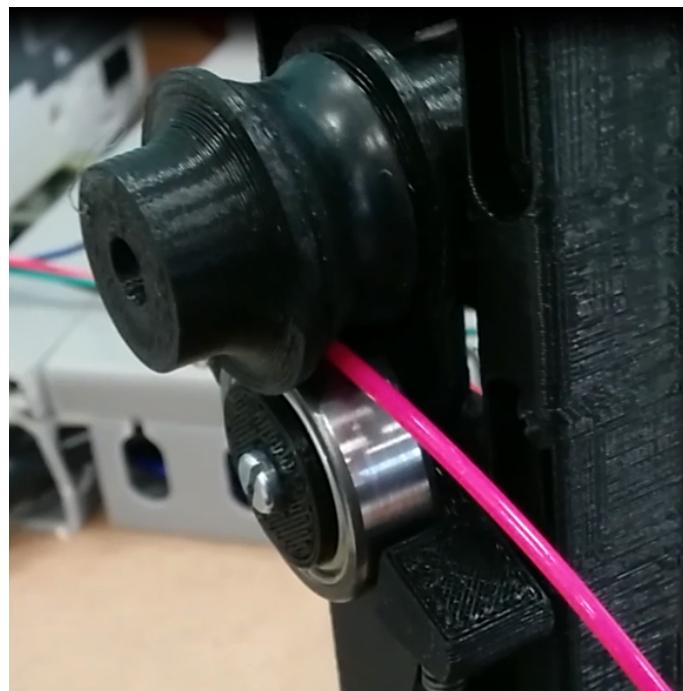


Figura 5: Tractora con filamento

Por tanto, podemos pasar a instalar la tractora en la maqueta.

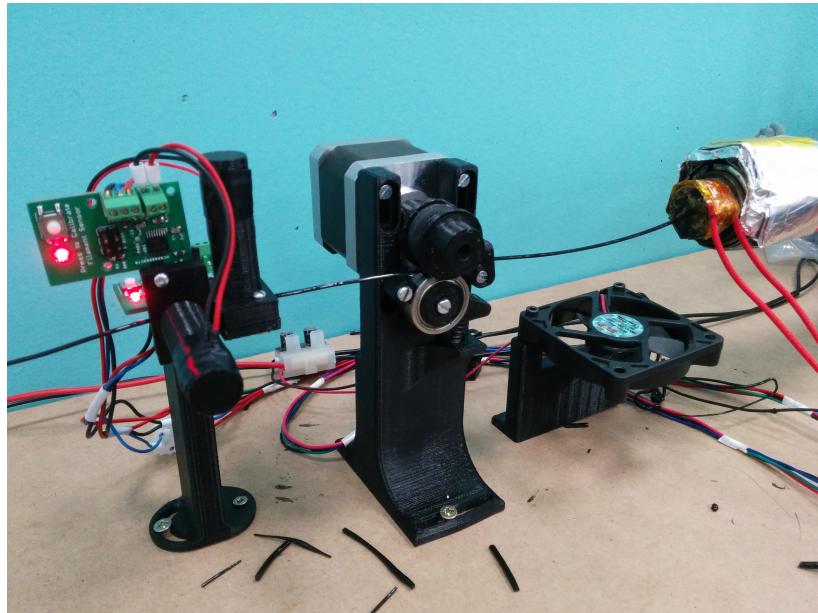


Figura 6: Montaje final filastruder-tractora-sensor

0.1.1. Resultados

Usando pellets reciclados, se pasa a hacer una producción de filamento, para comprobar que el diseño de la tractora es el correcto. El ensayo que se va a realizar consiste en:

- 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

Se está alrededor de seis minutos extruyendo filamento, sin embargo, debido a un exceso en el diámetro del filamento, hace que este no entre por el sensor de diámetro y sea necesario parar, sin embargo podemos estudiar los datos obtenidos. Tras el ensayo, los resultados obtenidos son los siguientes:

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

Tabla 3: Datos obtenidos en el ensayo del día 20 de Julio



Figura 7: Gráfica con los datos de la producción

En la gráfica anterior vemos los datos obtenidos del diámetro del eje X. Se ve claramente, 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. Durante el ensayo, se ha notado física y acústicamente 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. Se instala un encoder mediante un imán, un sensor de efecto hall y un arduino a la filastruder, para cerciorarnos de que la velocidad es constante.

