



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Máster

SISTEMA DE MEDIDA DEL PERFIL DE VELOCIDAD EN PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVA

Alumno: Pérez Lorente, Francisco José

Tutor: Prof. D. Rubén Dorado Vicente
Dpto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio, 2021



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Rubén Dorado Vicente , tutor del Proyecto Fin de Máster titulado: Sistema de medida del perfil de velocidad en procesos de fabricación aditiva, que presenta Francisco José Pérez Lorente, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Universidad de Jaén.

Jaén, Junio de 2021

El alumno:

El tutor:

Francisco José Pérez Lorente

Rubén Dorando Vicente

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	6
1.1	Interés.....	6
1.2	Planteamiento del problema.....	6
1.3	Objetivos del trabajo	7
2.	DESARROLLO DEL SISTEMA	7
2.1	Materiales.....	8
2.2	Programación del encoder	10
2.2.1	Obtención del ángulo actual	11
2.2.2	Obtención del ángulo movido.....	11
2.2.3	Obtención de la velocidad actual.....	11
2.2.4	Ejemplo código de programación	11
2.3	Exportación de datos.....	12
2.3.1	Arduino - Excel.....	12
2.3.2	Excel - Matlab	13
3.	CALIBRACIÓN DEL EQUIPO	14
3.1	Análisis de los valores máximos de velocidad y aceleración alcanzados para el eje X e Y ...	15
3.1.1	Medición de la velocidad y aceleración máxima.....	15
3.1.2	Comportamiento de la velocidad y de la aceleración	16
3.1.3	Comparación del eje X e Y en la impresora Creality Ender 3 PRO	19
3.1.4	Conclusiones.....	20
3.2	Determinación del valor de delay	21
3.3	Cálculo de la distancia recorrida en vacío	23
3.3.1	Estudio de la distancia analítica y experimental en el eje X.....	23
3.3.2	Estudio de la distancia analítica en el eje Y.....	29
3.3.3	Estudio de la distancia analítica en el eje XY.....	31
3.3.4	Conclusiones.....	36
3.4	Análisis de los valores de velocidad alcanzados para los ejes X e Y en el movimiento independiente y en el movimiento simultáneo	37
3.4.1	Análisis de los valores de velocidad para el eje X	37
3.4.2	Análisis de los valores de velocidad para el eje Y.....	39
3.4.3	Análisis de los valores de velocidad para el eje XY.....	39
3.4.4	Conclusiones.....	40
3.5	Comportamiento de los perfiles de posición (P), velocidad (V) y aceleración (A)	41
3.5.1	Representación de los perfiles de P,V y A para una distancia de 10 mm en el eje X....	42

3.5.2	Representación de los perfiles de P,V y A para una distancia de 100 mm en el eje X..	44
3.5.3	Representación de los perfiles de P,V y A para una distancia de 10 mm en el eje XY..	47
3.5.4	Representación de los perfiles de P,V y A para una distancia de 100 mm en el eje XY	49
3.5.5	Aspectos importantes a tener en cuenta de los perfiles obtenidos	51
3.5.6	Conclusiones.....	53
4.	EJEMPLOS DE APLICACIÓN	54
4.1	Trayectoria sinusoidal en vacío	54
4.1.1	Perfil de posición	57
4.1.2	Perfil de velocidad	59
4.1.3	Perfil de aceleración.....	64
4.1.4	Conclusiones.....	67
4.2	Extrusión de la trayectoria sinusoidal	67
4.2.1	Perfil de posición	69
4.2.2	Perfil de velocidad	70
4.2.3	Perfil de aceleración.....	74
4.2.4	Análisis del motor paso a paso encargado de la extrusión de material.....	76
4.2.5	Observación de las piezas extruidas.....	82
4.2.6	Conclusiones.....	85
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	86
6.	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	89
7.	ANEXOS.....	90
7.1	Anexo 1. Códigos de programación en Arduino.....	90
7.1.1	Código de programación para la obtención del ángulo actual del eje del motor.....	90
7.1.2	Código de programación para la obtención del ángulo movido del eje del motor	90
7.1.3	Código de programación para la obtención de la velocidad actual del eje del motor .	91
7.1.4	Código de programación para el envío de datos desde Arduino a Excel.....	91
7.1.5	Código de programación para la obtención del ángulo y de la velocidad actual y posterior envío de datos desde Arduino a Excel.....	92
7.2	Anexo 2. Códigos de programación en Matlab	93
7.2.1	Código de programación para la obtención de los perfiles de posición, velocidad y aceleración en trayectorias rectas en un único eje.....	93
7.2.2	Código de programación para la obtención de los perfiles de posición, velocidad y aceleración en trayectorias rectas en dos ejes de coordenadas.	97
7.2.3	Código de programación para la obtención de los perfiles de posición, velocidad y aceleración en trayectorias curvas contenidas en ambos ejes de coordenadas.	104

7.2.4	Código de programación para la obtención de los perfiles de posición, velocidad y aceleración en trayectorias curvas contenidas en ambos ejes de coordenadas durante la extrusión.....	108
-------	--	-----

1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo fin de máster se lleva a cabo la implementación y el desarrollo de un sistema de medida experimental del perfil de velocidad en procesos de fabricación aditiva. En impresión 3D, el perfil de velocidad de la trayectoria seguida al depositar el hilo fundido así como su sincronización con la velocidad de extrusión influyen en el acabado y en la forma final de las piezas. Además, de este perfil de velocidad depende el tiempo de impresión, que junto a factores como el coste y el consumo de energía son críticos a la hora de determinar la eficiencia de los procesos de fabricación aditiva.

1.1 Interés

Se ha decidido realizar este trabajo porque, como se ha redactado anteriormente existen unos factores críticos a partir de los cuáles va a depender el estado final de las piezas, ya sea la forma o el acabado de éstas. La velocidad de extrusión constante provoca un exceso de deposición de material durante las fases de aceleración y desaceleración del cabezal de impresión, sin embargo, el suavizado de la trayectoria puede reducir este exceso de deposición de material en las esquinas, *cornering* [\[1\]](#). Por tanto, sería interesante el cálculo de los perfiles de velocidad tanto del movimiento plano como de la propia extrusión de material para llevar a cabo el correcto estudio de los datos y determinar el comportamiento de estos perfiles.

1.2 Planteamiento del problema

Anteriormente, se ha mostrado la importancia del perfil de velocidad, así que, para llevar a cabo la obtención de éste se desarrollará un sistema de medida que puede acoplarse a los motores paso a paso empleados en impresoras de extrusión, basado en el dispositivo uStepper S-lite (figura 2.3). Este dispositivo contiene un encoder a partir del cuál se puede obtener tanto la velocidad como la posición y con ello la obtención de los perfiles de posición, velocidad, así como el de aceleración.

El software utilizado para obtener la posición y la velocidad se implementará en Arduino. Estos datos serán exportados a otros programas como Excel y Matlab para facilitar el procesamiento correcto de los datos.

Los perfiles obtenidos experimentalmente se compararán con perfiles teóricos programados en el control de la impresora obtenidos a través de un modelo analítico que conlleva un estudio de la trayectoria de la velocidad [\[2\]](#).

1.3 Objetivos del trabajo

El principal objetivo como se ha comentado anteriormente, es el desarrollo de un sistema para medir los perfiles de velocidad en impresión 3D.

La calibración del equipo, también es un fin marcado en el trabajo, ya que a partir de ésta va a depender que los resultados obtenidos sean representativos o no.

La comparación de los perfiles teóricos-experimentales es un objetivo importante, ya que a partir de esta comparación se podrán obtener unas conclusiones interesantes en cuanto al trabajo desarrollado por las impresoras 3D para elaborar cualquier elemento.

Además, se abordará la determinación de la calidad de las medidas realizadas con el objetivo de que los resultados obtenidos sean lo más favorables posibles. Para ello, se hará uso de un pie de rey.

El sistema será implementado en la impresora 3D Creality Ender 3 PRO (figura 2.1) donde se espera que los resultados obtenidos sean favorables para que en un posible trabajo futuro se lleve a cabo una comparación de los resultados en distintas impresoras 3D.

Finalmente, emplear el sistema desarrollado en un ejemplo práctico que permita obtener los perfiles de posición, velocidad y de aceleración.

2. DESARROLLO DEL SISTEMA

En este apartado, se explicará el trabajo previo que se debe realizar para llevar a cabo la toma de datos. En primer lugar, se mostrarán que materiales han sido empleados. Seguidamente, se llevará a cabo una explicación de la programación necesaria para poder obtener de manera correcta los datos. Por último, se procederá a la descripción de la exportación de los datos a otros programas, como Excel y Matlab, para realizar posteriormente el estudio correspondiente de los datos adquiridos.

2.1 Materiales

Como se ha comentado anteriormente, este apartado incluirá los materiales empleados en el desarrollo del sistema. Primeramente, se mostrará la impresora utilizada, así como, el tipo de encoder empleado y su colocación en los motores paso a paso. Finalmente, se detallará cómo se controlarán los motores a través de un software especializado.

La máquina empleada para realizar el desarrollo del sistema, es la impresora 3D Creality Ender 3 PRO (figura 2.1), como se afirmó en los objetivos del trabajo. Cabe destacar que en un primer momento, la impresora utilizada ha sido la máquina RepRap (figura 2.2), pero debido a problemas en la extrusión de material no ha sido posible realizar el estudio completo en esta impresora.



Figura 2.1. Impresora 3D Creality Ender 3 PRO [\[3\]](#)



Figura 2.2. Impresora RepRap [\[4\]](#)

En cuanto al encoder, este está incluido en el dispositivo uStepper S-lite (figura 2.3). El encoder giratorio de 12 bits, que tiene la designación AS5600, garantiza que se pueda rastrear la posición y la velocidad del eje del motor. La disposición que tiene el encoder en el dispositivo se puede ver en la figura 2.4, donde se aprecia como se sitúa en la parte central del dispositivo y, a partir de la colocación del imán del encoder en el eje del motor se puede realizar la lectura de los datos correspondientes.



Figura 2.3. Dispositivo uStepper S-lite [5]

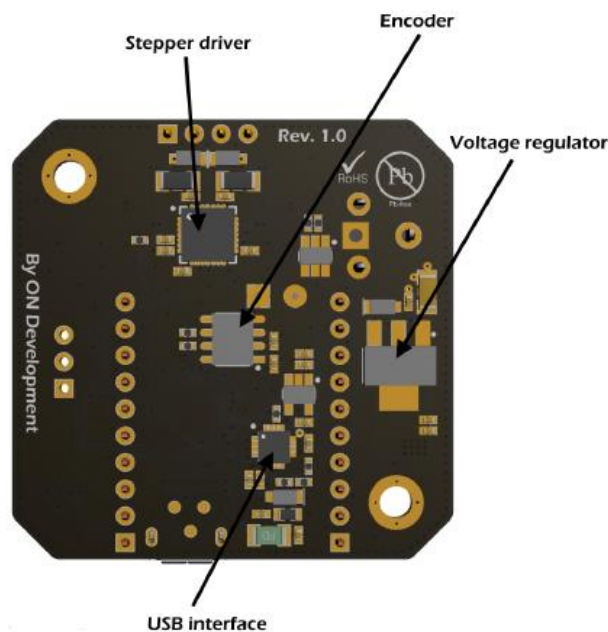


Figura 2.4. Disposición del encoder [5]

El dispositivo empleado se va a colocar en los motores paso a paso tanto del eje X como del eje Y, así como en el eje del motor de extrusión. En la figura 2.5, se puede observar la colocación del dispositivo en el motor paso a paso. Con esto se conseguirá obtener los datos tanto del eje X como del eje Y en rectas o trayectorias que se

dispongan en ambos ejes, así como los datos obtenidos del movimiento de la extrusión de material.



Figura 2.5. Colocación en el motor paso a paso [5]

Por último, el control de los motores paso a paso se realizará a través del software pronterface. Inicialmente, se conectará el software al puerto PC de la impresora con el valor de velocidad de comunicación de datos correspondiente. En la figura 2.6, se puede observar la ventana de comandos de esta herramienta, donde se tiene una opción para poder cargar el código G-code de la trayectoria que se desea realizar (Load file), así como también se puede controlar manualmente desde la parte izquierda del programa ejecutando los movimientos del eje correspondiente.

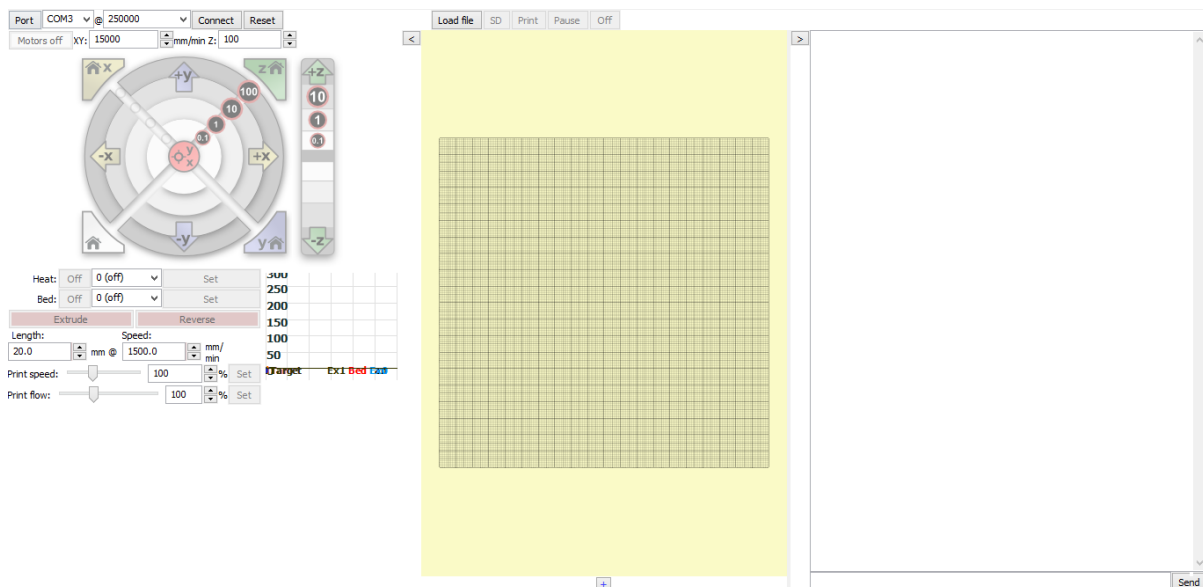


Figura 2.6. Ventana de comandos software pronterface

2.2 Programación del encoder

Con respecto a la programación del encoder, el primer paso será el estudio de las funciones necesarias a programar en Arduino para llevar a cabo el código correcto

de programación y, cargar en el encoder con el objetivo de obtener los datos necesarios para la realización del estudio correspondiente. Como se ha descrito anteriormente, la idea es acoplar un encoder en los motores paso a paso de los ejes X e Y inicialmente, con el objetivo de tener un estudio previo del movimiento del extrusor. Posteriormente, en la recepción de datos simultáneos de ambos motores paso a paso se necesitarán dos ordenadores para el envío de datos, ya que un ordenador no deja el envío de datos de dos dispositivos diferentes. El código de programación será el mismo para los dos motores. En los siguientes subapartados se detallan las funciones necesarias para obtener los datos que se requieran en cada caso.

2.2.1 Obtención del ángulo actual

La función necesaria para llevar a cabo la obtención del ángulo actual es *getAngle()* [6]. Esta función devuelve el ángulo actual del eje del motor. Devuelve el valor en grados donde los valores están en el rango de 0° a 360°.

2.2.2 Obtención del ángulo movido

La función que se necesita para obtener el ángulo movido es *getAngleMoved()* [6]. Esta función devuelve el ángulo movido por el eje del motor. Los valores irán en función del ángulo movido desde 0°, 30°, 60°, 90°, 360°, 720°... etc.

2.2.3 Obtención de la velocidad actual

La función requerida para la obtención de la velocidad actual es *getSpeed(unit)* [6]. Esta función devuelve la velocidad actual del motor. El valor que devuelve de la velocidad tiene las unidades de SPS (step per second), pero para asegurarse se compara el valor obtenido de unit con SPS o RPM para estar seguros de las unidades del valor obtenido. Los valores en el avance tienen el signo positivo, en cambio en el retroceso los valores son obtenidos con el signo negativo.

2.2.4 Ejemplo código de programación

Una vez explicadas las distintas funciones a tener en cuenta, se está en disposición de realizar el código de programación idóneo para poder obtener los datos que se requieran. El código de programación de las distintas funciones explicadas anteriormente, se muestra en los anexos correspondientes a los apartados 7.1.1, 7.1.2

y 7.1.3. Todos los códigos de programación tienen en común la misma estructura que se detalla en la figura 2.7.

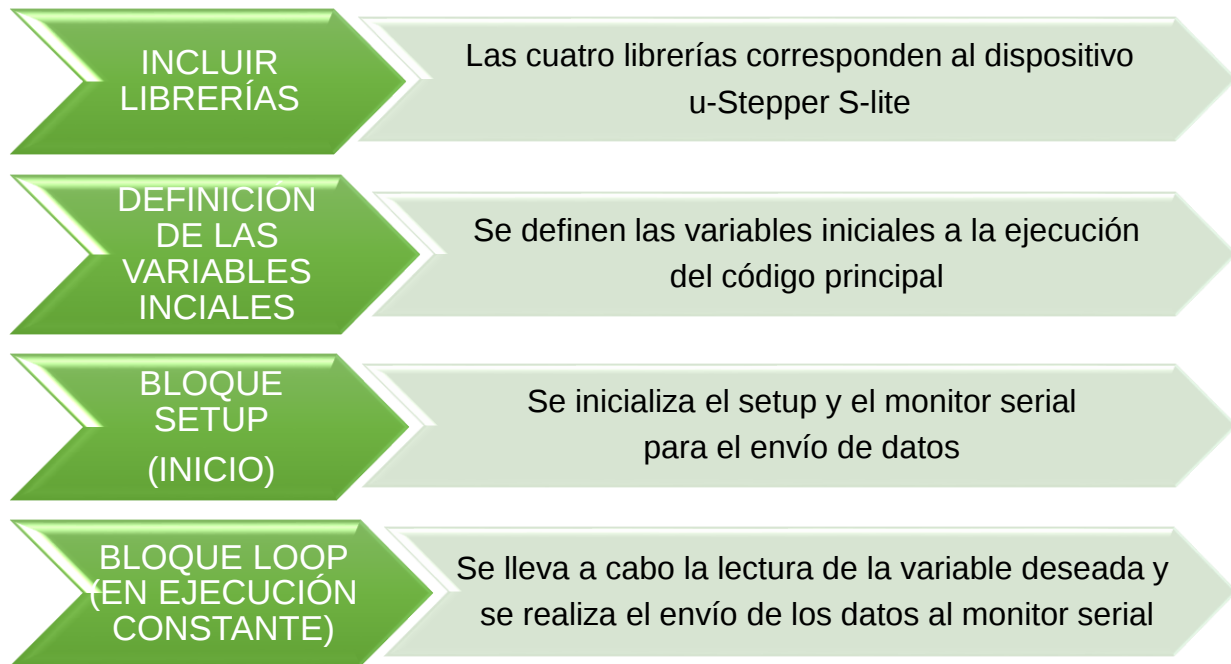


Figura 2.7. Estructura del código de programación ARDUINO

2.3 Exportación de datos

Una vez que se consigue la adquisición de datos a través del monitor serial del software arduino, se plantea la exportación de estos datos a otros programas. Arduino no es la mejor herramienta para llevar a cabo un estudio correcto de los datos, por tanto, se empleará el programa Matlab para realizar el estudio de los datos correspondientes utilizando de intermediario Excel para la exportación de éstos.

2.3.1 Arduino - Excel

El primer paso para exportar los datos será la utilización del programa Excel. Para ello, se utilizará la herramienta *PLX-DAQ.v2*, que permite realizar la exportación de datos al mismo tiempo que los datos están siendo leídos desde arduino. En la figura 2.8, se muestra la ventana de comandos de esta herramienta. Donde los parámetros más importantes a tener en cuenta son el puerto (Port) que habrá que seleccionar el número de puerto del PC al que está conectado el dispositivo u-Stepper S-lite, y la velocidad de comunicación de los datos (Baud) que tiene que tener el mismo valor de velocidad que el indicado en el código de programación en arduino y en la ventana de

comandos del software pronterface si no la transmisión de los datos no será factible. Una vez que el código de programación en Arduino se haya cargado en el dispositivo se hará clic en el botón *Connect* y comenzará la transmisión de los datos.

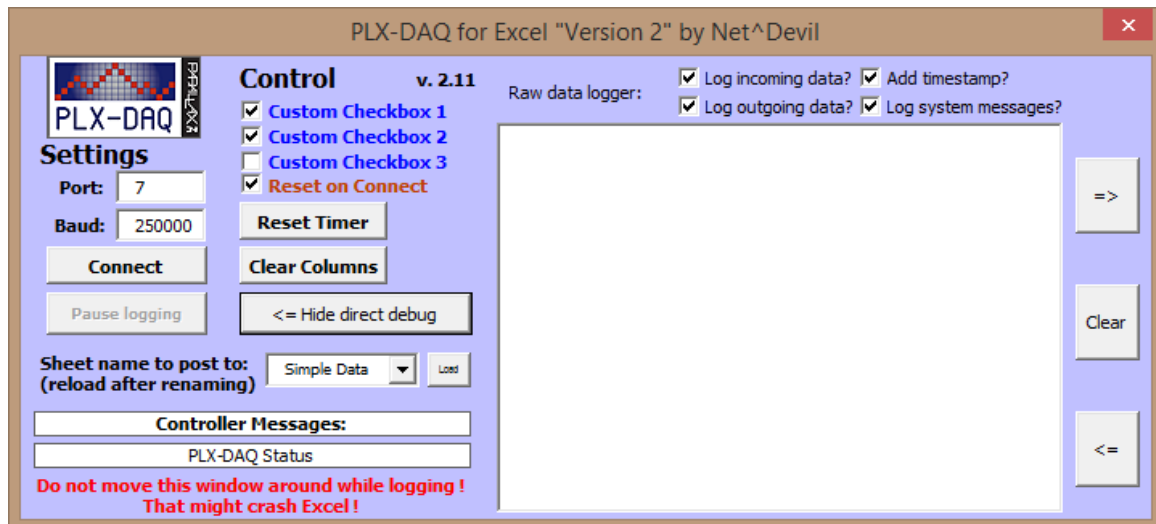


Figura 2.8. Ventana de comandos de la herramienta PLX-DAQ.v2

Una vez configurada la ventana de comandos, hay que realizar el código de programación en Arduino para realizar correctamente el envío de datos desde Arduino a Excel. La estructura de este código de programación, mostrada en la figura 2.9, es similar a la mostrada en la figura 2.7 pero se han añadido más líneas de código con el objetivo del envío de los datos. El ejemplo del código de programación se puede observar en el anexo correspondiente al apartado 7.1.4.

2.3.2 Excel - Matlab

Una vez concluida la transmisión de datos desde Arduino a Excel, se está en disposición de exportar los datos a Matlab. Esta operación es sencilla y se hace todo el proceso en pocas líneas de código. La función necesaria para esta operación es *xlsread()*. Un ejemplo de la utilización de esta función se muestra en la figura 2.10b, donde a la función se le asigna un nombre de variable, y se introducen los campos del nombre del archivo Excel que contiene los datos y la columna y filas de éstos, figura 2.10a.

El código de programación para la exportación de datos tendrá tantas líneas de código como columnas se quieran exportar, ya sea el tiempo, velocidad y/o posición,

aunque se pueden exportar todos los datos del archivo excel en una misma variable simplemente introduciendo el nombre del archivo, como indica la figura 2.10c.



Figura 2.9. Estructura del código de programación ARDUINO-EXCEL

```
NOMBRE_VARIABLE = xlsread('NOMBRE_DEL_ARCHIVO_EXCEL', 'COLUMNA-FILAS');
```

(a)

```
Velocidad = xlsread('2. Velocidad (X100 F500) 50ms.xlsm', 'E2:E250');
```

(b)

```
DATOS_10_MM = xlsread('1. T-V-P (X10 F4000) 0_0625ms.xlsm');
```

(c)

Figura 2.10. (a) Estructura *xlsread()*, (b) Ejemplo 1 de la función *xlsread()*, (c) Ejemplo 2 de la función *xlsread()*

3. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

La calibración del sistema es un paso importante en el desarrollo del trabajo ya que tiene como objetivo la obtención de unos resultados finales precisos. Para lograr dicha calibración, se han realizado distintas pruebas y ensayos que se presentan en los siguientes subapartados.

En primer lugar, se realizará un análisis del comportamiento de los valores máximos de velocidad (V) y aceleración (A) alcanzados a distintas velocidades de programación (F) para la distancia máxima de recorrido. En segundo lugar, se

calculará el valor de delay óptimo entre cada medida para poder obtener unos datos representativos a partir del encoder. A continuación, se pretende obtener y comparar la distancia recorrida en vacío analítica y experimentalmente. Seguidamente, se realizará un estudio de la velocidad alcanzada en el movimiento simultáneo de los ejes X e Y para distintas distancias de recorrido. Y, por último, se mostrarán algunos gráficos de los perfiles de posición, velocidad y aceleración para unos determinados casos a partir de los cuales se analizarán su comportamiento y se podrán obtener unas conclusiones importantes.

3.1 Análisis de los valores máximos de velocidad y aceleración alcanzados para el eje X e Y

En un primer paso, para lograr la calibración del equipo se medirán los valores máximos de velocidad y aceleración que la impresora puede llegar a alcanzar, así como se mostrará si estos valores hallados son aproximados a los valores teóricos aportados por el firmware. A su vez, se expondrá el comportamiento de la velocidad y de la aceleración máxima cuando la velocidad programada disminuye tanto para la impresora RepRap como para la impresora Creality Ender 3 PRO con el fin de realizar una comparación entre ambas máquinas, y así determinar las diferencias entre una y otra. Finalmente, se hará una comparación de los datos obtenidos tanto en el eje X como en el eje Y de la impresora Creality Ender 3 PRO, que es la máquina principal de este trabajo.

3.1.1 Medición de la velocidad y aceleración máxima

Esta medición se ha llevado a cabo para la distancia máxima de recorrido en el eje X que está en torno a 200-220 mm. La tabla 3.1 muestra los valores teóricos de velocidad y aceleración máxima aportados por el firmware y los valores máximos experimentales de velocidad y aceleración que llegan a alcanzar ambas impresoras.

En cuanto a la máquina RepRap, se puede observar como el valor de velocidad experimental máximo es equivalente al valor teórico aportado por el firmware cometiendo un error relativo del 0.24%. En cambio, para la aceleración la diferencia es mayor, en concreto de un 23.3% de error. Este error puede estar ocasionado debido a la finalidad del archivo de configuración Marlin que está pensado para utilizarlo en la impresora Ultimaker [\[10\]](#), por tanto, el valor teórico de la aceleración es demasiado alto para una impresora que presenta limitaciones respecto a la Ultimaker.

Para la impresora Creality Ender 3 PRO, se puede analizar que el valor de velocidad experimental es mucho más bajo que el valor teórico, cometiendo un error relativo de un 40.8%, donde esta diferencia puede tener influencia debido a la distancia máxima permitida que puede recorrer la impresora que es de unos 220 mm en el eje X aproximadamente. Si la impresora tuviese unas dimensiones mayores de desplazamiento se estaría más cerca de alcanzar la velocidad teórica detallada. Otro aspecto a tener en cuenta y que puede influir podría ser el valor teórico de la aceleración, como se puede comprobar el valor teórico permitido es de 500 mm/s², cercano al valor experimental obtenido de la aceleración. Si el valor de la aceleración teórica fuese más alto de 500 mm/s², posiblemente se estaría más cerca de alcanzar la velocidad teórica programada por el firmware de la impresora. A pesar de no alcanzar el valor teórico de la velocidad, el valor obtenido es suficiente para seguir en el transcurso del trabajo.

	RepRap		Creality Ender 3 PRO	
	V (mm/s)	A (mm/s ²)	V (mm/s)	A (mm/s ²)
Valores teóricos	250	1500	500	500
Valores experimentales	250.6	1150	296	515

Tabla 3.1 Valores teóricos y experimentales de velocidad y aceleración máximos alcanzados por ambas máquinas

3.1.2 Comportamiento de la velocidad y de la aceleración

Una vez hallados los valores máximos tanto de la velocidad como de la aceleración, se hacen los distintos ensayos para observar el comportamiento de ambas magnitudes cuando la velocidad programada disminuye. Los resultados expuestos se han obtenido de realizar los ensayos a la distancia máxima posible de recorrido que tienen las dos impresoras en el eje X, que son de 200 mm para el caso de la RepRap y 220 mm para la máquina Creality Ender 3 PRO. Estos resultados se presentan en la tabla 3.2, figura 3.1 y 3.2.

Para la impresora RepRap, se puede observar como el valor máximo de velocidad alcanzado es para una velocidad programada de 250 mm/s, como se pudo comprobar en la tabla 3.1. Si se disminuye dicha velocidad programada se puede ver como los valores máximos experimentales alcanzados también disminuyen sin cometer prácticamente errores entre las medidas. A velocidades programadas más

altas de 250 mm/s se puede observar como los valores de velocidad obtenidos se estabilizan en 250 mm/s, que como se dijo anteriormente es la velocidad máxima que puede llegar a alcanzar la impresora RepRap.

En cuanto a la impresora Creality Ender 3 PRO, se puede analizar como la velocidad experimental máxima se alcanza para una velocidad programada de 333.3 mm/s, pero cometiendo un error relativo de un 11.16%. A medida que disminuye la velocidad programada el error relativo va disminuyendo hasta alcanzar la velocidad experimental de 200 mm/s donde el error cometido es prácticamente nulo. Por lo tanto, se deduce que a velocidades altas se comete un error relativo mayor que a velocidades intermedias-bajas.

La aceleración se comporta de igual manera en los dos casos, disminuyendo su valor máximo cuando la velocidad programada también disminuye, es lógico ya que la aceleración mide el cambio en la velocidad y ésta es cada vez menor al disminuir la velocidad.

	RepRap		Creality Ender 3 PRO	
F (mm/s)	V (mm/s)	A (mm/s ²)	V (mm/s)	A (mm/s ²)
416.7	250.4	1200	296	515.4
333.3	250.1	1201	296.1	525.3
300	250.6	1189	287.5	516.1
283.3	250.8	1109	276.6	504.9
250	250.6	1150	247.7	525.4
200	200	1051	200.1	489.1
166.7	167.2	927.3	167.5	482.1
116.7	117.3	684	117	453.8
66.7	67.5	414.3	67	346.4
33.3	33.9	215.4	33.6	201.1
8.3	8.5	53.4	8.4	53.8

Tabla 3.2 Valores máximos de velocidad y aceleración para las dos impresoras 3D a distintas velocidades programadas en el eje X.

Así pues, se afirma que para velocidades de programación altas, en la impresora Creality Ender 3 PRO se comete un error menor del 5% para aquellas velocidades que si son posibles de alcanzar. En cambio, para la impresora RepRap, la velocidad máxima alcanzada se consigue para la misma velocidad programada, de 250 mm/s, sin cometer prácticamente ningún error. En relación con la aceleración, se puede analizar en los dos casos como la aceleración va disminuyendo cuando la velocidad programada también aminora, teniendo unos valores de aceleración más altos para el caso de la máquina RepRap debido a que el valor teórico impuesto de aceleración es de 1500 mm/s^2 . Por consiguiente, las velocidades idóneas para obtener a priori unos resultados precisos están por debajo de los 12000 mm/min en ambas máquinas, ya que si no se alcanzan de manera experimental en cada caso los valores teóricos de velocidad habrá errores en los tiempos de proceso, por ejemplo.

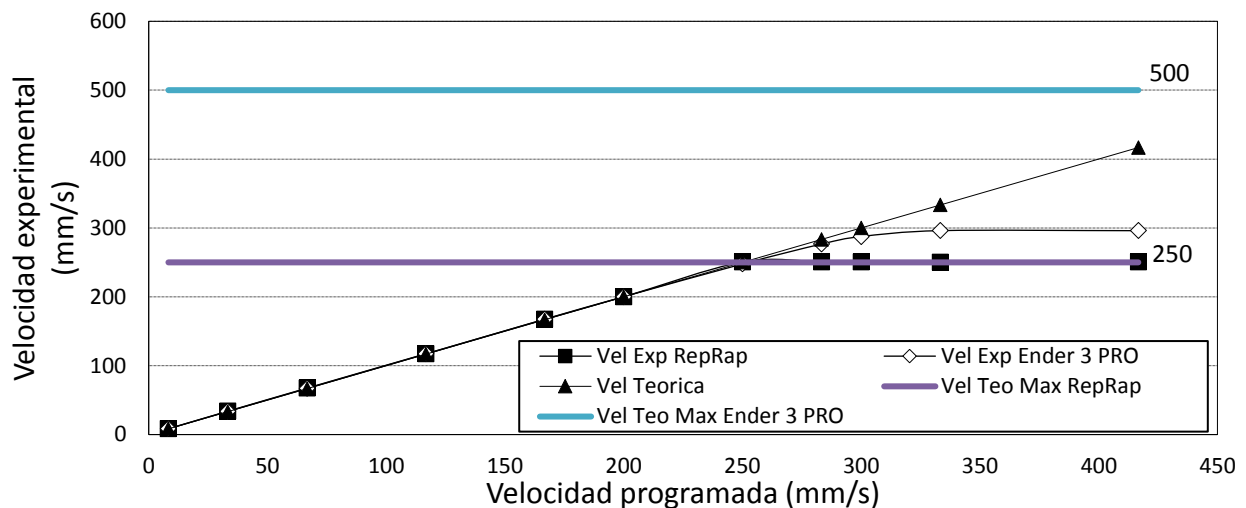


Figura 3.1. Comportamiento de la velocidad en ambas impresoras

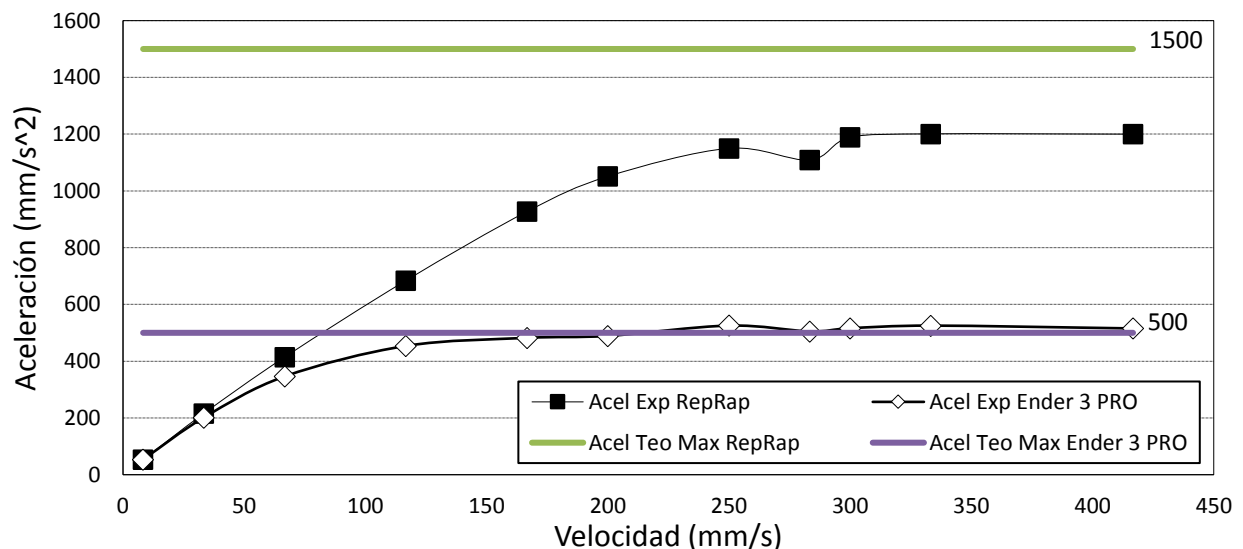


Figura 3.2. Comportamiento de la aceleración en ambas impresoras

3.1.3 Comparación del eje X e Y en la impresora Creality Ender 3 PRO

Una vez realizada la comparación de ambas máquinas en el eje X, se realizará la comparación de los datos obtenidos tanto para el eje X como para el eje Y en la impresora Creality Ender 3 PRO. Se espera que, ya que los motores de ambos ejes son idénticos, no debe haber disparidad entre dichos datos. En la tabla 3.3, figura 3.3 y 3.4 se presentan dichos resultados.

Así pues, analizando los resultados obtenidos tanto en el eje X como en el eje Y para la Ender 3 PRO se afirma que los datos obtenidos son correctos ya que se alcanzan valores similares para una misma velocidad de programación en los distintos ejes de coordenadas. Con respecto a la aceleración hay una pequeña diferencia entre dichos valores máximos pero no es muy notable.

	Creality Ender 3 PRO EJE X		Creality Ender 3 PRO EJE Y	
F (mm/s)	V (mm/s)	A (mm/s ²)	V (mm/s)	A (mm/s ²)
416.7	296	515.4	295.5	520.5
333.3	296.1	525.3	295.8	522.09
300	287.5	516.1	287.2	518.2
283.3	276.6	504.9	276.5	516
250	247.7	525.4	247.9	514.8
200	200.1	489.1	199.6	500.2
166.7	167.5	482.1	167.1	476.6
116.7	117	453.8	116.6	444.5
66.7	67	346.4	66.7	342
33.3	33.6	201.1	33.5	216.3
8.3	8.4	53.8	8.4	58.1

Tabla 3.3 Valores máximos de velocidad y aceleración para la impresora Ender 3 PRO a distintas velocidades programadas en el eje X e Y.

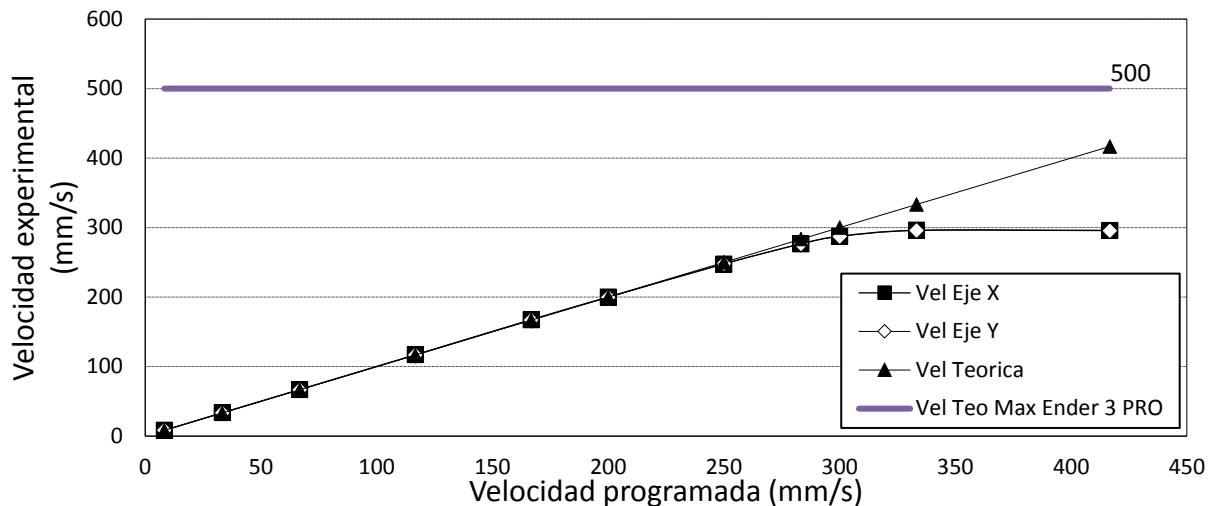


Figura 3.3. Comparación de velocidades en el eje X e Y

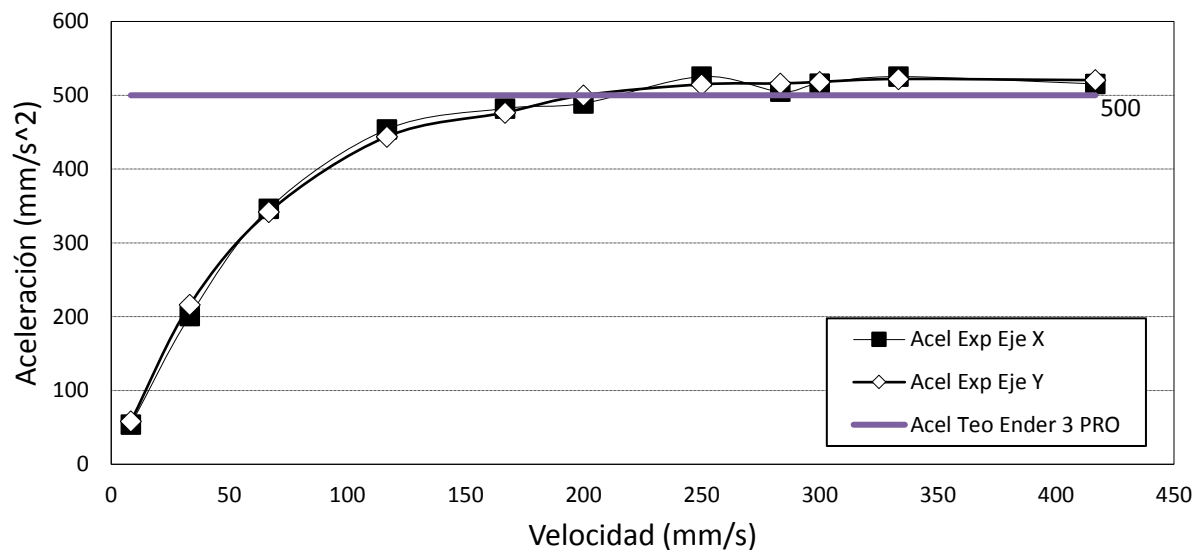


Figura 3.4. Comparación de aceleraciones en el eje X e Y

3.1.4 Conclusiones

Finalmente, una vez realizado el análisis del comportamiento de la velocidad y aceleración máxima las conclusiones que se obtienen son las siguientes:

- ✓ Para la máquina RepRap, se alcanza el valor teórico de la velocidad, mientras que el valor teórico de la aceleración no se alcanza por las limitaciones de la máquina.
- ✓ Para la impresora Creality Ender 3 PRO, el valor de la velocidad teórica está lejano de ser alcanzado debido o a la distancia de movimiento máxima o al valor impuesto de aceleración. Sin embargo si que se alcanzan los valores de velocidad teórica inferiores al máximo.

- ✓ El comportamiento de la velocidad y de la aceleración son prácticamente idénticos en ambas impresoras, disminuyendo los valores experimentales de ambas magnitudes al disminuir la velocidad de programación, y manteniéndose constante cuando se alcanza el valor máximo.
- ✓ Se determina en ambos casos que la velocidad máxima a imponer en ambas impresoras es de 12000 mm/min donde el error cometido es prácticamente nulo en ambos casos.
- ✓ En relación al eje X e Y para la máquina Ender 3 PRO, se determina que el comportamiento es idéntico por lo cual los datos obtenidos son favorables.

3.2 Determinación del valor de delay

El valor de delay óptimo es un parámetro importante con respecto a la veracidad de los datos obtenidos ya que dependiendo del valor de éste se obtendrán unos datos de velocidad, posición y tiempo más o menos representativos, y se debe de obtener aquellos datos que permitan adquirir unos resultados precisos en cualquier tipo de ensayo realizado, ya sea para distancias más grandes o más pequeñas, o velocidades más altas o más bajas.

En primer lugar, un paso importante es la determinación de la velocidad máxima, obtenida en el apartado 3.1, que puede alcanzar la máquina, ya que esta velocidad máxima será la velocidad limitante, respecto a la distancia máxima que puede recorrer el extrusor. Estos dos valores máximos, velocidad y distancia, serán considerados como valores límites a partir de los cuales se hallará el valor de delay óptimo que permitirá obtener unos resultados precisos a velocidades menores y a distancias más pequeñas.

