



Universidad de Málaga

Escuela de Ingenierías Industriales

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Trabajo Fin de Grado

Control adaptativo de un manipulador paralelo ligero de tres grados de libertad

Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Autor: Víctor Rosillo Suero

Tutor: Juan Manuel Gandarias Palacios

Cotutor: Dahui Lin Yang

30 de noviembre de 2024

Declaración de Originalidad del Trabajo

Fin de Grado

D./Dña. Víctor Rosillo Suero

DNI/Pasaporte: 54202532L. Correo electrónico: vrosillo1110@gmail.com

Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Título del Proyecto/Trabajo: Control adaptativo de un manipulador paralelo ligero de tres grados de libertad

DECLARA BAJO SU RESPONSABILIDAD

Ser autor/a del texto entregado y que no ha sido presentado con anterioridad, ni total ni parcialmente, para superar materias previamente cursadas en esta u otras titulaciones de la Universidad de Málaga o cualquier otra institución de educación superior u otro tipo de fin.

Asimismo, declara no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual, así como que las fuentes utilizadas han sido citadas adecuadamente.

En Málaga, a 30 de noviembre de 2024

Fdo.: Víctor Rosillo Suero

Resumen

Control adaptativo de un manipulador paralelo ligero de tres grados de libertad

Autor: Víctor Rosillo Suero

Tutor: Juan Manuel Gandarias Palacios

Cotutor: Dahui Lin Yang

Departamento: Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

La interacción física segura entre robots y el entorno es un problema que ha persistido durante décadas en el campo de la robótica, ya que las colisiones pueden ser dañinas, especialmente en entornos donde robots y personas trabajan simultáneamente. En este proyecto, se implementa un control de admitancia en el efecto final de un manipulador delta de tres grados de libertad para mejorar estas interacciones. Este control responde a fuerzas externas medidas por un sensor de fuerzas de tres grados de libertad, colocado en el efecto final, el cual se diseña, fabrica y calibra durante el desarrollo del proyecto. La calibración se realiza empleando un manipulador industrial, comparando las lecturas de ambos sensores para garantizar la precisión del sensor diseñado. Todos los elementos del sistema, incluyendo el sensor, el control de admitancia, los actuadores y el resto del firmware del manipulador, se comunican mediante nodos y topics en ROS. El control desarrollado se valida a través de simulaciones en un modelo de admitancia de un grado de libertad en Simulink, lo que permite comparar el comportamiento del modelo teórico con el controlador de admitancia diseñado. Posteriormente, se llevan a cabo experimentos reales para probar la respuesta del controlador a fuerzas externas aplicadas en los tres ejes, medidas por el sensor. Además, se analiza el efecto de variar la admitancia en el eje z, confirmándose así la capacidad del controlador para ajustar parámetros de forma online, sin necesidad de reiniciar el sistema.

Abstract

Adaptive control of a lightweight three-degree-of-freedom parallel manipulator

Author: Víctor Rosillo Suero

Supervisor: Juan Manuel Gandarias Palacios

Cosupervisor: Dahui Lin Yang

Departamento: Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Degree: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Safe physical interaction between robots and the environment has been a persistent problem for decades in the field of robotics, as collisions can be harmful, especially in environments where robots and humans work simultaneously. In this project, an admittance control is implemented on the end effector of a three-degree-of-freedom delta manipulator to enhance these interactions. This control responds to external forces measured by a three-degree-of-freedom force sensor, placed on the end effector, which is designed, manufactured, and calibrated during the project development. Calibration is performed using an industrial manipulator, comparing the readings from both sensors to ensure the accuracy of the designed sensor. All elements of the system, including the sensor, the admittance control, the actuators, and the rest of the manipulator's firmware, communicate through ROS nodes and topics. The developed control is validated through simulations in a one-degree-of-freedom admittance model in Simulink, allowing for a comparison between the theoretical model's behavior and the designed admittance controller. Subsequently, real experiments are conducted to test the controller's response to external forces applied in the three axes, measured by the sensor. Furthermore, the effect of varying the admittance in the z-axis is analyzed, thereby confirming the controller's ability to adjust parameters online, without the need to restart the system.

A mis padres y a mi hermana

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a mis tutores Juanma y Dahui por siempre tenderme una mano durante el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado. Su pasión por la robótica y la investigación ha sido una fuente de inspiración para mí a lo largo de estos meses, y su orientación ha sido fundamental para alcanzar mis objetivos. Agradezco sinceramente su apoyo y dedicación.

En segundo lugar, agradecer también a mi familia, por ser mi apoyo incondicional. Pese a no conocer en profundidad ninguno de los temas que trata este proyecto, siempre me han apoyado y dado fuerza para seguir adelante. También me gustaría agradecer a mis amigos de la carrera, que han conseguido que en muchos momentos me despeje y disfrute de otras facetas del estudio.

Acrónimos y Notación Matemática

TFG	Trabajo Fin de Grado
ISA	Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
GdL	Grados de libertad
ADC	Analog-to-Digital Converter
CPU	Central Processing Unit (Unidad Central de Procesamiento)
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
I2C	Inter-Integrated Circuit
DAT	Data
SCK	Serial Clock
TTL	Transistor-Transistor Logic
CAD	Computer-Aided Design
EE	End-Effector o efector final
MBC	Control Basado en Modelos
ROS	Robot Operating System
V_{ex}	Tensión de alimentación del circuito
V_o	Tensión de salida del circuito
dt	Derivada del tiempo
x	Variable asociada a la posición
x_{EE_des}	Posición deseada del efector final
x_{EE_act}	Posición actual del efector final
\dot{x}, v	Variable asociada a la velocidad
\dot{x}_{EE_act}	Velocidad actual del efector final
v_{cmd}	Velocidad comandada
\ddot{x}	Variable asociada a la aceleración
\ddot{x}_{EE_des}	Aceleración deseada del efector final
q	Variable asociada a la posición angular
\dot{q}, w	Variables asociadas a la velocidad angular
\ddot{q}	Variable asociada a la aceleración angular
m	Variable asociada a la masa del sistema
b	Variable asociada al coeficiente de amortiguamiento del sistema
k	Variable asociada a la rigidez del muelle
Z	Asociada a la impedancia
Z^{-1}	Asociada a la admitancia

J	Matriz jacobiana
J^{-1}	Matriz jacobiana inversa
M_i	Matriz de inercia para un control de impedancia $M_i \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$
B_i	Matriz de amortiguamiento para un control de impedancia $B_i \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$
K_i	Matriz de rigidez del muelle para un control de impedancia $K_i \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$
M_a	Matriz de inercia para un control de admitancia $M_a \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$
B_a	Matriz de amortiguamiento para un control de admitancia $B_a \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$
K_a	Matriz de rigidez del muelle para un control de admitancia $K_a \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$
W	Matriz de esfuerzos $W \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$
F_{ext}	Fuerza externa aplicada
f_{EE}	Fuerza aplicada en el efecto final $f_{EE} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$
τ_{EE}	Torque aplicado en el efecto final $\tau_{EE} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$

Índice

	Página
Índice de Figuras	xvii
Índice de Tablas	xix
1 Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Estado del arte	2
1.3. Objetivos y contribución	6
1.4. Estructura de la memoria	7
2 Contexto y Marco Teórico	9
2.1. Contexto del proyecto	10
2.2. Control adaptable o Compliant motion control	11
2.2.1. Control de impedancia	11
2.2.2. Control de admitancia	12
2.3. Células de carga	14
2.3.1. Galgas extensiométricas	14
2.3.2. Funcionamiento de una célula de carga	15
3 Metodología	19
3.1. Esquema de control general del proyecto	20
3.2. Control de admitancia adaptativo	20
3.3. Componentes de hardware	23
3.3.1. Manipulador delta	23
3.3.2. Sensor de fuerza	23
3.4. Descripción de software	32
3.4.1. Comunicación vía ROS	32
3.4.2. Nodo del sensor de fuerza	32
3.4.3. Nodo para la tara del sensor	34

ÍNDICE

3.4.4. Nodo del control de admitancia	34
4 Experimentos y Resultados	37
4.1. Entorno experimental	38
4.2. Simulación del modelo	38
4.2.1. Simulación del comportamiento del controlador para 1 GdL	38
4.2.2. Validación de la simulación a través del modelo teórico de admitancia para 1 GdL	39
4.3. Experimento del modelo desarrollado	42
4.3.1. Experimento para comprobar el comportamiento del modelo en cada uno de los ejes	42
4.3.2. Experimento variando la admitancia en el eje z	45
5 Conclusiones	53
Bibliografía	57

Índice de Figuras

Figura	Página
2.1. Controlador previo al proyecto.	10
2.2. Controlador de actuadores de bajo nivel implementado en los motores Dynamixel.	11
2.3. Esquema de un modelo masa-muelle-amortiguador.	12
2.4. Esquema general de un circuito RLC	13
2.5. Circuito de un puente de Wheatstone simple.	15
2.6. Diagrama de funcionamiento de una célula de carga tipo viga.	16
3.1. Esquema de control general del proyecto.	20
3.2. Esquema real del funcionamiento del control desarrollado	21
3.3. Diagrama de arquitectura de hardware.	23
3.4. Diagrama de cableado de una célula de carga, mediante la utilización de un puente de Wheatstone simple.	25
3.5. Esquema del conexionado del sensor de fuerza.	26
3.6. Explosión del modelo CAD del sensor de fuerza.	27
3.7. Calibración del sensor de fuerzas empleando manipulador industrial KUKA lbr iiwa 7.	28
3.8. Gráficas correspondientes a la calibración de la primera célula de carga.	29
3.9. Gráficas correspondientes a la calibración de la segunda célula de carga.	30
3.10. Gráficas correspondientes a la calibración de la tercera célula de carga.	31
3.11. Diagrama de comunicación usando ROS.	33
3.12. Diagrama de comunicación del nodo de tara con el nodo del sensor de fuerza.	34
4.1. Gráfica de la simulación de una variación en el valor del amortiguamiento del sistema.	39
4.2. Gráfica de la simulación de una variación en la inercia del sistema.	40
4.3. Modelo en Simulink de un control de admitancia para 1GdL.	40
4.4. Gráfica del comportamiento del modelo al variar el parámetro de amortiguamiento.	41
4.5. Gráfica del comportamiento del modelo al variar el parámetro de amortiguamiento.	41
4.6. Conjunto de gráficas que describen el comportamiento del sistema ante una entrada de fuerza de forma independiente y espaciada en el tiempo para cada uno de los ejes.	43

ÍNDICE DE FIGURAS

4.7. Conjunto de gráficas que representan la evolución del eje x al aplicar una señal de fuerza de forma cuadrada.	44
4.8. Conjunto de gráficas que representan la evolución del eje y al aplicar una señal de fuerza de forma cuadrada.	45
4.9. Conjunto de gráficas que representan la evolución del eje z al aplicar una señal de fuerza de forma cuadrada.	46
4.10. Gráfica que muestra el comportamiento del sistema ante una baja admitancia en el eje z. .	48
4.11. Gráfica donde se aprecia el comportamiento del sistema en el eje x, teniendo en cuenta que existe una baja admitancia en el eje z.	49
4.12. Gráfica donde se aprecia el comportamiento del sistema en el eje y, teniendo en cuenta que existe una baja admitancia en el eje z.	49
4.13. Gráfica donde se aprecia el comportamiento del sistema en el eje z, siendo en este eje donde se aplica una baja admitancia.	50
4.14. Gráfica que muestra la evolución de la posición del efecto final sobre el plano xy.	51

Índice de Tablas

Tabla	Página
4.1. Tabla de parámetros del controlador para el primer experimento.	42
4.2. Tabla de parámetros del controlador para el segundo experimento.	46
4.3. Tabla de parámetros del controlador para el segundo experimento.	47

Introducción

Contenido

1.1.	Motivación	2
1.2.	Estado del arte	2
1.3.	Objetivos y contribución	6
1.4.	Estructura de la memoria	7

Este capítulo describe el contexto y la relevancia del trabajo realizado. Se plantea el problema o motivación detrás del proyecto, se describen las investigaciones previas en el mismo campo, los objetivos planteados y se ofrece un breve resumen de la estructura que rige el proyecto.

1.1. Motivación

En el presente, el uso de la robótica se desarrolla en infinidad de campos, desde entornos industriales, hasta la biomedicina. Pese a ello, siempre se ha evitado el contacto físico con el entorno. Sobretodo cuando se interactuaba con personas, ya que el contacto físico robot-humano puede resultar dañino en muchos casos. Por lo tanto, los contactos se consideraban colisiones no deseadas, en otras palabras, el robot se para al detectar un contacto. La parada en un entorno industrial, siempre resulta en una pérdida de beneficios, puesto que las tareas de manipulación necesitan continuidad en el proceso. Sin embargo, la tendencia del desarrollo de la robótica es promover las interacciones de los robots con el entorno, como en el campo de la robótica móvil, y el desarrollo de los sistemas de percepción y visión por computador. Por ello, actualmente existen numerosas ramas de investigación acerca de este tema, dividiéndose en dos líneas. La primera de ellas enfocada en el hardware, diseñando sistemas flexibles o blandos, haciendo que las colisiones no generen daños físicos a los humanos. Aquí un artículo a cerca de la robótica blanda [1]. Y la segunda, basándose en el software, desarrollando sistemas de control adaptativos, permitiendo a los manipuladores tradicionales adaptarse a las colisiones con el entorno. Sobre esta última rama se centra este proyecto, se han logrado numerosos avances, siendo en su mayoría estudios para manipuladores de cadena abierta o manipuladores móviles. En el campo de la robótica aérea este tema sigue siendo una incógnita, puesto que, cuando se trata de colisiones a un manipulador aéreo, puede afectar a la trayectoria del mismo ocasionando daños graves al robot. Es por ello, que este proyecto se centra en el desarrollo de un control adaptativo para un manipulador aéreo, más concretamente el desarrollo de un control de admitancia para un manipulador delta paralelo de tres grados de libertad (GdL). Este manipulador ha sido desarrollado por investigadores del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (ISA) y ha sido montado y probado en un drone de grandes dimensiones. Para el desarrollo del proyecto se afronta el diseño del controlador enfocado únicamente en el manipulador, desvinculándolo del modelo final.

1.2. Estado del arte

El origen del control adaptativo que se conoce hoy en día, comenzó a desarrollarse en las décadas de 1960 y 1970. A lo largo de este periodo se asentaron las bases del control adaptativo en manipuladores que se utiliza en la actualidad. Pese a que las técnicas de control de aquella época eran muy básicas, se establecieron dos enfoques de control: el control PID (Proportional-Integral-Derivative) y el control Basado en Modelos (MBC).

