



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Estudio para la caracterización del relieve y formas de
objetos utilizando el sensor de fuerza del robot UR3e

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR/A: Gallú Camús, Juan

Tutor/a: Blanes Campos, Carlos

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Estudio para la caracterización del relieve y formas de objetos utilizando el sensor de fuerza del robot UR3e.

DOCUMENTO N° 1

MEMORIA

Autor: Juan Gallú Camús
Tutor: Carlos Blanes Campos
Curso académico 2021/2022

ÍNDICE DOCUMENTO Nº 1 MEMORIA

| | |
|---|----|
| 1.-Objeto..... | 8 |
| 2.-Resumen..... | 8 |
| 3.-Antecedentes(estado del arte)..... | 9 |
| 3.1.-Historia de la robótica..... | 9 |
| 3.2.-Seguridad y uso de los robots colaborativos..... | 10 |
| 3.3.-Uso del sensor de fuerza..... | 12 |
| 4.-Materiales y métodos..... | 13 |
| 4.1.-Materiales..... | 13 |
| 4.2.-Métodos..... | 16 |
| 4.2.1.- Calibrado de herramienta:..... | 16 |
| 4.2.2.- Comunicación entre el robot y el ordenador..... | 19 |
| 4.2.3.-Programación por hilos..... | 22 |
| 4.2.4.-Programa LabView..... | 23 |
| 4.2.5.-Teoría sistema de control..... | 25 |
| 4.2.6.-Programación en modo fuerza..... | 27 |
| 4.2.7.-Resumen gráfico de realizado..... | 30 |
| 5.-Experimentos..... | 31 |
| 5.1.-Experimento número 1, pieza plana..... | 32 |
| 5.2.-Experimento número 2, pieza plana..... | 34 |
| 5.3-Experimento número 3, pieza con pendiente..... | 37 |
| 5.4-Experimento número 4, pieza impresa en 3D..... | 40 |
| 5.5-Experimento número 5, pieza impresa en 3D..... | 43 |
| 5.6.1-Experimento número 6.1, pieza impresa en 3D..... | 45 |
| 5.6.2-Experimento número 6.2, pieza impresa en 3D..... | 48 |
| 5.6.3-Experimento número 6.3, pieza impresa en 3D..... | 51 |
| 5.6.4-Experimento número 6.4, pieza impresa en 3D..... | 54 |
| 6.-Discusión y conclusiones..... | 58 |
| 6.1.-Discusión..... | 58 |
| 6.2.-Conclusiones obtenidas en el experimento 1..... | 59 |
| 6.3.-Conclusiones obtenidas en el experimento 2..... | 59 |
| 6.4.-Conclusiones obtenidas en el experimento 3..... | 60 |
| 6.5.-Conclusiones obtenidas en el experimento 4..... | 60 |
| 6.6.-Conclusiones obtenidas en el experimento 5..... | 61 |
| 6.7.-Conclusiones obtenidas en el experimento 6..... | 62 |

| | |
|---|----|
| 6.7.1.-Conclusiones obtenidas gracias al estudio de la respuesta y lectura de los datos obtenidos por el sensor de fuerza. | 62 |
| 6.7.2.-Conclusiones obtenidas gracias al estudio de la altura. | 64 |
| 6.7.3.-Conclusiones obtenidas gracias a la velocidad. | 68 |
| 7.-Ideas futuras. | 69 |
| 8.-Bibliografía..... | 70 |

ÍNDICE FIGURAS DOCUMENTO Nº 1 MEMORIA

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Posibilidades y utilidades del robot UR3e. | 10 |
| Figura 2 | ejemplo robot colaborativo marca Kuka. | 11 |
| Figura 3 | Ilustración de la precaución que debe tener un humano al trabajar con robots | 12 |
| Figura 4 | Partes robot UR3e. | 13 |
| Figura 5 | Controlador E/S del UR3e. | 14 |
| Figura 6 | Consola de programación del robot UR3e. | 15 |
| Figura 7 | Eje de coordenadas que toma de referencia el robot. | 16 |
| Figura 8 | Centro de gravedad y punto central de herramienta del robot. | 16 |
| Figura 9 | Elección del punto central de herramienta y su ubicación. | 17 |
| Figura 10 | Eje de coordenadas de la muñeca del robot. | 17 |
| Figura 11 | Elección y ubicación del centro de gravedad de la herramienta. | 18 |
| Figura 12 | Pantalla nº1 para configurar la herramienta. | 18 |
| Figura 13 | Pantalla nº2 para configurar la herramienta. | 18 |
| Figura 14 | Pantalla nº3 para configurar la herramienta. | 19 |
| Figura 15 | Distancia del centro de gravedad hasta la base de la muñeca. | 19 |
| Figura 16 | Pantalla de los ajustes para conocer la IP de nuestro robot. | 20 |
| Figura 17 | Conexiones de red de nuestro ordenador. | 21 |
| Figura 18 | Ajustes red ethernet en nuestro ordenador. | 21 |
| Figura 19 | Propiedades protocolo TCP/IPv4. | 22 |
| Figura 20 | Ejecución comando ping. | 22 |
| Figura 21 | Imagen programa generación fichero LabVIEW. | 23 |
| Figura 22 | Muestra del interior del archivo de LabVIEW para generar el fichero. | 23 |
| Figura 23 | Primera parte del archivo de LabVIEW para el procesado de datos. | 24 |
| Figura 24 | Segunda parte del archivo de LabVIEW para el procesado de datos. | 24 |
| Figura 25 | Diferencias entre un sistema subamortiguado, amortiguado y críticamente amortiguado. | 25 |
| Figura 26 | Diferencias del comportamiento de los diferentes sistemas ante una entrada tipo escalón. | 27 |
| Figura 27 | Distancia de barrido en función de la pieza de interés. | 29 |
| Figura 28 | Resumen gráfico del proceso a seguir para la realización de los experimentos .. | 30 |
| Figura 29 | Pieza nº1 de metacrilato. | 31 |
| Figura 30 | Altura pieza nº1 de metacrilato. | 31 |
| Figura 31 | Pieza nº2 impresa en 3D. | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura 32 Distancia de barrido experimento nº1..... | 32 |
| Figura 33 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº1..... | 33 |
| Figura 34 Gráfica de la altura en excel del experimento nº1. | 33 |
| Figura 35 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº1. | 34 |
| Figura 36 Distancia de barrido experimento nº2..... | 35 |
| Figura 37 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº2..... | 35 |
| Figura 38 Gráfica de la altura en excel del experimento nº2. | 36 |
| Figura 39 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº2. | 36 |
| Figura 40 Imagen del experimento nº3..... | 37 |
| Figura 41 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº3..... | 37 |
| Figura 42 Gráfica de la altura en excel del experimento nº3. | 38 |
| Figura 43 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº3. | 38 |
| Figura 44 Gráficas de la fuerza que lee el sensor de fuerza (Fx, Fy, Fz) del experimento nº3. | 39 |
| Figura 45 Gráfica de Fz en el experimento nº3. | 40 |
| Figura 46 Gráfica combinada Fz y altura Z experimento nº3..... | 40 |
| Figura 47 Distancia de barrido experimento nº4..... | 41 |
| Figura 48 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº4..... | 41 |
| Figura 49 Gráfica de la altura en excel del experimento nº4. | 42 |
| Figura 50 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº4. | 42 |
| Figura 51 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº5..... | 43 |
| Figura 52 Gráfica de la altura en excel del experimento nº5. | 44 |
| Figura 53 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº5. | 44 |
| Figura 54 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº6.1..... | 45 |
| Figura 55 Gráfica de la altura en excel del experimento nº6.1. | 46 |
| Figura 56 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº6.1. | 46 |
| Figura 57 Gráficas de la fuerza que lee el sensor de fuerza (Fx, Fy, Fz) del experimento nº6.1. | 47 |
| Figura 58 Gráfica Fz en excel del experimento nº6.1..... | 47 |
| Figura 59 Gráfica combinada Fz y altura Z experimento nº6.1..... | 48 |
| Figura 60 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº6.2..... | 49 |
| Figura 61 Gráfica de la altura en excel del experimento nº6.2. | 49 |
| Figura 62 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº6.2. | 49 |
| Figura 63 Gráficas de la fuerza que lee el sensor de fuerza (Fx, Fy, Fz) del experimento nº6.2. | 50 |
| Figura 64 Gráfica Fz en excel del experimento nº6.2. | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 65 Gráfica combinada Fz y altura Z experimento nº6.2. | 51 |
| Figura 66 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº6.3. | 52 |
| Figura 67 Gráfica de la altura en excel del experimento nº6.3. | 52 |
| Figura 68 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº6.3. | 53 |
| Figura 69 Gráficas de la fuerza que lee el sensor de fuerza (Fx, Fy, Fz) del experimento nº6.3. | 53 |
| Figura 70 Gráfica Fz en excel del experimento nº6.3. | 54 |
| Figura 71 Gráfica combinada Fz y altura Z experimento nº6.3. | 54 |
| Figura 72 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº6.4. | 55 |
| Figura 73 Gráfica de la posición en excel del experimento nº6.4. | 55 |
| Figura 74 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº6.4. | 56 |
| Figura 75 Gráficas de la fuerza que lee el sensor de fuerza (Fx, Fy, Fz) del experimento nº6.4. | 57 |
| Figura 76 Gráfica Fz en excel del experimento nº6.4. | 57 |
| Figura 77 Gráfica combinada Fz y altura Z experimento nº6.4. | 58 |
| Figura 78 Comparación de la altura entre el experimento nº1 y nº2. | 60 |
| Figura 79 Comparación de la altura entre el experimento nº2 y nº4. | 61 |
| Figura 80 Comparación de la altura entre el experimento nº4 y nº5. | 61 |
| Figura 81 Comparación de Fy, Fx y Fz de los experimentos nº6.1, nº6.2, nº6.3 y nº6.4. | 63 |
| Figura 82 Gráfica Fx del experimento nº3. | 63 |
| Figura 83 Imagen sin diferencia en el eje y del punto A al punto B. | 64 |
| Figura 84 Imagen con diferencia en el eje y del punto A al punto B. | 64 |
| Figura 85 Comparación de la altura de los experimentos nº6.1, nº6.2, nº6.3 y nº6.4. | 65 |

ÍNDICE ECUACIONES DOCUMENTO Nº 1 MEMORIA

| | |
|--|----|
| Ecuación 1 Ecuación estándar sistema segundo orden. | 26 |
| Ecuación 2 Obtención de los polos de un sistema subamortiguado. | 26 |
| Ecuación 3 Obtención de los polos de un sistema sobreamortiguado. | 26 |
| Ecuación 4 Obtención de los polos de un sistema críticamente amortiguado. | 26 |
| Ecuación 5 Obtención de la media aritmética. | 65 |
| Ecuación 6 Obtención del error absoluto. | 66 |
| Ecuación 7 Obtención del error relativo. | 67 |

ÍNDICE TABLAS DOCUMENTO Nº 1 MEMORIA

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Variables utilizadas en el experimento 1. | 33 |
| Tabla 2 Variables utilizadas en el experimento 2. | 34 |
| Tabla 3 Variables utilizadas en el experimento 3. | 37 |
| Tabla 4 Variables utilizadas en el experimento 4. | 41 |
| Tabla 5 Variables utilizadas en el experimento 5. | 43 |
| Tabla 6 Variables utilizadas en el experimento 6.1. | 45 |
| Tabla 7 Variables utilizadas en el experimento 6.2. | 48 |
| Tabla 8 Variables utilizadas en el experimento 6.3. | 52 |
| Tabla 9 Variables utilizadas en el experimento 6.4. | 55 |
| Tabla 10 Altura punto 1 experimento 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4. | 66 |
| Tabla 11 Altura punto 2 experimento 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4. | 66 |
| Tabla 12 Altura punto 3 experimento 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4. | 66 |
| Tabla 13 Altura real punto 1 experimento 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4. | 66 |
| Tabla 14 Altura real punto 2 experimento 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4. | 66 |
| Tabla 15 Error absoluto del punto 1. | 67 |
| Tabla 16 Error absoluto del punto 2. | 67 |
| Tabla 17 Error relativo del punto 1. | 67 |
| Tabla 18 Error relativo del punto 2. | 67 |

1.-Objeto.

El objeto del proyecto es realizar el estudio para la caracterización del relieve y formas de objetos utilizando el sensor de fuerza del robot UR3e. Consiguiendo aprovechar lo máximo posible las oportunidades que nos brinda el robot ur3e al tener incorporado el sensor de fuerza de la muñeca.

Por otro lado, el objeto en el ámbito de las comunicaciones será crear una red robot-ordenador para poder enviar y recibir datos desde el robot al ordenador y viceversa, para así interpretar la información de forma correcta.

2.-Resumen.

Dentro de la amplia gama de robots industriales, los robots colaborativos o cobots cada vez se están empleando más en sectores industriales. Los cobots tienen la ventaja de poder compartir su espacio de trabajo con los humanos, su especial diseño y modo de trabajo lo permite. En caso de colisión con el ser humano el cobot se para evitando dañar a las personas, normalmente este sistema funciona por medio de la evaluación de la corriente de los motores o por medio de la información de sensores de fuerza. Los cobots también trabajan a velocidades limitadas, tienen formas redondeadas y configuraciones geométricas para evitar atrapamientos. Algunos cobots vienen equipados con un sensor de fuerza en la muñeca, como el UR3e del DISA. Este sensor permite que el cobot interactúe con el entorno y también puede permitir recopilar datos de los objetos con los que contacta.

La motivación de este proyecto es el estudio para la caracterización de la forma y relieve de distintos objetos mediante la utilización del sensor de fuerza del robot UR3e. Para ello se programa el cobot en modo control de fuerza para que contacte con la superficie de los objetos y obtener dicha la información por medio del envío de la posición. Este método también puede permitir determinar el contorno de la pieza. Todos estos datos serán enviados a un ordenador para poder procesarlos e interpretarlos.

La correcta realización del proyecto engloba los siguientes pasos: conocer el entorno de trabajo, configuración del robot y de la herramienta en función de nuestras necesidades, conseguir lograr la comunicación entre ordenador y robot, concluyendo con la recopilación de los datos y su posterior análisis.

3.-Antecedentes(estado del arte).

3.1.-Historia de la robótica

La Cuarta Revolución Industrial, también conocida como Industria 4.0, se refiere a la profunda digitalización e integración de las tecnologías de la información en las prácticas industriales y de fabricación tradicionales (Arnold et al., 2016), incluyendo el internet de las cosas, la comunicación entre máquinas comunicación, sistemas basados en la nube, big data, fabricación aditiva y robots colaborativos (Neumann et al., 2021). En este contexto el papel de la mano de obra humana en los procesos de fabricación está cambiando hacia la supervisión y la colaboración con estas nuevas tecnologías (Reiman et al., 2021).

Uno de los aspectos de esta transformación digital que evoluciona más rápidamente transformación digital es la colaboración cada vez más avanzada entre humanos y máquinas (Yilma et al., 2019). El concepto de robot colaborativo, denominado cobot, se introdujo hace dos décadas para describir un dispositivo que permitiera la colaboración física directa con las máquinas.

Los primeros cobots eran pasivos y eran manejados por humanos, mientras que los cobots modernos han evolucionado adoptando la forma de brazos robóticos ligeros. Los cobots son especialmente ventajosos y mayormente utilizados en tareas de ensamblaje, en las que la elevada carga y la repetibilidad que caracterizan a los sistemas robóticos tradicionales deben combinarse con las habilidades y la flexibilidad de los operarios humanos (Matheson et al., 2019).

Una de las clasificaciones propuestas para describir las diferentes formas en que los cobots pueden trabajar con los humanos distingue cuatro niveles de colaboración creciente: coexistencia, cuando el operador y el cobot solo comparten el mismo espacio físico sin interacción, sincronización, cuando operador y cobot comparten el mismo espacio de trabajo, cooperación, cuando trabajan en el mismo espacio de trabajo al mismo tiempo, pero en tareas separadas, colaboración, cuando ejecutan una tarea juntos y las acciones de uno tienen consecuencias inmediatas en el otro (Vicentini, 2020).

Mientras que las primeras implementaciones de cobot a menudo sólo implicaban la eliminación de las vallas de protección, en un futuro próximo aumentarán las aplicaciones que impliquen una colaboración total con el operador y el cobot aumentando la interacción cognitiva mediante acciones humanas y el reconocimiento de gestos, los comandos de voz y la aceptación social (Hentout et al., 2019).

En este contexto, el operador humano y el cobot pueden describirse como una diada, capaz tanto de interacción física como cognitiva (Schmidtler, Knott, et al., 2015). En la evolución de la colaboración entre humanos y robots (HRC). Con la combinación de todos los aspectos expuestos se traduce en un mayor beneficio y rentabilidad para la empresa y

una mejor calidad de vida para el operario, comprendiendo siempre los riesgos y los retos a los que debe enfrentarse al trabajar con cobots.



Figura 1 Posibilidades y utilidades del robot UR3e.

Fuente: <https://sp-automation.co.uk/benefits-of-working-with-collaborative-robots/>

Debido a que las personas somos esenciales en cualquier proceso productivo, nos vamos a centrar en la robótica colaborativa dónde el robot es un suplemento al humano, no una sustitución, garantizando así el futuro trabajo de las generaciones siguientes.

3.2.-Seguridad y uso de los robots colaborativos.

El control de robots es un campo maduro, que ya se está comercializando en gran medida en la industria. Sin embargo, los métodos necesarios para regular la interacción y la colaboración entre humanos y robots aún no se han establecido del todo. Estas cuestiones son objeto de investigación en los campos de la interacción física hombre-robot (pHRI) (Bicchi et al., 2008) y la robótica colaborativa (CoBots) (Colgate et al., 1996). Los autores de De Luca y Flacco (2012) presentaron un paradigma que especifica tres capas anidadas de comportamientos coherentes que el robot debe seguir para lograr una pHRI segura:



Figura 2 ejemplo robot colaborativo marca Kuka.

Fuente: <https://www.kuka.com/es-es/la-producci%C3%B3n-del-futuro/cooperaci%C3%B3n-hombre-robot/cobots>

La seguridad es la primera y más importante característica en los robots colaborativos. Aunque recientemente se ha producido un impulso hacia la estandarización de la seguridad de los robots (por ejemplo, la norma ISO 13482:2014 para robots y dispositivos robóticos), todavía estamos en fase de desarrollo. La seguridad se aborda generalmente a través de la evitación de colisiones (tanto con humanos como con obstáculos; Khatib, 1985), una característica que requiere una gran reactividad (gran ancho de banda) y robustez tanto en la capa de percepción como en la de control.

La coexistencia es la capacidad del robot de compartir el espacio de trabajo con los humanos. Esto incluye aplicaciones en las que interviene un humano pasivo (por ejemplo, operaciones médicas en las que el robot interviene en el cuerpo de los pacientes; Azizian et al., 2014), así como escenarios en los que robot y humano trabajan juntos en la misma tarea, sin contacto ni coordinación.

La colaboración es la capacidad de realizar las tareas del robot con la interacción y coordinación directa del ser humano. Existen dos modalidades para ello: la colaboración física (con un contacto explícito e intencionado entre el humano y el robot), y la colaboración sin contacto (en la que las acciones se guían por un intercambio de información, por ejemplo, en forma de gestos corporales, órdenes de voz u otras modalidades). Especialmente para el segundo modo, es crucial establecer medios para un control intuitivo por parte de los operadores humanos, que pueden ser usuarios no expertos. El robot debe ser proactivo en la realización de las tareas solicitadas, y debe ser capaz de inferir las intenciones del usuario, para interactuar de forma más natural desde el punto de vista humano.

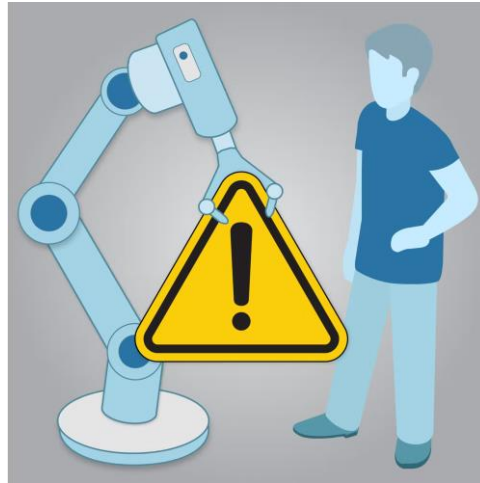


Figura 3 Ilustración de la precaución que debe tener un humano al trabajar con robots.

Fuente: <https://es.coursera.org/learn/collaborative-robot-safety>

Las tres capas se ven obstaculizadas por la imprevisibilidad de las acciones humanas, que varían según las situaciones y los individuos, lo que complica el modelado (Phoha, 2014) y el uso del control clásico.

En la literatura sobre robótica, han surgido dos enfoques principales para la ejecución de tareas: la planificación de la trayectoria/movimiento (La Valle, 2006) y el control basado en sensores (Chaumette y Hutchinson, 2006). Los métodos de planificación se basan en el conocimiento a priori de los estados futuros del robot y del entorno durante una ventana de tiempo. Aunque han demostrado su eficacia en aplicaciones bien estructuradas, estos métodos son difícilmente aplicables a la colaboración entre humanos y robots, debido a la naturaleza impredecible y dinámica de los humanos. En opinión de los autores, el control basado en sensores es más eficiente y flexible para la pHRI, ya que cierra el bucle de percepción-acción a un nivel inferior que la planificación de la trayectoria/movimiento. Hay que tener en cuenta también que las estrategias de control basadas en sensores se parecen mucho a los procesos de nuestro sistema nervioso central (Berthoz, 2002), y pueden remontarse al problema del servomecanismo (Davison y Goldenberg, 1975). El ejemplo más conocido es el *visual servoing* basado en imágenes (Chaumette y Hutchinson, 2006), que se basa directamente en la retroalimentación visual para controlar el movimiento del robot, sin requerir una capa cognitiva ni un modelo preciso del entorno.

3.3.-Uso del sensor de fuerza.

A día de hoy, el principal uso del sensor de fuerza es el de la seguridad cobot-humano, evitando el uso de cámaras de visión y otros sistemas más sofisticados para cumplir con la seguridad necesaria. Siguiendo este modelo podemos utilizar el sensor de fuerza para reconocer y caracterizar objetos sin necesidad de un sistema de visión artificial, consiguiendo el mismo resultado, pero abaratando los costes de la instalación.

4.-Materiales y métodos.

Para el correcto desarrollo de nuestro trabajo de investigación y poder llevar a cabo el experimento son requeridos una serie de materiales y métodos que sin ellos no seríamos capaces de llevar a cabo nuestro proyecto.

4.1.-Materiales.

-Robot UR3: es la pieza fundamental del proyecto, este modelo en concreto es el robot UR3e que se encuentra en los laboratorios de robótica del DISA. Teniendo las siguientes características.

El robot es de tipo antropomorfo, tiene un peso de 11.2 Kg al no tratarse de un robot de grandes dimensiones la carga útil efectiva es hasta 3 Kg teniendo un rango de alcance de 500 mm. Consta de 6 articulaciones giratorias otorgándonos 6 grados de libertad las 6 articulaciones son las siguientes:

- La base nos otorga rango de trabajo de 360° con una velocidad máxima de $180^{\circ}/s$.
 - El hombro nos otorga rango de trabajo de 360° con una velocidad máxima de $180^{\circ}/s$.
 - El codo nos otorga rango de trabajo de 360° con una velocidad máxima de $180^{\circ}/s$.
 - La muñeca 1 nos otorga rango de trabajo de 360° con una velocidad máxima de $360^{\circ}/s$.
 - La muñeca 2 nos otorga rango de trabajo de 360° con una velocidad máxima de $360^{\circ}/s$.
 - La muñeca 3 nos otorga rango de trabajo infinito con una velocidad máxima de $360^{\circ}/s$.
- En su conjunto somos capaces de movernos con una velocidad del TCP de 1 m/s.

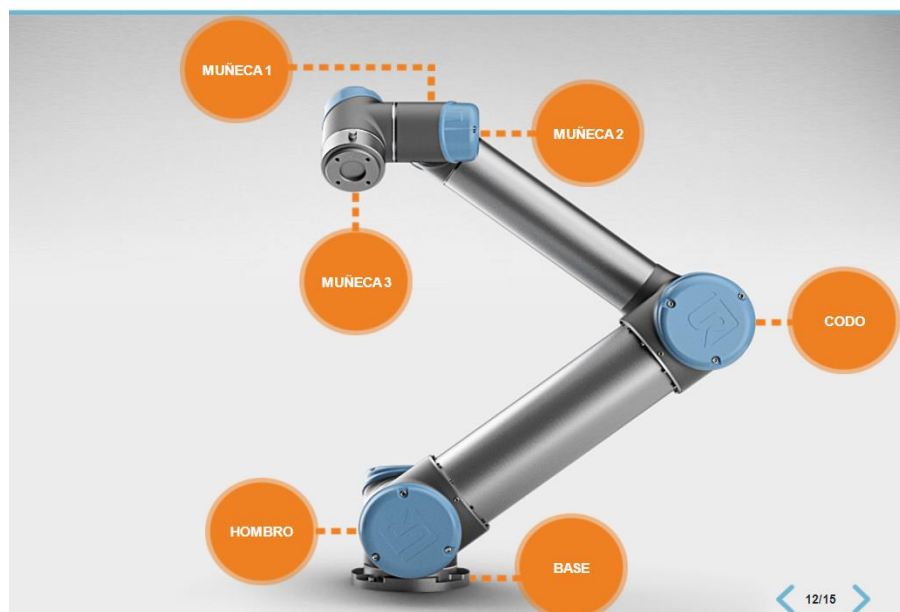


Figura 4 Partes robot UR3e.

Fuente: <https://www.universal-robots.com/es/productos/robot-ur3/>

Como podemos apreciar las características del UR3e lo convierten en un modelo muy interesante para espacios de trabajo reducidos y con cargas livianas, es por ello que lo consideramos ideal para nuestro experimento. El robot está construido en acero, plástico y aluminio.

-Caja de control: es el elemento donde se deben hacer las conexiones mediante los diferentes puertos de entrada y salida para que el robot interactúe con periféricos externos. Tiene un total de 16 entradas digitales, 16 salidas digitales, 2 entradas analógicas, 2 salidas analógicas y 4 entradas digitales. Tiene un peso de 12 Kg construida en acero pulverizado. Tiene diferentes protocolos de comunicación: TCP/IP 100 Mbit, ethernetIP, Profinet y modbus TCP.



Figura 5 Controlador E/S del UR3e.

Fuente: <https://www.universal-robots.com/es/productos/robot-ur3/>

-Consola de programación: para tener una agradable experiencia a nivel usuario el robot viene equipado con una pantalla táctil de 12 ". El objetivo de esta pantalla es poder realizar la programación de forma rápida e intuitiva, para que cualquier usuario con las nociones básicas pueda desarrollar pequeños programas.



Figura 6 Consola de programación del robot UR3e.

Fuente: <https://www.happygoing.xyz/products.aspx?cname=ur+teach+pendant&cid=1>

-Herramienta: Para que el robot pueda hacer contacto con la pieza, este necesita incorporar en su muñeca una herramienta acorde a ello. Existen muchos tipos de herramientas por ejemplo una herramienta tipo garra que se utiliza para coger y manipular objetos, pero para nuestra aplicación no tiene sentido utilizarla ya que no vamos a manipular el objeto. Para nuestra aplicación necesitamos una herramienta tipo puntero, para poder ser capaces de afinar y tener mayor precisión, además a medida que esta herramienta sea más fina mejorará la toma de resultados dado que seremos capaces de seguir mejor las formas de distintas piezas.

-Programa LabView: LabView fue desarrollado por National Instruments como un banco de trabajo para controlar pruebas de instrumentación. Sin embargo, sus aplicaciones se han extendido mucho más allá dichas pruebas a todo el campo de diseño y operación de sistemas. Una de sus principales ventajas es la automatización de captura y validación de señales además de poder realizar las mediciones de forma más sencilla que en otros programas tradicionales, otra gran cualidad es que permite procesar en paralelo diferentes flujos de datos lo que en nuestro caso ha sido el motivo por el cuál nos hemos decantado por el uso de este programa, ya que como veremos más adelante utilizamos la programación por hilos.

-Ordenador: Para realizar el experimento y procesar los resultados es indispensable tener un ordenador con el programa Labview instalado. Realizando una comunicación del robot con el equipo podemos obtener todos los datos de interés. En el apartado 4.2 veremos cómo se realiza dicha comunicación.

-Objeto a caracterizar: el objetivo del proyecto es caracterizar el relieve, pues en este caso se ha impreso una pieza en 3D para dicha caracterización. Aunque valdría cualquier objeto que varíe su cota en Z en función del eje X o Y.

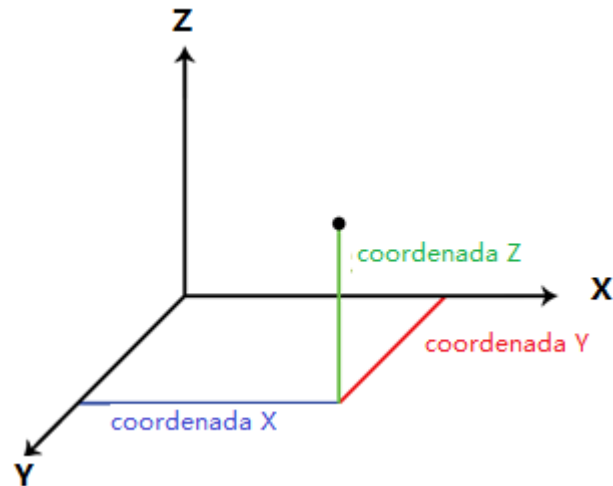


Figura 7 Eje de coordenadas que toma de referencia el robot.

-Programa excel: Usaremos un programa de cálculo para manipular datos numéricos en forma de tablas o gráficas, además de tener la posibilidad de usar fórmulas matemáticas de forma automática. Nosotros lo usaremos para tratar los datos exportados del LabView.

4.2.-Métodos.

4.2.1.- Calibrado de herramienta:

Este es el primer paso que debemos realizar para cualquier proyecto con un brazo robot, debido a su gran importancia y a su imprescindible configuración se va a explicar de forma detallada. Hay 3 parámetros de vital importancia para que el robot nos otorgue su máximo rendimiento: el peso de la herramienta, el centro de gravedad y el punto central de herramienta.

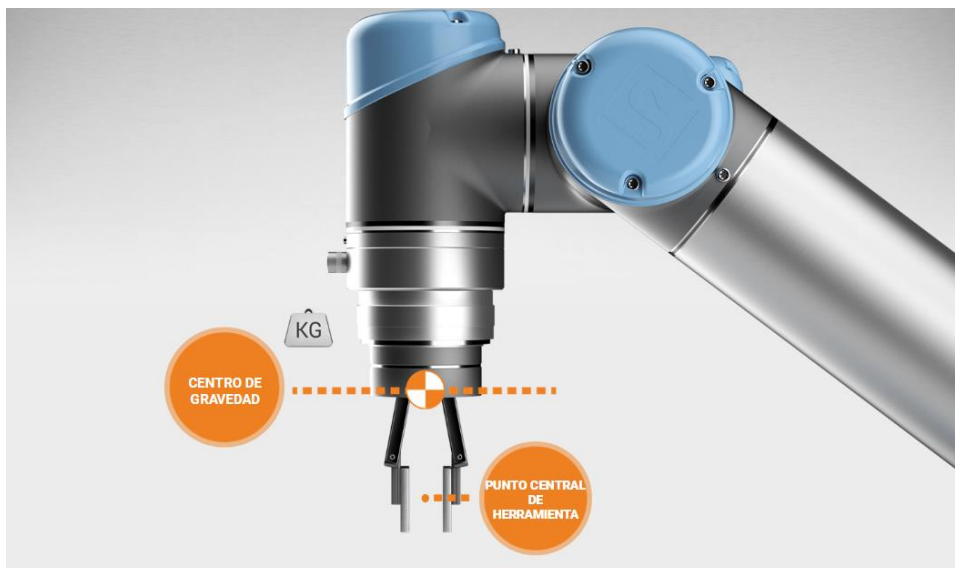


Figura 8 Centro de gravedad y punto central de herramienta del robot.

Fuente: <https://academy.universal-robots.com/es/formacion-en-linea-gratuita/formacion-en-linea-de-cb3/>

El punto central es aquella parte de la herramienta que está en contacto con la pieza de trabajo, en nuestro caso al tratarse de un puntero su obtención está clara ya que solo tenemos un punto de contacto, justo el punto donde contacta con la pieza.