Los valores límites para la máquina principal, Creality Ender 3 PRO, analizados en el apartado anterior son:

- ✓ Distancia máxima de 220 mm
- ✓ Velocidad máxima programada de 200 mm/s

Para hallar el valor de delay óptimo también es necesario conocer las características de los motores paso a paso que la componen, puesto que a partir de

éstas se va a conocer cual es el valor mínimo de desplazamiento a medir atendiendo a la resolución del motor. Las características que componen el motor paso a paso NEMA 17 de esta impresora son:

- ✓ Ángulo de paso del motor: 1.8°
- ✓ Nº dientes del engranaje: 20 dientes
- ✓ Paso de la correa: 2 mm

Atendiendo a los valores presentados anteriormente y aplicando el modelo definido en [11] para hallar la resolución del motor se obtiene lo mostrado en la figura 3.5:

- ✓ Pasos por mm: 80
- ✓ Resolución del motor: $12.5 \mu\text{m}$

The image shows a web-based calculator for determining motor resolution. It has several input fields and a results table.

Motor step angle	Driver microstepping
1.8° (200 per revolution)	1/16 - uStep (mostly Pololu)
Belt pitch (in mm)	Belt presets
2	2mm Pitch (GT2 mainly)
Pulley tooth count	
20	

Result	Resolution	Teeth	Step angle	Stepping	Belt
80.00 Click to Share!	12.5micron	20	1.8°	1/16th	2mm

Figura 3.5 Características y resultados de la resolución del motor NEMA 17

Una vez determinada la resolución del sistema se está en disposición de determinar cual es el valor de delay óptimo a aplicar en los diferentes ensayos que se realicen. A continuación, partiendo de la velocidad máxima alcanzada y realizando los distintos cambios de conversión de unidades correspondientes se obtiene el valor de delay para $1 \mu\text{m}$. Se finaliza multiplicando el valor obtenido por la resolución del motor y se determina el valor de delay óptimo que es de 0.0625ms.

$$t_{delay} = \frac{r}{v_{Max}} = 0.0625 \text{ ms}; \begin{cases} v = 200 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 200 \frac{\mu\text{m}}{\text{ms}}, \\ r = 12.5 \mu\text{m} \end{cases}$$

3.3 Cálculo de la distancia recorrida en vacío

La distancia recorrida en vacío es un fin importante a determinar para seguir avanzando en el estudio de este trabajo y, a partir de la cual se comprobará si los datos obtenidos experimentalmente son representativos o no, y por consiguiente se mostrará si la máquina recorre la distancia que le ha sido programada o no. Este cálculo se realizará a través de la fórmula analítica mostrada en la ecuación (1).

$$X = \text{paso} * n^{\circ} \text{ dientes} * n^{\circ} \text{ vueltas} \quad (1)$$

Donde:

X = Distancia recorrida (mm)

p = Paso de la correa (mm)

d = N° de dientes del engranaje

n = N° de vueltas del engranaje

En primer lugar, se determinará la distancia recorrida en vacío en el eje X, con el objetivo de asegurar que el valor obtenido de la distancia es idóneo. A continuación, se hará el proceso analítico en el eje Y, y posteriormente se realizará el proceso analítico de manera diagonal, es decir, realizando rectas que estén contenidas en ambos ejes.

Para el caso de la impresora Ender 3 PRO se tiene que el paso de la correa mide 2 mm, el número de dientes es de 20, y el número de vueltas se determinará a partir de la función que obtiene el ángulo movido, explicada en el apartado 2.2.2 *Obtención del ángulo movido*, teniendo en cuenta que una vuelta equivale a 360° y que 1.8° es el paso por ángulo del motor.

3.3.1 Estudio de la distancia analítica y experimental en el eje X

Los datos presentados en la tabla 3.4 y en la tabla 3.5 se han obtenido de realizar líneas rectas en el eje X donde la velocidad de programación (F) está expresada en mm/min, y la distancia de referencia (Xref), analítica (Xanal) y experimental (Xexp) están expresadas en mm.

Ender 3 PRO	F (500)	F (2000)	F (4000)	F (7000)	F (10000)	F (12000)
Xref (mm)	Xanal (mm)					
10	10.06	10.07	10.06	10,05	10,07	10,04
20	20.09	20.08	20.08	20,09	20,09	20,07
30	30.00	30.00	29.99	30,00	29,99	29,97
40	40.00	39.99	39.99	40,00	39,99	39,98
50	50.07	50.06	50.07	50,06	50,07	50,06
60	60.04	60.09	60.09	60,09	60,09	60,09
70	69.95	70.00	69.99	69,99	69,96	69,99
80	79.99	79.99	79.98	79,99	79,99	79,96
90	90.03	90.07	90,06	90,06	90,06	90,06
100	100.09	100.08	100,08	100,08	100,09	100,08
110	109.99	109.99	109,99	109,99	110,00	109,99
120	119.98	119.98	119,98	119,98	119,98	119,98
130	130.06	130.06	130,05	130,07	130,06	130,07
140	140.08	140.09	140,08	140,09	140,09	140,08
150	149.99	149.99	149,97	150,00	150,00	150,00
160	159.98	159.99	159,98	159,99	159,99	159,98
170	170.07	170.07	170,05	170,03	170,07	170,06
180	180.09	180.09	180,07	180,05	180,09	180,08
190	190.00	189.99	189,98	189,96	189,98	190,00
200	199.99	199.96	199,98	199,99	199,98	199,99
210	210.07	210.04	210,06	210,02	210,05	210,06
220	220.09	220.07	220,08	220,09	220,07	220,09

Tabla 3.4 Resultados de la distancia analítica para distintas velocidades (Eje X)

Ender 3 PRO	F (500)	F (2000)	F (4000)	F (7000)	F (10000)	F (12000)
Xref (mm)	Xexp (mm)					
10	9.96	10.02	10,00	10,04	10,00	9,98
20	20.00	19.96	19,94	19,98	20,08	20,04
30	30.06	30.06	30,04	30,06	30,04	29,94
40	40.04	40.02	39,98	40,06	40,04	40,06
50	50.06	50.06	49,98	50,00	50,00	50,08
60	59.94	60.00	60,02	59,98	59,98	59,92
70	70.02	69.96	69,92	70,00	69,98	69,98
80	80.04	79.98	80,06	80,02	79,98	80,00
90	89.96	90.04	90,02	90,06	89,94	90,06
100	100.02	100.02	100,00	99,96	99,92	100,02
110	110.04	110.04	109,92	109,98	110,04	109,98
120	120.06	119.96	120,04	120,06	120,08	120,06
130	130.00	130.00	130,00	129,98	129,94	130,02
140	140.02	140.04	139,92	139,94	139,98	140,04
150	149.96	150.06	149,98	150,02	150,02	149,98
160	160.02	160.02	160,02	160,04	160,02	160,06
170	170.04	169.96	170,06	169,98	170,04	169,98
180	180.06	178.98	179,94	180,04	180,06	180,02
190	189.96	190.04	190,06	190,06	190,02	189,94
200	200.04	200.02	200,04	199,98	200,04	200,02
210	210.02	210.06	209,94	210,04	210,04	210,02
220	220.06	220.02	219,94	220,06	220,06	220,04

Tabla 3.5 Resultados de la distancia experimental para distintas velocidades
(Eje X)

Para analizar de manera más directa los resultados mostrados en la tabla 3.4 y 3.5 se representan gráficamente en la Figura 3.6.

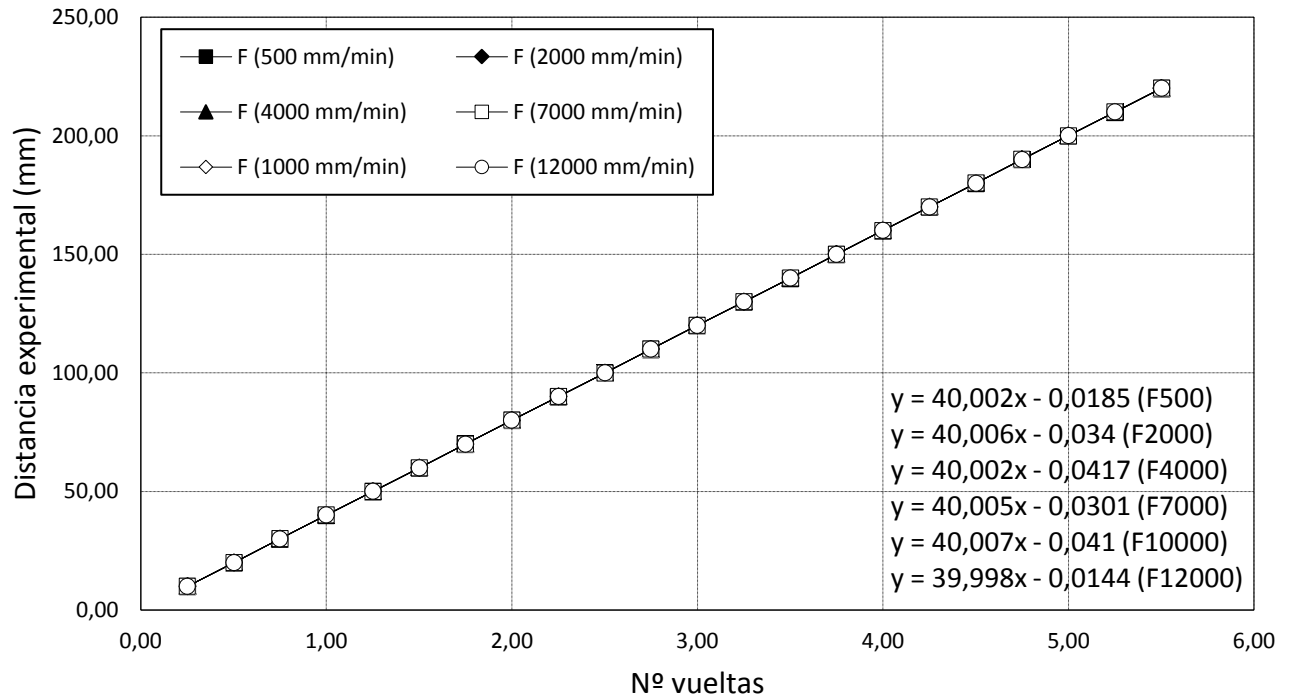


Figura 3.6. Representación de la distancia experimental frente al número de vueltas para distintas velocidades

En la figura 3.6, se observa la representación de la distancia experimental frente al número de vueltas dadas por el eje del motor para las distintas velocidades seleccionadas. El objetivo de esta representación es la obtención de la pendiente de la recta cuyo valor debe ser igual al valor constante de la multiplicación del paso de la correa por el número de dientes del engranaje, dicho valor constante es de 40 equivalente al valor obtenido de la pendiente para todas las rectas resultantes como se puede observar en las ecuaciones de la recta obtenidas. Por tanto, se afirma que los datos obtenidos de manera experimental son correctos.

A continuación, se mostrarán gráficamente los errores relativos cometidos tanto para distancias analíticas como experimentales, respecto a la medida real del segmento a recorrer en la impresora, con el propósito de ratificar la afirmación dicha en el párrafo anterior.

Como se puede observar en las figuras 3.7 y 3.8 los errores relativos obtenidos tanto para la distancia analítica como experimental son pequeños donde la media del error está por debajo de 0.09% y 0.06% respectivamente, unos valores que reafirman

lo dicho anteriormente, los datos obtenidos de manera experimental son correctos, y además los datos obtenidos de manera analítica también son idóneos.

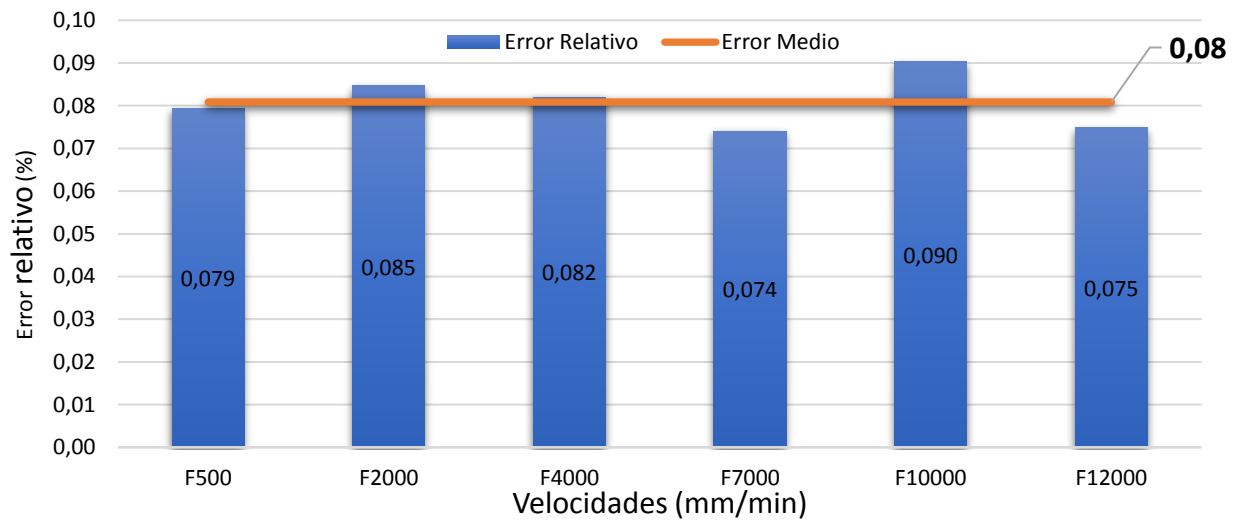


Figura 3.7. Representación de los errores relativos en la distancia analítica (Eje X)

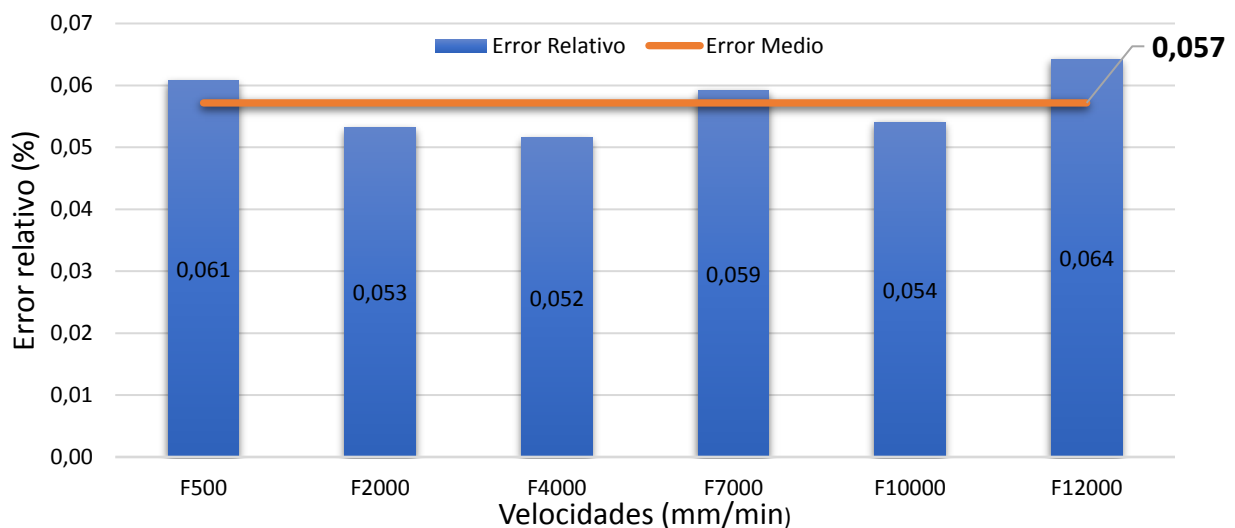


Figura 3.8. Representación de los errores relativos en la distancia experimental (Eje X)

A continuación, se mostrará la técnica utilizada para realizar la medición de la distancia experimental, donde se ha utilizado como instrumento de medida un pie de rey, como el de la figura 3.12.

En primer lugar, se ha seleccionado un punto de partida o de inicio en el perfil que contiene la correa para el movimiento del eje X, este punto será el 0 a partir del cual se va a comenzar la medición. Se ha escogido este punto de la correa porque coincide con el final del perfil (Figura 3.9).

Cuando se inicia el movimiento de la correa, se desplaza a su vez la marca creada en la correa y se realiza la medición desde el punto de partida hasta la marca, con lo cual se obtiene la distancia experimental del movimiento en el eje X, como se indica en la figura 3.10.



Figura 3.9. Punto de partida para la medición de la distancia experimental en el eje X.

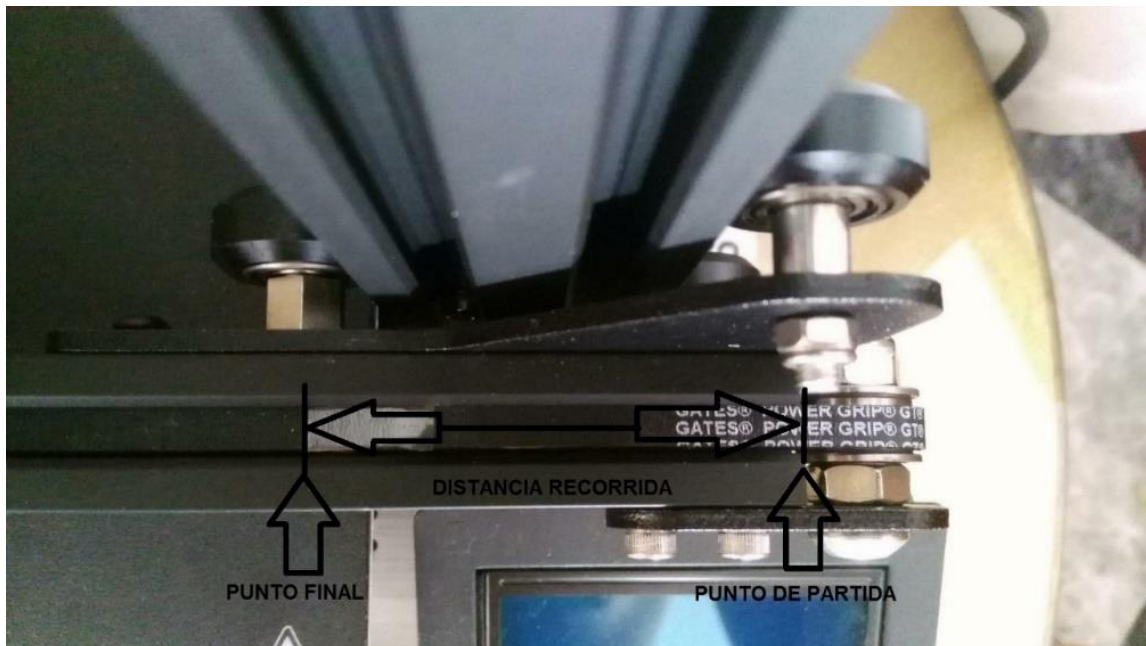


Figura 3.10. Ejemplo de desplazamiento de la marca de la correa.

El pie de rey empleado tiene un campo de medida de 0 a 150 mm y una resolución de 0.02 mm. Teniendo en cuenta el campo de medida, el procedimiento descrito está limitado a distancias inferiores a los 150 mm, por lo tanto, se recurre a la marcación de ciertos puntos en el perfil del eje X que indican las distancias de 100 mm y de 200 mm, a partir de las cuales se realizan las mediciones para distancias superiores a 150 mm. En la figura 3.11 se pueden ver dichas marcas.

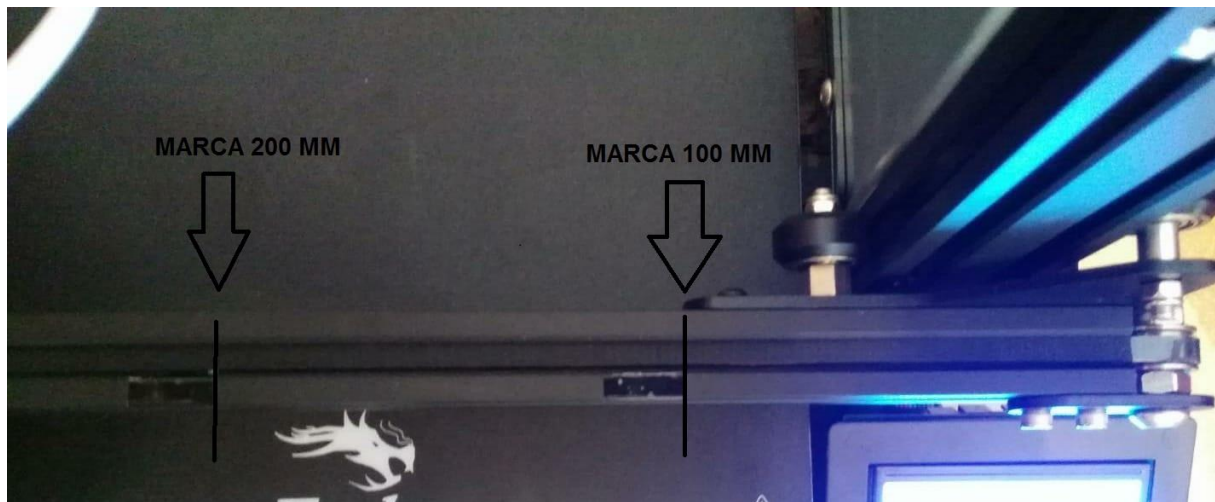


Figura 3.11. Marcas de las distancias de 100 y 200 mm.



Figura 3.12 Pie de rey

3.3.2 Estudio de la distancia analítica en el eje Y

Una vez realizado el estudio en vacío en el eje X, se realizará de manera analítica dicho estudio en el eje Y. Se esperan obtener resultados similares que para el eje X debido a que ambos ejes trabajan con el mismo modelo de motor paso a paso. El estudio de la distancia experimental no se realizará en este caso debido a que la

medición con el pie de rey en dicho eje es más compleja, y como hemos ratificado anteriormente ambos análisis son semejantes y se considera el estudio analítico suficiente.

Ender 3 PRO	F (500)	F (2000)	F (4000)	F (7000)	F (10000)	F (12000)
Yref (mm)	Yanal (mm)					
10	10,02	9,99	9,99	10	9,99	10,01
20	20,01	20,02	20,02	20,03	20,01	20,02
30	30,02	29,99	29,98	29,98	29,98	29,98
40	40,00	40,01	40,03	40,02	40,02	40,01
50	50,00	49,99	50,00	49,99	50,00	49,99
60	60,01	60,01	60,02	60,01	60,02	60,03
70	69,97	69,99	69,99	69,98	69,98	69,98
80	80,00	80,01	80,02	80,01	80,01	80,02
90	89,99	89,99	90,00	89,99	89,99	90,00
100	100,01	100,02	100,03	100,01	100,01	100,01
110	109,98	109,98	109,98	109,98	109,99	109,99
120	120,01	120,01	120,02	120,01	120,02	120,01
130	129,99	129,99	130,00	129,99	129,99	130,00
140	140,01	140,01	140,02	140,01	140,01	140,01
150	149,98	149,98	149,99	149,98	149,98	149,99
160	160,01	160,01	160,02	160,02	160,01	160,02
170	169,99	169,99	169,99	169,99	169,99	170,00
180	180,01	180,01	180,03	180,01	180,02	180,03
190	189,98	190,00	189,99	189,98	189,99	189,99
200	200,02	200,01	200,01	200,01	200,01	200,02
210	210,00	210,00	210,00	209,99	209,99	210,00
220	219,97	219,97	219,98	219,97	219,97	219,98

Tabla 3.6 Resultados de la distancia analítica para distintas velocidades (Eje Y)

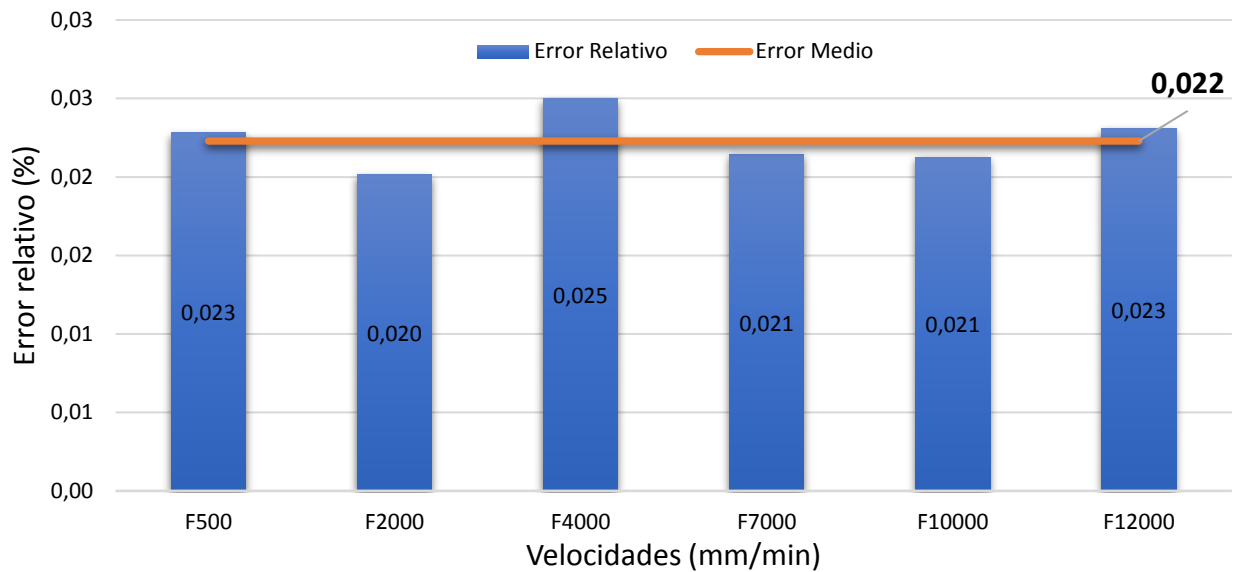


Figura 3.13. Representación de los errores relativos respecto a las estimaciones de distancias analíticas (Eje Y)

En la tabla 3.6 se presentan los resultados obtenidos de la distancia analítica para las distintas velocidades de programación en el eje Y, donde a dichos resultados se les ha calculado el error relativo como se presenta en la figura 3.13. Se puede analizar que se obtienen para cada velocidad un error medio menor de 0.03%, quedando el error medio para el eje Y en un valor de 0.022%, que es incluso menor al error obtenido para el eje X, 0.08%. Por lo cual, se deduce que los resultados obtenidos para el eje Y son positivos, y que la diferencia entre ambos porcentajes se puede deber al propio dispositivo utilizado, uStepper S-lite, ya que en cada motor se utiliza un dispositivo diferente o que haya alguna diferencia mínima en la medición de los motores paso a paso, ya sea parte de la correa por estar una más tensa que la otra o algún otro aspecto. Aún así, ambos errores obtenidos son muy pequeños y favorables.

3.3.3 Estudio de la distancia analítica en el eje XY

Anteriormente, se realizó el estudio de la distancia analítica tanto en el eje X como en el eje Y por separado, pero sería interesante y fundamental el estudio de dicha distancia en ambos ejes simultáneamente, es decir, hacer un análisis de rectas diagonales que contengan coordenadas en ambos ejes. El resultado de este análisis será crucial y podrá permitir reafirmar la resolución favorable que se comentó en subapartados anteriores.

El estudio se ejecutará de la misma manera que los anteriores, se realizarán rectas diagonales cuyas dimensiones en el eje X e Y serán equivalentes a las realizadas en los dos estudios anteriores. A continuación, se muestran las tablas 3.7-3.9 de los resultados de las distancias obtenidas tanto para los dos ejes de coordenadas X e Y como para la distancia en diagonal. Finalmente, a estos resultados se les ha calculado el error relativo y se analizan en las figuras posteriores.

Ender 3 PRO	F (500)	F (2000)	F (4000)	F (7000)	F (10000)	F (12000)
Xref (mm)	Dist Anal Coord X (mm)					
10	10,03	9,99	9,99	9,97	9,98	9,97
20	19,96	19,95	19,99	19,97	19,97	19,97
30	30,05	29,95	29,95	29,95	29,96	29,96
40	39,98	39,97	39,97	39,96	39,97	39,97
50	49,92	49,98	49,98	49,97	49,97	49,97
60	60,03	59,98	59,98	59,97	59,97	59,97
70	70,04	69,95	69,95	69,96	69,96	69,95
80	79,99	79,97	79,97	79,97	79,97	79,96
90	89,93	89,98	89,98	89,97	89,97	89,97
100	100,03	99,98	99,98	99,97	99,96	99,96
110	110,03	109,95	109,94	109,96	109,95	109,96
120	119,99	119,97	119,97	119,97	119,97	119,97
130	129,93	129,98	129,97	129,97	129,97	129,97
140	140,03	139,98	139,97	139,97	139,97	139,97
150	150,03	149,95	149,96	149,95	149,96	149,97
160	159,98	159,97	159,97	159,98	159,97	159,97
170	169,94	169,98	169,96	169,97	169,97	169,97
180	179,99	179,98	179,97	179,97	179,97	179,97
190	190,02	189,95	189,96	189,96	189,95	189,96
200	199,98	199,97	199,97	199,96	199,97	199,97

210	209,93	209,98	209,97	209,97	209,97	209,97
220	219,99	219,98	219,98	219,97	219,97	219,96

Tabla 3.7 Resultados de la distancia analítica para la coordenada X

Ender 3 PRO	F (500)	F (2000)	F (4000)	F (7000)	F (10000)	F (12000)
Yref (mm)	Dist Anal Coord Y (mm)					
10	10,01	10,00	10,02	10,03	10,04	9,99
20	20,02	20,03	20,02	20,02	20,02	20,03
30	30,02	29,98	29,98	30,00	30,00	30,01
40	40,02	40,02	40,02	40,02	40,02	40,04
50	50,02	50,01	50,03	50,02	50,02	50,03
60	60,03	60,01	60,02	60,02	60,02	60,03
70	70,03	69,99	69,99	69,99	70,00	70,00
80	80,03	80,01	80,02	80,03	80,03	80,03
90	90,02	90,02	90,02	90,03	90,03	90,03
100	100,04	100,01	100,02	100,03	100,02	99,99
110	110,01	109,99	109,99	110,01	109,99	109,97
120	120,00	120,03	120,03	120,04	120,04	120,04
130	129,99	130,02	130,02	130,03	130,03	130,03
140	140,00	140,02	140,02	140,02	140,03	139,99
150	150,01	149,99	149,99	150,01	150,01	149,97
160	160,00	160,02	160,03	160,03	160,03	160,02
170	169,99	170,02	170,03	170,03	170,03	170,03
180	180,01	180,02	180,03	180,03	180,03	180,03
190	190,01	189,99	190,01	190,01	189,96	190,01
200	200,00	200,02	200,03	200,04	199,99	200,03
210	209,99	210,02	210,03	210,03	209,99	210,03
220	219,95	219,97	219,98	219,98	219,98	219,98

Tabla 3.8 Resultados de la distancia analítica para la coordenada Y

Ender 3 PRO	F (500)	F (2000)	F (4000)	F (7000)	F (10000)	F (12000)
XYref (mm)	Recta Diagonal XY (mm)					
14,14	14,17	14,14	14,15	14,14	14,16	14,11
28,28	28,27	28,27	28,29	28,28	28,28	28,28
42,43	42,48	42,38	42,38	42,39	42,40	42,41
56,57	56,57	56,56	56,56	56,56	56,56	56,58
70,71	70,67	70,70	70,72	70,70	70,70	70,71
84,85	84,89	84,85	84,85	84,85	84,85	84,85
98,99	99,04	98,95	98,95	98,96	98,97	98,96
113,14	113,15	113,12	113,13	113,14	113,14	113,13
127,28	127,24	127,28	127,28	127,28	127,28	127,28
141,42	141,47	141,41	141,42	141,42	141,41	141,39
155,56	155,59	155,52	155,51	155,54	155,52	155,52
169,71	169,70	169,71	169,71	169,71	169,71	169,71
183,85	183,79	183,85	183,84	183,85	183,85	183,85
197,99	198,01	197,99	197,98	197,98	197,99	197,96
212,13	212,16	212,09	212,10	212,10	212,11	212,09
226,27	226,26	226,27	226,27	226,28	226,27	226,27
240,42	240,37	240,42	240,41	240,42	240,42	240,42
254,56	254,56	254,56	254,56	254,56	254,56	254,56
268,70	268,72	268,66	268,68	268,68	268,64	268,68
282,84	282,83	282,84	282,84	282,84	282,82	282,84
296,98	296,93	296,98	296,98	296,98	296,96	296,98
311,13	311,09	311,09	311,10	311,09	311,09	311,09

Tabla 3.9 Resultados de la distancia analítica para la recta diagonal XY

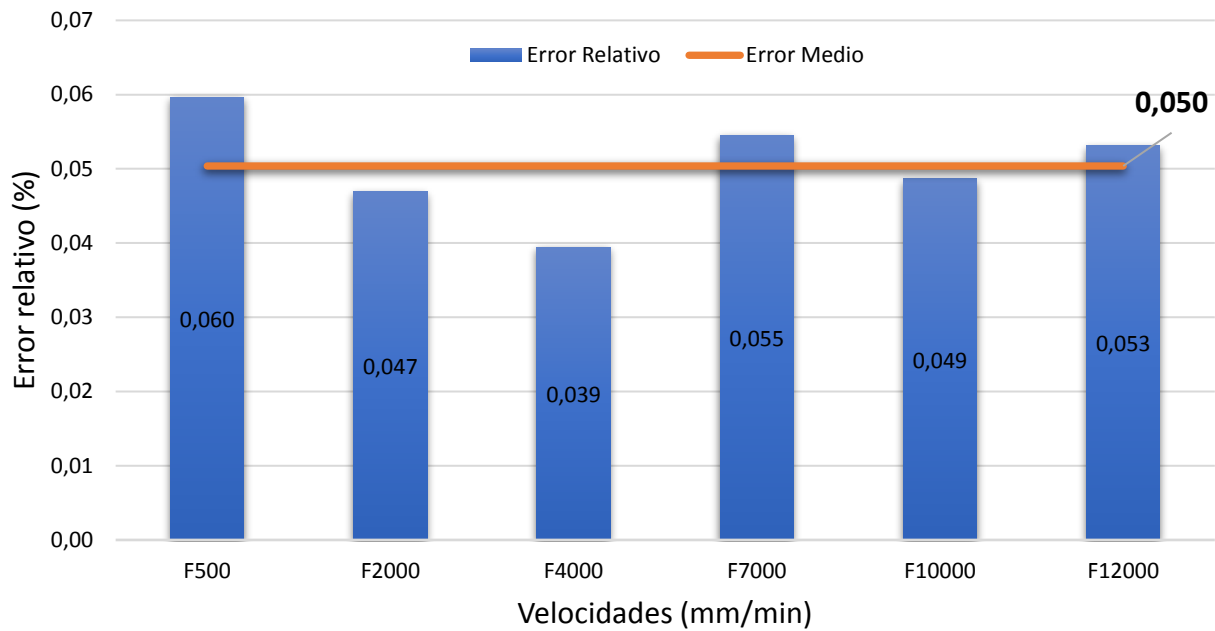


Figura 3.14. Representación de los errores relativos para la coordenada en el eje X

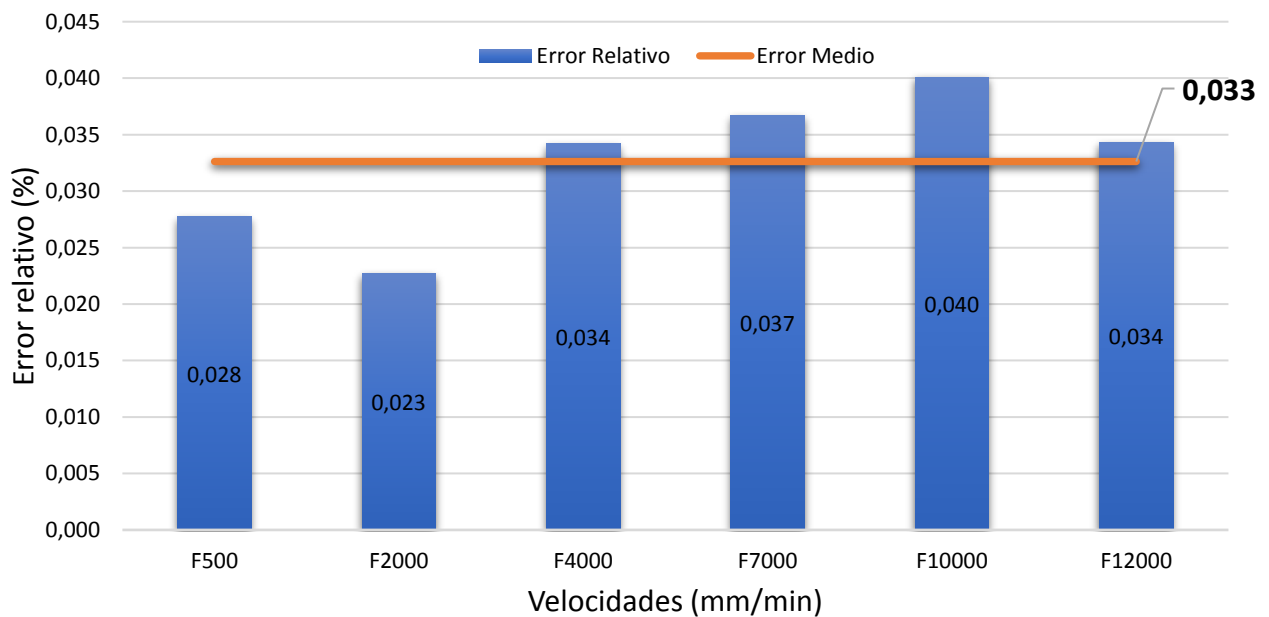


Figura 3.15. Representación de los errores relativos para la coordenada en el eje Y

Como se puede observar en las figuras 3.14 y 3.15, los errores relativos medios obtenidos tanto para el eje X como para el eje Y son 0.05% y 0.033% respectivamente. Valores numéricos de errores muy pequeños que a priori hacen indicar que el resultado final obtenido es positivo.

En la figura 3.16, se representa el error relativo al obtener la recta diagonal cuyo valor medio es de 0.018%, error muy pequeño y como se comentó anteriormente hace

indicar que los datos obtenidos son precisos. Para la velocidad de F500 el valor del error está por encima de la media debido a que a distancias pequeñas como por ejemplo la diagonal de 14.14 mm el resultado analítico obtenido es de 14.17mm y al ser en términos numéricos unos valores de distancias pequeñas el error cometido es más alto que para distancias superiores 240.42.

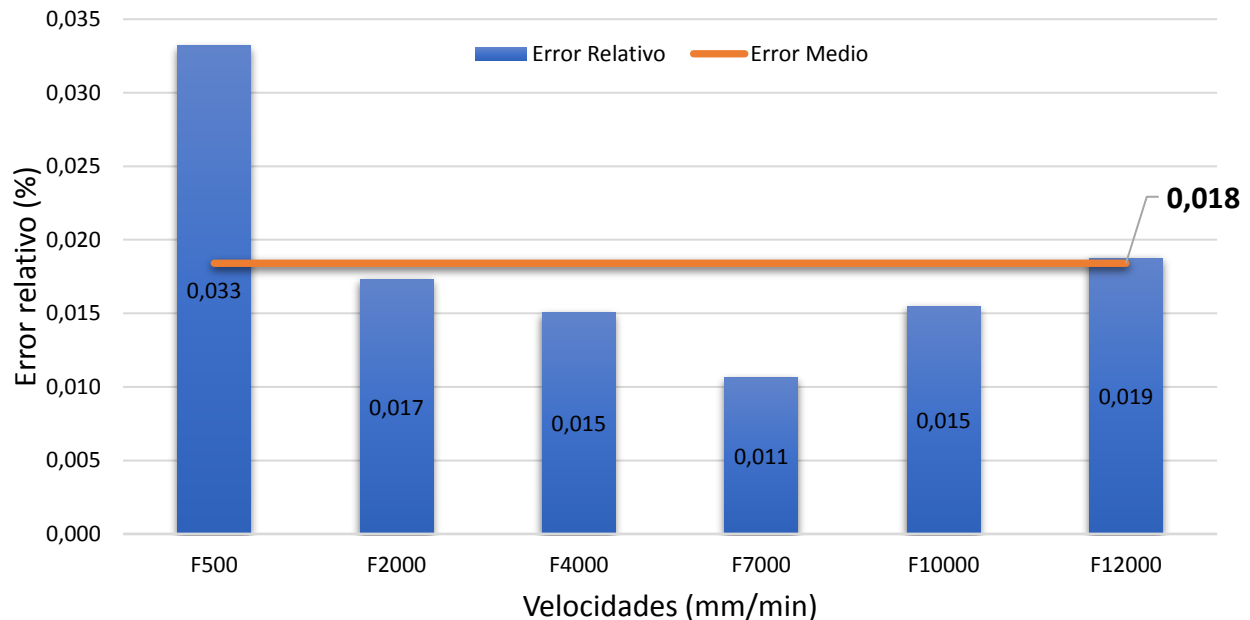


Figura 3.16. Representación de los errores relativos para la recta diagonal XY

Por tanto, una vez analizado los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados se puede afirmar que el sistema de medida desarrollado proporciona medidas fiables en cuanto a la posición y corrobora una buena sincronización entre el control teórico y la trayectoria real (al menos en tramos rectos)

3.3.4 Conclusiones

Las principales conclusiones que se obtienen de este apartado son las siguientes:

- ✓ Los valores obtenidos del ensayo experimental para el eje X han sido precisos, cometiendo un error de 0.057%. Así pues, la técnica utilizada para la medición ha resultado ser positiva. Además, se obtuvo el valor de la pendiente de la recta que coincidía con la multiplicación de la distancia del paso de la correa con el número de dientes del engranaje.
- ✓ Los valores obtenidos de manera analítica para el eje X también han sido precisos, cometiendo un error de 0.08%.

- ✓ Para el eje Y, no se acometió el análisis experimental debido a que no era viable la técnica de medición pero se obtuvo un error de 0.022% respecto a la estimación analítica, por tanto, al obtener un resultado bastante preciso no era necesario realizar dicho estudio experimental.
- ✓ Por último, el estudio realizado para el movimiento simultáneo de los ejes también ha sido positivo, obteniendo unos errores muy pequeños al igual que para los casos del movimiento individual de los ejes.

3.4 Análisis de los valores de velocidad alcanzados para los ejes X e Y en el movimiento independiente y en el movimiento simultáneo

En el apartado 3.1, se realizó el estudio de los valores máximos de velocidad alcanzados tanto para el eje X como para el eje Y recorriendo una distancia máxima de 220 mm donde el movimiento de éstos era de manera independiente, es decir, se tomaron los valores durante el movimiento individual de cada uno de los motores que componen el eje X e Y. En el análisis actual, el estudio se realizará de igual manera pero para distintas distancias de recorrido con el objetivo de estudiar el comportamiento de la velocidad máxima ante esta situación. Además, al igual que se ha realizado el estudio de la distancia analítica para el eje XY, movimiento simultáneo de los dos motores, se realizará el análisis de la velocidad para dicho caso también.

Dicho lo anterior, en primer lugar, se ejecutará el análisis de la velocidad en los ejes X e Y por separado para observar el comportamiento de la velocidad cuando se le programa distintas distancias de recorrido. Y finalmente, se realizará el mismo análisis para los datos obtenidos a partir del movimiento simultáneo de los ejes XY.