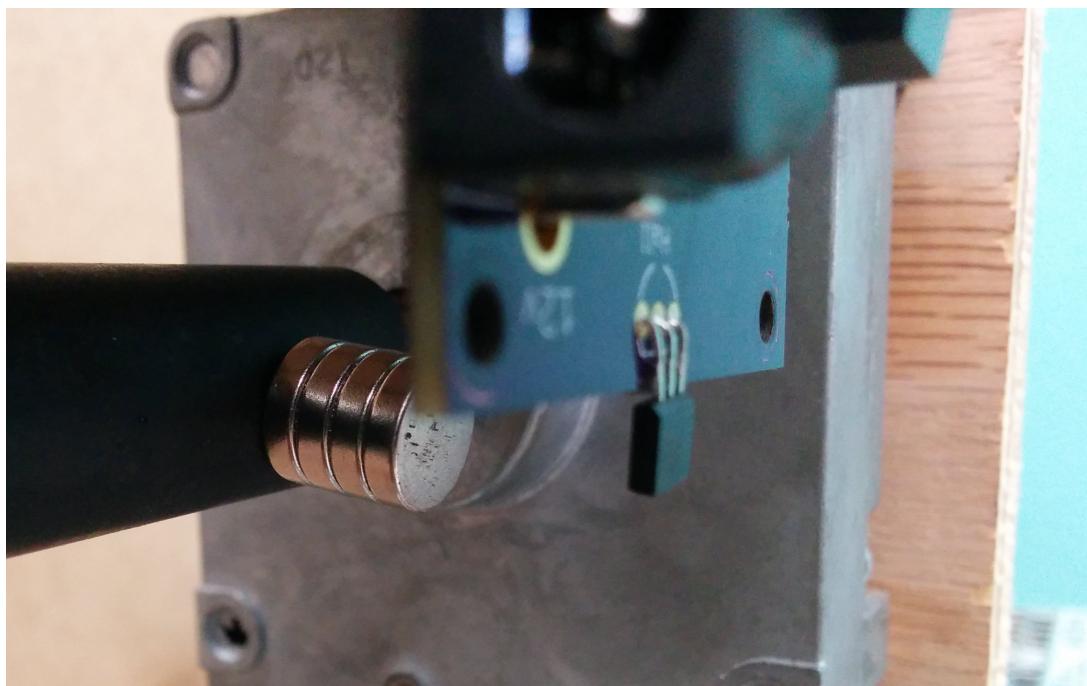


Figura 8: Encoder instalado en la filastruder.

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:

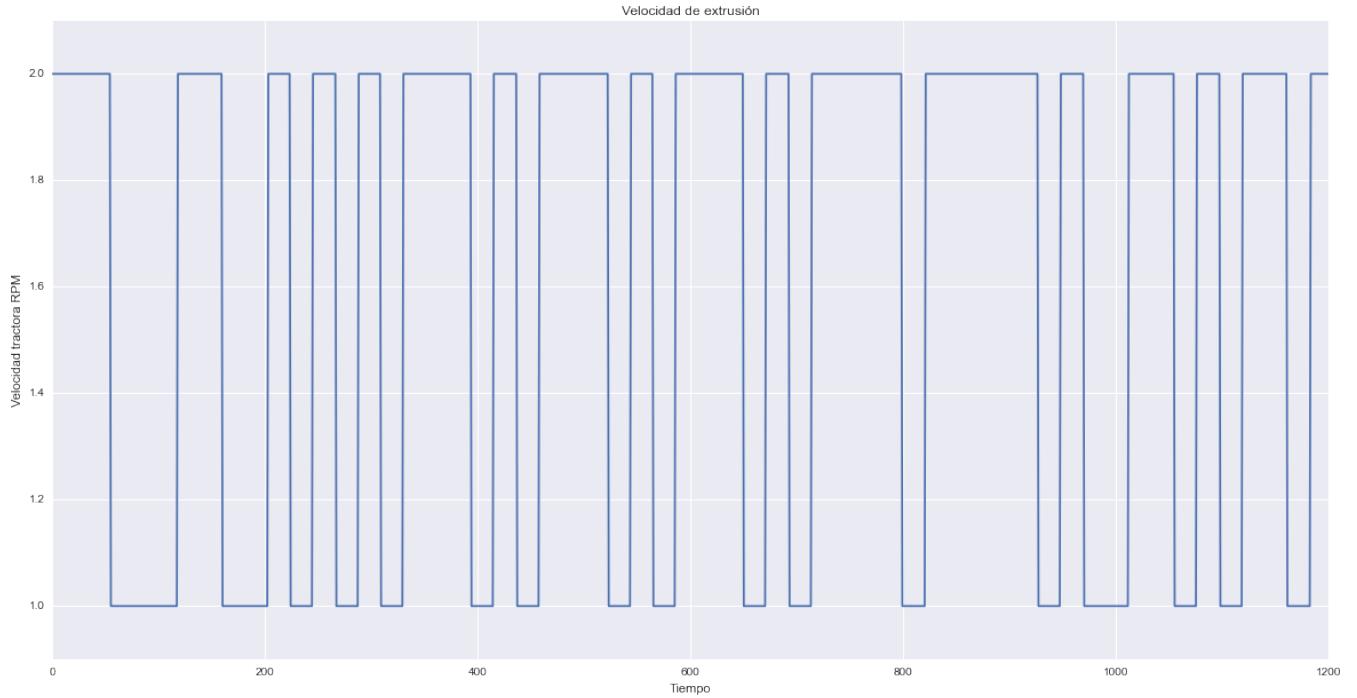


Figura 9: Velocidad de la extrusora.