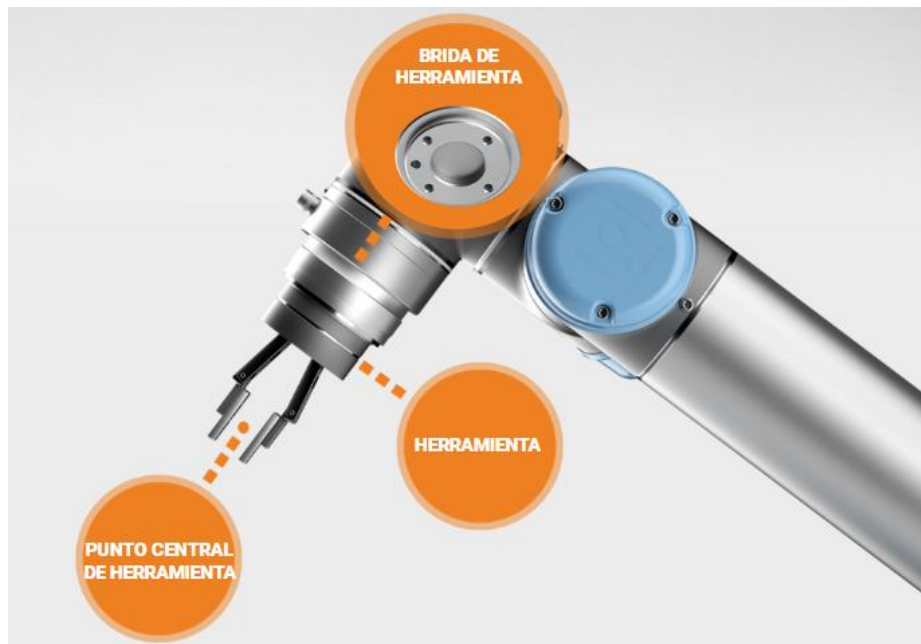


Figura 9 Elección del punto central de herramienta y su ubicación.

Fuente: <https://academy.universal-robots.com/es/formacion-en-linea-gratuita/formacion-en-linea-de-cb3/>

Para que el robot interprete dónde está el PCH(Punto central de herramienta) debemos pasarle las coordenadas del mismo desde la base de la muñeca. Como ya hemos comentado nuestra herramienta se trata de un puntero por lo que el PCH solamente está desplazado en el eje Z

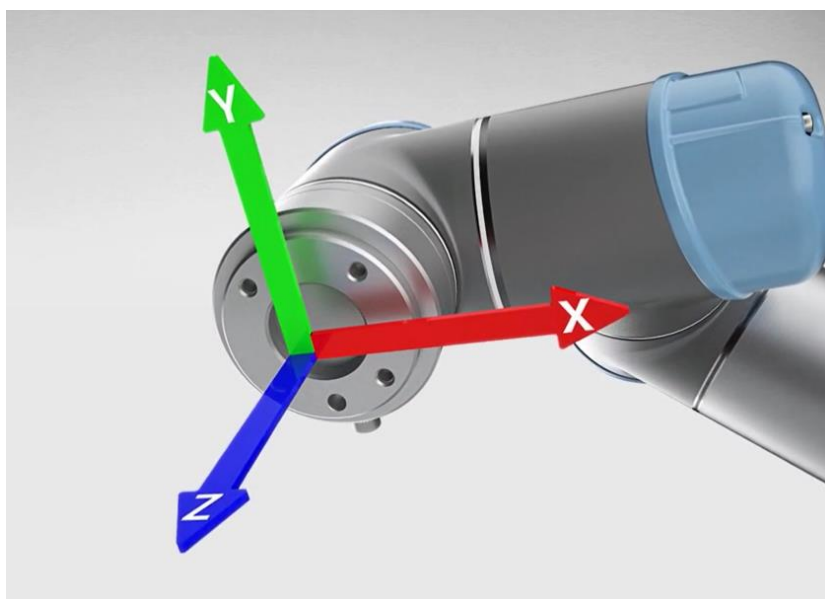


Figura 10 Eje de coordenadas de la muñeca del robot.

Fuente: <https://academy.universal-robots.com/es/formacion-en-linea-gratuita/formacion-en-linea-de-cb3/>

El centro de gravedad es el punto de la herramienta donde el peso es el mismo a ambos lados del punto.

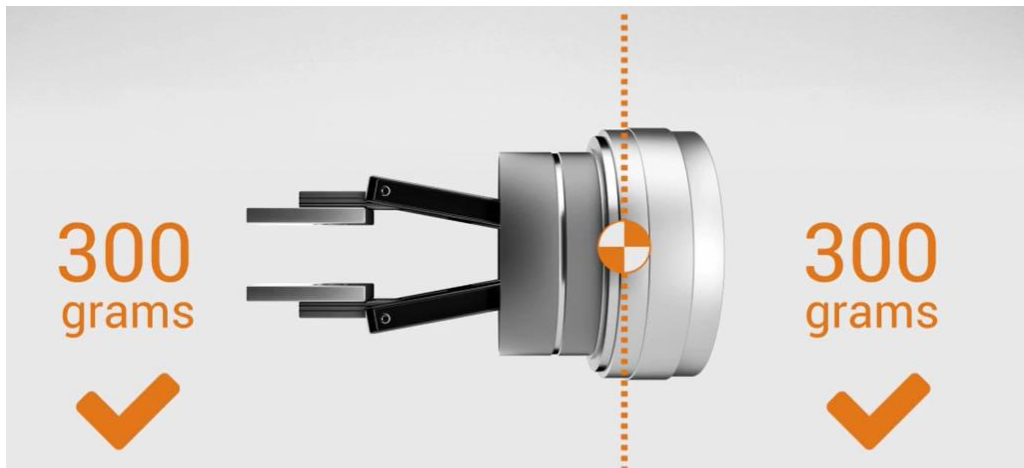


Figura 11 Elección y ubicación del centro de gravedad de la herramienta.

Fuente: <https://academy.universal-robots.com/es/formacion-en-linea-gratuita/formacion-en-linea-de-cb3/>

La ruta para configurar la herramienta:

1º.-Configurar robot.

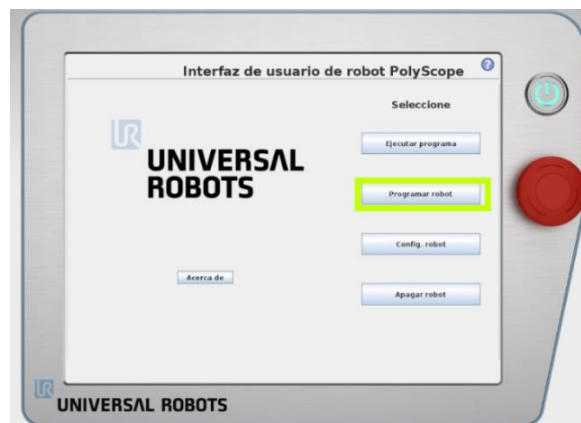


Figura 12 Pantalla nº1 para configurar la herramienta.

Fuente: <https://academy.universal-robots.com/es/formacion-en-linea-gratuita/formacion-en-linea-de-cb3/>

2º.-Instalación

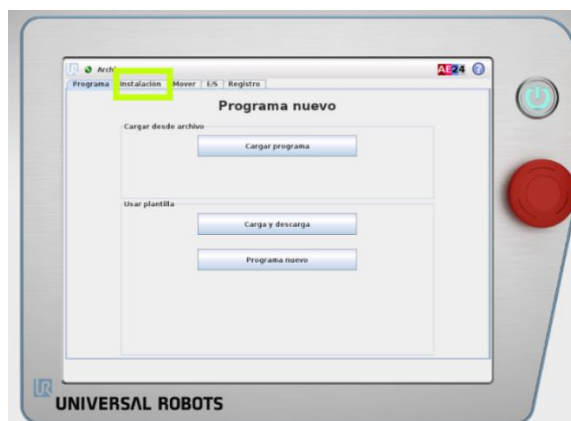


Figura 13 Pantalla nº2 para configurar la herramienta.

Fuente: <https://academy.universal-robots.com/es/formacion-en-linea-gratuita/formacion-en-linea-de-cb3/>

3º.-Clic en configuración de PCH y ya podemos introducir los datos, en nuestro caso la distancia en Z es de 140mm.

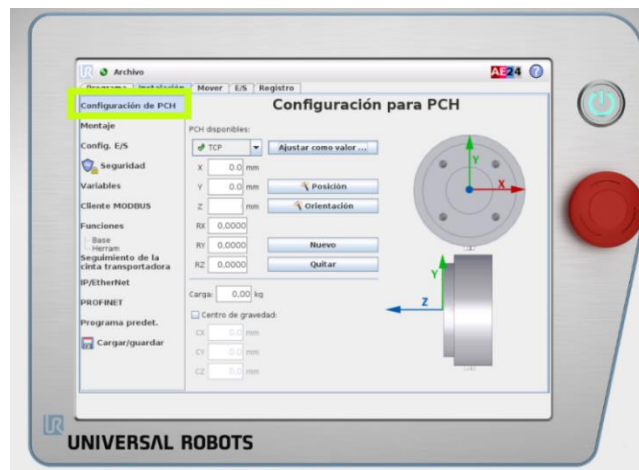


Figura 14 Pantalla nº3 para configurar la herramienta.

Fuente: <https://academy.universal-robots.com/es/formacion-en-linea-gratuita/formacion-en-linea-de-cb3/>

4º.-En la misma pestaña podemos introducir el peso de nuestra herramienta en la casilla de “Carga”, en nuestro caso son 425 gramos.

5º.-Medimos la distancia del centro de gravedad hasta la base de la muñeca, con esta distancia el robot calculará los momentos de inercia y podrá aplicar la fuerza necesaria.

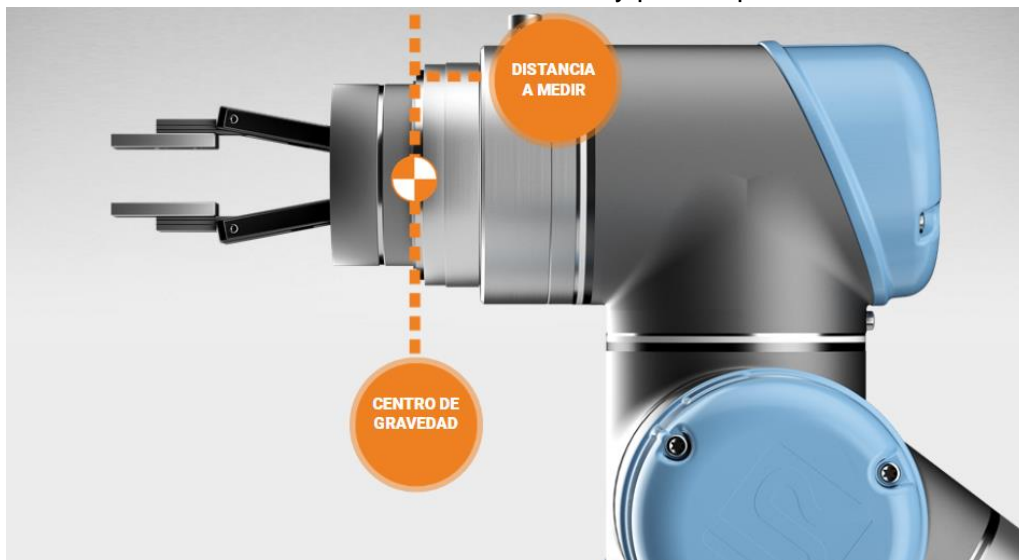


Figura 15 Distancia del centro de gravedad hasta la base de la muñeca.

Fuente: <https://academy.universal-robots.com/es/formacion-en-linea-gratuita/formacion-en-linea-de-cb3/>

4.2.2.- Comunicación entre el robot y el ordenador.

Uno de los aspectos fundamentales en el mundo de la robótica y automática es la comunicación entre distintos elementos entre si. Con ello logramos enviar y recibir información de los equipos conectados a la red, consiguiendo la información que deseamos en el momento que la necesitamos.

En nuestro caso lo que queremos es comunicar mi ordenador personal con el robot UR3e, debemos seguir los siguientes pasos:

1º.- Conectamos el cable Ethernet del robot al ordenador, por el viajarán todos los datos del robot al ordenador y viceversa.

2º.-Necesitamos conocer la IP y máscara del robot, conseguiremos esta información en el apartado ajustes de la consola. Dirección IP del robot: 192.168.1.133 y la máscara de red 255.255.255.0.

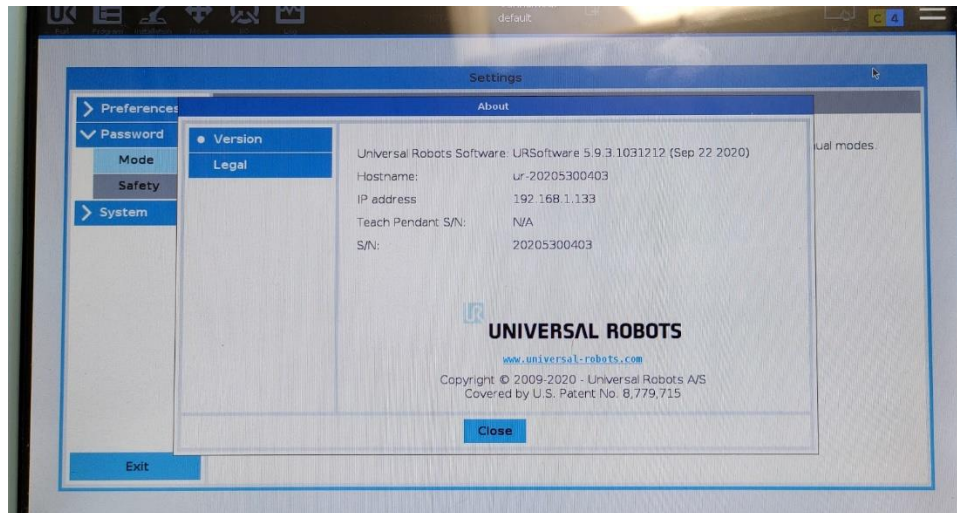


Figura 16 Pantalla de los ajustes para conocer la IP de nuestro robot.

3º.-Debemos asignar a nuestro ordenador la IP correcta, para ello nos fijamos en el último número de la máscara de red del robot, vemos que es un 0 lo que quiere decir que podemos asignar del equipo 0 al 255, lo que nos da la posibilidad de incluir 256 equipos a la red sin ningún inconveniente, por lo que vamos a proponer la siguiente IP para el ordenador: 192.158.1.91.

4º.-Comprobamos que la IP que hemos elegido no está siendo usada por otro equipo. Ejecutamos el comando ping y nos aseguramos que no tenga ninguna conexión establecida.

5º.-Cambiamos la IP en nuestro ordenador. Hacemos clic en “ver conexiones de red”.

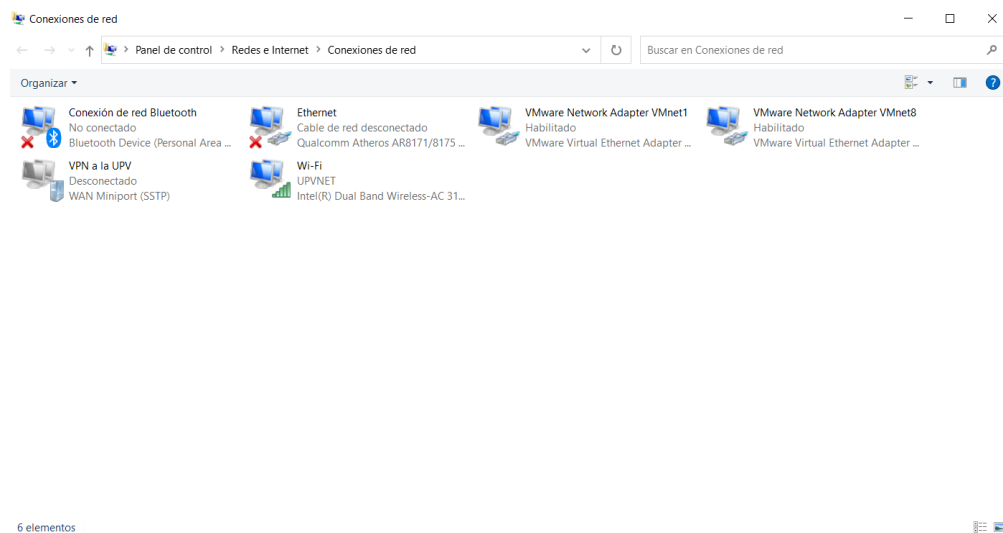


Figura 17 Conexiones de red de nuestro ordenador.

Hacemos clic derecho en Ethernet y propiedades.

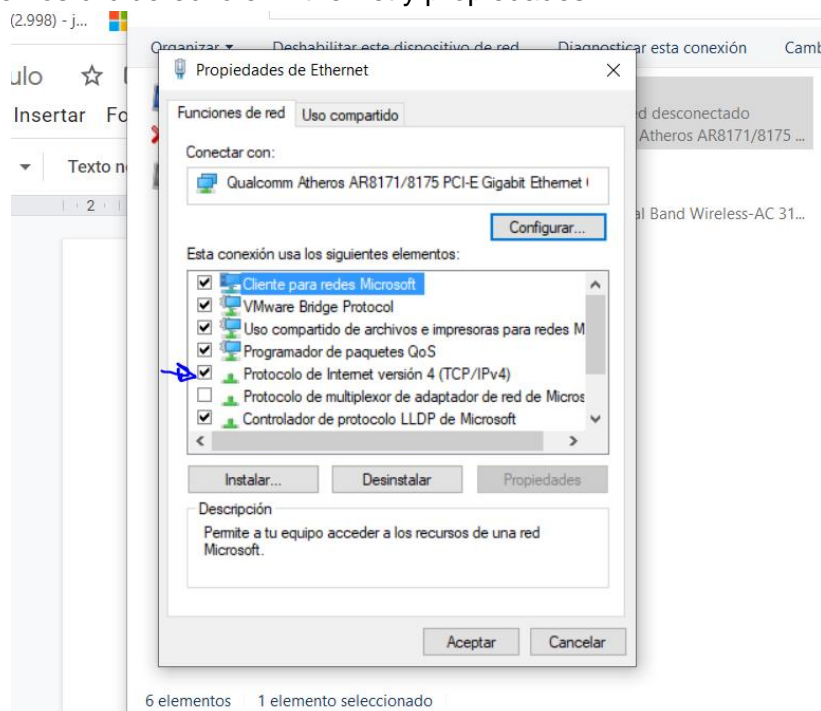


Figura 18 Ajustes red ethernet en nuestro ordenador.

Como vamos a realizar la comunicación mediante el protocolo TCP/IPv4, hacemos doble clic en Protocolo de Internet versión 4 (TC/IPv4), debemos poner la IP que hemos reservado 192.158.1.91 y la máscara de subred 255.255.255.0, para el servidor DNS preferido ponemos 192.168.1.91 que es el que sale en los ajustes del robot y el DNS alternativo 8.8.8.8 que es el de google.

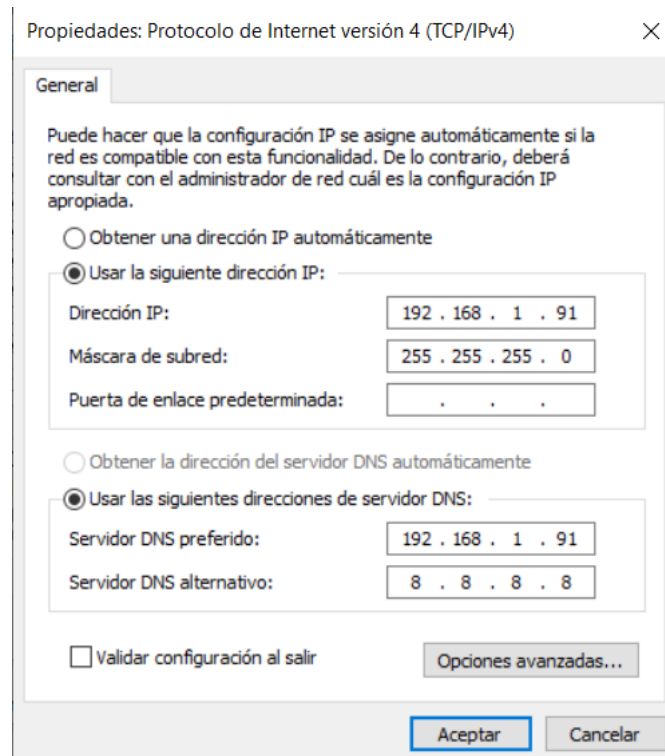


Figura 19 Propiedades protocolo TCP/IPv4.

6º.-Comprobamos que se ha realizado correctamente la comunicación por medio del comando ping, y vemos que los paquetes enviados son igual a los recibidos y el número de paquetes perdidos es 0.

```
C:\Users\Usuario>ping 192.168.1.133

Haciendo ping a 192.168.1.133 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.1.133: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.133: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.133: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.133: bytes=32 tiempo<1m TTL=64

Estadísticas de ping para 192.168.1.133:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
              (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
    Mínimo = 0ms, Máximo = 0ms, Media = 0ms
```

Figura 20 Ejecución comando ping.

4.2.3.-Programación por hilos.

Para enviar un paquete de información que deseamos tratar vamos a usar la programación por hilos, un hilo es una secuencia del programa que se ejecuta en paralelo al programa principal del robot, en nuestro crearemos un hilo con 4 variables distintas por cada una de ellas enviaremos un parámetro distinto de la información de la posición. La ventaja de usar este tipo de programación es que mejora el rendimiento del programa y nos envía para

el mismo instante 4 datos diferentes, la desventaja es que el fichero que obtenemos debe ser tratado para poder trabajar con él. Ejemplo de un conjunto de datos del fichero:

getp[-0.0892216,-0.295668,0.125782,2.46222,1.95117,-4.80449e-05]0.117926]0p
Nosotros usaremos LabView para manipular estos datos.

4.2.4.-Programa LabView.

Como ya se ha comentado necesitamos adquirir los datos y posteriormente procesarlos. Para ello usaremos dos programas de LabView:

-Adquisición de datos: Este programa se encargará únicamente de generar un fichero con los datos.

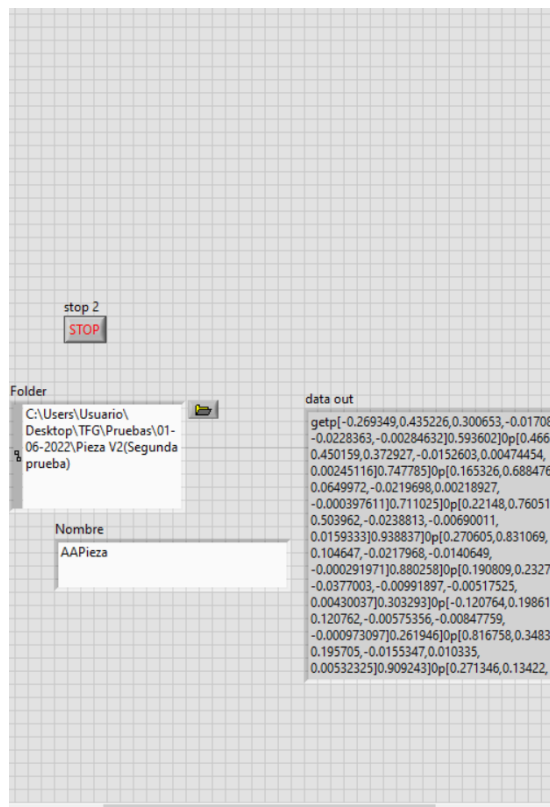


Figura 21 Imagen programa generación fichero LabVIEW.

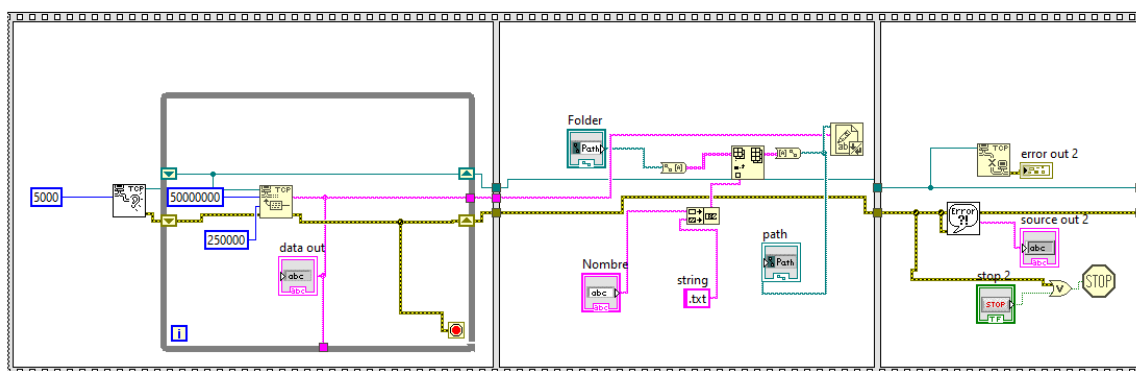


Figura 22 Muestra del interior del archivo de LabVIEW para generar el fichero.

-Procesado de datos: Este programa tiene como entrada el fichero generado en el programa de adquisición de datos y su función es separar todas las trazas y datos de forma que sean manipulables, mediante comparadores y sumadores.

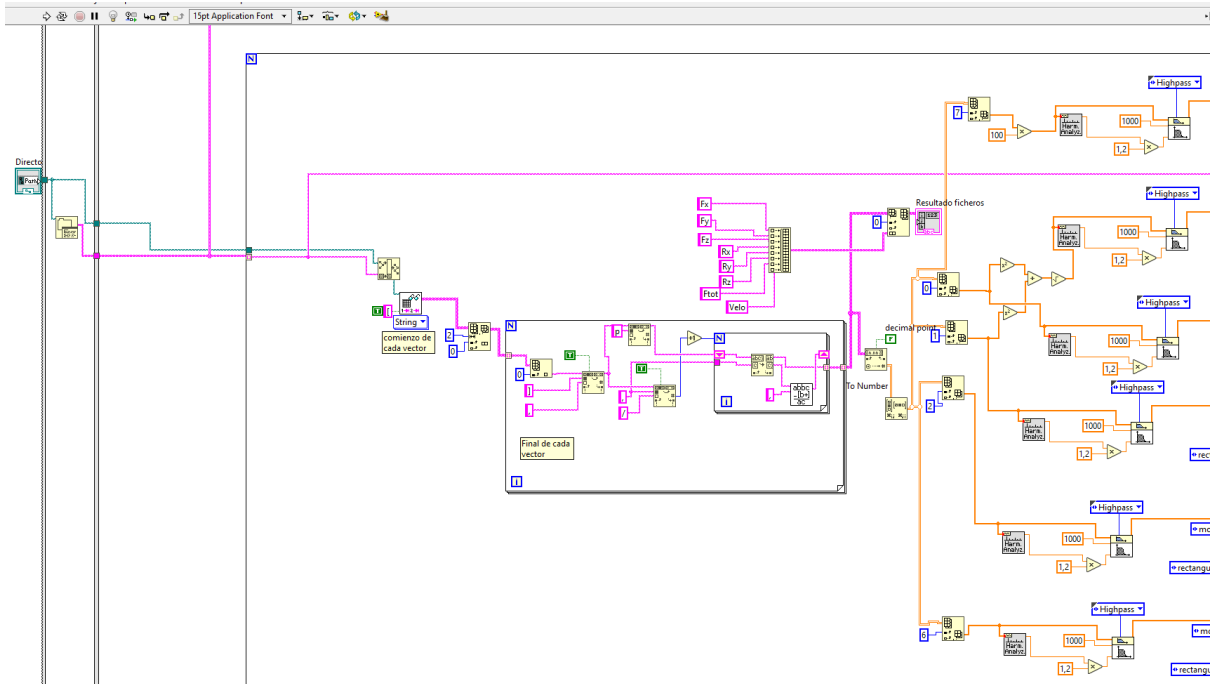


Figura 23 Primera parte del archivo de LabVIEW para el procesado de datos.

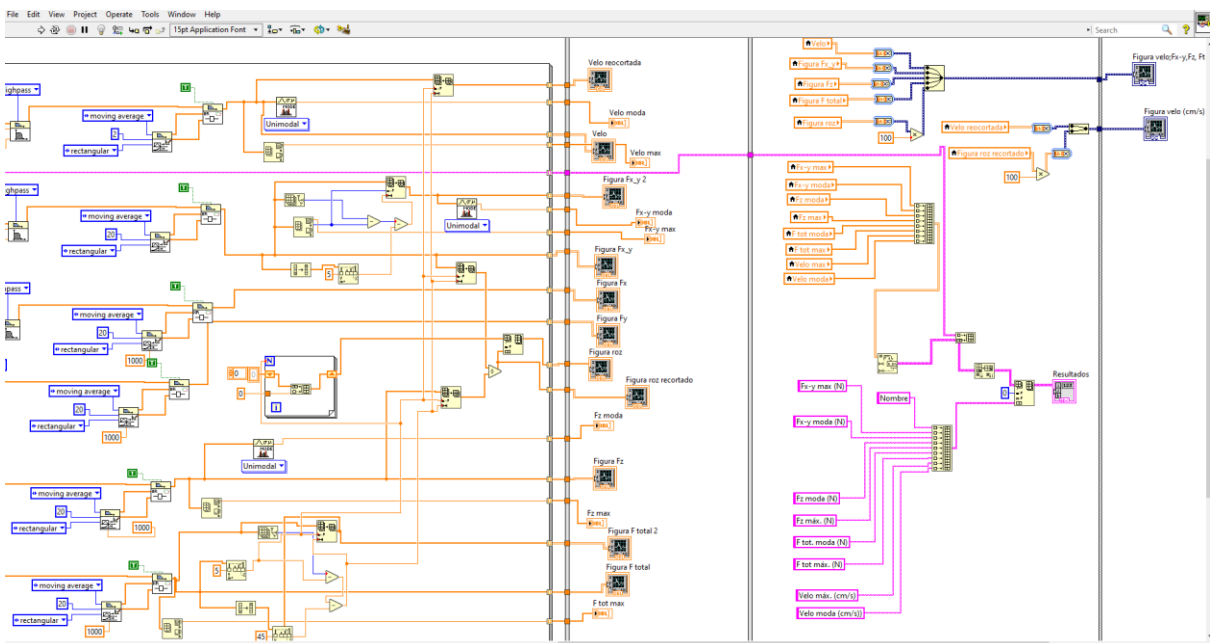


Figura 24 Segunda parte del archivo de LabVIEW para el procesado de datos.

Una gran ventaja es que LabVIEW nos permite exportar a Excel los datos una vez tratados, facilitando así realizar diferentes mediciones para su análisis.

4.2.5.-Teoría sistema de control.

El robot es un sistema muy complejo, con un gran número de variables de interés a controlar, y un sinfín de perturbaciones que hacen que el sistema varíe su comportamiento, lo que hace realmente complejo su control.

En nuestro caso vamos a controlar el robot en modo fuerza (se explica más adelante en el presente documento), pero nuestro objetivo es monitorizar la posición y ser capaces de obtener el relieve de la pieza. Al entrar en modo fuerza el robot contacta con la pieza buscando la fuerza normal a la que hemos programado el vector fuerza, posteriormente se realiza el barrido con el objetivo que la herramienta contacte durante todo el tiempo con la pieza, esta será la única manera de garantizar que no hemos tenido saltos de información en el relieve. Durante todo este barrido se usa como referencia la fuerza normal deseada así como los parámetros de velocidad y aceleración definidos para cada movimiento. La velocidad a la que se hace el barrido tiene vital importancia a la hora de recopilar con mayor claridad y calidad la información del relieve.

Como ya se ha comentado durante todo el barrido de la pieza el TCP de la herramienta no debe separarse de la superficie de la pieza es por ello que lo que buscamos y necesitamos es un comportamiento sobreamortiguado o de forma idílica tendiendo a un movimiento críticamente amortiguado, sin oscilaciones que impidan obtener la información correcta de la pieza. En caso de tener oscilaciones tendríamos un sistema subamortiguado, el sistema subamortiguado nos serviría en caso de que dichas oscilaciones no tomen el valor de 0, lo que se traduce en que en todo momento el robot está recibiendo una fuerza normal a la que aplica, que se traduce en que está en contacto con la pieza.

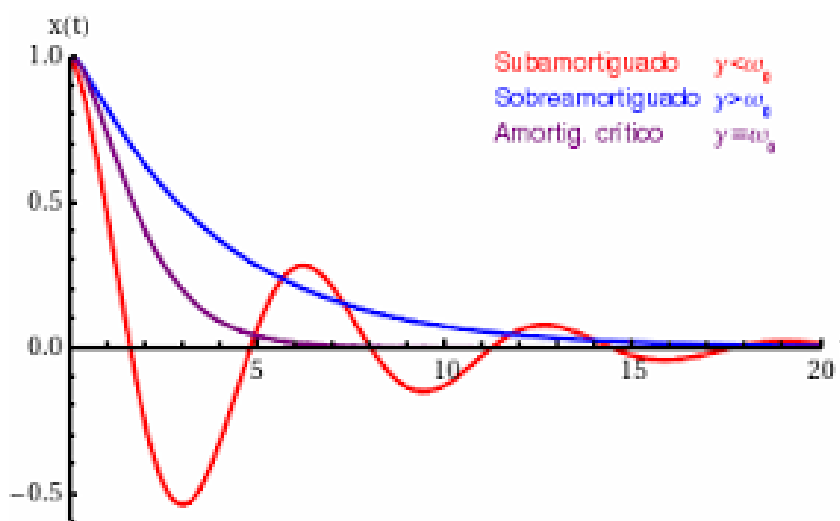


Figura 25 Diferencias entre un sistema subamortiguado, amortiguado y críticamente amortiguado.