El control PID es un método de retroalimentación que ajusta el comportamiento del controlador a través de tres componentes principales. El componente proporcional (P) ajusta la salida del controlador en función de la diferencia entre el valor deseado y el valor medido. El componente integral (I) se encarga de acumular los errores a lo largo del tiempo para eliminar el error residual y estabilizar la salida en el valor de referencia. Finalmente, el componente derivativo (D) anticipa los errores futuros

basándose en la tasa de cambio del proceso, lo que ayuda a mejorar la estabilidad del sistema al reducir el sobreimpulso. Un artículo fundamental sobre los principios del control PID es el de Åström y Hägglund (2006) [2]. En la robótica, el control PID se utilizaba para gestionar tareas básicas de control de movimiento, como la posición, velocidad y fuerza del efecto final. Esto permitía mejorar la precisión y el rendimiento de los manipuladores. Un estudio representativo de esta época sobre el control PID en manipuladores es el de Masuda y cols. (1974) [3]. Aunque los controles adaptativos no eran comunes en ese entonces, se empleaban métodos como el ajuste manual de parámetros y el desarrollo de algoritmos de optimización para mejorar el desempeño del sistema. Un libro relevante que describe estas prácticas es el de Murray y cols. (2017) [4].

El Control Basado en Modelos (MBC) es una técnica que emplea un modelo matemático del sistema a controlar para diseñar y ajustar un controlador. El modelo puede ser lineal o no lineal dependiendo de la complejidad del sistema. En el campo de los manipuladores se empleaba este tipo de controladores para control de movimiento y control de fuerza. Para obtener información a cerca de este tipo de controladores se ha investigado en estos artículos [5], [6]. En este caso los controladores tampoco se definían como adaptativos en el sentido actual del concepto. En cambio, guardaban ciertas similitudes con lo que hoy en día denominamos control adaptativo. Se utilizaban técnicas de actualización del modelo, ajustes de parámetros en tiempo real o métodos de identificación del modelo.

Durante la década de 1980, el control adaptativo se comenzó a desarrollar en manipuladores de forma más extensa. En parte por la capacidad computacional de los microprocesadores, siendo posible la implementación de un control en tiempo real. Esto es crucial en robótica, puesto que se puede operar en entornos de los que no conoce el modelo, o que está en continuo cambio, además las condiciones de operación varían a lo largo del tiempo. Surgen así los MRAC o Controles Adaptativos Basados en Modelos, ajustando los parámetros del modelo en tiempo real para ajustarse al comportamiento del sistema, siendo los sucesores del mencionado MBC. Se empleaban en el control de trayectorias para manipuladores, puesto que cuando el manipulador sigue una trayectoria determinada, se deben ajustar los ángulos de las distintas articulaciones en tiempo real. En esta misma década se desarrolla el control adaptativo Directo e Indirecto, el control adaptativo directo ajusta los parámetros del controlador en función de los datos que se observan, mientras que el control adaptativo indirecto necesita identificar el modelo del sistema, y una vez identificado varía los parámetros en función del mismo. Un artículo acerca del control adaptativo directo [7]. Asimismo, apareció el control adaptativo basado en Regresión y Estimación en Línea, cuya aparición se basó en los avances en algoritmos de regresión como el filtro de Kalman o el método de mínimos cuadrados. Un libro que muestra en profundidad este tipo de control, mediante el uso del filtrado [8].

En esta misma década se introdujo el control de admitancia y el control de impedancia en el ámbito de la robótica. En 1985, Neville Hogan sentó las bases para el control de impedancia con su artículo pionero [9]. Este tipo de control se basa en modelar al manipulador como un sistema compuesto por masas, resortes y amortiguadores. La idea es que el manipulador pueda responder de manera flexible

a las fuerzas externas, como si fuera un sistema mecánico adaptable, lo cual es crucial para tareas como el ensamblaje en entornos no controlados. Paralelamente, el control de admitancia también se desarrolló, pero con un enfoque opuesto: ajustando la posición del manipulador en respuesta a las fuerzas externas aplicadas. El avance en sensores de fuerza y torque que medían las fuerzas en tiempo real permitió implementar estos conceptos en sistemas reales. Los primeros manipuladores que usaron este tipo de control se emplearon para manejar materiales frágiles o con resistencia significativa. El sistema ajustaba la posición del efecto final en función de las fuerzas detectadas, facilitando la manipulación en entornos dinámicos.

En los años 90, la implementación del control de admitancia en manipuladores industriales se volvió más común. Por ejemplo, el libro de Glosser y Newman (1994) [10] detalla cómo se integró el control de admitancia en un manipulador industrial, comparándolo con otros enfoques y destacando sus ventajas. A finales de la década, el artículo de Caccavale y Siciliano (1999) [11] abordó la implementación de un control de impedancia en manipuladores con seis grados de libertad, mejorando la adaptabilidad a fuerzas externas. Con el avance de los controles de admitancia en la industria, surgió el interés por aplicarlos en el ámbito médico, especialmente en rehabilitación. Un artículo clave en este campo es el de Krebs y Hogan (1998) [12], que introdujo un control de admitancia para exoesqueletos. Este control no solo asistía de manera pasiva, sino que también ajustaba los parámetros del controlador en función de la recuperación progresiva del paciente. Posteriormente, se desarrolló el exoesqueleto Lokomat, diseñado para ayudar a pacientes con problemas de marcha, ajustando automáticamente la respuesta a los esfuerzos del paciente. El libro de Jezernik (1999) [13] ofrece una visión detallada de cómo se aplicó este control en el Lokomat y los resultados obtenidos. En la década de los 2000, el hilo de la investigación se centró en descubrir cómo implementar un control de admitancia con detecciones de colisiones sin sensores adicionales y estrategias de control híbrido. Un trabajo que supuso un avance en este campo fue el libro publicado por De Luca y Mattone en 2005 [14]. Propusieron un enfoque innovador de detecciones de colisiones mediante la observación de las dinámicas internas del manipulador. Por otro lado se mejoró en los algoritmos de control de admitancia para adaptar la rigidez y la dinámica del robot en tiempo real. Este enfoque, diseñado para entornos industriales, empleaba información sensorial para modificar la rigidez y la amortiguación [15]. A finales de la década Albu-Schäffer(2007) [16] exploró el control de admitancia en robots cooperativos para realizar tareas compartidas con humanos. Su propuesta introdujo un control pasivo unificado que abarcaba tres aspectos fundamentales del control robótico: posición, torque e impedancia.

En los primeros años de la década de 2010, la investigación se centró en la mejora de la interacción humano-robot (HRI, Human-Robot Interaction). El control de admitancia se convirtió en una herramienta crucial para lograr una interacción segura y eficiente entre los robots y su entorno. Un ejemplo destacado es el artículo de Ott y Stramigioli (2010) [17], que propuso técnicas de control de impedancia y admitancia para robots de servicio, asegurando un desempeño seguro y estable al interactuar con humanos.

Hacia mediados de la década, se comenzó a integrar inteligencia artificial y aprendizaje automático en los sistemas de control de admitancia. Esto permitió una mayor adaptabilidad y personalización en aplicaciones como la rehabilitación y la asistencia. Por ejemplo, un artículo de Abusahab I. A. y Cheng (2017) [18] demostró cómo los algoritmos de aprendizaje profundo podían ajustar dinámicamente los parámetros del control de admitancia en exoesqueletos, optimizando la asistencia según las necesidades específicas de los usuarios.

Además, se desarrollaron estrategias de control híbrido que combinaban control de posición y fuerza para mejorar el desempeño en tareas de manipulación complejas. El trabajo de Albu-Schäffer et al. (2013) [19] introdujo conceptos de robótica blanda "para adaptar la rigidez de los manipuladores en tiempo real, aumentando la seguridad y eficacia en la interacción con humanos y objetos frágiles. Actualmente, la investigación ha expandido el enfoque hacia nuevas áreas como la robótica colaborativa, la medicina y la exploración espacial. En estos contextos, el control de admitancia continúa siendo esencial en aplicaciones donde la adaptabilidad y la seguridad son cruciales. Un estudio relevante de Li y Hongbing (2022) trata sobre el desarrollo de un sistema robótico para realizar punciones lumbares, utilizando un control de admitancia que mejora la precisión y seguridad del procedimiento, colaborando con el cirujano para minimizar riesgos. [20].

En el ámbito de la rehabilitación, el control de admitancia ha avanzado con la integración de sensores avanzados y tecnologías de realidad aumentada, facilitando una interacción más natural y efectiva. Un artículo reciente de Topini y Alberto (2022) mtrata sobre el desarrollo de un exoesqueleto de mano con control de admitancia variable. Este exoesqueleto está diseñado para tareas de rehabilitación basadas en realidad virtual, permitiendo ajustar el nivel de asistencia según las necesidades del usuario. El control de admitancia variable mejora la interacción y adaptabilidad del dispositivo durante las sesiones de rehabilitación, ayudando a los pacientes a recuperar movilidad de manera más eficiente. [21].

La robótica aérea ha integrado el control de admitancia para potenciar la capacidad de los drones en tareas de manipulación. En este contexto, el control de admitancia en manipuladores aéreos se ha convertido en un área de creciente interés debido a su habilidad para ajustar dinámicamente la posición y la fuerza en respuesta a las fuerzas externas, lo cual asegura una operación segura y eficiente en entornos complejos y variables. Un estudio reciente de Suarez et al. (2022) presenta un sistema de control de admitancia en drones que facilita la manipulación de objetos en entornos dinámicos, ajustando la posición y fuerza en tiempo real para garantizar una operación segura y efectiva [22]. Este trabajo destaca cómo el control de admitancia puede ser esencial para abordar los desafíos únicos de la manipulación aérea. En adición, Gu, Wang, y Liu (2019) exploran la integración del control de admitancia en manipuladores aéreos para la manipulación de objetos en entornos no estructurados, ofreciendo una solución para mejorar la precisión y la seguridad durante la operación [23]. Este estudio es relevante para entender la adaptabilidad del control de admitancia a diversas condiciones ambientales y operativas en la robótica aérea. Feng y Liu (2018) presentan un enfoque de control de admitancia para un cuadricóptero con un brazo robótico, resaltando la capacidad del

sistema para ajustar su comportamiento en función de las fuerzas aplicadas durante la manipulación aérea [24]. Este trabajo subraya la importancia de la adaptabilidad en los sistemas de manipulación aérea y proporciona una visión práctica de la implementación del control de admitancia. Zhang, Zhang, y Wu (2021) investigan estrategias de control híbridas que combinan el control de admitancia con la detección de fuerzas en manipuladores aéreos, enfocándose en cómo estas técnicas pueden mejorar la precisión en la manipulación de objetos [25]. Su enfoque híbrido ofrece una perspectiva avanzada sobre la combinación de métodos de control para optimizar el rendimiento de los manipuladores aéreos. Beyeler y Floreano (2016) abordan el modelado dinámico y el control de un manipulador aéreo para tareas de manipulación precisa, incluyendo la implementación del control de admitancia para mejorar la capacidad de respuesta del sistema [26]. Este estudio es fundamental para entender cómo el control de admitancia puede ser integrado en manipuladores aéreos para mejorar su rendimiento en tareas delicadas. Kim y Choi (2020) presentan un análisis detallado del control adaptativo de admitancia para manipuladores aéreos, discutiendo tanto la teoría como la implementación práctica de estas técnicas en plataformas de drones [27]. Este trabajo es especialmente relevante para el proyecto, ya que se enfoca en la aplicación práctica del control adaptativo de admitancia en manipuladores aéreos, proporcionando una base sólida para el desarrollo y futuras investigaciones en esta área.

1.3. Objetivos y contribución

La finalidad del proyecto es mejorar la capacidad de interacción física de un manipulador aéreo. Para ello se plantea:

- **Desarrollar un control adaptativo para el efecto final de un manipulador delta paralelo de 3 GdL**

Para alcanzar este propósito, se definen los siguientes objetivos:

- **Diseñar, fabricar y calibrar un sensor de fuerza de 3GdL:** Se emplea un programa de modelado CAD para diseñar el sensor de fuerza de 3 grados de libertad; posteriormente, se utiliza una impresora 3D para su fabricación. Una vez ensamblado, se lleva a cabo la calibración del sensor mediante un manipulador industrial, asegurando así su correcto funcionamiento y precisión en las lecturas.
- **Elaborar un diagrama de comunicación en tiempo real:** Se debe diseñar un esquema que incluya nodos y topics, asignando un nodo para el sensor de fuerzas y otro para el control de admitancia desarrollado, así como la comunicación con el nodo del manipulador delta
- **Implementar el sensor de fuerza en el framework del manipulador:** Se lleva a cabo la instalación física del sensor en el efecto final del manipulador y se establece la comunicación

mediante rosserial, asegurando que el sensor se integre adecuadamente en el framework del manipulador.

- **Realizar simulaciones y experimentos que verifiquen el funcionamiento del modelo:** Para conseguir este objetivo, se realizan simulaciones para el modelo en un solo grado de libertad y, posteriormente, se implementa en el manipulador para realizar experimentos reales que permitan comprobar que el controlador puede variar sus parámetros en tiempo real y visualizar la respuesta.

1.4. Estructura de la memoria

En el capítulo 2 se presenta la teoría sobre los controles adaptativos y sensores de fuerza, comenzando con el trabajo previo realizado y sentando así las bases teóricas del proyecto. En el capítulo 3 se describe gran parte del proceso de desarrollo, siendo el capítulo más extenso del proyecto. Se muestra un esquema general del proyecto, con las mejoras desarrolladas, seguido de la descripción del control adaptativo diseñado, y se concluye con la descripción de hardware y el software desarrollado. Más tarde, en el capítulo 4, se valida el controlador mediante simulaciones para un grado de libertad y se realizan experimentos reales con el manipulador delta. Con el fin de comprobar la variación de la admitancia en tiempo real. Finalizando con el capítulo 5, donde se indica si se han cumplido los objetivos propuestos y se presentan futuras mejoras del proyecto. Para concluir la memoria, se expone la bibliografía empleada como referencia.

Contexto y Marco Teórico

Contenido

2.1.	Contexto del proyecto	10
2.2.	Control adaptable o Compliant motion control	11
2.2.1.	Control de impedancia	11
2.2.2.	Control de admitancia	12
2.3.	Células de carga	14
2.3.1.	Galgas extensiométricas	14
2.3.2.	Funcionamiento de una célula de carga	15

El presente capítulo comienza con la descripción detallada del trabajo previo realizado, para contextualizar el proyecto. En primer lugar, se aborda la dinámica del sistema a controlar, detallando las ecuaciones fundamentales que describen su comportamiento. A continuación, se exploran diferentes enfoques de control adaptativo, evaluando sus ventajas y limitaciones, lo que lleva a la selección del método de control más adecuado para su implementación. Para concluir, se describen los principios teóricos esenciales para la utilización de células de carga en sensores de fuerza, considerando aspectos como la linealidad, la sensibilidad y la calibración, factores críticos en la precisión de la medición de fuerzas en el sistema.

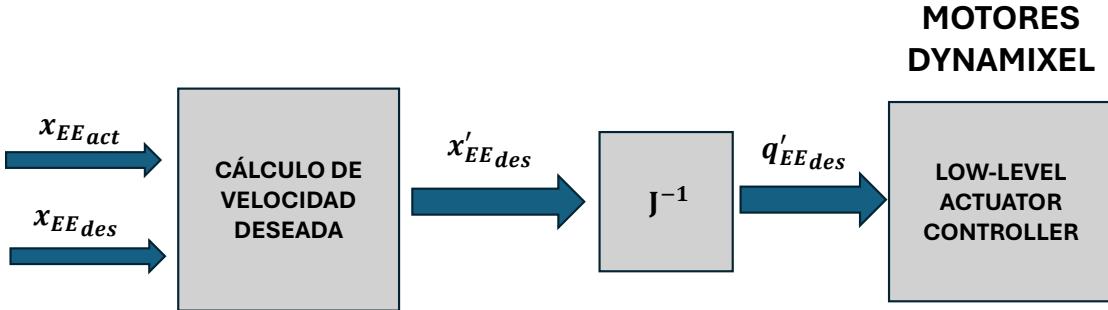


Figura 2.1: Controlador previo al proyecto.