Vemos claramente, que la velocidad de giro no es constante, variando entre 1 y 2 RPM. 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 podemos cambiar. Para no alargar la duración del proyecto e intentar avanzar en el control se van a tomar las siguientes medidas:

- Usar una mezcla de granza de PLA natural (70 %) con pellets reciclados de filamento (30 %) (ver imagen 10). 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
- 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 va a diseñar 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 se lo más constante posible. El tamaño de almacenamiento máximo ha pasado de 42gr a 150gr

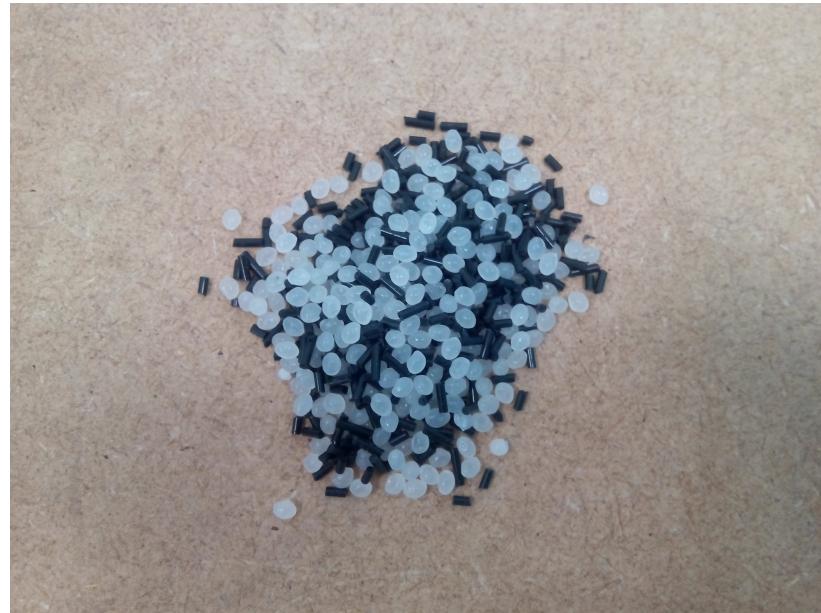


Figura 10: Mezcla de granza con pellets reciclados.



(a) Tolva impresa



(b) Tolva montada

Figura 11: Diseño y montaje de una tolva de mayor capacidad.

Se muestran a continuación los resultados obtenidos en el ensayo:

	Tolva Grande	Tolva pequeña
Medidas	2000.000000	2000.000000
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 4: Datos del ensayo con distintas tolvas

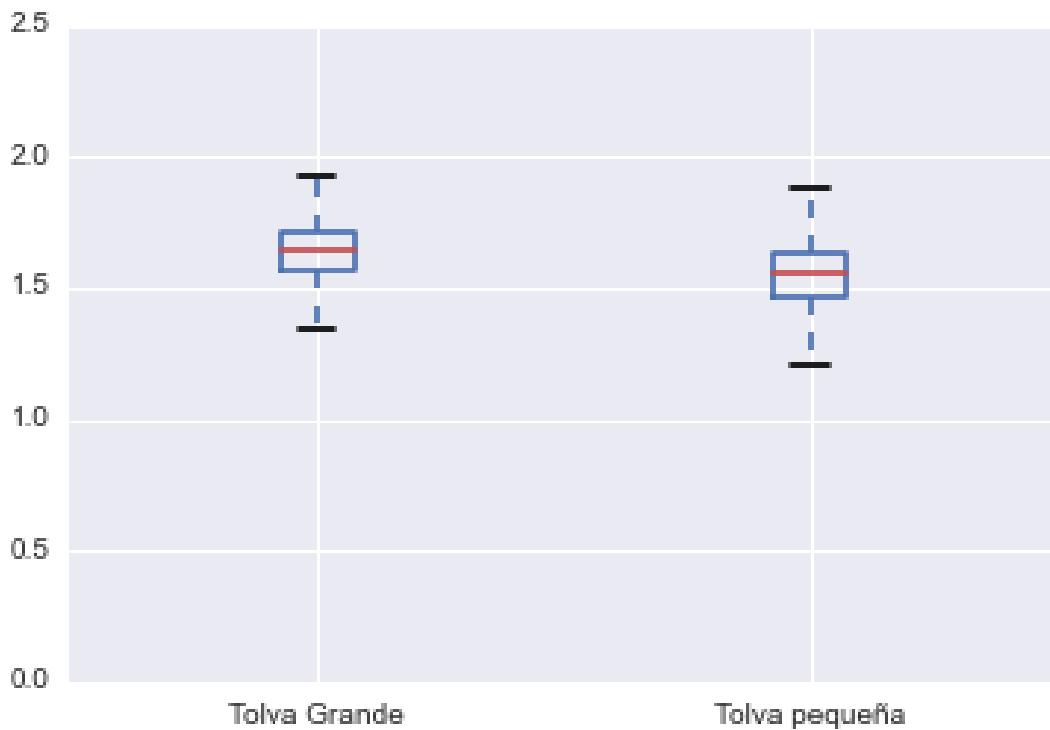


Figura 12: Diagrama de cajas

Como se ve en el diagrama de cajas, 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 anteriormente para intentar mejorar la producción son acertadas, sin embargo, como se aprecia en el gráfico siguiente, se sigue teniendo una variación 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.