3.4.1 Análisis de los valores de velocidad para el eje X

En la figura 3.17, se observa el comportamiento de la velocidad máxima que se alcanza para cada distancia programada. Se analiza que, a medida que la velocidad va aumentando necesita más distancia de recorrido para alcanzar la velocidad máxima teórica impuesta en la programación. Se puede ver como para una velocidad alta de 12000 mm/min le cuesta alcanzar dicha velocidad teórica para distancias de recorrido pequeñas, **por lo que se deduce que no hace falta aplicarle a una distancia pequeña una velocidad demasiado alta ya que no se va a poder alcanzar experimentalmente.** De la gráfica también podemos obtener qué velocidad

es idónea para programar una cierta distancia de recorrido con la seguridad de que la velocidad va a ser posible de alcanzar.

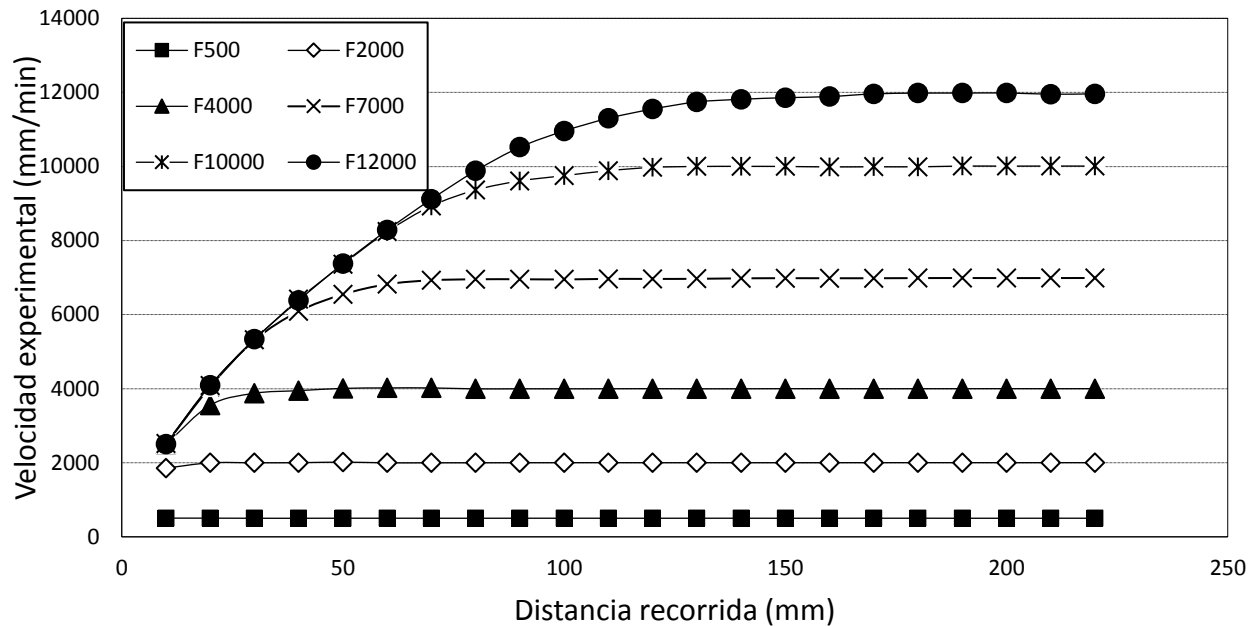


Figura 3.17. Comportamiento de la velocidad a distintas distancias recorridas durante el movimiento individual del eje X

En la figura 3.18, se observa en términos numéricos lo comentado en la gráfica anterior. Se puede analizar cómo para una velocidad pequeña el error medio respecto a la velocidad programada cometido de todas las distancias recorridas es menor que para una velocidad más alta, donde no es posible alcanzar la velocidad teórica. Para la velocidad más alta de 12000 mm/min se comete el mayor error debido a que necesita un mayor recorrido para alcanzar la velocidad teórica.

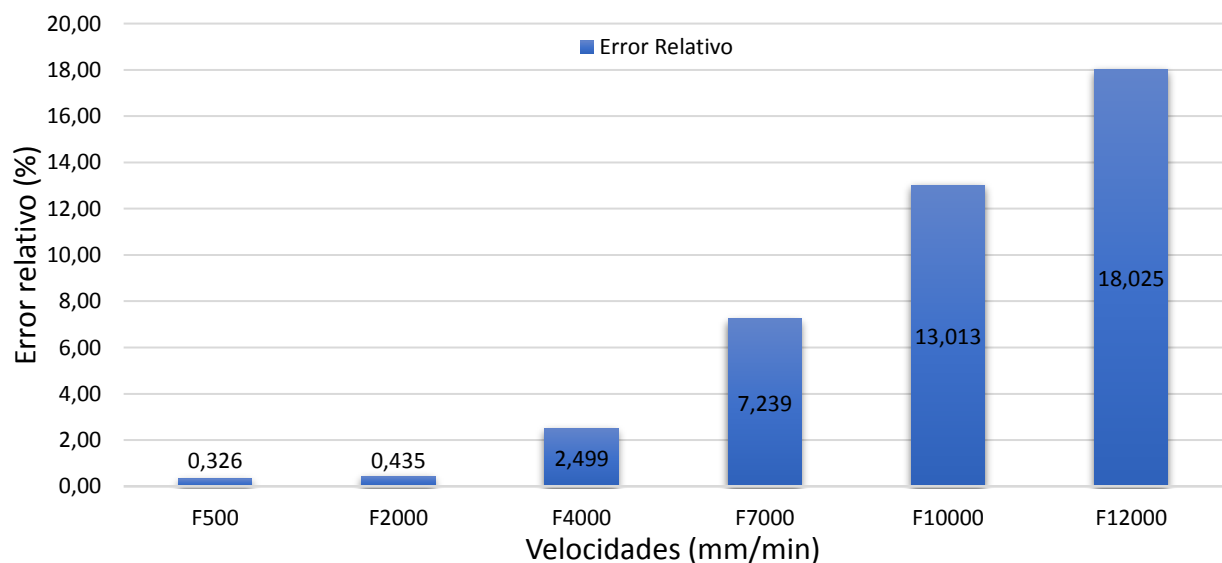


Figura 3.18. Representación de los errores relativos de las velocidades a distintas distancias recorridas durante el movimiento individual del eje X

3.4.2 Análisis de los valores de velocidad para el eje Y

En este caso se realiza el análisis para el eje Y al igual que para el caso del eje X, donde se puede observar en las gráficas 3.19 y 3.20 que los resultados obtenidos son idénticos que para el caso del eje X, por lo que se deduce que los datos obtenidos son correctos, ya que el comportamiento tanto del eje X como del eje Y debe ser el mismo al utilizar el mismo motor paso a paso.

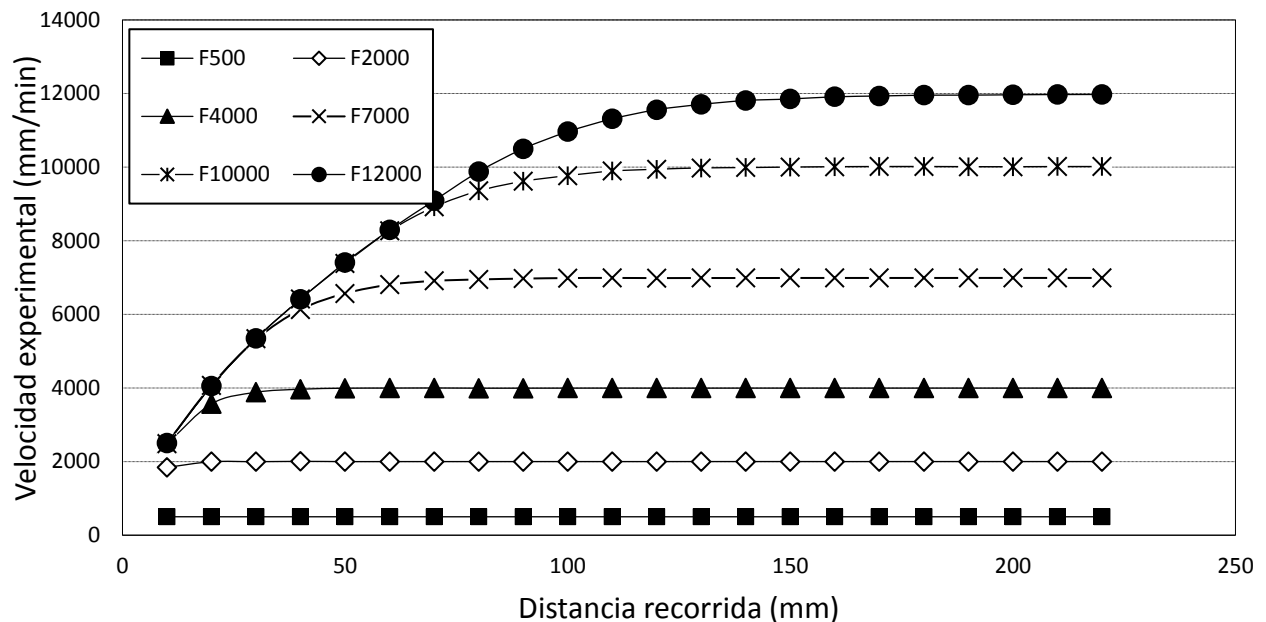


Figura 3.19. Comportamiento de la velocidad a distintas distancias recorridas durante el movimiento individual del eje Y

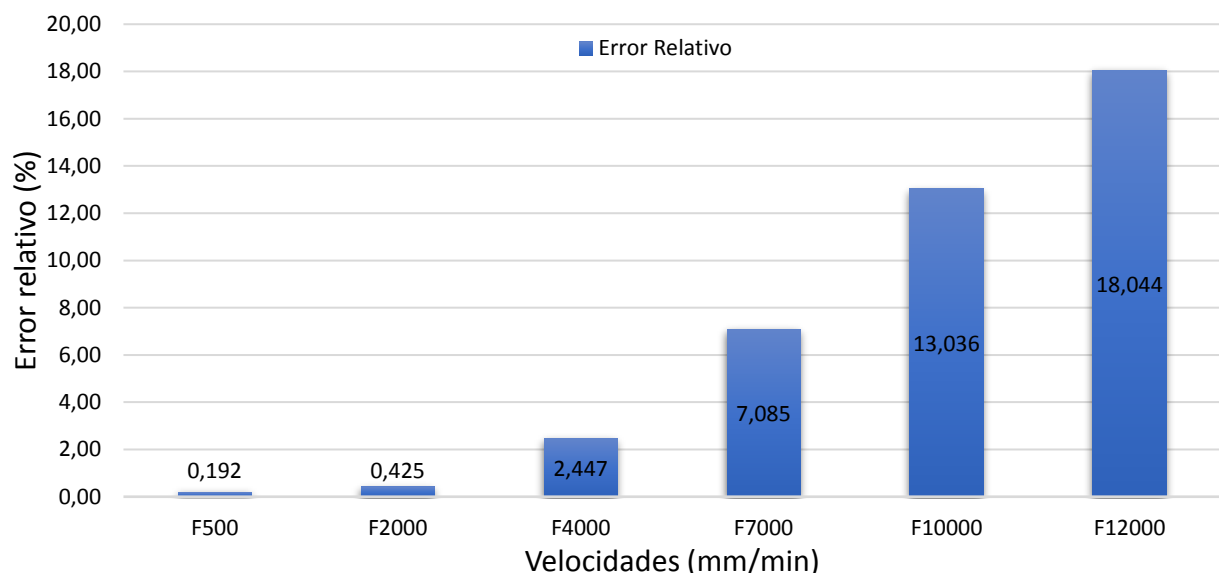


Figura 3.20. Representación de los errores relativos de las velocidades a distintas distancias recorridas durante el movimiento individual del eje Y

3.4.3 Análisis de los valores de velocidad para el eje XY

Una vez realizado el análisis por separado tanto del eje X como del Y durante el movimiento independiente de los motores, es conveniente hacer dicho análisis para el movimiento simultáneo ya que la velocidad programada para la trayectoria es la misma. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente gráfica.

En la figura 3.21, se observa el comportamiento de la velocidad obtenida para las distintas distancias en el eje XY. El comportamiento se puede ver que es el mismo que en los casos anteriores, donde aumenta la velocidad máxima a medida que la distancia recorrida es mayor. Se pueden ver diferencias en los valores obtenidos de la velocidad respecto al movimiento independiente, y es que para algunos casos de distancia de recorrido donde en el movimiento independiente no alcanzaba la velocidad máxima y, por lo tanto, ésta se quedaba por debajo, para el caso del movimiento simultáneo hay algunos casos donde si se alcanza la velocidad máxima programada y en los casos donde no se alcanza, se obtienen unos valores mayores de velocidad que para el mismo caso pero en el movimiento independiente. Esto es lógico ya que la trayectoria realizada no es la misma al realizarse de manera diagonal.

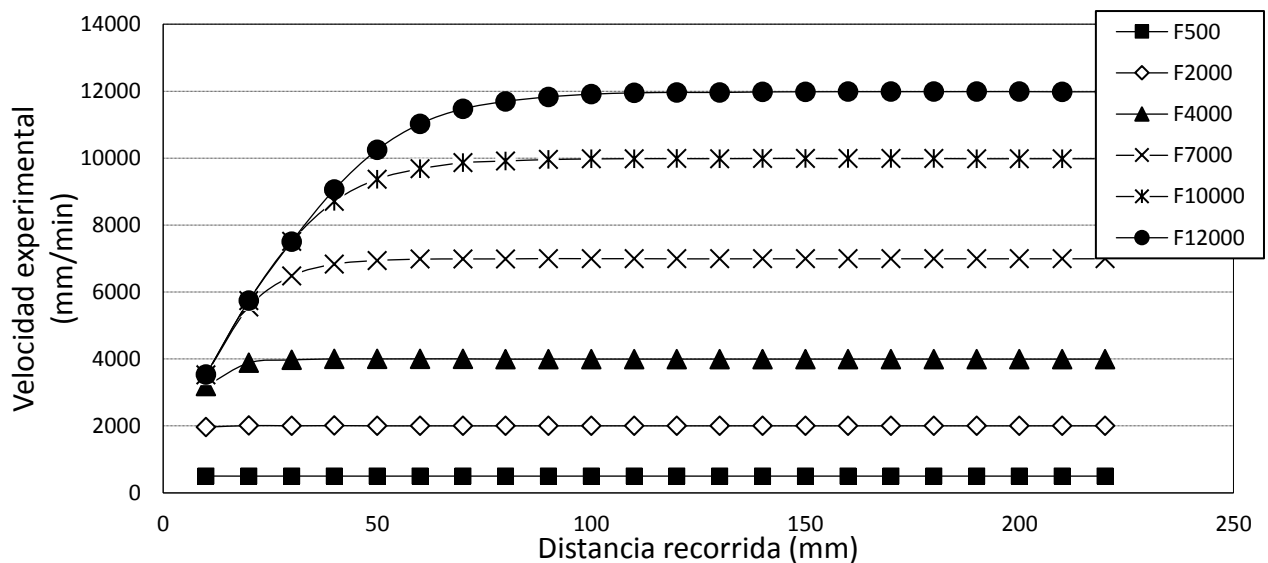


Figura 3.21. Comportamiento de la velocidad a distintas distancias recorridas durante el movimiento simultáneo en el eje XY

3.4.4 Conclusiones

- ✓ Los análisis de velocidad realizados para el eje X e Y durante el movimiento independiente de cada uno de los motores hace indicar que los datos obtenidos son muy precisos y positivos sin cometer error alguno en las medidas.

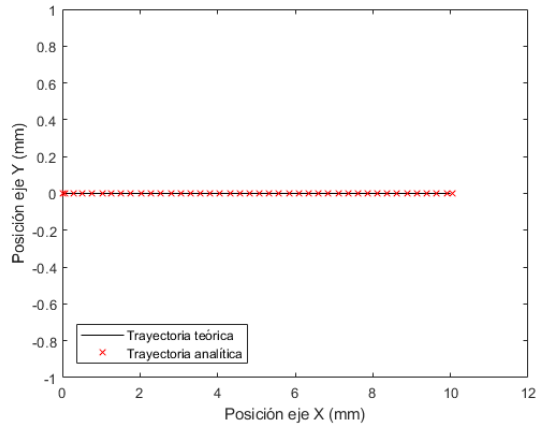
- ✓ El comportamiento de la velocidad en ambos casos (eje X e Y) es muy lógico y aceptable.
- ✓ En cuanto al análisis del eje XY, movimiento simultáneo de los motores, el comportamiento de la velocidad es idéntico que para los dos casos analizados anteriores por separado, por tanto, se puede afirmar que la impresora realiza el movimiento correcto y a la velocidad programada impuesta.

3.5 Comportamiento de los perfiles de posición (P), velocidad (V) y aceleración (A)

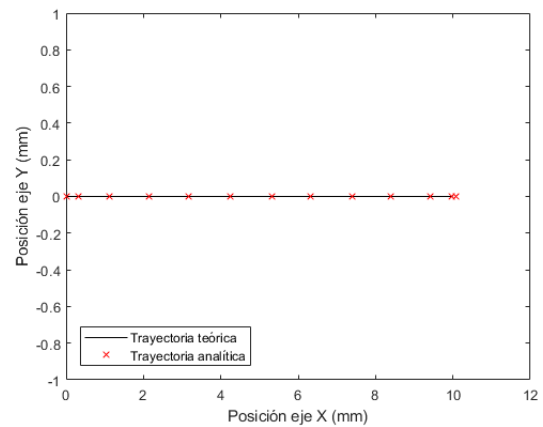
En los apartados anteriores se realizó un análisis de las medidas obtenidas tanto de la posición como de la velocidad y se representaron en distintos gráficos los valores máximos obtenidos de ambas magnitudes en función de la velocidad de programación y de la distancia máxima recorrida. A continuación, el aspecto que se abordará será el de la representación de los perfiles de posición, velocidad así como el de la aceleración de los datos que se obtuvieron en algunos de los ensayos realizados anteriormente. El principal objetivo de esta representación será el de analizar los distintos gráficos para observar el comportamiento de las distintas magnitudes en el transcurso del movimiento. Además, en los perfiles que sean posibles se realizará una comparación con otros perfiles teóricos, analíticos o experimentales para verificar si el comportamiento de los perfiles obtenidos es correcto o no.

En los siguientes subapartados se presentan distintos casos donde se analizará lo descrito anteriormente. El primer caso a analizar tiene una distancia de recorrido de 10 mm en el eje X, el segundo caso tendrá una distancia de recorrido de 100 mm en el mismo eje. A continuación, se evaluarán las mismas distancias de 10 y 100 mm pero en este caso en el eje XY, donde va a conllevar el movimiento simultáneo de ambos motores en dichos ejes de coordenadas.

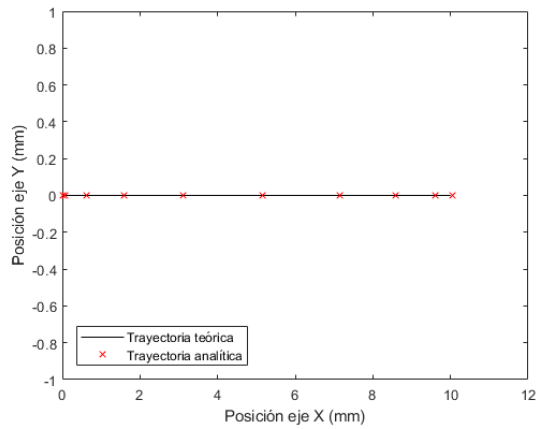
3.5.1 Representación de los perfiles de P,V y A para una distancia de 10 mm en el eje X



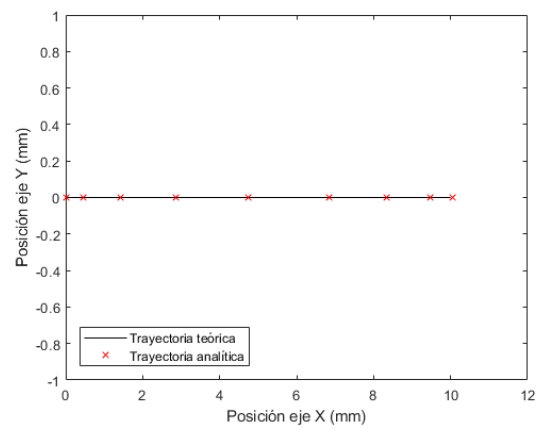
(a)



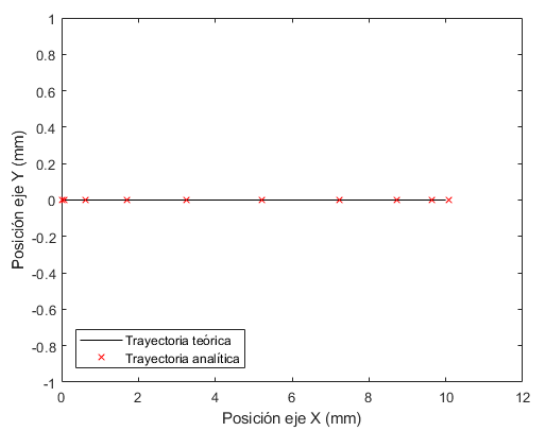
(b)



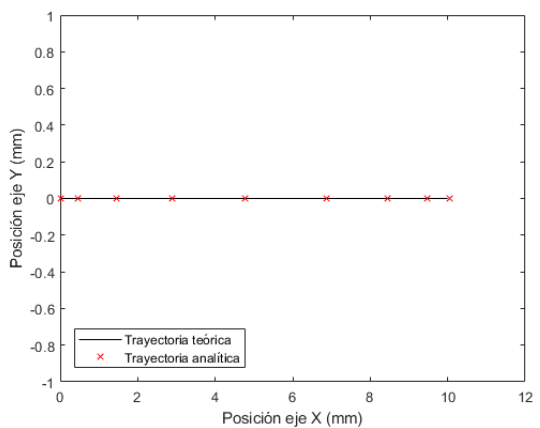
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.22. Perfil de posición teórico/analítico en el eje X para una distancia de 10 mm utilizando distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min

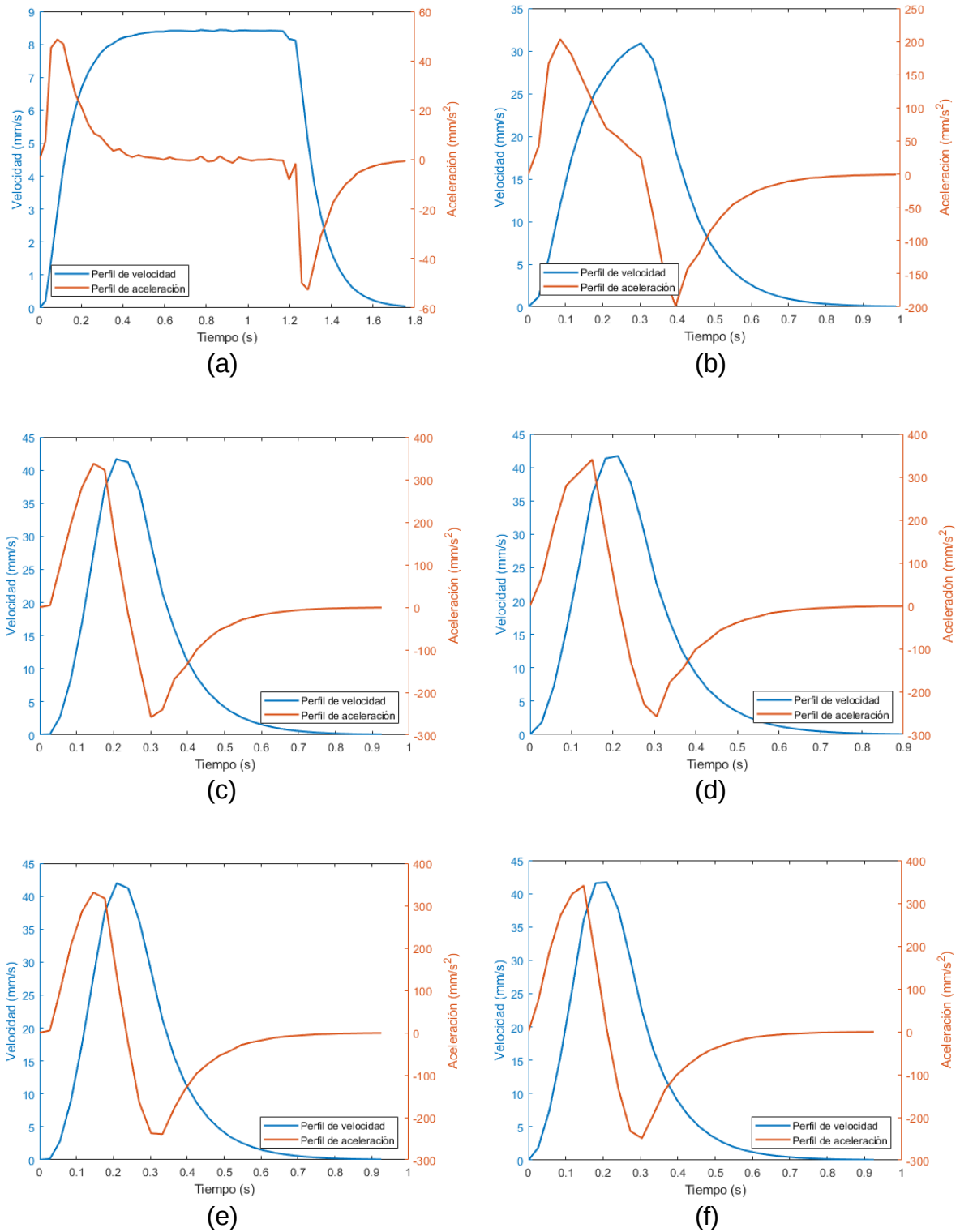


Figura 3.23. Perfil de velocidad y aceleración experimental en el eje X para una distancia de 10 mm utilizando distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min

En las figuras 3.22 y 3.23 se presentan los distintos gráficos obtenidos de las variables que se analizarán, posición, velocidad y aceleración, para las distintas velocidades de programación utilizadas.

La primera variable a analizar es la posición, como se puede observar en la figura 3.22, los perfiles de posición tanto teóricos como analíticos coinciden perfectamente en los distintos casos de velocidades de programación utilizadas. Se puede destacar como al aumentar la velocidad de programación se obtienen menos puntos analíticos al tener una velocidad mayor, por tanto, el tiempo de procesado es menor y se obtienen menos puntos.

En la figura 3.23, perfil de velocidad, se puede ver el comportamiento de la velocidad a medida que aumenta la velocidad de programación. A velocidades pequeñas hay una velocidad constante que indica que la velocidad máxima ha sido alcanzada. A velocidades más altas no se puede alcanzar dicha zona constante ya que el tiempo de movimiento es menor.

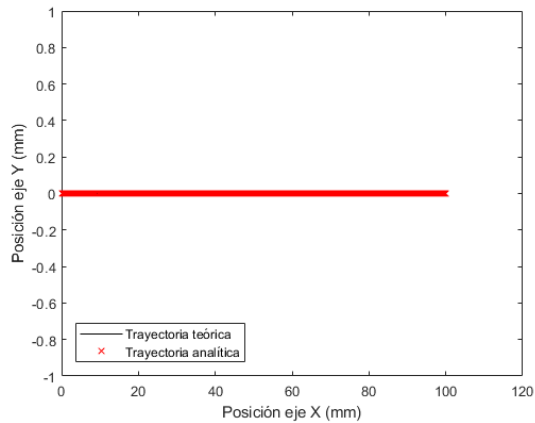
En la figura 3.23, perfil de aceleración, se analiza el comportamiento que tiene la aceleración que coincide como es lógico con las zonas a destacar de los perfiles de velocidad. En dichas gráficas se observan como solo hay dos zonas de aceleración y desaceleración que coinciden con las zonas donde la velocidad aumenta positivamente y donde disminuye su valor hasta 0. También cabe descartar los puntos donde la aceleración es prácticamente cero que coincide al tener una zona constante de velocidad.

3.5.2 Representación de los perfiles de P,V y A para una distancia de 100 mm en el eje X

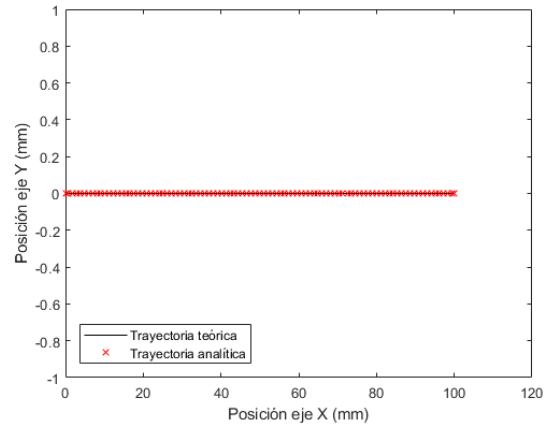
En este caso las gráficas obtenidas, figura 24 y 25, son para una distancia de recorrido de 100 mm a distintas velocidades de programación al igual que para el caso de 10 mm de distancia recorrida.

Los resultados obtenidos son similares que para el caso analizado anteriormente. Se observa como en el perfil de posición coinciden tanto el perfil teórico como el analítico y que se obtienen menos puntos analíticos cuando aumenta la velocidad de programación.

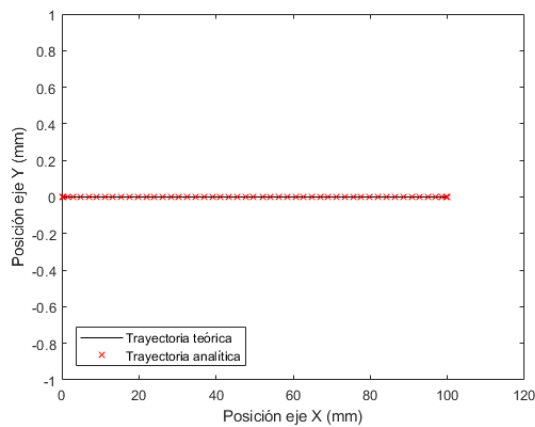
Para los casos de la velocidad y de la aceleración, los resultados obtenidos son similares aumentando el valor máximo de velocidad y aceleración en algunos casos al disponer de una distancia de recorrido mayor, aún así el comportamiento de ambas magnitudes es semejante al caso de una distancia recorrida menor por lo cual los datos obtenidos son representativos y precisos.



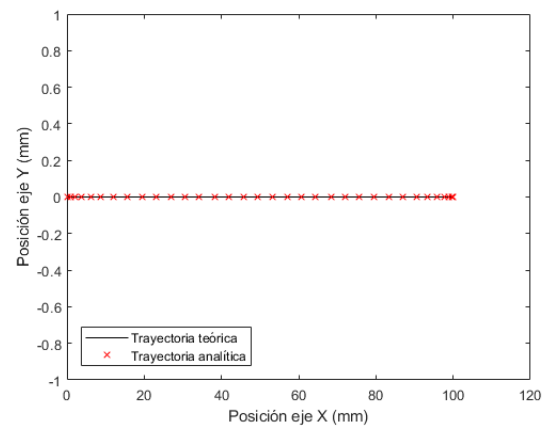
(a)



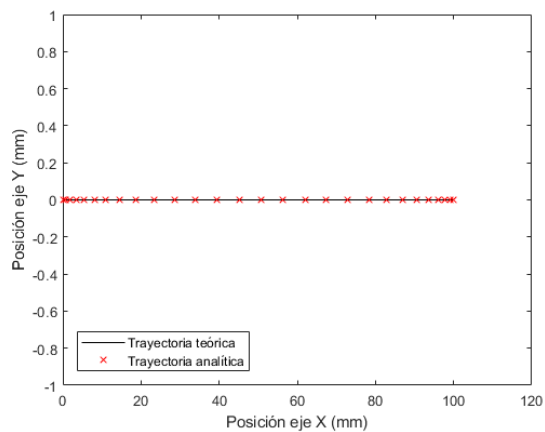
(b)



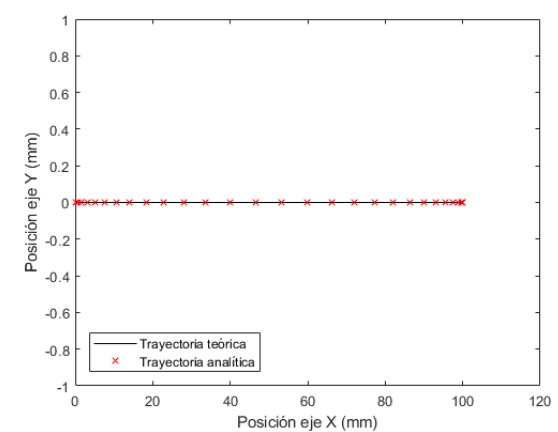
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.24. Perfil de posición teórico/analítico en el eje X para una distancia de 100 mm utilizando distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min

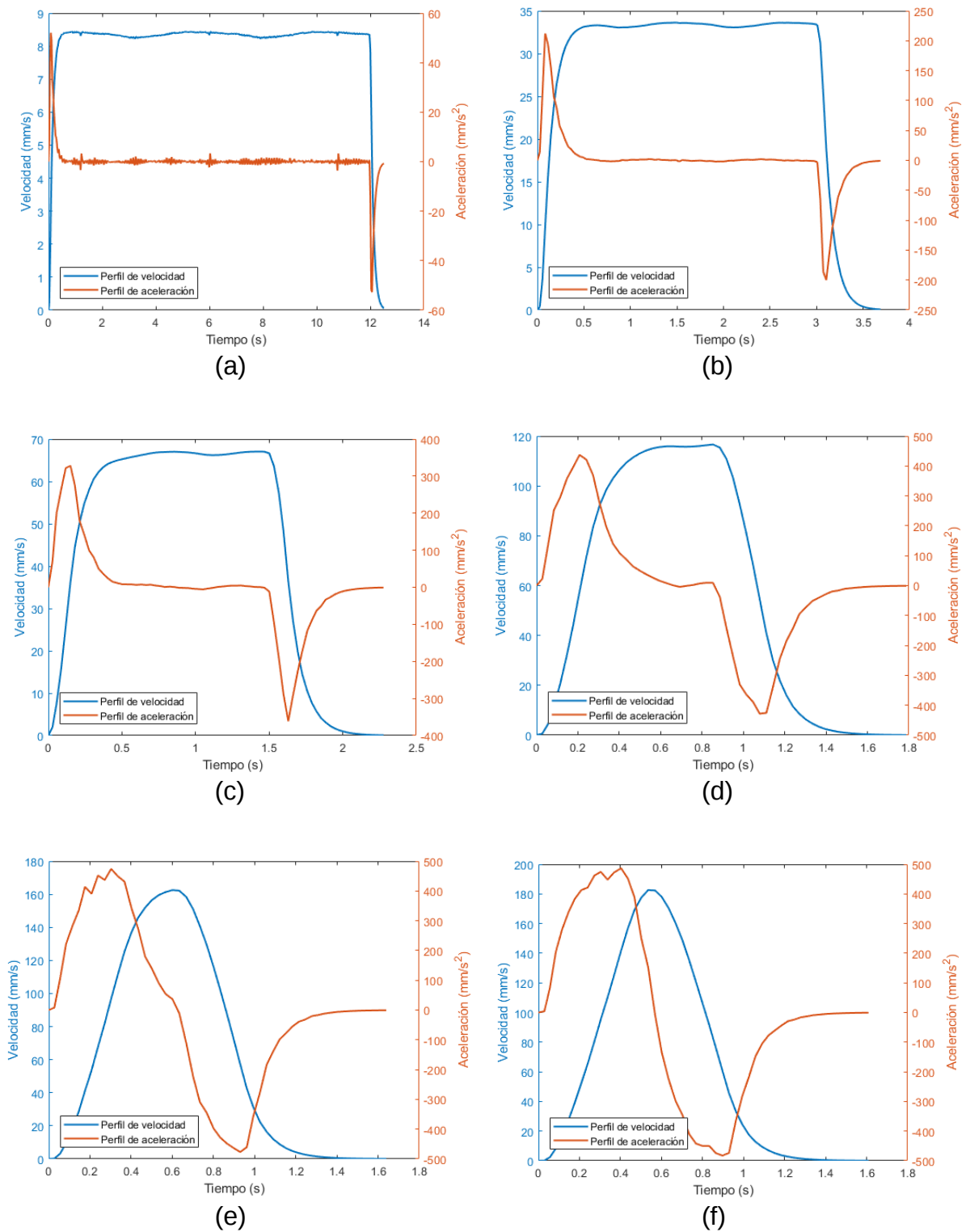
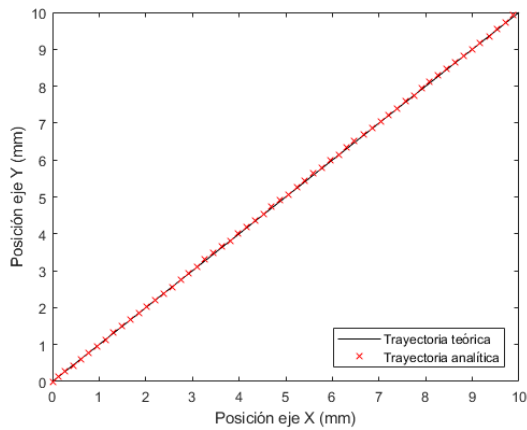
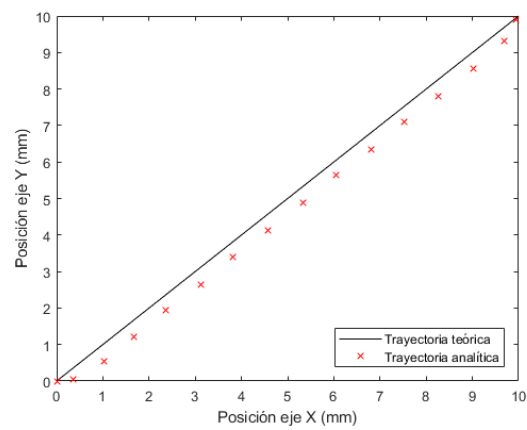


Figura 3.25. Perfil de velocidad y aceleración experimental en el eje X para una distancia de 100 mm utilizando distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min

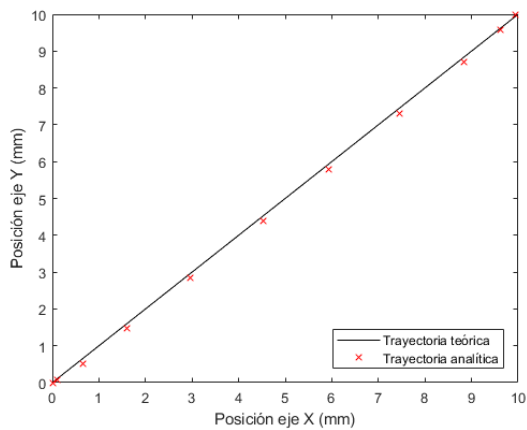
3.5.3 Representación de los perfiles de P,V y A para una distancia de 10 mm en el eje XY



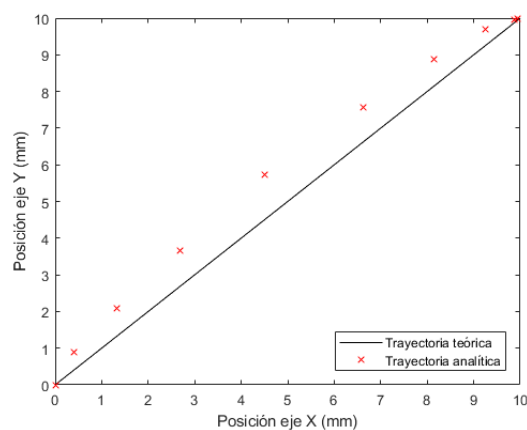
(a)



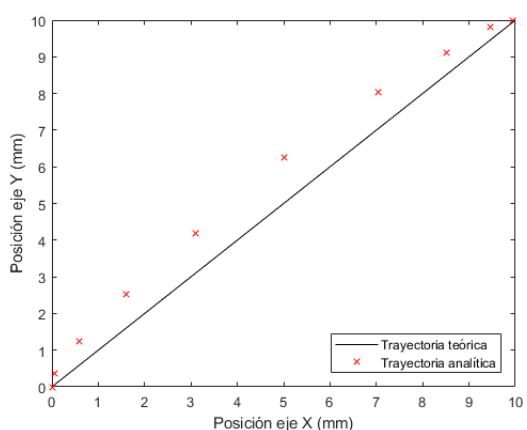
(b)



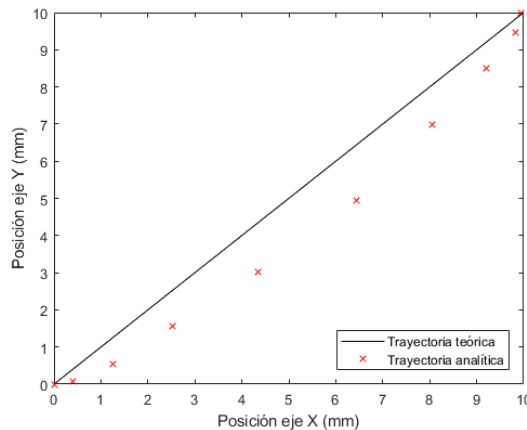
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.26. Perfil de posición teórico/analítico en el eje XY para una distancia de 10 mm utilizando distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min

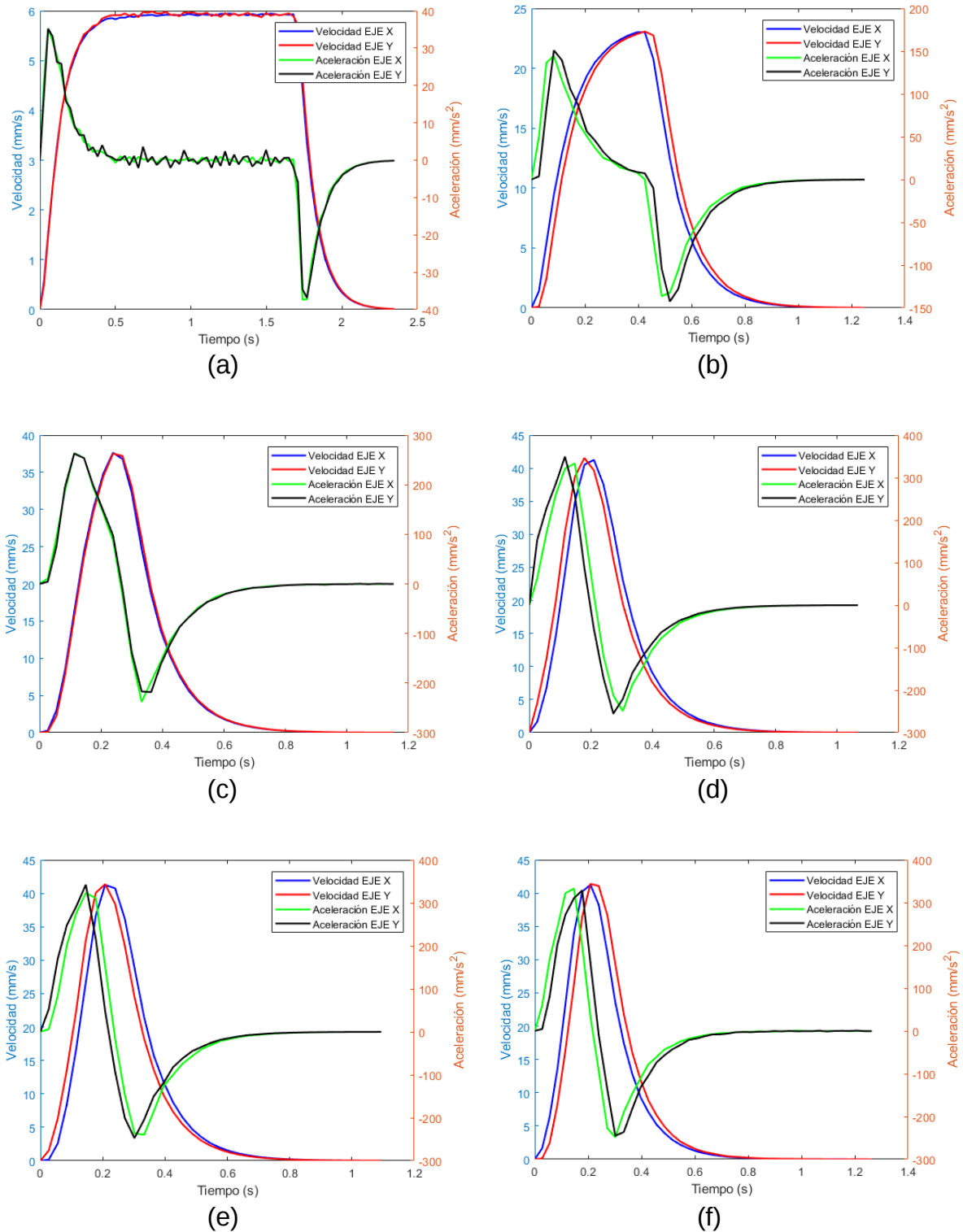


Figura 3.27. Perfil de velocidad y aceleración experimental en el eje XY para una distancia de 10 mm utilizando distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min

En los dos casos anteriores se analizaron las variables para el movimiento en un único eje, así pues en este caso los resultados se han obtenido del movimiento

simultáneo de ambos ejes para una distancia de recorrido de 10 mm en ambos ejes y se observa en un primer momento que el perfil de posición ya no coincide teórica y analíticamente entre sí a medida que la velocidad de programación va aumentando. Dicha diferencia puede ser lógica y deberse a que a una distancia de recorrido pequeña no se le puede aplicar una velocidad tan alta ya que podría provocar inestabilidad que es lo que indican los datos obtenidos analíticamente y por lo tanto no hay una coordinación entre ambos motores paso a paso durante el movimiento que se ejecuta.