2.1. Contexto del proyecto

En esta sección se describe el punto de partida de este proyecto. Cabe recalcar, que al inicio de este proyecto ya se encontró con un modelo CAD de un manipulador delta de tres grados de libertad diseñado e impreso por los investigadores del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (ISA) de la Universidad de Málaga ???. En consecuencia, el enfoque del proyecto no se ha centrado en ningún momento en el diseño del manipulador, sino en el control del efecto final del mismo. Además, el manipulador se encontraba unido a un soporte para alojarse un drone de grandes dimensiones.

En el caso del control para efecto final del manipulador delta, este implementa un control de velocidad cartesiano en bucle abierto diseñado por el departamento.

Se instalaron previamente tres motores Dynamixel, uno para cada una de las articulaciones del manipulador. Por lo tanto, dichos motores son los encargados de controlar la velocidad del efecto final o, en otras palabras, de conseguir el desplazamiento deseado en el efecto final. Puesto que los motores están programados para funcionar recibiendo como entrada una velocidad angular q_{EE} , emplean J^{-1} para convertir velocidades cartesianas en angulares, por medio de la ecuación 2.1:

$$(2.1) \quad \dot{q}_{EE} = J^{-1} \cdot \dot{x}_{EE}$$

De esta forma, la velocidad angular deseada se comanda a los motores, los cuales cuentan con un controlador de actuadores de bajo nivel (Low-Level-Actuator Controller) (figura 2.2). Más tarde, se emplea un control en bucle cerrado con un controlador PI para ajustar y regular la velocidad de cada motor individualmente.

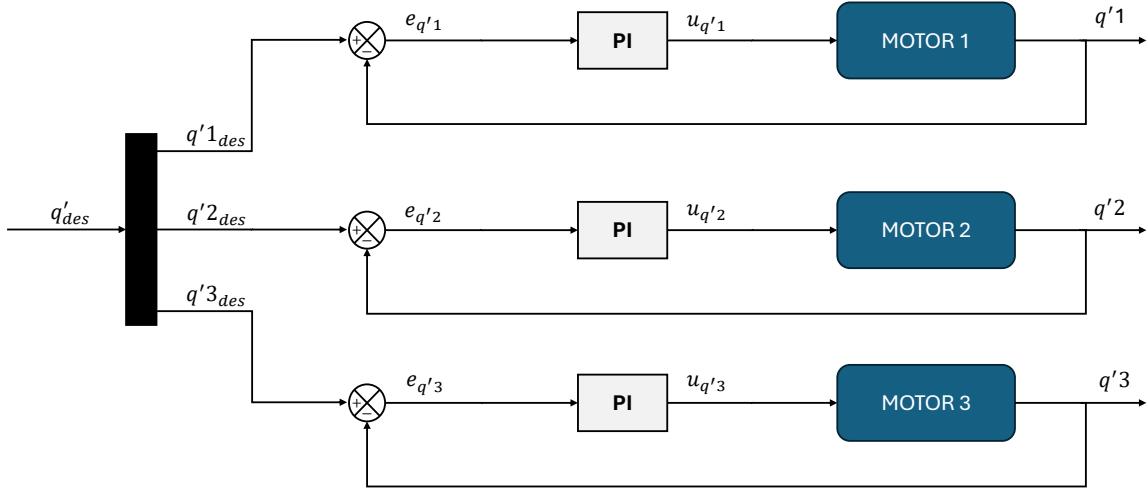


Figura 2.2: Controlador de actuadores de bajo nivel implementado en los motores Dynamixel.

2.2. Control adaptable o Compliant motion control

2.2.1. Control de impedancia

El control de impedancia es una técnica de control que se basa en controlar la fuerza de manera indirecta que ejerce el robot al estar en contacto con su entorno. Utilizando la regulación de la impedancia mecánica o relación entre la fuerza aplicada por el robot y su desplazamiento, como medio de control. Este tipo de controles se plantean normalmente para el espacio de tarea del manipulador (Task Space). De manera que durante la trayectoria del manipulador, este deja de comportarse de forma rígida, y comienza a asemejarse a un modelo mecánico de masa-muelle-amortiguador (figura 2.3).

La ecuación diferencial que define la dinámica del sistema masa-muelle-amortiguador se rige por la ecuación 2.2.

$$(2.2) \quad M \cdot \ddot{x} + B \cdot \dot{x} + K \cdot x = F$$

Obteniendo por lo tanto, mediante la transformada de Laplace, la función de transferencia asociada al modelo de control de impedancia. (ecuación 2.3)

$$(2.3) \quad \frac{F(s)}{X(s)} = M_i s^2 + B_i s + K_i$$

Tanto la ecuación 2.2 como la ecuación 2.3 corresponden al modelo simplificado de 1 grado de libertad, sin embargo estas ecuaciones se pueden extrapolar a N grados de libertad.

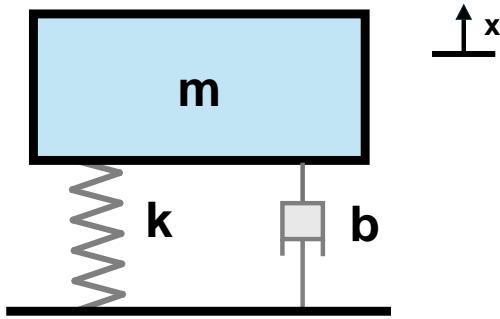


Figura 2.3: Esquema de un modelo masa-muelle-amortiguador.

Como entrada del sistema se plantea una posición deseada, la cuál el manipulador debe seguir, planificando una trayectoria. Mientras que, en el caso de la salida, esta se define como la fuerza que aplica el manipulador para mantener dicha trayectoria, frente a fuerzas exteriores que se aplican sobre el efecto final o articulaciones del mismo. Por lo tanto, una variación de la impedancia consigue variar el comportamiento del manipulador frente a perturbaciones externas. Se plantea la fuerza aplicada por el manipulador de esta forma: $F(s) = Z(s)X(s)$. Por consiguiente, una impedancia mayor provoca una mayor resistencia a ser desplazado de su trayectoria. Puede ser muy útil para trabajos de precisión. En cambio, si lo que se busca es una mayor elasticidad o flexibilidad frente a cambios en la trayectoria programada, se utilizará una impedancia menor.

Existe una analogía entre la impedancia mecánica y la impedancia eléctrica, puesto que ambas se centran en la oposición que presenta el sistema frente a una fuerza o señal eléctrica, respectivamente. Los términos de masa (M), amortiguador (B) y muelle (K), se corresponden con los términos de inductancia (L), resistencia (R) y capacitancia (C) en el circuito RLC análogo 2.4. El amortiguador en un sistema mecánico es el encargado de disipar la energía, se comporta de forma análoga a la resistencia de un circuito eléctrico, que disipa energía en forma de calor. Por otro lado, el resorte, acumula energía potencial y ofrece resistencia al movimiento, sería comparable con el condensador, que almacena energía eléctrica y se opone a la variación del voltaje.

La ecuación que describe la relación entre el voltaje de entrada V_{in} y la corriente i es:

$$(2.4) \quad V = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt$$

La impedancia eléctrica se define como:

$$(2.5) \quad Z_e(s) = Ls + R + \frac{1}{Cs}$$

2.2.2. Control de admitancia

El control de admitancia es una estrategia de control que se basa en la interacción física entre el robot y el entorno, derivado del control de impedancia. Siendo la admitancia la inversa de la

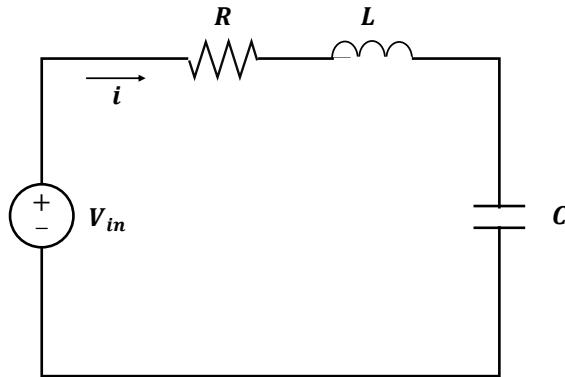


Figura 2.4: Esquema general de un circuito RLC

impedancia, y se define como $Z^{-1}(s) = \frac{X(s)}{F(s)}$. Se centra en regular la admitancia del manipulador, con otras palabras, regula la facilidad con la que el manipulador se mueve en respuesta a las fuerzas externas. Este tipo de controladores no necesitan conocer el modelo del sistema, ya que impone una dinámica. Tomando como referencia un manipulador de un grado de libertad, donde una masa interactúa con el entorno, se obtiene la ecuación del movimiento de la masa. (ecuación 2.6)

$$(2.6) \quad m \cdot \ddot{x} = F + F_{ext}$$

Por lo tanto, el objetivo es diseñar un control de fuerza que establezca una relación entre las fuerzas externas F_{ext} y las variaciones en la posición, respecto a un instante inicial $x = x_d - x_o$. Asimismo, se simplifica el modelo en un sistema de segundo orden masa-muelle-amortiguador, donde la masa, el coeficiente de amortiguamiento y la constante del muelle sean valores que varíen en función de la necesidad del control. (ecuación 2.2)

La admitancia se basa en la definición de impedancia, cuya función de transferencia busca mantener la relación Fuerza-Posición o Fuerza-Velocidad, descrito en la ecuación 2.3. En cambio, la definición de admitancia busca mantener la relación Velocidad-Fuerza (ecuación 2.7), teniendo como entrada las Fuerzas externas aplicadas sobre el manipulador, y como salida la velocidad deseada del efecto final. Resumiendo, se aplica la transformada de Laplace para obtener al expresión del controlador, que se rige por la ecuación 2.8.

$$(2.7) \quad Y(s) = Z(s)^{-1} = \frac{\dot{X}(s)}{F_{ext}}$$

$$(2.8) \quad \frac{\dot{X}(s)}{F(s)} = M_a \cdot s + B_a + \frac{K_a}{s}$$

Basándose en lo anterior, surge la pregunta: ¿Cuál sería la mejor opción a la hora de diseñar un control de admitancia, una alta admitancia o una baja admitancia? Una admitancia baja requeriría

fuerzas más significativas en el efecto final para lograr el mismo movimiento en comparación con una admitancia alta. Pese a ello, una baja admitancia presenta una serie de ventajas. Por ejemplo, el aumento de la estabilidad del manipulador y la reducción de la vibración. Estos atributos son esenciales para tareas que requieran una alta precisión posicional o que se realicen en entornos con altas vibraciones. Además, representa una gran ventaja cuando se busca realizar tareas donde es necesario mantener una fuerza constante en el tiempo. Por el contrario, una alta admitancia supone menor esfuerzo para desplazar el manipulador, consiguiendo una mejor adaptabilidad al entorno y a los objetos que se manipulan. Se obtiene, por lo tanto, una mayor velocidad de desplazamiento, lo que ahorrará tiempo y dinero en el contexto de la automatización. En la sección 4.2, se podrá observar la diferencia en el comportamiento del sistema para distintos valores de admitancia.

2.3. Células de carga

2.3.1. Galgas extensiométricas

Para desarrollar un sensor de fuerza como el descrito en este proyecto, se deben emplear células de carga, las cuales basan su funcionamiento en galgas extensiométricas. Una galga extensiométrica actúa como un sensor, puesto que es capaz de medir microdeformaciones ($\mu\epsilon$) mediante variaciones en su resistencia. Dicha resistencia depende de las propiedades elásticas del cable que forma la galga. Cuando el cable se estira, su longitud aumenta, y su sección trasversal disminuye, lo que provoca un aumento en su resistencia. En el caso de comprimirse, ocurriría lo contrario.

La relación entre el cambio de longitud del cable y la longitud original se denomina deformación mecánica:

$$(2.9) \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Una vez obtenida la deformación mecánica, se busca la manera de relacionar la variación de la resistencia en la galga, con la deformación del cable grabado, que ha sido calculada. Es estrictamente necesario que la carga aplicada sobre la galga se encuentre en los límites elásticos del material. Puesto que si se encuentra fuera de este rango, la galga no tendría un comportamiento elástico. Esta relación se denomina factor de galga G:

$$(2.10) \quad G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\epsilon}$$

Esta expresión es clave en la utilización de galgas extensiométricas para el desarrollo de sensores de fuerza. La carga aplicada sobre el sensor genera una deformación que, a su vez, produce una alteración de la resistencia de la misma. Por lo tanto, la caída de tensión en la galga varía dependiendo de la carga aplicada sobre ella.

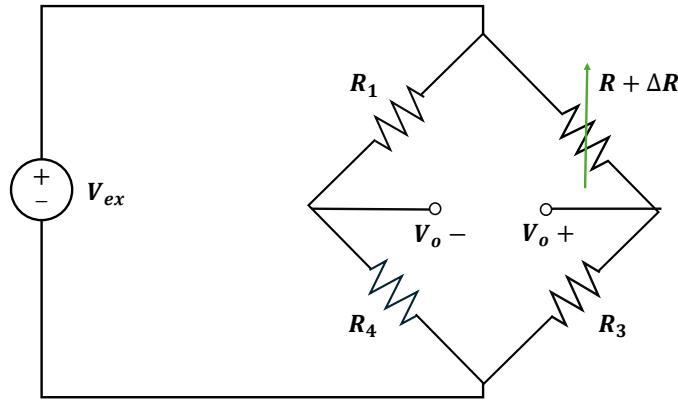


Figura 2.5: Circuito de un puente de Wheatstone simple.

2.3.2. Funcionamiento de una célula de carga

Como ya se ha comentado en el apartado anterior (sección 2.3), las galgas tienen límites de carga, por lo que no se puede exceder el valor donde el cable ya no regresa a su longitud inicial L . Para la mayoría de los metales este límite es muy pequeño, y el factor de galga está alrededor del orden de 2. Asimismo, la variación en la resistencia sería imperceptible para cualquier medidor, incluso caería dentro del error porcentual del mismo. Por lo tanto, para medir con precisión la variación en la resistencia, una célula de carga utiliza un circuito simple conocido como puente de Wheatstone (figura 2.5) [28]. El puente de Wheatstone se alimenta con una tensión de entrada V_{ex} , y se colocan 4 resistencias con la distribución que se aprecia en la Figura 2.5. En el caso de la resistencia asociada a la galga, su valor viene dado por la expresión $R+\Delta R$, teniendo R_1 , R_2 , R_3 y R el mismo valor. En primer lugar, si no se aplica ninguna carga sobre la galga, la diferencia de resistencia ΔR será igual a 0. Por lo tanto, el voltaje medido sobre los nodos V_{o-} y V_{o+} es equivalente, en otras palabras, la salida del sistema será una tensión de 0V.