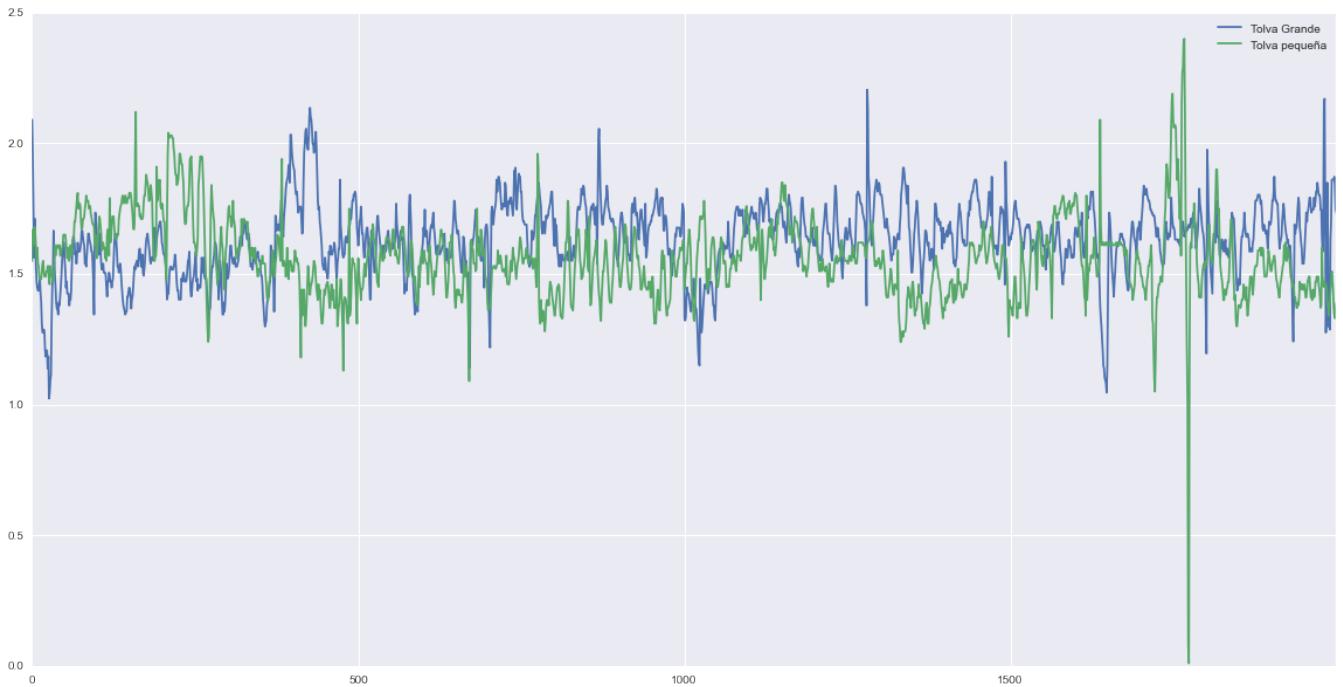


Figura 13: Grafica con los datos obtenidos

Hasta el momento, hemos conseguido los siguientes objetivos que planteamos al principio 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.

Quedándonos tan sólo:

- Puesta en marcha del regulador en planta y comprobar resultados.

Además, para conseguir los dos últimos objetivos cumplidos y el objetivo que falta, se han tenido que realizar las siguientes tareas para poder conseguirlo:

- Realizar una maqueta con una extrusora de fabricación casera.
- Conseguir reciclar PLA y que este sea funcional para extruir filamento.

En el siguiente capítulo veremos la implementación del regulador experto y analizaremos los resultados obtenidos.

0.2. Regulador experto

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.

Como se ha visto en los ensayos anteriores, la salida de filamento que proporciona el filastruder no es constante y en ocasiones, no está bien mezclada.



Figura 14: Mezcla incorrecta de la filastruder

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

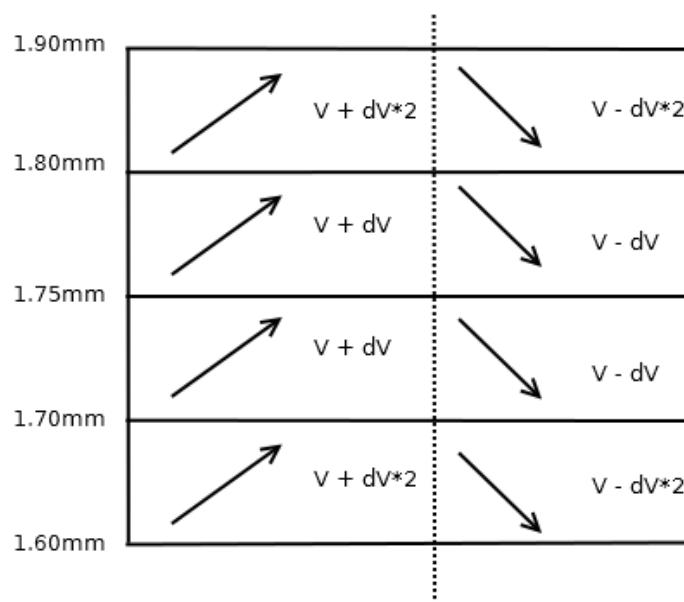


Figura 15: Reglas a utilizar en el sistema experto

Se realiza un bloque de programación que implemente esta filosofía y en función del diámetro actual, y el diámetro anterior, se irá modificando la velocidad de tracción, para así variar el diámetro del filamento.