En las siguientes gráficas, perfil de velocidad y aceleración, se puede observar lo comentado anteriormente respecto al perfil de posición. Se han representado en una misma gráfica tanto el perfil del eje X como el del eje Y, ya que al realizar a priori el mismo movimiento deberían coincidir pero analizando dichas gráficas se puede ver de manera más directa el error de coordinación entre ambos motores. A medida que la velocidad de programación va aumentando los perfiles del eje X e Y ya no coinciden tanto en la velocidad como en la aceleración indicando la inestabilidad durante el movimiento a una velocidad alta en el recorrido de una distancia pequeña.

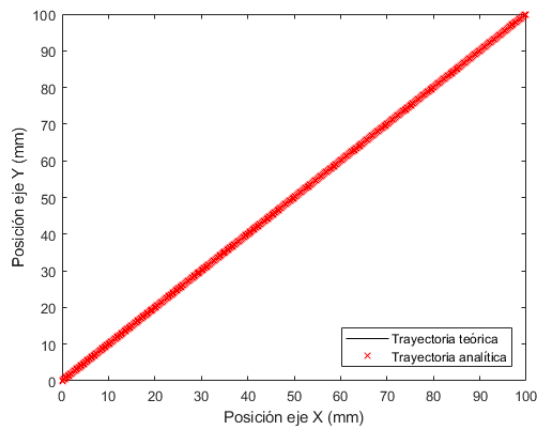
3.5.4 Representación de los perfiles de P,V y A para una distancia de 100 mm en el eje XY

Por último, de manera análoga pero para una distancia de recorrido mayor, 100 mm en cada eje, se realiza el mismo ensayo para poder comparar los resultados con el ensayo de una distancia 10 mm en el movimiento simultáneo de los motores.

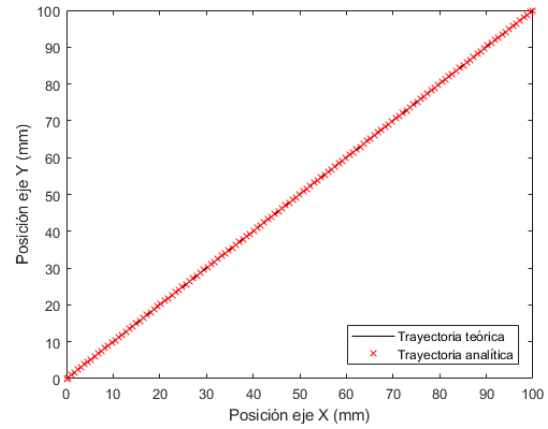
Con respecto al perfil de posición, ya se pueden ver diferencias con el caso anterior, se observa como ahora no hay tanta disparidad entre las gráficas teóricas y analíticas debido a que la distancia de recorrido es mayor y a dicha distancia si se le puede aplicar una velocidad de programación mayores que para una distancia menor. Aún así, el perfil analítico en ciertas velocidades altas no se ajusta exactamente al perfil teórico debido a la inestabilidad provocada por una velocidad alta como se comentó en casos anteriores.

En relación con la velocidad y la aceleración ocurre exactamente lo mismo que con el perfil de posición, se observa como a velocidades altas no hay una coincidencia exacta entre los perfiles obtenidos para el eje X e Y. Aún así, al ser la distancia de

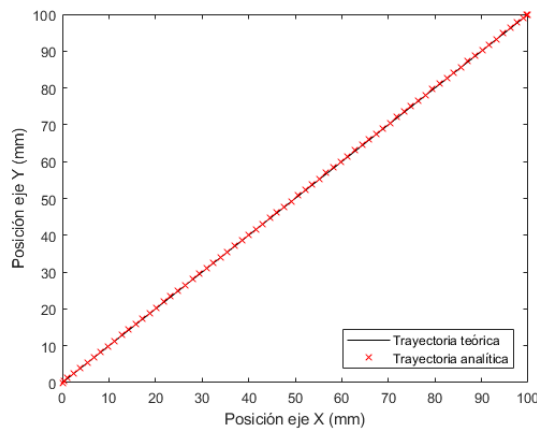
recorrido mayor hay más coincidencias entre ambos ejes a ciertas velocidades donde para una distancia de 10 mm no había coincidencia.



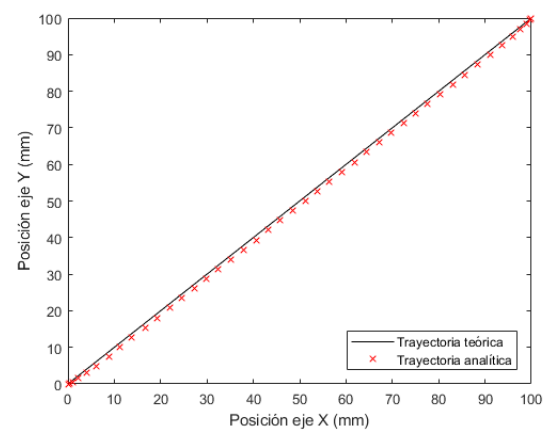
(a)



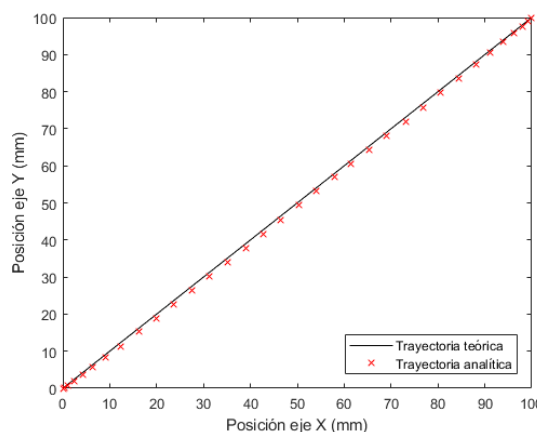
(b)



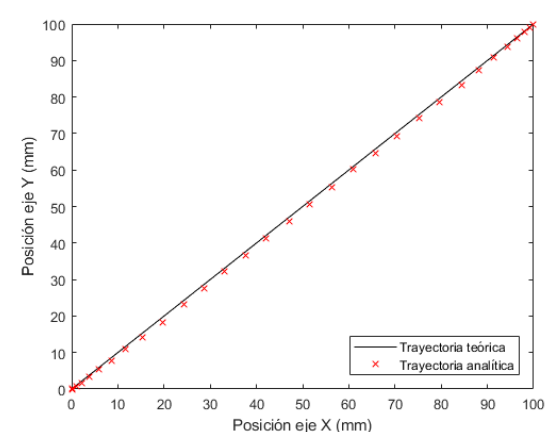
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.28. Perfil de posición teórico/analítico en el eje XY para una distancia de 100 mm utilizando distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min

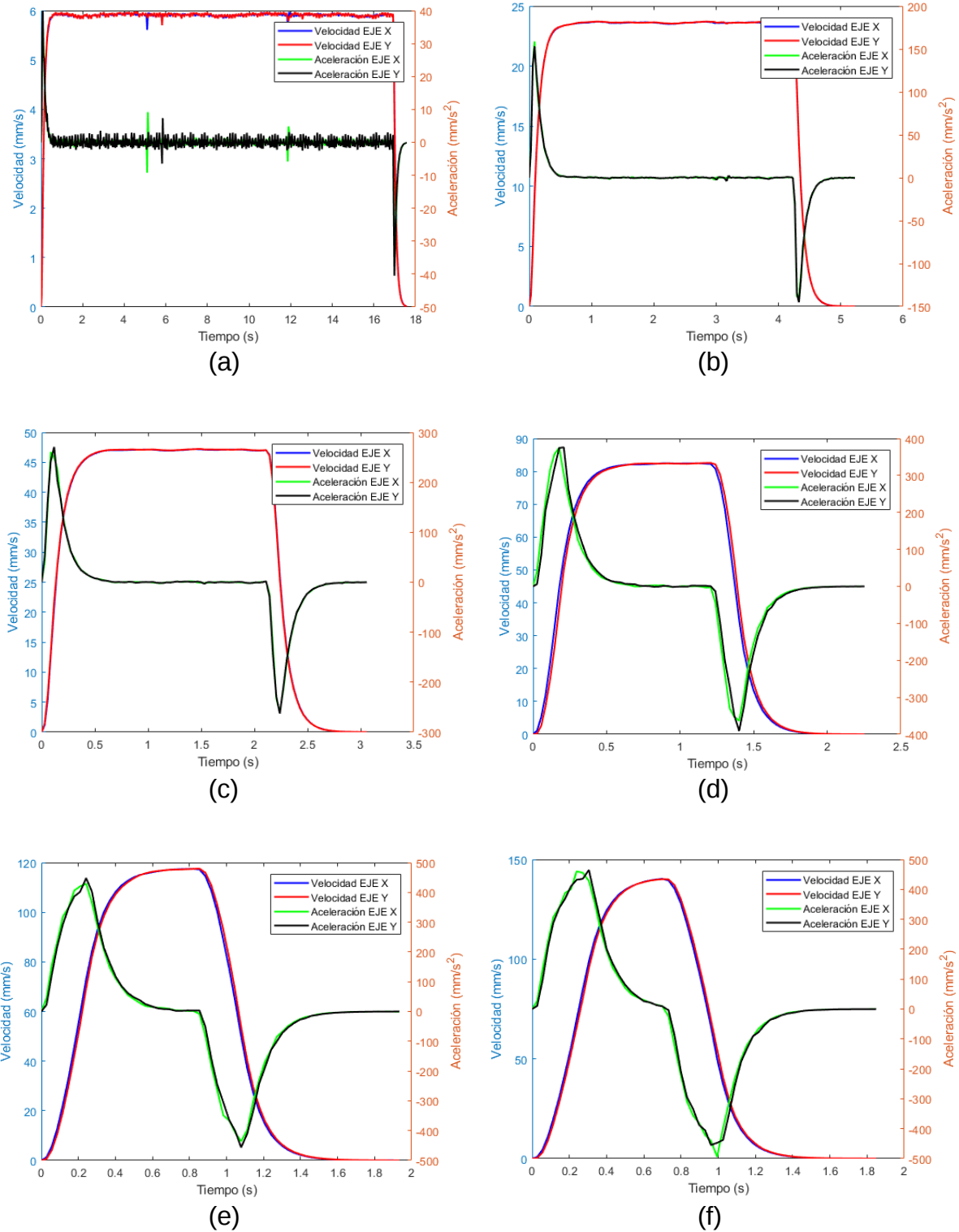


Figura 3.29. Perfil de velocidad y aceleración experimental en el eje XY para una distancia de 100 mm utilizando distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min

3.5.5 Aspectos importantes a tener en cuenta de los perfiles obtenidos

En los anteriores análisis llevados a cabo se analizó el comportamiento de los perfiles en las distintas magnitudes estudiadas pero hay ciertos aspectos de los perfiles obtenidos que hay que tener en cuenta y que hacen indicar un buen funcionamiento de los motores paso a paso empleados.

En relación con el perfil de velocidad, hay un aspecto importante a destacar que es la reducción de la velocidad en los instantes donde se va a alcanzar una velocidad constante. En la figura 3.30 se puede ver dicho aspecto en dos situaciones. En primer lugar cuando hay un aumento de la velocidad, se puede observar como la velocidad aumenta progresivamente de manera rápida pero en el instante donde se está cerca de alcanzar una velocidad constante hay una reducción del aumento de la velocidad lo que produce una curva que indica el comienzo de una zona constante de velocidad. Otra situación donde se puede observar este aspecto importante es cuando finaliza el movimiento y hay una reducción de la velocidad hasta llegar al valor de velocidad 0 mm/s, donde en esta situación también se genera dicha curva de reducción de velocidad.

El aspecto comentado respecto al perfil de velocidad está ligado al perfil de aceleración. En la figura 3.31 se observa dicha situación. Se puede analizar como la reducción de la velocidad conlleva a una aceleración de 0 mm/s², lo que indica que se ha alcanzado la velocidad constante. Además, también se puede destacar de la figura 3.31 las zonas de aceleración y desaceleración correspondiente al aumento de la velocidad positivamente en el primer tramo de la gráfica y a la disminución del valor de la velocidad hasta llegar a 0 mm/s en el último tramo de la gráfica.

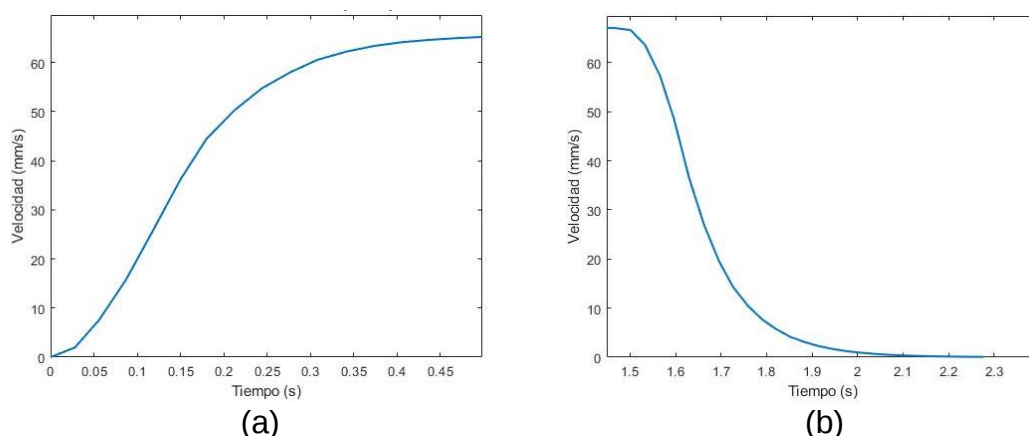


Figura 3.30 Curva de reducción de velocidad en (a) alcance de zona constante de velocidad máxima, (b) alcance del fin de movimiento (vel = 0)

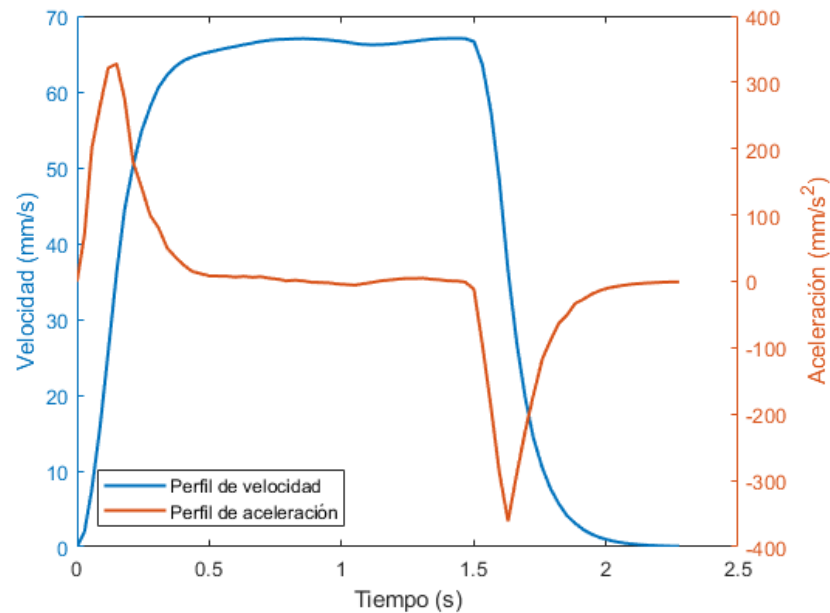


Figura 3.31 Comparación del perfil de velocidad y aceleración

3.5.6 Conclusiones

Las principales conclusiones obtenidas después de analizar los diversos perfiles obtenidos de distintas magnitudes y para distintos casos son:

- ✓ Con respecto al movimiento individual de los motores paso a paso se ha analizado como los datos obtenidos son representativos al coincidir tanto el perfil teórico como analítico de la distancia recorrida. Aunque se ha observado como no es necesario aplicarle a una distancia pequeña una velocidad tan alta que no será posible alcanzar.
- ✓ Con respecto al movimiento simultáneo de los motores paso a paso en los dos casos analizados se ha comprobado como a velocidades de programación altas en ciertas distancias de recorrido se produce inestabilidad en el movimiento de ambos motores, por lo cual se ha deducido que se trabaja mejor a velocidades menores para lograr el objetivo requerido.
- ✓ Por último, se ha realizado un análisis más exhaustivo de los perfiles obtenidos donde se ha descatalogado las zonas fundamentales de éstos que hacen indicar que el movimiento se ejecuta a la perfección. Por ejemplo, zonas de aceleración, desaceleración, etc.

4. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Este apartado conllevará el estudio de trayectorias no tan simples como las estudiadas anteriormente. Principalmente, el estudio está centrado en trayectorias curvas ejecutadas mediante el comando G01 del código G. A los datos obtenidos se les hallará tanto los perfiles de posición, velocidad como de aceleración en las distintas técnicas que sean posibles de obtener ya sean perfiles teóricos, analíticos o experimentales con el fin de comparar los distintos gráficos obtenidos y lograr unos resultados que permitan adquirir unas conclusiones importantes. Además, se emplearán distintas velocidades de movimiento con el fin de obtener una comparación más extensiva de los datos obtenidos.

4.1 Trayectoria sinusoidal en vacío

La trayectoria sinusoidal a realizar se presenta en la figura 4.1, donde las coordenadas de los puntos a ejecutar de la trayectoria se muestran en la tabla 4.1. La trayectoria se realizará primero en vacío con el fin de que los resultados obtenidos sean favorables para posteriormente realizar el mismo estudio de la trayectoria pero en este caso extruyendo material.

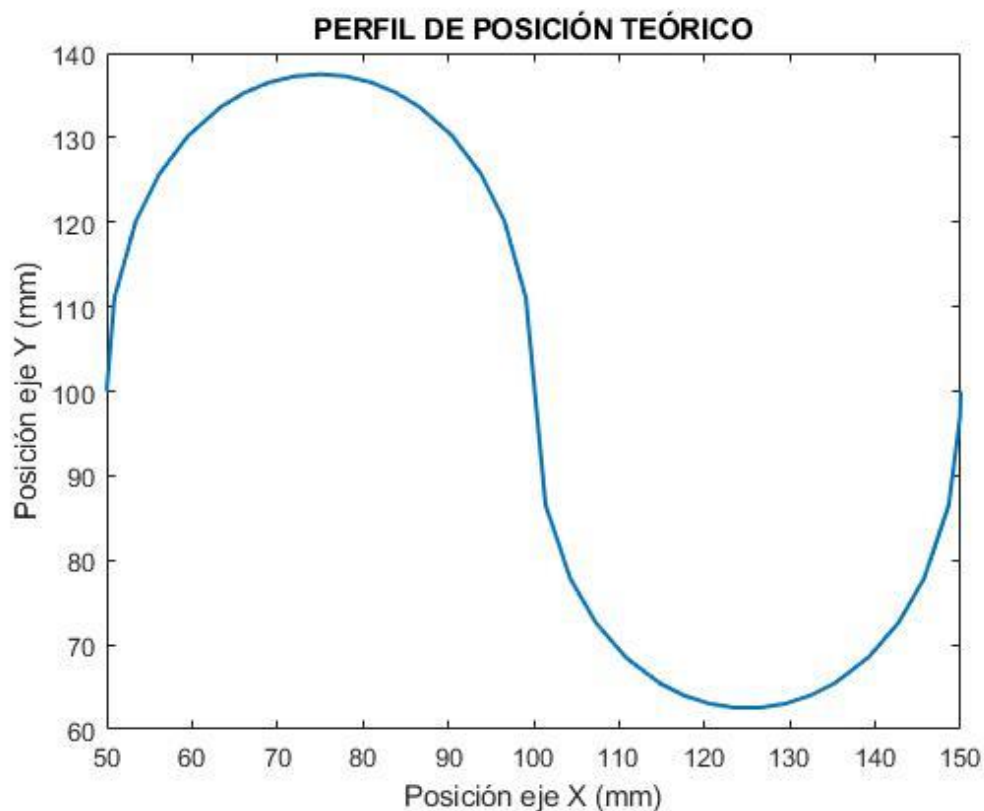


Figura 4.1. Trayectoria teórica a realizar

Trayectoria sinusoidal					
X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)
50	100	83,8272	135,34	120,5216	63,04
50,9088	111,04	86,5904	133,66	123,5008	62,56
53,4304	120,16	90,4352	130,24	126,4992	62,56
56,1952	125,74	93,8048	125,74	129,4784	63,04
59,5648	130,24	96,5696	120,16	132,4	64
63,4096	133,66	99,0912	111,04	135,2256	65,44
66,1728	135,34	101,4	86,5	139,2	68,5
69,0512	136,54	104,2768	77,86	142,7424	72,64
72,0064	137,26	107,2576	72,64	145,7232	77,86
75	137,5	110,8	68,5	148,6	86,5
77,9936	137,26	114,7744	65,44	149,9408	97,06
80,9488	136,54	117,6	64	150	100

Tabla 4.1 Coordenadas de la trayectoria sinusoidal a realizar

Las coordenadas de la tabla 4.1 han sido ejecutadas mediante el código G a través del software Pronterface, los datos leídos a través del encoder utilizado mediante Arduino han sido exportados tanto a Excel como a Matlab como ya se comentó al inicio de este trabajo. Los códigos de programación empleados en Arduino y Matlab para la obtención de los datos medidos a través del encoder así como la obtención de los perfiles de posición, velocidad y aceleración se detallan en mayor profundidad a continuación.

En el anexo 7.1.5 se muestra el código de programación necesario para la obtención del ángulo como de la velocidad actual medida en cada giro del eje de los motores paso a paso correspondientes a los ejes de coordenadas X e Y. La estructura de este código se detalla en la figura 4.2 y es análogo a la estructura que se presentó en el subapartado 2.2.4 *Ejemplo de código de programación*.

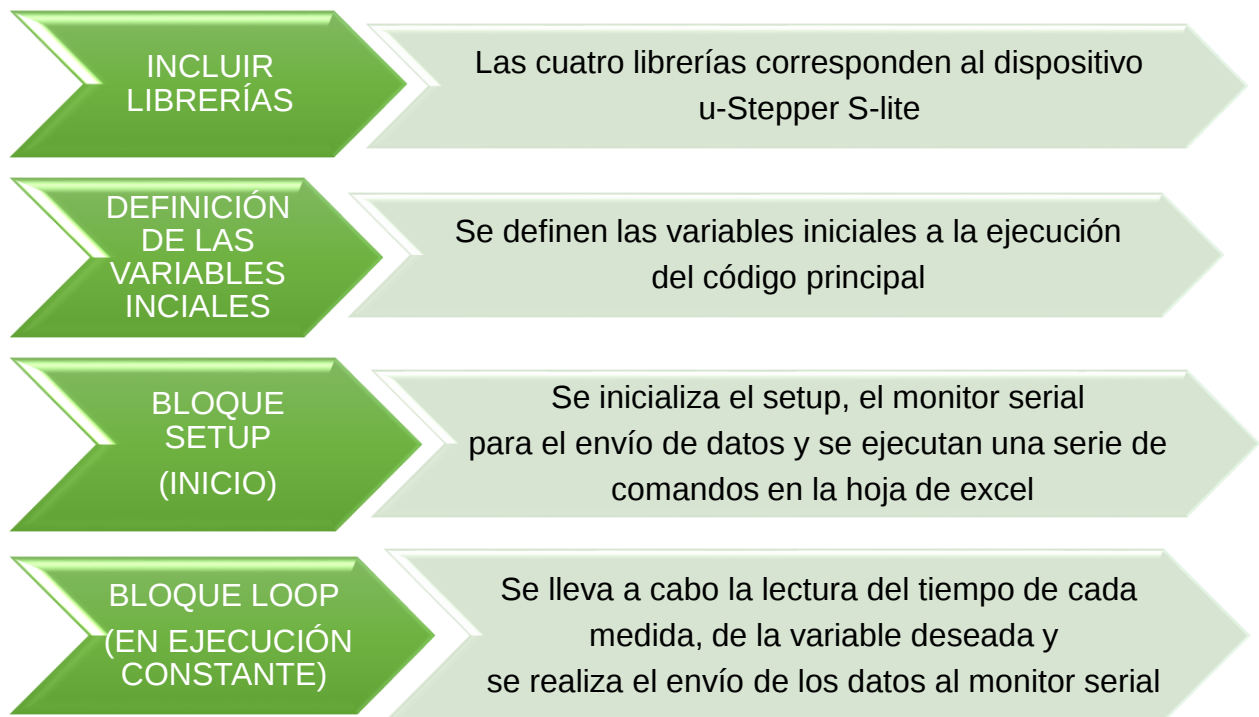


Figura 4.2. Estructura del código final para obtener el ángulo y la velocidad

Para llevar a cabo el procesamiento de los datos, obtenidos a través del código de programación presentado en el anexo correspondiente al apartado 7.1.5, se realiza un código de programación en el software Matlab a través del cual se realizará un correcto procesado de datos con el objetivo de obtener los perfiles de posición, velocidad y aceleración de la trayectoria realizada. La estructura del código de programación empleado para el procesado de los datos medidos a través del encoder se presenta en la figura 4.3, cuyo código de programación se muestra en el anexo 7.2.3.

Así pues, una vez detallada la estructura del código de programación para el procesado de los datos, se está en disposición de presentar los perfiles teóricos, analíticos y/o experimentales obtenidos para la trayectoria sinusoidal en vacío realizada a distintas velocidades de programación.



Figura 4.3. Estructura del código de programación para el procesamiento de los datos en vacío

4.1.1 Perfil de posición

En primer lugar, se presentarán los perfiles de posición teóricos comparados con los perfiles obtenidos analíticamente para las distintas velocidades. Como se puede observar en los perfiles de posición teóricos/analíticos, figura 4.4, la trayectoria analítica obtenida corresponde perfectamente con la trayectoria teórica que se presentó en la figura 4.1. Dicha coincidencia hace indicar que la impresora realiza correctamente la trayectoria que se le ha ordenado a ejecutar. Para todas las velocidades el resultado es preciso, salvo para la velocidad más alta de 12000 mm/min donde se puede observar que hay una ligera discrepancia en la ejecución de las curvas que puede deberse a una cierta inestabilidad en el movimiento de los motores

paso a paso al utilizar una velocidad tan alta como ya se observó en ensayos realizados anteriormente.

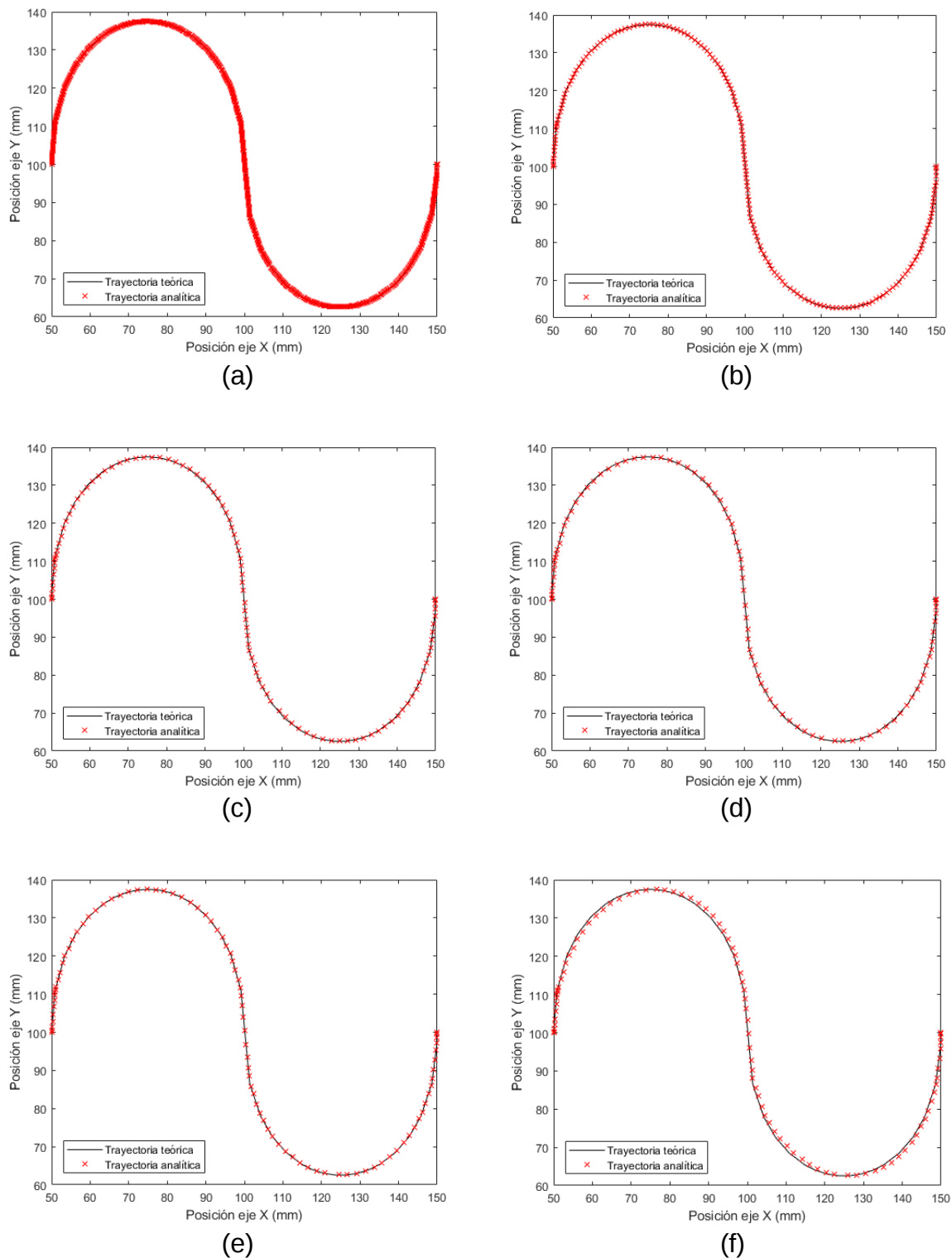


Figura 4.4. Perfil de posición teórico/analítico para las distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min

4.1.2 Perfil de velocidad

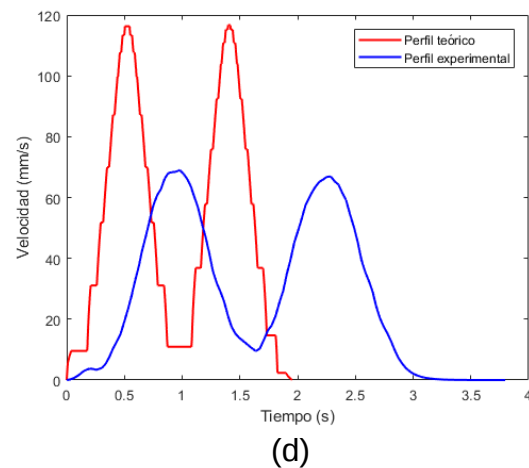
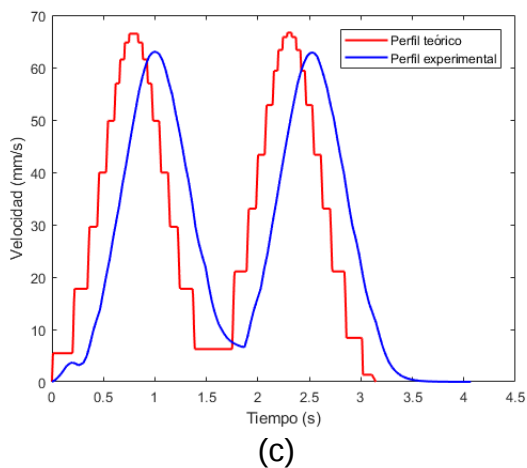
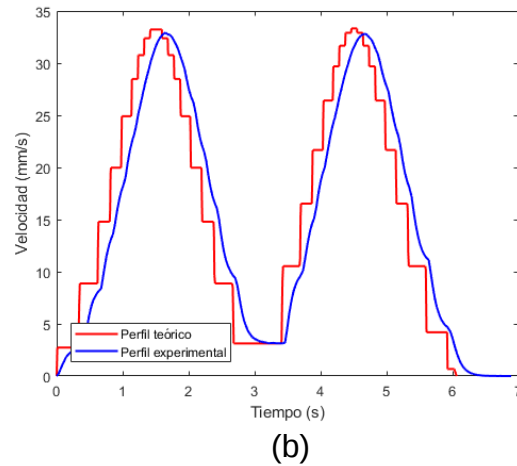
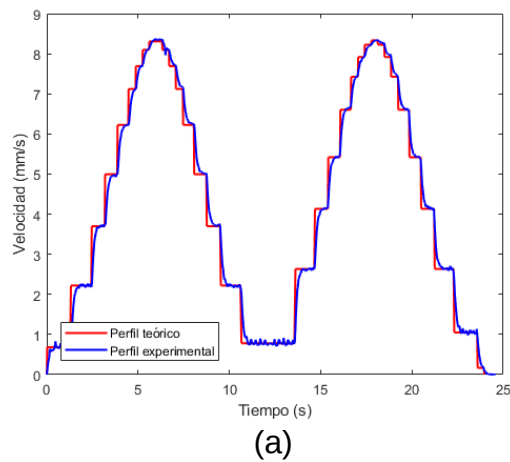
A continuación, se analizan los perfiles de velocidad teórico-experimentales obtenidos para las distintas velocidades de programación en función del tiempo en los dos ejes de coordenadas X e Y en las figuras 4.5 y 4.6, respectivamente.

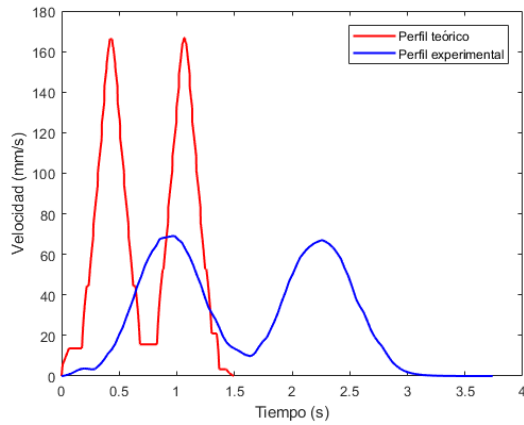
En el eje X se puede analizar como el valor de la velocidad va aumentando desde la velocidad programada de 500 a 7000 mm/min, momento en el que los valores medidos de la velocidad se mantienen al alcanzar la velocidad máxima de recorrido, por lo cual se observa que los perfiles de velocidad a partir de 7000 mm/min son exactamente idénticos. También se puede apreciar como la gráfica del perfil de velocidad tiene sentido con respecto a la trayectoria que se ha ejecutado, aumentando la velocidad en el eje X a medida que el eje X e Y aumentan positivamente la distancia y en el instante que el eje Y alcanza la distancia máxima y tiene que reducir ésta, la velocidad en el eje X hace lo propio y disminuye la velocidad hasta el punto donde el eje X e Y coinciden en el mismo valor de distancia, 100 mm. A partir de ahí el comportamiento de la velocidad es el mismo hasta terminar la trayectoria ya que la curva realizada es la misma que en el primer tramo en términos absolutos.

Analizando la comparación entre los perfiles teóricos y experimentales, se puede apreciar como para una velocidad de 500 mm/min ambas gráficas coinciden perfectamente debido a que ésta puede ser una velocidad idónea para el movimiento de ambos ejes de coordenadas. Sin embargo, a medida que la velocidad de movimiento va aumentando ambas gráficas ya presentan disparidad. Para los casos de una velocidad de 2000 y 4000 mm/min la forma de las gráficas es la misma pero hay una diferencia en el tiempo de procesado de la trayectoria, debido a la influencia de tener una velocidad mayor de movimiento. Para los siguientes casos donde la velocidad es mayor de 7000 mm/min, se puede ver como es imposible alcanzar la velocidad máxima teórica impuesta debido a las limitaciones de la impresora comentadas en casos anteriores, y por lo cual el tiempo de procesado también presenta grandes diferencias.

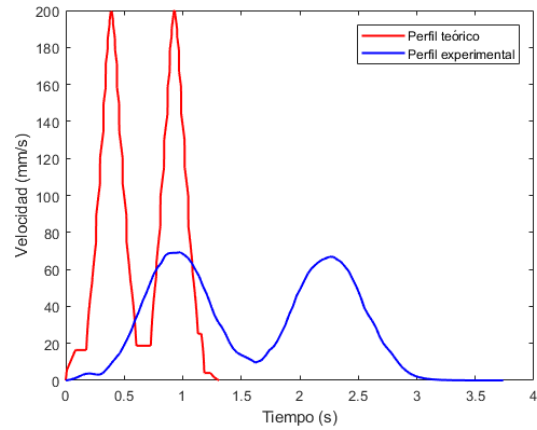
En el caso de los perfiles de velocidad para el eje Y, se ve un comportamiento prácticamente opuesto al del eje X, cuando la velocidad aumenta en el eje X disminuye en el eje Y y de manera inversa ocurre lo mismo. Alcanzados los valores máximos y

mínimos de velocidad en el eje Y en los instantes donde se alcanzan los valores mínimos y máximos de velocidad en el eje X, respectivamente, lo que indican que hay un cambio de trayectoria ya sea en sentido positivo o negativo de alguno de los dos ejes de coordenadas. Y como era lógico, al igual que ocurrió para el eje X, a partir de la velocidad programada de 7000 mm/min se mantiene constantes los valores de velocidad medidos por el encoder. Hay que destacar que a partir de una velocidad programada de 4000 mm/min los perfiles de velocidad en el eje Y presentan alguna discontinuidad en dichos perfiles que puede deberse a que la toma de datos se realiza a alta velocidad y no se obtienen demasiados datos para representar correctamente el perfil aunque para el caso del eje X este aspecto no ocurre. En este caso, la comparación de los perfiles teóricos y experimentales del perfil de velocidad para el eje Y presenta el mismo análisis que para el caso del eje X.



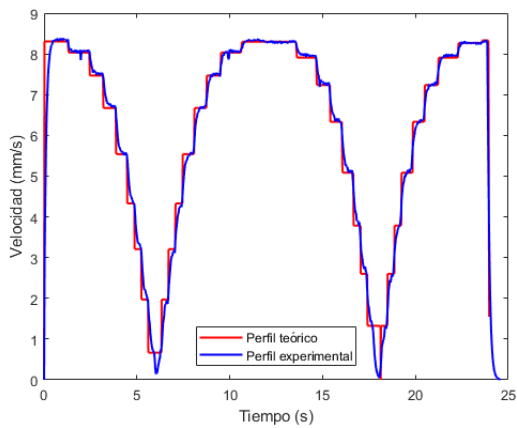


(e)

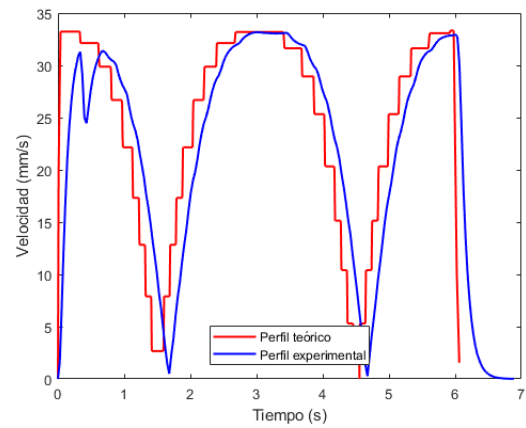


(f)

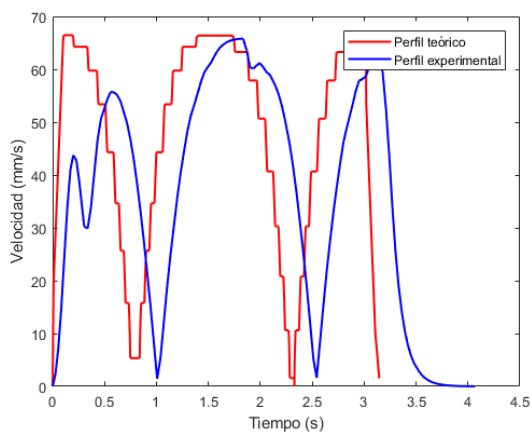
Figura 4.5. Perfil de velocidad teórico/experimental en el eje X para las distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min



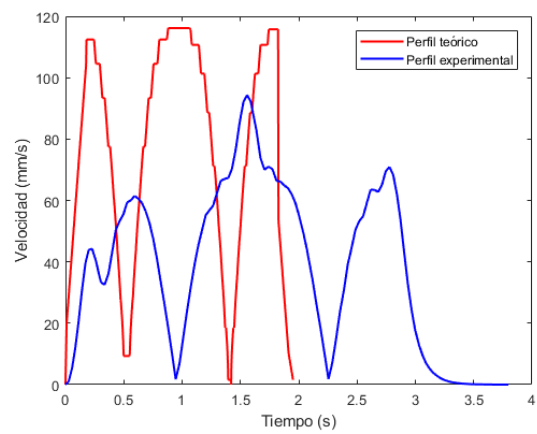
(a)



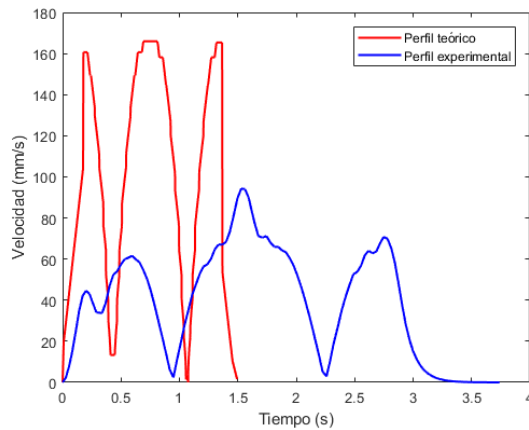
(b)



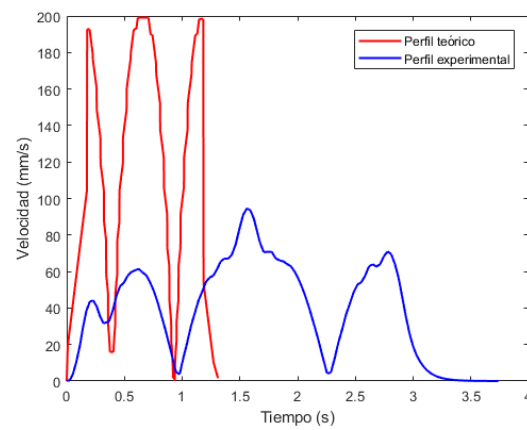
(c)



(d)



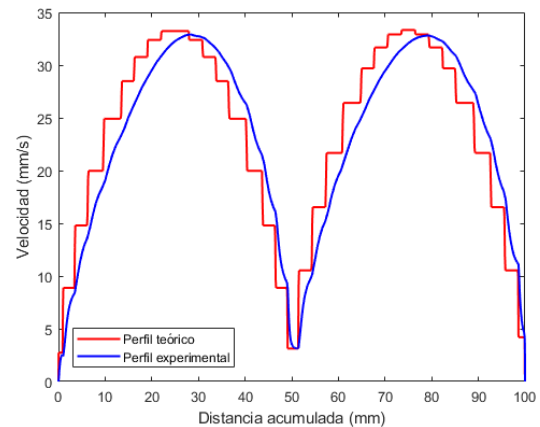
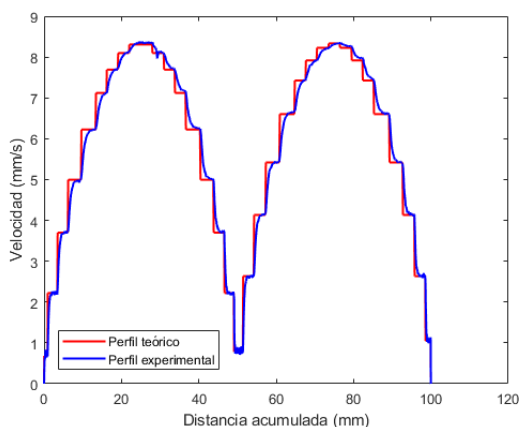
(e)



(f)

Figura 4.6. Perfil de velocidad teórico/experimental en el eje Y para las distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min

Así pues, además de realizar la comparación de los perfiles de velocidad teóricos-experimentales en función del tiempo de procesado se hará lo propio pero en función de la distancia recorrida con el objetivo de reafirmar lo expuesto en el caso anterior. En las figuras 4.7 y 4.8 se presentan los resultados obtenidos de esta comparación de perfiles de velocidad. En este caso se puede ver de manera más visual la diferencia entre los perfiles teóricos y experimentales al tener ambos la misma duración en el eje de coordenadas X a causa de realizar la misma distancia de recorrido. Se puede analizar como para ambos casos, eje X e Y, a medida que aumenta la velocidad de programación impuesta comienza a haber diferencias entre ambos perfiles debido al aumento de dicha velocidad que presenta limitaciones en tramos de recorrido pequeños donde lo ideal es imponer una velocidad más baja como se ve para el caso de 500 mm/min donde coinciden perfectamente ambos perfiles. Por tanto, se confirma lo analizado en el caso de los perfiles de velocidad en función del tiempo de procesado.