¿Qué ocurriría entonces si se aplicara una carga al sistema? Puesto que dicha carga produce una deformación sobre la galga, esta aumentaría o disminuiría el valor de la resistencia asociada a ella. En base a la ley de Ohm, donde la tensión es equivalente a $V=I \cdot R$, despejando al intensidad se obtiene que $I=\frac{V}{R}$. Una vez despejada, se calcula la tensión en cada uno de los nodos de salida.

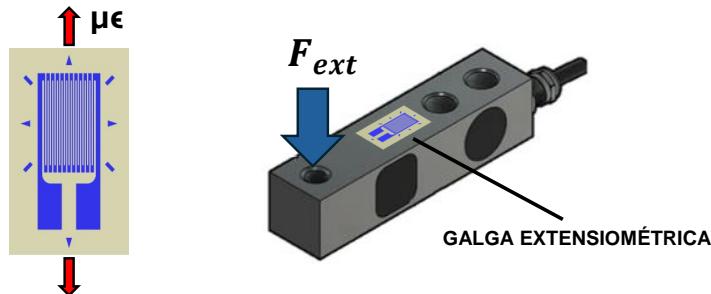
La intensidad en el nodo de la izquierda es igual a $\frac{V_{ex}}{(R_1+R_2)}$, sustituyendo en la ecuación de la ley de ohm para la tensión, se obtiene: (ecuación 2.11)

$$(2.11) \quad V_{o-} = V_{ex} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

De forma similar se calcula la tensión a la salida del nodo derecho. (ecuación 2.12)

$$(2.12) \quad V_{o+} = V_{ex} \cdot \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_3}$$

TRABAJA A TRACCIÓN:



TRABAJA A COMPRESIÓN:

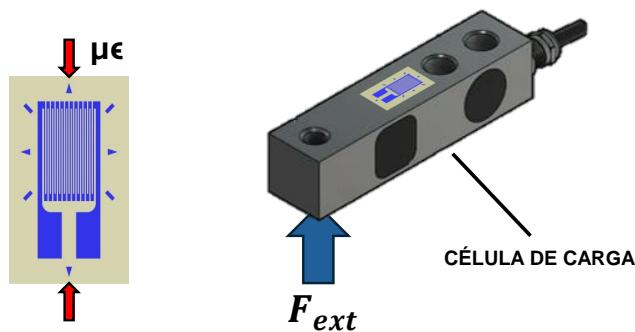


Figura 2.6: Diagrama de funcionamiento de una célula de carga tipo viga.

Por tanto, la salida del sistema será la diferencia entre ambos. (ecuación 2.13)

$$(2.13) \quad V_o = V_{o+} - V_{o-}$$

Existen muchos tipos de células de carga dependiendo de sus aplicaciones específicas y las condiciones a las que se someten. Algunos de los tipos más comunes son las células de compresión, de tensión, tipo S, de tracción, de flexión, de anillo, entre otras. Cada una tiene su propio principio de funcionamiento y diseño estructural, la elección de una u otra dependerá de factores como la capacidad máxima de carga, el entorno de operación o la precisión necesaria.

En este proyecto se han seleccionado células de carga de tipo viga o único punto. Este tipo de células ha sido diseñadas para medir la carga a lo largo de un eje específico. La disposición estructural de estas células se asemeja al de una viga, de ahí su nombre. Un extremo de la célula se fija de forma permanente, mientras que en el otro extremo se aplica la carga. Esta configuración permite medir tanto fuerzas negativas como positivas, es decir, tanto a tracción como a compresión. Como se puede ver en la figura 2.6, aplicando una carga en el eje vertical, se puede producir una deformación a

tracción o a compresión en la galga colocada. Esta deformación, como ya se ha descrito, provoca una variación en la resistencia asociada a la misma.

Metodología

Contenido

3.1.	Esquema de control general del proyecto	20
3.2.	Control de admitancia adaptativo	20
3.3.	Componentes de hardware	23
3.3.1.	Manipulador delta	23
3.3.2.	Sensor de fuerza	23
3.4.	Descripción de software	32
3.4.1.	Comunicación vía ROS	32
3.4.2.	Nodo del sensor de fuerza	32
3.4.3.	Nodo para la tara del sensor	34
3.4.4.	Nodo del control de admitancia	34

En este capítulo se describe desarrollo de cada una de las partes del proyecto. Partiendo de una base previamente implementada por el departamento ISA de la Universidad de Málaga, se detalla el desarrollo de software realizado en el proyecto y el hardware empleado. Enfocándose fundamentalmente en el control de admitancia adaptativo y en el sensor de fuerza diseñado.

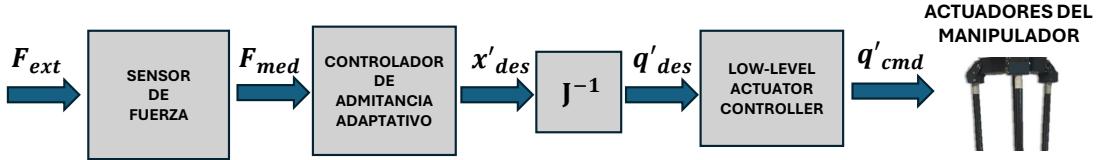


Figura 3.1: Esquema de control general del proyecto.

3.1. Esquema de control general del proyecto

Se ha desarrollado un controlador de admitancia adaptativo, el cuál recibe las fuerzas cartesianas medidas en el efecto final mediante un sensor de fuerza y las convierte en una velocidad deseada del efecto final. Esta velocidad cartesiana se comanda al conjunto de motores Dynamixel. El esquema general del proyecto se describe en la figura 3.1.

En este esquema se puede ver de forma muy general el funcionamiento del controlador que se quiere implementar (figura 3.2). Como se puede observar, las fuerzas cartesianas que se ejerzan sobre el efecto final dan lugar a una velocidad lineal en la misma dirección pero con menor módulo, dependiendo de los parámetros del controlador.

3.2. Control de admitancia adaptativo

El diseño del controlador se ha realizado específicamente para un manipulador de seis grados de libertad, anticipando que este proyecto pueda ser extrapolado a un sistema similar en el futuro. Pese a ello, este controlador también puede ser utilizado en manipuladores de tres grados de libertad, lo que lo hace versátil y aplicable en una variedad de configuraciones.

La función que define un control de admitancia para un manipulador de un grado de libertad es la siguiente 2.8. Una vez obtenida la expresión general del control de admitancia, aparece un nuevo reto, implementar este modelo en el controlador para un manipulador delta paralelo. Teniendo en cuenta las fuerzas aplicadas en el efecto final, F_{EEext} , ser capaz de calcular una velocidad deseada x'_{EEdes} . En este proyecto se realizará un control de manera específica en el efecto final del manipulador, se tendrán en cuenta fuerzas y pares aplicados sobre él. La salida de control será la velocidad cartesiana deseada para cada eje que, mediante el jacobiano inverso (J^{-1}) se relaciona con las velocidades angulares en cada uno de los tres motores. Estos motores tendrán implementado un control PI en bucle cerrado, que controla la velocidad angular de los mismos. Asimismo, para

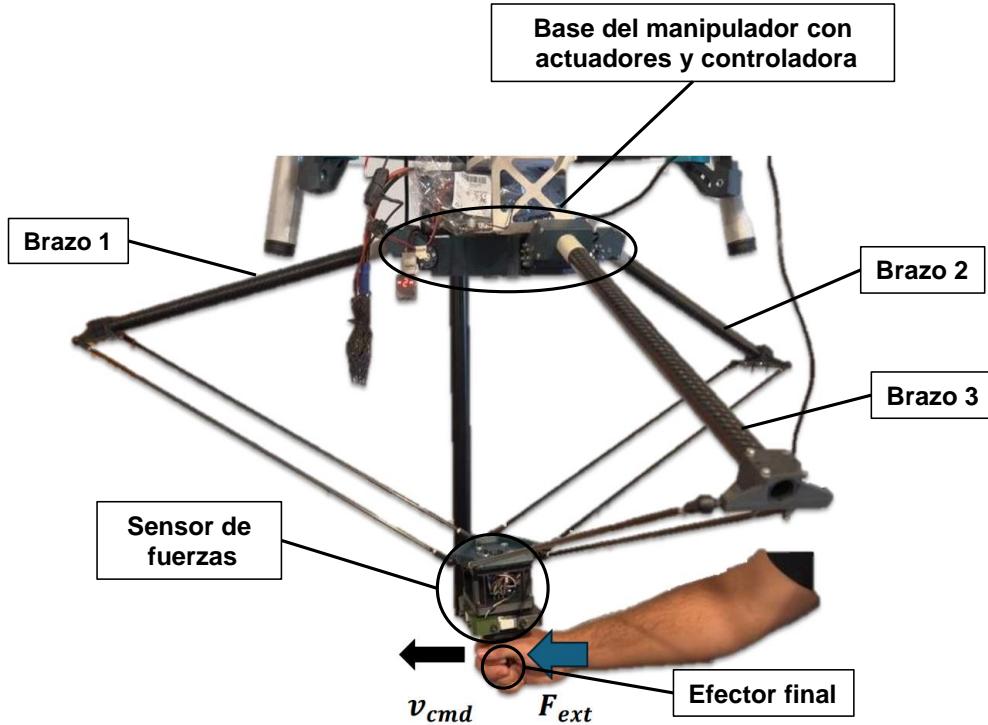


Figura 3.2: Esquema real del funcionamiento del control desarrollado

obtener dicha velocidad se necesita primero presentar las matrices que conforman el modelo del controlador.

La matriz de esfuerzos $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^6$ que contiene las fuerzas y pares ejercidos en el efecto final.

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} F_{EEx} \\ F_{EEy} \\ F_{EEz} \\ \tau_{EEx} \\ \tau_{EEy} \\ \tau_{EEz} \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{EE} \\ \boldsymbol{\tau}_{EE.} \end{bmatrix}$$

Siguiendo por las matrices de posición, velocidad y aceleración del sistema, las cuales serán también de dimensión $\mathbb{R}^{6 \times 6}$. Matriz de posición del efecto final: $X_{EE} = [x_{EEx}; x_{EEy}; x_{EEz}; q_{EEx};$

$q_{EEy} ; q_{EEz}$, matriz de velocidad del efecto final: $\dot{X}_{EE} = [\dot{x}_{EEx} ; \dot{x}_{EEy} ; \dot{x}_{EEz} ; \dot{q}_{EEx} ; \dot{q}_{EEy} ; \dot{q}_{EEz}]$, matriz de aceleración del efecto final: $\ddot{X}_{EE} = [\ddot{x}_{EEx} ; \ddot{x}_{EEy} ; \ddot{x}_{EEz} ; \ddot{q}_{EEx} ; \ddot{q}_{EEy} ; \ddot{q}_{EEz}]$.

Para finalizar con la representación de matrices, se plantean las matrices que alojan los parámetros del controlador. Comenzando por la matriz de inercia $M_a = \text{diag}(m) \mathbb{R}^{6 \times 6}$, siguiendo por la matriz de amortiguación $B_a = \text{diag}(b) \mathbb{R}^{6 \times 6} 6 \times 6$ y terminando por la matriz de elasticidad $K_a = \text{diag}(k) \mathbb{R}^{6 \times 6} 6 \times 6$, que son las encargadas de regular la admitancia del sistema, mediante la variación de los elementos de su diagonal.

Es importante señalar que el manipulador utilizado en este proyecto tiene una orientación fija, en otras palabras, que solo presenta tres grados de libertad. Esto implica que ninguna de las matrices empleadas tiene componente de orientación. Lo que simplifica considerablemente las operaciones de control. A pesar de ello, se mantienen las dimensiones originales de las matrices, en este caso, se añaden ceros en lugar de los valores correspondientes a la orientación del efecto final. En cuanto a la solución del problema de control de admitancia, se selecciona la técnica más común, la cual establece la constante del muelle $K = 0$. Permitiendo anular el vector de posición, eliminando la necesidad de calcular la posición deseada del efecto final.

Asimismo, se comienza con la obtención de la aceleración en el efecto final. Para los siguientes pasos se vuelve al modelo simplificado de un grado de libertad, puesto que se ve mucho más claro el proceso de obtención de la velocidad deseada.

Primero se despeja la aceleración de la ecuación 2.2.

$$(3.1) \quad \ddot{x} = \frac{F - b_a \cdot \dot{x} - k_a \cdot x}{m_a}$$

Una vez despejada la aceleración, se integra la función, obteniendo así el valor de la velocidad deseada. Los valores de velocidad y posición introducidos en la integral son los valores actuales del sistema. Estos valores se actualizan continuamente en cada iteración.

$$(3.2) \quad \dot{x}_{des} = \int \frac{F - b_a \cdot \dot{x}_{act} - k_a \cdot x_{act}}{m_a} dt$$

Se emplea como tiempo de integración un valor de 0.01 segundos, con el que poder conseguir una respuesta realista y una alta frecuencia de publicación. Para simplificar el sistema, se anula la matriz asociada al muelle K_a . El algoritmo que implemento para lograrlo es el siguiente:

$$(3.3) \quad \dot{x}_{des} = \int \frac{F - b_a \cdot \dot{x}_{act}}{m_a} dt$$

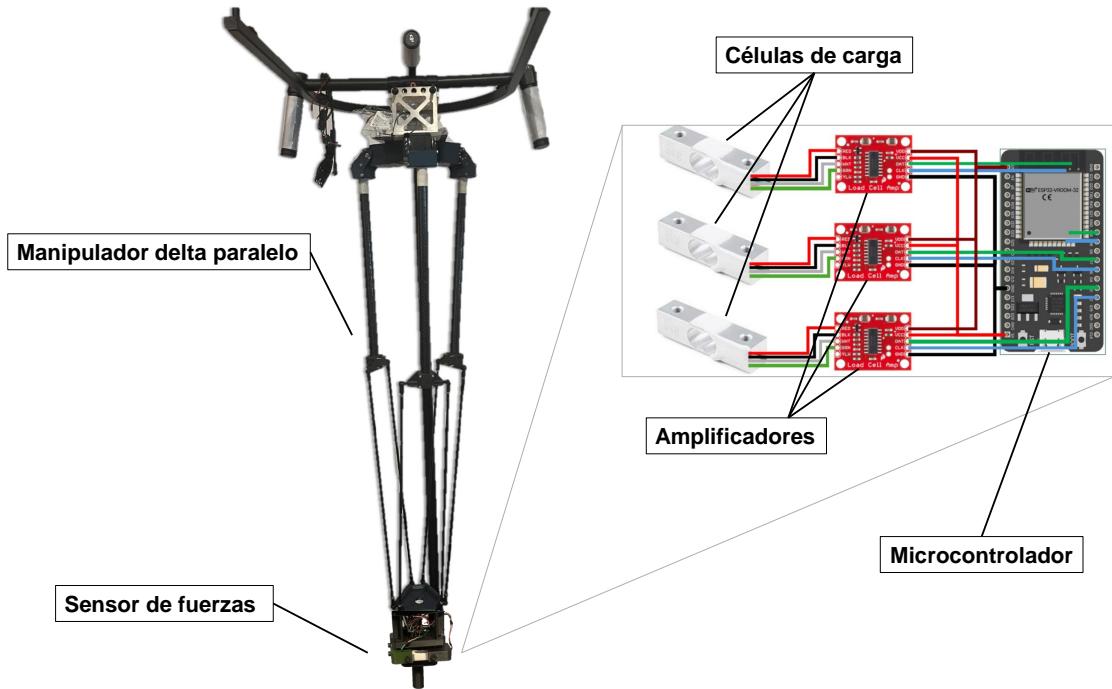


Figura 3.3: Diagrama de arquitectura de hardware.