Una vez realiado el programa, se van a realizar varios ensayos con distintos parámetros para ver cómo influye el regulador.

0.2.1. Ensayo 1

Los datos con los que se realizaron el experimento fueron:

- Hora de inicio: 14:27
- Hora final : 15:08
- Filamento extruido: 537cm
- Granza de PLA mezcla: 70 % granza, 30 % pellets.
- Mezcla secada en horno 4 horas antes del ensayo.
- $T : 150^{\circ}C$
- $V_{min\text{tractor}} : 1,5mm/s$
- $V_{max\text{tractor}} : 3,4mm/s$
- Los incrementos de velocidades en las reglas del sistema experto son las mismas.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

	Diámetro X
Medidas	1526
Media (mm)	1.72
Desviación estandar	0.29
Mínimo (mm)	1.20
Máximo (mm)	2.56

Tabla 5: Datos obtenidos en el ensayo 1

Cómo vemos en la tabla 7 la media del filamento conseguido es de $1,72mm$, sin embargo, los valores límites de $1,65mm$ y $1,85mm$ han sido superados, por lo que el filamento que se ha extruido, no valdría en su totalidad para imprimir. Si representamos los datos obtenidos en una gráfica, podemos observar como hay una influencia del regulador. Las variaciones que hay en el diámetro, son no son tan pronunciadas como en el caso del funcionamiento en lazo abierto.

Con el gráfico de cajas, podemos ver que la distribución de los datos no es del todo homogena, teniendo una gran cantidad de los datos por encima de la media, sobre 1.96 mm .