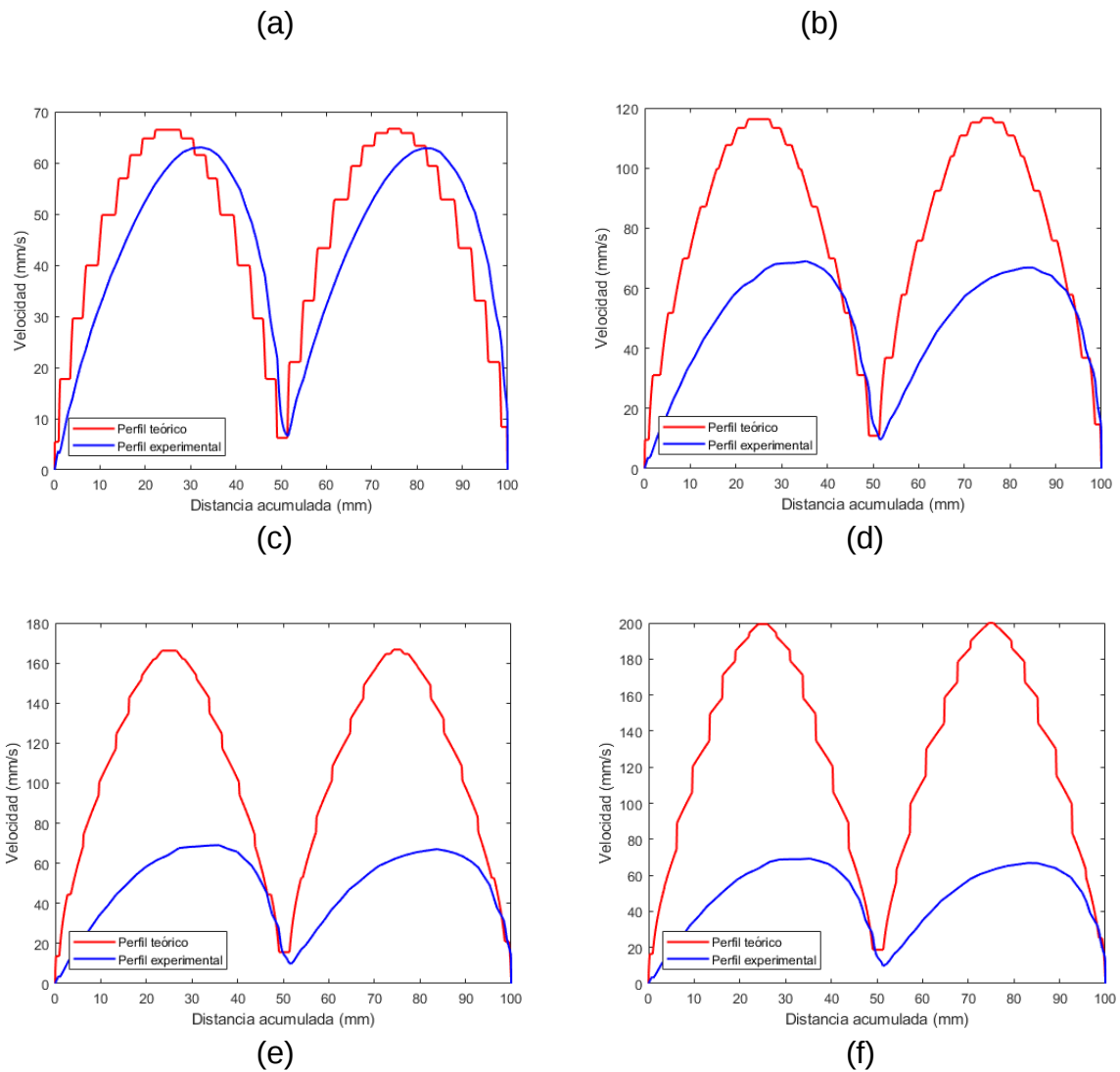
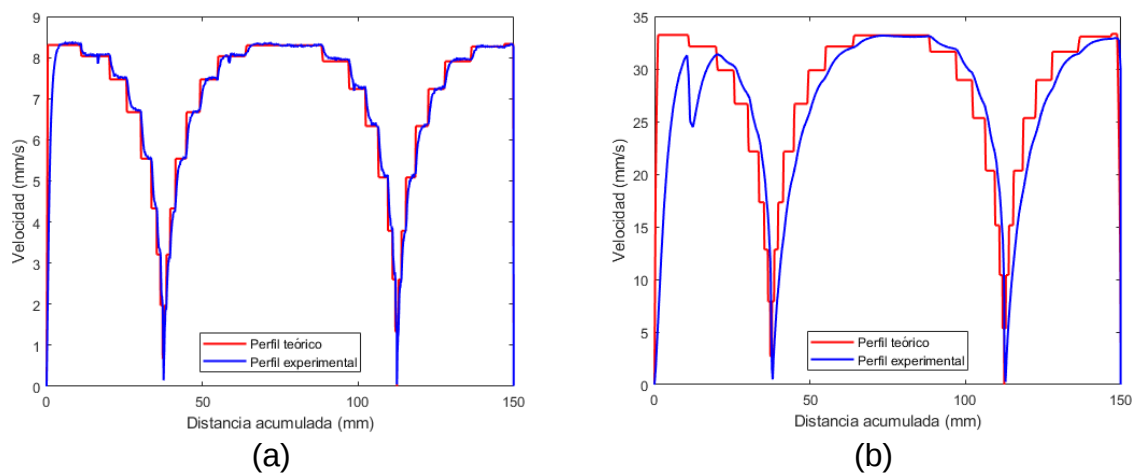
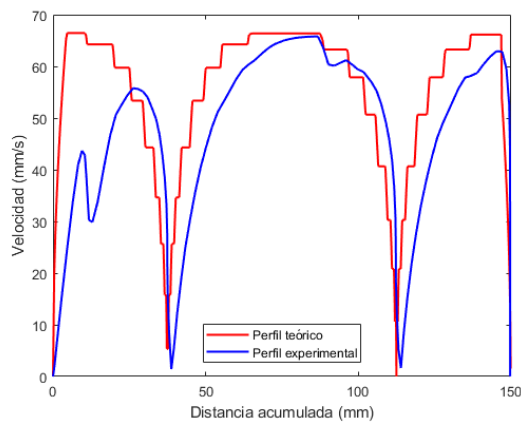
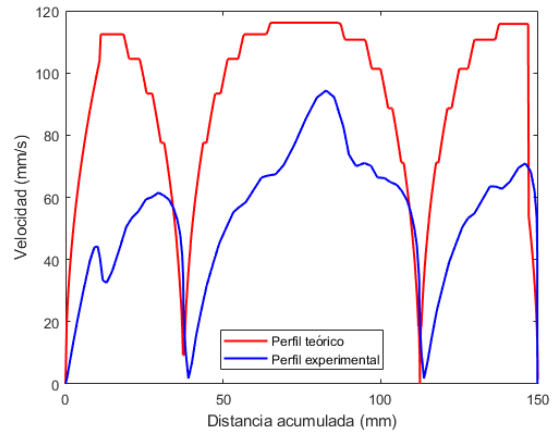


Figura 4.7. Perfil de velocidad teórico/experimental en el eje X para las distintas velocidades de programación en función de la distancia acumulada (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min

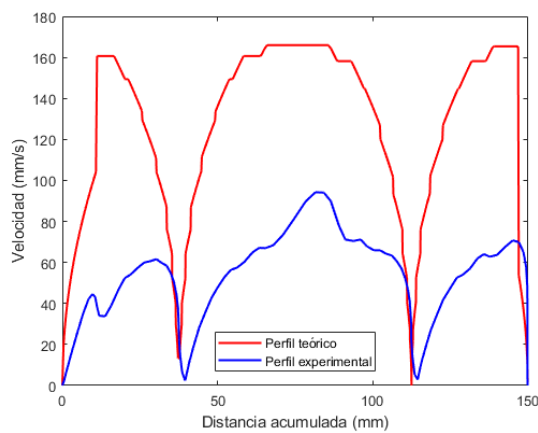




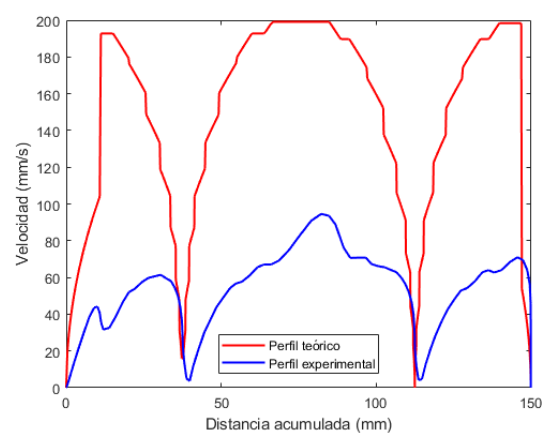
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.8. Perfil de velocidad teórico/experimental en el eje Y para las distintas velocidades de programación en función de la distancia acumulada (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min

4.1.3 Perfil de aceleración

Seguidamente, al igual que se ha obtenido el perfil de velocidad experimental para los dos ejes de coordenadas se ha hecho lo propio con el perfil de aceleración. Los perfiles de aceleración obtenidos para los ejes X e Y a distintas velocidades de programación se muestran en las figuras 4.9 y 4.10. Estas gráficas no tienen una resolución demasiado buena ya que como se puede apreciar contienen ruido, pero se pueden apreciar las zonas donde comienza la aceleración y la desaceleración que coinciden con los tramos donde la velocidad aumenta o disminuye, es decir cuando hay un cambio de dirección. Por ejemplo, en la figura 4.9c se observan cuatro tramos donde aumenta y disminuye la aceleración que justamente coinciden con los tramos de la figura 4.5c que contiene dos zonas de aumento de la velocidad y dos zonas igualmente que corresponde al descenso de la velocidad. Así pues, aunque las

gráficas de la aceleración presentan ruido se pueden analizar las distintas zonas importantes de las gráficas, detallas en el apartado 3.5.5 *Aspectos a tener en cuenta de los perfiles obtenidos*, y se reafirma que los resultados obtenidos son correctos.

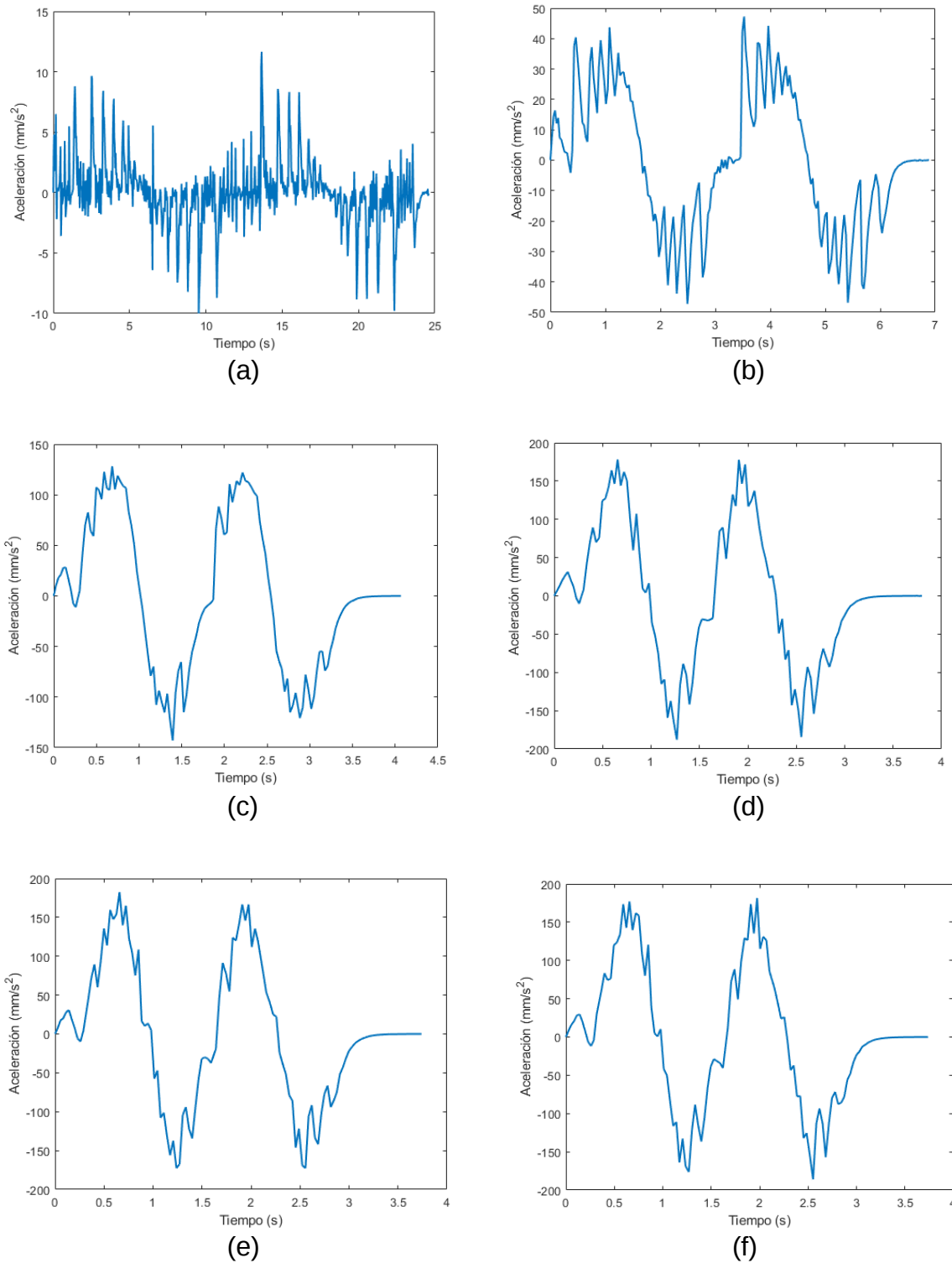
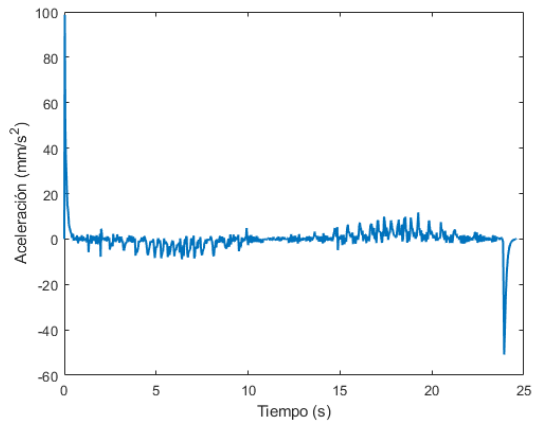
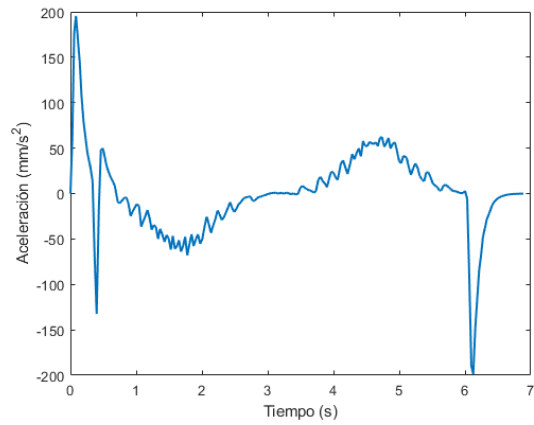


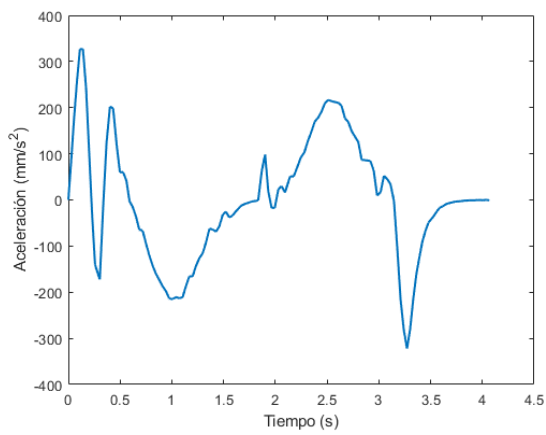
Figura 4.9. Perfil de aceleración experimental en el eje X para las distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min



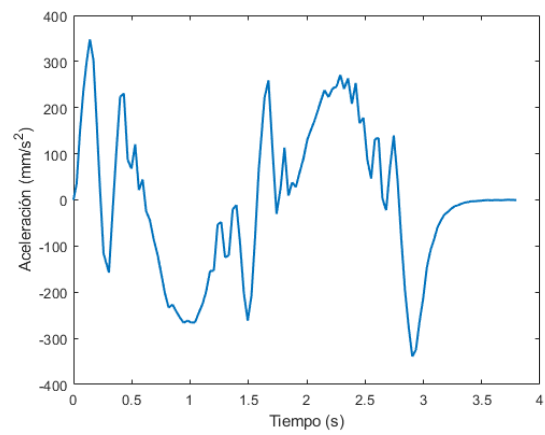
(a)



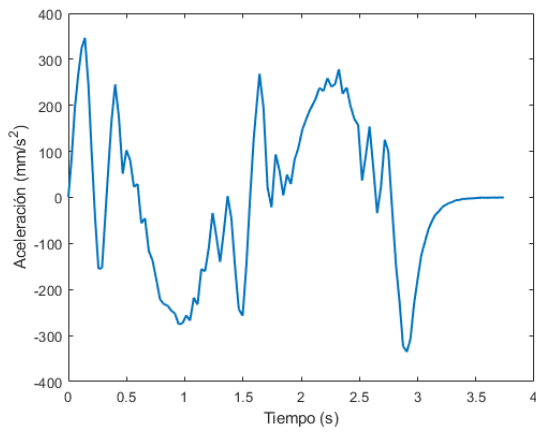
(b)



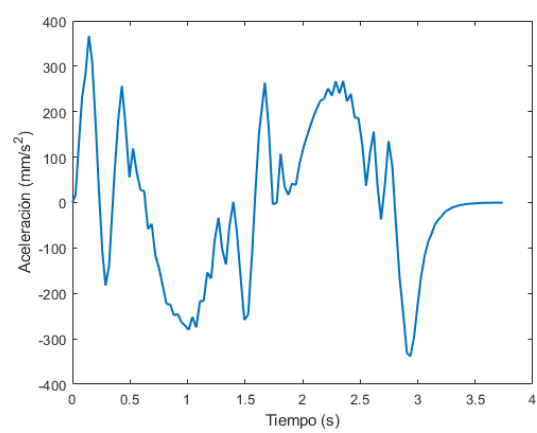
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.10. Perfil de aceleración experimental en el eje Y para las distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min, (e) 10000 mm/min, (f) 12000 mm/min

4.1.4 Conclusiones

Las principales conclusiones que se obtienen del análisis de la trayectoria sinusoidal en vacío son las siguientes:

- ✓ En cuanto al perfil de posición, los perfiles tanto teóricos como analíticos coinciden entre sí notablemente salvo para la velocidad más alta donde se observa una discontinuidad provocada por el exceso de velocidad en el recorrido de tramos pequeños de distancia.
- ✓ En relación al perfil de velocidad, se ha representado el perfil teórico-experimental en función del tiempo y se ha apreciado cómo solo hay una coincidencia exacta entre ambos perfiles a la velocidad más pequeña. A medida que aumenta dicha velocidad van apareciendo cada vez más diferencias entre ambos perfiles tanto en la velocidad a alcanzar como en el tiempo de procesado.
- ✓ Así mismo, se ha representando el perfil de velocidad teórico-experimental en función de la distancia acumulada y se ha ratificado la conclusión anterior ya que se ha observado como a medida que aumenta la velocidad de programación no se alcanza la velocidad teórica.
- ✓ Por último, en cuanto a los perfiles de aceleración experimentales aunque presenten ruido en algunas gráficas se pueden observar los distintos tramos de aceleración y desaceleración coincidentes con el perfil de velocidad.

4.2 Extrusión de la trayectoria sinusoidal

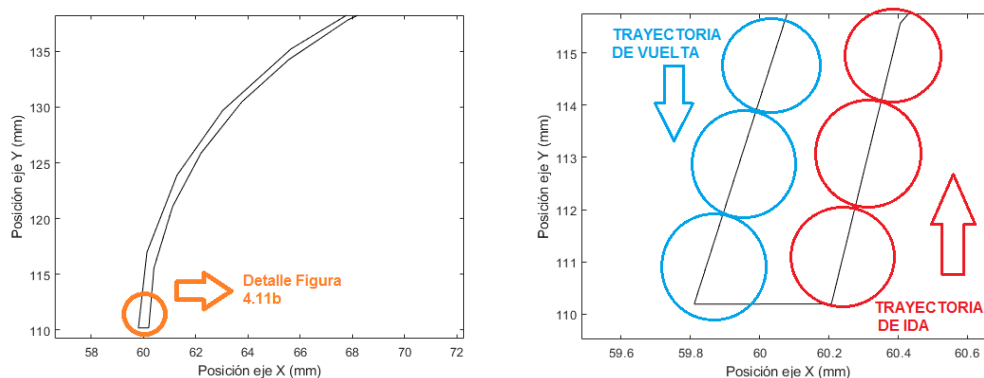
En este momento, ya se está en disposición de realizar la extrusión de la trayectoria sinusoidal, mostrada en la figura 4.1, después de haber llevado a cabo todo el análisis de dicha trayectoria en vacío y de haber obtenido unos resultados bastante representativos del comportamiento de las distintas magnitudes estudiadas en los diferentes casos planteados.

El código de programación para obtener los datos desde el encoder tiene la estructura que se presentó en la figura 4.2, que igualmente es válido para la obtención de los datos del eje E de extrusión. Y, la estructura del código de programación para

procesar los datos obtenidos del encoder tiene una estructura similar a la mostrada en la figura 4.3 cuyo código de programación se muestra en el anexo 7.2.4.

Para este caso de la extrusión, hay que hacer un pre-procesamiento de los datos leídos desde el encoder en excel. En primer lugar, de los datos obtenidos para los ejes X e Y se eliminan todas las filas hasta el momento en el que se inicia el movimiento, es decir, el punto de partida (0,0). Y, en segundo lugar, de los datos obtenidos para el eje E se eliminan las filas hasta el momento en el que se inicia la extrusión de la trayectoria. En ambos casos, después de la eliminación de los datos iniciales se determina el valor 0 de velocidad en la primera fila de los tres ejes y si hay algún desfase en el ángulo inicial debido por el retroceso de cualquiera de los ejes en su colocación al punto de partida se corregirá este desfase posteriormente en el procesamiento de los datos.

Cabe destacar que se ha seleccionado un espesor de la trayectoria de 0.8 mm y al no poder extruir directamente todo el espesor, se ha dividido la trayectoria en dos partes, una de ida con un espesor de 0.4 mm y otra de vuelta de 0.4 mm para completar el espesor total de la trayectoria, así pues en los perfiles de velocidad y aceleración obtenidos se deberían obtener dos partes de las gráficas semejantes. En la figura 4.11, se puede observar un detalle de la representación teórica de la trayectoria a realizar. En la figura 4.11a se observa un detalle más lejano de la trayectoria donde ya no se ve una única línea de trazado como en la figura 4.1, sino que se ven dos líneas de trazado que corresponden a las dos pasadas que tiene que realizar el extrusor para completar una capa de espesor de pared de 0.8 mm. En la figura 4.11b se puede apreciar en mejor detalle el sentido del movimiento de las dos trayectorias de ida y vuelta, que corresponden con las dos pasadas que tiene que ejecutar el extrusor.



(a) (b)
Figura 4.11. (a) Trayectoria teórica de ida y vuelta a realizar para completar una capa (b) Detalle del sentido de movimiento del extrusor para completar una capa

Con respecto a la velocidad y después de haber analizado los datos para el caso de la trayectoria en vacío sólo se emplearán las velocidades de programación 500, 2000, 4000 y 7000 mm/min, debido a que las velocidades mayores de 7000 mm/min no son capaces de alcanzar y los resultados obtenidos son similares a dicha velocidad. Aún así, cuando se introducen las velocidades de programación anteriormente impuestas los valores de velocidad que aparecen en el archivo G-Code tienen una pequeña disminución de la velocidad quedando finalmente los valores en 480, 1980, 3960 y 6960 mm/min, valores de velocidad de programación que se tendrán en cuenta en el cálculo de los perfiles teóricos de la velocidad. Y, a continuación, se muestran los resultados obtenidos para la extrusión de la trayectoria.

4.2.1 Perfil de posición

Al igual que para el caso en vacío, se comienza con la obtención del perfil de posición. El perfil de posición general será diferente al mostrado en el caso anterior ya que la trayectoria extruida se realiza en el centro de la cama de la impresora y por lo cual el extrusor se debe dirigir hacia el punto inicial de dicha extrusión. En la figura 4.12 se muestra la trayectoria recorrida por el extrusor, donde se aprecia en primera instancia el movimiento en línea recta desde el punto de partida (0,0) hasta el punto donde comienza la extrusión (zona azul). En el caso de la trayectoria en vacío no se presenta ese recorrido inicial hasta el punto de inicio de la extrusión ya que se definía como punto de partida el punto (50,100) y no el punto (0,0).

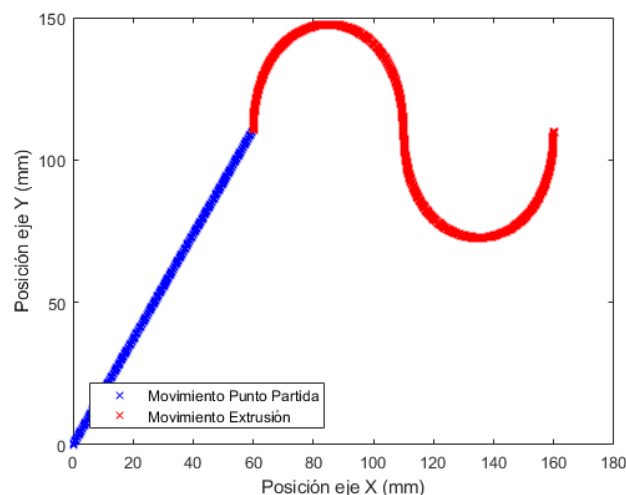


Figura 4.12. Trayectoria total recorrida por el extrusor desde el punto de partida (0,0)

Una vez detallada la trayectoria total recorrida por el extrusor se muestra con mejor detalle la trayectoria recorrida en el momento de la extrusión. En la figura 4.13, se puede apreciar tanto el perfil de posición de la trayectoria teórica como de la trayectoria analítica. Así pues, se puede analizar cómo prácticamente tanto la trayectoria analítica de ida como la trayectoria analítica de vuelta, es decir, las dos pasadas que tiene que realizar el extrusor para completar una capa coinciden perfectamente con la trayectoria teórica lo que hace indicar que la impresora realiza sincronizadamente el movimiento correcto de ambos ejes, X e Y.

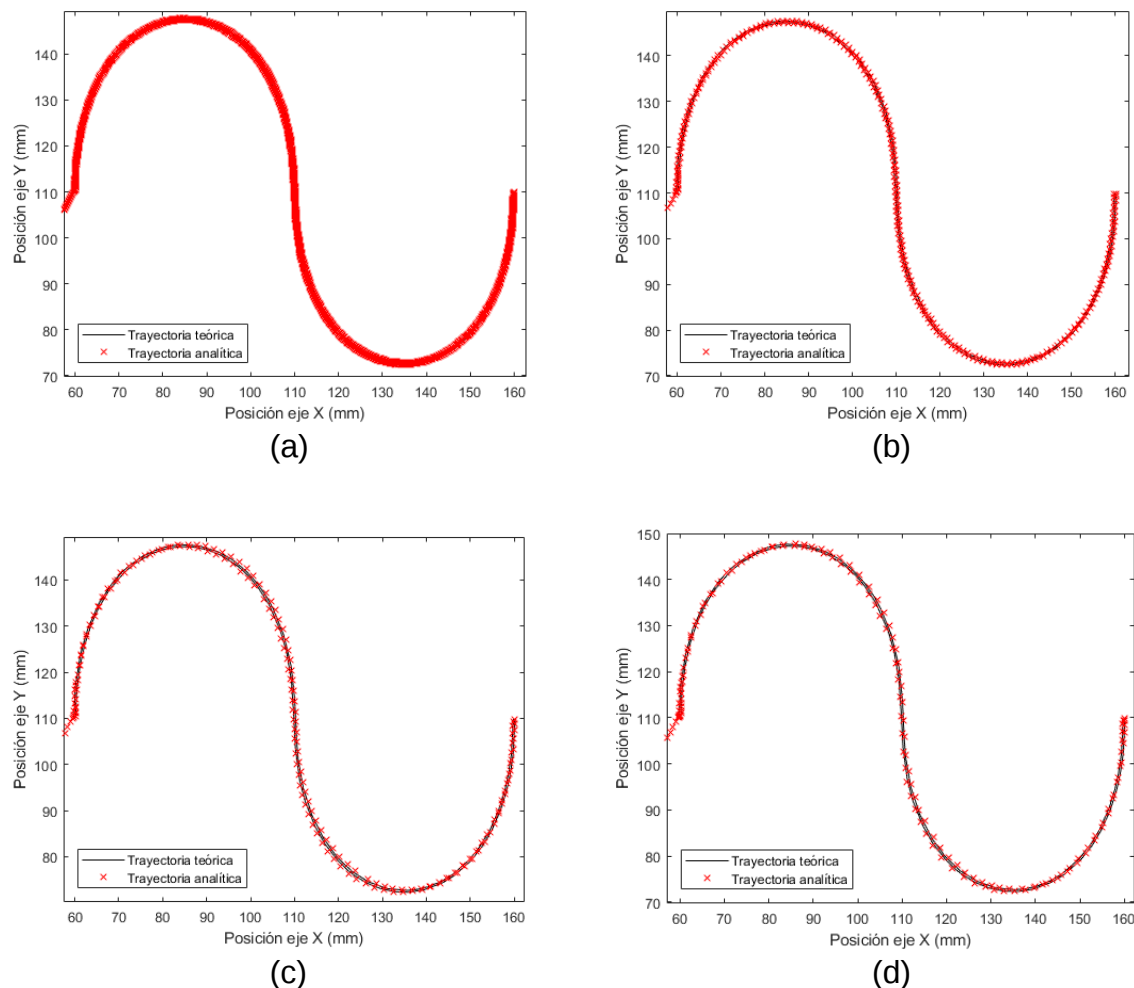


Figura 4.13. Perfil de posición teórico/analítico para las distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min

4.2.2 Perfil de velocidad

En segundo lugar, después de analizar el perfil de posición, se presenta el perfil de velocidad de la trayectoria extruida para los mismos casos de velocidad de programación detallados anteriormente. El perfil de velocidad que se muestra a continuación es la representación de la velocidad frente a la distancia acumulada en

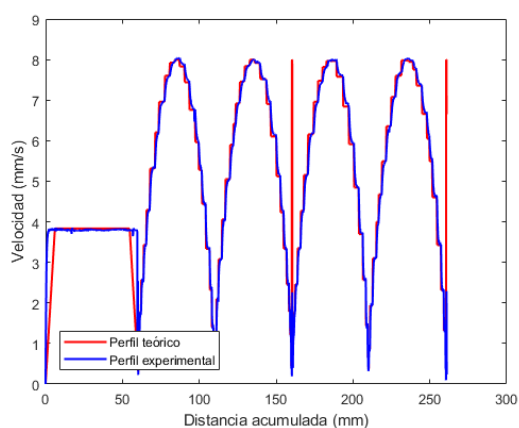
cada eje de coordenadas para poder comparar con más detenimiento tanto el perfil experimental como el perfil obtenido de manera teórica al coincidir la duración en el eje de abscisas. Ya se mostró en el caso de la trayectoria en vacío que la representación del perfil de velocidad en función del tiempo presentaba diferencias cuando la velocidad de programación era más alta de lo aconsejable, y por tanto, se apreciaban esas diferencias de tiempos de procesado teóricos y experimentales. Así pues, en este caso se obviará esta representación porque el resultado obtenido será el mismo y también se puede apreciar dichas diferencias de tiempo en las figuras que se muestran a continuación, figuras 4.14 y 4.15.

Como se puede observar en las figuras 4.14 y 4.15, se aprecian a simple vista las dos zonas simétricas que corresponden a los dos pasadas de trayectoria recorridas por el extrusor y que hace indicar que los resultados obtenidos a simple vista parecen correctos. Luego, en ambas figuras se aprecia una zona donde la velocidad aumenta rápido en una corta distancia y cuando alcanza el valor máximo de la velocidad en dicho recorrido se mantiene ésta constante, lo que hace indicar que dicha zona pertenece al momento del movimiento del extrusor desde el punto de partida (0,0) hasta el comienzo de la extrusión, que como se vió anteriormente es una línea recta y, por tanto, esta zona tiene una forma de perfil de trapecio.

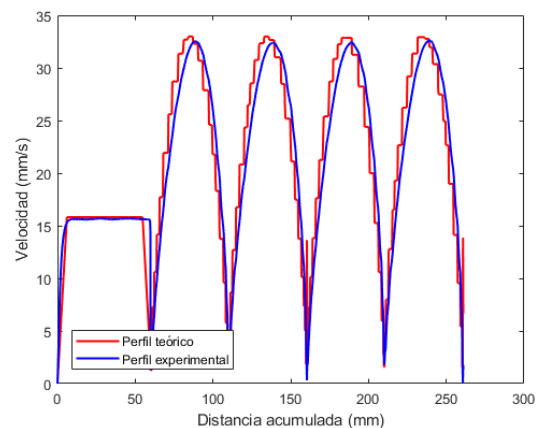
Comparando ambos perfiles de velocidad, teórico y experimental, se puede observar como para el caso de la velocidad más pequeña coinciden perfectamente ambos perfiles al igual que ocurrió para el caso en vacío. A medida que aumenta la velocidad de programación ya comienzan a aparecer las diferencias entre ambos perfiles, al no poder alcanzar experimentalmente la velocidad teórica impuesta para la misma distancia de recorrido. Esto implica que hay una diferencia de tiempos de procesado, y el tiempo de procesado marcado teóricamente no va a ser el mismo tiempo de procesado real que realice la impresora. Aún así, las formas de los perfiles obtenidos son muy representativos y aunque no coincidan tanto el perfil teórico como el experimental los resultados obtenidos son correctos, ya que como se comentó anteriormente en varias ocasiones para ciertas distancias de recorrido donde los tramos son pequeños no va a ser posible de alcanzar unas velocidades altas.

Aún así, después de analizar los distintos perfiles de velocidad obtenidos tanto para el caso de la trayectoria en vacío como para la trayectoria extruída hay que

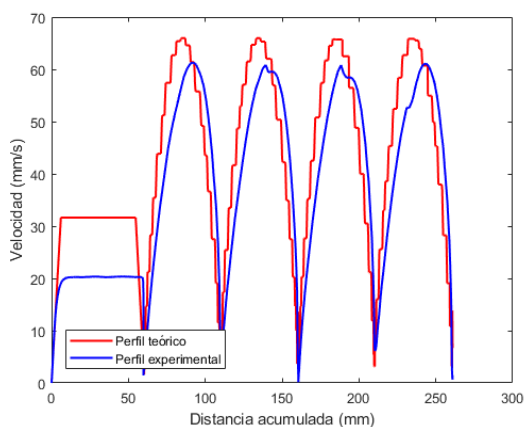
destacar algo importante en cuanto a los perfiles teóricos obtenidos. Anteriormente, se comentó las distintas diferencias entre los perfiles teóricos y experimentales en cuanto a la velocidad alcanzada o el tiempo de procesamiento. Dichas diferencias tienen que ver con el modelo matemático utilizado para adquirir dicho perfiles de velocidad. Y, es que este modelo matemático no tiene en cuenta que para velocidades altas la aceleración es pequeña para que sea posible alcanzar la velocidad de referencia impuesta. Por tanto, como se ha mostrado en las gráficas se observa como para velocidad altas, la velocidad teórica calculada es mucho mayor que la velocidad experimental obtenida. También tiene gran influencia que la impresora principal utilizada en este trabajo tiene una aceleración baja, en concreto, de 500 mm/s^2 con lo cual no es posible alcanzar un valor de velocidad alto en algunos tramos de trayectorias, sin embargo, en la máquina RepRap, que es la máquina donde se creó y empleó dicho modelo matemático, este problema no aparecía ya que la aceleración de dicha máquina es tres veces mayor que la de la máquina Creality Ender 3 PRO.



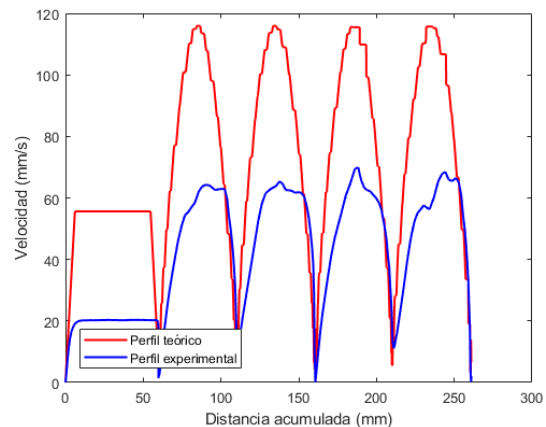
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.14. Perfil de velocidad teórico/experimental en el eje X para las distintas velocidades de programación en función de la distancia acumulada (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min

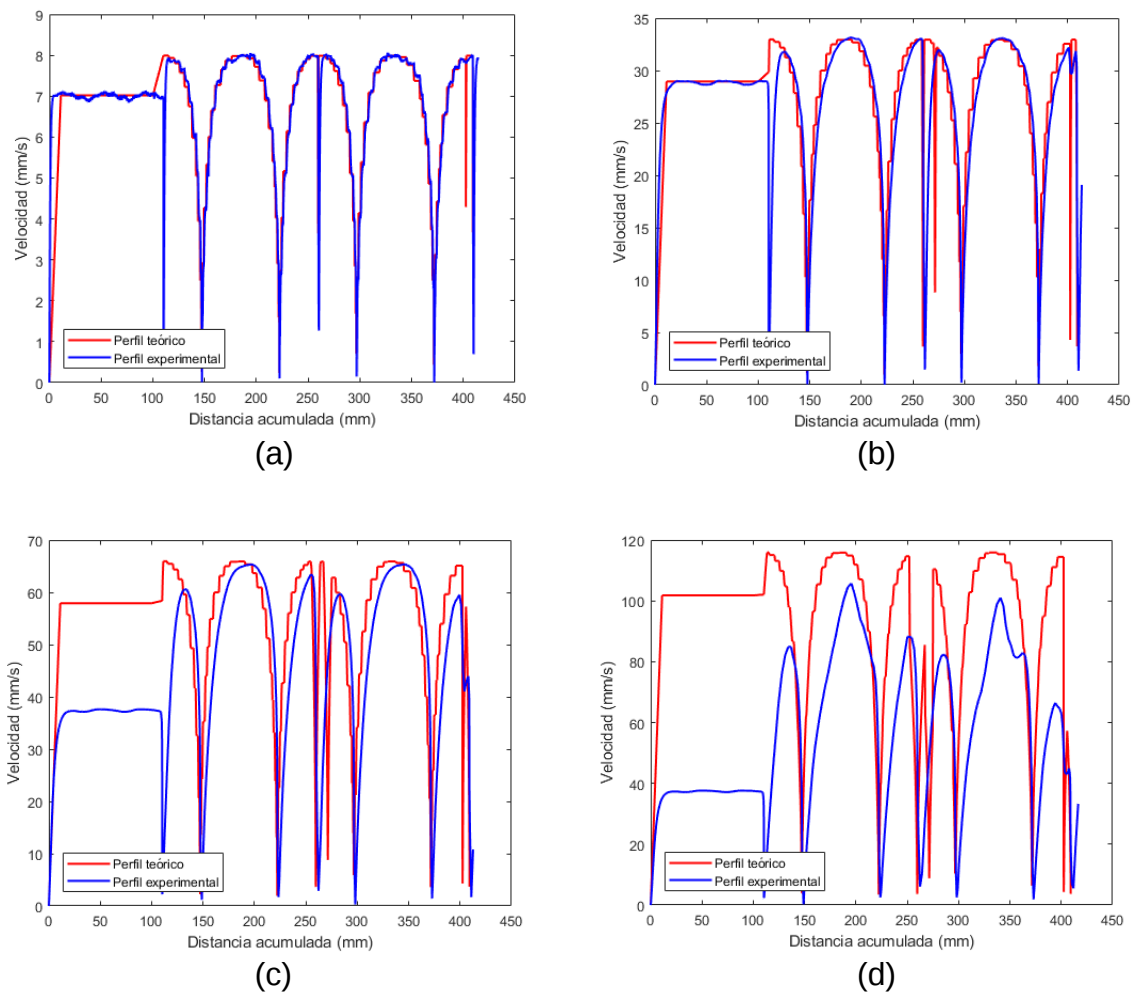


Figura 4.15. Perfil de velocidad teórico/experimental en el eje Y para las distintas velocidades de programación en función de la distancia acumulada (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min

Además, de la anterior representación de la velocidad en función de la distancia acumulada, se ha representado en la figura 4.16 el módulo de velocidad del movimiento plano XY en función de la longitud del segmento completo de la trayectoria para observar dicho comportamiento. Se puede observar, en primer lugar, que para velocidades pequeñas prácticamente el módulo de velocidad es constante en todo el recorrido salvo en los cambios de trayectoria en el inicio y final de ésta donde la velocidad baja en gran medida. Cuando la velocidad programada es más alta se aprecia como en la mitad de la trayectoria se alcanza la velocidad máxima ya que en esta parte hay una zona recta sin ninguna curva ni cambio de trayectoria lo que implica que se alcance la mayor velocidad.