Fuente: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Movimiento_oscilatorio

Vamos a explicar las diferencias entre los distintos escenarios que se nos podrían dar:

Suponiendo un sistema de segundo orden, la forma estándar de su función de transferencia es:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k \cdot Wn^2}{s^2 + 2 \cdot \varepsilon \cdot s + Wn^2}$$

Ecuación 1 Ecuación estándar sistema segundo orden.

Dónde K es la ganancia estática, Wn es la frecuencia natural y ε es el coeficiente de amortiguamiento. Variar un parámetro afecta directamente a la respuesta del sistema. Nos vamos a centrar en el coeficiente de amortiguamiento para clasificar los sistemas

-Sistema subamortiguado: Se considera que un sistema es subamortiguado cuando ε está entre 0 y 1. Esto implica polos complejos conjugados con parte real negativa.

$$s = -\varepsilon \cdot Wn \pm j Wn \cdot \sqrt{1 - \varepsilon^2}$$

Ecuación 2 Obtención de los polos de un sistema subamortiguado.

Como podemos apreciar tiene un transitorio dónde oscila, como ya hemos comentado si en estas oscilaciones la fuerza no vuelve a pasar por 0, nuestro sistema está en todo momento contactando con la pieza. Por otro lado, en caso de que en estas oscilaciones pasen por 0 durante ese periodo tendríamos una pérdida de información, ya que no estaría en contacto el TCP, por lo que no logramos identificar la posición de la pieza.

-Sistema sobreamortiguado: Se considera que un sistema es sobreamortiguado cuando ε es mayor a 1. Esto implica polos reales negativos.

$$s = -\varepsilon \cdot Wn \pm Wn \cdot \sqrt{1 - \varepsilon^2}$$

Ecuación 3 Obtención de los polos de un sistema sobreamortiguado.

El movimiento sobreamortiguado se caracteriza por avanzar lentamente hacia su posición de equilibrio respecto al críticamente amortiguado, ajustando la ganancia se ajusta la respuesta más rápida posible pareciéndose al críticamente amortiguado. Este va a ser el sistema que tendremos, ya que la posición del TCP siempre estará en contacto con la pieza a pesar de los cambios de pendiente, nuestro sistema será lo suficientemente rápido para seguir esos cambios. Para ello debemos jugar con la ganancia y la velocidad a la que se realiza el barrido. Si la velocidad es muy rápida, debemos subir la ganancia del sistema corriendo el riesgo que sea inestable.

-Sistema críticamente amortiguado: Se considera que un sistema es críticamente amortiguado cuando $\varepsilon=1$. Esto implica un polo doble real negativo.

$$s = -\varepsilon \cdot Wn$$

Ecuación 4 Obtención de los polos de un sistema críticamente amortiguado.

El críticamente amortiguado tiene una respuesta más rápida respecto al sobreamortiguado.

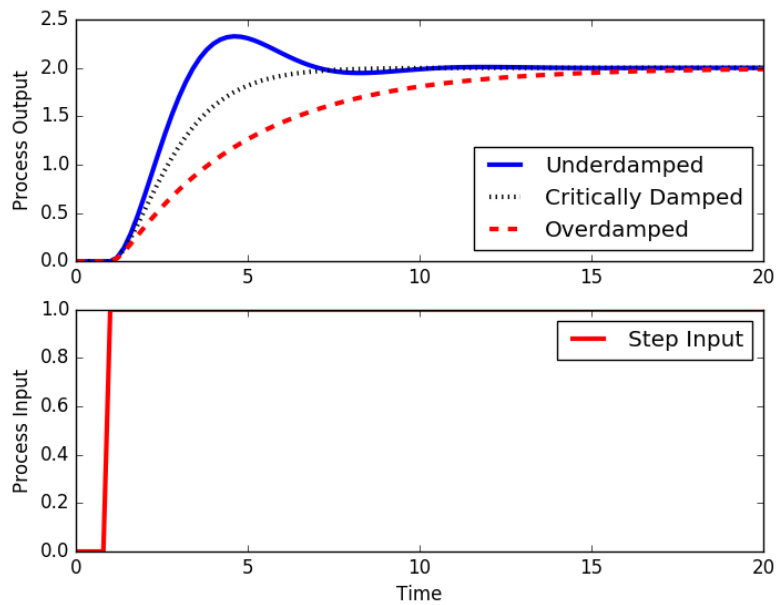


Figura 26 Diferencias del comportamiento de los diferentes sistemas ante una entrada tipo escalón.

Fuente: <https://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/SecondOrderSystems>

-Sistema inestable: Se considera que un sistema es inestable cuando ϵ es menor a 0. Esto implica Polos complejos conjugados con parte real positiva. Debemos evitar que nuestro sistema sea inestable ya que no se puede controlar dando error por no poder alcanzar los parámetros solicitados de la acción de control. En este caso se saturará alguno de los valores de la acción de control dando error el sistema interno del robot.

4.2.6.-Programación en modo fuerza.

Como estamos comentando a lo largo de todo el documento, la programación en modo fuerza es lo que caracteriza este trabajo de investigación y cuya aplicación está en pleno auge. En la actualidad existen diversas aplicaciones donde controlar el robot en modo fuerza, desde la experiencia personal conozco 2 ensayos los cuales precisan de este sensor, la realización de la horma de distintos modelos de zapatos en diversas fábricas cercanas a mi localidad y en la aplicación de puesta a punto de todas las matrices empleadas en empresas del sector de la automoción. En ambas aplicaciones el uso de la programación en modo fuerza daría un gran avance en la optimación del proceso, ya que nos brinda posibilidades únicas dentro de la robótica. Debemos pensar que tener la incorporación de un sensor de fuerza es lo más próximo al tacto de un humano en la robótica.

Dado el gran abanico que nos brinda Universal Robots en este campo, vamos a centrarnos en la explicación de funciones y parámetros que empleamos en nuestro programa, adjuntado en el anexo.

Force_mode(Herram, sel, fuerza, 2, vel2), esta es la instrucción que inicializa el robot en modo fuerza, para ello debemos incluir los siguientes parámetros:

-Herram: Es el vector posición el cual define el plano de fuerza relativo al plano de la base. En nuestro caso usamos el plano de la herramienta.

-Sel: Es un vector de seis dimensiones que debe de ser rellenado con ceros y unos. Donde los unos indican que el robot trabajará en el plano de la tarea. En nuestro caso Sel=[0, 0, 1, 0, 0, 0] lo que indica que trabajaremos en traslación del eje Z. Lo que es lógico dado que la intención es obtener la altura.

-Fuerza: Le indicamos al robot la fuerza que debe aplicar a su entorno. El robot ajustará su posición respecto al eje deseado con el fin de alcanzar la fuerza especificada. La fuerza real aplicada puede llegar a ser menor que la solicitada debido a los valores de seguridad que integra el propio robot UR3e, en nuestro caso Fuerza=[0, 0, 2, 0, 0, 0] lo que indica que el robot realizará una fuerza de 2 N en el eje Z, lo que se traduce si pasamos los Newton a Kilogramos dividiendo entre la gravedad obtenemos un valor de 0.2038 Kg de fuerza. Cabe destacar que este valor se ha obtenido de forma experimental, teniendo en cuenta el material que está fabricado la pieza sobre la que el robot contacta así como obteniendo una buena fuerza de rozamiento, a mayor fuerza aplicada se generará una mayor fuerza de rozamiento, que no es deseado en caso de valores elevados, ya que penalizaría la respuesta del sistema.

-Tipo: Es un número entero del 1 al 3 con el que indicamos cómo interpreta el robot el plano de fuerza. Si es 1 el plano de fuerza se transforma de forma que su eje se alinea con un vector que apunta desde el TCP del robot hacia el origen de la trama de fuerza, si es un 2 que es nuestro caso el plano de fuerza no se transforma, por último si es un 3 el marco de fuerza se transforma de forma que su eje x es la proyección del vector velocidad del TCP del robot.

-Vel2: Este parámetro es un vector de 6 dimensiones que tiene como función delimitar la velocidad de los ejes cuando el robot inicializa el modo fuerza, en particular este parámetro nos afecta a la velocidad a la cual se realiza el barrido de la pieza. En nuestro caso Vel2=[0.01, 0.01, 0.01, 0.017, 0.017, 0.017], si esta velocidad es demasiado grande el sistema de control no será capaz de seguir la referencia de la pieza y no será válido para su posterior representación. Va de la mano con la velocidad a la que se desplaza al Waypoint3 (es el punto final del barrido) que es la nos marcará la velocidad de barrido si esa velocidad es superior a vel_2, vel_2 establece el límite.

Force_mode_set_damping(0.05): con esta función ajustamos el amortiguamiento del control del sensor de fuerza, el valor debe de estar entre 0 y 1. Un valor de 1 es una amortiguación total, por lo que el robot desacelerará rápidamente en caso de no haber fuerza, mientras que un valor 0 indica que no hay amortiguación, lo que indica que el robot mantendrá la velocidad. En este caso nos interesa que sea un movimiento sin mucha amortiguación para que no pierda la velocidad el movimiento y que sea lo más constante posible. Necesitamos un ajuste de compromiso. Un valor muy bajo de amortiguamiento implica una posible inestabilidad del sistema de control de fuerza durante el primer contacto contra la pieza. Cuando estás barriendo la pieza por contacto un valor muy alto implica una acción control muy baja por lo que ante cambios en el perfil de la pieza el robot no reaccionará de manera adecuada no siguiendo la pieza. Este efecto implica que dependiendo de cómo sea el cambio en la pieza se producirá que la herramienta se separa de la pieza o que la herramienta

contacta con demasiada fuerza contra la pieza al no reaccionar lo suficientemente rápido ante los cambios de pendiente.

Force_mode_set_gain_scaling(1): Nos indica la ganancia del sistema ante el error de la fuerza ejercida, el valor va desde 0 hasta 2. Un valor mayor que 1 puede hacer que el modo de fuerza sea inestable, por ejemplo, en caso de colisiones o de empuje contra superficies duras. Por defecto viene en 1, aún así lo iremos variando para ver su influencia en nuestro experimento.

Con todos los parámetros mencionados solo falta explicar la filosofía de esta programación. Partimos de la base que somos capaces de extraer el relieve de una pieza sin ningún conocimiento previo, consiguiendo así suprimir un sistema de visión completo. Dado que el robot UR3e tiene un rango reducido las piezas que se podrán caracterizar deben de ir acorde a ello. La única previsión que tenemos que dedicarle especial atención es crear una línea de un punto A a un punto B lo suficientemente grande para que las piezas con las que trabajemos estén dentro del rango. Es decir, la distancia entre el punto A y punto B debe de ser mayor siempre que la longitud de la pieza con la que trabajaremos.

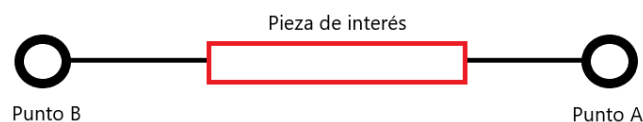


Figura 27 Distancia de barrido en función de la pieza de interés.

El robot se acercará al punto A, con la orientación de la herramienta deseada, contactará con el “suelo” y ejercerá los 2N de fuerza constantes manteniendo la orientación de la herramienta fija, lo que conseguimos es realizar un barrido de la pieza hasta el punto B que acabará el barrido. Cabe hacer una anotación y es que aunque le digamos un punto A y un punto B, el robot se detendrá cuando detecte una fuerza normal igual a la que está ejerciendo eso será la señal que ha contactado con la pieza. Esa es la principal ventaja de la programación en modo fuerza que realiza el movimiento hasta que encuentra la fuerza normal correspondiente, sin importar otra condición, eso nos permite usar un mismo programa para distintas piezas.

4.2.7.-Resumen gráfico de realizado.



Figura 28 Resumen gráfico del proceso a seguir para la realización de los experimentos.

5.-Experimentos.

A continuación, se van a exponer los experimentos realizados para realizar el mejor ajuste posible del programa, así como los relieves obtenidos y la trayectoria hasta llegar al resultado final.

Para la realización de los diferentes experimentos se han utilizado dos piezas distintas para llegar a concluir con los resultados esperados.

La pieza número 1 es un objeto plano de metacrilato en forma de prisma. Con una altura de 8.3 cm.

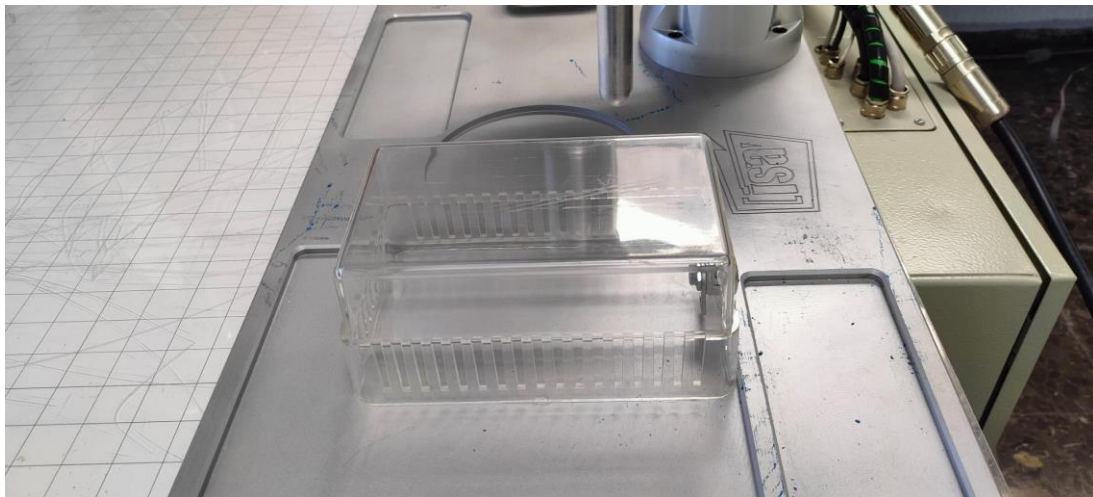


Figura 29 Pieza nº1 de metacrilato.

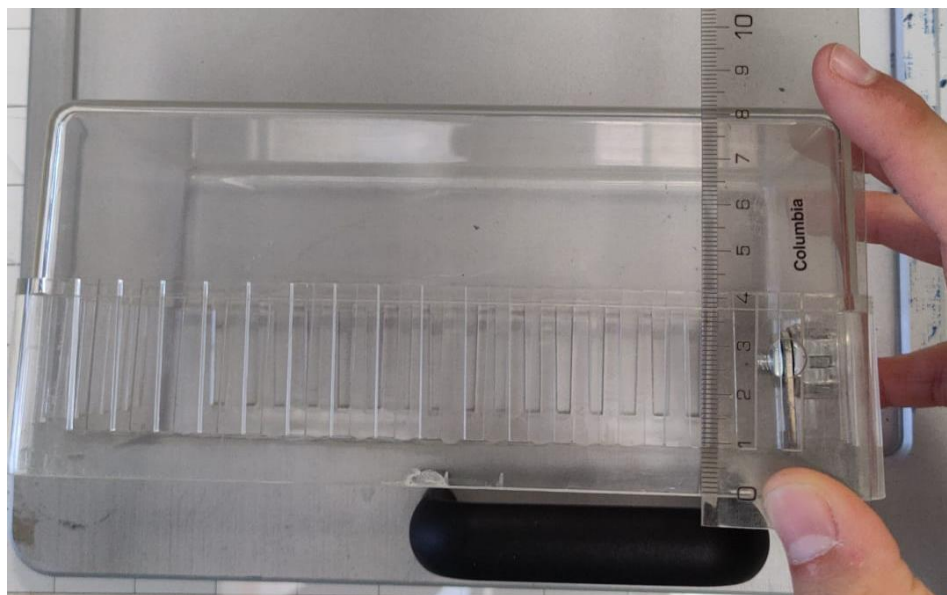


Figura 30 Altura pieza nº1 de metacrilato.

La pieza número 2 se trata de una impresión en 3D con una rampa de 30°, que encadena una curvatura de radio 20 mm, acto seguido con una curvatura de radio 10 mm acabando con una curvatura de nuevo de 20 mm de radio que encadena con la rampa final de pendiente 45°. La altura máxima de la pieza es de 9.6mm y la longitud de 12 mm. Se adjuntan los planos en el anexo 1 del presente documento.

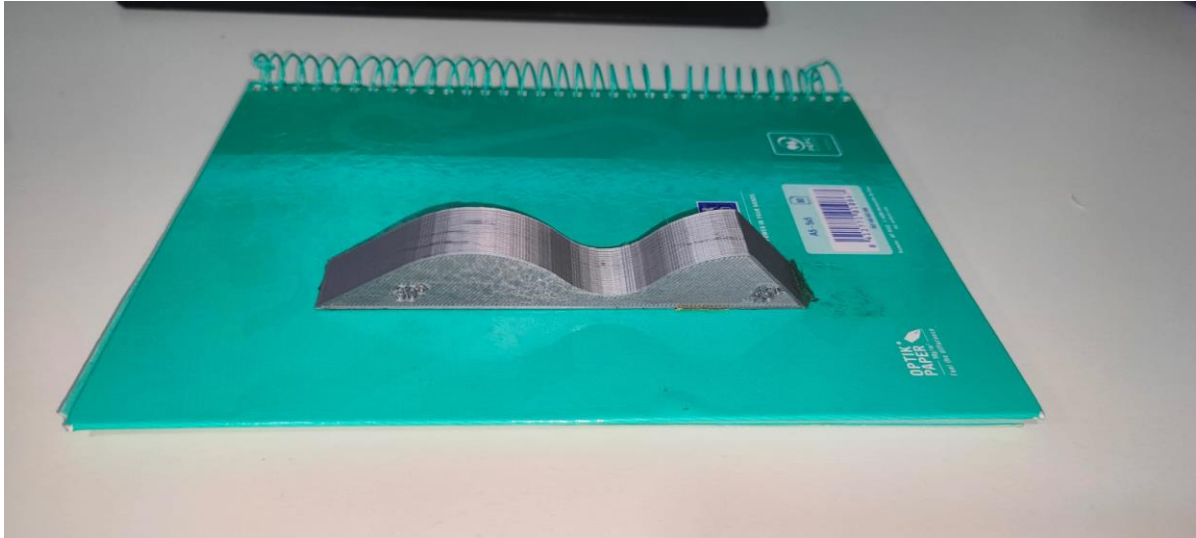


Figura 31 Pieza nº2 impresa en 3D.

5.1.-Experimento número 1, pieza plana.

Dado que no conocemos que valores son los adecuados para nuestro sistema de control de fuerza, primero debemos probarlo en una pieza más sencilla para realizar un primer ajuste, en este caso una pieza sin ningún tipo de pendiente.

En primer lugar, seleccionamos el punto A y punto B, recordar lo que ya se ha explicado anteriormente estos puntos será la distancia que recorrerá el barrido. Dado que es la primera toma de contacto los configuramos para que estos puntos estén contenidos en la distancia de la pieza. Para así asegurarnos que desde el primer contacto con la pieza hasta el final del barrido tenga la misma altura y salga una línea recta en el relieve.

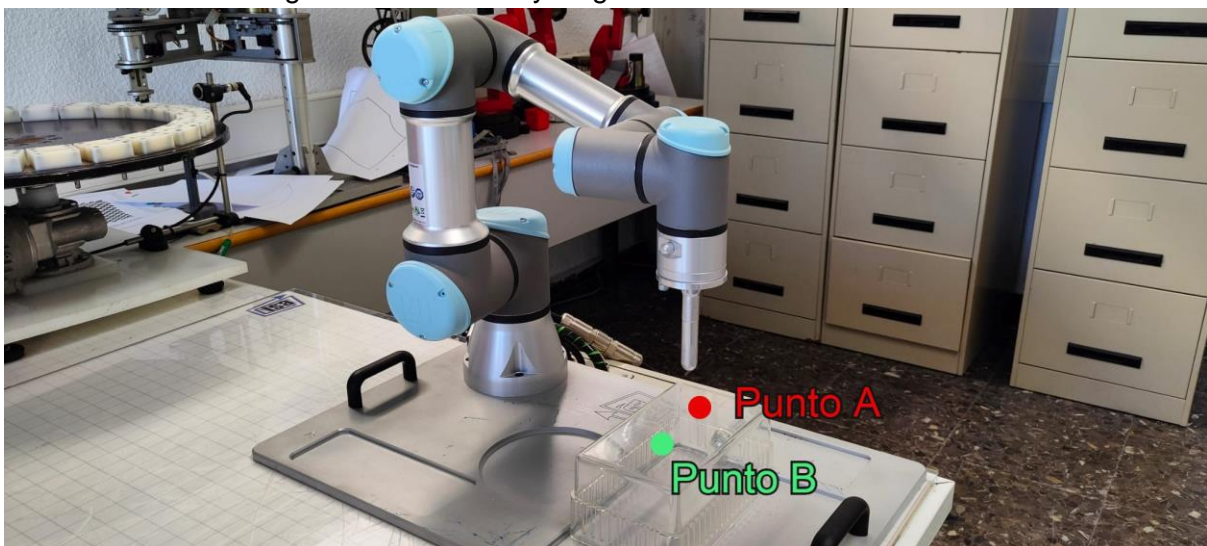


Figura 32 Distancia de barrido experimento nº1.

Además, hacemos una aproximación de las variables explicadas en apartado 4.2.6 de este documento.

| Nombre de la variable | Valor de la Variable |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| Pieza | Pieza plana de metacrilato |
| fuerza | [0,0,4,0,0,0] N |
| Vel_2 | [0.05,0.05,0.05,0.057,0.57,0.57] mm/s |
| force_mode_set_damping() | 0.01 |
| force_mode_set_gain_scaling() | 2 |
| Velocidad al WayPoint3 (Punto B) | 10 mm/s |

Tabla 1 Variables utilizadas en el experimento 1.

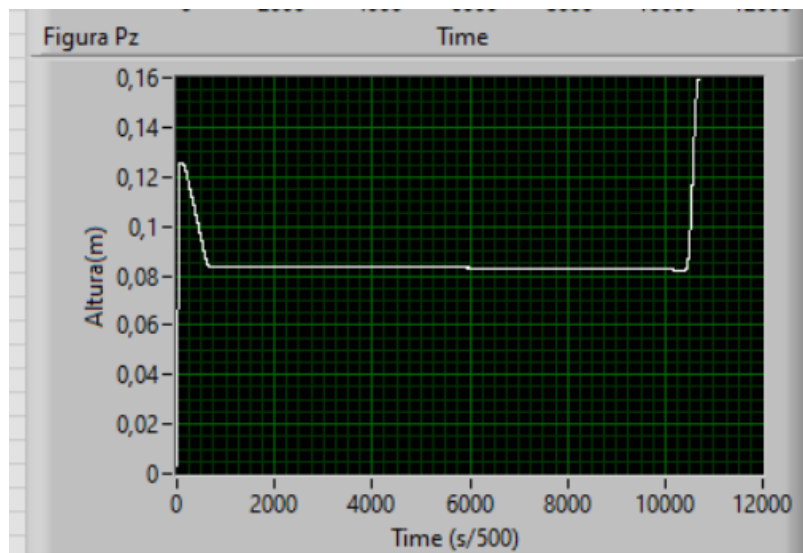


Figura 33 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº1.

Exportamos los resultados a excel para poder trabajar con los datos de una forma más cómoda y verlo mejor. $R^2 = 0,9937$ solo se ha tenido en cuenta el tramo de la pieza.

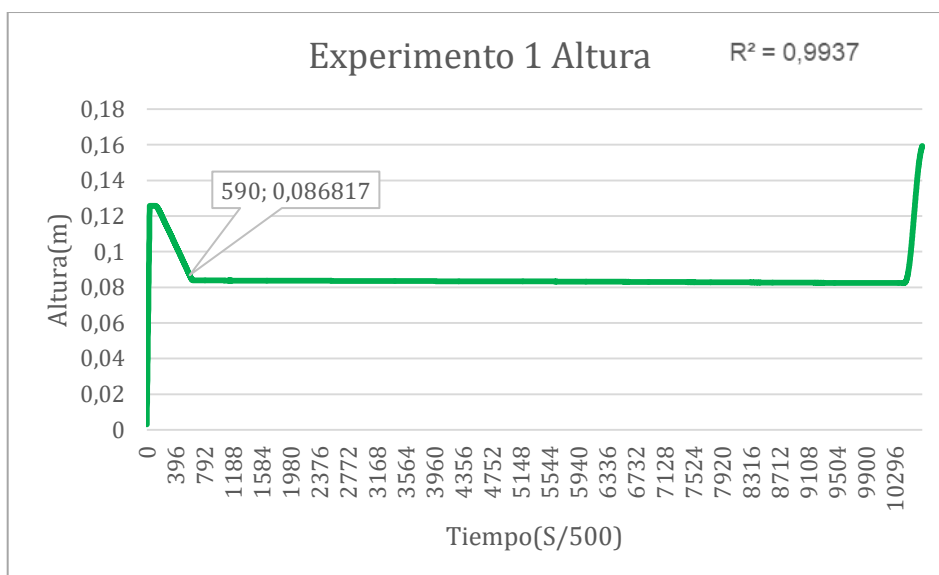


Figura 34 Gráfica de la altura en excel del experimento nº1.

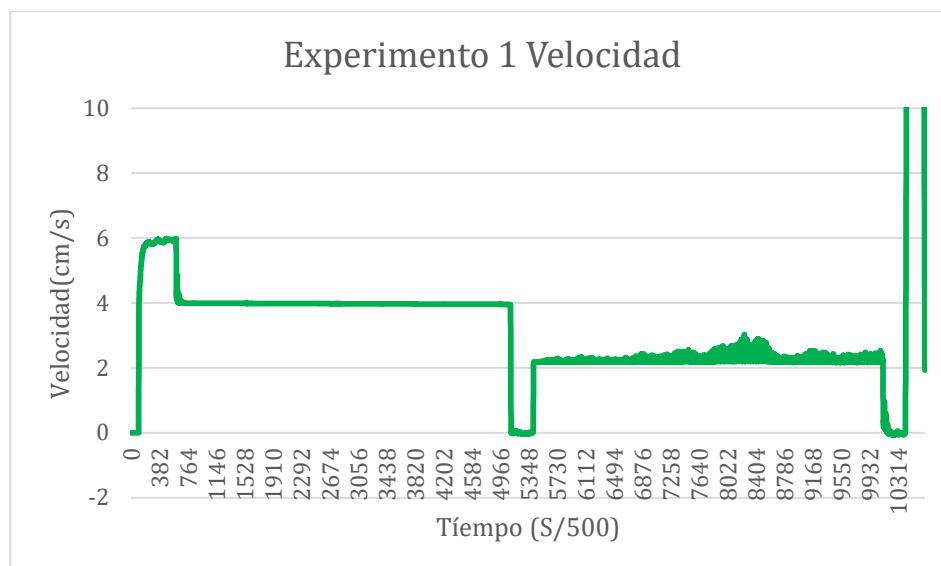


Figura 35 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº1.

Nos damos cuenta viendo los resultados del relieve del experimento 1 el robot aplica una fuerza innecesaria para el contacto con la superficie. Esto se debe de corregir para seguir optimizando nuestros parámetros.

Atendiendo a los resultados obtenidos en la primera toma de contacto con el sistema, vemos como se obtienen unos resultados representativos de la pieza. A pesar de los dos puntos donde no traza la línea recta al 100% estamos viendo como sí que nos devuelve una recta que es lo esperado.

5.2.-Experimento número 2, pieza plana.

Para mitigar los fallos detectados en el experimento 1 procedemos a bajar la fuerza que aplica el robot y la velocidad de barrido (tanto vel_2 que es el límite como la velocidad hasta el Waypoint3) . Y probamos un damping mayor.

| Nombre de la variable | Valor de la Variable |
|----------------------------------|--|
| Pieza | Pieza plana de metacrilato |
| fuerza | [0,0,2,0,0,0] N |
| Vel_2 | [0.025,0.025,0.025,0.027,0.27,0.27] mm/s |
| force_mode_set_damping() | 0.05 |
| force_mode_set_gain_scaling() | 2 |
| Velocidad al WayPoint3 (Punto B) | 5 mm/s |

Tabla 2 Variables utilizadas en el experimento 2.

Dado que todavía estamos en una fase temprana, seguimos manteniendo la distancia que realiza el barrido con del punto A al Punto B. Esto nos otorga la posibilidad de comparar el experimento 1 y 2 viendo cómo afecta principalmente la velocidad de barrido.

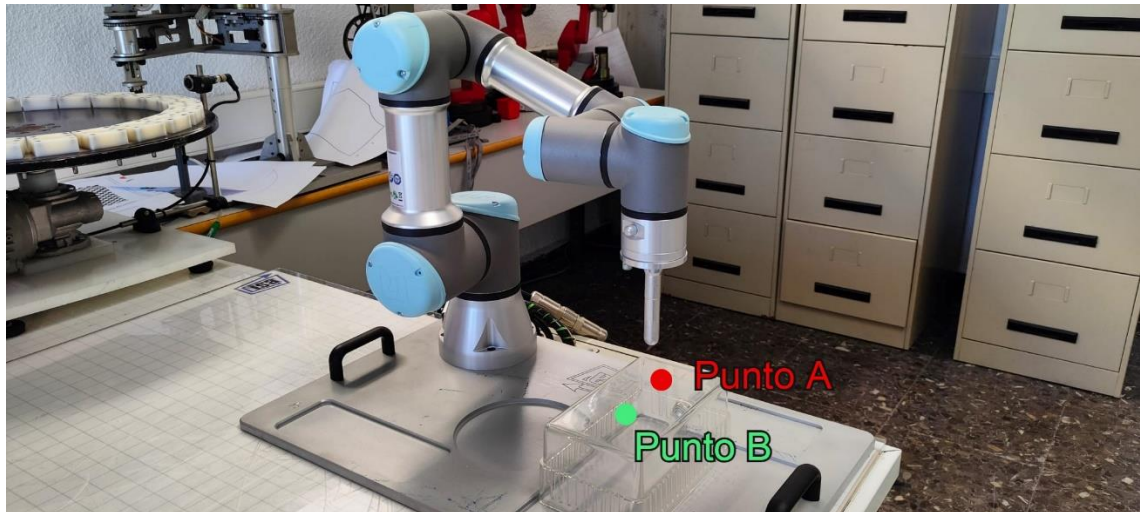


Figura 36 Distancia de barrido experimento n°2.

Obteniendo en el programa LabVIEW la siguiente gráfica de seguimiento del relieve:

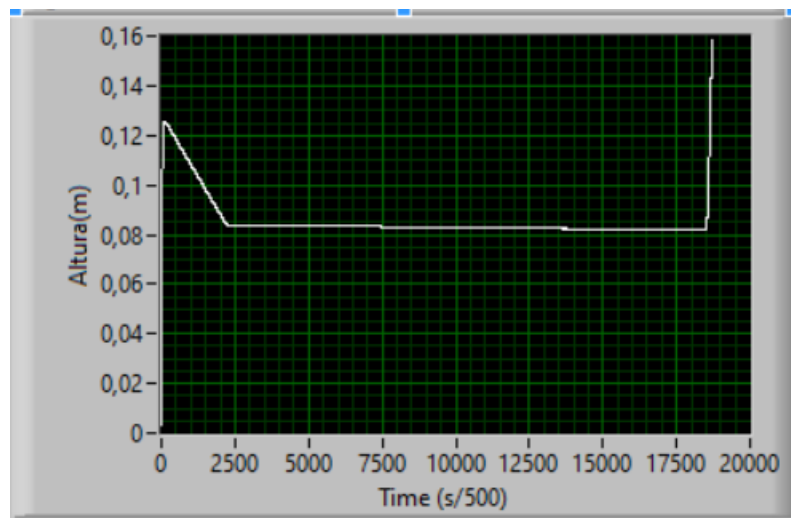


Figura 37 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento n°2.

Exportamos los resultados a excel para trabajar de forma más cómoda y obtenemos la gráfica del relieve y de velocidad. $R^2 = 0,9986$ solo se ha tenido en cuenta el tramo de la pieza.