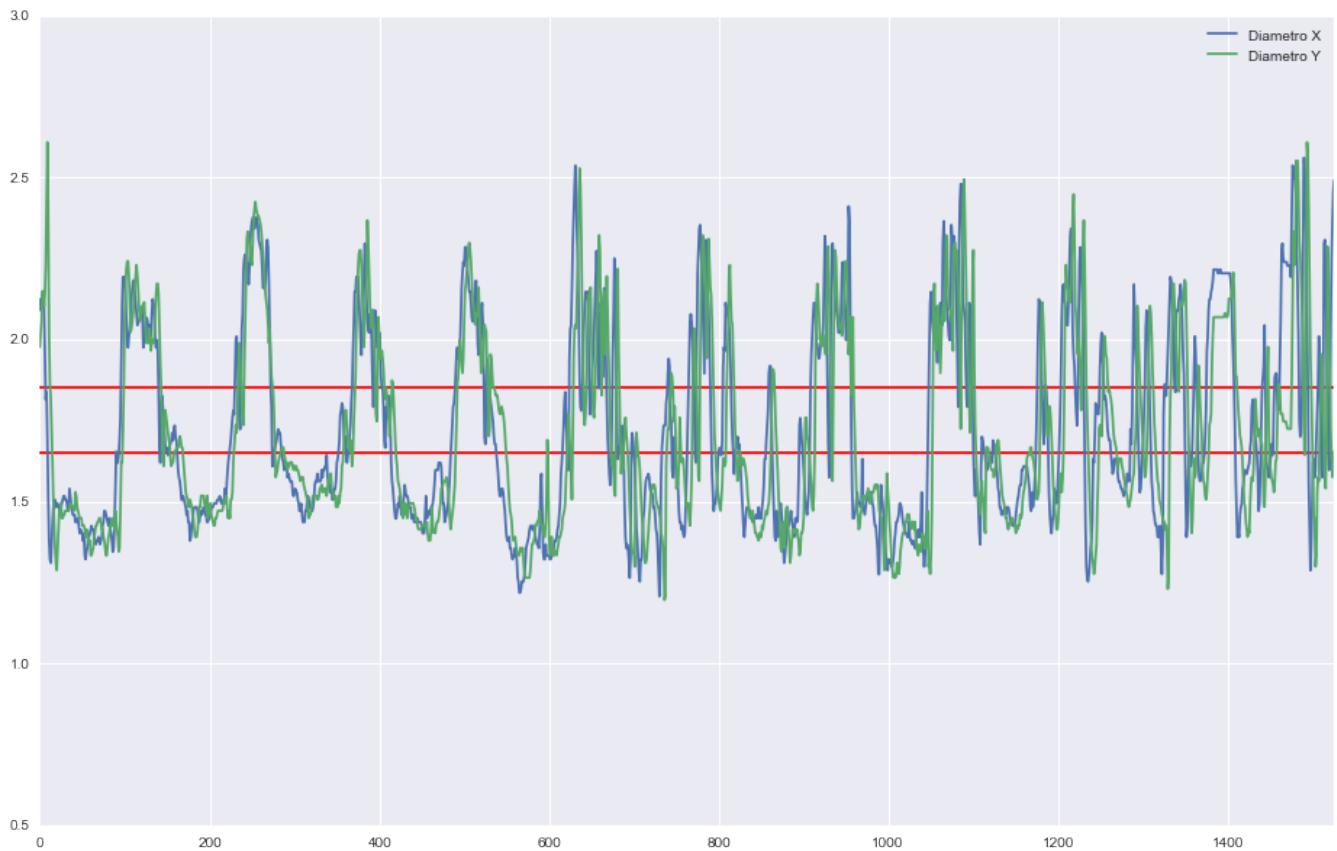


Figura 16: Datos graficados del ensayo 1 con regulador experto

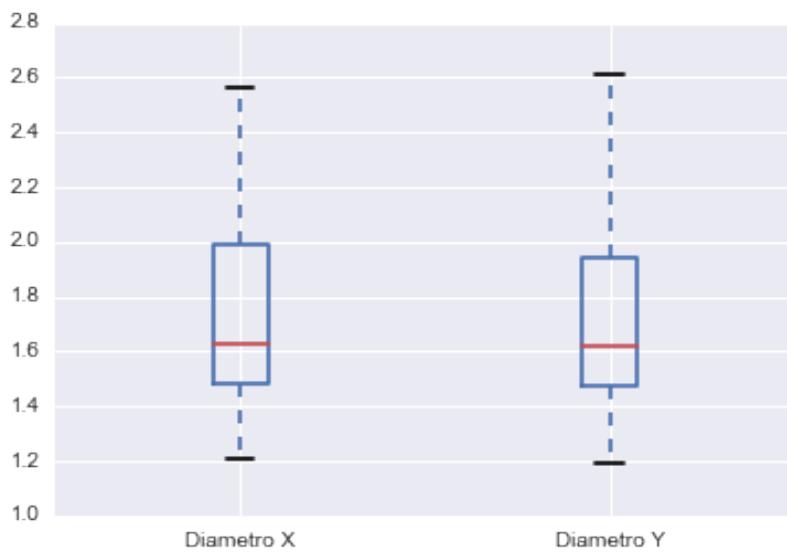


Figura 17: Diagrama de cajas del ensayo 1 con regulador experto

Como segunda aproximación que vamos a realizar será la de hacer mayores incrementos al subir la velocidad en los tramos que el diámetro se encuentre entre $1,80\text{mm}$ y $1,75\text{mm}$ haremos incrementos de velocidad mayor.

0.2.2. Ensayo 2

Los datos con los que se realizaron el experimento fueron:

-
- Hora de inicio: 11:05
 - Hora final : 11:35
 - Filamento extruido: 435cm
 - T : $150^{\circ}C$
 - $V_{min} \text{tractor}a : 1,5mm/s$
 - $V_{max} \text{tractor}a : 3,4mm/s$
 - Los incrementos de velocidades en las reglas del sistema experto son distintas:

En este ensayo, se va a cambiar el incremento de velocidad, cuando el filamento esté entre una diámetro de $1,75mm$ y $1,80mm$ y tenga una tendencia de crecimiento. Se hará que en este caso, la velocidad se incremente más.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

	Diámetro X
Medidas	1114
Media (mm)	1.74
Desviación estandar	0.26
Mínimo (mm)	1.02
Máximo (mm)	2.45

Tabla 6: Datos obtenidos en el ensayo 2

Con los cambios realizados, los datos ahora son algo más estables, y hemos conseguido aumentar la media del filamento a 1.74 estando dentro del margen de producción, sin embargo, los límites superior e inferior no son los adecuados, alejándose demasiado de lo deseado. Sin embargo en este caso, una gran parte del filamento podría llegar a ser re-aprovechado para imprimir.