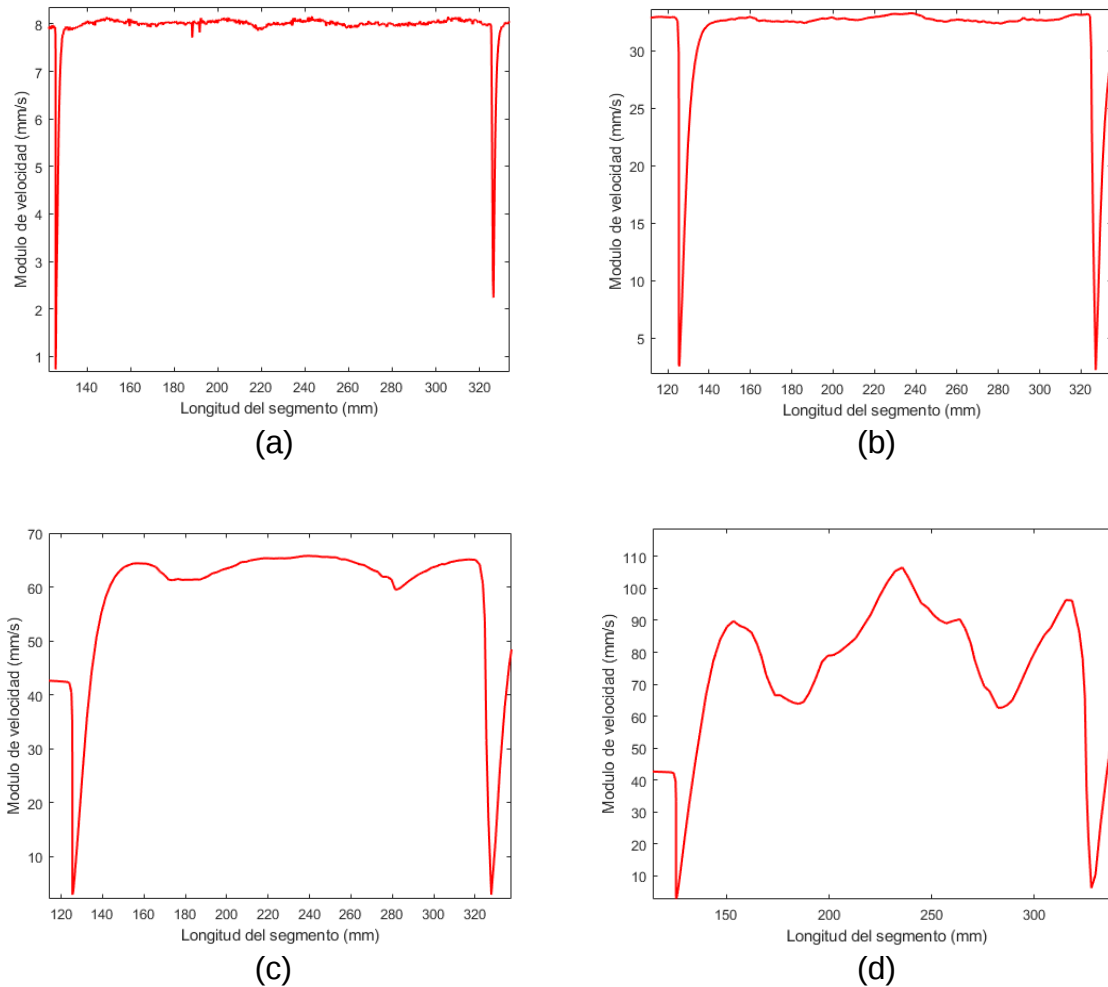
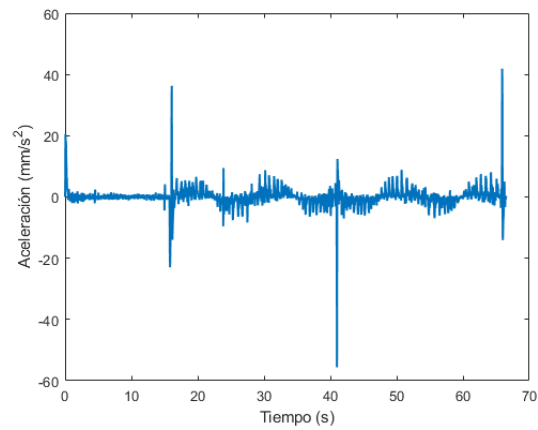


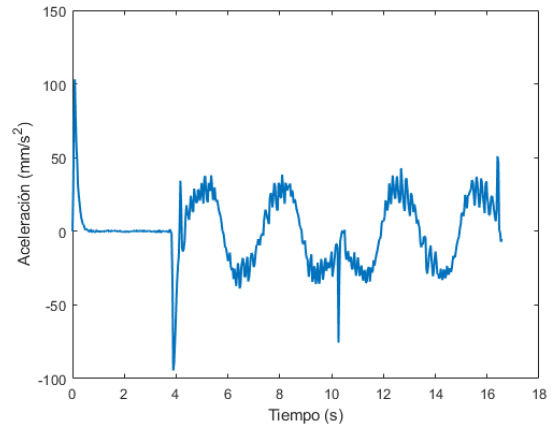
Figura 4.16. Perfil del módulo de velocidad experimental en el eje XY para las distintas velocidades de programación en función de la longitud total del segmento de la trayectoria (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min

4.2.3 Perfil de aceleración

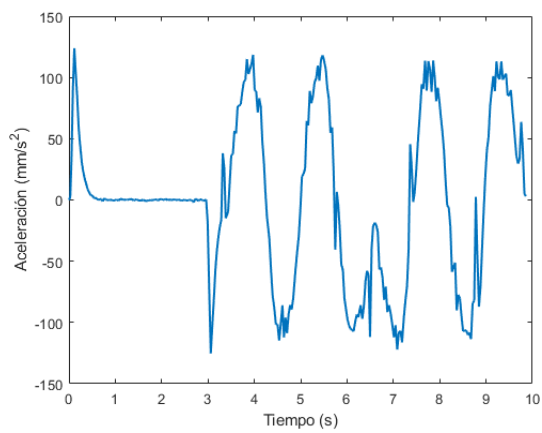
A continuación, se presenta el perfil de aceleración experimental. Al igual que ocurrió en el caso del perfil de velocidad se aprecia a simple vista las dos zonas simétricas correspondientes a los pasadas recorridas por el extrusor en una misma capa. Así mismo, se aprecia al principio de cada gráfica la zona de aceleración del movimiento desde el punto de partida hasta el comienzo de la extrusión, donde acelera rápidamente en un corto espacio de tiempo y cuando se alcanza la velocidad constante, la aceleración es cero como ya se mostró en casos anteriores. Y, también se puede observar como están contempladas las zonas de aceleración y desaceleración que corresponden a las zonas donde la velocidad aumenta y disminuye.



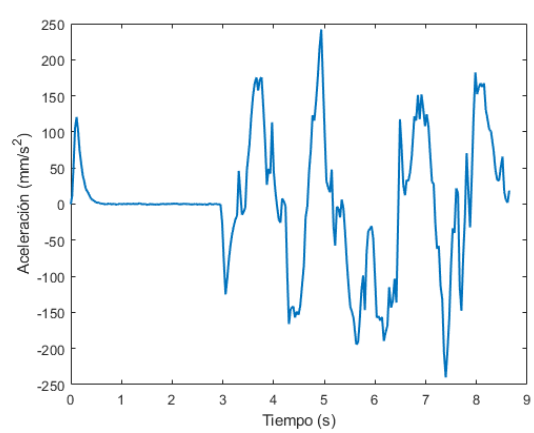
(a)



(b)

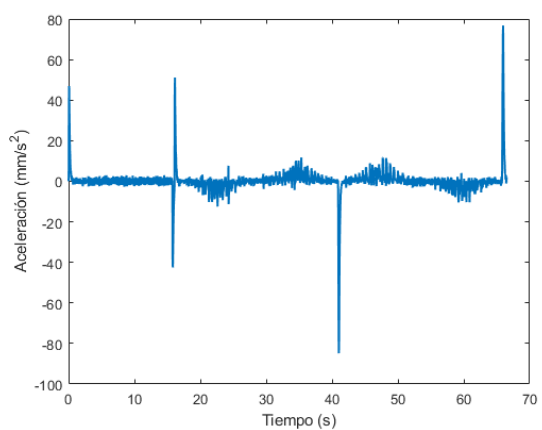


(c)

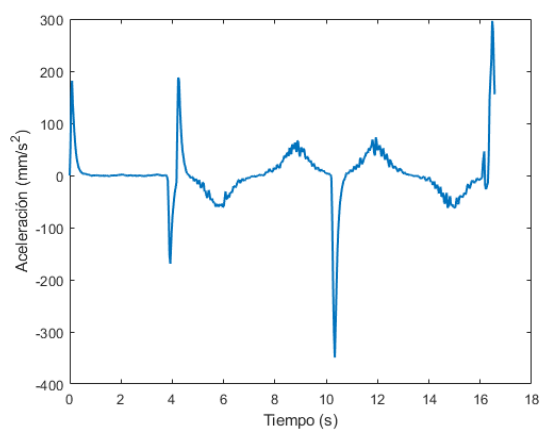


(d)

Figura 4.17. Perfil de aceleración experimental en el eje X para las distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min



(a)



(b)

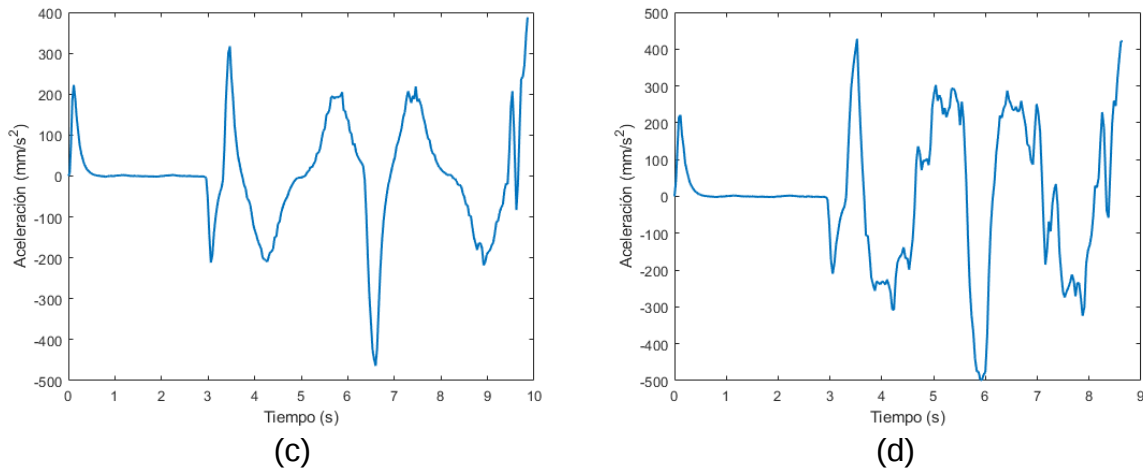


Figura 4.18. Perfil de aceleración experimental en el eje Y para las distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min

4.2.4 Análisis del motor paso a paso encargado de la extrusión de material

Una vez analizado los distintos perfiles de posición, velocidad y aceleración correspondientes al movimiento plano XY, sería interesante analizar el motor paso a paso del extrusor encargado de realizar la propia extrusión del material. Como se explicó al comienzo de este trabajo, había un aspecto importante a tener en cuenta como es el *cornering*, que era el suavizado de la trayectoria encargado de reducir la deposición de material en esquinas. En la trayectoria anteriormente extruida se puede analizar este concepto, ya que al inicio de la trayectoria y al final se encuentran una serie de esquinas correspondientes a cambios de trayectoria (ida y vuelta), así como también se contemplan distintos cambios de trayectoria durante el transcurso de la misma. En la figura 4.19, se pueden observar los cambios de trayectorias que generan esquinas donde se ha indicado el sentido del movimiento del extrusor al ejecutar las dos pasadas para completar una capa completa. Por tanto, a continuación se muestran distintas gráficas donde es posible analizar este concepto en mayor profundidad.

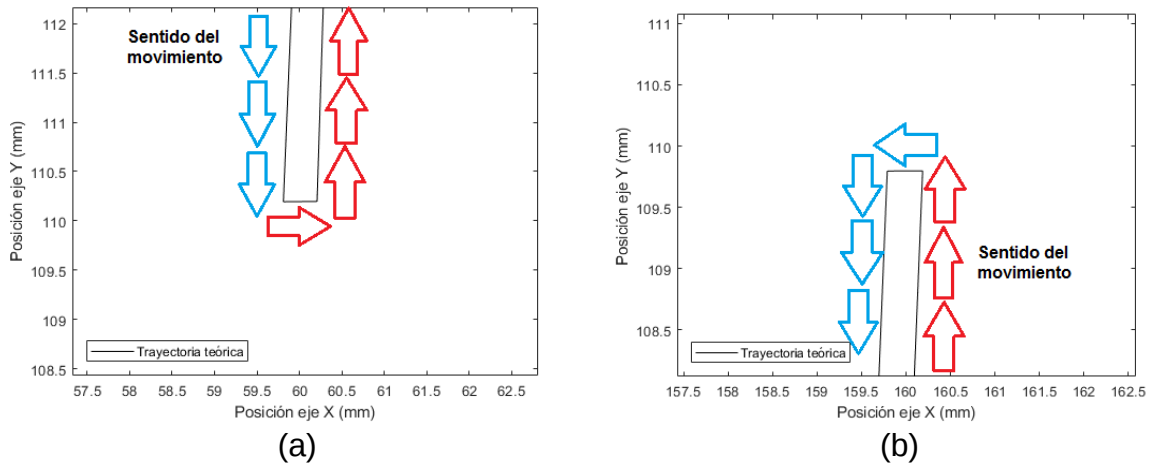


Figura 4.19. Detalle de las zonas de las esquinas en los dos cambios de trayectoria
(a) Inicio de la trayectoria de ida (b) Inicio de la trayectoria de vuelta

En primer lugar, en la figura 4.20, se muestra el perfil de velocidad del movimiento del eje de la extrusión a distintas velocidades de programación después de haber realizado tres o cuatro trayectorias completas. Se puede observar como en los cuatro casos, al comienzo de la extrusión la velocidad del eje E sube hasta 25 mm/s, que es la velocidad teórica máxima impuesta en el motor de extrusión, debido a que al comienzo de la extrusión hay una salida rápida del material de unos 3 mm, como se puede observar en la figura 4.24, lo que va a permitir que el material salga fluido en todo el proceso. A partir de ahí, se puede observar como en la primera trayectoria de ida y vuelta los valores alcanzados están por encima de las siguientes trayectorias donde los valores permanecen constantes. Los valores más altos en la primera trayectoria (ida y vuelta) se deben a que al comienzo no hay un cambio de capa en el eje Z, como si se puede observar en las siguientes trayectorias donde cuando finaliza las dos primeras pasadas, el eje Z tiene que aumentar la altura y la velocidad en el eje E se disminuye para no realizar una deposición excesiva de material. A continuación, después de realizar la segunda trayectoria completa se puede observar como los valores permanecen constantes en cada trayectoria realizada ya que el movimiento ejecutado es el mismo tanto en el movimiento plano XY como en el movimiento del eje Z.

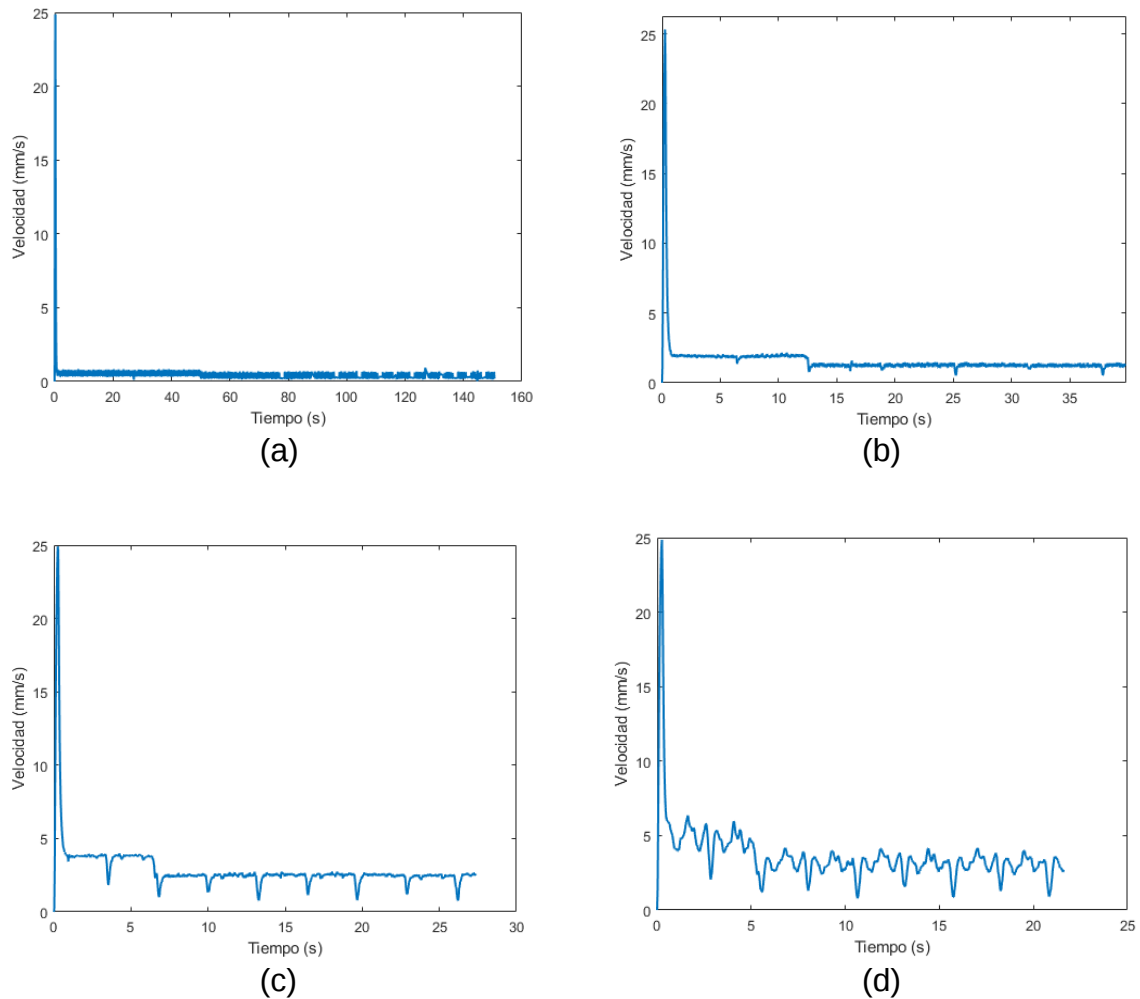


Figura 4.20. Perfil de velocidad experimental en el eje E para las distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min

Para observar con más detenimiento el perfil de velocidad en una trayectoria completa se presenta la figura 4.21 donde se puede apreciar con mejor detalle este perfil. Se puede ver como al comienzo de la trayectoria donde se encuentran las dos primeras esquinas, figura 4.19a, hay un cambio brusco de la velocidad donde se observa una bajada hasta un valor mínimo y la posterior subida cuando pasa este cambio de trayectoria. A continuación, la velocidad se mantiene constante entre un cierto rango de velocidad hasta el momento en el que se inicia la trayectoria de vuelta, figura 4.19b, donde se observa otro cambio de la velocidad justo en la mitad de la gráfica donde vuelve a bajar hasta un cierto valor que permite realizar dicho cambio de trayectoria. Por tanto, es fácil de detectar estos cambios de trayectoria, en forma de esquinas, ya que en el perfil de velocidad forman unos picos donde se alcanzan unos valores de velocidad mínimos.

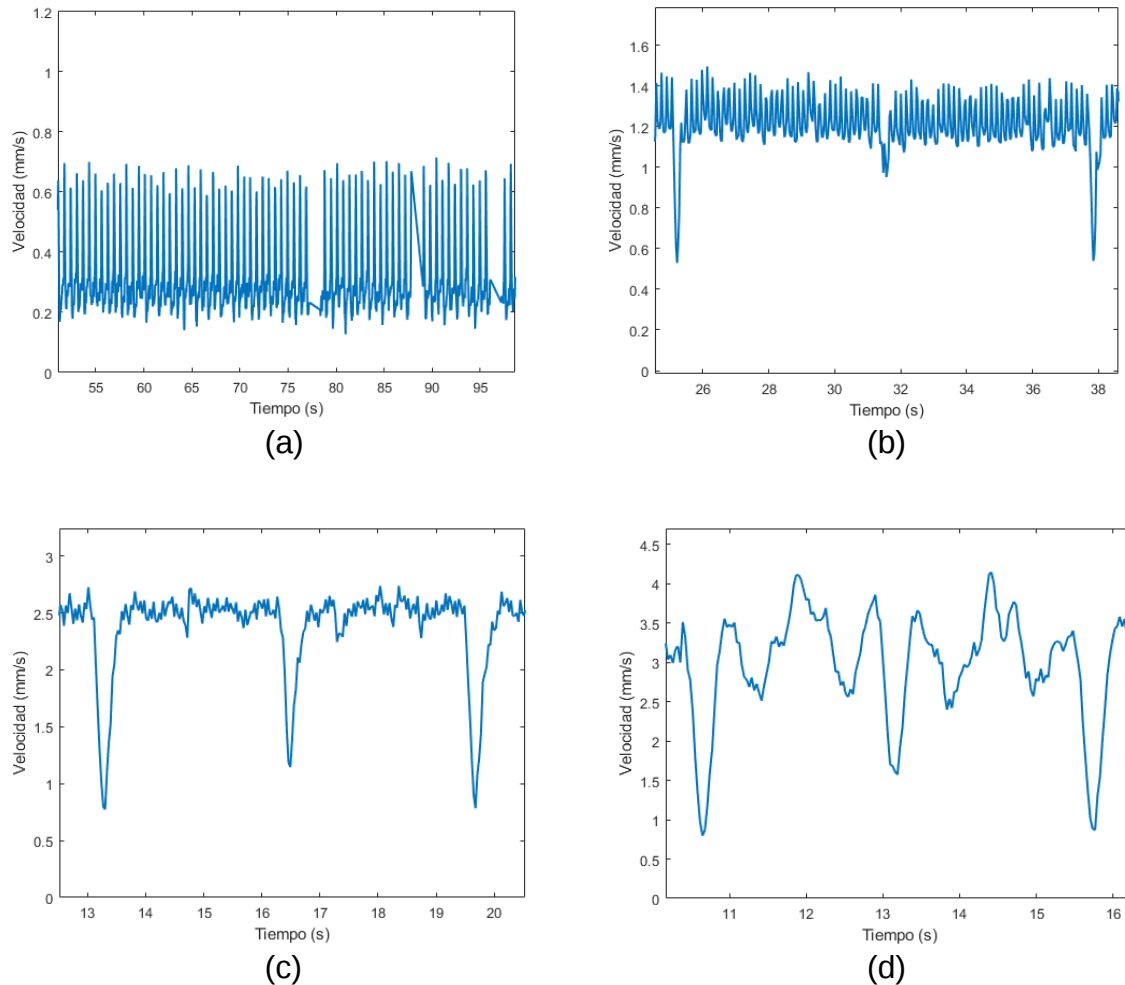


Figura 4.21. Detalle del perfil de velocidad experimental en el eje E para las distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min

Cabe destacar que el valor de velocidad mínimo en el inicio de la trayectoria de vuelta es mayor que en el inicio de la trayectoria de ida debido a que en el inicio de la trayectoria de ida se produce un desnivel en el eje Z producido por el cambio de capa. También se destaca que a medida que la velocidad de programación es más alta, la velocidad del propio movimiento del eje E de extrusión también aumenta proporcional a este aumento en la velocidad de programación. Por último, se destaca que un envío masivo de datos desde Arduino a Excel provoca inestabilidad en los datos a partir de un envío de datos mayor a 3400, como se puede observar en la figura 4.21a donde aparecen dos zonas donde la velocidad se mantiene constante en un salto de tiempo.

De igual modo, para observar con mejor detenimiento lo explicado anteriormente, se presenta en la figura 4.22 y 4.23 una comparación entre el perfil de velocidad durante el movimiento plano XY y el perfil de velocidad durante el

movimiento del eje E de la extrusión donde se puede observar como el tiempo total de la trayectoria obtenido en ambos casos coinciden, además de coincidir los puntos donde hay cambios de trayectoria. Para estas gráficas no se ha representado el perfil de velocidad comparativo de la velocidad de 500 mm/min ya que como se pudo observar en las anteriores gráficas al ser una velocidad de movimiento más pequeña la velocidad del movimiento del eje de extrusión permanece prácticamente siempre constante en el mismo rango de velocidades y no se aprecian los cambios de trayectoria que si se pueden apreciar con facilidad en el resto de casos.

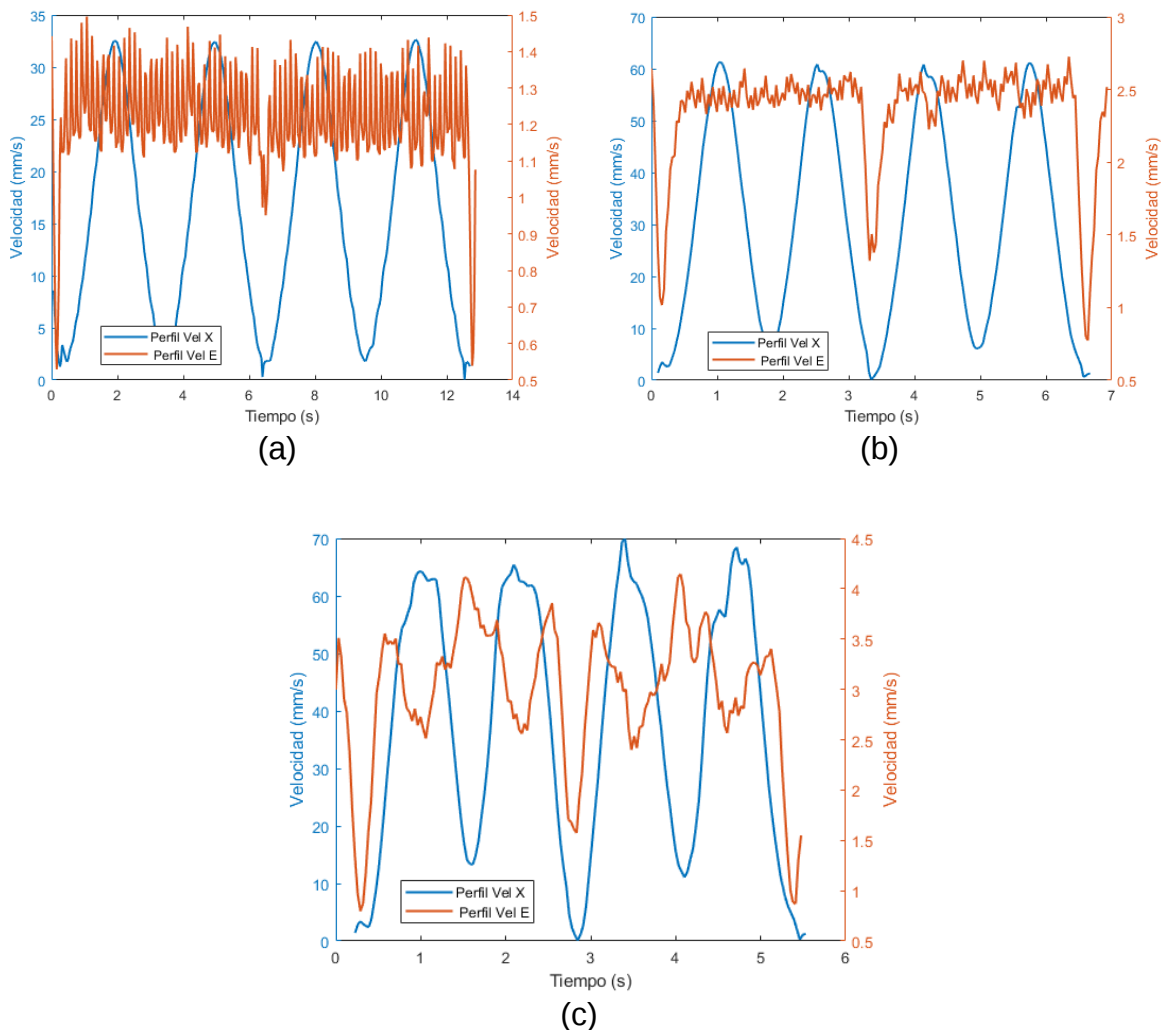


Figura 4.22. Comparativa del perfil de velocidad experimental en el eje X-E para las distintas velocidades de programación (a) 2000 mm/min, (b) 4000 mm/min, (c) 7000 mm/min

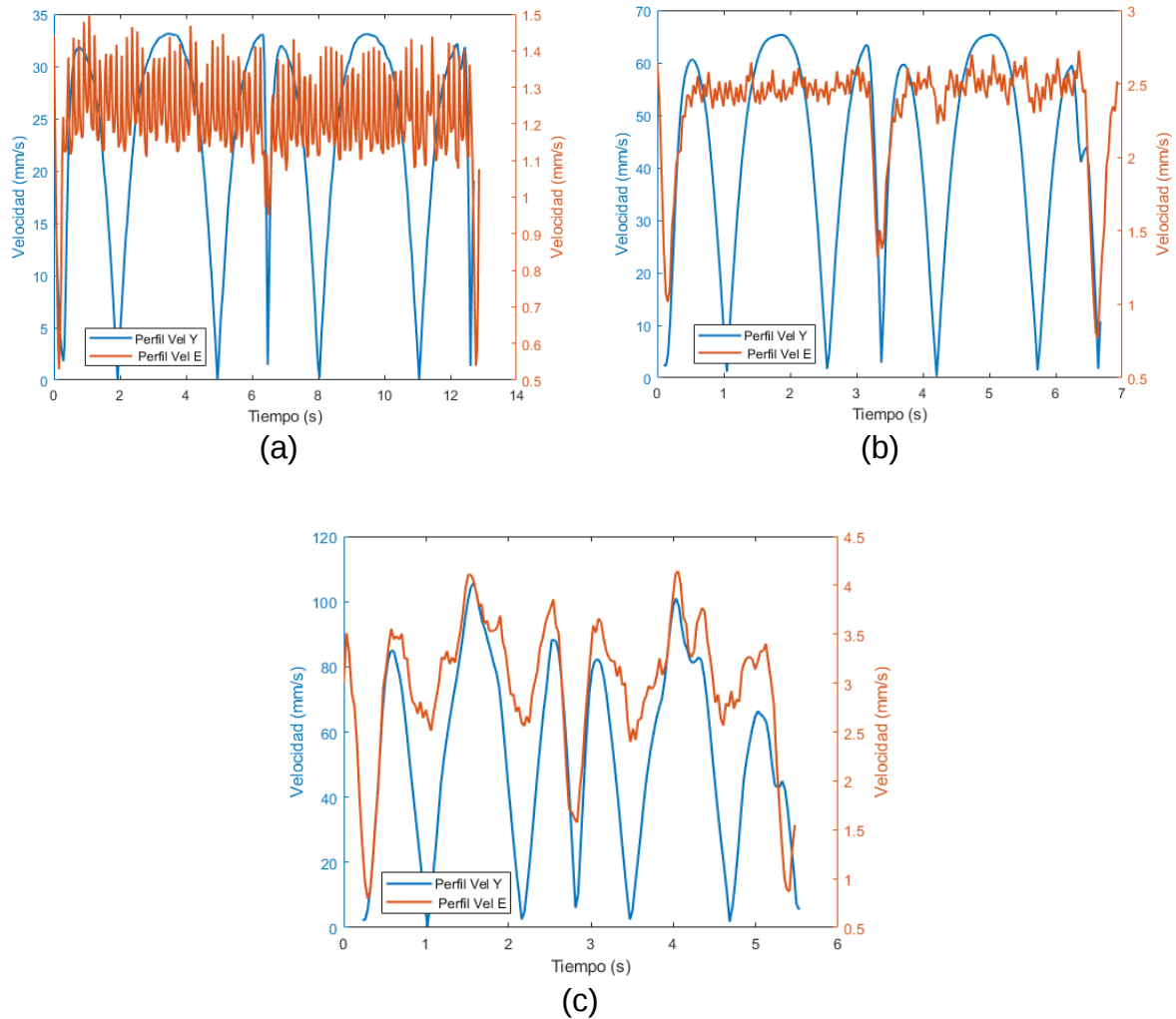


Figura 4.23. Comparativa del perfil de velocidad experimental en el eje Y-E para las distintas velocidades de programación (a) 2000 mm/min, (b) 4000 mm/min, (c) 7000 mm/min

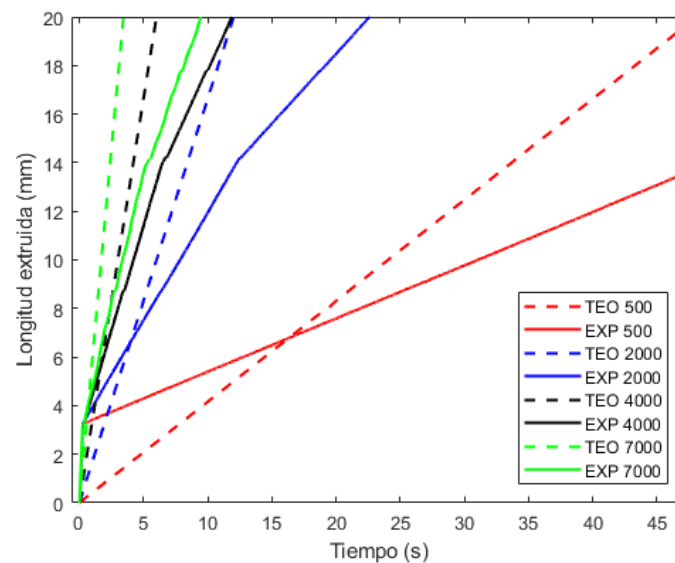


Figura 4.24. Comparativa de la longitud de material extruida en función del tiempo tanto teórica como experimentalmente para las distintas velocidades de programación (a) 2000 mm/min, (b) 4000 mm/min, (c) 7000 mm/min

Anteriormente, se analizó el movimiento del eje de extrusión en términos de velocidad y se comparó con los datos obtenidos durante el movimiento de los ejes X e Y donde se apreció que el movimiento de todos los ejes se realizaba de manera sincronizada pero es importante de igual manera analizar la longitud que se extruye de material en todo el proceso. Para ello, se ha representado en la figura 4.24 una comparativa de la longitud extruida tanto teórica como experimentalmente en función del tiempo para analizar lo que ocurre durante la extrusión. Se observa como es lógico que a medida que la velocidad es más alta se extruye más longitud de material a medida que avanza el tiempo. También se puede apreciar como los datos teóricos no se corresponden con los datos experimentales debido a que los datos teóricos son obtenidos con una velocidad teórica que experimentalmente no es posible de alcanzar. Además, la extrusión es lineal salvo en pequeños instantes donde hay variaciones en las rectas que serán debidas a un cambio de trayectoria como los mostrados en las figuras 4.19. Y, por último, se puede ver como para todos los casos se extruye unos 3 mm de material en el comienzo en un corto periodo de tiempo que se debe para que en el resto de la extrusión el material salga de manera fluida sin ningún tipo de problema.

4.2.5 Observación de las piezas extruidas

En los subapartados anteriores, se explicó y se mostró todo lo relativo a los perfiles de posición, velocidad y aceleración, es decir, a los datos obtenidos a través del encoder o datos obtenidos por métodos analíticos/teóricos. No obstante, también es importante la calidad de las piezas obtenidas mediante la extrusión para tener una mejor idea de lo que realmente se está imprimiendo. Para ello, en las siguientes figuras se presentan distintas fotografías de algunas partes de las piezas para observar ciertos aspectos con mejor detalle.

En la figura 4.25, se observa la zona donde se realiza el inicio de la trayectoria de ida, es decir, donde se inicia la primera pasada y donde finaliza la segunda pasada para las distintas velocidades utilizadas. Se puede apreciar claramente la diferencia que hay en esta zona a medida que la velocidad va aumentando. En la figura 4.25a, correspondiente a la velocidad más pequeña se ve que todas las capas son completamente semejantes sin haber ninguna irregularidad, sin embargo, en la figura 4.25b, correspondiente a una velocidad mayor a la anterior, ya se comienzan a

observar diferencias por ejemplo en el grosor del espesor de pared donde hay una mayor acumulación de material extruido. En las siguientes figuras, 4.25c y 4.25d se aprecia también este aumento de grosor del espesor de pared respecto a la figura 4.25a. Además, en las velocidades más altas se observa un deposición más excesiva e irregularidades en la forma de las capas iniciales.

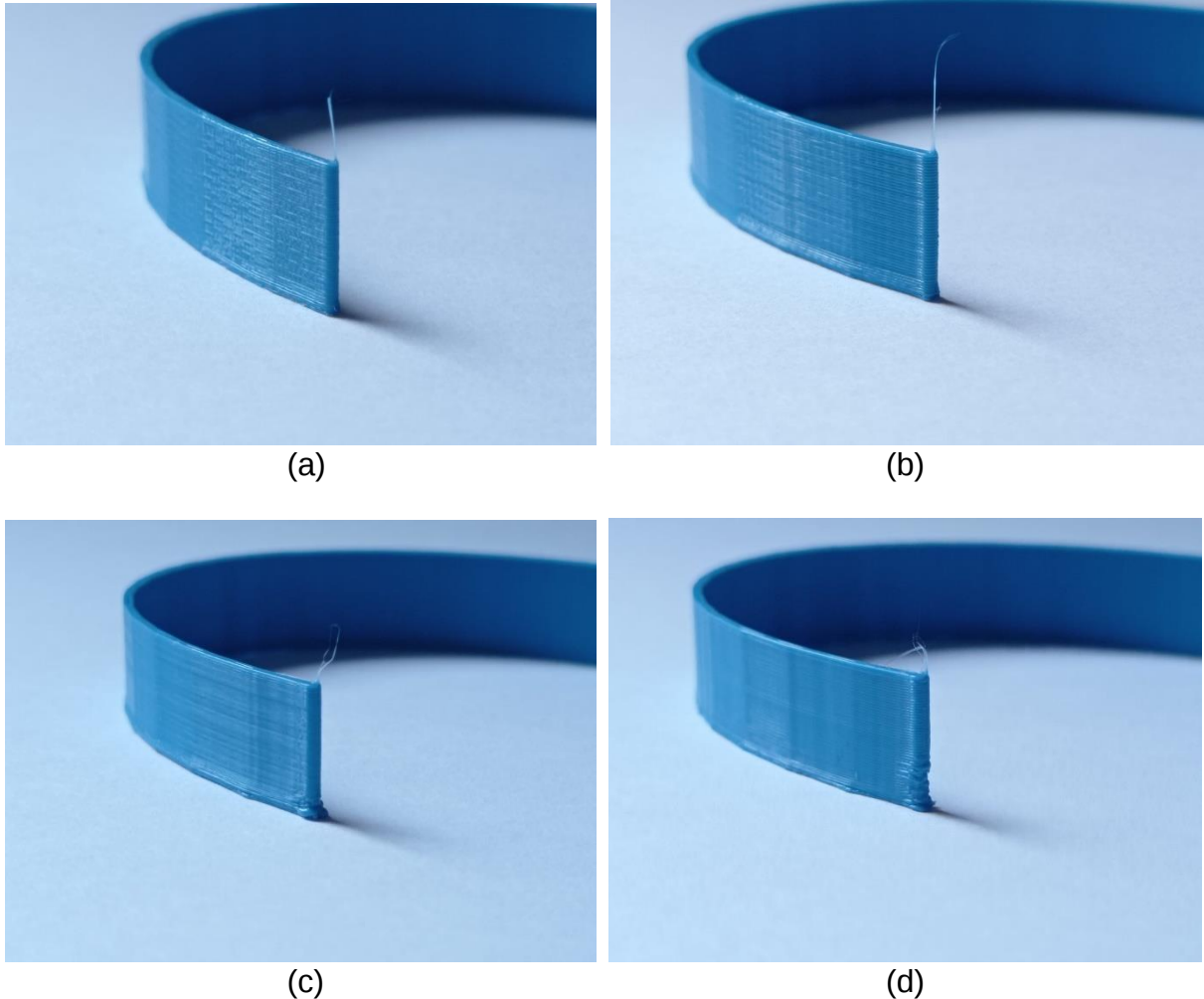


Figura 4.25. Detalle de la pieza en el inicio de la trayectoria de ida para las distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min

En la figura 4.26, se observa la zona extruida donde se inicia la trayectoria de vuelta, es decir, donde finaliza la primera pasada y se inicia la segunda pasada. En este caso, se aprecia como en la figura 4.26a para la velocidad más pequeña las capas son completamente regulares al igual que en el caso anterior. En los siguientes casos sigue habiendo diferencias con respecto a la figura 4.26a pero estas diferencias son menores que en las mostradas en la figura 4.25 debido a que en esta zona no se produce un desnivel en el eje Z producido por el cambio de capa. Sin embargo, se

aprecia como las diferencias son más notable a medida que aumenta la velocidad de programación.