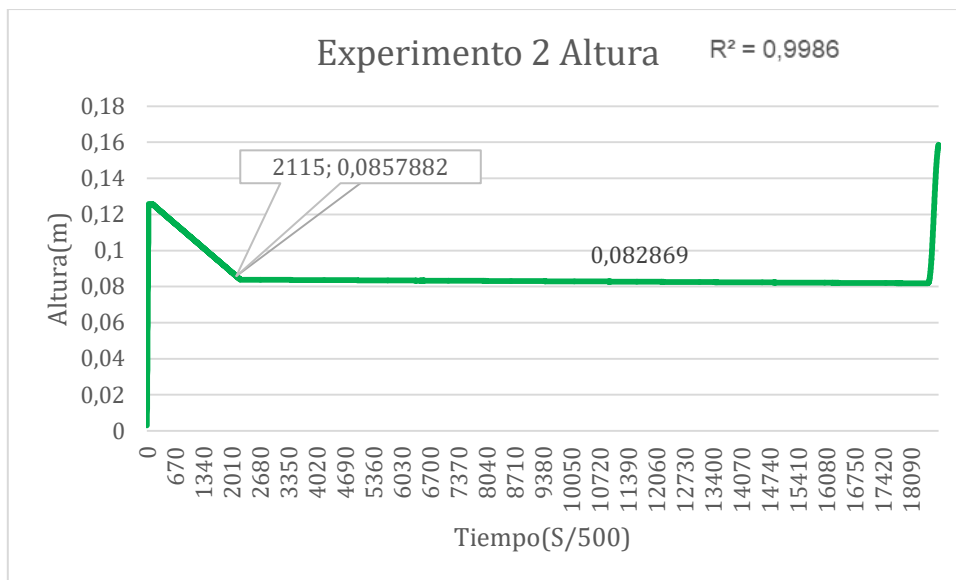


Figura 38 Gráfica de la altura en excel del experimento n°2.

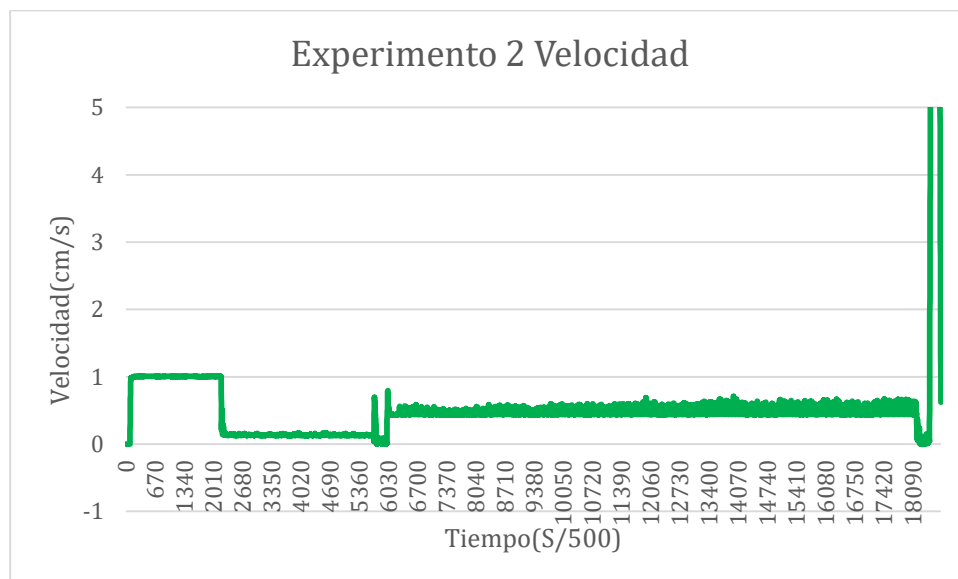


Figura 39 Gráfica de la velocidad en excel del experimento n°2.

Apreciamos como obtenemos un movimiento más fluido debido a que aplica una fuerza y velocidad menor. Siguiendo el experimento en tiempo real se detecta que sigue la referencia con mayor suavidad, sin oprimir la pieza pero siempre en contacto con la misma. Se observa como en la gráfica del relieve tenemos más segundos, eso es lógico ya que realiza la misma distancia de barrido pero de forma más lenta.

5.3-Experimento número 3, pieza con pendiente.

Debido a que en el experimento 2 ya obtenemos unos datos y comportamiento que parece cumplir con nuestras expectativas y necesidades, vamos a poner a prueba nuestro sistema con un plano inclinado, estudiando la altura dónde deberá reflejarse una rampa, además de analizar el comportamiento del sensor de fuerza para comprobar que el sistema sea conforme a las especificaciones establecidas.

| Nombre de la variable | Valor de la Variable |
|----------------------------------|--|
| Pieza | Pieza plana de metacrilato |
| fuerza | [0,0,2,0,0,0] N |
| Vel_2 | [0.025,0.025,0.025,0.027,0.27,0.27] mm/s |
| force_mode_set_damping() | 0.05 |
| force_mode_set_gain_scaling() | 2 |
| Velocidad al WayPoint3 (Punto B) | 5 mm/s |

Tabla 3 Variables utilizadas en el experimento 3.

Realizamos el plano inclinado con la ayuda del taco de madera y la libreta.

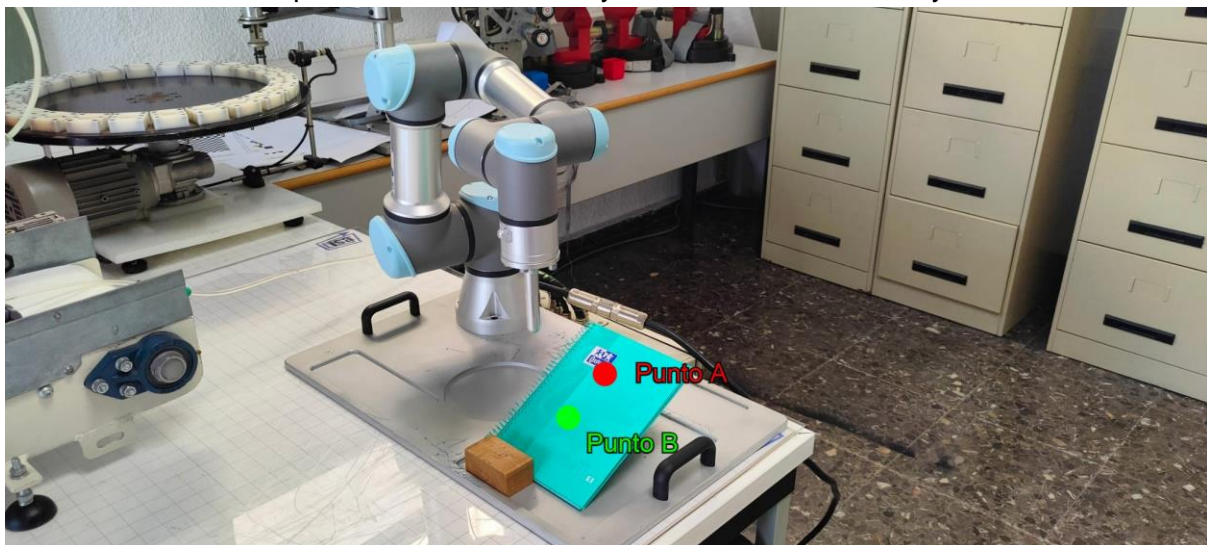


Figura 40 Imagen del experimento n°3.

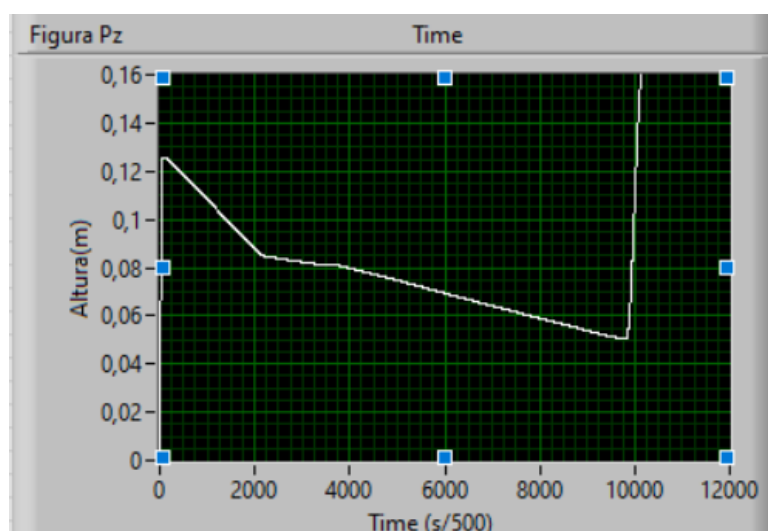


Figura 41 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento n°3.

Se exportan los datos a excel para trabajar de forma más cómoda. $R^2 = 0,9999$ solo se ha tenido en cuenta el tramo con la libreta inclinada.

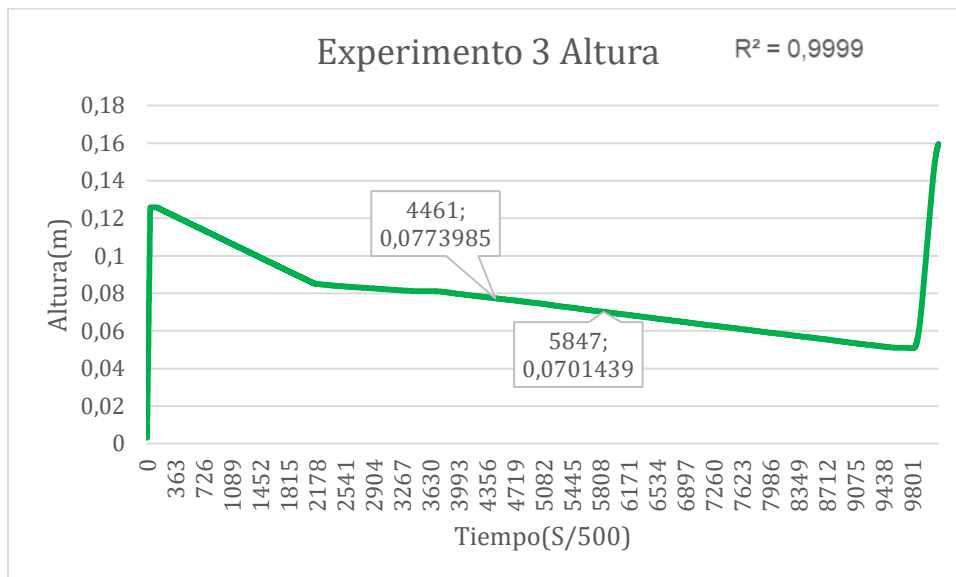


Figura 42 Gráfica de la altura en excel del experimento nº3.

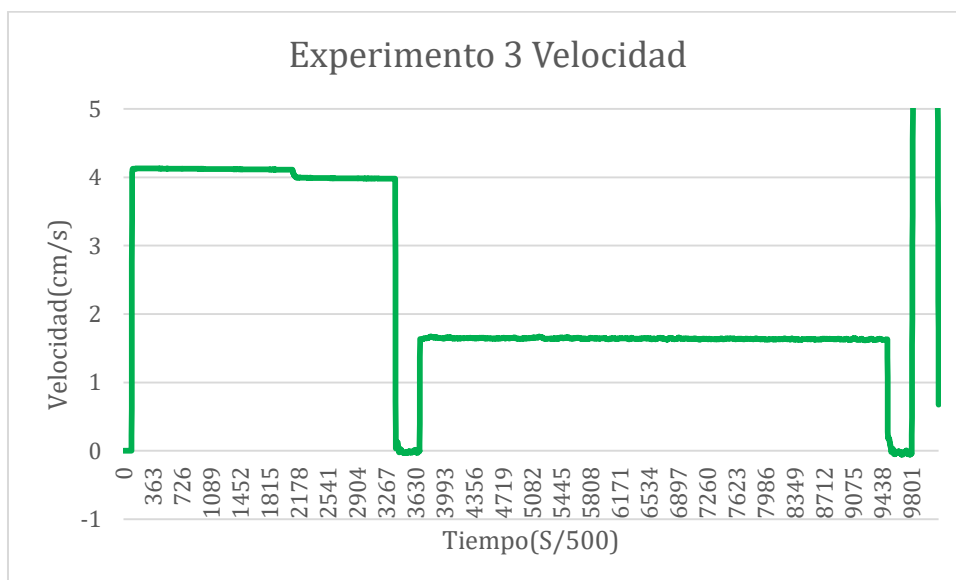


Figura 43 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº3.

Además, en este experimento vamos a procesar la trama que obtenemos del sensor de fuerza, para comprobar si tenemos en algún momento de la rampa un salto de información, esto ya se ha comentado que se traduce en que la punta de la herramienta no contacta con la pieza por lo que el sensor de fuerza no detectaría fuerza. En caso de producirse deberíamos corregirlo para tener información en todo momento.

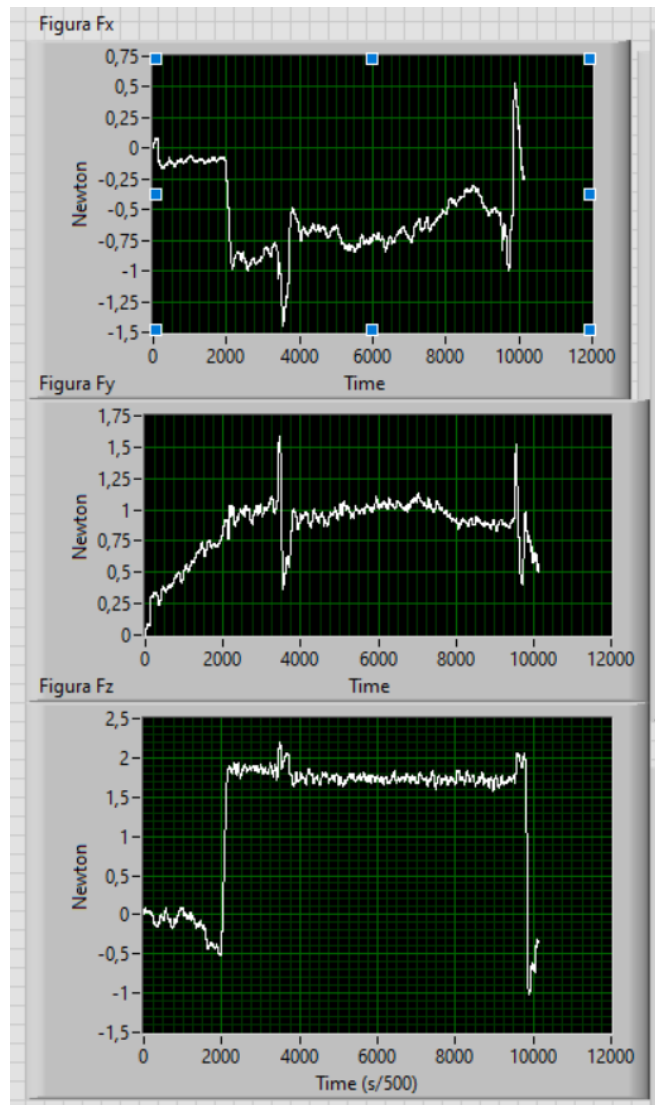


Figura 44 Gráficas de la fuerza que lee el sensor de fuerza (F_x , F_y , F_z) del experimento nº3.

Pasamos los datos a excel para poder trabajar de forma más cómoda, se va a procesar solo la fuerza del eje Z ya que es dónde está trabajando el sistema para obtener el relieve de la pieza.

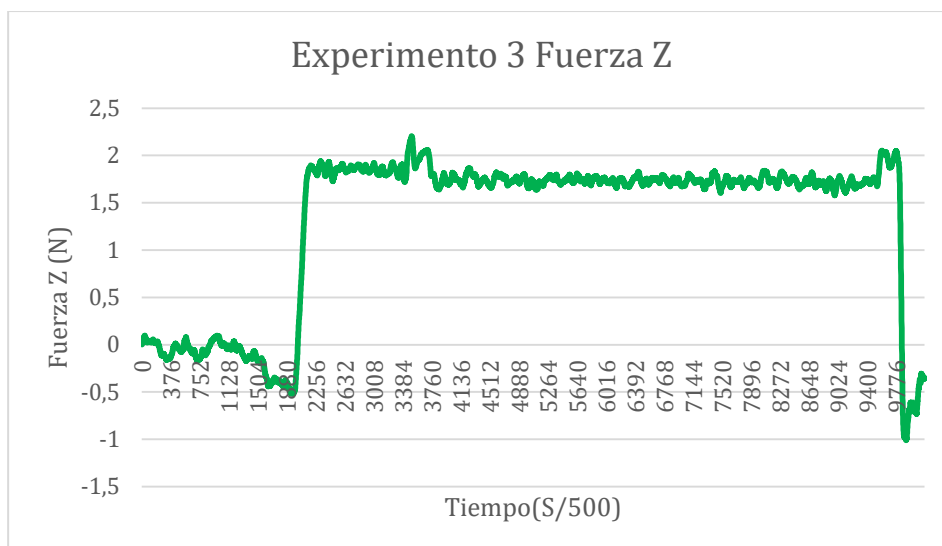


Figura 45 Gráfica de Fz en el experimento nº3.

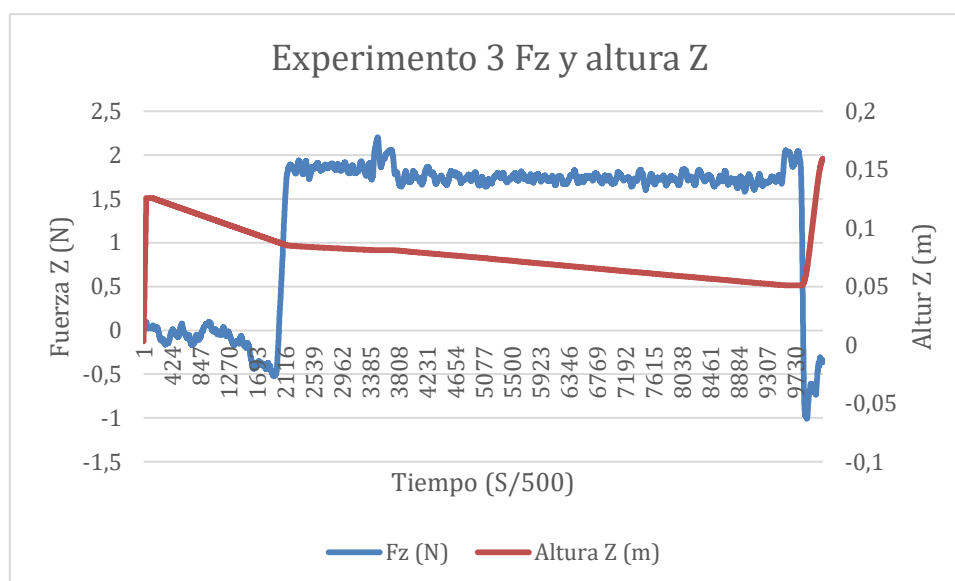


Figura 46 Gráfica combinada Fz y altura Z experimento nº3.

La explicación en detalle de las gráficas del sensor de fuerza se explicará en el punto 6 Conclusiones de este documento, pero adelantamos que los resultados nos confirman que no tenemos pérdidas de contacto con la pieza, por lo que procedemos con el experimento 4.

5.4-Experimento número 4, pieza impresa en 3D.

En el experimento 3 ya tenemos una respuesta con la que nos encontramos cómodos en lo que se refiere a la altura, además de tener un sistema sin saltos de información, en un plano inclinado por ello ya pasamos a nuestra pieza de interés. Una pieza impresa en 3D con varias pendientes y radios de curvatura.

| Nombre de la variable | Valor de la Variable |
|----------------------------------|--|
| Pieza | Pieza 3D con pendientes |
| fuerza | [0,0,2,0,0,0] N |
| Vel_2 | [0.025,0.025,0.025,0.027,0.27,0.27] mm/s |
| force_mode_set_damping() | 0.05 |
| force_mode_set_gain_scaling() | 2 |
| Velocidad al WayPoint3 (Punto B) | 5 mm/s |

Tabla 4 Variables utilizadas en el experimento 4.

Recordamos que seguimos manteniendo el mismo Punto A y B que en el experimento 2, en este experimento lo que ha variado ha sido la referencia de la pieza.

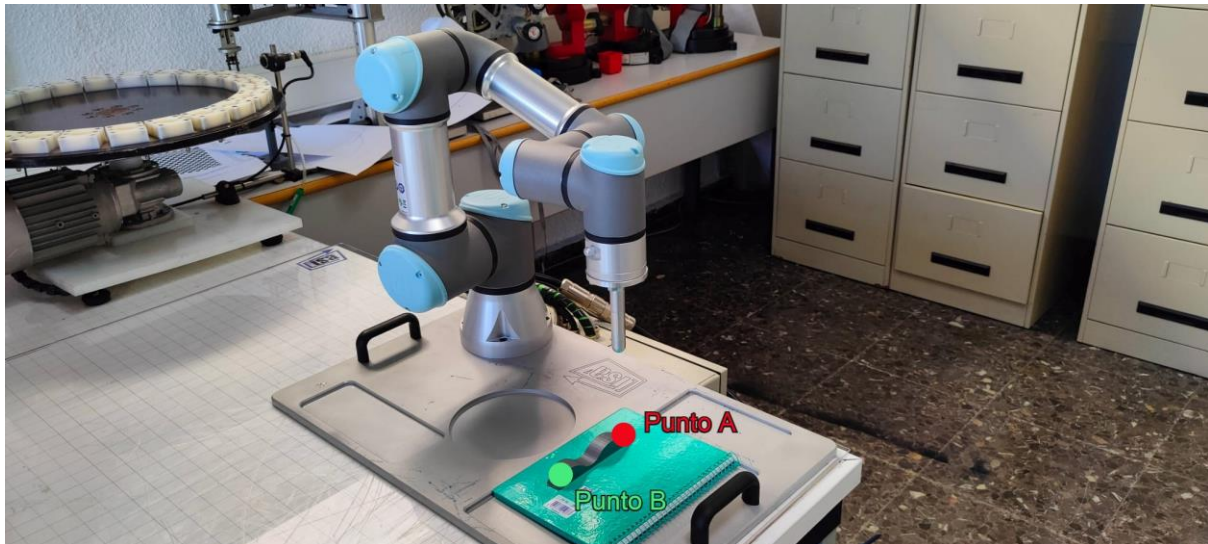


Figura 47 Distancia de barrido experimento nº4.

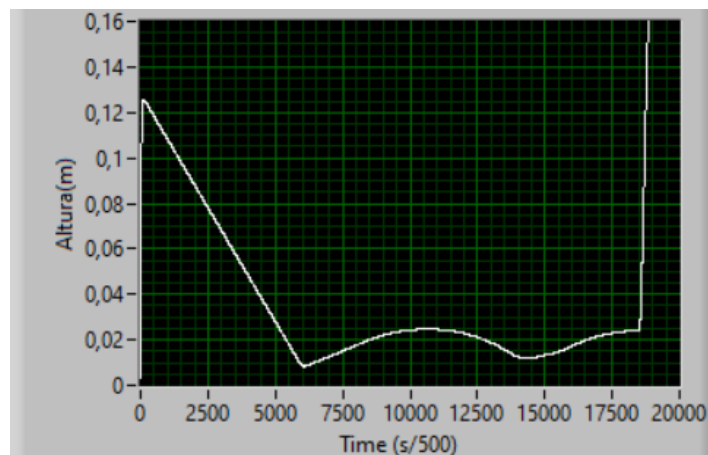


Figura 48 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº4.

Exportamos los resultados a excel para trabajar de forma más cómoda y obtenemos la gráfica del relieve y de velocidad.

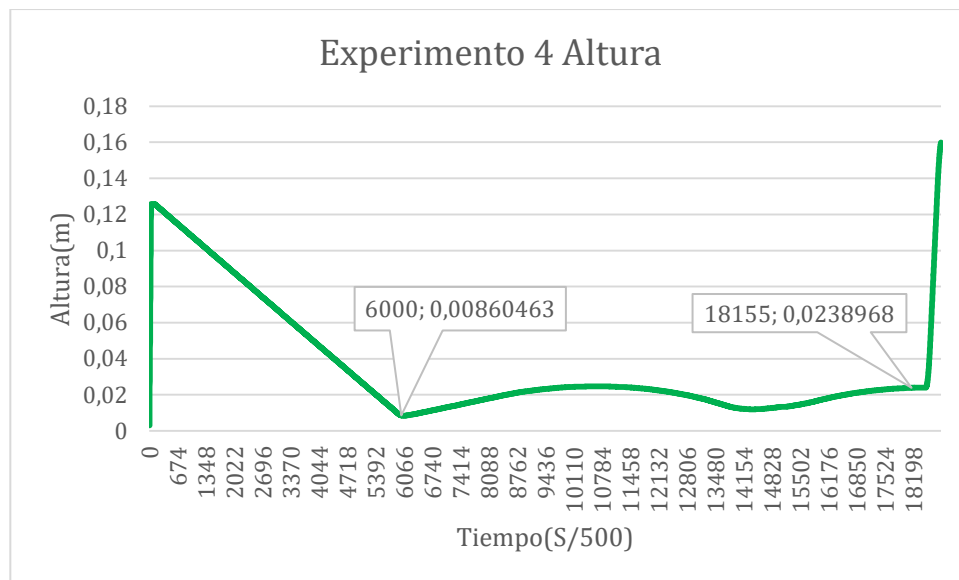


Figura 49 Gráfica de la altura en excel del experimento nº4.

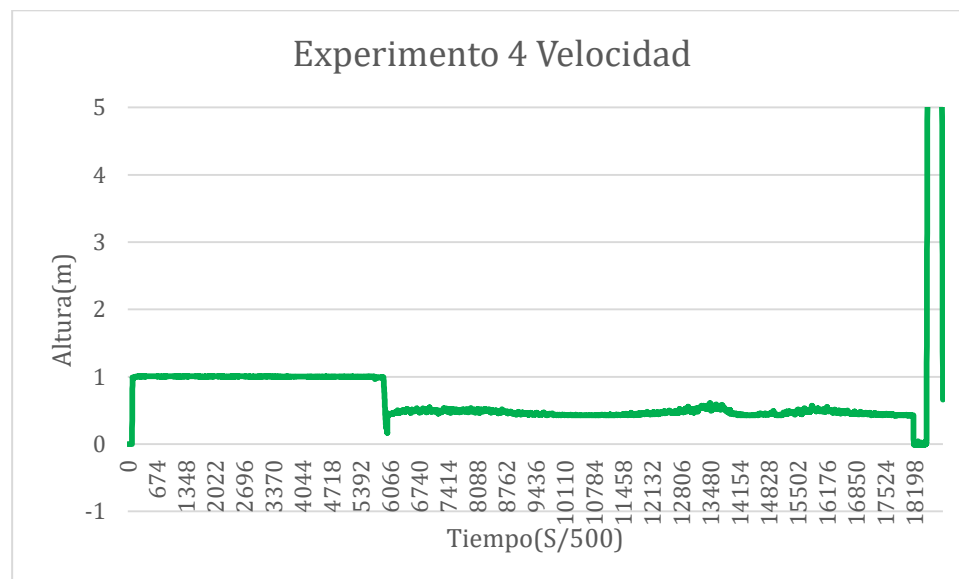


Figura 50 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº4.

Podemos comprobar que en el experimento 3 ya empieza a salir el relieve de la pieza, pero aún no está pulido, si nos fijamos en la parte final no la acaba de mostrar eso es debido a que la distancia de barrido del punto A al punto B es inferior a la longitud de la pieza. Además de no tener las curvas lo suficientemente nítidas como para parar de ajustar nuestro sistema, es por ello que se procede a realizar el experimento número 4.

Destacamos que el experimento 4 se ha realizado bajo la hipótesis que el sistema sigue siendo eficaz sin pérdidas de información, tal y como hemos comprobado en el experimento 3.

5.5-Experimento número 5, pieza impresa en 3D.

La forma de tener una mayor precisión es haciendo un barrido de la pieza a una velocidad menor, así tenemos una mejor lectura del relieve debido a que nuestro sistema tiene un mayor tiempo para adaptarse a la superficie de la pieza, pero lo penalizaremos en el tiempo el cuál se necesita emplear para realizar el barrido, por lo que lo que vamos a bajar es un poco el límite de velocidad máxima, para que en caso de que llegue a él no lo sobrepase, además de recopilar una cantidad de datos más elevada, lo que se traduce en mayor precisión.

Se modifica el punto B para que tenga una mayor recorrido en el barrido y asegurarnos que estamos midiendo la parte final de la pieza.

| Nombre de la variable | Valor de la Variable |
|----------------------------------|---|
| Pieza | Pieza 3D con pendientes |
| fuerza | [0,0,2,0,0,0] |
| Vel_2 | [0.01, 0.01, 0.01, 0.017, 0.017, 0.017] |
| force_mode_set_damping() | 0.05 |
| force_mode_set_gain_scaling() | 2 |
| Velocidad al WayPoint3 (Punto B) | 5 mm/s |

Tabla 5 Variables utilizadas en el experimento 5.

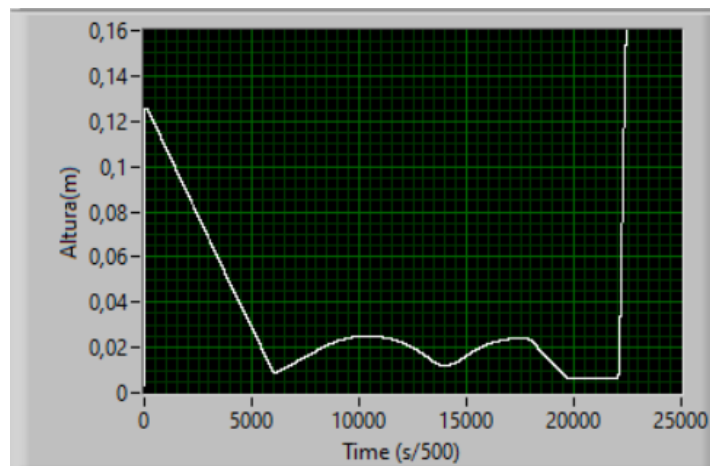


Figura 51 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento n°5.

Exportamos los datos a excel para trabajar de forma más cómoda y precisa.

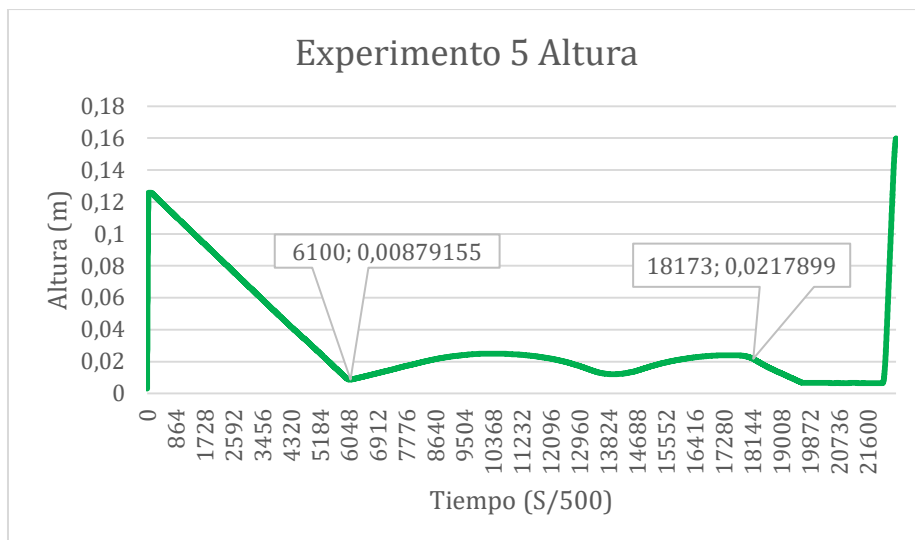


Figura 52 Gráfica de la altura en excel del experimento nº5.

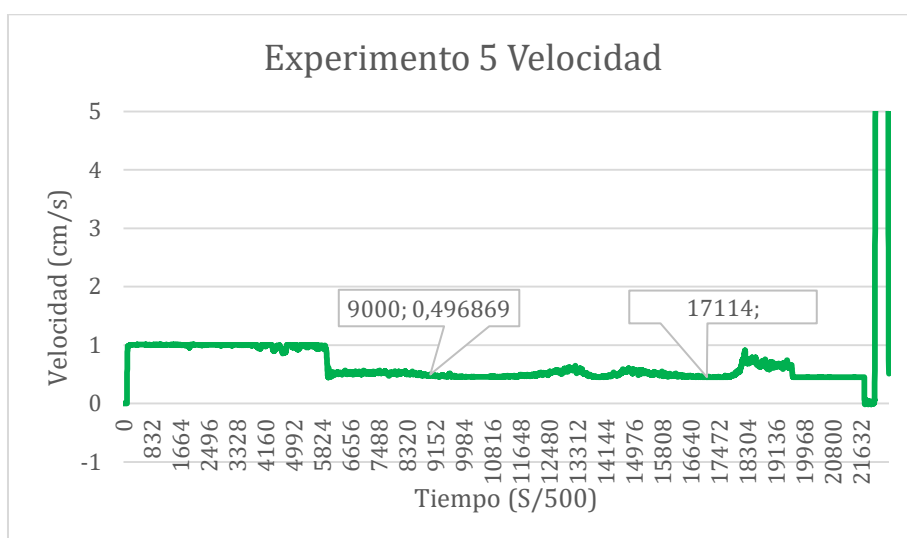


Figura 53 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº5.