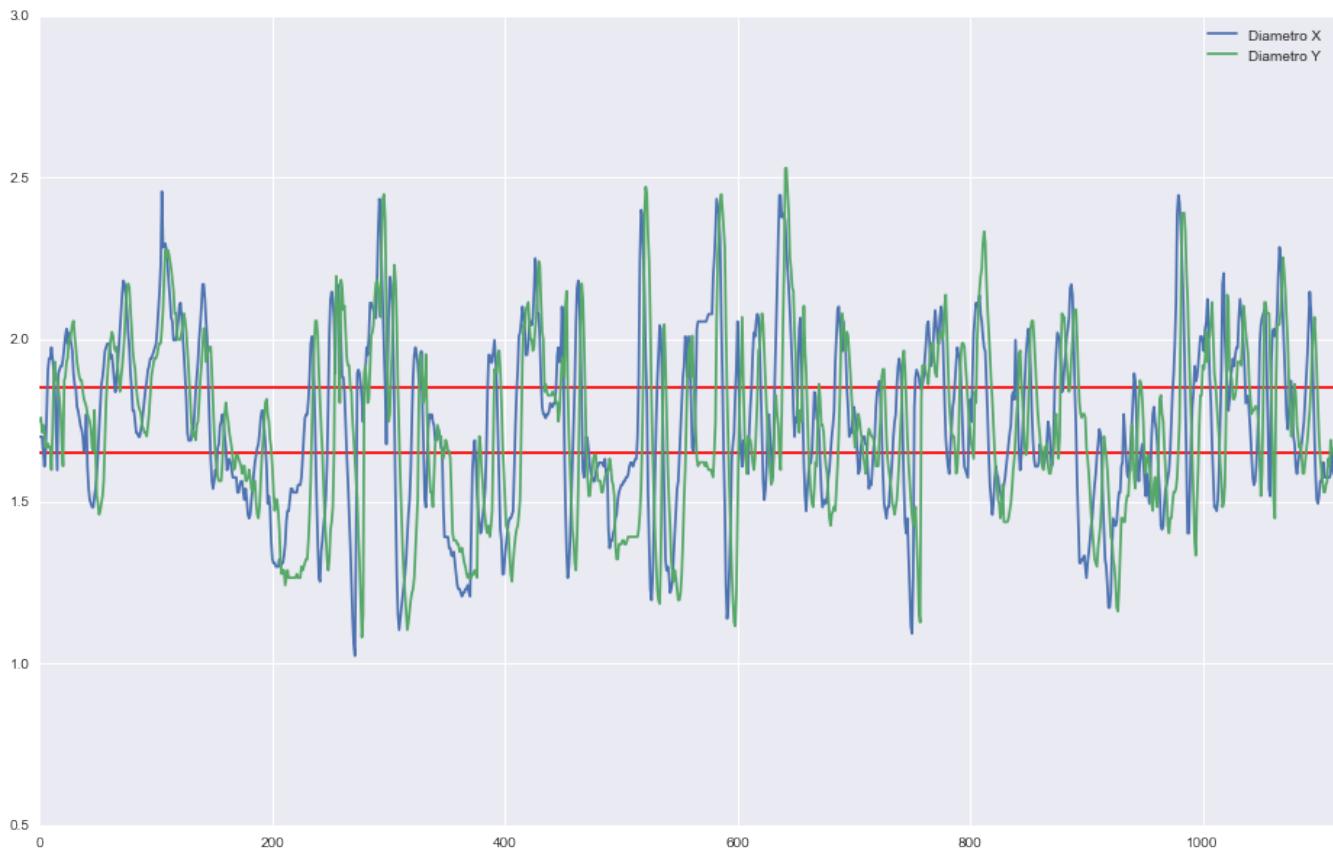


Figura 18: Datos graficados del ensayo 2 con regulador experto

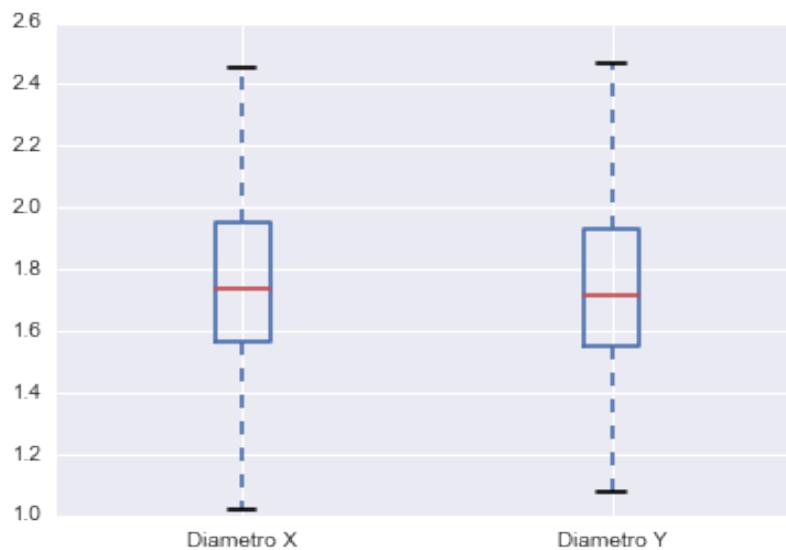


Figura 19: Diagrama de cajas del ensayo 2 con regulador experto

Como tercera aproximación, vamos a modificar los incrementos de velocidades en los tramos en los que el filamento se encuentre entre $1,70\text{mm}$ y $1,80\text{mm}$

0.2.3. Ensayo 3

Los datos con los que se realizaron el experimento fueron:

- Hora de inicio: 12:00

-
- Hora final : 12:30
 - Filamento extruido: 425cm
 - $T : 150^{\circ}C$
 - $V_{min\,tractor} : 1,5mm/s$
 - $V_{max\,tractor} : 3,4mm/s$
 - Los incrementos de velocidades en las reglas del sistema experto son distintas:

En este ensayo, se va a cambiar el incremento de velocidad, cuando el filamento esté entre una diámetro de $1,75mm$ y $1,80mm$ y sea cual sea la tendencia. Se hará que en este caso, la velocidad se incremente más.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Diámetro X	
Medidas	1124
Media (mm)	1.66
Desviación estandar	0.24
Mínimo (mm)	0.98
Máximo (mm)	2.60

Tabla 7: Datos obtenidos en el ensayo 2

Con esta tercera aproximación se ha conseguido estabilizar los datos y reducir la desviación estandar, sin embargo, la media del filamento y de la velocidad de tracción ha disminuido también. Por lo tanto, los cambios realizados no han sido satisfactorio