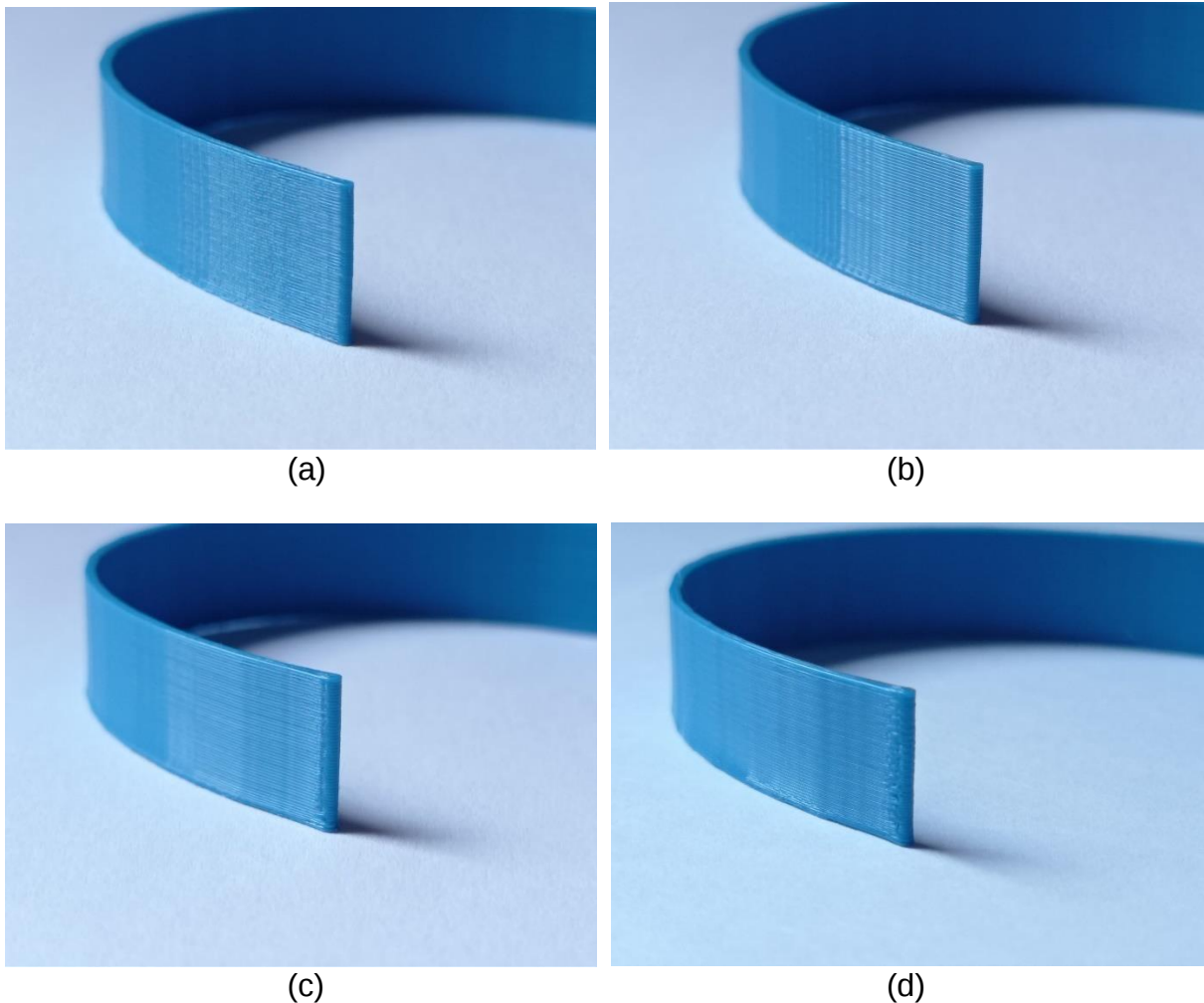


Figura 4.26. Detalle de la pieza en el inicio de la trayectoria de vuelta para las distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min

Y, por último, en la figura 4.27, se ha mostrado una zona de la pieza extruida correspondiente a una curva donde a simple vista se observa como las distintas capas en cada pieza son bastantes homogéneas. Aunque, si se pueden apreciar diferencias entre las distintas figuras mostradas. Se observa como para una velocidad más pequeña, figura 4.27a, el espesor de pared permanece prácticamente constante en todo movimiento, sin embargo, a medida que aumenta la velocidad dicho espesor va cambiando apareciendo un espesor más irregular en los puntos donde se inician los cambios de trayectorias más suaves. Los cambios de espesor o las distintas zonas regulares que se observan entre puntos son lógica debido a que se utiliza el comando G01. Si se hubiesen utilizado los comandos G02 o G03, se podrían observar que estas diferencias de espesor se reducirían en gran medida.

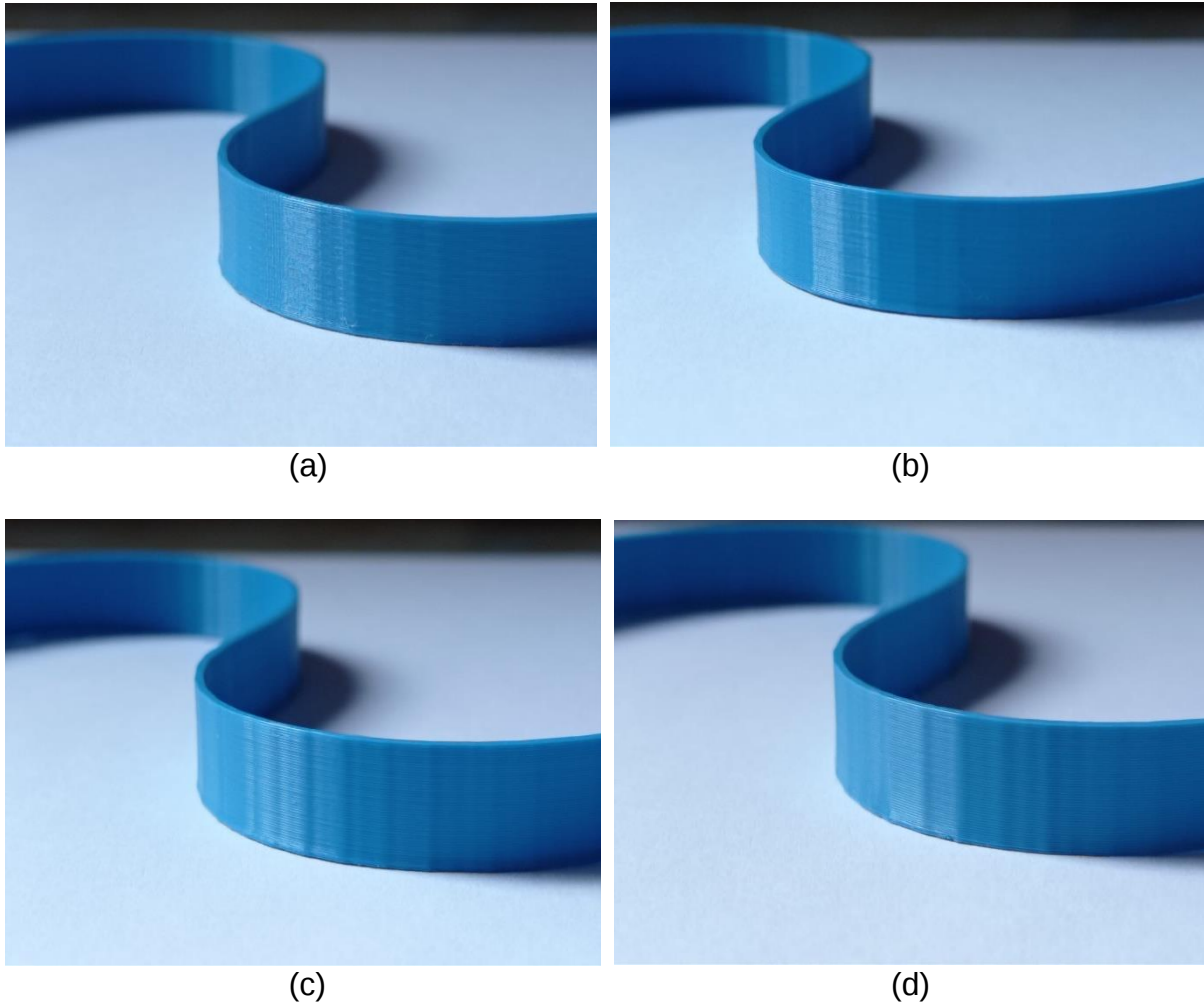


Figura 4.27. Detalle de la pieza en una zona curva para las distintas velocidades de programación (a) 500 mm/min, (b) 2000 mm/min, (c) 4000 mm/min, (d) 7000 mm/min

4.2.6 Conclusiones

Las conclusiones que se obtienen del análisis de la trayectoria durante la extrusión son:

- ✓ Con respecto al perfil de posición, se ha mostrado como prácticamente no existe ninguna diferencia entre el perfil analítico y teórico, a pesar de tener que realizar dos pasadas para realizar la trayectoria sinusoidal completa correspondiente al espesor marcado inicialmente.
- ✓ Los perfiles de velocidad obtenidos han sido bastante representativos en ambos ejes, con la coincidencia en la forma de los perfiles tanto teórico como experimental aunque para las velocidades más altas existiesen

diferencias entre los valores de velocidad alcanzados debido a las limitaciones de la impresora.

- ✓ Los perfiles de aceleración obtenidos de manera experimental, también han resultado ser positivos con la coincidencia de las distintas zonas de aceleración y desaceleración, correspondientes al aumento o disminución de la velocidad.
- ✓ La comparación entre los perfiles de velocidad del movimiento plano y del movimiento del eje de extrusión han sido muy semejantes en términos de tiempo y de cambios de trayectoria coincidiendo ambos en los puntos importantes donde se producía un cambio de trayectoria.
- ✓ Además, se ha analizado la longitud extruida de material en función del tiempo y ha resultado ser muy representativa, mostrando una deposición lineal del material en casi todo el recorrido.
- ✓ Por último, en las imágenes mostradas de las piezas se ha conseguido analizar las distintas diferencias existentes entre los casos realizados, donde se ha observado como para una velocidad de programación menor los resultados obtenidos son muy buenos, en términos de calidad de la pieza.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para finalizar este trabajo se mencionarán las principales conclusiones y posibles trabajos futuros. Como principales conclusiones, se establecen las siguientes:

- La calibración del equipo, un objetivo importante marcado en este proyecto, ha resultado ser bastante favorable con respecto a los resultados obtenidos en los distintos análisis realizados destacando las gráficas obtenidas del comportamiento de la velocidad en ambas impresoras, así como el comportamiento de la velocidad experimental en función de la distancia recorrida y finalizando con los perfiles de posición, velocidad y aceleración obtenidos donde la identificación de las distintas zonas importantes de estos gráficos ha sido posible analizar.
- En cuanto a los perfiles obtenidos en la trayectoria en vacío, los resultados del perfil de posición, velocidad y aceleración han sido muy

representativos en general. Destacando la gran coincidencia de la comparación de los distintos perfiles ya sea teórico, analítico o experimental a la velocidad más baja utilizada. Sin embargo, dicha coincidencia en los perfiles de velocidad a medida que la velocidad de programación iba aumentando se iba diluyendo, apareciendo cada vez más diferencias en la velocidad alcanzada, o en los tiempos ejecutados debido al error cometido en la realización del modelo matemático al no contemplar que la aceleración es pequeña en las velocidades de programación altas ensayadas.

- Los resultados obtenidos para la extrusión de la trayectoria han sido muy positivos. En primer lugar, la obtención de los perfiles de posición donde las trayectorias teóricas y analíticas coinciden bastante bien entre sí, a pesar de tener que realizar dos pasadas para realizar una trayectoria completa. Los perfiles de velocidad han resultado ser muy representativos denotando las distintas zonas importantes del perfil y la coincidencia entre el perfil teórico y experimental a velocidades bajas.
- Los perfiles de velocidad obtenidos para el motor paso a paso encargado de la extrusión también han sido muy representativos, destacando de igual manera las distintas zonas en el perfil donde se producían los cambios de trayectoria en la realización de la misma. Recalcando la gran coincidencia entre los perfiles de velocidad experimentales del eje X e Y con el eje de extrusión E, donde los distintos cambios de trayectoria coincidían en el mismo punto.
- Así pues, se ha podido analizar como el concepto del cornering está muy influenciado por la velocidad de programación que se le indique a la trayectoria a ejecutar. Una trayectoria realizada con una velocidad baja, o velocidad óptima obtiene una pieza con unas grandes precisiones en la ejecución de la misma, sin embargo, si se realiza el mismo trabajo a una velocidad alta que no sea óptima para dichas trayectorias producirá imprecisiones en la pieza final obtenida.

En vista de los resultados obtenidos y de la metodología desarrollada, se podrían establecer los siguientes trabajos futuros:

- Comparación de los perfiles de posición, velocidad y aceleración para una misma trayectoria en distintas impresoras utilizando este sistema de medida de perfiles de posición, velocidad y aceleración en procesos de fabricación aditiva.
- Comparación de los perfiles de velocidad para una trayectoria aportando un analizador digital.
- Realización del análisis de los valores de velocidad alcanzados para los ejes X e Y tanto en el movimiento independiente como simultáneo, pero en este caso, en vez de en trayectoria rectas que sea en trayectorias circulares donde el radio utilizado tenga influencia con la longitud de las trayectorias rectas empleadas en este trabajo, $2 \cdot \pi \cdot R = L$, utilizando los comandos G02 o G03 que sería lo más ideal para dicho análisis.

6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Comminal, R., Serdeczny, M.P., Pedersen, D.B. y Spangenberg, J. Motion planning and numerical simulation of material deposition at corners in extrusion additive manufacturing. Additive Manufacturing. 29 (2019) 100753
- [2] Dorado-Vicente, R., Medina-Sánchez, G., García-Collado, A., Carou, D. y Perez, M. How to use and compare interpolation schemes in Fused Deposition Modeling. Procedia Manufacturing 41 (2019) 343-350
- [3] Impresoras 3D. Disponible en: <https://www.impresoras3d.com/producto/impresora-3d-creality-ender-3-pro/> (Visitado el día 3 marzo 2020)
- [4] Impresora RepRap. Disponible en: <https://asceps.org/es/bcn-3d/>
- [5] uStepper S-lite. Disponible en: https://ustepper.com/store/ustepper-boards/26-42-ustepper-s-lite.html#/28-connector-dc_jack/31-stepper_motor-no_stepper_motor (Visitado el día 26 septiembre 2019)
- [6] uStepper. Disponible en: <http://ustepper.com/docs/ustepperslite/html/classuStepperEncoder.html> (Visitado el día 7 noviembre 2019)
- [7] PLX-DAQ.v2. Disponible en: <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=437398.msg3251256#msg3251256> (Visitado el día 11 noviembre 2019)
- [8] Arduino. Disponible en: <https://www.arduino.cc/reference/en/> (Visitado el día 12 noviembre 2019)
- [9] Matlab. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- [10] Configuración Marlin. Disponible en: https://www.staticboards.es/blog/marlin-instalacion-configuracion/#Ajustar_la_velocidad_y_aceleracion_maxima (Visitado el día 15 abril 2020)
- [11] Calculadora de resolución. Disponible en: https://blog.prusaprinters.org/calculator_3416/ (Visitado el día 10 julio 2020)

7. ANEXOS

7.1 Anexo 1. Códigos de programación en Arduino

7.1.1 Código de programación para la obtención del ángulo actual del eje del motor

```
#include <i2cMaster.h>           //Estas cuatro librerías corresponden
#include <TMC2208.h>             //... a la librería u-Stepper S-lite
#include <uStepperServo.h>
#include <uStepperSLite.h>

uStepperSLite stepper;          //Se inicia la variable stepper
float Angulo;                   //Definimos la variable Angulo como float

void setup() {
  stepper.setup();               //Inicialización de u-Stepper S-lite
  Serial.begin(250000);          //Inicialización del serial de arduino
}

void loop() {
  Serial.print("Angulo: ");      //Escribe en pantalla Ángulo
  Angulo = stepper.encoder.getAngle(); //Obtiene el valor del ángulo
  actual del eje del motor
  Serial.print(Angulo);          //Escribe en pantalla el valor de la variable
  Angulo
  Serial.println(" Grados");     //Escribe en pantalla Grados
  delay(10);                     //Un delay entre medida y medida
}
```

7.1.2 Código de programación para la obtención del ángulo movido del eje del motor

```
#include <i2cMaster.h>           //Estas cuatro librerías corresponden
#include <TMC2208.h>             //... a la librería u-Stepper S-lite
#include <uStepperServo.h>
#include <uStepperSLite.h>

uStepperSLite stepper;          //Se inicia la variable stepper
float Angulo;                   //Definimos la variable Angulo como float

void setup() {
  stepper.setup();               //Inicialización de u-Stepper S-lite
  Serial.begin(250000);          //Inicialización del serial de arduino
}

void loop() {
  Serial.print("Angulo: ");      //Escribe en pantalla Ángulo
  Angulo = stepper.encoder.getAngleMoved(); //Obtiene el valor del
  ángulo movido
  Serial.print(Angulo);          //Escribe en pantalla el valor de la variable
  Angulo
  Serial.println(" Grados");     //Escribe en pantalla Grados
  delay(10);                     //Un delay entre medida y medida
}
```

7.1.3 Código de programación para la obtención de la velocidad actual del eje del motor

```
#include <i2cMaster.h>           //Estas cuatro librerías corresponden a la
#include <TMC2208.h>             //... librería u-Stepper S-lite
#include <uStepperServo.h>
#include <uStepperSLite.h>

uStepperSLite stepper;          //Se inicia la variable stepper
float Velocidad;                //Definimos la variable Velocidad como float
bool unit;                      //Definimos la variable unit como bool
                                //(Nos va a permitir saber que unidades da la
                                //funcion getSpeed)

funcion getSpeed()

void setup() {
    stepper.setup();             //Inicialización de u-Stepper S-lite
    Serial.begin(250000);        //Inicialización del serial de arduino
}

void loop() {
    Velocidad = stepper.encoder.getSpeed(unit); //Obtiene el valor actual de
la velocidad del motor
    if(unit == RPM)              //Comparamos si el valor de las unidades es
igual a RPM
    {
        Serial.print("Velocidad: ");          //Escribe en pantalla Velocidad
        Serial.print(Velocidad);              //Escribe en pantalla el valor de la
variable Velocidad
        Serial.println(" RPM");               //Escribe en pantalla RPM
        delay(10);                            //Un delay entre medida y medida
    }
    else
    {
        Serial.print("Velocidad: ");          //Escribe en pantalla Velocidad
        Serial.print(Velocidad);              //Escribe en pantalla el valor de la
variable Velocidad
        Serial.println(" SPS");               //Escribe en pantalla SPS(steps per second)
        delay(10);                            //Un delay entre medida y medida
    }
}
```

7.1.4 Código de programación para el envío de datos desde Arduino a Excel

```
#include <i2cMaster.h>           //Estas cuatro librerías corresponden
#include <TMC2208.h>             //... a la librería u-Stepper S-lite
#include <uStepperServo.h>
#include <uStepperSLite.h>

unsigned long int milli_time;    //Inicialización de la variable para el
tiempo
uStepperSLite stepper;          //Se inicia la variable stepper
float Angulo;                   //Definimos la variable Angulo como float

void setup() {
    stepper.setup();             //Inicialización del u-Stepper S-lite
    Serial.begin(250000);        //Inicialización del serial de arduino
    Serial.println("CLEARDATA"); //CLEARDATA: Sirve para eliminar los datos de
la hoja excel
```

```

    Serial.println("CLEAR SHEET"); //CLEAR SHEET: Sirve para eliminar los
    nombres de las columnas
    Serial.println("LABEL,Hora,Tiempo(milisegundos),Angulo"); //LABEL:
    Escribe el nombre de las columnas de excel
}

void loop() {
    milli_time = millis(); //Obtengo en la variable milli_time
                           //... los milisegundos que van pasando
    Angulo = stepper.encoder.getAngle(); //Obtiene el valor del ángulo
    actual del eje del motor
    Serial.print("DATA,TIME,"); //Escribe en excel la hora
    Serial.print(milli_time); //Escribe en excel los milisegundos de
    cada toma de datos
    Serial.print(",");
    Serial.println(Angulo); //Escribe en excel el angulo
    delay(10); //Un delay entre medida y medida
}

```

7.1.5 Código de programación para la obtención del ángulo y de la velocidad actual y posterior envío de datos desde Arduino a Excel

```

#include <i2cMaster.h> //Estas cuatro librerías corresponden a la
librería u-Stepper S-lite
#include <TMC2208.h>
#include <uStepperServo.h>
#include <uStepperSLite.h>

unsigned long int milli_time; //Variable para el tiempo
uStepperSLite stepper; //Se inicia la variable stepper
float Velocidad; //Definimos la variable Velocidad como float
float Angulo; //Definimos la variable Angulo como float

void setup() {
    stepper.setup(); //Inicialización del u-Stepper S-lite
    Serial.begin(9600); //Inicialización del serial de arduino
    Serial.println("CLEAR SHEET"); //Limpia los nombres de las columnas
    Serial.println("CLEARDATA"); //Sirve para eliminar los datos de la
    hoja excel
    Serial.println("LABEL,Hora,Tiempo(ms),Vmedida(SPS),Angulo(Grados)");
    //LABEL: Escribe el nombre de las columnas de excel
}

void loop() {
    milli_time = millis(); //Obtengo en la variable milli_time los
    milisegundos que van pasando
    Velocidad = - stepper.encoder.getSpeed(); //Obtiene el valor de la
    velocidad actual del eje del motor
    Angulo = - stepper.encoder.getAngleMoved(); //Obtiene el valor del ángulo
    movido del eje del motor
    Serial.print("DATA,TIME,"); //Escribe en excel la hora
    Serial.print(milli_time); //Escribe en excel los milisegundos
    que van pasando entre dato y dato
    Serial.print(",");
    Serial.print(Velocidad); //Escribe en excel el dato de la velocidad
    medida
    Serial.print(",");
    Serial.println(Angulo); //Escribe en excel el dato del angulo medido
    delay(0.0625); //Tomar datos cada 0.0625 ms
}

```

7.2 Anexo 2. Códigos de programación en Matlab

7.2.1 Código de programación para la obtención de los perfiles de posición, velocidad y aceleración en trayectorias rectas en un único eje.

CÓDIGO PRINCIPAL

```
%PROGRAMA: Procesado_de_datos
%ENTRADAS: DATOS_EJE_X, DATOS_TEORICOS
%SALIDAS: GRÁFICAS DE LOS PERFILES DE POSICIÓN, VELOCIDAD Y ACELERACIÓN
%VARIABLES: POS_X_teo, POS_Y_teo, DATOS_T_V_A_EJE_X,
%DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW, TamFilas_X_New, DATOS_FINALES, DATOS_FINALES_NEW

clear all
close all
clc
%%%% DATOS OBTENIDOS DEL ENCODER %%%%
DATOS_EJE_X = xlsread('1. T-V-P (X10 F500) 0_0625ms.xlsm');

%%%% DATOS TEÓRICOS %%%%
DATOS_TEORICOS = xlsread('1. DATOS TEÓRICOS.xlsx');
POS_X_teo = DATOS_TEORICOS(:,1);
POS_Y_teo = DATOS_TEORICOS(:,2);

%%%% FUNCIÓN QUE OBTIENE EL TIEMPO, VELOCIDAD Y POSICIÓN EN UNA MATRIZ %%%%
[DATOS_T_V_A_EJE_X] = Obt_T_V_P(DATOS_EJE_X);

%%%% FUNCIÓN QUE ELIMINA LOS DATOS INNECESARIOS AL COMIENZO DE LA LECTURA %%%%
%%%%% EJE X %%%%
[DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW, TamFilas_X_New] =
Elim_Datos_Ini(DATOS_T_V_A_EJE_X);

%%%%% CÁLCULO DE LA DISTANCIA A PARTIR DEL ÁNGULO (Distancia (mm)) %%%%
[DATOS_FINALES] =
Calc_Dist(TamFilas_X_New, DATOS_TEORICOS, DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW);

%%%%% ELIMINACIÓN DE LOS ÚLTIMOS DATOS QUE NO APORTAN NADA %%%%
[DATOS_FINALES_NEW] = Elim_Datos_Fin(DATOS_FINALES);

%%%%% CÁLCULO DE LA ACELERACIÓN %%%%
[DATOS_FINALES_NEW] = Calc_Acel(DATOS_FINALES_NEW);

%%%%% REPRESENTACIÓN DEL PERFIL DE POSICIÓN %%%%
%%%%% Gráfica comparativa teórica/analítica de la posición en X e
Y
figure('Name', 'Gráfica Comparativa Teo vs Anal X e
Y', 'NumberTitle', 'off');
plot(POS_X_teo, POS_Y_teo, '-k')
hold on
plot(DATOS_FINALES_NEW(:,3), DATOS_FINALES_NEW(:,5), 'rx')
xlabel('Posición eje X (mm)')
ylabel('Posición eje Y (mm)')
legend({'Trayectoria teórica', 'Trayectoria
analítica'}, 'Location', 'Southwest')
```

```

    %%%% REPRESENTACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD %%%%
    %%%% Gráfica experimental del perfil de velocidad en X
    figure('Name','PERFIL DE VELOCIDAD EXPERIMENTAL EN EL EJE
X','NumberTitle','off');
    plot(DATOS_FINALES_NEW(:,1),abs(DATOS_FINALES_NEW(:,2)),'LineWidth',1.5)
    xlabel('Tiempo (s)')
    ylabel('Velocidad (mm/s)')

    %%%% REPRESENTACIÓN DEL PERFIL DE ACELERACIÓN %%%%
    %%%% Gráfica experimental del perfil de aceleración en X
    figure('Name','PERFIL DE ACELERACIÓN EXPERIMENTAL EN EL EJE
X','NumberTitle','off');
    plot(DATOS_FINALES_NEW(:,1),DATOS_FINALES_NEW(:,4),'LineWidth',1.5)
    xlabel('Tiempo (s)')
    ylabel('Aceleración (mm/s^2)')

    %%%% Grafica COMPARATIVA DEL PERFIL DEL VELOCIDAD Y DE ACELERACIÓN
    figure('Name','PERFIL DE VELOCIDAD Y ACELERACIÓN EN EL EJE
X','NumberTitle','off');
    yyaxis left
    plot(DATOS_FINALES_NEW(:,1),abs(DATOS_FINALES_NEW(:,2)),'LineWidth',1.5)
    xlabel('Tiempo (s)')
    ylabel('Velocidad (mm/s)')
    yyaxis right
    plot(DATOS_FINALES_NEW(:,1),DATOS_FINALES_NEW(:,4),'LineWidth',1.5)
    xlabel('Tiempo (s)')
    ylabel('Aceleración (mm/s^2)')
    legend({'Perfil de velocidad','Perfil de
aceleración'},'Location','Southwest')

```

FUNCIÓN 1

```

function [Matriz_T_V_A] = Obt_T_V_P(DATOS_EJE)

%FUNCIÓN: [Matriz_T_V_A] = Obt_T_V_P(DATOS_EJE)
%DESCRIPCIÓN: Función que de los datos leídos del eje (DATOS_EJE) extrae
%las columnas del tiempo, velocidad y angulo
%PARÁMETROS DE ENTRADA: DATOS_EJE
%PARÁMETROS DE SALIDA: Matriz_T_V_A
%VARIABLES: ...

    Matriz_T_V_A(:,1) = DATOS_EJE(:,2); %%% Tiempo T(ms)
    Matriz_T_V_A(:,2) = DATOS_EJE(:,3); %%% Velocidad V(steps/s)
    Matriz_T_V_A(:,3) = DATOS_EJE(:,4); %%% Angulo Ang(°)
end

```

FUNCIÓN 2

```

function [DATOS_T_V_A_EJE_NEW,TamFilas_New] =
Elim_Datos_Ini(DATOS_T_V_A_EJE)

%FUNCIÓN: [DATOS_T_V_A_EJE_NEW,TamFilas_New] =
Elim_Datos_Ini(DATOS_T_V_A_EJE)
%DESCRIPCIÓN: Función que elimina los datos innecesarios del comienzo de la
%lectura
%PARÁMETROS DE ENTRADA: DATOS_T_V_A_EJE
%PARÁMETROS DE SALIDA: DATOS_T_V_A_EJE_NEW,TamFilas_New
%VARIABLES: TamFilas, Var_Aux_1, Var_Aux_2, i, j

```

```

TamFilas = size(DATOS_T_V_A_EJE);
TamFilas = TamFilas(1,1);
Var_Aux_1 = 1;
Var_Aux_2 = 2;
DATOS_T_V_A_EJE_NEW(1,1) = 0; %%% Tiempo T(ms)
DATOS_T_V_A_EJE_NEW(1,2) = 0; %%% Velocidad V(steps/s)
DATOS_T_V_A_EJE_NEW(1,3) = 0; %%% Angulo Ang(°)
for i = 1:round(TamFilas/2) %%%% COMPARACIÓN DE VELOCIDAD %%%%
    if abs(DATOS_T_V_A_EJE(i,2)) < 5
        Var_Aux_1 = Var_Aux_1 + 1;
    else
        DATOS_T_V_A_EJE_NEW(Var_Aux_2,1) = DATOS_T_V_A_EJE(i,1);
        DATOS_T_V_A_EJE_NEW(Var_Aux_2,2) = DATOS_T_V_A_EJE(i,2);
        DATOS_T_V_A_EJE_NEW(Var_Aux_2,3) = DATOS_T_V_A_EJE(i,3);
        Var_Aux_2 = Var_Aux_2 + 1;
    end
end

i = i + 1;

for i = (round(TamFilas/2)+1):TamFilas %%%% COPIAR RESTO DE DATOS %%%%
    DATOS_T_V_A_EJE_NEW(Var_Aux_2,1) = DATOS_T_V_A_EJE(i,1);
    DATOS_T_V_A_EJE_NEW(Var_Aux_2,2) = DATOS_T_V_A_EJE(i,2);
    DATOS_T_V_A_EJE_NEW(Var_Aux_2,3) = DATOS_T_V_A_EJE(i,3);
    Var_Aux_2 = Var_Aux_2 + 1;
end

TamFilas_New = size(DATOS_T_V_A_EJE_NEW);
TamFilas_New = TamFilas_New(1,1);
for j = 2:TamFilas_New %%%% INICIALIZACIÓN DEL TIEMPO A 0
    DATOS_T_V_A_EJE_NEW(j,1) = DATOS_T_V_A_EJE_NEW(j,1) -
DATOS_T_V_A_EJE(Var_Aux_1-1,1);
end
end

```

FUNCIÓN 3

```

function [DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW] =
Calc_Dist(TamFilas_X_New,DATOS_TEORICOS,DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW)

%FUNCIÓN: [DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW] =
Calc_Dist(TamFilas_X_New,DATOS_TEORICOS,DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW)
%DESCRIPCIÓN: Función que permite el cálculo de la distancia a través de
%una fórmula analítica
%PARÁMETROS DE ENTRADA: TamFilas_X_New,DATOS_TEORICOS,DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW
%PARÁMETROS DE SALIDA: DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW
%VARIABLES: i

for i = 1:TamFilas_X_New
    DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW(i,3) = 20*2*DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW(i,3)/360 +
DATOS_TEORICOS(1,1);
    DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW(i,5) = 0;
end
end

```

FUNCIÓN 4

```

function [DATOS_FINALES_NEW] = Elim_Datos_Fin(DATOS_FINALES)

%FUNCIÓN: [DATOS_FINALES_NEW] = Elim_Datos_Fin(DATOS_FINALES)

```

```

%DESCRIPCIÓN: Función que elimina los últimos datos de la lectura que son
%innecesarios
%PARÁMETROS DE ENTRADA: DATOS_FINALES
%PARÁMETROS DE SALIDA: DATOS_FINALES_NEW
%VARIABLES: TamFilas_DF, i

    %%% CAMBIO DE UNIDADES %%%
    DATOS_FINALES(:,1) = DATOS_FINALES(:,1)/1000; %%% Tiempo T(s)
    DATOS_FINALES(:,2) = DATOS_FINALES(:,2)/80; %%% V(mm/s)

    TamFilas_DF = size(DATOS_FINALES);
    TamFilas_DF = TamFilas_DF(1,1);
    DATOS_FINALES_NEW(1,5) = 0; %%% Columna posicion del eje Y (valor es 0)
    for i = 1:(TamFilas_DF - 1)
        if (DATOS_FINALES(i,2) < 0.05) && (DATOS_FINALES(i,3) ==
DATOS_FINALES(i+1,3))
            break;
        else
            DATOS_FINALES_NEW(i,1) = DATOS_FINALES(i,1);
            DATOS_FINALES_NEW(i,2) = DATOS_FINALES(i,2);
            DATOS_FINALES_NEW(i,3) = DATOS_FINALES(i,3);
            DATOS_FINALES_NEW(i,5) = DATOS_FINALES(i,5);
        end
    end
end
end

```

FUNCIÓN 5

```

function [DATOS_FINALES_NEW] = Calc_Acel(DATOS_FINALES_NEW)

%FUNCIÓN: [DATOS_FINALES_NEW] = Calc_Acel(DATOS_FINALES_NEW)
%DESCRIPCIÓN: Cálculo de la aceleración a cada punto medido
%PARÁMETROS DE ENTRADA: DATOS_FINALES_NEW
%PARÁMETROS DE SALIDA: DATOS_FINALES_NEW
%VARIABLES: TamFilas_DFN, Acel_X, Tiempo_X, Velocidad_X, Distancia_X,
%Distancia_Y, i

    TamFilas_DFN = size(DATOS_FINALES_NEW);
    TamFilas_DFN = TamFilas_DFN(1,1);
    Acel_X = 0;
    Tiempo_X(:,1) = DATOS_FINALES_NEW(:,1);
    Velocidad_X(:,1) = DATOS_FINALES_NEW(:,2);
    Distancia_X(:,1) = DATOS_FINALES_NEW(:,3);
    Distancia_Y(:,1) = DATOS_FINALES_NEW(:,5);
    for i = 1:(TamFilas_DFN - 1)
        Acel_X(i+1,1) = (DATOS_FINALES_NEW(i+1,2) -
DATOS_FINALES_NEW(i,2))/(DATOS_FINALES_NEW(i+1,1) -
DATOS_FINALES_NEW(i,1)); %% A(mm/s^2)
    end
    DATOS_FINALES_NEW(:,1) = Tiempo_X(:,1); %%% Tiempo T(s)
    DATOS_FINALES_NEW(:,2) = Velocidad_X(:,1); %%% V(mm/s)
    DATOS_FINALES_NEW(:,3) = Distancia_X(:,1); %%% D(mm)
    DATOS_FINALES_NEW(:,4) = Acel_X(:,1); %%% A(mm/s^2)
    DATOS_FINALES_NEW(:,5) = Distancia_Y(:,1); %%% D(mm)
End

```

7.2.2 Código de programación para la obtención de los perfiles de posición, velocidad y aceleración en trayectorias rectas en dos ejes de coordenadas.

CÓDIGO PRINCIPAL

```
%PROGRAMA: Procesado_de_datos
%ENTRADAS: DATOS_EJE_X, DATOS_EJE_Y, DATOS_TEORICOS
%SALIDAS: GRÁFICAS DE LOS PERFILES DE POSICIÓN, VELOCIDAD Y ACELERACIÓN
%VARIABLES: POS_X_teo, POS_Y_teo, DATOS_T_V_A_EJE_X, DATOS_T_V_A_EJE_Y
%DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW, DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW, TamFilas_X_New,
TamFilas_Y_New,
%DATOS_FINALES, DATOS_FINALES_NEW, DFI

clear all
close all
clc
%%%% DATOS OBTENIDOS DEL ENCODER %%%%
DATOS_EJE_X = xlsread('1. T-V-P (X10 F500) 0_0625ms.xlsm');
DATOS_EJE_Y = xlsread('1. T-V-P (Y10 F500) 0_0625ms.xlsm');

%%%% DATOS TEÓRICOS %%%%
DATOS_TEORICOS = xlsread('1. DATOS TEÓRICOS.xlsx');
POS_X_teo = DATOS_TEORICOS(:,1);
POS_Y_teo = DATOS_TEORICOS(:,2);

%%%% FUNCIÓN QUE OBTIENE EL TIEMPO, VELOCIDAD Y POSICION EN UNA MATRIZ
%%%%%
[DATOS_T_V_A_EJE_X] = Obt_T_V_P(DATOS_EJE_X);
[DATOS_T_V_A_EJE_Y] = Obt_T_V_P(DATOS_EJE_Y);

%%%% FUNCIÓN QUE ELIMINA LOS DATOS INNECESARIOS AL COMIENZO DE LA
LECTURA %%%%
%%%%%%%% EJE X %%%%
[DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,TamFilas_X_New] =
Elim_Datos_Ini(DATOS_T_V_A_EJE_X);

%%%%%%%% EJE Y %%%%
[DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW,TamFilas_Y_New] =
Elim_Datos_Ini(DATOS_T_V_A_EJE_Y);

%%%% CÁLCULO DE LA DISTANCIA A PARTIR DEL ÁNGULO (Distancia (mm))
%%%%%
[DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW] =
Calc_Dist(TamFilas_X_New...
,TamFilas_Y_New,DATOS_TEORICOS,DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW)
;

%%%% FUNCIÓN QUE CALCULA LA UNIÓN DE LOS MISMOS TIEMPOS MEDIDOS %%%%
[DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW] =
Union_Tiempos(TamFilas_X_New...
,TamFilas_Y_New,DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW);

%%%% FUNCIÓN QUE UNE LOS DATOS VÁLIDOS MEDIDOS EN UNA MISMA MATRIZ
%%%%%
[DATOS_FINALES] =
Union_Datos(DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW);
```

```

##### ELIMINACIÓN DE LOS ÚLTIMOS DATOS QUE NO APORTAN NADA #####
[DATOS_FINALES_NEW] = Elim_Datos_Fin(DATOS_FINALES);

##### CÁLCULO DE LA ACELERACIÓN #####
[DATOS_FINALES_NEW] = Calc_Acel(DATOS_FINALES_NEW);

##### INTERPOLACIÓN #####
[DFI] = Interpolacion(DATOS_FINALES_NEW);

##### REPRESENTACIÓN DEL PERFIL DE POSICIÓN #####
##### Gráfica comparativa teórica/analítica de la posición en X e Y
figure('Name','Grafica Comparativa Teo vs Anal X e
Y','NumberTitle','off');
plot(POS_X_teo,POS_Y_teo,'-k')
hold on
plot(DFI(:,3),DFI(:,7),'rx')
axis([0 10 0 10]) %ADAPTAR A LA RECTA RECORRIDA
xlabel('Posición eje X (mm)')
ylabel('Posición eje Y (mm)')
legend({'Trayectoria teórica','Trayectoria
analítica'},'Location','Southeast')

##### REPRESENTACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD #####
##### Gráfica experimental comparativa de la velocidad en el eje
##### X e Y
figure('Name','PERFIL DE VELOCIDAD EXPERIMENTAL EN EL EJE X e
Y','NumberTitle','off');
plot(DFI(:,1),abs(DFI(:,2)),'LineWidth',1.5)
hold on
plot(DFI(:,5),abs(DFI(:,6)),'LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad (mm/s)')
legend({'Velocidad EJE X','Velocidad EJE Y'},'Location','Northeast')

##### REPRESENTACIÓN DE LOS PERFILES DE ACELERACIÓN EN X e Y #####
##### Gráfica experimental comparativa de la aceleración en el eje
##### X e Y
figure('Name','PERFIL DE ACELERACIÓN EXPERIMENTAL EN EL EJE X e
Y','NumberTitle','off');
plot(DFI(:,1),DFI(:,4),'LineWidth',1.5)
hold on
plot(DFI(:,5),DFI(:,8),'LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Aceleración (mm/s^2)')
legend({'Aceleración EJE X','Aceleración EJE Y'},'Location','Northeast')

##### REPRESENTACIÓN DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD Y ACELERACIÓN EN X e Y
#####
##### Gráfica experimental comparativa de la velocidad y la
aceleración en el eje
##### X e Y
figure('Name','PERFIL DE ACELERACIÓN EXPERIMENTAL EN EL EJE X e
Y','NumberTitle','off');
yyaxis left
plot(DFI(:,1),abs(DFI(:,2)),'-b','LineWidth',1.5)
hold on
plot(DFI(:,5),abs(DFI(:,6)),'-r','LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad (mm/s)')
yyaxis right

```

```

plot(DFI(:,1),DFI(:,4),'-g','LineWidth',1.5)
hold on
plot(DFI(:,5),DFI(:,8),'-k','LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Aceleración (mm/s^2)')
legend({'Velocidad EJE X','Velocidad EJE Y','Aceleración EJE X','Aceleración EJE Y'},'Location','Northeast')

```

FUNCIÓN 1

Equivalente a la función 1 del anexo 7.2.1

FUNCIÓN 2

Equivalente a la función 2 del anexo 7.2.1

FUNCIÓN 3

```

function [DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW] =
Calc_Dist(TamFilas_X_New,TamFilas_Y_New,DATOS_TEORICOS,DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW)

%FUNCIÓN: [DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW] =
Calc_Dist(TamFilas_X_New,TamFilas_Y_New,DATOS_TEORICOS,DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW)
%DESCRIPCIÓN: Función que permite el cálculo de la distancia a través de
%una fórmula analítica en los ejes X e Y
%PARÁMETROS DE ENTRADA:
TamFilas_X_New,TamFilas_Y_New,DATOS_TEORICOS,DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW
%PARÁMETROS DE SALIDA: DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW
%VARIABLES: i,j

for i = 1:TamFilas_X_New
    DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW(i,3) = 20*2*DADOS_T_V_A_EJE_X_NEW(i,3)/360 +
    DATOS_TEORICOS(1,1);
end

for j = 1:TamFilas_Y_New
    DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW(j,3) = 20*2*DADOS_T_V_A_EJE_Y_NEW(j,3)/360 +
    DATOS_TEORICOS(1,2);
end
end

```

FUNCIÓN 4

```

function [DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW] =
Union_Tiempos(TamFilas_X_New,TamFilas_Y_New,DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW)

%FUNCIÓN: [DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW] =
Union_Tiempos(TamFilas_X_New,TamFilas_Y_New,DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW)
%DESCRIPCIÓN: Función que permite agrupar en una misma fila tiempos
%semejantes de ambos ejes y eliminar la fila que no sea necesaria

```

```

%PARÁMETROS DE ENTRADA:
TamFilas_X_New,TamFilas_Y_New,DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW
%PARÁMETROS DE SALIDA: DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW
%VARIABLES: VALOR_MENOR, i

    if TamFilas_X_New >= TamFilas_Y_New
        VALOR_MENOR = TamFilas_Y_New;
    else
        VALOR_MENOR = TamFilas_X_New;
    end
    i = 1;
    TamFilas_Y_New = TamFilas_Y_New - 1;
    TamFilas_X_New = TamFilas_X_New - 1;
    if i < VALOR_MENOR
        for i = 1:VALOR_MENOR
            if i > VALOR_MENOR
                break;
            end
            if DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW(i,1) - DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW(i,1) > -
18 &&...
                DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW(i,1) - DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW(i,1) <
18
                elseif DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW(i,1) -
DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW(i,1) >= 18
                    DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW(i,:) = [];
                    i = i - 1;
                    VALOR_MENOR = VALOR_MENOR - 1;
                else if DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW(i,1) -
DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW(i,1) <= -18
                    DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW(i,:) = [];
                    i = i - 1;
                    VALOR_MENOR = VALOR_MENOR - 1;
                end
            end
        end
    end
end
end
end

```

FUNCIÓN 5

```

function [DATOS_FINALES] =
Union_Datos(DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW)

%FUNCIÓN: [DATOS_FINALES] =
Union_Datos(DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW)
%DESCRIPCIÓN: Función que une los datos necesarios (Tiempo, velocidad,
%posición) de cada eje en una misma matriz
%PARÁMETROS DE ENTRADA: DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW
%PARÁMETROS DE SALIDA: DATOS_FINALES
%VARIABLES: TAM_VECTOR_EJEX, TAM_VECTOR_EJEY, VARIABLEBUCLE, i

    TAM_VECTOR_EJEX = size(DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW);
    TAM_VECTOR_EJEX = TAM_VECTOR_EJEX(1,1);

    TAM_VECTOR_EJEY = size(DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW);
    TAM_VECTOR_EJEY = TAM_VECTOR_EJEY(1,1);

    if (TAM_VECTOR_EJEY >= TAM_VECTOR_EJEX)
        VARIABLEBUCLE = TAM_VECTOR_EJEX;
    else

```

```

    VARIABLEBUCLE = TAM_VECTOR_EJEY;
end

for i = 1:VARIABLEBUCLE
    DATOS_FINALES(i,1) = DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW(i,1);
    DATOS_FINALES(i,2) = DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW(i,2);
    DATOS_FINALES(i,3) = DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW(i,3);
    DATOS_FINALES(i,4) = DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW(i,1);
    DATOS_FINALES(i,5) = DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW(i,2);
    DATOS_FINALES(i,6) = DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW(i,3);
end
%%% CAMBIO DE UNIDADES %%%
DATOS_FINALES(:,2) = DATOS_FINALES(:,2)/80; %%% Velocidad V(mm/s)
DATOS_FINALES(:,5) = DATOS_FINALES(:,5)/80; %%% Velocidad V(mm/s)

DATOS_FINALES(:,1) = DATOS_FINALES(:,1)/1000; %%% Tiempo T(s)
DATOS_FINALES(:,4) = DATOS_FINALES(:,4)/1000; %%% Tiempo T(s)
end