Como podemos comprobar en comparación al experimento 4, tenemos una curva más próxima a la realidad, permitiéndonos identificar los diferentes tramos de la pieza, la primera rampa con pendiente positiva vemos como entrelaza con 3 curvas en forma de S acabando con la segunda rampa con pendiente negativa. Se observa como con el cambio del punto B, se aprecia una recta al final de la gráfica eso quiere decir que es el suelo y que se ha realizado el barrido hasta el final de la pieza.

5.6.1-Experimento número 6.1, pieza impresa en 3D.

En el experimento 4 ya tenemos una respuesta satisfactoria, aún así debemos recordar que tenemos una ganancia de 2, lo que no es recomendable como ya se ha explicado, por lo que se bajará a 1 para reducir el riesgo de inestabilidad del sistema. Para mejorar la visualización y las garantías de que el barrido que realizamos desde el punto A al punto B es lo suficientemente grande cómo para que la pieza esté dentro de ese rango vamos a ampliar el Punto A (El punto B ya ha sido modificado en el experimento 4. Así tenemos una mayor superficie de barrido.

| Nombre de la variable | Valor de la Variable |
|----------------------------------|---|
| Pieza | Pieza 3D con pendientes |
| fuerza | [0,0,2,0,0,0] |
| Vel_2 | [0.01, 0.01, 0.01, 0.017, 0.017, 0.017] |
| force_mode_set_damping() | 0.05 |
| force_mode_set_gain_scaling() | 1.5 |
| Velocidad al WayPoint3 (Punto B) | 5 mm/s |

Tabla 6 Variables utilizadas en el experimento 6.1.

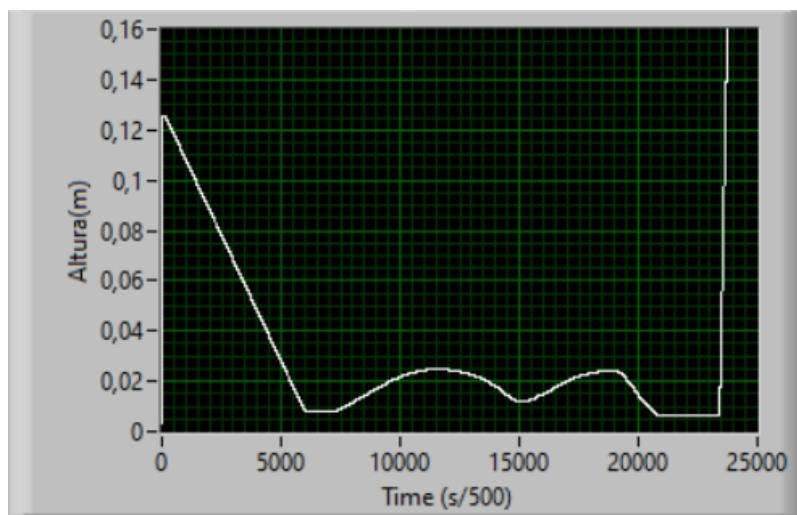


Figura 54 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº6.1.

Exportamos los datos obtenidos a excel para trabajar de forma más cómoda y precisa.

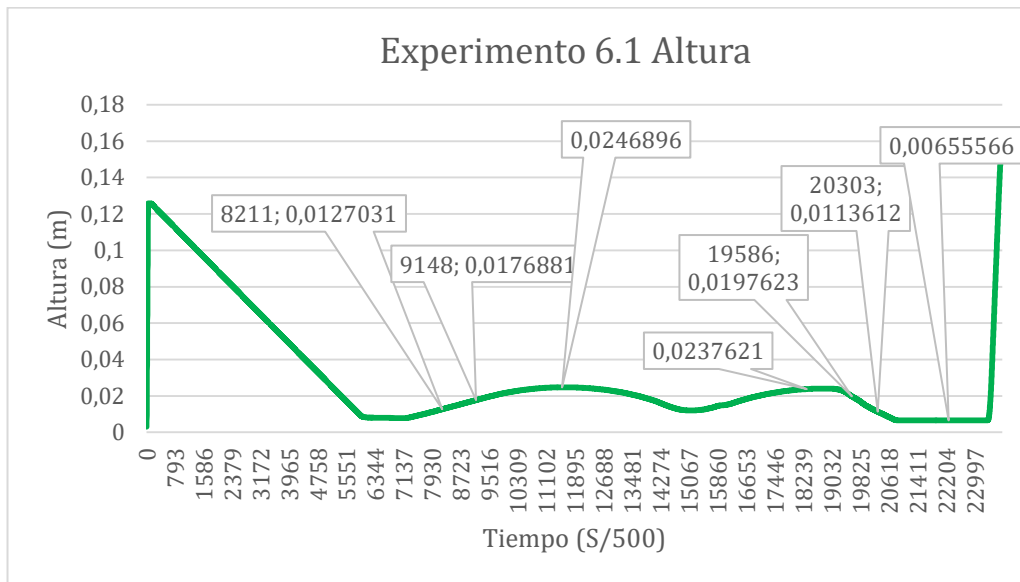


Figura 55 Gráfica de la altura en excel del experimento nº6.1.

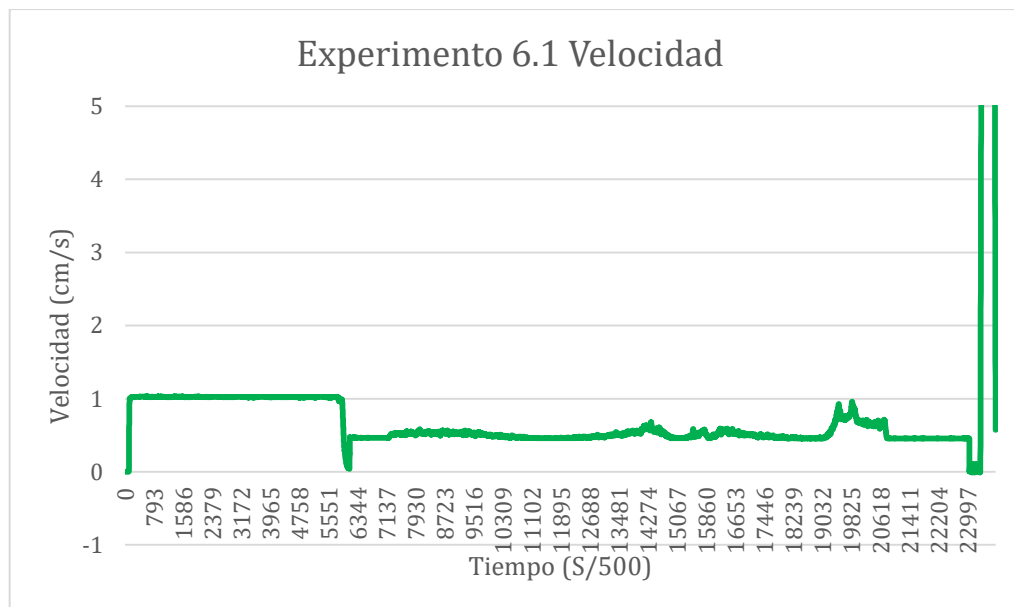


Figura 56 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº6.1.

Podemos observar en la gráfica de la altura cómo ya nos aparece el relieve entero de la pieza, además de caracterizarlo de forma precisa. En el apartado conclusiones se realizarán diversos cálculos para determinar dicha precisión.

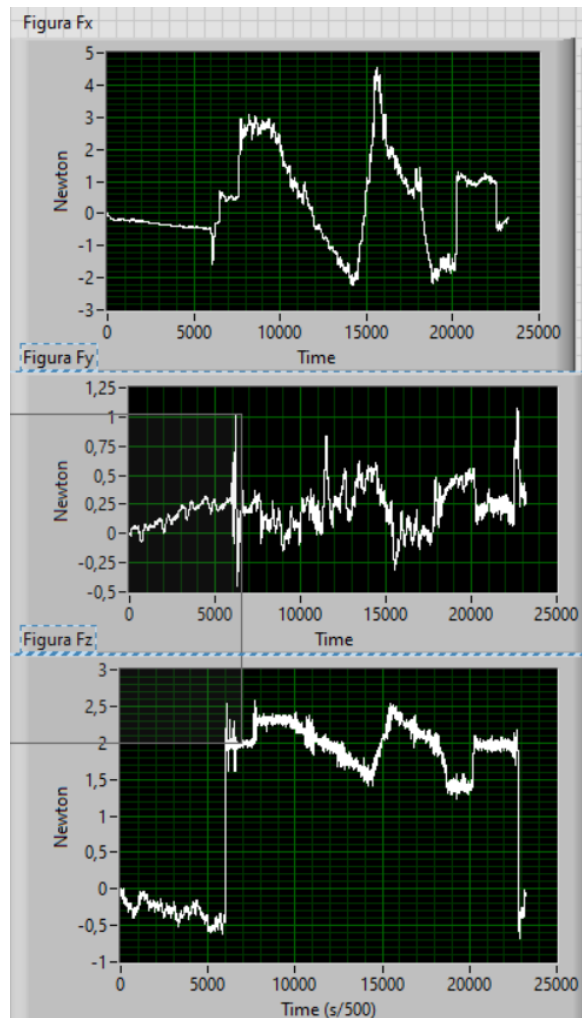


Figura 57 Gráficas de la fuerza que lee el sensor de fuerza (F_x , F_y , F_z) del experimento n°6.1.

Exportamos los datos a excel de la Fuerza que aplica en el eje Z.

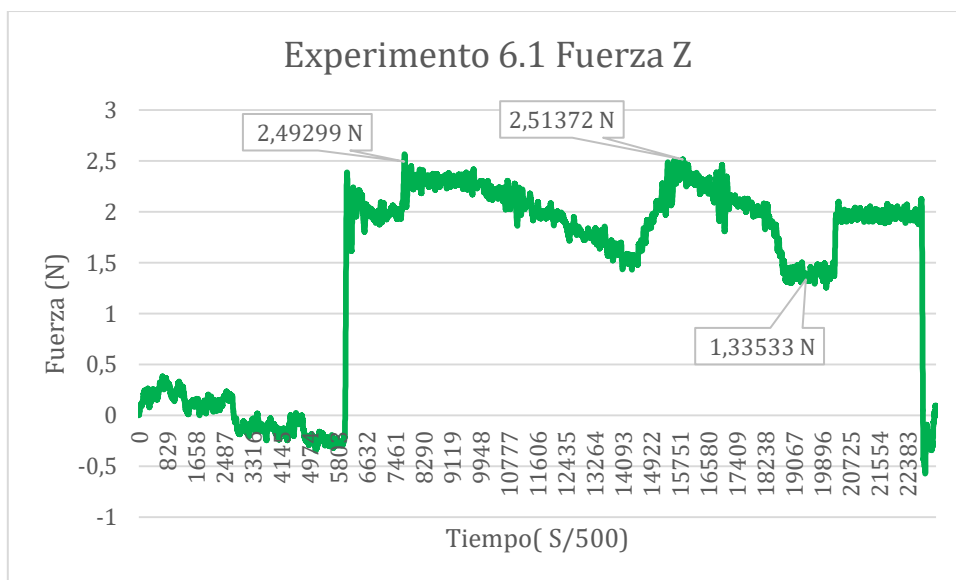


Figura 58 Gráfica F_z en excel del experimento n°6.1.

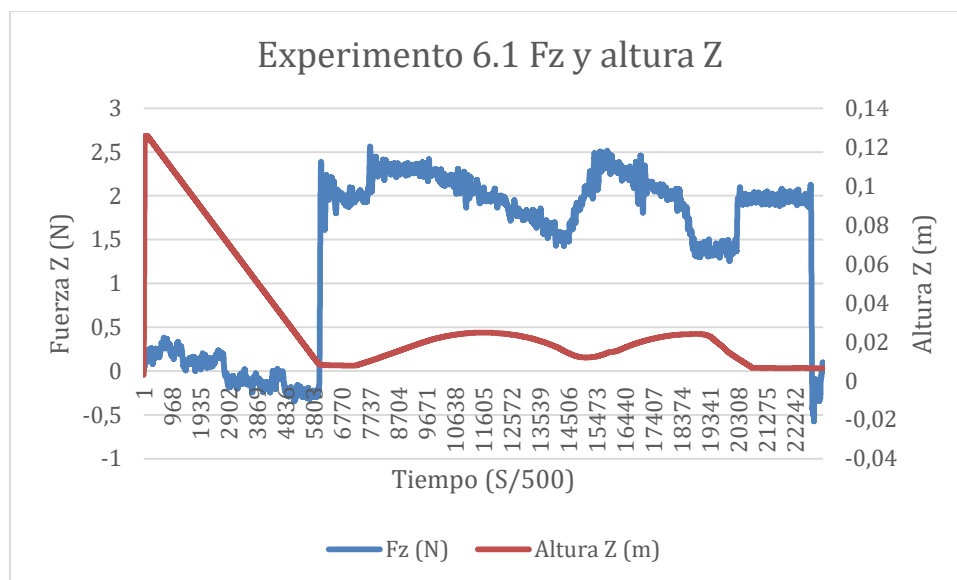


Figura 59 Gráfica combinada Fz y altura Z experimento n°6.1.

Podemos observar como en el momento que empieza a realizar el barrido del punto A hasta el punto B, el robot está aplicando una fuerza entre 2.51372 N y 1.335 N.

5.6.2-Experimento número 6.2, pieza impresa en 3D.

Debido a que los resultados obtenidos en el experimento 6.1 tienen la precisión que buscábamos así como el comportamiento del sistema, sin tener un déficit de información sobre el relieve de la pieza. Se aprecia la totalidad de la pieza, mostrando sus límites de altura y longitud por lo que no debemos seguir retocando el programa, es hora de repetir el experimento 6.1 tres veces para corroborar que el proyecto y experimento funciona y no ha sido una casualidad.

Recordamos que es un trabajo experimental, por lo que es necesario realizar estas 3 pruebas adicionales una vez ya tenemos robot, programa y pieza definidos.

| Nombre de la variable | Valor de la Variable |
|----------------------------------|---|
| Pieza | Pieza 3D con pendientes |
| fuerza | [0,0,2,0,0,0] |
| Vel_2 | [0.01, 0.01, 0.01, 0.017, 0.017, 0.017] |
| force_mode_set_damping() | 0.05 |
| force_mode_set_gain_scaling() | 1.5 |
| Velocidad al WayPoint3 (Punto B) | 5 mm/s |

Tabla 7 Variables utilizadas en el experimento 6.2.

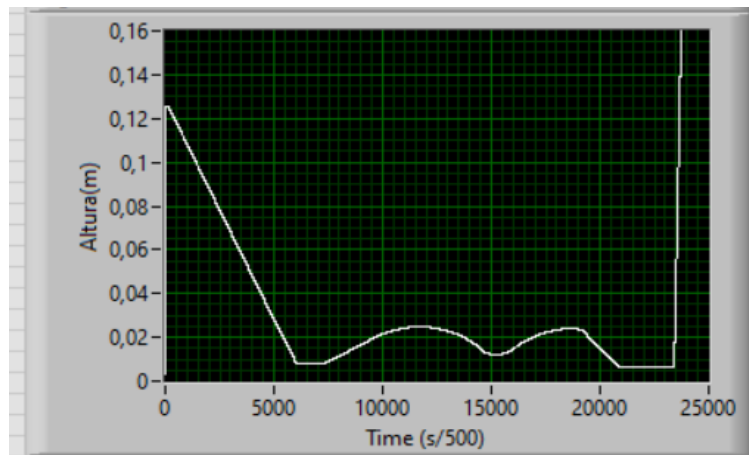


Figura 60 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº6.2.

Exportamos los datos obtenidos a excel para trabajar de forma más cómoda y precisa.

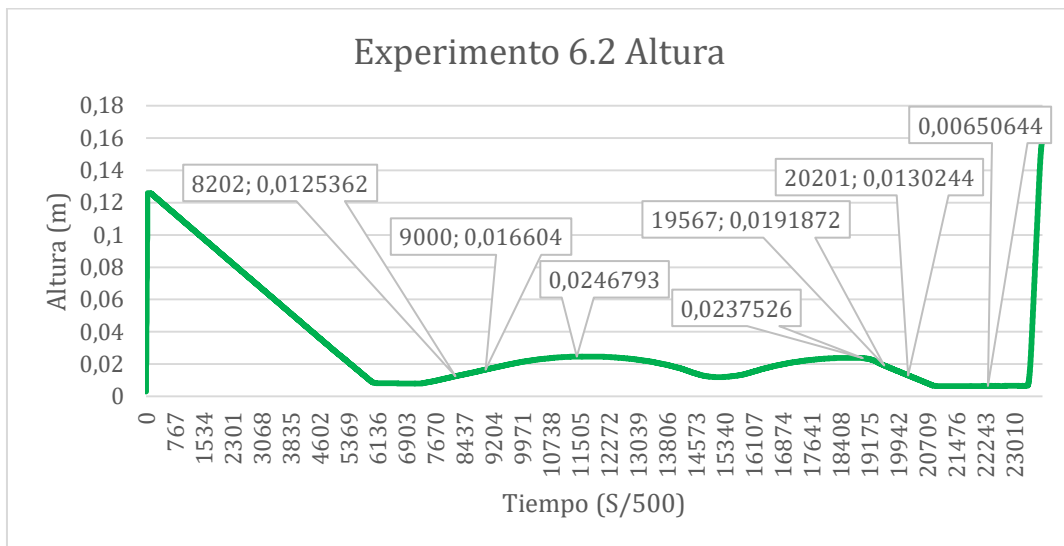


Figura 61 Gráfica de la altura en excel del experimento nº6.2.

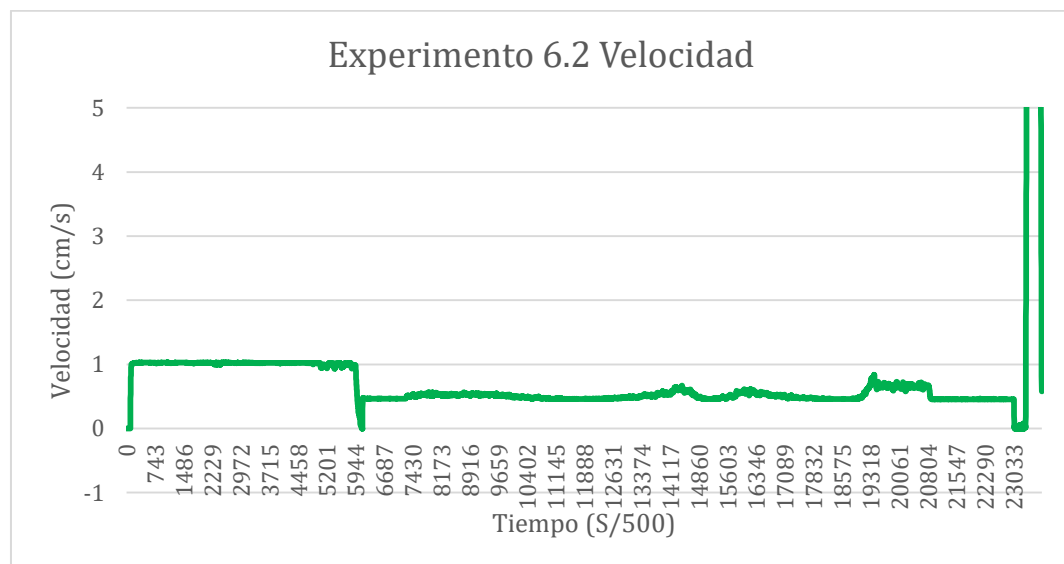


Figura 62 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº6.2.

Acto seguido procedemos a estudiar el comportamiento y lecturas del sensor de fuerza.

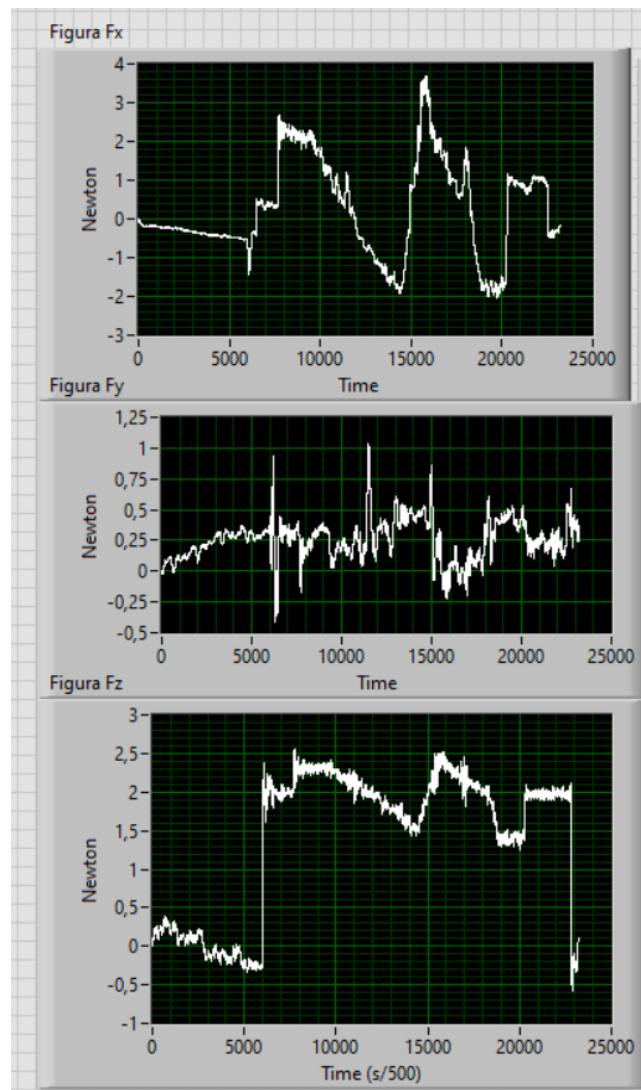


Figura 63 Gráficas de la fuerza que lee el sensor de fuerza (F_x , F_y , F_z) del experimento n°6.2.

Exportamos los datos a excel de la Fuerza que aplica en el eje Z.

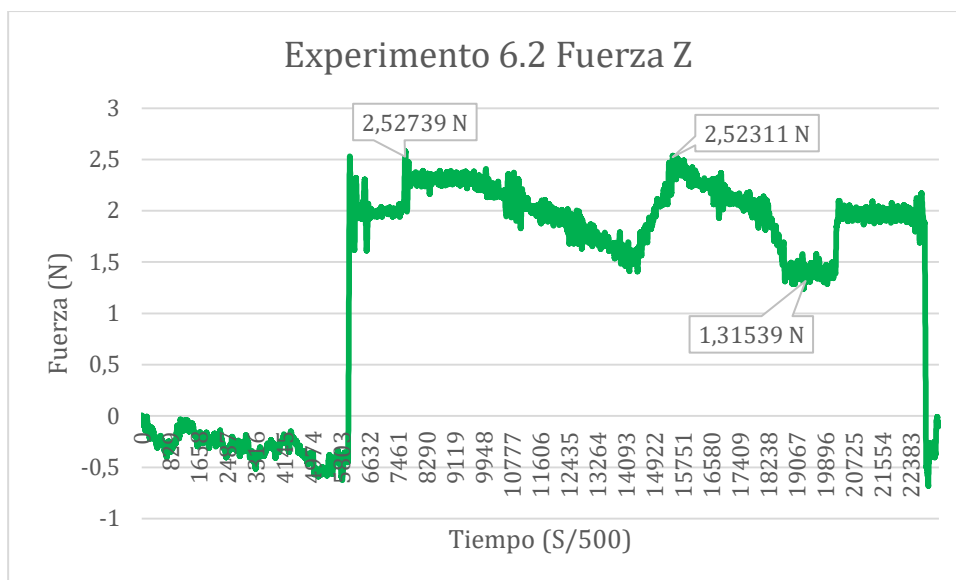


Figura 64 Gráfica Fz en excel del experimento nº6.2.

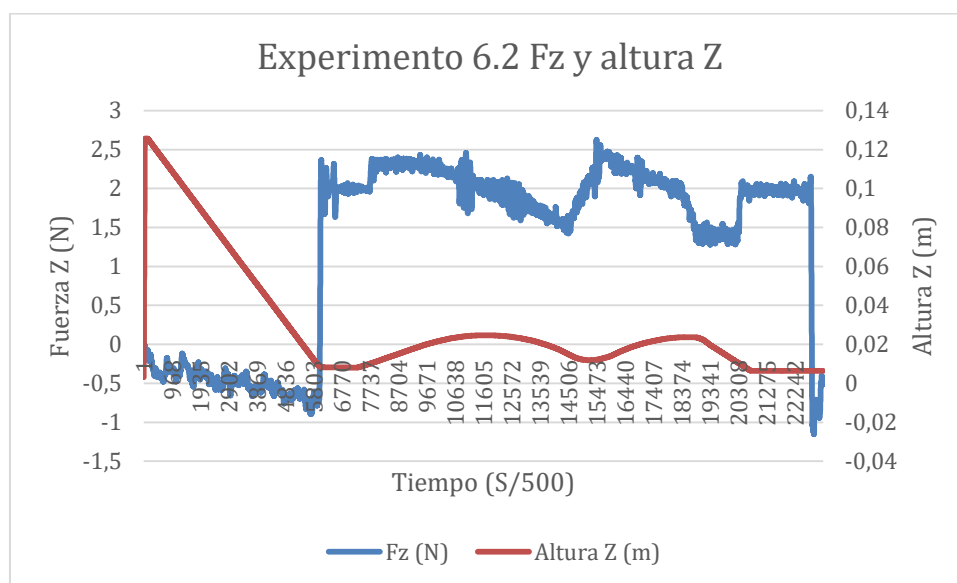


Figura 65 Gráfica combinada Fz y altura Z experimento nº6.2.

Podemos observar como en el momento que empieza a realizar el barrido del punto A hasta el punto B, el robot está aplicando una fuerza entre 2.52739 N y 1.31539 N.

5.6.3-Experimento número 6.3, pieza impresa en 3D.

Debido a que los resultados obtenidos en el experimento 6.1 tienen la precisión que buscábamos así como el comportamiento del sistema, sin tener un déficit de información sobre el relieve de la pieza. Se aprecia la totalidad de la pieza, mostrando sus límites de altura y longitud por lo que no debemos seguir retocando el programa, es hora de repetir el experimento 6.1 tres veces para corroborar que el proyecto y experimento funciona y no ha sido una casualidad.

Recordamos que es un trabajo experimental, por lo que es necesario realizar estas 3 pruebas adicionales una vez ya tenemos robot, programa y pieza definidos.

| Nombre de la variable | Valor de la Variable |
|----------------------------------|---|
| Pieza | Pieza 3D con pendientes |
| fuerza | [0,0,2,0,0,0] |
| Vel_2 | [0.01, 0.01, 0.01, 0.017, 0.017, 0.017] |
| force_mode_set_damping() | 0.05 |
| force_mode_set_gain_scaling() | 1.5 |
| Velocidad al WayPoint3 (Punto B) | 5 mm/s |

Tabla 8 Variables utilizadas en el experimento 6.3.

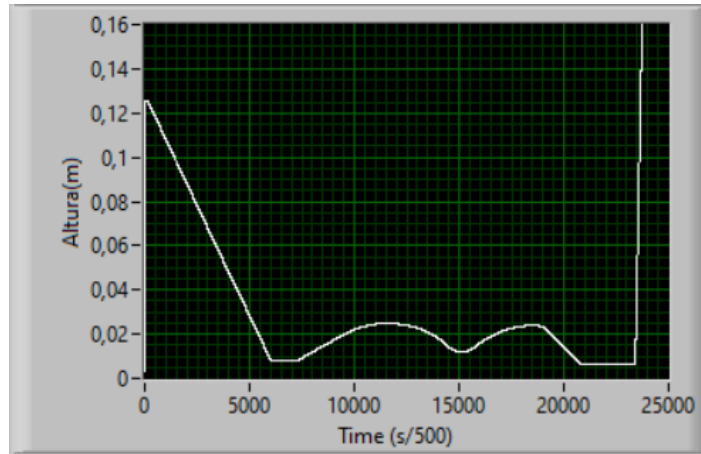


Figura 66 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº6.3.

Exportamos los datos obtenidos a excel para trabajar de forma más cómoda y precisa.

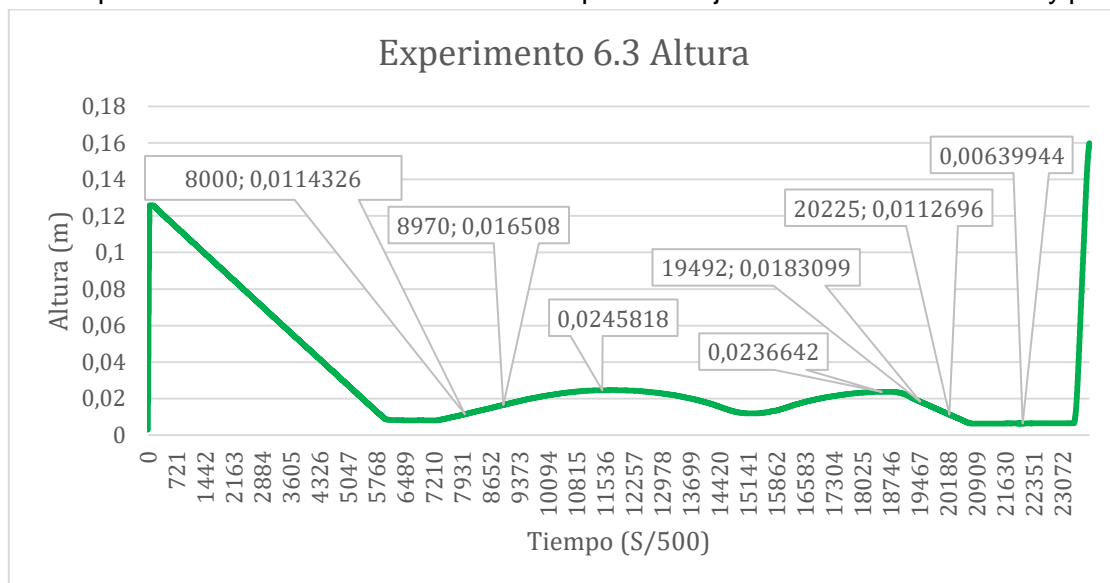


Figura 67 Gráfica de la altura en excel del experimento nº6.3.

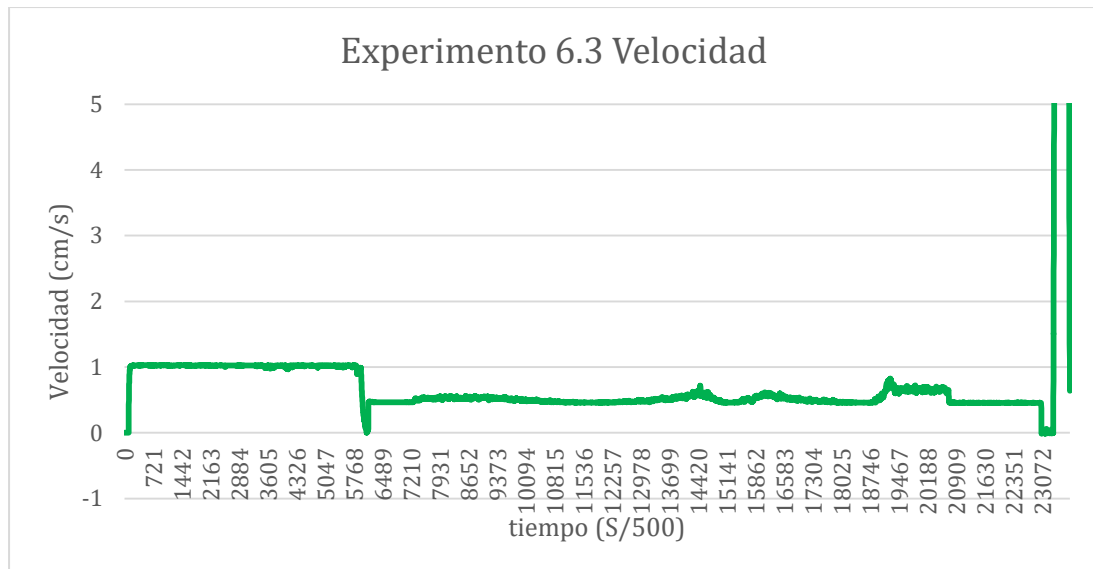


Figura 68 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº6.3.