3.3. Componentes de hardware

3.3.1. Manipulador delta

Brazo delta paralelo de tres grados de libertad diseñado y construido por un grupo de investigadores del departamento de Ingeniería de Sistemas de Automática en la Universidad de Málaga (figura 3.3). Este manipulador se ha construido con una estructura de fibra de carbono, haciéndolo extremadamente ligero para tareas de rescate. El peso de la estructura es de unos 2.2 kg, pudiendo soportar una carga de hasta 3.5 kg. La velocidad máxima permitida por el efecto final es de unos 4 m/s aproximadamente, en este proyecto no se alcanza ni una décima parte de este valor. Además, consta de tres motores Dynamixel MX-64AR con un peso de 135 g cada uno, dichos motores alcanzan una velocidad máxima de 78 rpm.

3.3.2. Sensor de fuerza

Para el desarrollo de este sensor de fuerza se barajaron varias alternativas, como la utilización de sensores de fuerza del departamento o la búsqueda de sensores en el mercado. Pese a ello, el diseño de un sensor de fuerza propio, mediante el uso de células de carga, era la opción más económica y desafiante. En la figura 3.6 se puede ver el modelo CAD final del sensor que se describe en esta sección.

El sensor de fuerza diseñado es capaz de medir fuerzas lineales para cada uno de los tres ejes. Puesto que el manipulador delta paralelo solo tiene tres grados de libertad, el sensor se adapta perfectamente a las necesidades de este proyecto. El objetivo principal de este sensor es el de enviar las lecturas sobre la fuerza aplicada en el efecto final al controlador de admitancia, para que este sea capaz de calcular una velocidad objetivo en el efecto final.

3.3.2.1. Microcontrolador ESP32-WROOM32

Es la placa que se utiliza para registrar y procesar las lecturas del sensor (figura 3.3)¹. Es un módulo MCU de alto rendimiento y versátil, con módulo WiFi y Bluetooth. El núcleo de este módulo se encuentra en un chip ESP32-D0WDQ6*. Hay dos núcleos de CPU que pueden controlarse individualmente, y llevar a cabo tareas en paralelo. La frecuencia de la CPU es ajustable desde 80 MHz a 240 MHz. Además como cualquier ESP32 del mercado integra una serie de periféricos como sensores táctiles, sensores de efecto Hall, interfaz para tarjetas Ethernet, SPI de alta velocidad, UART, I2C, etc.

3.3.2.2. Amplificadores HX711 Sparkfun

El dispositivo HX711 es un convertidor análogo digital (ADC) de 24 bits (figura 3.3)², ampliamente empleado en la industria para interactuar con sensores de peso, utiliza el protocolo de comunicación serial síncrono o TTL. Este protocolo, es similar a I2C y SPI, aunque más simplificado, se basa en la sincronización mediante la señal de reloj (SCK). Este dispositivo consta de una comunicación unidireccional, permitiendo transmitir los datos desde el amplificador al microcontrolador a través del pin DAT (Data), empleando la señal de reloj para lograr una correcta sincronización.

La comunicación comienza cuando el amplificador espera a que la señal de datos esté lista para enviar, manteniendo el pin DAT en “alto” mientras se realiza la conversión analógica-digital (A/D). Una vez finalizada la conversión, el pin DAT cambia a “bajo” para indicar que los datos están listos para enviarse. En ese instante, el microcontrolador empieza a generar los pulsos de reloj, uno por cada bit transmitido, hasta emitir 24 pulsos. Este proceso se repite continuamente para leer las mediciones del sensor o células de carga.

Cabe añadir que en este proyecto se emplean amplificadores HX711 Sparkfun, siendo una variable de los comúnmente empleados amplificadores HX711. Estos incluyen un pin adicional, V_{DD} , encargado de alimentar la lógica del amplificador. Pese a esta pequeña diferencia, el amplificador funciona exactamente igual que el amplificador convencional.

3.3.2.3. Células de carga

Las células de carga que se emplean en el diseño del sensor son de tipo viga (figura 3.3), por lo que su función es la de medir la carga sobre un eje. De forma que es necesario que uno de los extremos

¹Ver el [datasheet del microcontrolador ESP32-WROOM32](#)

²Ver el [datasheet del amplificador HX711](#)

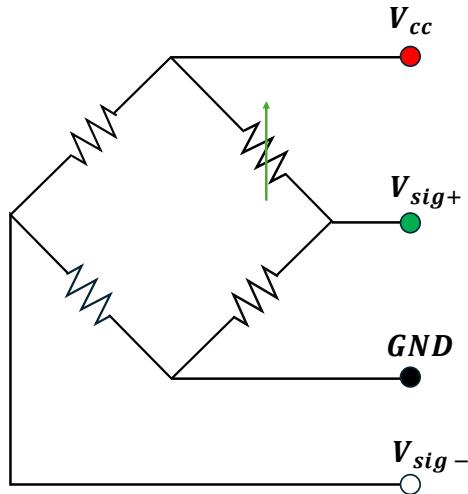


Figura 3.4: Diagrama de cableado de una célula de carga, mediante la utilización de un puente de Wheatstone simple.

de la célula se encuentre fijo, mientras que el otro extremo se somete a la carga. En particular este modelo de célula se encuentra dentro del límite elástico siempre y cuando no se le aplique un valor mayor de 5Kg³. En la sección 2.3 se describe de forma detallada el funcionamiento de las células de carga. Es preciso añadir una pequeña descripción sobre el cableado de una célula de carga (figura 3.4). Comenzando por el cable de color negro, el cuál se conecta a la toma de tierra del puente de Wheatstone. Siguiendo del cable de alimentación rojo, con un rango de alimentación de 5-10 V. Se comenta ahora la utilización de dos cables, verde y blanco, siendo los encargados de obtener la tensión en cada uno de los nodos, pudiendo así calcular la diferencia de tensión entre el nodo izquierdo y el derecho. En el nodo derecho se muestra la tensión variable debida a la galga extensiométrica. El cálculo de la diferencia de tensión en los nodos se llevará a cabo en el dispositivo HX711 conectado. Para consultar el esquema final del sensor de fuerza, donde se encuentran todos los dispositivos que lo conforman, mirar la sección 3.3.2.4.

3.3.2.4. Esquema de conexiones del sensor de fuerza

Para conectar cada uno de los dispositivos que conforman el sensor de fuerza, se debe seguir un esquema de conexión (figura 3.3.2.4). Se emplean 3 células de carga y 3 amplificadores de señal HX711, conectadas a un microcontrolador ESP32. La conexión entre la célula de carga y el amplificador es sencilla, simplemente se deben conectar los cables rojo, negro, blanco y verde a las 4 primeras entradas del amplificador (figura 3.4). La siguiente parte del proceso es la conexión entre el amplificador y el micro. Es importante conocer que el micro dispone de dos salidas de tensión, una para 3.3V y otra de 5V. En este caso se emplean ambas salidas, la salida de 3.3V se

³Ver el [datasheet de la célula de carga](#)

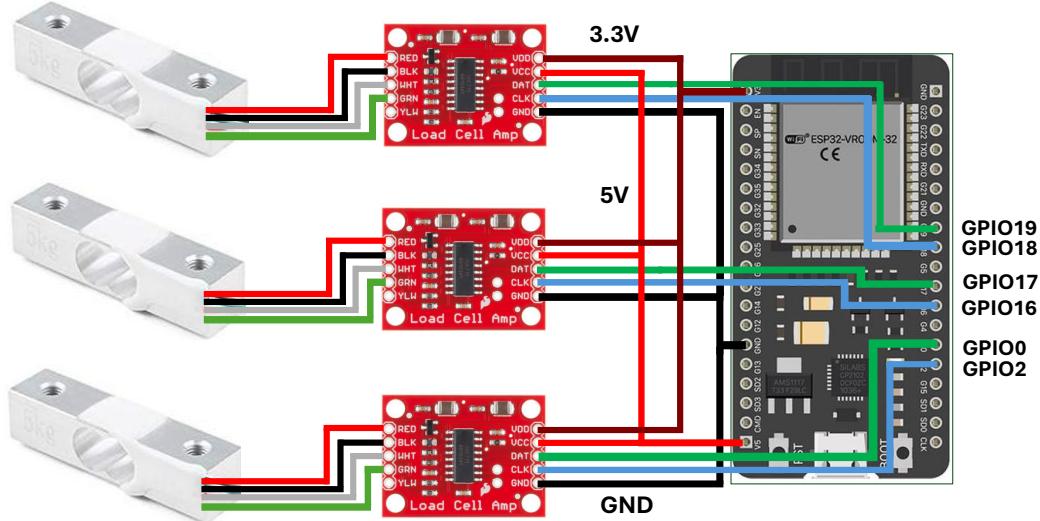


Figura 3.5: Esquema del conexionado del sensor de fuerza.

conecta a la entrada VDD del amplificador, puesto que se encarga de alimentar el circuito lógico del mismo, y si se suministraran 5V, se saldría de su rango de funcionamiento. La otra entrada de tensión del amplificador se conecta a 5V, esta entrada VCC es la que alimenta la célula de carga conectada. La conexión de tierra o GND se conecta a la tierra del micro. La señal de datos y la señal de reloj del amplificador se conectan a cualquier pin GPIO (General Purpose Input-Output) del microcontrolador, puesto que el nodo desarrollado en el sensor de fuerza se encarga de tratar estas señales y obtener los datos necesarios para la lectura.

3.3.2.5. Modelo CAD del sensor

El modelo CAD del sensor de fuerza se divide en 7 piezas que conforman el dispositivo final. Para obtener una vista más detallada de cada una de ellas se realiza un explosionado del modelo final ensamblado (figura 3.6).

- **Extensión efector final:** Pieza cilíndrica en donde se aplica la fuerza, diseñada para mejorar el agarre del usuario.
- **Soporte móvil:** Soporte cuya función es transmitir la fuerza aplicada sobre la sección móvil de cada una de las células de carga.
- **Unión eje X móvil, eje Z fijo:** Unión de la parte fija de la célula orientada en el eje z y la parte móvil de la célula orientada en el eje x.
- **Unión eje Y móvil, eje X fijo:** Unión de la parte móvil de la célula encargada de la lectura en y, junto con la parte fija de la célula en el eje x.

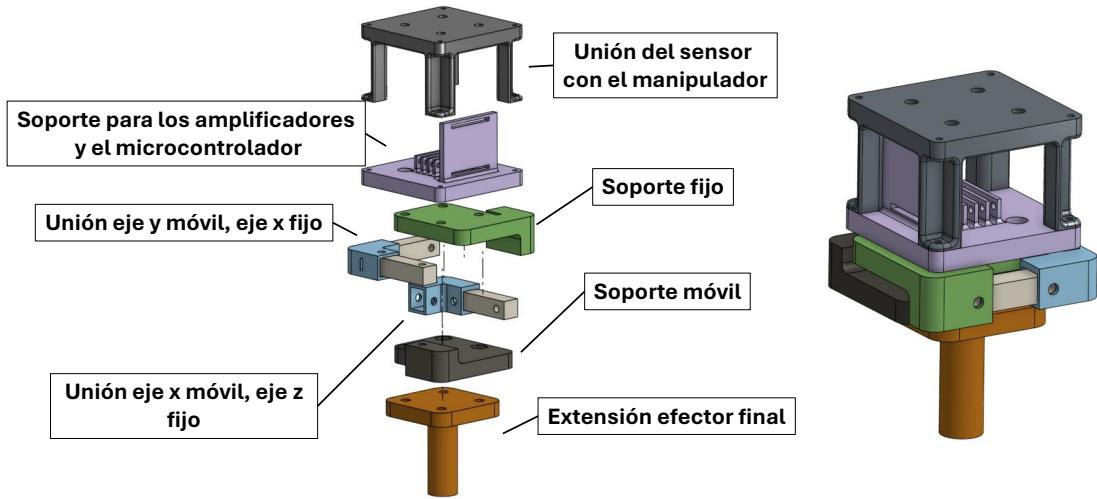


Figura 3.6: Explosión del modelo CAD del sensor de fuerza.

- **Soporte fijo:** Soporte cuya función es mantener la sección fija de cada célula inmóvil para lograr que se registre una lectura correcta.
- **Soporte para los amplificadores y el microcontrolador:** Pieza donde alojar los dispositivos implicados y llevar a cabo el conexionado del sensor.
- **Unión del sensor con el manipulador:** Esta pieza se diseña para poder unir el sensor a cualquier efecto final, puesto que mantiene la distribución de orificios general de la gran mayoría de efectores finales del mercado. Además se añaden 4 tornillos para la unión con el sensor, los cuales permiten cambiar la orientación del sensor y facilitan la instalación del mismo.