```

FUNCIÓN 6

```

function [DATOS_FINALES_NEW] = Elim_Datos_Fin(DATOS_FINALES)

%FUNCIÓN: [DATOS_FINALES_NEW] = Elim_Datos_Fin(DATOS_FINALES)
%DESCRIPCIÓN: Función que elimina los últimos datos de la lectura que son
%innecesarios
%PARÁMETROS DE ENTRADA: DATOS_FINALES
%PARÁMETROS DE SALIDA: DATOS_FINALES_NEW
%VARIABLES: TamFilas_DF, i

TamFilas_DF = size(DATOS_FINALES);
TamFilas_DF = TamFilas_DF(1,1);
DATOS_FINALES_NEW(1,6) = 0;
for i = 1:(TamFilas_DF - 1)
    if (DATOS_FINALES(i,2) < 0.01) && (DATOS_FINALES(i,5) < 0.01) &&...
        (DATOS_FINALES(i,3) == DATOS_FINALES(i+1,3)) &&...
        (DATOS_FINALES(i,6) == DATOS_FINALES(i+1,6))
        break;
    else
        DATOS_FINALES_NEW(i,1) = DATOS_FINALES(i,1);
        DATOS_FINALES_NEW(i,2) = DATOS_FINALES(i,2);
        DATOS_FINALES_NEW(i,3) = DATOS_FINALES(i,3);
        DATOS_FINALES_NEW(i,4) = DATOS_FINALES(i,4);
        DATOS_FINALES_NEW(i,5) = DATOS_FINALES(i,5);
        DATOS_FINALES_NEW(i,6) = DATOS_FINALES(i,6);
    end
end
end
end

```

FUNCIÓN 7

```

function [DATOS_FINALES_NEW] = Calc_Acel(DATOS_FINALES_NEW)

%FUNCIÓN: [DATOS_FINALES_NEW] = Calc_Acel(DATOS_FINALES_NEW)
%DESCRIPCIÓN: Cálculo de la aceleración a cada punto medido
%PARÁMETROS DE ENTRADA: DATOS_FINALES_NEW
%PARÁMETROS DE SALIDA: DATOS_FINALES_NEW
%VARIABLES: TamFilas_DFN, Acel_X, Acel_Y, Tiempo_X, Tiempo_Y, Velocidad_X,
%Velocidad_Y, Distancia_X, Distancia_Y, i

```

```

TamFilas_DFN = size(DATOS_FINALES_NEW);
TamFilas_DFN = TamFilas_DFN(1,1);
Acel_X = 0;
Acel_Y = 0;
Tiempo_X(:,1) = DATOS_FINALES_NEW(:,1);
Velocidad_X(:,1) = DATOS_FINALES_NEW(:,2);
Distancia_X(:,1) = DATOS_FINALES_NEW(:,3);
Tiempo_Y(:,1) = DATOS_FINALES_NEW(:,4);
Velocidad_Y(:,1) = DATOS_FINALES_NEW(:,5);
Distancia_Y(:,1) = DATOS_FINALES_NEW(:,6);
for i = 1:(TamFilas_DFN - 1)
    Acel_X(i+1,1) = (DATOS_FINALES_NEW(i+1,2) -
DATOS_FINALES_NEW(i,2))/(DATOS_FINALES_NEW(i+1,1) -
DATOS_FINALES_NEW(i,1)); %% A(mm/s^2)
    Acel_Y(i+1,1) = (DATOS_FINALES_NEW(i+1,5) -
DATOS_FINALES_NEW(i,5))/(DATOS_FINALES_NEW(i+1,4) -
DATOS_FINALES_NEW(i,4)); %% A(mm/s^2)
end
DATOS_FINALES_NEW(:,1) = Tiempo_X(:,1);    %% T(s)
DATOS_FINALES_NEW(:,2) = Velocidad_X(:,1); %% V(mm/s)
DATOS_FINALES_NEW(:,3) = Distancia_X(:,1); %% D(mm)
DATOS_FINALES_NEW(:,4) = Acel_X(:,1);      %% A(mm/s^2)
DATOS_FINALES_NEW(:,5) = Tiempo_Y(:,1);    %% T(s)
DATOS_FINALES_NEW(:,6) = Velocidad_Y(:,1); %% V(mm/s)
DATOS_FINALES_NEW(:,7) = Distancia_Y(:,1); %% D(mm)
DATOS_FINALES_NEW(:,8) = Acel_Y(:,1);      %% A(mm/s^2)
end

```

FUNCIÓN 8

```

function [DFI] = Interpolacion(DATOS_FINALES_NEW)

%FUNCIÓN: [DFI] = Interpolacion(DATOS_FINALES_NEW)
%DESCRIPCIÓN: Función que realiza la interpolación en aquellos datos de una
%misma fila donde los tiempos entre ambos ejes no coinciden en el mismo
%valor
%PARÁMETROS DE ENTRADA: DATOS_FINALES_NEW
%PARÁMETROS DE SALIDA: DFI
%VARIABLES: TamFilas_DFN, i

TamFilas_DFN = size(DATOS_FINALES_NEW);
TamFilas_DFN = TamFilas_DFN(1,1);
for i=1:TamFilas_DFN
    if (DATOS_FINALES_NEW(i,1) == DATOS_FINALES_NEW(i,5))
        DFI(i,:) = DATOS_FINALES_NEW(i,:);
    elseif (DATOS_FINALES_NEW(i,1) > DATOS_FINALES_NEW(i,5))
        DFI(i,5) = DATOS_FINALES_NEW(i,5);
        DFI(i,6) = DATOS_FINALES_NEW(i,6);
        DFI(i,7) = DATOS_FINALES_NEW(i,7);
        DFI(i,8) = DATOS_FINALES_NEW(i,8);
        DFI(i,1) = DATOS_FINALES_NEW(i,5);
        DFI(i,2) = DATOS_FINALES_NEW(i,2) - ((DATOS_FINALES_NEW(i,2) -
DATOS_FINALES_NEW(i-1,2))/(DATOS_FINALES_NEW(i,1) - DATOS_FINALES_NEW(i-
1,1)))/(DATOS_FINALES_NEW(i,1) - DATOS_FINALES_NEW(i,5)));
        DFI(i,3) = DATOS_FINALES_NEW(i,3) - ((DATOS_FINALES_NEW(i,3) -
DATOS_FINALES_NEW(i-1,3))/(DATOS_FINALES_NEW(i,1) - DATOS_FINALES_NEW(i-
1,1)))/(DATOS_FINALES_NEW(i,1) - DATOS_FINALES_NEW(i,5)));
        DFI(i,4) = DATOS_FINALES_NEW(i,4) - ((DATOS_FINALES_NEW(i,4) -
DATOS_FINALES_NEW(i-1,4))/(DATOS_FINALES_NEW(i,1) - DATOS_FINALES_NEW(i-
1,1)))/(DATOS_FINALES_NEW(i,1) - DATOS_FINALES_NEW(i,5)));
    elseif (DATOS_FINALES_NEW(i,1) < DATOS_FINALES_NEW(i,5))

```

```

        DFI(i,1) = DATOS_FINALES_NEW(i,1);
        DFI(i,2) = DATOS_FINALES_NEW(i,2);
        DFI(i,3) = DATOS_FINALES_NEW(i,3);
        DFI(i,4) = DATOS_FINALES_NEW(i,4);
        DFI(i,5) = DATOS_FINALES_NEW(i,1);
        DFI(i,6) = DATOS_FINALES_NEW(i,6) -
        ((DATOS_FINALES_NEW(i,6)-DATOS_FINALES_NEW(i-
        1,6))/((DATOS_FINALES_NEW(i,5)-DATOS_FINALES_NEW(i-
        1,5))/(DATOS_FINALES_NEW(i,5)-DATOS_FINALES_NEW(i,1)))));
        DFI(i,7) = DATOS_FINALES_NEW(i,7) -
        ((DATOS_FINALES_NEW(i,7)-DATOS_FINALES_NEW(i-
        1,7))/((DATOS_FINALES_NEW(i,5)-DATOS_FINALES_NEW(i-
        1,5))/(DATOS_FINALES_NEW(i,5)-DATOS_FINALES_NEW(i,1)))));
        DFI(i,8) = DATOS_FINALES_NEW(i,8) -
        ((DATOS_FINALES_NEW(i,8)-DATOS_FINALES_NEW(i-
        1,8))/((DATOS_FINALES_NEW(i,5)-DATOS_FINALES_NEW(i-
        1,5))/(DATOS_FINALES_NEW(i,5)-DATOS_FINALES_NEW(i,1)))));
        end
    end
end

```

7.2.3 Código de programación para la obtención de los perfiles de posición, velocidad y aceleración en trayectorias curvas contenidas en ambos ejes de coordenadas.

CÓDIGO PRINCIPAL

```
%PROGRAMA: Procesado_de_datos
%ENTRADAS: DATOS_EJE_X, DATOS_EJE_Y, DATOS_TEORICOS, V_T_X_teo, V_T_Y_teo,
D_X_Y_teo
%SALIDAS: GRÁFICAS DE LOS PERFILES DE POSICIÓN, VELOCIDAD Y ACELERACIÓN
%VARIABLES: POS_X_teo, POS_Y_teo, T_X_teo, T_Y_teo, V_X_teo, V_Y_teo,
D_X_teo,
%D_Y_teo, DATOS_T_V_A_EJE_X, DATOS_T_V_A_EJE_Y
%DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW, DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW, TamFilas_X_New,
TamFilas_Y_New,
%DATOS_FINALES, DATOS_FINALES_NEW, DFI

clear all
close all
clc

%%%%% DATOS OBTENIDOS DEL ENCODER %%%%%
DATOS_EJE_X = xlsread('1. T-V-P (Tray1X F500) 0_0625ms.xlsm');
DATOS_EJE_Y = xlsread('1. T-V-P (Tray1Y F500) 0_0625ms.xlsm');

%%%%% DATOS TEÓRICOS TRAYECTORIA %%%%%
DATOS_TEORICOS = xlsread('0. Datos teóricos.xlsx');
POS_X_teo = DATOS_TEORICOS(:,1);
POS_Y_teo = DATOS_TEORICOS(:,2);

%%%%% DATOS TEÓRICOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO ANALÍTICO DE LA TRAYECTORIA
%%%%%
%% VELOCIDAD, TIEMPO Y DISTANCIAS ACUMULADAS%%
V_T_X_teo = xlsread('0. T-V-X (F500).xlsx');
V_T_Y_teo = xlsread('0. T-V-Y (F500).xlsx');
D_X_Y_teo = xlsread('0. D-X-Y (F500).xlsx');

T_X_teo = V_T_X_teo(:,1);
V_X_teo = V_T_X_teo(:,2);
D_X_teo = D_X_Y_teo(:,1);
T_Y_teo = V_T_Y_teo(:,1);
V_Y_teo = V_T_Y_teo(:,2);
D_Y_teo = D_X_Y_teo(:,2);

%%%%% FUNCIÓN QUE OBTIENE EL TIEMPO, VELOCIDAD Y POSICION EN UNA MATRIZ
%%%%%
[DATOS_T_V_A_EJE_X] = Obt_T_V_P(DATOS_EJE_X);
[DATOS_T_V_A_EJE_Y] = Obt_T_V_P(DATOS_EJE_Y);

%%%%% FUNCIÓN QUE ELIMINA LOS DATOS INNECESARIOS AL COMIENZO DE LA
LECTURA %%%%%
%%%%% EJE X %%%%%
[DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,TamFilas_X_New] =
Elim_Datos_Ini(DATOS_T_V_A_EJE_X);

%%%%% EJE Y %%%%%
[DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW,TamFilas_Y_New] =
Elim_Datos_Ini(DATOS_T_V_A_EJE_Y);
```

```

        %%%%% CÁLCULO DE LA DISTANCIA A PARTIR DEL ÁNGULO (Distancia (mm))
        %%%%%
        [DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW] =
        Calc_Dist(TamFilas_X_New...

,TamFilas_Y_New,DATOS_TEORICOS,DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW)
;

        %%%%% FUNCIÓN QUE CALCULA LA UNIÓN DE LOS MISMOS TIEMPOS MEDIDOS %%%%%
        [DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW] =
        Union_Tiempos(TamFilas_X_New...
            ,TamFilas_Y_New,DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW);

        %%%%% FUNCIÓN QUE UNE LOS DATOS VÁLIDOS MEDIDOS EN UNA MISMA MATRIZ
        %%%%%
        [DATOS_FINALES] =
        Union_Datos(DATOS_T_V_A_EJE_X_NEW,DATOS_T_V_A_EJE_Y_NEW);

        %%%%% ELIMINACIÓN DE LOS ÚLTIMOS DATOS QUE NO APORTAN NADA %%%%%
        [DATOS_FINALES_NEW] = Elim_Datos_Fin(DATOS_FINALES);

        %%%%% CÁLCULO DE LA ACELERACIÓN %%%%%
        [DATOS_FINALES_NEW] = Calc_Acel(DATOS_FINALES_NEW);

        %%%%% INTERPOLACIÓN %%%%%
        [DFI] = Interpolacion(DATOS_FINALES_NEW);

        %%%%% CÁLCULO DEL AUMENTO EN EL INCREMENTO DE DISTANCIA %%%%%
        [DFI] = Calc_Aum_Dist(DFI);

        %%%%% REPRESENTACIÓN DEL PERFIL DE POSICIÓN %%%%%
        %%%%% Gráfica comparativa teórica/analítica de la posición en X e
Y
        figure('Name','Grafica Comparativa Teo vs Anal X e
Y','NumberTitle','off');
        plot(POS_X_teo,POS_Y_teo,'-k')
        hold on
        plot(DFI(:,3),DFI(:,7),'rx')
        xlabel('Posición eje X (mm)')
        ylabel('Posición eje Y (mm)')
        legend({'Trayectoria teórica','Trayectoria
analítica'},'Location','Southwest')

        %%%%% REPRESENTACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD %%%%%
        %%%%% Gráfica comparativa teórico/experimental de la velocidad
        %%%%% frente al tiempo en X
        figure('Name','PERFIL DE VELOCIDAD TEÓRICO/EXPERIMENTAL EN EL EJE
X','NumberTitle','off');
        plot(T_X_teo,V_X_teo,'-r','LineWidth',1.5)
        hold on
        plot(DFI(:,1),abs(DFI(:,2)),'-b','LineWidth',1.5)
        xlabel('Tiempo (s)')
        ylabel('Velocidad (mm/s)')
        legend({'Trayectoria teórica','Trayectoria
experimental'},'Location','Northeast')

        %%%%% Gráfica comparativa teórico/experimental de la velocidad
        %%%%% frente al tiempo en Y
        figure('Name','PERFIL DE VELOCIDAD TEÓRICO/EXPERIMENTAL EN EL EJE
Y','NumberTitle','off');

```

```

plot(T_Y_teo,V_Y_teo,'-r','LineWidth',1.5)
hold on
plot(DFI(:,5),abs(DFI(:,6)),'-b','LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad (mm/s)')
legend({'Trayectoria teórica','Trayectoria
experimental'},'Location','Northeast')

%%%% Gráfica comparativa teórico/experimental de la velocidad
%%%% frente a la distancia acumulada en X
figure('Name','PERFIL DE VELOCIDAD TEÓRICO/EXPERIMENTAL EN EL EJE
X','NumberTitle','off');
plot(D_X_teo,V_X_teo,'-r','LineWidth',1.5)
hold on
plot(DFI(:,9),abs(DFI(:,2)),'-b','LineWidth',1.5)
xlabel('Distancia acumulada (mm)')
ylabel('Velocidad (mm/s)')
legend({'Trayectoria teórica','Trayectoria
experimental'},'Location','Southwest')

%%%% Gráfica comparativa teórico/experimental de la velocidad
%%%% frente a la distancia acumulada en Y
figure('Name','PERFIL DE VELOCIDAD TEÓRICO/EXPERIMENTAL EN EL EJE
Y','NumberTitle','off');
plot(D_Y_teo,V_Y_teo,'-r','LineWidth',1.5)
hold on
plot(DFI(:,10),abs(DFI(:,6)),'-b','LineWidth',1.5)
xlabel('Distancia acumulada (mm)')
ylabel('Velocidad (mm/s)')
legend({'Trayectoria teórica','Trayectoria
experimental'},'Location','South')

%%%% REPRESENTACIÓN DEL PERFIL DE ACELERACIÓN %%%%
%%%%% Gráfica Grafica experimental de la aceleración en el eje X
figure('Name','PERFIL DE ACELERACIÓN EXPERIMENTAL EN EL EJE
X','NumberTitle','off');
plot(DFI(:,1),DFI(:,4),'LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Aceleración (mm/s^2)')

%%%%% Gráfica experimental de la aceleración en el eje Y
figure('Name','PERFIL DE ACELERACIÓN EXPERIMENTAL EN EL EJE
Y','NumberTitle','off');
plot(DFI(:,5),DFI(:,8),'LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Aceleración (mm/s^2)')

```

FUNCIÓN 1

Equivalente a la función 1 del anexo 7.2.1

FUNCIÓN 2

Equivalente a la función 2 del anexo 7.2.1

FUNCIÓN 3

Equivalente a la función 3 del anexo 7.2.2

FUNCIÓN 4

Equivalente a la función 4 del anexo 7.2.2

FUNCIÓN 5

Equivalente a la función 5 del anexo 7.2.2

FUNCIÓN 6

Equivalente a la función 6 del anexo 7.2.2

FUNCIÓN 7

Equivalente a la función 7 del anexo 7.2.2

FUNCIÓN 8

Equivalente a la función 8 del anexo 7.2.2

FUNCIÓN 9

```
function [DFI] = Calc_Aum_Dist(DFI)

%FUNCION: [DFI] = Calc_Aum_Dist(DFI)
%DESCRIPCIÓN: Función que permite calcular el incremento de distancia en
%los ejes X e Y a medida que avanza el movimiento
%PARAMETROS DE ENTRADA: DFI
%PARAMETROS DE SALIDA: DFI
%VARIABLES: TamFilas, i

TamFilas = size(DFI);
TamFilas = TamFilas(1,1);
DFI(1,9) = 0;
DFI(1,10) = 0;
for i = 2:TamFilas
    DFI(i,9) = abs(DFI(i,3) - DFI(i-1,3)) + DFI(i-1,9);
    DFI(i,10) = abs(DFI(i,7) - DFI(i-1,7)) + DFI(i-1,10);
end
end
```

7.2.4 Código de programación para la obtención de los perfiles de posición, velocidad y aceleración en trayectorias curvas contenidas en ambos ejes de coordenadas durante la extrusión.

CÓDIGO PRINCIPAL

```
%PROGRAMA: PROCESADO_TOTAL
%ENTRADAS: DATOS_EJE_X, DATOS_EJE_Y, DATOS_EJE_E, DATOS_TEO_TRAY,
%D_V_X_teo, D_V_Y_teo
%SALIDAS: GRÁFICAS DE LOS PERFILES DE POSICIÓN, VELOCIDAD Y ACELERACIÓN
%VARIABLES: DATOS_T_V_A_X, DATOS_T_V_A_Y, DATOS_T_V_A_E, DATOS_T_V_D_X,
%DATOS_T_V_D_Y, DATOS_T_V_D_E DATOS_T_V_D_X_NEW, DATOS_T_V_D_Y_NEW,
%DATOS_T_V_D_E_NEW, DATOS_T_V_D_XY, DATOS_XY_I

clear all
close all
clc

%%%%% DATOS OBTENIDOS DEL ENCODER %%%%%
DATOS_EJE_X = xlsread('1. EXP T-V-P_X (F500) M.xlsm');
DATOS_EJE_Y = xlsread('1. EXP T-V-P_Y (F500) M.xlsm');
DATOS_EJE_E = xlsread('1. EXP T-V-P_E (F500) M.xlsm');

%%%%% DATOS TEÓRICOS TRAYECTORIA %%%%%
DATOS_TEO_TRAY = xlsread('0. TEO TRAY.xlsm');

%%%%% DATOS TEÓRICOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO ANALÍTICO DE LA TRAYECTORIA
%%%%%%
%% DISTANCIAS ACUMULADAS Y VELOCIDAD %%
D_V_X_teo = xlsread('1. TEO D-V_X (F500).xlsx');
D_V_Y_teo = xlsread('1. TEO D-V_Y (F500).xlsx');

%%%%% FUNCIÓN QUE OBTIENE EL TIEMPO, VELOCIDAD Y ÁNGULO EN UNA MATRIZ
%%%%%%
[DATOS_T_V_A_X] = OBT_T_V_P(DATOS_EJE_X);
[DATOS_T_V_A_Y] = OBT_T_V_P(DATOS_EJE_Y);
[DATOS_T_V_A_E] = OBT_T_V_P(DATOS_EJE_E);

%%%%% CÁLCULO DE LA DISTANCIA A PARTIR DEL ÁNGULO (Distancia (mm))
%%%%%%
[DATOS_T_V_D_X] = CALC_DIST(DATOS_T_V_A_X);
[DATOS_T_V_D_Y] = CALC_DIST(DATOS_T_V_A_Y);
[DATOS_T_V_D_E] = CALC_DIST(DATOS_T_V_A_E);

%%%%% FUNCIÓN QUE AJUSTA EL Tiempo-Distancia Y REALIZA EL CAMBIO DE
UNIDADES %%%%%
[DATOS_T_V_D_X_NEW] = AJUSTE_CU(DATOS_T_V_D_X);
[DATOS_T_V_D_Y_NEW] = AJUSTE_CU(DATOS_T_V_D_Y);
[DATOS_T_V_D_E_NEW] = AJUSTE_CU(DATOS_T_V_D_E);

%%%%% CÁLCULO DE LA ACELERACIÓN %%%%%
[DATOS_T_V_D_X_NEW] = CALC_ACEL(DATOS_T_V_D_X_NEW);
[DATOS_T_V_D_Y_NEW] = CALC_ACEL(DATOS_T_V_D_Y_NEW);
[DATOS_T_V_D_E_NEW] = CALC_ACEL(DATOS_T_V_D_E_NEW);

%%%%% FUNCIÓN QUE CALCULA LA UNIÓN DE TIEMPOS SEMEJANTES EN XY %%%%%
[DATOS_T_V_D_X_NEW, DATOS_T_V_D_Y_NEW] =
UNION_TIEMPOS_XY(DATOS_T_V_D_X_NEW, DATOS_T_V_D_Y_NEW);
```

```

    %%%%% FUNCIÓN QUE UNE LOS DATOS DE T,V,D Y AC DEL EJE X e Y EN UNA
    MISMA MATRIZ %%%%%
    [DATOS_T_V_D_XY] = UNION_DATOS(DATOS_T_V_D_X_NEW,DATOS_T_V_D_Y_NEW);

    %%%%% INTERPOLACIÓN DE LOS DATOS DE LA MATRIZ XY%%%%%
    [DATOS_XY_I] = INTERPOLACION(DATOS_T_V_D_XY);

    %%%%% CÁLCULO DEL AUMENTO EN EL INCREMENTO DE DISTANCIA %%%%%
    [DATOS_XY_I] = CALC_INCR_DIST(DATOS_XY_I);

    %%%%% OBTENCIÓN DEL PUNTO DE PARTIDA DE LA TRAYECTORIA XY %%%%%
    Inicio_Tray_XY = input('Introduce el N° de fila de inicio de la
    trayectoria: ');
    %% Introducir el número de fila donde comienza la trayectoria
    sinusoidal para hacer coincidir los tiempos en el movimiento plano y en el
    eje E de extrusión
    [DATOS_XY_PP] = DATOS_XY_I(Inicio_Tray_XY:end,:);
    TiempoInicial = DATOS_XY_PP(1,1);
    TamFilas = size(DATOS_XY_PP);
    for i = 1:TamFilas(1,1)
        DATOS_XY_PP(i,1) = DATOS_XY_PP(i,1) - TiempoInicial;
        DATOS_XY_PP(i,5) = DATOS_XY_PP(i,5) - TiempoInicial;
    end

    %%%%% GRÁFICAS DE LOS PERFILES DE POSICIÓN, VELOCIDAD Y ACELERACIÓN EN
    EL EJE XY %%%%%
    %%%%% PERFIL DE POSICIÓN %%%%%
    %%%%% Gráfica comparativa teórica/analítica de la posición en X
    e Y
    figure('Name','Grafica Comparativa Teo vs Anal X e
    Y','NumberTitle','off');
    plot(DATOS_TEO_TRAY(:,1),DATOS_TEO_TRAY(:,2),'-k')
    hold on
    plot(DATOS_XY_I(:,3),DATOS_XY_I(:,7),'rx')
    xlabel('Posición eje X (mm)')
    ylabel('Posición eje Y (mm)')
    legend({'Trayectoria teórica','Trayectoria
    analítica'}, 'Location','Southwest')

    %%%%% PERFIL DE VELOCIDAD %%%%%
    %%%%% Gráfica comparativa teórico/experimental de la velocidad
    %%%%% frente a la distancia acumulada en X
    figure('Name','PERFIL DE VELOCIDAD TEÓRICO/EXPERIMENTAL EN EL EJE
    X','NumberTitle','off');
    plot(D_V_X_teo(:,1),abs(D_V_X_teo(:,2)),'-r','LineWidth',1.5)
    hold on
    plot(DATOS_XY_I(:,9),abs(DATOS_XY_I(:,2)),'-b','LineWidth',1.5)
    xlabel('Distancia acumulada (mm)')
    ylabel('Velocidad (mm/s)')
    legend({'Trayectoria teórica','Trayectoria
    experimental'}, 'Location','Southwest')

    %%%%% Gráfica comparativa teórico/experimental de la velocidad
    %%%%% frente a la distancia acumulada en Y
    figure('Name','PERFIL DE VELOCIDAD TEÓRICO/EXPERIMENTAL EN EL EJE
    Y','NumberTitle','off');
    plot(D_V_Y_teo(:,1),abs(D_V_Y_teo(:,2)),'-r','LineWidth',1.5)
    hold on
    plot(DATOS_XY_I(:,10),abs(DATOS_XY_I(:,6)),'-b','LineWidth',1.5)

```

```

xlabel('Distancia acumulada (mm)')
ylabel('Velocidad (mm/s)')
legend({'Trayectoria teórica','Trayectoria
experimental'}, 'Location', 'Southwest')

%%%% PERFIL DE ACELERACIÓN %%%%
%%%% Gráfica experimental de la aceleración en el eje X
figure('Name','PERFIL DE ACELERACIÓN EXPERIMENTAL EN EL EJE
X','NumberTitle','off');
plot(DATOS_XY_I(:,1),DATOS_XY_I(:,4),'LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Aceleración (mm/s^2)')

%%%% Gráfica experimental de la aceleración en el eje Y
figure('Name','PERFIL DE ACELERACIÓN EXPERIMENTAL EN EL EJE
Y','NumberTitle','off');
plot(DATOS_XY_I(:,5),DATOS_XY_I(:,8),'LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Aceleración (mm/s^2)')

%%%% GRÁFICAS DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD Y ACELERACIÓN EN EL EJE E
%%%%
%%%% PERFIL DE VELOCIDAD %%%%
figure('Name','PERFIL DE VELOCIDAD EXPERIMENTAL EN EL EJE
E','NumberTitle','off');
plot(DATOS_T_V_D_E_NEW(:,1),abs(DATOS_T_V_D_E_NEW(:,2)),'LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad (mm/s)')

%%%% PERFIL DE ACELERACIÓN %%%%
figure('Name','PERFIL DE ACELERACIÓN EXPERIMENTAL EN EL EJE
E','NumberTitle','off');
plot(DATOS_T_V_D_E_NEW(:,1),DATOS_T_V_D_E_NEW(:,4),'LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Aceleración (mm/s^2)')

%%%% GRÁFICAS DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD EN EL EJE XY-E %%%%
%%%% PERFIL DE VELOCIDAD X-E %%%%
figure('Name','PERFIL DE VELOCIDAD EXPERIMENTAL X-E','NumberTitle','off');
yyaxis left
plot(DATOS_XY_PP(:,1),abs(DATOS_XY_PP(:,2)),'LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad (mm/s)')
yyaxis right
plot(DATOS_T_V_D_E_NEW(:,1),abs(DATOS_T_V_D_E_NEW(:,2)),'LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad (mm/s)')
legend({'Perfil Vel X',' Perfil Vel E'}, 'Location', 'Southwest')

%%%% PERFIL DE VELOCIDAD Y-E %%%%
figure('Name','PERFIL DE VELOCIDAD EXPERIMENTAL Y-E','NumberTitle','off');
yyaxis left
plot(DATOS_XY_PP(:,5),abs(DATOS_XY_PP(:,6)),'LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad (mm/s)')
yyaxis right
plot(DATOS_T_V_D_E_NEW(:,1),abs(DATOS_T_V_D_E_NEW(:,2)),'LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad (mm/s)')
legend({'Perfil Vel Y',' Perfil Vel E'}, 'Location', 'Southwest')

```

FUNCIÓN 1

```
function [Matriz_T_V_A] = OBT_T_V_P(DATOS_EJE)

%FUNCION: [Matriz_T_V_A] = OBT_T_V_P(DATOS_EJE)
%DESCRIPCION: Función que de los datos leídos del eje (DATOS_EJE) extrae
%las columnas del tiempo, velocidad y angulo
%PARAMETROS DE ENTRADA: DATOS_EJE
%PARAMETROS DE SALIDA: Matriz_T_V_A
%VARIABLES: ...

Matriz_T_V_A(:,1) = DATOS_EJE(:,2); %%% Tiempo T(ms)
Matriz_T_V_A(:,2) = DATOS_EJE(:,3); %%% Velocidad V(steps/s)
Matriz_T_V_A(:,3) = DATOS_EJE(:,4); %%% Angulo Ang(°)
end
```

FUNCIÓN 2

```
function [DATOS_T_V_D_EJE] = CALC_DIST(DATOS_T_V_A_EJE)

%FUNCION: [DATOS_T_V_D_EJE] = CALC_DIST(DATOS_T_V_A_EJE)
%DESCRIPCIÓN: Función que permite el cálculo de la distancia a través de
%una fórmula analítica en los ejes X e Y
%PARAMETROS DE ENTRADA: DATOS_T_V_A_EJE
%PARAMETROS DE SALIDA: DATOS_T_V_D_EJE
%VARIABLES: TamFilas, i

TamFilas = size(DATOS_T_V_A_EJE);
for i = 1:TamFilas(1,1)
    DATOS_T_V_D_EJE(i,1) = DATOS_T_V_A_EJE(i,1);
    DATOS_T_V_D_EJE(i,2) = DATOS_T_V_A_EJE(i,2);
    DATOS_T_V_D_EJE(i,3) = 20*2*DADOS_T_V_A_EJE(i,3)/360;
    %%% FÓRMULA ANALÍTICA -> DISTANCIA = N°DIENTES*PASO CORREA* ANG/360
end
end
```

FUNCIÓN 3

```
function [DATOS_T_V_D_EJE_NEW] = AJUSTE_CU(DATOS_T_V_D_EJE)

%FUNCION: [DATOS_T_V_D_EJE_NEW] = AJUSTE_CU(DATOS_T_V_D_EJE)
%DESCRIPCION: Función que ajusta el tiempo y la distancia de inicio y
realiza
%el cambio de unidades
%PARAMETROS DE ENTRADA: DATOS_T_V_D_EJE
%PARAMETROS DE SALIDA: DATOS_T_V_D_EJE_NEW
%VARIABLES: TamFilas, Tiempo_In_Err, Distancia_In_Err, i

TamFilas = size(DATOS_T_V_D_EJE);
TamFilas = TamFilas(1,1);
Tiempo_In_Err = DATOS_T_V_D_EJE(1,1);
Distancia_In_Err = DATOS_T_V_D_EJE(1,3);
for i = 1:TamFilas
    DATOS_T_V_D_EJE_NEW(i,1) = (DATOS_T_V_D_EJE(i,1) -
Tiempo_In_Err)/1000; %%% Tiempo T(s)
    DATOS_T_V_D_EJE_NEW(i,2) = DATOS_T_V_D_EJE(i,2)/80; %%% Velocidad
V(mm/s)
    if Distancia_In_Err < 0
        DATOS_T_V_D_EJE_NEW(i,3) = DATOS_T_V_D_EJE(i,3) +
abs(Distancia_In_Err); %%% Distancia(mm)
```

```

elseif Distancia_In_Err > 0
    DATOS_T_V_D_EJE_NEW(i,3) = DATOS_T_V_D_EJE(i,3) -
abs(Distancia_In_Err); %% Distancia(mm)
elseif Distancia_In_Err == 0
    DATOS_T_V_D_EJE_NEW(i,3) = DATOS_T_V_D_EJE(i,3); %%
Distancia(mm)
end
end
end
end

```

FUNCIÓN 4

```

function [DATOS_T_V_D_EJE_NEW] = CALC_ACEL(DATOS_T_V_D_EJE_NEW)

%FUNCIÓN: [DATOS_T_V_D_EJE_NEW] = CALC_ACEL(DATOS_T_V_D_EJE_NEW)
%DESCRIPCIÓN: Cálculo de la aceleración a cada punto medido
%PARÁMETROS DE ENTRADA: DATOS_T_V_D_EJE_NEW
%PARÁMETROS DE SALIDA: DATOS_T_V_D_EJE_NEW
%VARIABLES: TamFilas, i

TamFilas = size(DATOS_T_V_D_EJE_NEW);
DATOS_T_V_D_EJE_NEW(1,4) = 0;
for i = 1:(TamFilas(1,1) - 1)
    DATOS_T_V_D_EJE_NEW(i+1,4) = (DATOS_T_V_D_EJE_NEW(i+1,2) -
DATOS_T_V_D_EJE_NEW(i,2))/(DATOS_T_V_D_EJE_NEW(i+1,1) -
DATOS_T_V_D_EJE_NEW(i,1)); %% A(mm/s^2)
end
end

```

FUNCIÓN 5

```

function [DATOS_T_V_D_X_NEW,DATOS_T_V_D_Y_NEW] =
UNION_TIEMPOS_XY(DATOS_T_V_D_X_NEW,DATOS_T_V_D_Y_NEW)

%FUNCIÓN: [DATOS_T_V_D_X_NEW,DATOS_T_V_D_Y_NEW] =
UNION_TIEMPOS_XY(DATOS_T_V_D_X_NEW,DATOS_T_V_D_Y_NEW)
%DESCRIPCIÓN: Función que permite agrupar en una misma fila tiempos
%semejantes de ambos ejes y eliminar la fila que no sea necesaria
%PARÁMETROS DE ENTRADA: DATOS_T_V_D_X_NEW,DATOS_T_V_D_Y_NEW
%PARÁMETROS DE SALIDA: DATOS_T_V_D_X_NEW,DATOS_T_V_D_Y_NEW
%VARIABLES: TamFilas_X, TamFilas_Y, VALOR_MENOR, i

TamFilas_X = size(DATOS_T_V_D_X_NEW);
TamFilas_Y = size(DATOS_T_V_D_Y_NEW);
if TamFilas_X(1,1) >= TamFilas_Y(1,1)
    VALOR_MENOR = TamFilas_Y(1,1);
else
    VALOR_MENOR = TamFilas_X(1,1);
end
i = 1;
TamFilas_Y(1,1) = TamFilas_Y(1,1) - 1;
TamFilas_X(1,1) = TamFilas_X(1,1) - 1;
if i < VALOR_MENOR
    for i = 1:VALOR_MENOR
        if i > VALOR_MENOR
            break;
        end
        if DATOS_T_V_D_X_NEW(i,1) - DATOS_T_V_D_Y_NEW(i,1) > -18/1000
&&...
            DATOS_T_V_D_X_NEW(i,1) - DATOS_T_V_D_Y_NEW(i,1) < 18/1000

```

```

elseif DATOS_T_V_D_X_NEW(i,1) - DATOS_T_V_D_Y_NEW(i,1) >=
18/1000
    DATOS_T_V_D_Y_NEW(i,:) = [];
    i = i - 1;
    VALOR_MENOR = VALOR_MENOR - 1;
    else if DATOS_T_V_D_X_NEW(i,1) - DATOS_T_V_D_Y_NEW(i,1)
<= -18/1000
        DATOS_T_V_D_X_NEW(i,:) = [];
        i = i - 1;
        VALOR_MENOR = VALOR_MENOR - 1;
        end
    end
end
end
end
end
end

```

FUNCIÓN 6

```

function [DATOS_T_V_D_XY] =
UNION_DATOS(DATOS_T_V_D_X_NEW,DATOS_T_V_D_Y_NEW)

%FUNCIÓN: [DATOS_T_V_D_XY] =
UNION_DATOS(DATOS_T_V_D_X_NEW,DATOS_T_V_D_Y_NEW)
%DESCRIPCIÓN: Función que une los datos necesarios (Tiempo, velocidad,
%distancia y aceleración) de cada eje en una misma matriz
%PARÁMETROS DE ENTRADA: DATOS_T_V_D_X_NEW,DATOS_T_V_D_Y_NEW
%PARÁMETROS DE SALIDA: DATOS_T_V_D_XY
%VARIABLES: TamFilas_X, TamFilas_Y, VARIABLEBUCLE, i

TamFilas_X = size(DATOS_T_V_D_X_NEW);
TamFilas_Y = size(DATOS_T_V_D_Y_NEW);

if (TamFilas_Y(1,1) >= TamFilas_X(1,1))
    VARIABLEBUCLE = TamFilas_X(1,1);
else
    VARIABLEBUCLE = TamFilas_Y(1,1);
end

for i = 1:VARIABLEBUCLE
    DATOS_T_V_D_XY(i,1) = DATOS_T_V_D_X_NEW(i,1);
    DATOS_T_V_D_XY(i,2) = DATOS_T_V_D_X_NEW(i,2);
    DATOS_T_V_D_XY(i,3) = DATOS_T_V_D_X_NEW(i,3);
    DATOS_T_V_D_XY(i,4) = DATOS_T_V_D_X_NEW(i,4);
    DATOS_T_V_D_XY(i,5) = DATOS_T_V_D_Y_NEW(i,1);
    DATOS_T_V_D_XY(i,6) = DATOS_T_V_D_Y_NEW(i,2);
    DATOS_T_V_D_XY(i,7) = DATOS_T_V_D_Y_NEW(i,3);
    DATOS_T_V_D_XY(i,8) = DATOS_T_V_D_Y_NEW(i,4);
end
end

```

FUNCIÓN 7

```

function [DATOS_XY_I] = INTERPOLACION(DATOS_T_V_D_XY)

%FUNCIÓN: [DATOS_XY_I] = INTERPOLACION(DATOS_T_V_D_XY)
%DESCRIPCIÓN: Función que realiza la interpolación en aquellos datos de una
%misma fila donde los tiempos entre ambos ejes no coinciden en el mismo
%valor
%PARÁMETROS DE ENTRADA: DATOS_T_V_D_XY
%PARÁMETROS DE SALIDA: DATOS_XY_I

```

```

%VARIABLES: TamFilas_DFN, i

TamFilas_DFN = size(DATOS_T_V_D_XY);
for i=1:TamFilas_DFN(1,1)
    if (DATOS_T_V_D_XY(i,1) == DATOS_T_V_D_XY(i,5))
        DATOS_XY_I(i,:) = DATOS_T_V_D_XY(i,:);
    elseif (DATOS_T_V_D_XY(i,1) > DATOS_T_V_D_XY(i,5))
        DATOS_XY_I(i,5) = DATOS_T_V_D_XY(i,5);
        DATOS_XY_I(i,6) = DATOS_T_V_D_XY(i,6);
        DATOS_XY_I(i,7) = DATOS_T_V_D_XY(i,7);
        DATOS_XY_I(i,8) = DATOS_T_V_D_XY(i,8);
        DATOS_XY_I(i,1) = DATOS_T_V_D_XY(i,5);
        DATOS_XY_I(i,2) = DATOS_T_V_D_XY(i,2) -
            ((DATOS_T_V_D_XY(i,2)-DATOS_T_V_D_XY(i-1,2))/((DATOS_T_V_D_XY(i,1)-
            DATOS_T_V_D_XY(i-1,1))/(DATOS_T_V_D_XY(i,1)-DATOS_T_V_D_XY(i,5))));
        DATOS_XY_I(i,3) = DATOS_T_V_D_XY(i,3) -
            ((DATOS_T_V_D_XY(i,3)-DATOS_T_V_D_XY(i-1,3))/((DATOS_T_V_D_XY(i,1)-
            DATOS_T_V_D_XY(i-1,1))/(DATOS_T_V_D_XY(i,1)-DATOS_T_V_D_XY(i,5))));
        DATOS_XY_I(i,4) = DATOS_T_V_D_XY(i,4) -
            ((DATOS_T_V_D_XY(i,4)-DATOS_T_V_D_XY(i-1,4))/((DATOS_T_V_D_XY(i,1)-
            DATOS_T_V_D_XY(i-1,1))/(DATOS_T_V_D_XY(i,1)-DATOS_T_V_D_XY(i,5))));
    elseif (DATOS_T_V_D_XY(i,1) < DATOS_T_V_D_XY(i,5))
        DATOS_XY_I(i,1) = DATOS_T_V_D_XY(i,1);
        DATOS_XY_I(i,2) = DATOS_T_V_D_XY(i,2);
        DATOS_XY_I(i,3) = DATOS_T_V_D_XY(i,3);
        DATOS_XY_I(i,4) = DATOS_T_V_D_XY(i,4);
        DATOS_XY_I(i,5) = DATOS_T_V_D_XY(i,1);
        DATOS_XY_I(i,6) = DATOS_T_V_D_XY(i,6) -
            ((DATOS_T_V_D_XY(i,6)-DATOS_T_V_D_XY(i-1,6))/((DATOS_T_V_D_XY(i,5)-
            DATOS_T_V_D_XY(i-1,5))/(DATOS_T_V_D_XY(i,5)-DATOS_T_V_D_XY(i,1))));
        DATOS_XY_I(i,7) = DATOS_T_V_D_XY(i,7) -
            ((DATOS_T_V_D_XY(i,7)-DATOS_T_V_D_XY(i-1,7))/((DATOS_T_V_D_XY(i,5)-
            DATOS_T_V_D_XY(i-1,5))/(DATOS_T_V_D_XY(i,5)-DATOS_T_V_D_XY(i,1))));
        DATOS_XY_I(i,8) = DATOS_T_V_D_XY(i,8) -
            ((DATOS_T_V_D_XY(i,8)-DATOS_T_V_D_XY(i-1,8))/((DATOS_T_V_D_XY(i,5)-
            DATOS_T_V_D_XY(i-1,5))/(DATOS_T_V_D_XY(i,5)-DATOS_T_V_D_XY(i,1))));
    end
end
end
end

```

FUNCIÓN 8

```

function [DATOS_XY_I] = CALC_INCR_DIST(DATOS_XY_I)

%FUNCION: [DATOS_XY_I] = CALC_INCR_DIST(DATOS_XY_I)
%DESCRIPCIÓN: Función que permite calcular el incremento de distancia en
%los ejes X e Y a medida que avanza el movimiento
%PARAMETROS DE ENTRADA: DATOS_XY_I
%PARAMETROS DE SALIDA: DATOS_XY_I
%VARIABLES: TamFilas, i

TamFilas = size(DATOS_XY_I);
DATOS_XY_I(1,9) = 0;
DATOS_XY_I(1,10) = 0;
for i = 2:TamFilas(1,1)
    DATOS_XY_I(i,9) = abs(DATOS_XY_I(i,3) - DATOS_XY_I(i-1,3)) +
    DATOS_XY_I(i-1,9);
    DATOS_XY_I(i,10) = abs(DATOS_XY_I(i,7) - DATOS_XY_I(i-1,7)) +
    DATOS_XY_I(i-1,10);
end
end

```