Acto seguido procedemos a estudiar el comportamiento y lecturas del sensor de fuerza.

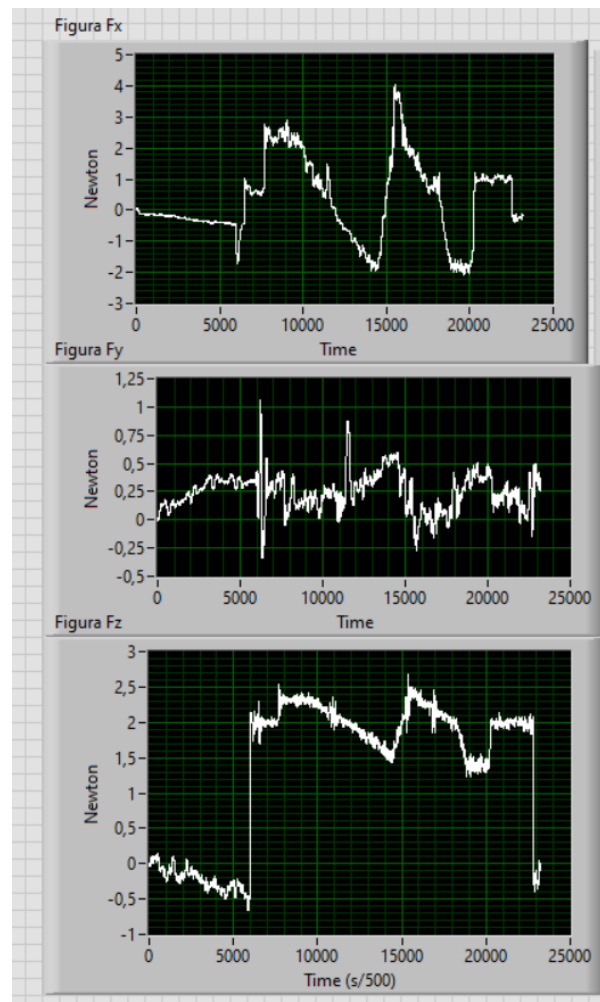


Figura 69 Gráficas de la fuerza que lee el sensor de fuerza (F_x , F_y , F_z) del experimento nº6.3.

Exportamos los datos a excel de la Fuerza que aplica en el eje Z.

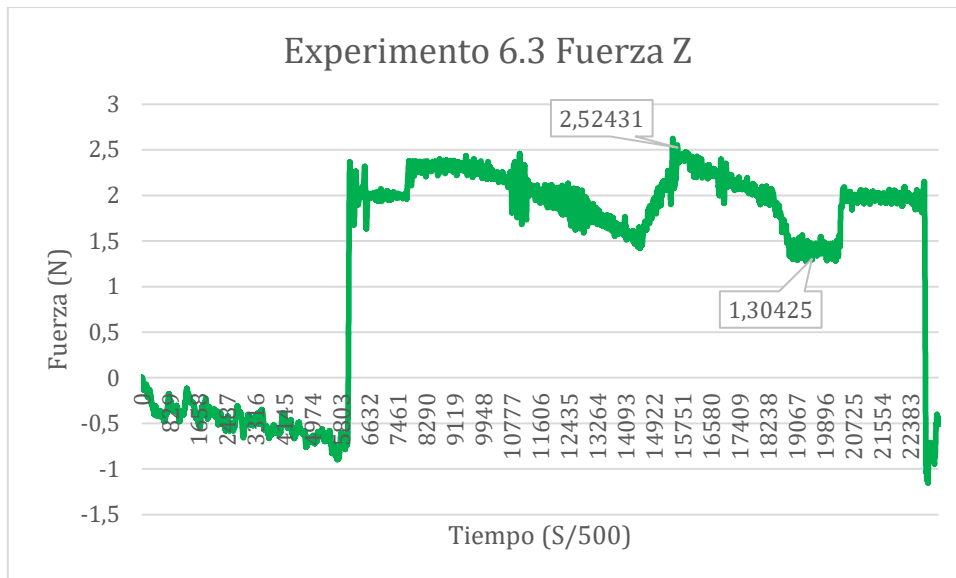


Figura 70 Gráfica Fz en excel del experimento n°6.3.

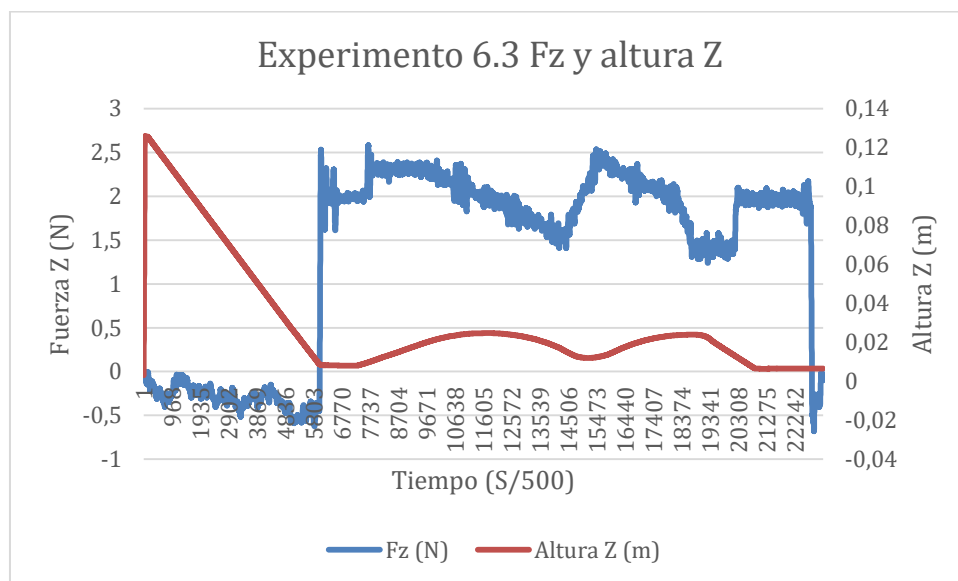


Figura 71 Gráfica combinada Fz y altura Z experimento n°6.3.

Podemos observar como en el momento que empieza a realizar el barrido del punto A hasta el punto B, el robot está aplicando una fuerza entre 2.52431 N y 1.30425 N.

5.6.4-Experimento número 6.4, pieza impresa en 3D.

Debido a que los resultados obtenidos en el experimento 6.1 tienen la precisión que buscábamos así como el comportamiento del sistema, sin tener un déficit de información sobre el relieve de la pieza. Se aprecia la totalidad de la pieza, mostrando sus límites de altura y longitud por lo que no debemos seguir retocando el programa, es hora de repetir el experimento 6.1 tres veces para corroborar que el proyecto y experimento funciona y no ha sido una casualidad.

Recordamos que es un trabajo experimental, por lo que es necesario realizar estas 3 pruebas adicionales una vez ya tenemos robot, programa y pieza definidos.

| Nombre de la variable | Valor de la Variable |
|----------------------------------|---|
| Pieza | Pieza 3D con pendientes |
| fuerza | [0,0,2,0,0,0] |
| Vel_2 | [0.01, 0.01, 0.01, 0.017, 0.017, 0.017] |
| force_mode_set_damping() | 0.05 |
| force_mode_set_gain_scaling() | 1.5 |
| Velocidad al WayPoint3 (Punto B) | 5 mm/s |

Tabla 9 Variables utilizadas en el experimento 6.4.

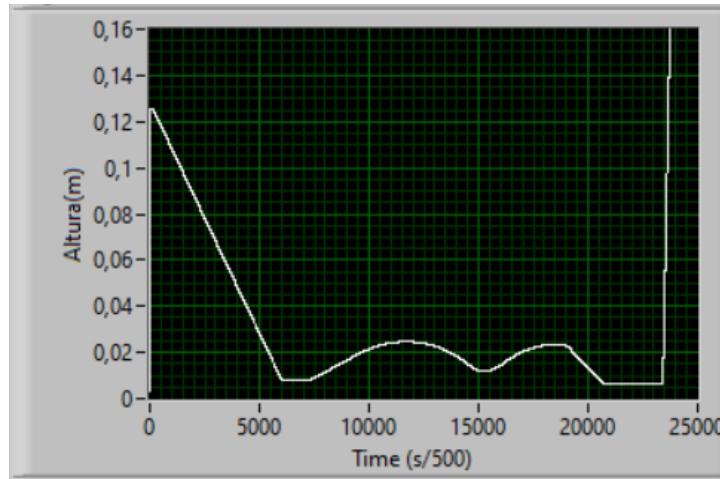


Figura 72 Gráfica de la altura en LabVIEW del experimento nº6.4.

Exportamos los datos obtenidos a excel para trabajar de forma más cómoda y precisa.

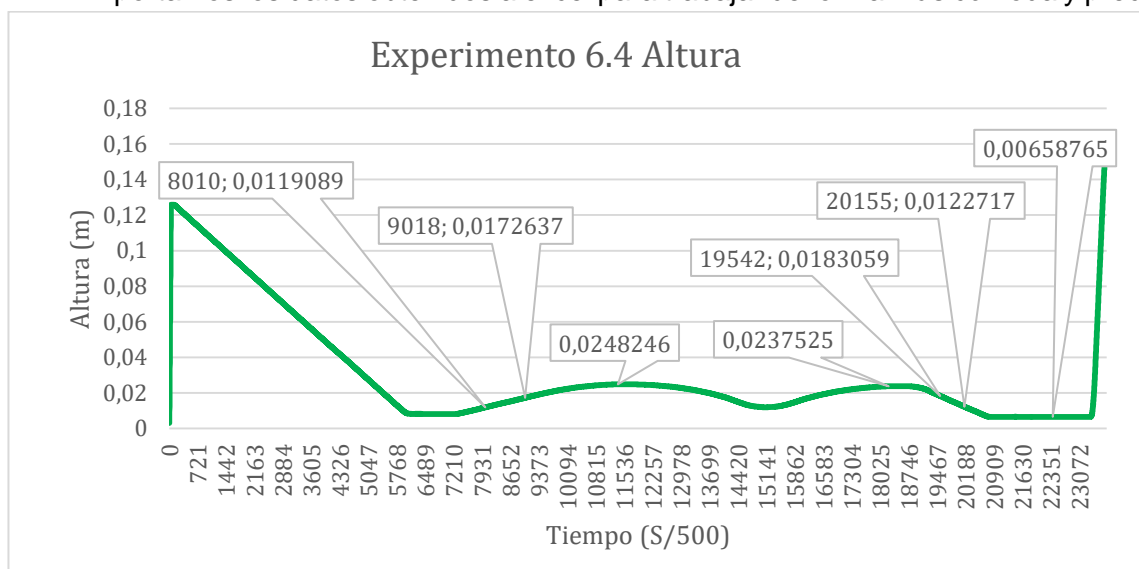


Figura 73 Gráfica de la posición en excel del experimento nº6.4.

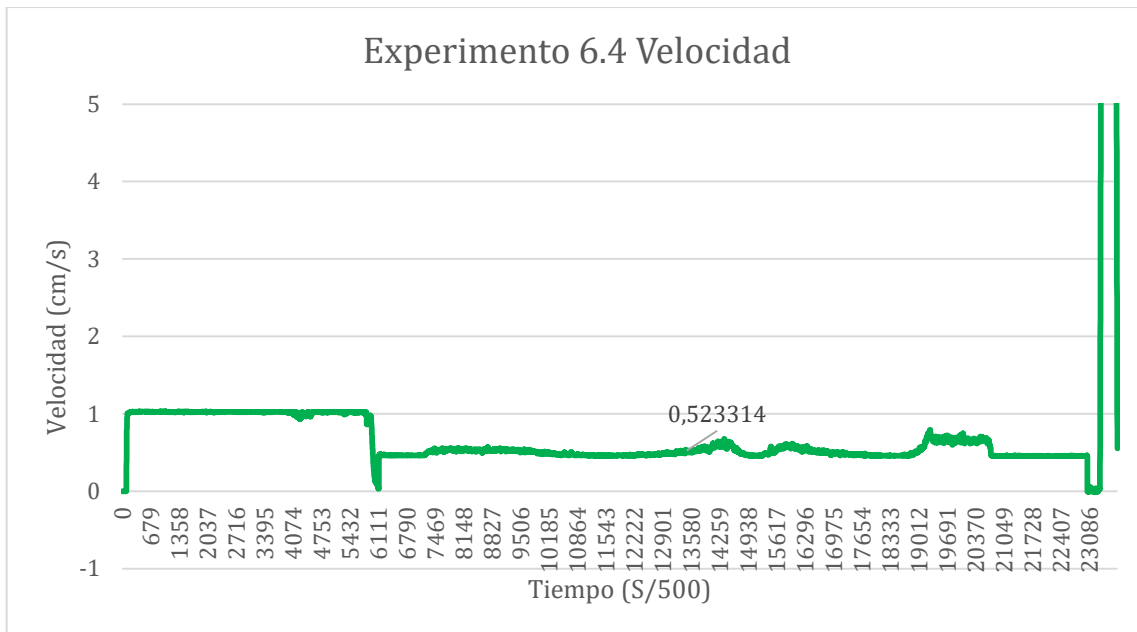


Figura 74 Gráfica de la velocidad en excel del experimento nº6.4.

Acto seguido procedemos a estudiar el comportamiento y lecturas del sensor de fuerza.

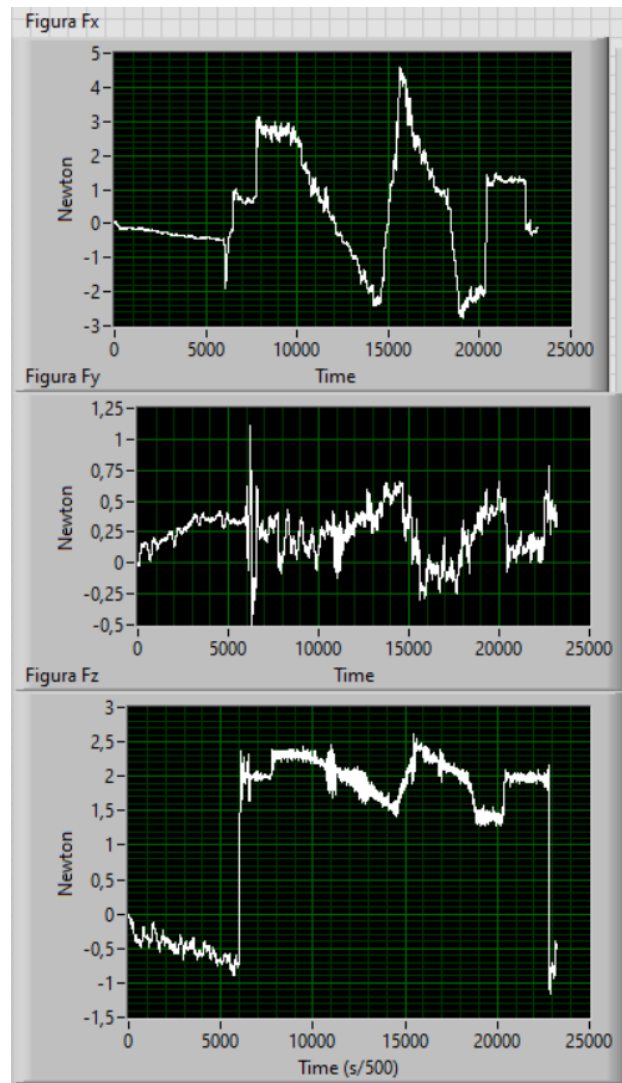


Figura 75 Gráficas de la fuerza que lee el sensor de fuerza (F_x , F_y , F_z) del experimento n°6.4.

Exportamos los datos a excel de la Fuerza que aplica en el eje Z.

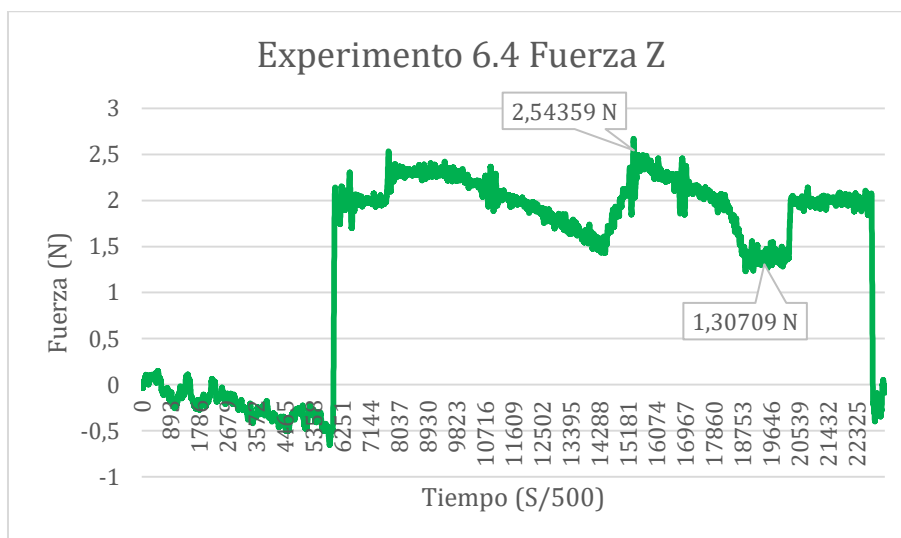


Figura 76 Gráfica F_z en excel del experimento n°6.4.

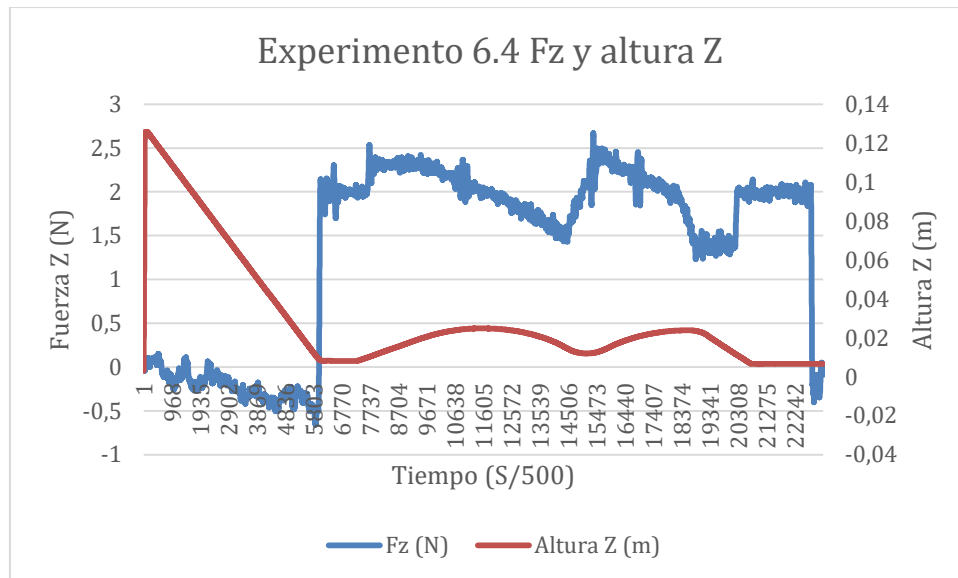


Figura 77 Gráfica combinada Fz y altura Z experimento n°6.4.

Podemos observar como en el momento que empieza a realizar el barrido del punto A hasta el punto B, el robot está aplicando una fuerza entre 2.54359 N y 1.30709 N.

6.-Discusión y conclusiones.

6.1.-Discusión.

Antes de llegar a ciertas conclusiones particulares de los experimentos, debemos realizar una serie de consideraciones generales de los mismos.

-En primer lugar, debemos tener en cuenta el plano de trabajo del robot, en nuestro caso el robot ha trabajado en el plano XY, es decir en paralelo con el suelo, por lo que esto afecta a la dirección de la fuerza que debemos aplicar, ya que queremos que sea perpendicular al plano, si el plano cambia debemos cambiar la dirección de la fuerza, esto debemos tenerlo en cuenta ya que influye en la calidad de caracterización del relieve.

-La herramienta utilizada influye directamente en los resultados obtenidos, ya que tener una herramienta que acabe en una punta redonda de radio 8 como la utilizada en el proyecto tendrá un margen de precisión menor que una herramienta que acabe en punta redonda de radio 6, esto se debe a que cuanto menos superficie de contacto con la herramienta más precisión tendremos a la hora de medir.

-El tamaño debe de ser adecuado para el área de trabajo de nuestro robot, en este caso el UR3 tiene un alcance de trabajo de 500 mm, por lo que las dimensiones de la pieza deben estar acorde con las características del robot. Sin embargo, si la pieza es muy pequeña no seremos capaces de ofrecer la máxima resolución, ya que cómo ya hemos comentado anteriormente necesitaríamos utilizar una herramienta con la punta más fina.

-Un parámetro que tiene vital importancia es la elasticidad y rigidez del material de la pieza que deseamos realizar el estudio, ya que un material elástico nos proporcionará un error acumulado en un sistema que presente oscilaciones, ya que se tendría un margen de modificar su forma, sin embargo conforme el material tiene un mayor nivel de rigidez este error acumulado se reduce.

-Debemos tener en cuenta que el sensor de fuerza del robot tiene un ruido de más o menos 0.75 N aproximadamente, este ruido hace que las gráficas donde estudiamos la fuerza que recibe el sensor tengan pequeño ruido.

-La distancia de barrido se debe ajustar a la pieza, en caso de que cambiamos a una pieza mayor, lo primero que debemos realizar es aumentar dicha distancia para así asegurarnos que la pieza está dentro del rango para realizar el barrido.

-Hay un concepto que tiene vital importancia para asegurar que no tenemos una pérdida de información, diremos que tendremos una pérdida de información cuando la punta del TCP no esté en contacto con la pieza, ya que si no está en contacto durante ese periodo de tiempo, estaremos representando una posición que no es la real. Dado que nuestro periodo de muestreo es de 0.002s si estoy 0.5 segundos con el TCP levantado de la pieza tendré un total de 250 datos erróneos, lo que es un gran número de datos erróneos. En el momento el TCP se levante de la pieza aunque el robot esté ejerciendo una fuerza determinada, la lectura del sensor será 0 o valores negativos ya que al estar en el aire la resistencia es 0 y por tanto al sensor de fuerza no le llegaría ninguna señal y esto se vería reflejado en las gráficas donde aparece la fuerza en el eje Z del experimento 3 y 6.

6.2.-Conclusiones obtenidas en el experimento 1.

-Tras realizar el primer experimento nos damos cuenta la velocidad de barrido era demasiado rápida, seguía la referencia pero de forma ortodoxa, de forma presencial en el laboratorio se podía ver como la herramienta temblaba cuando contactaba con la pieza y avanzaba, por lo que se llega a la conclusión que debemos bajar la fuerza que aplica y la velocidad de barrido, una velocidad muy alta aplicando una fuerza elevada nos daría problemas, se debe llegar a una solución de compromiso entre velocidad y fuerza. Para que fuera lo más suave posible el robot debería aplicar la mínima fuerza posible.

Obtenemos el valor medio y desviación típica mientras el TCP está en contacto con la pieza. Obteniendo un valor medio de 0.08324618 m y una desviación típica de 0.0002157 m.

6.3.-Conclusiones obtenidas en el experimento 2.

-A menor velocidad de barrido mejor seguiremos la referencia pero más tiempo tardaremos, esto se traduce en intentar conseguir la mayor velocidad de barrido manteniendo la calidad de nuestro relieve, en nuestro caso la velocidad de barrido que nos encontramos cómodos y no obtenemos fallos la hemos dejado a 5 mm/s.

-La influencia del parámetro vel_2 se puede ver de forma muy clara al comparar las gráficas de posición del experimento 1 del experimento 2.

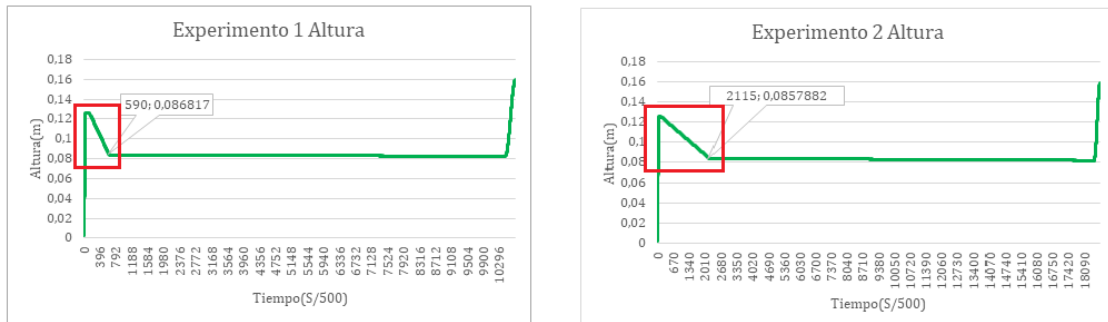


Figura 78 Comparación de la altura entre el experimento nº1 y nº2.

El recuadro rojo de cada gráfica indica el tramo en el que la herramienta está bajando hasta que contacta con la pieza, el robot entra en modo fuerza y el límite de la velocidad del movimiento lo limita el parámetro vel_2 , podemos observar cómo en el eje del tiempo hasta realizar este contacto en el experimento 2 lo realiza más tarde, recordamos que es la misma pieza, por lo que el motivo de que este retardo no es otro que la posición. Si para llegar al mismo punto tardamos más es porque la velocidad ha sido menor y está ha sido limitada por el parámetro vel_2 .

-Del experimento 2 podemos comparar la altura de la pieza de metacrilato que mide 8.3 cm de altura, de la gráfica obtenemos el valor medio 0.08344139 m, y una desviación típica de 0.00016691 m, que si los comparamos con los datos del experimento 1 la desviación típica ha bajado. Teniendo en cuenta que la pieza mide 0.083 m, tenemos una precisión de 0.0044 m.

6.4.-Conclusiones obtenidas en el experimento 3.

-Viendo las gráficas de fuerza en el eje Z del experimento 3, que más adelante se explicará porque no hacemos alusiones al eje X y eje Y, podemos decir que estamos ante un sistema subamortiguado, pero que dichas oscilaciones no pasan por 0 por lo que podemos afirmar que durante el barrido de la pieza no tenemos pérdida de información.

6.5.-Conclusiones obtenidas en el experimento 4.

En el experimento 4 es el primero con la pieza impresa en 3D, dado que el experimento 3 ha sido satisfactorio, probamos lo mismos parámetros (experimento 2 y 3) cambiando solamente la referencia de la pieza. Recordamos que la distancia del barrido del experimento 2 y 4 es la misma, por ello vamos a comparar las dos gráficas:



Figura 79 Comparación de la altura entre el experimento nº2 y nº4.

Si nos damos cuenta a pesar de tener la misma velocidad tarda más tiempo en realizar el contacto, si nos fijamos en el eje del tiempo hay una diferencia de 3885 unidades, esto se debe a que la pieza impresa en 3D tiene una menor altura, por lo manteniendo la velocidad constante si aumentamos la distancia desde el punto de partida hasta que se realiza el contacto con la pieza, el tiempo que tarda en contactar aumenta.

6.6.-Conclusiones obtenidas en el experimento 5.

Vamos a ver si llegamos a los límites de vel_2 asignados en el experimento 5, que se ha reducido respecto al experimento 4, además de comprobar cómo afecta alargar la distancia de barrido (solo con punto B).

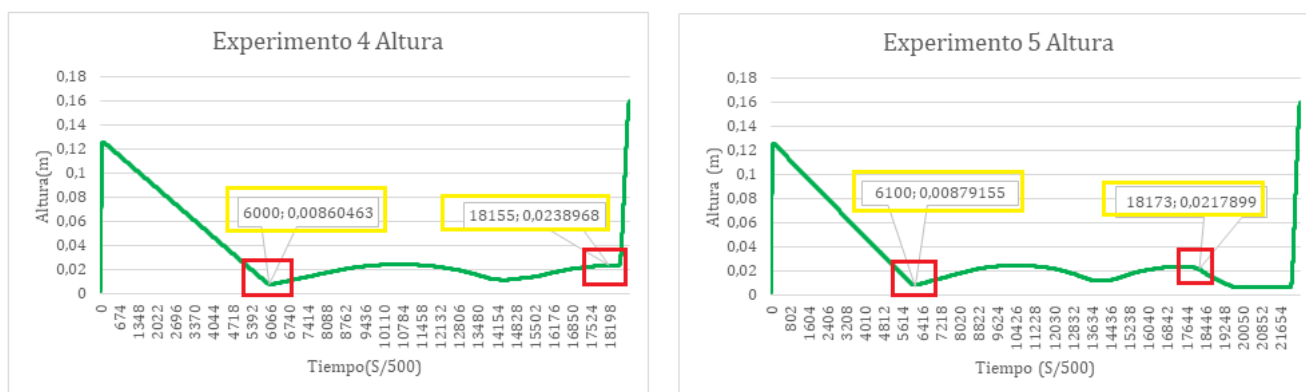


Figura 80 Comparación de la altura entre el experimento nº4 y nº5.

Observamos como el primer recuadro rojo es cuando se realiza en contacto, y podríamos decir que coincide a pesar de irse 0.2 segundos, ya que el propio hecho de medir en la gráfica tiene un error, respecto al último cuadrado es el mismo instante en ambos experimentos y vemos que prácticamente coincide también en ambas gráficas en la altura,

apreciamos como en el experimento 4 se cortaba la segunda rampa con pendiente negativa, que gracias a alargar el punto B en el experimento 5 si se ve reflejada.

Para asegurarnos que no llegamos al límite de vel_2 vamos a sacar la velocidad media de ambos experimentos del instante 6740 al instante 17000 para ver si durante ese tramo del recorrido varía o no.

Velocidad media experimento 4 entre los instantes 6740 y 17000 es 0.493192 cm/s

Velocidad media experimento 5 entre los instantes 6740 y 17000 es 0.498192 cm/s

Asumiendo que en la medida tenemos un pequeño error, podemos decir que la velocidad no llega nunca a pasar el límite impuesto según el parámetro vel_2 .

Además, podemos ver como se cumple la velocidad del WayPoint3 que es la que verdaderamente marca la velocidad del barrido, recordamos que era 0.5 cm/s si nos fijamos en la velocidad medias obtenidas en un tramo representativo durante la realización del barrido nos damos cuenta que son prácticamente 0.5 cm/s, que es la velocidad impuesta para llegar al WayPoint3 o como nosotros lo reconocemos punto B.

6.7.-Conclusiones obtenidas en el experimento 6.

El experimento 6 es el experimento final dónde ya están pulidos todos los parámetros del programa, configuración del robot y pieza. Por lo que se han realizado 4 experimentos exactamente en las mismas condiciones, o por lo menos los más parecidas posible con los mismos parámetros, programa y pieza. Se han realizado el análisis de posición, velocidad y fuerza.

6.7.1.-Conclusiones obtenidas gracias al estudio de la respuesta y lectura de los datos obtenidos por el sensor de fuerza.

Si nos fijamos, en la lectura de F_x , F_y y F_z nos damos cuenta cómo la variable de interés de nuestro sistema es F_z ya que es dónde aplicamos la fuerza de 2N.

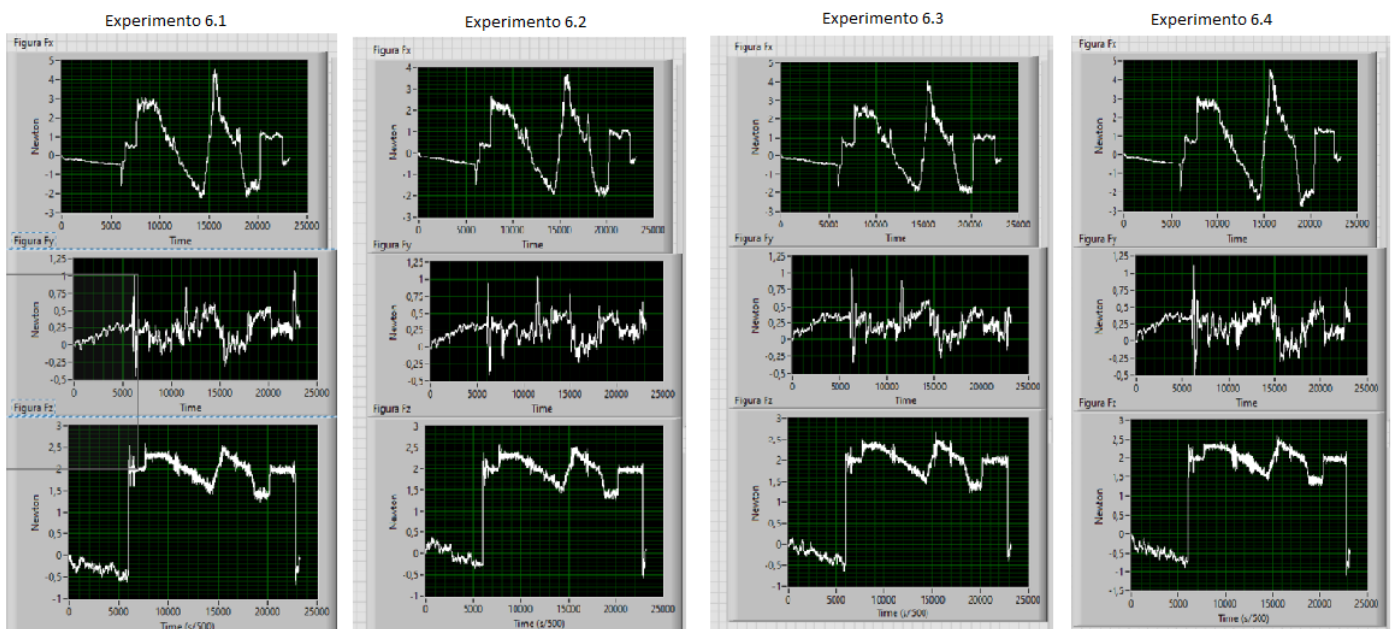


Figura 81 Comparación de F_y , F_x y F_z de los experimentos nº6.1, nº6.2, nº6.3 y nº6.4.