3.3.2.6. Calibración del sensor de fuerza

Tras la impresión del modelo CAD, y el posterior ensamblaje del sensor de fuerza, es necesario calibrar las lecturas proporcionadas por cada una de las células de carga. La calibración es estrictamente necesaria, debido a que el sensor diseñado obtiene lecturas en forma de bits, en concreto con una resolución de 24 bits, y el control desarrollado emplea como entrada una lectura de fuerza en N. Sin embargo, existe una forma trivial de lograrlo, simplemente utilizando un sensor de alta resolución. En este caso, se emplea un manipulador KUKA LBR iiwa de 7 GdL, que cede el departamento para realizar la calibración de las células de carga del sensor. Antes de comenzar con la calibración se debe comentar que el sensor que proporciona el manipulador KUKA no es un sensor de fuerzas en el efecto final, sino que está equipado con un sensor de par en cada una de las 7 articulaciones. Por lo tanto, mediante un modelo dinámico directo, conociendo los pares aplicados en cada una de las

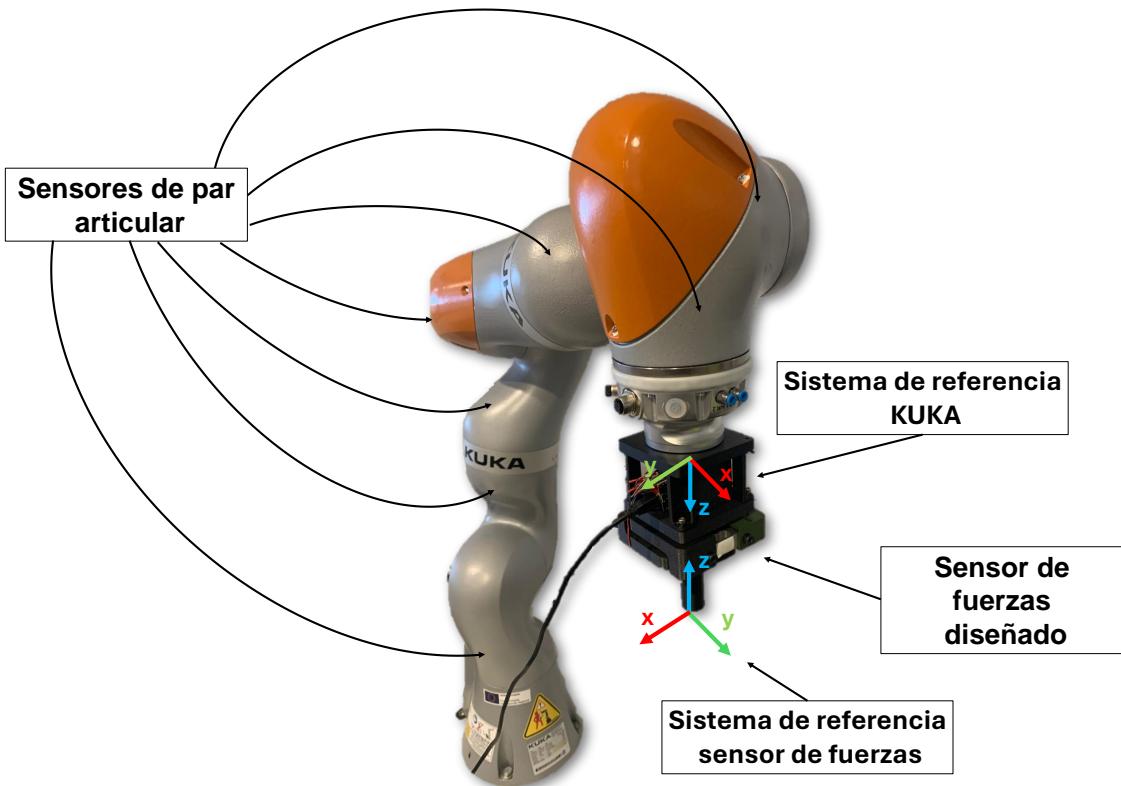


Figura 3.7: Calibración del sensor de fuerzas empleando manipulador industrial KUKA lbr iiwa 7.

articulaciones, se puede obtener las fuerzas y pares aplicados en el efecto final.

Una vez instalado el sensor diseñado en el efecto final del manipulador (figura 3.7), se procede con la calibración de las células de carga. Para ello, se realiza una calibración independiente para cada una de ellas, ya que no tienen un comportamiento elástico idéntico. Por lo tanto, se aplican fuerzas sobre cada uno de los ejes centrándose en tan solo uno de ellos en cada una de las calibraciones. De forma que, comparando los valores de fuerza en newton, comandados por el manipulador, con las lecturas en bits del sensor de fuerza, se obtiene una gráfica de primer orden. El modelo se asemeja a una recta lineal de primer orden, siempre y cuando se respeten los límites elásticos de la célula de carga implicada. Lo que es de vital importancia es conocer la orientación de los ejes cartesianos de la herramienta del manipulador KUKA frente a la disposición de cada célula de carga. En este caso, el sistema de referencia de la herramienta del manipulador industrial se encuentra alineado con el sistema de referencia del sensor desarrollado. El eje x del sensor se corresponde con el eje y del manipulador, el eje y del sensor se corresponde con el eje x del manipulador, y el eje z del sensor tiene la misma dirección pero sentido opuesto al del manipulador. Como se ha descrito en la sección 3.3.2.3, el tipo de célula de carga empleado es de tipo viga, por lo que es interesante colocar las 3 células de forma que tomen lectura sobre 3 ejes cartesianos, pese a que más adelante mediante software exista la capacidad de cambiar la orientación de dichos ejes.

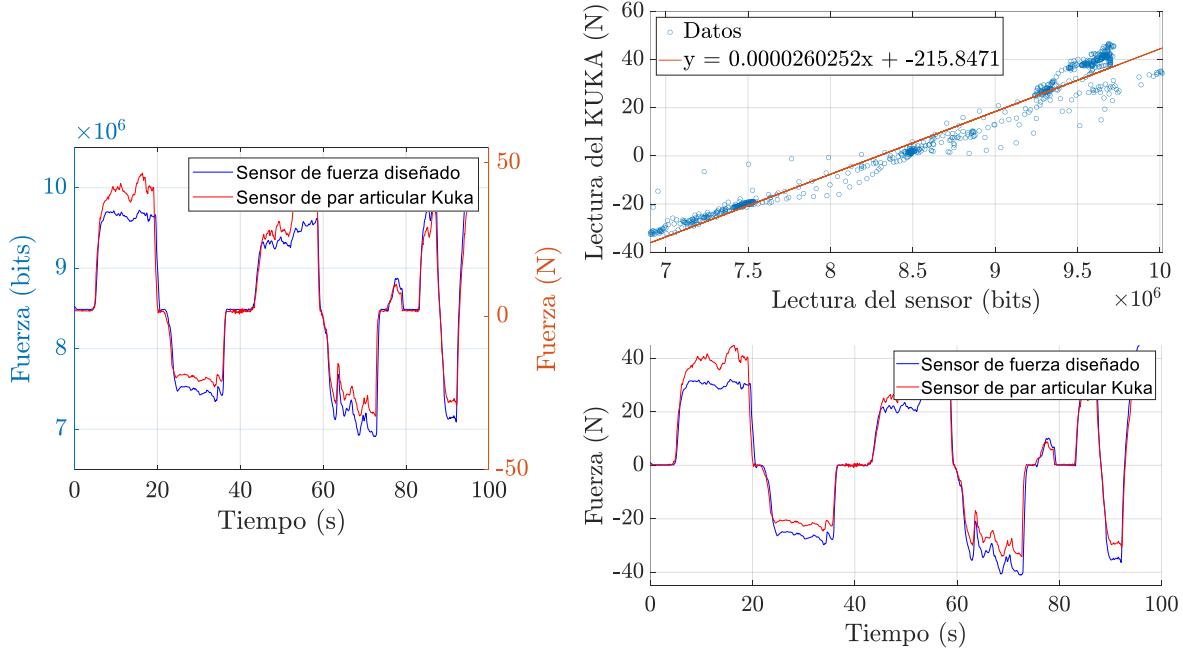


Figura 3.8: Gráficas correspondientes a la calibración de la primera célula de carga.

Es preciso señalar que, en el instante en el que se realiza la calibración, el nodo desarrollado para el sensor de fuerza se encontraba en su versión inicial. A pesar de ello, el nodo era capaz de comandar la lectura del sensor en bits en tiempo real. Sin embargo, aún no se había implementado un mecanismo de tara, por lo que la lectura inicial, correspondiente al valor nulo del manipulador KUKA en el caso del sensor, coincidía con un valor finito distinto de cero. Más adelante, en las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 este valor es 0, puesto que se ha tardado la prueba mediante software.

Calibración primera célula de carga: La primera célula a calibrar corresponde con el eje x del manipulador, de forma que se estudia independientemente la lectura de fuerza en el eje x, frente a los valores en bits proporcionados por la primera célula.

Como se puede observar en la figura 3.8, la gráfica de la izquierda se compone de dos ejes y, uno para la fuerza en Newton y otro para la lectura en bits. Cada uno de los ejes está escalado de forma independiente, puesto que el rango de bits es mucho mayor, y de esta forma se pueden comparar ambas gráficas. Por lo tanto, una vez relacionadas, se puede asegurar que la célula de carga está midiendo correctamente, ya que mantienen la misma trayectoria.

En la calibración de una célula de carga es esencial conocer la relación entre la lectura en bits y el valor real en el sistema internacional. Para ello se emplea el método de la regresión lineal, mediante el estudio de una nube de puntos correspondientes a las lecturas de ambos sensores, como se puede observar en la gráfica superior derecha (figura 3.8). En este caso, la regresión lineal se asemeja a una

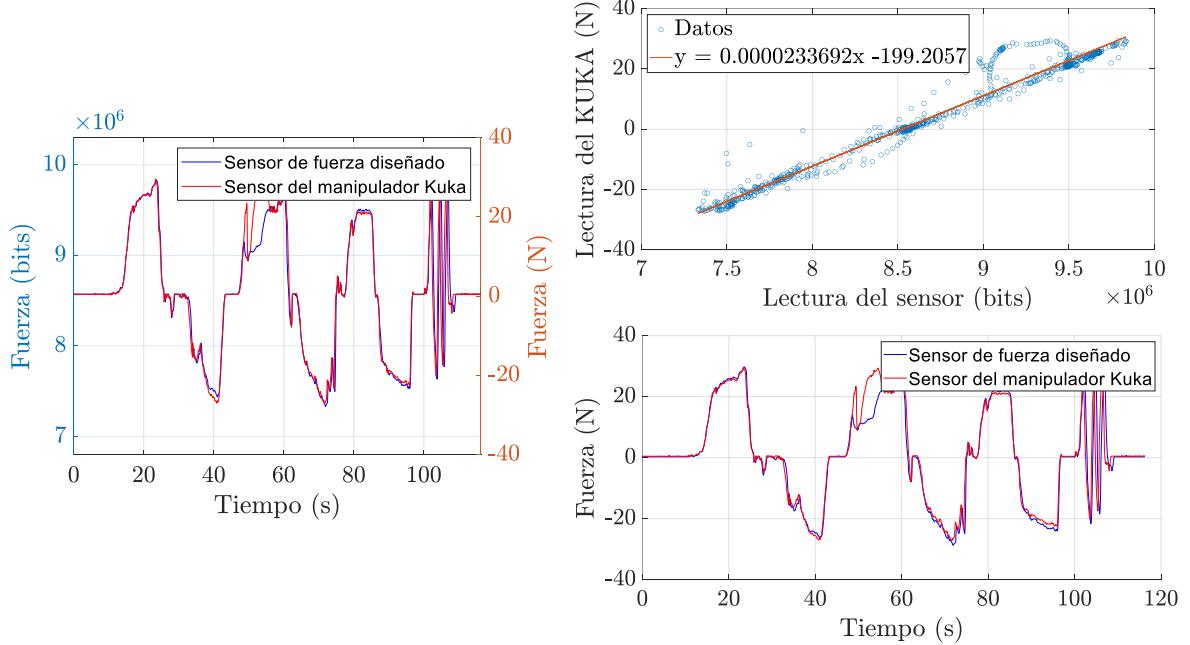


Figura 3.9: Gráficas correspondientes a la calibración de la segunda célula de carga.

recta lineal. La ecuación de la recta es la siguiente 3.4.

$$(3.4) \quad y = 0,0000260252x - 215,8471$$

Una vez calculada la relación bits-N se procede a visualizar la lectura en SI de ambos sistemas de medida. En la parte inferior derecha de la figura 3.8 se puede analizar el comportamiento de ambos sensores.

Calibración segunda célula de carga: La segunda célula a calibrar se corresponde con el eje y del manipulador KUKA. Al igual que en el anterior apartado, se aplican fuerzas sobre ese eje concreto, y más tarde se separan los resultados para calcular la relación fuerza en Newton frente a fuerza en bits para la segunda célula.

En la primera figura 3.9, en la gráfica situada a la izquierda de la imagen, se observa una ligera disonancia en la lectura del sensor de fuerza. Esto se debe, probablemente, a una pérdida de información durante la prueba. Sin embargo, en general, las lecturas presentan un comportamiento similar al de la primera célula. Pese a haber comprobado la velocidad de lectura del dispositivo en la última parte de la prueba, a la hora de calcular la regresión lineal se descartan estos datos por la posible dispersión que generarían en el cálculo de la regresión lineal.

Para finalizar la calibración de la segunda célula de carga, se calcula la regresión lineal dando como resultado una recta lineal. Asimismo el término independiente de la recta 3.5 se corresponde con el valor inicial del peso del sensor sobre esta célula.

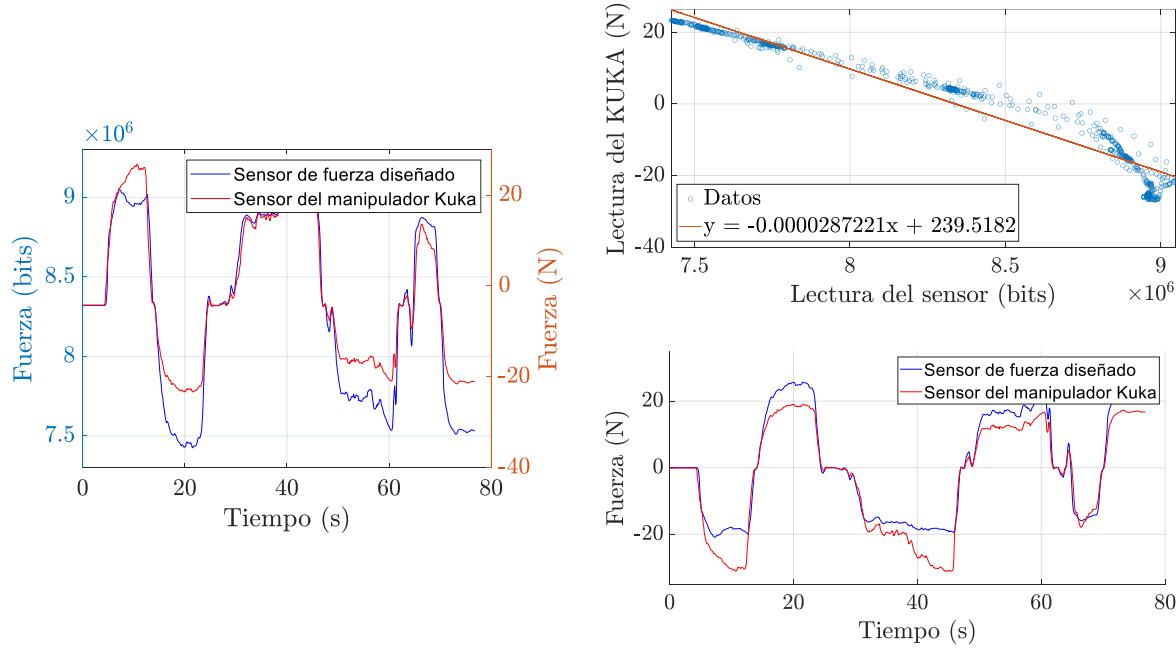


Figura 3.10: Gráficas correspondientes a la calibración de la tercera célula de carga.

$$(3.5) \quad y = 0,0000233692x - 199,2057$$

Finalizada la calibración de esta célula, se lleva a cabo la comparación de lecturas en el SI para ambos sensores. En la figura 3.9, se visualizan los resultados en la parte inferior derecha de la imagen. La lectura obtenida es prácticamente idéntica.

Calibración tercera célula de carga: En la calibración de la última célula (figura 3.10), el eje z del manipulador se encuentra en dirección contraria al eje de lectura de la célula; por lo tanto, la relación de calibración presenta un valor negativo. Sin embargo, esto no representa un problema al implementarlo en el programa, ya que el valor absoluto de la pendiente de la recta de regresión es lo que realmente tiene relevancia para el proyecto. Como se ha comentado anteriormente, lo más interesante del diseño de este sensor es su capacidad de adaptarse a cualquier rotación de sus ejes mediante software.