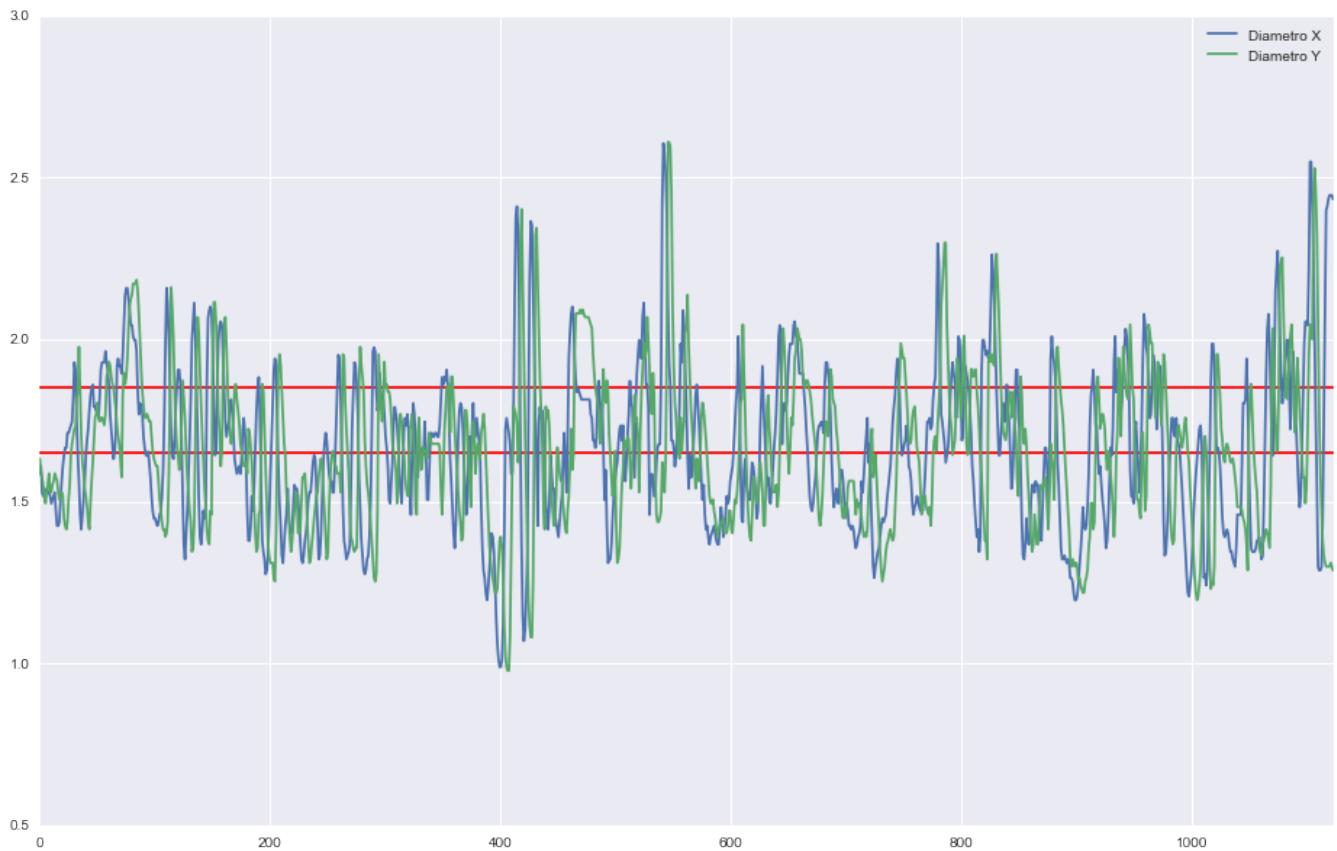


Figura 20: Datos graficados del ensayo 23 con regulador experto

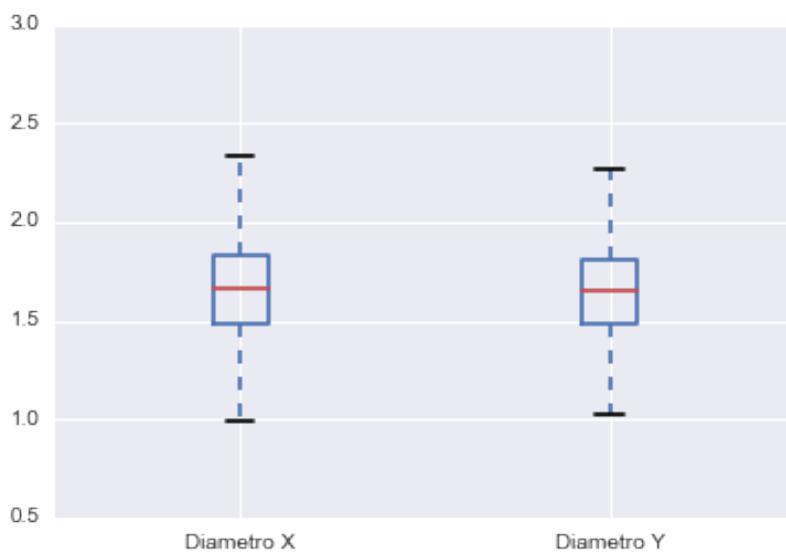


Figura 21: Diagrama de cajas del ensayo 3 con regulador experto

Como cuarta aproximación, vamos a modificar los incrementos en los que el diámetro se encuentra entre $1,70\text{mm}$ y $1,80\text{mm}$, en sentido de subida. En el sentido de bajada se mantendrá con incrementos de $+1$.

Se ha detectado también que el eje de giro de la tractora está algo suelto. Se va a apretar para el siguiente ensayo.

Bibliografía

- [1] Sergio Berti, Javier Roitman, and Claudio Verrastro. Controlador de motores paso a paso mediante técnica de micropasos por modulación de ancho de pulso. pages 1–6, August 31 2015.