Como hemos anunciado los valores dónde se aplica la fuerza es en su gran mayoría en el F_z , la fuerza una vez realiza el primer contacto va desde 1.33N a 2.5N, los obtenemos de la tercera gráfica de la figura 76, lo que nos confirma que no tendremos pérdida de información gracias a que las oscilaciones del sistema subamortiguado no pasan por 0 una vez empieza a realizar el barrido hasta terminarlo.

Si recordamos el eje de coordenadas que tenemos podemos apreciar en qué dirección aplica F_x e F_y ya que F_z ya sabemos que trabaja en el eje vertical (Figura nº7).

Con el eje de coordenadas delante vemos cómo el barrido se hace a lo largo del eje X, por lo que las rampas y cambios en el relieve también se verán reflejados en la fuerza que recibirá el sensor en la componente F_x , si fuese una superficie con una pendiente constante sin cambios en la misma, la componente F_x no sería de interés y no debería devolver ningún valor tal y como sucede en el experimento 3.

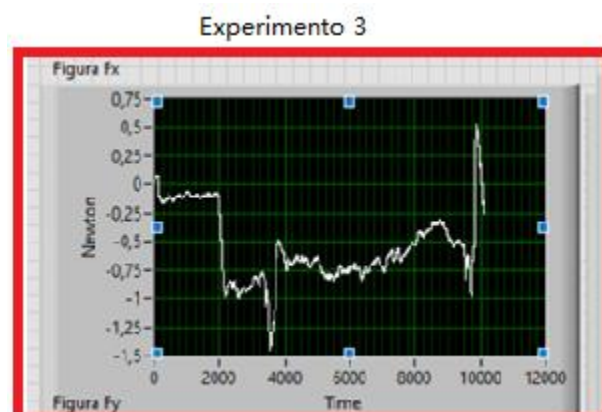


Figura 82 Gráfica F_x del experimento nº3.

Tenemos valores negativos o 0 lo que se traduce en que el sensor no recibe información de la fuerza F_x .

Sin embargo en el experimento 6, si nos fijamos en la primera gráfica de todos los experimentos vemos como sí que afecta la componente F_x , justo cuando inicia la pendiente sube la fuerza F_x y cuando baja coincide con una F_x decreciente y menor.

En lo que respecta a F_y lo que nos afecta si la componente Y del punto A y B, es la misma, cuanto menor sea ese delta más recta será la trayectoria del barrido si tenemos una perspectiva desde arriba.



Figura 83 Imagen sin diferencia en el eje y del punto A al punto B.

En este caso el delta de Y es 0 por lo que no tendría ninguna variación en Y, no tendremos ninguna lectura de F_y ya que no hay variación en Y.

Sin embargo en el experimento 6 en algún momento si tenemos valores de F_y , a pesar de ser muy pequeños y poder estar en el rango del propio ruido del sensor, tiene la influencia que el delta de Y entre el punto A y punto B no sea 0 y que por eso tenga esa pequeña variación de F_y , casi insignificante.

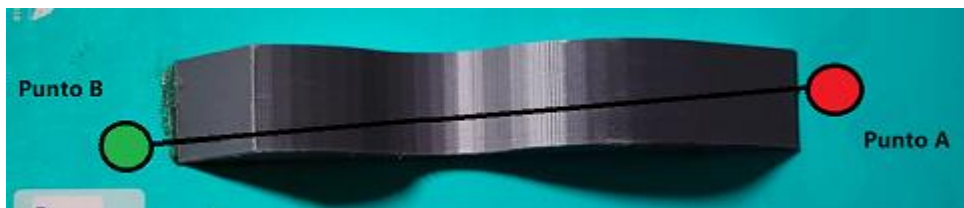


Figura 84 Imagen con diferencia en el eje y del punto A al punto B.

Fijándonos en la segunda gráfica de todos los experimentos tenemos algunos picos muy puntuales en torno a 1 N, pero de forma irregular, lo que da a pensar que en esta medida la influencia del ruido es mayor que en las demás.

6.7.2.-Conclusiones obtenidas gracias al estudio de la altura.

Vamos a comparar las 4 gráficas, analizando varios puntos de control para conocer la calidad a la hora de representar el relieve de la pieza. Conociendo la altura de ese punto que se aprecia en el documento nº3 Planos, es de 16.4 mm.



Figura 85 Comparación de la altura de los experimentos nº6.1, nº6.2, nº6.3 y nº6.4.

Analizando las medidas, al tener más de un experimento tenemos más de una medida, para ello vamos a calcular el error absoluto y relativo para obtener la calidad de la medida y comparar esas medidas con el valor de los puntos de control que debería de tener.

Recordemos la pieza esta sobre una libreta, por eso para sacar la altura de los puntos de control (recuadro rojo y amarillo) debemos restarle la altura de la libreta (recuadro azul).

Repetiendo el experimento en las mismas condiciones posibles podemos estimar la incertidumbre debida a factores ambientales aleatorios.

Para obtener la media aritmética, si repetimos el experimento n veces (en nuestro caso 4), siguiendo la siguiente fórmula:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Ecuación 5 Obtención de la media aritmética.

Vamos a calcular la media aritmética de los 3 puntos remarcados.

Debemos recalcar que la repetitividad de nuestro aparato en este caso el robot es de 0.1 mm.

Punto 1 altura primera montaña (recuadro rojo)

| Número de experimento | Medida punto de control 1 |
|-----------------------|---------------------------|
| Experimento 6.1 | 0.02468960 m |
| Experimento 6.2 | 0.02467930 m |
| Experimento 6.3 | 0.02458180 m |
| Experimento 6.4 | 0.02482460 m |

Tabla 10 Altura punto 1 experimento 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4.

Punto 2 altura segunda montaña (recuadro amarillo)

| Número de experimento | Medida punto de control 2 |
|-----------------------|---------------------------|
| Experimento 6.1 | 0.02376210 m |
| Experimento 6.2 | 0.02375260 m |
| Experimento 6.3 | 0.02366420 m |
| Experimento 6.4 | 0.02375250 m |

Tabla 11 Altura punto 2 experimento 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4.

Punto 3 referencia suelo (recuadro azul)

| Número de experimento | Medida referencia suelo |
|-----------------------|-------------------------|
| Experimento 6.1 | 0.00655566 m |
| Experimento 6.2 | 0.00650644 m |
| Experimento 6.3 | 0.00639944 m |
| Experimento 6.4 | 0.00658765 m |

Tabla 12 Altura punto 3 experimento 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4.

Para conocer la altura de los puntos de control real debemos hacer el punto de control 1 menos el punto referencia suelo y punto de control 2 menos el punto referencia suelo.

Medida real del punto de control 1:

| Número de experimento | Medida Punto de control 1-Medida ref suelo |
|-----------------------|--|
| Experimento 6.1 | 0.01813394 m |
| Experimento 6.2 | 0.01817286 m |
| Experimento 6.3 | 0.01818236 m |
| Experimento 6.4 | 0.01823695 m |

Tabla 13 Altura real punto 1 experimento 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4.

Medida real del punto de control 2:

| Número de experimento | Medida Punto de control 2-Medida ref suelo |
|-----------------------|--|
| Experimento 6.1 | 0.01720644 m |
| Experimento 6.2 | 0.01724616 m |
| Experimento 6.3 | 0.01726476m |
| Experimento 6.4 | 0.01716485m |

Tabla 14 Altura real punto 2 experimento 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4.

Si realizamos la media aritmética nos sale un valor de 0.01818153 m para la altura del punto 1 y la media aritmética de la altura en el punto 2 es de 0.01722055 m.

Para obtener el error absoluto seguiremos la siguiente fórmula:

$$\Delta X = X - X_0$$

Ecuación 6 Obtención del error absoluto.

Dónde X es la medida que obtenemos y X_0 es el valor verdadero, este valor lo podemos saber gracias a los planos el valor verdadero del punto de control 1 es 0.16386844 m y el del punto de control 2 es 0.16386844 m, es decir tienen la misma altura.

Error absoluto punto de control 1:

| Número de experimento | Error Absoluto Punto de control 1 |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Experimento 6.1 | 0.00174594 m |
| Experimento 6.2 | 0.00178486 m |
| Experimento 6.3 | 0.00179436 m |
| Experimento 6.4 | 0.00184895 m |

Tabla 15 Error absoluto del punto 1.

Error absoluto punto de control 2:

| Número de experimento | Error Absoluto Punto de control 2 |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Experimento 6.1 | 0.00081844 m |
| Experimento 6.2 | 0.00085816 m |
| Experimento 6.3 | 0.00087676 m |
| Experimento 6.4 | 0.00077685 m |

Tabla 16 Error absoluto del punto 2.

Si realizamos la media del error absoluto en el punto de control 1 nos sale que es de 0.00179353 m y en el punto de control 2 la media del error absoluto es 0.0083255 m.

Para obtener el error relativo en tanto por cien, debemos seguir la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X_0} \cdot 100$$

Ecuación 7 Obtención del error relativo.

Dónde ΔX es el error absoluto obtenido previamente y X_0 es el valor verdadero de los puntos de control.

Error relativo punto de control 1:

| Número de experimento | Error relativo punto de control 1 |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Experimento 6.1 | 10.65377113 % |
| Experimento 6.2 | 10.89126196 % |
| Experimento 6.3 | 10.94923112 % |
| Experimento 6.4 | 11.28234074 % |

Tabla 17 Error relativo del punto 1.

Error relativo punto de control 2:

| Número de experimento | Error relativo punto de control 2 |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Experimento 6.1 | 4,994142055 % |
| Experimento 6.2 | 5,236514523 % |
| Experimento 6.3 | 5,350012204 % |
| Experimento 6.4 | 4,740358799 % |

Tabla 18 Error relativo del punto 2.

Si realizamos la media del error relativo del punto de control 1 sale que es de un 10.94415121 % mientras que la media del error relativo del punto de control 2 es de 5.08025681 %.

Debemos saber que cualquier medida experimental se ve afectada por el simple hecho de realizar el proceso de medida. A pesar de que el robot tiene una alta sensibilidad comparado de cualquier aparato de medida tradicional, eso se traduce en la cantidad de decimales que es capaz el robot de darnos la medida.

Existen errores sistemáticos, estos errores se caracterizan por ser constantes a lo largo de toda la toma de medidas en nuestro caso tenemos los siguientes errores sistemáticos:

-Error en el calibrado de la herramienta del robot.

-Error de método de medida: El propio hecho de medir en un lugar u otro, podemos ver como en el error relativo en el punto de control 2 es mucho menor que en el punto de control 1, esto puede deberse a que no se ha realizado la medición en el punto óptimo en el punto de control 1.

También tenemos errores accidentales o aleatorios, estos errores son imposibles de controlar y están sometidos al azar:

-Error en la impresión 3D, la pieza en 3D no tendrá exactamente las mismas medidas que en plano, por lo que es un error que se repite de forma aleatoria a lo largo de la pieza.

Otro tipo de error es el error de muestreo físico que puede tomar el valor del error de muestreo sistemático, aleatorio o la suma de ambos.

Si nos centramos en los resultados obtenidos en los 2 puntos de control, podemos decir que el error absoluto medio entre los 2 puntos sería de 0.00131304 m y el error relativo es 8.01220405 %. Con lo que teniendo en cuenta todos los factores mencionados es un error asumible a nivel de resultados de los experimentos. Cuanto mayor sea el número de puntos de control obtendremos una media de errores más fiable.

Las medidas que obtengamos deberemos expresarla cómo $X \pm \Delta X$

Donde X es la medida obtenida y ΔX el error absoluto, en nuestro caso $\Delta X=0.00131304$ m.

Podemos concluir el apartado diciendo que en cada experimento realizado se ha conseguido mejorar y depurar el comportamiento del robot y en consecuencia se ha mejorado la obtención de los datos para su análisis concluyendo en el experimento 6 dónde tras realizarlo 4 veces distintas, ante las mismas condiciones posibles, hemos obtenido un error absoluto de 0.00131304 m y un error relativo de 8.01220405 % siendo estos unos resultados que dictaminan un error relativamente bajo ante la multitud de factores que afectan al experimento. Con ese error nuestro sistema es lo suficientemente fiable para caracterizar cualquier relieve dentro de los rangos de trabajo del robot de forma satisfactoria. En el presente documento recordamos que el según el pliego de condiciones exigía un error relativo inferior al 12% por lo que cumplimos con las exigencias del proyecto.

6.7.3.-Conclusiones obtenidas gracias a la velocidad.

Gracias a la velocidad podemos comprobar la velocidad media a lo largo de todo el barrido coincide con la velocidad que debe de llegar al punto B, que es el Waypoint3, recordamos que hemos determinado que sea de 0.5 cm/s y si sacamos la media durante todo el barrido nos sale de 0.492 cm/s lo que se acerca al resultado esperado.

7.-Ideas futuras.

Este proyecto se fundamenta en ser un trabajo de investigación y de campo, por lo que la cantidad de posibilidades que se abren tras el mismo y tiene un amplio rango de aplicaciones, a continuación, se van a enumerar algunas:

-A raíz de las fuerzas F_x y F_y se podría estudiar la relación de estas fuerzas ante los cambios de pendientes y la fricción sobre la superficie.

-El siguiente paso podría ser caracterizar el contorno de una pala de pádel, modificando la fuerza que aplica en cada instante adaptando el vector fuerza al contorno a medida que este varía.

-Al igual que el vector de fuerza, se puede adaptar la orientación de la herramienta en función del contorno, con esto conseguiríamos un movimiento más natural y suave.

-Una acción que sería una mejora cómo ya se ha descrito sería la utilización de una herramienta más fina, para tener un error menor en la medida.

-Este sistema puede utilizarse para sacar un mapa 3D de alturas de diferentes piezas.

Como podemos ver distintas posibilidades, lo que debemos tener claro que el control de fuerza es lo más parecido al tacto de un humano en el mundo de los robots, por lo que se puede exprimir en abundancia este concepto para lograr aplicaciones y utilidades innovadoras.

8.-Bibliografía.

- Arnold, C., Kiel, D., & Voigt, K. I. (2016). How the industrial internet of things changes business models in different manufacturing industries. *International Journal of Innovation Management*, 20, 1640015. <https://doi.org/10.1142/S1363919616400156>
- Neumann, W. P., Winkelhaus, S., Grosse, E. H., & Glock, C. H. (2021). Industry 4.0 and the human factor—A systems framework and analysis methodology for successful development. *International Journal of Production Economics*, 233(November), 107992. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527320303418?via%3Dihub>
- Reiman, A., Kaivo-oja, J., Parviainen, E., Takala, E. P., & Lauraeus, T. (2021). Human factors and ergonomics in manufacturing in the industry 4.0 context—A scoping review. *Technology in Society*, 65(December), 101572. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101572>
- Yilma, B. A., Panetto, H., & Naudet, Y. (2019). A meta-model of cyber- physical-social system: The CPSS paradigm to support human- machine collaboration in industry 4.0. 20th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises, 568(October) <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-28464-0>
- Matheson, E., Minto, R., Zampieri, E. G. G., Faccio, M., & Rosati, G. (2019). Human-robot collaboration in manufacturing applications: A review. *Robotics*, 8(4), 1–25. <https://doi.org/10.3390/robotics8040100>
- Vicentini, F. (2020). Terminology in safety of collaborative robotics. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 63(November), 101921. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101921>
- Hentout, A., Aouache, M., Maoudj, A., & Akli, I. (2019). Human–robot interaction in industrial collaborative robotics: A literature review of the decade 2008–2017. *Advanced Robotics*, 33(15–16), 764–799. <https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1636714>
- Schmidtler, J., Knott, V., Hölzel, C., & Bengler, K. (2015). Human centered assistance applications for the working environment of the future. *Occupational Ergonomics*, 12(3), 83–95. <https://doi.org/10.3233/OER150226>
- Bicchi, A., Peshkin, M., and Colgate, J. (2008). *Safety for Physical Human-Robot Interaction*. Springer Handbook of Robotics. doi: 10.1007/978-3-540-30301-5_58 https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-540-30301-5_58
- Colgate, J., Wannasuphoprasit, W., and Peshkin, M. (1996). “Cobots: robots for collaboration with human operators,” in *Proc ASME Dynamic Systems and Control Division, Vol. 58*, 433–439. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.37.7236>
- Khatib, O. (1985). “Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots,” in *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA*. doi: 10.1109/ROBOT.1985.1087247 <https://ieeexplore.ieee.org/document/1087247>
- Azizian, M., Khoshnam, M., Najmaei, N., and Patel, R. V. (2014). Visual Servoing in medical robotics: a survey. Part I: endoscopic and direct vision imaging-techniques and applications. *Int. J. Med. Robot.* 10, 263–274. doi: 10.1002/rcs.1531 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rcs.1531>
- Phoha, S. (2014). Machine perception and learning grand challenge: situational intelligence using cross-sensory fusion. *Front. Robot. AI* 1:7. doi: 10.3389/frobt.2014.00007 <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2014.00007/full>
- La Valle, S. M. (2006). *Planning Algorithms*. Cambridge University Press.

https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=-PwLBAQAQBAJ&oi=fnd&pg=PT9&ots=0iDy2syklp&sig=nCPDUVHyH6wFz4FCeqGy2z8j_3E&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

-Chaumette, F., and Hutchinson, S. (2006). Visual servo control, Part I: basic approaches. *IEEE Robot. Autom. Mag.* 13, 82–90. doi: 10.1109/MRA.2006.250573

<https://ieeexplore.ieee.org/document/4015997>

-Berthoz, A. (2002). *The Brain's Sense of Movement*. Harvard University Press.

https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=O7hrgeKScOYC&oi=fnd&pg=PA9&ots=Pe8VLdpjfK&sig=h0bybZ4nWv59YbmmdHAZwwKOE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

-Davison, E., and Goldenberg, A. (1975). Robust control of a general servomechanism problem: the servo compensator. *IFAC Proc.* 8, 231–239. doi: 10.1016/S1474-6670(17)67744-9

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017677449?via%3Dihub>

-Teoría sistemas de segundo orden: <https://dademuch.com/2020/05/07/sistema-de-segundo-orden/>

Estudio para la caracterización del relieve y formas de objetos utilizando el sensor de fuerza del robot UR3e.

DOCUMENTO Nº 2

PLIEGO DE CONDICIONES

Autor: Juan Gallú Camús
Tutor: Carlos Blanes Campos
Curso académico 2021/2022

ÍNDICE DOCUMENTO Nº 2 PLIEGO DE CONDICIONES

| | |
|--|----|
| 1.-Objeto..... | 74 |
| 2.-Normativa. | 74 |
| 3.-Robot y materiales utilizados. | 74 |
| 4.-Normas de ejecución y seguridad..... | 75 |
| 5.-Impresión 3D. | 75 |
| 6.-Pruebas y análisis de resultados..... | 76 |

1.-Objeto.

El presente documento tiene como pretexto especificar las condiciones técnicas para desarrollar el experimento y estudio de caracterización del relieve por medio de la programación de la fuerza del robot UR3 de forma correcta y satisfactoria.

2.-Normativa.

Se debe realizar todos los experimentos bajo la siguiente normativa:

-ISO 10218-1. Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte 1: Robots.

-ISO 10218-2. Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte 2: Sistemas robot e integración.

-ISO 11161. Seguridad de las máquinas. Sistemas de fabricación integrados. Requisitos fundamentales.

-IEC 62061. Seguridad funcional de los sistemas de control eléctrico, electrónico y electrónico programable relacionados con la seguridad.

- ISO/TS 15066. Robots y equipos robotizados.

- UNE-EN ISO/ASTM 52910:2020.- Fabricación aditiva. Diseño. Requisitos, directrices y recomendaciones.

- UNE-EN-ISO 178. Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión

-UNE-CEN/TR 15310-1:2006. Caracterización de residuos. Muestreo de residuos. Parte 1: Orientación en la selección y aplicación de los criterios de muestreo bajo diversas condiciones.

3.-Robot y materiales utilizados.

El robot empleado deberá ser un robot que tenga incorporado el sensor de fuerza en la muñeca con 6 grados de libertad. Se propone el robot de la serie UR-3e de la compañía Universal Robots, este robot se caracteriza por ser capaz de trabajar con cargas de hasta 3 kg en un rango de trabajo de 500 mm, además cuenta con el sensor de fuerza incluido en la muñeca del propio robot. Se debe utilizar un robot con dichas características o similares.

Se deberá utilizar una herramienta tipo puntero compatible con el robot seleccionado que no tenga una punta de diámetro superior a 2 cm y una longitud mayor a 15 cm, estos son límites físicos para garantizar el buen funcionamiento del sistema.

Se deberán probar 2 piezas distintas, se propone una sencilla sin pendiente y una pieza impresa en 3D con distintas pendientes y alturas.

4.-Normas de ejecución y seguridad.

La realización del experimento se debe realizar bajo la norma ISO13850, dónde indica que deberá contar con un botón que actúe de botón de emergencia en caso de fallo.

Acorde a la norma ISO 10218-1 se debe contar con:

-Una función segura comandada por un controlador externo con entradas especiales de seguridad.

-Debe existir un límite de velocidad, par de fuerza y posición de las diferentes articulaciones del robot.

El usuario es el encargado de en función del entorno de trabajo, modificar y crear las variables para garantizar la máxima seguridad posible, prestando especial atención a los límites de seguridad del robot.

Se recomienda a pesar de ser un robot colaborativo preparado para trabajar con humanos, mantener la distancia de seguridad recomendada por el fabricante y tener siempre cerca la consola de programación con el botón de emergencia situado cerca de nosotros.

Los errores en el programa de ensayo se registrarán bajo la norma UNE-CEN/TR 15310-1:2006, en ella se especifica los errores posibles que existen, apartado 4.7.3 Errores en el Programa de Ensayo.

5.-Impresión 3D.

La impresión 3D se deberá realizar en cualquier impresora comercial, pero debe tener una resolución en Z no menor a 0.1mm, esto se debe a que en el proyecto de caracterización de relieve la cota que más se va a trabajar es la cota Z.

Bajo la normativa UNE-EN ISO/ASTM 52910:2020 para la fabricación aditiva, en ella se trazan las recomendaciones, requisitos y obligaciones a seguir para lograr una correcta impresión 3D. El usuario debe conocer las diferentes posibilidades que brinda el mercado para la asignación de materiales a utilizar en el proyecto.

El usuario debe modelar la pieza 3D de tal forma que el robot pueda trabajar con ella, además de realizar un uso responsable del material utilizado, intentando no realizar un malgasto del mismo.

6.-Pruebas y análisis de resultados.

Tras realizar el número necesario de experimentos para lograr que el robot caracterice de forma correcta el relieve. Se deberá realizar el último experimento con la pieza impresa en 3D repitiendo el mismo un mínimo de 3 veces ante las mismas condiciones. Una vez repetido se comprobará que el error relativo del sistema es inferior al 12% tomando 2 puntos de control y comparándolos con el valor real de la pieza.

El usuario realizará las pruebas pertinentes para asegurar que el robot cumple con las condiciones de seguridad exigidas.

En lo que respecta a la impresión 3D se deberá realizar y comprobar que la impresora está en las condiciones óptimas, así como el material utilizado.

Estudio para la caracterización del relieve y formas de objetos utilizando el sensor de fuerza del robot UR3e.

DOCUMENTO Nº 3

PRESUPUESTO

Autor: Juan Gallú Camús
Tutor: Carlos Blanes Campos
Curso académico 2021/2022

Cuadro de mano de obra

| Nº | Designación | Importe | | |
|----|--|----------------|------------------|---------------|
| | | Precio (Euros) | Cantidad (Horas) | Total (Euros) |
| 1 | Técnico especializado en impresión 3D, realizará el modelado de la pieza en 3D y la impresión garantizando que la pieza se ha impreso con la calidad exigida además de realizar el mantenimiento y preparación de la impresora 3D. | 20,000 | 2,500 h | 50,00 |
| 2 | Estudiante de Ingeniería electrónica industrial y automática con mención en automática. | 7,000 | 330,000 h | 2.310,00 |
| 3 | Tiempo necesario por el especialista en montar y dejar listo el robot de la forma adecuada para poder emplearlo. | 23,500 | 5,500 h | 129,25 |
| | | | Importe total: | 2.489,25 |
| | <p>Valencia, agosto de 2022</p> <p>Ingeniero técnico electrónico industrial y automático</p> <p>Juan Gallú Camús</p> | | | |

Cuadro de maquinaria

| Nº | Designación | Importe | | |
|----|--|----------------|-----------------------|---------------|
| | | Precio (Euros) | Cantidad | Total (Euros) |
| 1 | <p>La BCN3D Epsilon W27 es un estado del producto de impresión ART 3D con una extrusora doble independiente o IDEX, tal y como lo hace el fabricante. La impresora tiene una cámara térmica pasiva completamente cerrada con una pausa de seguridad. La impresora está equipada con una pantalla táctil capacitiva a todo color de 5 pulgadas. BCN3D Cura es el software utilizado por el producto y soporta los formatos de archivo STL, 3MF, OBJ, AMF. Consume 840W mA con una fuente de alimentación de 84 V ac-240V V ac, 3,6 V ac-1,3A V ac y 50 V ac-60Hz V. El dispositivo admite impresión sin conexión a través de tarjeta SD e impresión en línea a través de Wi-Fi o Ethernet (a través de BCN3D Cloud). Materiales estándar PLA, PET-G, TPU 98A y PVA.</p> | 4.995,000 | 1,000 ud | 4.995,00 |
| 2 | <p>El UR3e de Universal Robots es un robot industrial colaborativo ultraligero y compacto, ideal para la aplicación sobre mesas de trabajo. Su tamaño reducido lo convierte en el más adecuado para implementarse directamente dentro de maquinaria o en otros espacio de trabajo pequeños. Este cobot pesa tan solo 11 kg, pero tiene una carga útil de 3 kg. Su rotación ±360 grados en todas las articulaciones y su rotación infinita en el extremo hacen que sea ideal para ensamblajes ligeros y aplicaciones de atornillado. Tiene incorporado el sensor de fuerza en la muñeca con un alcance de hasta 500 mm. Con controlador E/S.</p> | 23.500,000 | 1,000 ud | 23.500,00 |
| | <p>Valencia, agosto de 2022 Ingeniero técnico electrónico industrial y automático</p> <p style="text-align: center;">Juan Gallú Camús</p> | | <p>Importe total:</p> | 28.495,00 |

Cuadro de materiales

| Nº | Designación | Importe | | |
|----|--|-------------------|----------------------|------------------|
| | | Precio (Euros) | Cantidad Empleada | Total (Euros) |
| 1 | Eono Filamento PLA de seda 1,75 mm, filamento estilo seda, filamento PLA de impresora 3D con brillo metálico brillante, 1 kg 1 carrete, Plata seda, con aspecto metalizado. | 20,600 | 0,125 kg | 2,58 |
| 2 | Programa Labview edición Completo compatible con Windows, Linux y MAC. Con capacidad de integración de hardware, Adquirir datos desde hardware de NI, Adquirir datos desde Hardware de terceros, permite la implementación de hardware en tiempo real con el complemento Real-Time Module (incluido en el precio), con la posibilidad de realizar representaciones gráficas desde ficheros de datos. | 3.021,000 | 1,000 ud | 3.021,00 |
| 3 | Paquete con licencia para 1 año de office 365 con programas como WORD, EXCEL, POWERPOINT, TEAMS, OUTLOOK y ONE DRIVE. | 70,000 | 1,000 ud | 70,00 |
| 4 | Licencia anual windows 10 Pro. | 259,000 | 1,000 ud | 259,00 |
| 5 | FULARR® 10M X 15MM Premium Transparente Acrílica Espuma Montaje Cinta, Ultra Fuerte Doble Cara Adhesiva Cinta Rollo, Impermeable & Resistente Calor, para Interiores y Exteriores (Espesor 1mm). | 0,890 | 0,120 m | 0,11 |
| 6 | Herramienta de acero inoxidable compatible con el robot Ur3e en forma de puntero acabando con una curva de 8mm de radio y una longitud de 106 mm. | 150,000 | 1,000 ud | 150,00 |
| 7 | Oxford, Cuaderno A5 cuadriculado 5x5, Libreta Microperforada Europeanbook1, Tapa extradura, 80 Hojas, Color Ice Mint. | 5,000 | 1,000 ud | 5,00 |
| 8 | Pieza de metacrilato con una altura 8.3 cm y una superficie plana, lo suficientemente resiste como para hacer las primeras pruebas del proyecto. | 1,750 | 1,000 ud | 1,75 |
| 9 | Taco de madera de dimensiones 30x20x20. | 1,250 | 1,000 ud | 1,25 |
| 10 | Ordenador portatil MSI PE62 7RD con memoria RAM de 16 GB DDR4, Procesador Intel(R) Core(TN) i7-7700HQ CPU, Disco duro SSD de 256 GB y HDD de 1TB, tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE GTX 1050. | 1.150,000 | 1,000 ud | 1.150,00 |
| | | | Importe total: | 4.660,69 |
| | <p>Valencia, agosto de 2022</p> <p>Ingeniero técnico electrónico</p> <p>industrial y automático</p> <p>Juan Gallú Camús</p> | | | |

Cuadro de precios nº 1

| Nº | Designación | Importe | |
|---|--|---------------------|--|
| | | En cifra (Euros) | En letra (Euros) |
| 1 | h Se incluye la mano de obra utilizada en el proyecto, tanto para la parte de investigación como planificación del mismo, donde se realiza un estudio de posibilidades, análisis de mercado, viabilidad técnica y planificación de como se ejecutará el proyecto, como la mano de obra utilizada para ejecutar los experimentos, programación del robot y redacción del documento. | 2.356,20 | DOS MIL TRESCIENTOS CINCUENTA Y SEIS EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS |
| 2 | ud Pieza impresa en 3D, con una resolución inferior a 1mm para garantizar la suficiente calidad en la impresión. Utilizando la impresora BCN3D Epsilon W27 Dual Extrusion 3D Printer, garantizando el correcto funcionamiento y mantenimiento de la impresora y modelaje de la pieza 3D por personal cualificado. | 5.148,53 | CINCO MIL CIENTO CUARENTA Y OCHO EUROS CON CINCUENTA Y TRES CÉNTIMOS |
| 3 | ud Se precisa de un ordenador MSI PE62 7RD con memoria RAM de 16 GB DDR4, Procesador Intel(R) Core(TN) i7-7700HQ CPU, Disco duro SSD de 256 GB y HDD de 1TB, tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE GTX 1050 con Windows 10 Pro instalado y funcionando de forma correcta y el paquete de office 365 operativo. Además de la licencia del programa Labview. | 4.590,00 | CUATRO MIL QUINIENTOS NOVENTA EUROS |
| 4 | ud Material necesario para llevar acabo los diferentes experimentos que se van a realizar. La pieza impresa en 3D está dentro del capítulo de impresión 3D y no se incluye aquí. Se incluye: pieza de metacrilato, cinta de doble cara, libreta para utilizar de soporte y anotar observaciones de los experimentos, taco de madera y herramienta tipo puntero compatible con el robot. | 161,27 | CIENTO SESENTA Y UN EUROS CON VEINTISIETE CÉNTIMOS |
| 5 | ud El UR3e de Universal Robots es un robot industrial colaborativo ultraligero y compacto, ideal para la aplicación sobre mesas de trabajo. Su tamaño reducido lo convierte en el más adecuado para implementarse directamente dentro de maquinaria o en otros espacio de trabajo pequeños. Este cobot pesa tan solo 11 kg, pero tiene una carga útil de 3 kg. Su rotación ±360 grados en todas las articulaciones y su rotación infinita en el extremo hacen que sea ideal para ensamblajes ligeros y aplicaciones de atornillado. Tiene incorporado el sensor de fuerza en la muñeca con un alcance de hasta 500 mm. Con controlador E/S. Instalado y garantizando el correcto funcionamiento por técnico cualificado. | 24.101,84 | VEINTICUATRO MIL CIENTO UN EUROS CON OCHENTA Y CUATRO CÉNTIMOS |
| Valencia, agosto de 2022 Ingeniero técnico electrónico industrial y automático | | | |
| Juan Gallú Camús | | | |