En resumen, se obtienen los valores que relacionan la fuerza en Newton con la fuerza en bits medidas por el sensor de fuerza diseñado. Esta relación se establece mediante la ecuación de regresión lineal de cada una de las células de carga, siendo el valor de la pendiente el término que indica la relación entre la fuerza. Además, el valor del bias se utiliza para la tara en el sistema. Por último, la pendiente se aplica en el programa o nodo del sensor, el cual realiza la conversión de bits a Newton.

La regresión lineal de la tercera célula de carga se define en la ecuación 3.6.

$$(3.6) \quad y = -0,0000287221x + 239,5182$$

3.4. Descripción de software

3.4.1. Comunicación vía ROS

En este proyecto se emplea ROS (Robot Operating System) para lograr una comunicación en tiempo real de todos los elementos que lo conforman. El esquema principal de comunicación del proyecto se puede ver en la figura 3.11, donde se utilizan dos dispositivos de hardware para configurar el sistema: un ordenador, en el que se lleva a cabo el lanzamiento del máster, y un sensor de fuerza, encargado de la lectura de fuerzas externas. El primer topic, */Force*, tiene como suscriptor el nodo desarrollado para el control de admitancia, que recibe la lectura de la fuerza en N. En cuanto al nodo del sensor de fuerzas, la fuerza que se publica en el topic corresponde a una fuerza medida en el efecto final, utilizando como enlace el nodo proporcionado por la librería rosserial. Por otro lado, el nodo de fuerza dummy no publica fuerzas medidas por ningún sensor, sino que genera fuerzas online comandadas por el ordenador, lo que permite su uso en simulaciones del modelo, introduciendo cualquier señal de entrada. El nodo del control de admitancia se encarga de recibir la fuerza medida y comandar una velocidad lineal al segundo topic, */cmd_vel_ee*. Dicho topic tiene como suscriptor el nodo del manipulador delta, el cual convierte la velocidad lineal en velocidad angular, para así comandar la velocidad angular a los motores Dynamixel que implementa el manipulador en cada articulación. En resumen, este diagrama de comunicación corresponde con la implementación real del esquema de control general del proyecto (figura 3.1). Esta sección de software pone el foco sobre el diagrama de comunicación descrito.

3.4.2. Nodo del sensor de fuerza

En primer lugar, se desarrolla un nodo o programa que se implementa en el microcontrolador alojado en el sensor de fuerza. Este nodo consta de varias rutinas o funciones para conseguir que el sensor se comunique con el control diseñado, y que, a su vez, la frecuencia de publicación de lecturas sea óptima para realizar un control de admitancia.

El nodo comienza con una rutina de inicialización del sistema, estableciendo los pines de datos y señal de reloj para cada uno de los convertidores ADC (Analog-to-Digital Converter). Posteriormente, se asigna un valor de 115200 unidades de señal por segundo para la tasa de baudios, puesto que se emplea una comunicación serial. En el bucle principal del nodo se lleva a cabo la lectura de bits en las células de carga a una frecuencia impuesta de 80 Hz, utilizando la librería HX711, que proporciona el fabricante de los convertidores ADC de 24 bits. Una vez realizada la lectura, se convierten a Newton

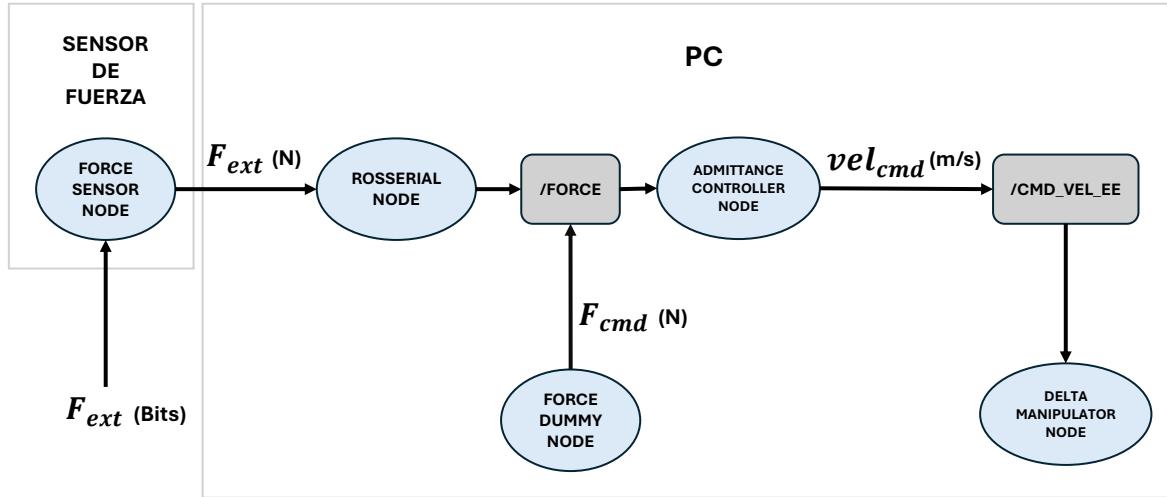


Figura 3.11: Diagrama de comunicación usando ROS.

dichos valores, para su posterior publicación en el nodo de control. Todo ello se lleva a cabo mediante un timer por el microcontrolador La conversión de bits a Newton es fundamental para la lectura del sensor, evitando así tener que realizar la conversión en el mismo controlador. Para lograrlo, una vez conocidos los valores de la relación entre ambas unidades (sección 3.3.2.6), se emplea la ecuación de la regresión lineal, empleando 3 funciones independientes, una para cada célula en específico. El nodo del sensor de fuerza se encuentra en el siguiente repositorio ⁴.

3.4.2.1. Comunicación usando el puerto serie mediante la librería rosserial

Para permitir la comunicación entre el sistema y el nodo del sensor de fuerza, es necesario añadir la librería **rosserial** al nodo del sensor. Esta librería permite que el *ForceSensorNode*, cargado en el microcontrolador, se comunique con el diagrama de comunicación del proyecto a través del puerto serie del ordenador, empleando un cable USB. Sin la librería rosserial, el nodo de este proyecto no podría enviar las lecturas de fuerza al controlador, lo que resultaría en un sensor de fuerzas no funcional. Aunque existen otras alternativas para conectar los nodos del sistema, para este proyecto se ha seleccionado rosserial.

Al incluir la librería rosserial, se consigue que el nodo del sensor de fuerzas publique las lecturas en el topic */Force*. Por lo tanto, el nodo funciona de manera similar a los otros nodos del sistema, con la diferencia de que es el nodo que implementa la librería rosserial (rosserial node) quien publica los

⁴Enlace del repositorio: [sensor de fuerza de 3GdL](#)

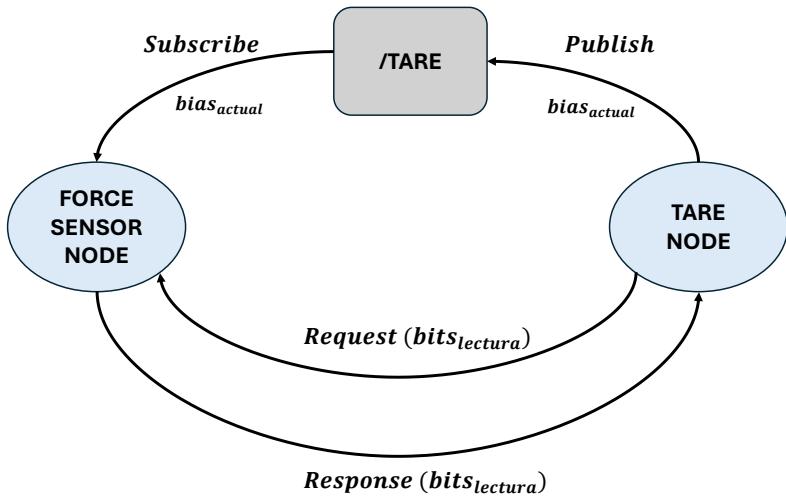


Figura 3.12: Diagrama de comunicación del nodo de tara con el nodo del sensor de fuerza.

mensajes en el topic. Para establecer la comunicación serial, se debe ejecutar el nodo rosserial en la terminal, siguiendo la siguiente sintaxis:

```
1 $ rosrun rosserial_python serial_node.py _port:=/dev/tty/USB* _baud:=115200
```

3.4.3. Nodo para la tara del sensor

Una vez desarrollado el nodo del sensor de fuerza (sección 3.4.2), se implementa la posibilidad de realizar una tara del sensor de fuerza. Para ello, se diseña un programa específico para esta tarea, que consiste en un nodo que haga una sola función al lanzarlo; devolver al nodo del sensor de fuerza el valor del bias necesario para tarar el sensor. Se plantea un diagrama de comunicación (figura 3.12), donde se desarrolla un servicio, mediante el cual el nodo de tara es capaz de recibir el valor actual de bits de lectura del sensor. Los bits que recibe el nodo son la lectura de fuerza actual del sensor para conseguir que ese valor se corresponda con el valor nulo de la fuerza en Newton. Para ello, se coloca la componente y de la ecuación de la recta de calibración a 0, y se despeja el valor del bias o intercepto de dicha recta. Una vez conocido este valor se publica en un tópico denominado /Tare, encargado de que el nodo del sensor reciba dicho valor. De esta manera el sensor de fuerza tiene la opción de colocar el valor de lectura del sensor otra vez a 0.

3.4.4. Nodo del control de admitancia

El programa desarrollado para el nodo del control de admitancia se basa en la ecuación 3.2. Para ello, se utiliza un algoritmo que permite comandar el valor de la velocidad lineal deseada a los motores Dynamixel, conectados a las tres articulaciones del manipulador delta. El algoritmo

comienza calculando la variación de velocidad durante el instante de tiempo Δt , integración discreta. Este valor se determina mediante la ecuación general para un control de admitancia (ecuación 3.3); sin embargo, en este proyecto se trabaja con 6 grados de libertad, por lo que el cálculo corresponde a una matriz de dimensiones 6x1. Las variables que influyen en este cálculo son la matriz de masa o inercia, la matriz de velocidad actual, la matriz de posición actual, y las matrices de amortiguamiento y rigidez.

A continuación, se determina el valor de velocidad deseada, la cual se devuelve por la función al programa de control. Este valor se calcula simplemente sumando la variación de velocidad al valor actual de velocidad. Una vez se obtiene la velocidad deseada, se emplea una función para actualizar el valor de la velocidad actual, asignándole el valor de la velocidad deseada. Es importante destacar que, en un sistema de control de admitancia, es fundamental mantener la rigidez en 0, lo que significa que no es necesario conocer la posición actual del efecto final.

Para conseguir un control más realista, es importante conocer el tiempo de integración Δt . El valor de esta variable es aproximadamente 0.01 segundos, sin embargo, existe la posibilidad de obtener el valor real del tiempo transcurrido en cada iteración. Este valor se obtiene a partir de la comunicación del nodo de control con el nodo del sensor de fuerza. De forma que el tiempo transcurrido entre la recepción de dos lecturas consecutivas del sensor se emplea como el valor asignado al tiempo de integración.

El nodo para el control está suscrito al topic */Force*, el cual recibe información de la lectura del sensor de forma periódica. El procesamiento de la fuerza medida comienza cuando el controlador recibe un mensaje con las componentes de la matriz de esfuerzos. En esta rutina se actualiza el valor de fuerza actual en x, y, z, y se registra el valor del tiempo transcurrido desde la última lectura, asignando un nuevo valor a Δt . Posteriormente, se calcula la velocidad deseada utilizando el algoritmo de control mencionado previamente.

Una vez determinada la velocidad deseada, se estudian las limitaciones de diseño, comparando este valor con la velocidad máxima del manipulador, impuesta por software para evitar colisiones. Si el valor calculado supera el valor absoluto de la velocidad máxima, este valor calculado se sustituye automáticamente por el valor de la velocidad máxima. Para finalizar el proceso, se publica un mensaje con las componentes x, y, z de la velocidad lineal deseada, que posteriormente recibe el manipulador delta para comandar la velocidad angular de los motores Dynamixel.

El programa descrito se encuentra en el siguiente repositorio ⁵.

⁵Enlace del repositorio: [control de admitancia para un manipulador de 6 GdL](#)

Algorithm 1 Controlador de admitancia

Input: F_t **Output:** V_{des}

```
     $W_t \leftarrow (F_t, 0, 0, 0)$ 
     $V_{des} \leftarrow AdmittanceController()$ 
     $V_{max} \leftarrow getVelmax()$ 
    if  $|V_{des}| > |V_{max}|$  then
         $V_{des} \leftarrow V_{max}$ 
    end if
     $V_{act} \leftarrow V_{des}$ 
```

Experimentos y Resultados

Contenido

4.1.	Entorno experimental	38
4.2.	Simulación del modelo	38
4.2.1.	Simulación del comportamiento del controlador para 1 GdL	38
4.2.2.	Validación de la simulación a través del modelo teórico de admitancia para 1 GdL	39
4.3.	Experimento del modelo desarrollado	42
4.3.1.	Experimento para comprobar el comportamiento del modelo en cada uno de los ejes	42
4.3.2.	Experimento variando la admitancia en el eje z	45

En este capítulo se muestran los resultados de las simulaciones y experimentos realizados para validar el modelo teórico del controlador desarrollado. Se realizan dos simulaciones, ambas para un modelo de un grado de libertad, para simplificar el análisis de resultados. La primera de ellas consiste en comandar señales de fuerza de forma online, mientras que la segunda simula el mismo controlador en Simulink para validar los resultados obtenidos en la primera simulación. Adicionalmente, se realizan dos experimentos reales para tres grados de libertad, uno de ellos enfocado en la comprobación del funcionamiento del controlador y otro en la validación de la admitancia variable, cambiando la admitancia en uno de sus ejes. Mediante gráficas se discuten los resultados obtenidos, visualizando la respuesta del sistema en cada una de las situaciones.

4.1. Entorno experimental

Para los experimentos que se redactan a continuación, se emplean 3 dispositivos hardware. El primero de ellos es el equipo donde se realiza la prueba, un portátil ASUS ROG de 2019, que implementa un procesador Intel i7 de 9^a generación y 16Gb de memoria RAM. También se utiliza un sensor de fuerza diseñado en este proyecto, el cual se ha descrito en la sección 3.3.2. Y por último, un manipulador delta paralelo, que también ha sido descrito previamente (sección 3.3.1).

En el caso del software, el experimento se realiza en Ubuntu en la versión 18.04 y utilizando ROS Melodic. El desarrollo del sensor de fuerza se lleva a cabo en ARDUINO IDE, y los resultados se muestran en Matlab y Simulink. Para el desarrollo del código del control de admitancia se emplea Visual Studio Code, como podría haberse utilizado cualquier otro programa dedicado a la programación.