Anejo de justificación de precios

| Nº | Código | Ud | Descripción | Total |
|---------------------------------|--------|-----------|--|-----------------|
| 1 MANO DE OBRA | | | | |
| 1.1 | EMO.T | h | Se incluye la mano de obra utilizada en el proyecto, tanto para la parte de investigación como planificación del mismo, donde se realiza un estudio de posibilidades, análisis de mercado, viabilidad técnica y planificación de como se ejecutará el proyecto, como la mano de obra utilizada para ejecutar los experimentos, programación del robot y redacción del documento. | |
| | MOIE | 330,000 h | Estudiante de Ingeniería electrónica industrial y automática con mención en automática. | 2.310,00 |
| | % | 2,000 % | Costes Directos Complementarios | 46,20 |
| Precio total por h | | | | 2.356,20 |

Anejo de justificación de precios

| Nº | Código | Ud | Descripción | Total |
|----------------------------------|--------|----------|---|--------------------|
| 2 IMPRESIÓN 3D | | | | |
| 2.1 | IM3D | ud | Pieza impresa en 3D, con una resolución inferior a 1mm para garantizar la suficiente calidad en la impresión. Utilizando la impresora BCN3D Epsilon W27 Dual Extrusion 3D Printer, garantizando el correcto funcionamiento y mantenimiento de la impresora y modelaje de la pieza 3D por personal cualificado. | |
| | I3DMO | 2,500 h | Técnico especializado en impresión 3D | 20,000 50,00 |
| | 3DImpr | 1,000 ud | Impresora EPSILON W27 Bcn3d | 4.995,000 4.995,00 |
| | 3DMPLA | 0,125 kg | Filamento PLA 1.75 mm color gris. | 20,600 2,58 |
| | % | 2,000 % | Costes Directos Complementarios | 5.047,580 100,95 |
| Precio total por ud | | | | 5.148,53 |

Anejo de justificación de precios

| Nº | Código | Ud | Descripción | Total |
|----------------------------------|--------|----------|--|------------------|
| 3 ROBOT | | | | |
| 3.1 | PRUR | ud | El UR3e de Universal Robots es un robot industrial colaborativo ultraligero y compacto, ideal para la aplicación sobre mesas de trabajo. Su tamaño reducido lo convierte en el más adecuado para implementarse directamente dentro de maquinaria o en otros espacio de trabajo pequeños. Este cobot pesa tan solo 11 kg, pero tiene una carga útil de 3 kg. Su rotación ± 360 grados en todas las articulaciones y su rotación infinita en el extremo hacen que sea ideal para ensamblajes ligeros y aplicaciones de atornillado. Tiene incorporado el sensor de fuerza en la muñeca con un alcance de hasta 500 mm. Con controlador E/S. Instalado y garantizando el correcto funcionamiento por técnico cualificado. | |
| | RUR3P | 1,000 ud | Robot UR3e con sensor de fuerza integrado en la muñeca y controlador. | 23.500,00 |
| | MORUR3 | 5,500 h | Técnico especializado en montaje de robots. | 129,25 |
| | % | 2,000 % | Costes Directos Complementarios | 472,59 |
| Precio total por ud | | | | 24.101,84 |

Anejo de justificación de precios

| Nº | Código | Ud | Descripción | Total |
|---|--------|----------|---|---------------|
| 4 MATERIAL PARA LOS EXPERIMENTOS | | | | |
| 4.1 | MExT | ud | Material necesario para llevar acabo los diferentes experimentos que se van a realizar. La pieza impresa en 3D está dentro del capítulo de impresión 3D y no se incluye aquí. Se incluye: pieza de metacrilato, cinta de doble cara, libreta para utilizar de soporte y anotar observaciones de los experimentos, taco de madera y herramienta tipo puntero compatible con el robot. | |
| | MPzMe | 1,000 ud | Pieza metacrilato | 1,750 |
| | MLiOx | 1,000 ud | Libreta Oxford tamaño A5 con tapa dura. | 5,000 |
| | MC2C | 0,120 m | Cinta de doble cara. | 0,890 |
| | MTM12 | 1,000 ud | Taco de madera 30x20x20 mm | 1,250 |
| | MHPRo | 1,000 ud | Herramienta compatible UR3e radio 8mm | 150,000 |
| | % | 2,000 % | Costes Directos Complementarios | 158,110 |
| Precio total por ud | | | | 161,27 |

Anejo de justificación de precios

| Nº | Código | Ud | Descripción | Total |
|----------------------------------|---------|----------|---|-----------------|
| 5 SOFTWARE Y PC | | | | |
| 5.1 | MdON23 | ud | Se precisa de un ordenador MSI PE62 7RD con memoria RAM de 16 GB DDR4, Procesador Intel(R) Core(TN) i7-7700HQ CPU, Disco duro SSD de 256 GB y HDD de 1TB, tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE GTX 1050 con Windows 10 Pro instalado y funcionando de forma correcta y el paquete de office 365 operativo. Además de la licencia del programa Labview. | |
| | NUPCMSI | 1,000 ud | Ordenador portatil MSI PE62 7RD | 1.150,00 |
| | LOff365 | 1,000 ud | Paquete office 365. | 70,00 |
| | LLVBIW | 1,000 ud | Licencia anual programa LabView Completo+complemento Real-Time Module | 3.021,00 |
| | LcW10P | 1,000 ud | Licencia Windows 10 pro anual. | 259,00 |
| | % | 2,000 % | Costes Directos Complementarios | 90,00 |
| Precio total por ud | | | | 4.590,00 |

Presupuesto parcial nº 1 MANO DE OBRA

| Nº | Ud | Descripción | Medición |
|-----------|-----------|--|-----------------------------|
| 1.1 | H | Se incluye la mano de obra utilizada en el proyecto, tanto para la parte de investigación como planificación del mismo, donde se realiza un estudio de posibilidades, análisis de mercado, viabilidad técnica y planificación de como se ejecutará el proyecto, como la mano de obra utilizada para ejecutar los experimentos, programación del robot y redacción del documento. | |
| | | | Total h: 1,000 |

Presupuesto parcial nº 2 IMPRESIÓN 3D

| Nº | Ud | Descripción | Medición |
|-----------|-----------|--|------------------------------|
| 2.1 | Ud | Pieza impresa en 3D, con una resolución inferior a 1mm para garantizar la suficiente calidad en la impresión. Utilizando la impresora BCN3D Epsilon W27 Dual Extrusion 3D Printer, garantizando el correcto funcionamiento y mantenimiento de la impresora y modelaje de la pieza 3D por personal cualificado. | |
| | | | Total ud: 1,000 |

Presupuesto parcial nº 3 ROBOT

| Nº | Ud | Descripción | Medición |
|-----------------|----|--|----------|
| 3.1 | Ud | El UR3e de Universal Robots es un robot industrial colaborativo ultraligero y compacto, ideal para la aplicación sobre mesas de trabajo. Su tamaño reducido lo convierte en el más adecuado para implementarse directamente dentro de maquinaria o en otros espacio de trabajo pequeños. Este cobot pesa tan solo 11 kg, pero tiene una carga útil de 3 kg. Su rotación ± 360 grados en todas las articulaciones y su rotación infinita en el extremo hacen que sea ideal para ensamblajes ligeros y aplicaciones de atornillado. Tiene incorporado el sensor de fuerza en la muñeca con un alcance de hasta 500 mm. Con controlador E/S. Instalado y garantizando el correcto funcionamiento por técnico cualificado. | |
| Total ud: | | | 1,000 |

Presupuesto parcial nº 4 MATERIAL PARA LOS EXPERIMENTOS

| Nº | Ud | Descripción | Medición |
|-----------|-----------|--|------------------------------|
| 4.1 | Ud | Material necesario para llevar acabo los diferentes experimentos que se van a realizar. La pieza impresa en 3D está dentro del capítulo de impresión 3D y no se incluye aquí. Se incluye: pieza de metacrilato, cinta de doble cara, libreta para utilizar de soporte y anotar observaciones de los experimentos, taco de madera y herramienta tipo puntero compatible con el robot. | |
| | | | Total ud: 1,000 |

Presupuesto parcial nº 5 SOFTWARE Y PC

| Nº | Ud | Descripción | Medición |
|-----------|-----------|--|------------------------------|
| 5.1 | Ud | Se precisa de un ordenador MSI PE62 7RD con memoria RAM de 16 GB DDR4, Procesador Intel(R) Core(TN) i7-7700HQ CPU, Disco duro SSD de 256 GB y HDD de 1TB, tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE GTX 1050 con Windows 10 Pro instalado y funcionando de forma correcta y el paquete de office 365 operativo. Además de la licencia del programa Labview. | |
| | | | Total ud: 1,000 |

Valencia, agosto de 2022
Ingeniero técnico electrónico industrial y automático

Juan Gallú Camús

Presupuesto parcial nº 1 MANO DE OBRA

| Nº | Ud | Descripción | Medición | Precio | Importe |
|-----------|-----------|--|--|---------------|-----------------|
| 1.1 | H | Se incluye la mano de obra utilizada en el proyecto, tanto para la parte de investigación como planificación del mismo, donde se realiza un estudio de posibilidades, análisis de mercado, viabilidad técnica y planificación de como se ejecutará el proyecto, como la mano de obra utilizada para ejecutar los experimentos, programación del robot y redacción del documento. | | | |
| | | | Total h: | 1,000 | 2.356,20 |
| | | | Total presupuesto parcial nº 1 MANO DE OBRA : | | 2.356,20 |

Presupuesto parcial nº 2 IMPRESIÓN 3D

| Nº | Ud | Descripción | Medición | Precio | Importe |
|-----------|-----------|--|---|---------------|----------------|
| 2.1 | Ud | Pieza impresa en 3D, con una resolución inferior a 1mm para garantizar la suficiente calidad en la impresión. Utilizando la impresora BCN3D Epsilon W27 Dual Extrusion 3D Printer, garantizando el correcto funcionamiento y mantenimiento de la impresora y modelaje de la pieza 3D por personal cualificado. | | | |
| | | | Total ud: | 1,000 | 5.148,53 |
| | | | Total presupuesto parcial nº 2 IMPRESIÓN 3D : | | 5.148,53 |

Presupuesto parcial nº 3 ROBOT

| Nº | Ud | Descripción | Medición | Precio | Importe |
|-----------|-----------|---|---|---------------|------------------|
| 3.1 | Ud | El UR3e de Universal Robots es un robot industrial colaborativo ultraligero y compacto, ideal para la aplicación sobre mesas de trabajo. Su tamaño reducido lo convierte en el más adecuado para implementarse directamente dentro de maquinaria o en otros espacio de trabajo pequeños. Este cobot pesa tan solo 11 kg, pero tiene una carga útil de 3 kg. Su rotación ±360 grados en todas las articulaciones y su rotación infinita en el extremo hacen que sea ideal para ensamblajes ligeros y aplicaciones de atornillado. Tiene incorporado el sensor de fuerza en la muñeca con un alcance de hasta 500 mm. Con controlador E/S. Instalado y garantizando el correcto funcionamiento por técnico cualificado. | | | |
| | | | Total ud: | 1,000 | 24.101,84 |
| | | | | | <u>24.101,84</u> |
| | | | Total presupuesto parcial nº 3 ROBOT : | | 24.101,84 |

Presupuesto parcial nº 4 MATERIAL PARA LOS EXPERIMENTOS

| Nº | Ud | Descripción | Medición | Precio | Importe |
|-----------|-----------|--|--|---------------|----------------|
| 4.1 | Ud | Material necesario para llevar acabo los diferentes experimentos que se van a realizar. La pieza impresa en 3D está dentro del capítulo de impresión 3D y no se incluye aquí. Se incluye: pieza de metacrilato, cinta de doble cara, libreta para utilizar de soporte y anotar observaciones de los experimentos, taco de madera y herramienta tipo puntero compatible con el robot. | | | |
| | | | Total ud: | 1,000 | 161,27 |
| | | | Total presupuesto parcial nº 4 MATERIAL PARA LOS EXPERIMENTOS : | | 161,27 |

Presupuesto parcial nº 5 SOFTWARE Y PC

| Nº | Ud | Descripción | Medición | Precio | Importe |
|-----------|-----------|--|---|---------------|-----------------|
| 5.1 | Ud | Se precisa de un ordenador MSI PE62 7RD con memoria RAM de 16 GB DDR4, Procesador Intel(R) Core(TN) i7-7700HQ CPU, Disco duro SSD de 256 GB y HDD de 1TB, tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE GTX 1050 con Windows 10 Pro instalado y funcionando de forma correcta y el paquete de office 365 operativo. Además de la licencia del programa Labview. | | | |
| | | | Total ud: | 1,000 | 4.590,00 |
| | | | | | <hr/> |
| | | | Total presupuesto parcial nº 5 SOFTWARE Y PC : | | 4.590,00 |

Presupuesto de ejecución material

| | |
|----------------------------------|------------------|
| 1 MANO DE OBRA | 2.356,20 |
| 2 IMPRESIÓN 3D | 5.148,53 |
| 3 ROBOT | 24.101,84 |
| 4 MATERIAL PARA LOS EXPERIMENTOS | 161,27 |
| 5 SOFTWARE Y PC | 4.590,00 |
| Total | 36.357,84 |

Asciende el presupuesto de ejecución material a la expresada cantidad de **TREINTA Y SEIS MIL TRESCIENTOS CINCUENTA Y SIETE EUROS CON OCHENTA Y CUATRO CÉNTIMOS.**

Valencia, agosto de 2022
Ingeniero técnico electrónico industrial y automático

Juan Gallú Camús

Proyecto: Presupuesto TFG

| Capítulo | Importe |
|---|----------------|
| Capítulo 1 MANO DE OBRA | 2.356,20 |
| Capítulo 2 IMPRESIÓN 3D | 5.148,53 |
| Capítulo 3 ROBOT | 24.101,84 |
| Capítulo 4 MATERIAL PARA LOS EXPERIMENTOS | 161,27 |
| Capítulo 5 SOFTWARE Y PC | 4.590,00 |
| Presupuesto de ejecución material | 36.357,84 |
| 13% de gastos generales | 4.726,52 |
| 6% de beneficio industrial | 2.181,47 |
| Suma | 43.265,83 |
| 21% | 9.085,82 |
| Presupuesto de ejecución por contrata | 52.351,65 |

Asciende el presupuesto de ejecución por contrata a la expresada cantidad de CINCUENTA Y DOS MIL TRESCIENTOS CINCUENTA Y UN EUROS CON SESENTA Y CINCO CÉNTIMOS.

Valencia, agosto de 2022
Ingeniero técnico electrónico industrial y
automático

Juan Gallú Camús

Estudio para la caracterización del relieve y formas de objetos utilizando el sensor de fuerza del robot UR3e.

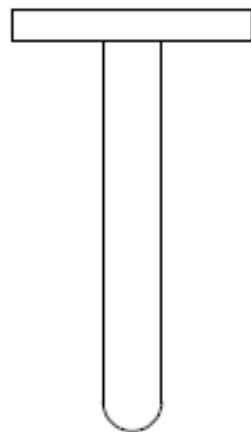
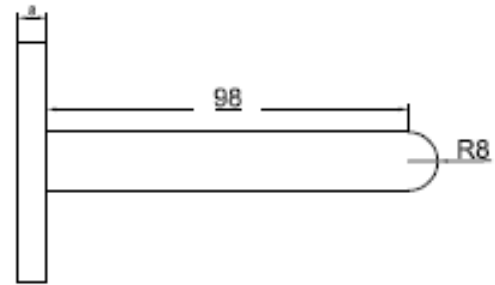
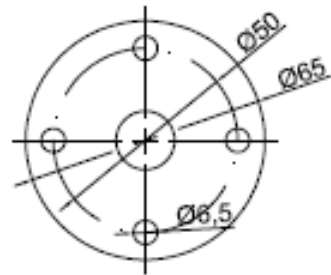
DOCUMENTO Nº 4

PLANOS

Autor: Juan Gallú Camús

Tutor: Carlos Blanes Campos

Curso académico 2021/2022



PROYECTO: Proyecto final de grado

Fecha: 19/08/2022

Escala:

1:2

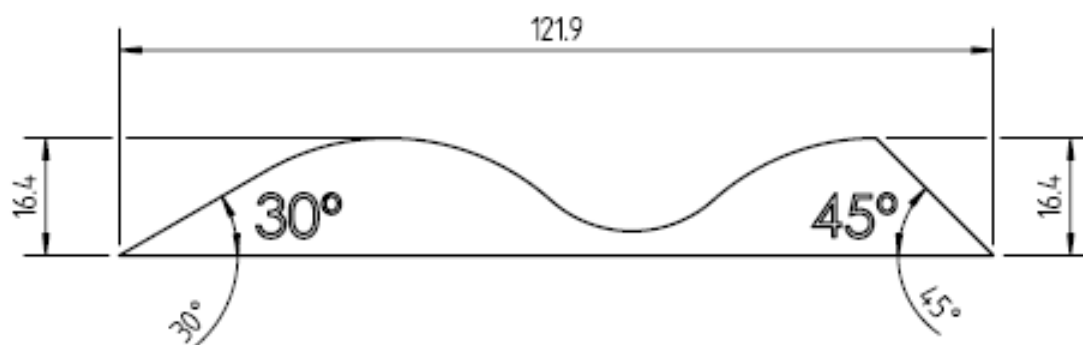
Autor: Juan Gallú Camús

Plano:

Herramienta puntero robot

Plano Nº

01



| | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| PROYECTO: Proyecto final de grado | | Fecha: 19/08/2022 |
| | | Escala: 1:1 |
| Autor: Juan Gallú Camús | Plano: Pieza modelada en 3D | Plano Nº 02 |

Estudio para la caracterización del relieve y formas de objetos utilizando el sensor de fuerza del robot UR3e.

DOCUMENTO Nº 5

ANEXOS

Autor: Juan Gallú Camús

Tutor: Carlos Blanes Campos

Curso académico 2021/2022

ÍNDICE DOCUMENTO Nº5 ANEXOS

| | |
|--|----------|
| Anexo nº1 Programa UR3e. | 3 |
| Anexo nº2 Hojas de características..... | 6 |

Anexo nº1 Programa UR3e.

Program

Robot Program

```
var_send:= False
```

```
//Inicializamos las variables
```

```
fuerza:=[0,0,2,0,0,0]
```

```
vel:=[0.1,0.1,1,0.17,0.17,0.17]
```

```
vel_2:=[0.01,0.01,0.01,0.017,0.17,0.17]
```

```
sel:=[0,0,1,0,0,0]
```

```
open:=socket_open("192.168.1.91",5000) //Abrimos el socket de comunicaciones
```

```
socket_send_string("get")
```

```
textmsg("conexion establecida") //Confirmamos que se ha realizado la conexión.
```

```
force_mode_set_damping(0.05)
```

```
force_mode_set_gain_scaling(2)
```

```
MoveL //Iniciamos el movimiento en línea recta
```

```
Wait: 0.1
```

```
var_send:= True
```

```
zero_ftsensor() //Se resetean los valores del sensor de fuerza
```

```
Wait: 0.2
```

```
Waypoint_4
```

```
force_mode(Tool_const,sel,fuerza,2,vel_2) //Iniciamos el modo fuerza
```

```
Waypoint_1 //En el documento se ha llamado punto A, empieza el barrido
```

```
Wait: 0.6
```

```
Waypoint_3 //En el document se ha llamado punto B, finaliza el barrido.
```

```
Wait: 0.6
```

```
end_force_mode() //Terminamos el modo fuerza.
```

```
'Halt'
```

```
'Halt'
```

```
MoveJ //Nos movemos de forma "libre" al Waypoint_3
```

```
'force_mode(Tool_const,sel,[0,0,0,0,0],2,vel_2)'
```

```
Waypoint_3
```

```
Wait: 2.0
```

```
end_force_mode()
```

```
'Waypoint_5'
```

```
'Wait: 2.0'
```

```
'Waypoint_4'
```

Halt // Este es el primer Halt que no está comentado, sirve para acabar finalizar la toma de datos desde LabVIEW

```
'MoveL'
```

//Comenzamos la programación por hilos para enviar información

```
Thread_1
```

```
var_2:=force()
```

```
var_1:=get_tcp_pose() //En caso de necesitar estudiar la fuerza var_1:=get_tcp_force()
```

```
var_3:=norm(get_target_tcp_speed())
```

```
var_4:=get_steptime()
```

```
'Wait: 0.1'
```

```
If var_send? True
```

```
socket_send_string(var_1)
```

```
socket_send_string(var_2)
```

```
socket_send_string("]")
```

```
socket_send_string(var_3)
```

```
'socket_send_string("]")'
```

```
'socket_send_string(var_4)'
```

```
Else
```

```
'socket_send_string("a")'
```

```
'socket_send_string(var_1)'
```

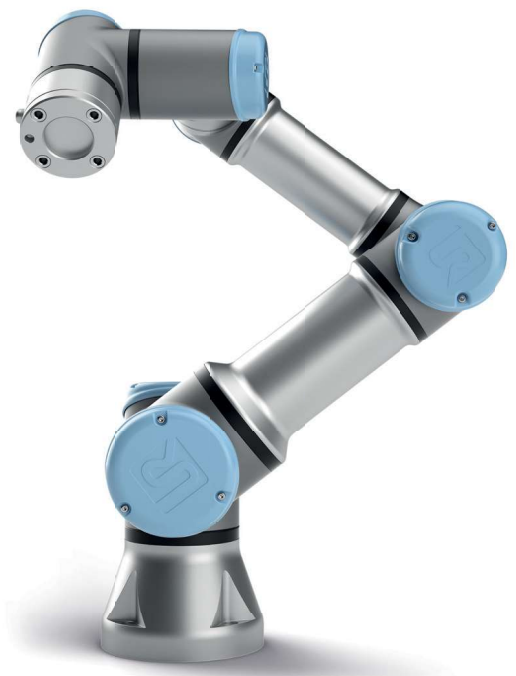
```
'socket_send_string("a")'
```

```
sync()
```

Anexo nº2 Hojas de características.

UR3e

Ficha técnica



Rendimiento

| | | | |
|-------------------------------|--|------------|---------|
| Consumo de energía | Aprox. 100W para un programa típico | | |
| Operación de colaboración | 17 funciones de seguridad ajustables avanzadas, incluyendo supervisión del código Control remoto de acuerdo con ISO 10218 | | |
| Certificaciones | EN ISO 13849-1, Cat.3, PL d, y EN ISO 10218-1 | | |
| Sensor F/P - Fuerza, X-Y-Z | Sensor F/P - Par, X-Y-Z | | |
| Rango | 30 N | Rango | 10 Nm |
| Resolución | 1,0 N | Resolución | 0,02 Nm |
| Precisión | 3,5 N | Precisión | 0,10 Nm |
| Rango de temperatura ambiente | 0–50°C* | | |
| Humedad | 90%RH (sin condensación) | | |

Especificación

| | | | |
|--------------------|---|--|--|
| Carga útil | 3kg / 6,6lbs | | |
| Alcance | 500mm / 19,7in | | |
| Grados de libertad | 6 articulaciones giratorias | | |
| Programación | Interfaz gráfica del usuario PolyScope con pantalla táctil de 12" con soporte | | |

Movimiento

| | | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|------------------|--|
| Repetibilidad de posición | +/-0,03mm con carga, según ISO 9283 | | |
| Movim. del eje del brazo robot. | Radio de acción | Velocidad máxima | |
| Base | ± 360° | ± 180°/s | |
| Hombro | ± 360° | ± 180°/s | |
| Codo | ± 360° | ± 180°/s | |
| Muñeca 1 | ± 360° | ± 360°/s | |
| Muñeca 2 | ± 360° | ± 360°/s | |
| Muñeca 3 | Infinita | ± 360°/s | |
| Velocidad típica de TCP | 1 m/s / 39,4 in/s | | |

Funciones

| | | | |
|--|---|---|--|
| Clasificación IP | IP54 | | |
| Clase ISO Sala limpia | 5 | | |
| Ruido | Menos de 60dB(A) | | |
| Montaje del robot | Cualquier orientación | | |
| Puertos de E/S en herramienta | Entrada digital | 2 | |
| | Salida digital | 2 | |
| | Entrada analógica | 2 | |
| | Salida analógica | 0 | |
| | Interface UART (9.6k-5Mbps) | | |
| E/S de fuente de alimentación en herramienta | 12V/24V 600mA continuos, 2A por periodos cortos | | |

Características físicas

| | | | |
|---|----------------------------------|--|--|
| Huella | Ø 128 mm | | |
| Materiales | Aluminio, Plásticos de PP, Acero | | |
| Tipo de conector para herramienta del robot | M8 M8 8-pin | | |
| Long. cable del brazo robótico | 6m / 236in | | |
| Peso incluyendo cable | 11,2kg / 24,7lbs | | |

*El robot puede trabajar dentro del intervalo de temperaturas 0-50 °C. A alta velocidad continua de las articulaciones, la temperatura ambiente se reduce.

Caja de control

Funciones

| | | |
|-------------------------------|--|----|
| Clasificación IP | IP44 | |
| Clase ISO Sala limpia | 6 | |
| Rango de temperatura ambiente | 0–50°C | |
| Puertos de E/S | Entrada digital | 16 |
| | Salida digital | 16 |
| | Entrada analógica | 2 |
| | Salida analógica | 2 |
| | Control a 500 Hz, 4 entradas digitales en cuadratura de alta velocidad dedicadas | |
| E/S de fuente de alimentación | 24 V 2A | |
| Comunicación | Frecuencia de control: 500 Hz ModbusTCP. Frecuencia de señal de 500 Hz ProfiNet y EthernetIP. Frecuencia de señal de 500 Hz Puertos USB: 1 USB 2.0, 1 USB 3.0 | |
| Fuente de alimentación | 100-240VAC, 47-440Hz | |
| Humedad | 90%RH (sin condensación) | |

Características físicas

| | | |
|---|--|--|
| Tamaño de la caja de control (anch. x alt. x prof.) | 475mm x 423mm x 268mm / 18,7in x 16,7in x 10,6in | |
| Peso | Máx. 13kg / 28,7lbs | |
| Materiales | Acero | |

Consola de programación

Funciones

| | | |
|------------------------|--------------------------|--|
| Clasificación IP | IP54 | |
| Humedad | 90%RH (sin condensación) | |
| Resolución de pantalla | 1280 x 800 píxeles | |

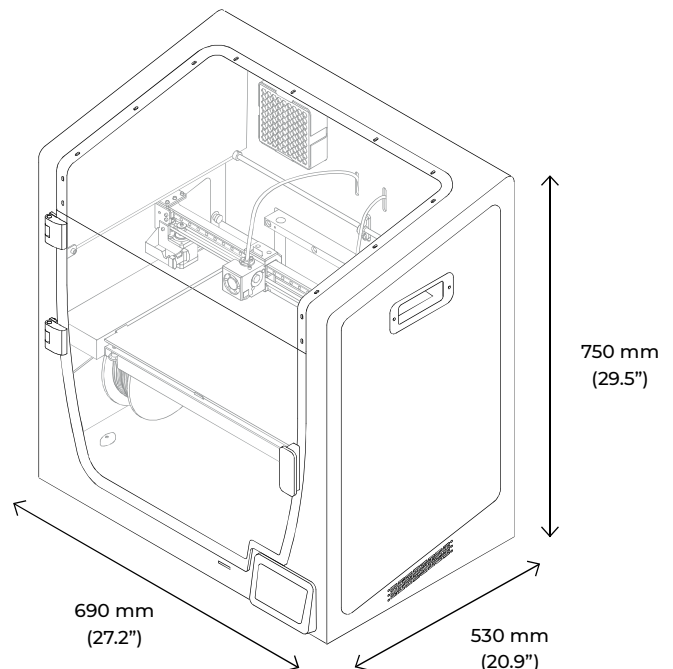
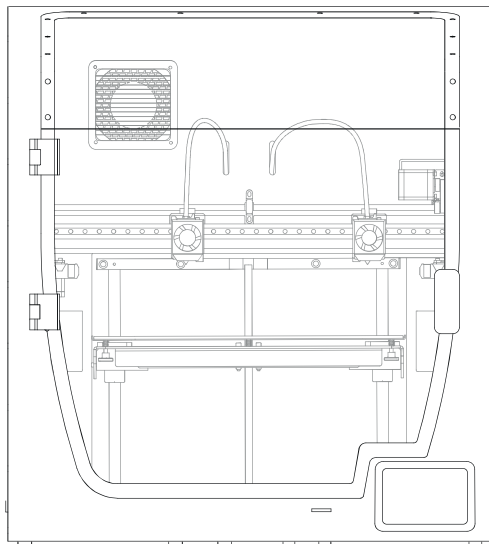
Características físicas

| | | |
|-----------------------------------|----------------|--|
| Materiales | Plástico | |
| Peso incluyendo 1m de cable de TP | 1,6kg / 3,5lbs | |
| Longitud del cable | 4,5m / 17,7in | |

Specifications



BCN3D Epsilon W27



Printer properties

| | |
|-------------------------------|---|
| 3D Printing Technology | Fused Filament Fabrication (FFF) |
| Architecture | Independent Dual EXtruder (IDEX) |
| Printing volume | 420mm x 300mm x 220mm (16.5" x 11.8" x 8.7") |
| Build chamber | Passive Heated Chamber Fully enclosed Safety Pause |
| Air filtering | Category H13 HEPA filter Active Carbon filter |
| Number of extruders | 2 |
| Warranty | 2 years for EU countries 1 year for non-EU countries |
| Extruder system | Extruder Bondtech™ high-tech dual drive gears Hotends optimized and manufactured by e3D™ |
| Printing modes | Single mode Duplication mode Mirror mode Multimaterial mode Soluble Supports mode |
| Electronics | Single Board Computer: Toradex ARM Compute Module Motion Board: BCN3D Electronics with Independent Stepper Drivers |

Specifications



BCN3D Epsilon W27

Printer properties

| | |
|---------------------|--|
| Firmware | BCN3D Embedded Linux distribution BCN3D Epsilon - Marlin |
| Heated bed | Silicone thermal pad |
| Screen | 5" full color capacitive touchscreen |
| Supported languages | Spanish English German French Italian Japanese Portuguese Chinese |
| Supported files | *.gcode |
| Operating sound | 49dB |
| Nozzle diameter | Brass nozzle: 0,4mm (default) 0,6mm 0,8mm 1,0mm Hotend X: 0,6mm |
| Certifications | CE / FCC |
| Connectivity | Offline printing: SD card Online printing: WiFi or Ethernet (through BCN3D Cloud) |

Materials

| | |
|----------------------|---|
| Filament diameter | 2,85 ± 0,05 mm |
| Compatible materials | Standard materials: PLA, Tough PLA, PET-G, TPU 98A, PVA, BVOH Technical materials: ABS, PP, PA Composite materials (only with Hotend X): PP GF30, PAHT CF15 |
| Open filament system | Yes |

Physical properties

| | |
|-------------------------|--|
| Overall dimensions | 690mm (W) x 530mm (D) x 750mm (H) (27.2" x 20.9" x 29.5") |
| Weight | 33kg (72.7 lb) |
| Shipping box dimensions | 800mm (W) x 600mm (D) x 1230mm (H) (31.5" x 23.6" x 48.4") |
| Shipping weight | 60kg (132.3 lb) |
| Shipping method | Half Europallet |

Specifications



BCN3D Epsilon W27

Printing properties

| | |
|------------------------------------|--|
| Recommended profiles | Layer height: 0,2mm 0,3mm 0,4mm (depending on nozzle diameter) |
| Layer height | 0,05mm - 0,5mm (custom profiles) |
| Positioning resolution (X / Y / Z) | 1,25µm / 1,25µm / 1µm |
| Operating temperature | 15 °C - 30 °C |
| Extruder maximum temperature | 300 °C |
| Heated bed maximum temperature | 120 °C |
| Build chamber maximum temperature | 60 °C (depending on operating temperature) |

Electric Properties

| | |
|---------------------------|-----------------------------------|
| Input | AC 100-240V, AC 8,4-3,5A, 50-60Hz |
| Maximum power consumption | 840W |

Software

| | |
|---------------------------|---|
| File preparation software | BCN3D Cura |
| Operating Systems | Windows, Mac, Linux |
| Supported files | STL, 3MF, OBJ, AMF |
| Wireless connectivity | BCN3D Cloud |
| Supported browsers | Google Chrome, Mozilla Firefox, Microsoft Edge, Safari, Opera |