4.2. Simulación del modelo

4.2.1. Simulación del comportamiento del controlador para 1 GdL

Se simula un modelo simplificado de un solo grado de libertad del control de admitancia desarrollado, mediante la implementación de un nuevo nodo en el diagrama de comunicación del proyecto en ROS, **force_dummy_node** (figura 3.11). Dado que el objetivo es únicamente simular el modelo del controlador diseñado, no es necesario emplear el sensor de fuerzas para obtener las lecturas de fuerza. Utilizando el nodo dummy se puede enviar una señal de fuerza al controlador de forma online. En este caso se introduce una señal de entrada cuadrada de amplitud 20 N, que oscila entre -10 y 10 N. Esto permite observar la respuesta del sistema al modificar los parámetros del controlador. Puesto que la simulación debe ser lo más realista posible, se impone un valor máximo de velocidad 0.5 m/s. Esta limitación responde a la velocidad máxima soportada por los motores instalados en cada una de las articulaciones del manipulador.

4.2.1.1. Primera simulación: Variación del parámetro b (damping) del sistema

Se inicia la simulación del controlador diseñado modificando el parámetro b, que está asociado al amortiguamiento del sistema. Se emplean 3 valores de amortiguamiento, $b_1 = 60\text{Ns/m}$, $b_2 = 40\text{Ns/m}$, $b_3 = 19\text{Ns/m}$. En la figura 4.2 se observa como, a medida que aumenta el amortiguamiento, se produce una disminución en el módulo de la velocidad final. Esto se debe a que el parámetro b está relacionado a la velocidad en la ecuación 2.8. Por el contrario, si disminuye el valor de amortiguamiento, la velocidad final de respuesta aumenta. Para el valor de 19Ns/m, se demuestra que el limitador de velocidad máxima está ejecutándose, ya que la curva de velocidad se mantiene en un valor constante de 0.5m/s, sin posibilidad de superarlo.

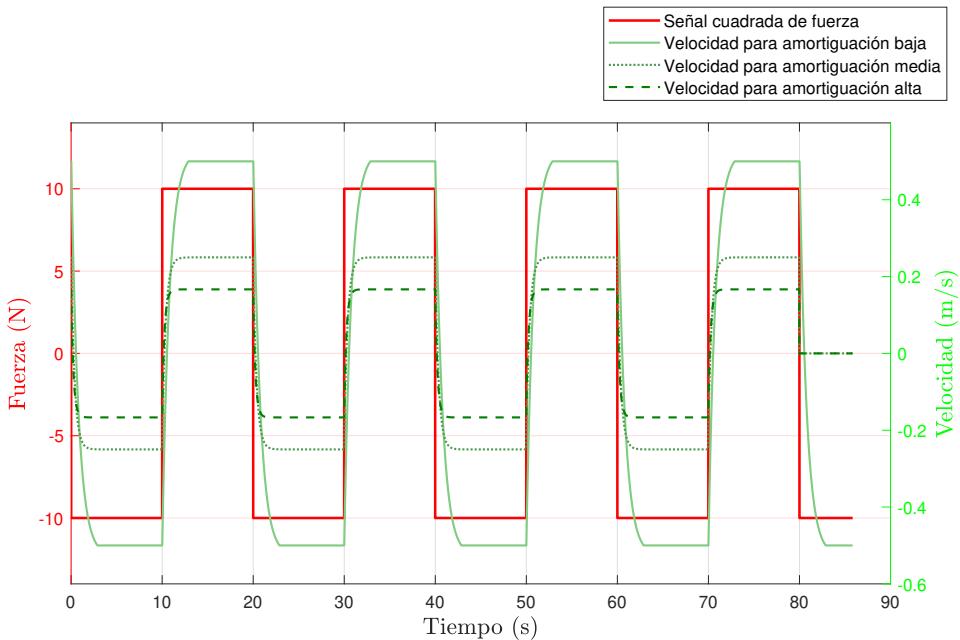


Figura 4.1: Gráfica de la simulación de una variación en el valor del amortiguamiento del sistema.

4.2.1.2. Segunda simulación: Variación del parámetro m (inercia) del sistema

Se modifica ahora el parámetro de inercia m para analizar su impacto en la respuesta del sistema. Se utilizan 3 valores distintos de inercia: $m_1 = 3Kg$, $m_2 = 15Kg$, $m_3 = 40Kg$, abarcando un rango amplio de valores para facilitar la visualización de las diferencias a la salida.

Como se puede observar en la gráfica 4.1 la velocidad final se mantiene pese a modificar el parámetro asociado a la inercia. Considerando que el valor del parámetro inercia está acompañado de la aceleración, es entonces el tiempo de establecimiento el que cambia en función de la masa.

4.2.2. Validación de la simulación a través del modelo teórico de admitancia para 1 GdL

Para validar el comportamiento del controlador diseñado, se plantea el mismo modelo en Simulink (figura 4.3). El objetivo es mostrar el funcionamiento teórico del controlador, para poder comprobar si el controlador desarrollado en C++ logra obtener un comportamiento similar. Para ello, se plantean dos simulaciones: la primera, en la que varía el parámetro de amortiguación b (figura 4.4) y una segunda, donde cambia el valor del parámetro de la inercia m (figura 4.5). Para lograr una réplica exacta del comportamiento del controlador desarrollado, se emplean las mismas variaciones en los parámetros.

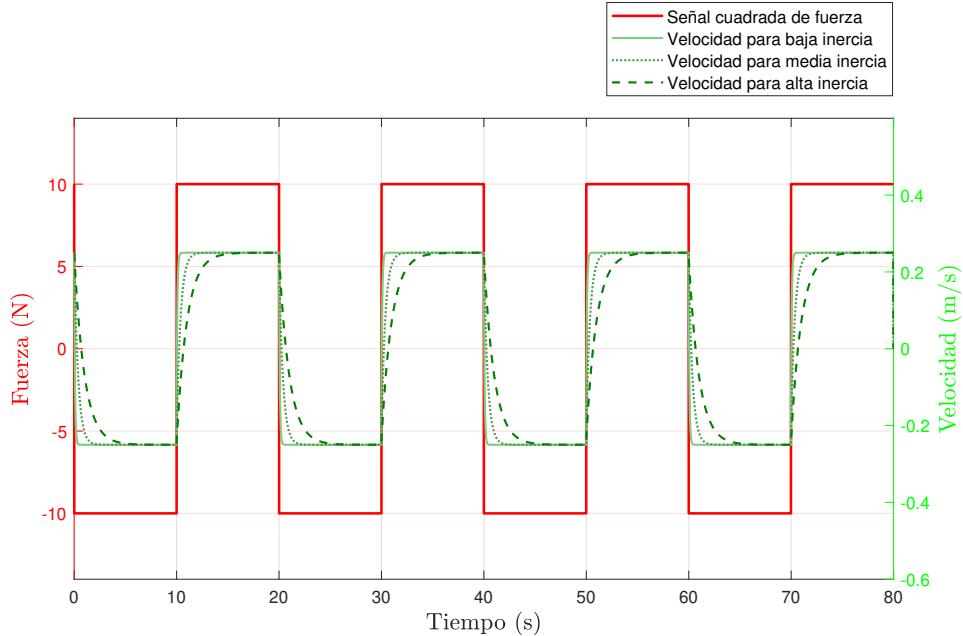


Figura 4.2: Gráfica de la simulación de una variación en la inercia del sistema.

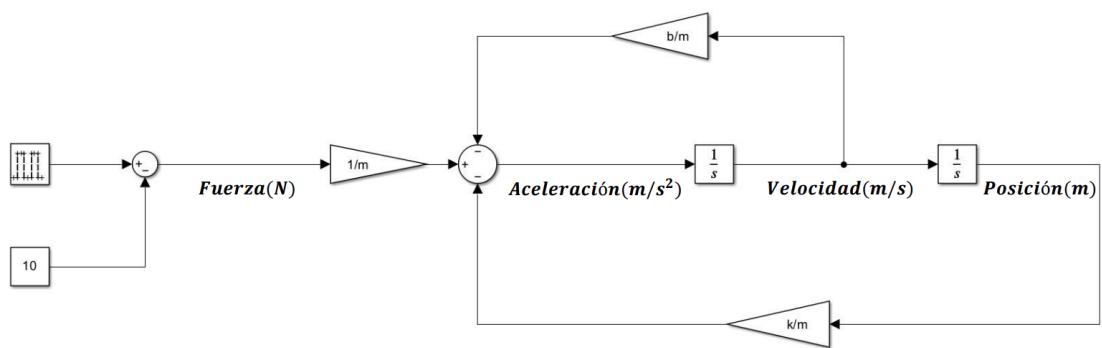


Figura 4.3: Modelo en Simulink de un control de admitancia para 1GdL.

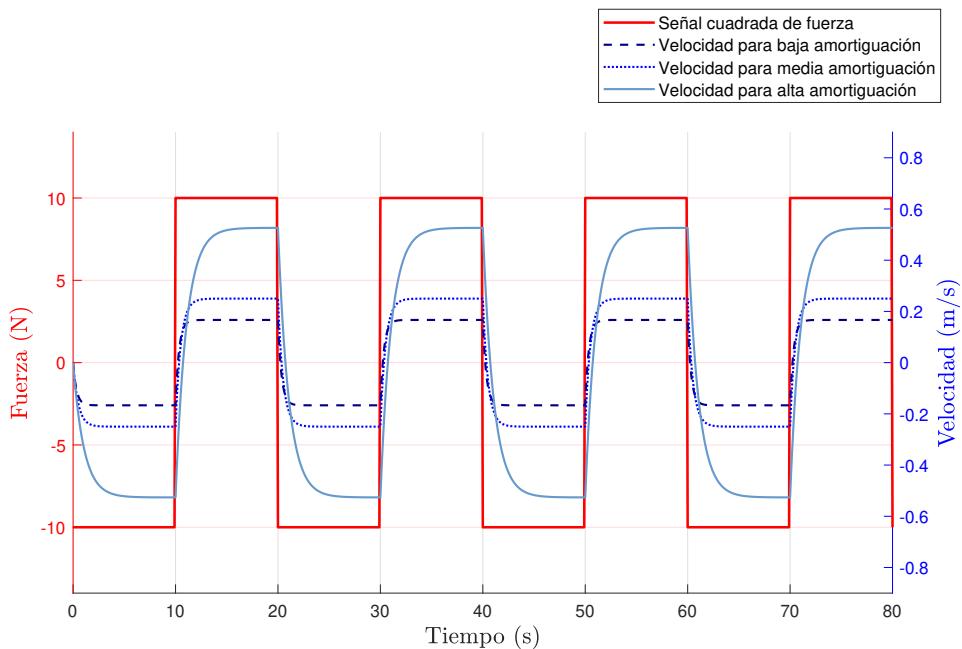


Figura 4.4: Gráfica del comportamiento del modelo al variar el parámetro de amortiguamiento.

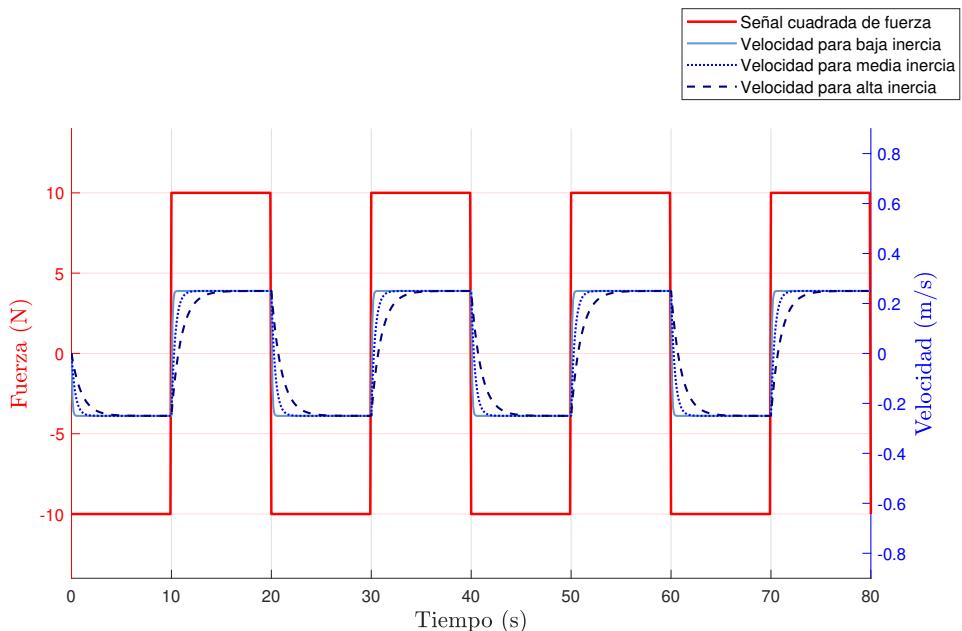


Figura 4.5: Gráfica del comportamiento del modelo al variar el parámetro de amortiguamiento.

4.3. Experimento del modelo desarrollado

Se instala el sensor de fuerza en el manipulador delta paralelo y se realiza la prueba real del modelo. Se divide en dos experimentos, el primero de ellos se basa en aplicar una señal cuadrada sobre cada uno de los ejes de forma independiente y separada en el tiempo. Se realiza un segundo experimento variando los parámetros del controlador en el eje z.

4.3.1. Experimento para comprobar el comportamiento del modelo en cada uno de los ejes

En este primer experimento se aplica una fuerza, imitando una señal cuadrada, sobre cada uno de los ejes. Se inicia con el eje x, seguido por el eje y, y finalmente se concluye con el eje z. Antes de llevar a cabo el experimento, se establecen una serie de parámetros para el controlador diseñado. Tras varias pruebas, se decide utilizar los valores que se muestran en la tabla 4.1. El video del experimento descrito se encuentra en el siguiente enlace ¹.

Matriz	Parámetros					
	mx	my	mz	mr_x	mr_y	mr_z
Mass (M)	5.0	5.0	10.0	5.0	5.0	10.0
Damping (B)	bx	by	bz	br_x	br_y	br_z
	50.0	50.0	150.0	50.0	50.0	150.0
Stiffness (K)	k_x	k_y	k_z	kr_x	kr_y	kr_z
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 4.1: Tabla de parámetros del controlador para el primer experimento.

Una vez realizado el experimento se muestran los resultados obtenidos. La figura 4.6 muestra un conjunto de gráficas que contienen toda la información del experimento para los tres ejes. En la primera gráfica, se puede distinguir la fuerza registrada por el sensor de fuerza para cada uno de los ejes a lo largo del experimento. Este tipo de lecturas suelen tener cierto ruido, sobretodo si el sensor es de muy alta resolución. Sin embargo, se identifican las 3 señales con una forma similar a una señal cuadrada, que se aplican en el eje x, más tarde en el eje y y, finalmente, en el eje z. En la segunda gráfica, que representa la evolución de la velocidad comandada por el controlador, se aprecia de manera más precisa la velocidad comandada para cada uno de los ejes. En el eje z, dado que presenta una admitancia menor, se observa que, a pesar de aplicar una señal de fuerza con mayor amplitud, la velocidad comandada resulta ser proporcionalmente menor en comparación con la velocidad comandada en los otros ejes. Esto se debe a que una admitancia más baja implica una menor respuesta en velocidad ante fuerzas externas, lo que explica la diferencia en el comportamiento del eje z frente a los demás, donde la relación entre la fuerza aplicada y la velocidad comandada es más directa. Para

¹Enlace del primer experimento: [Comprobación del modelo en cada uno de los ejes](#)

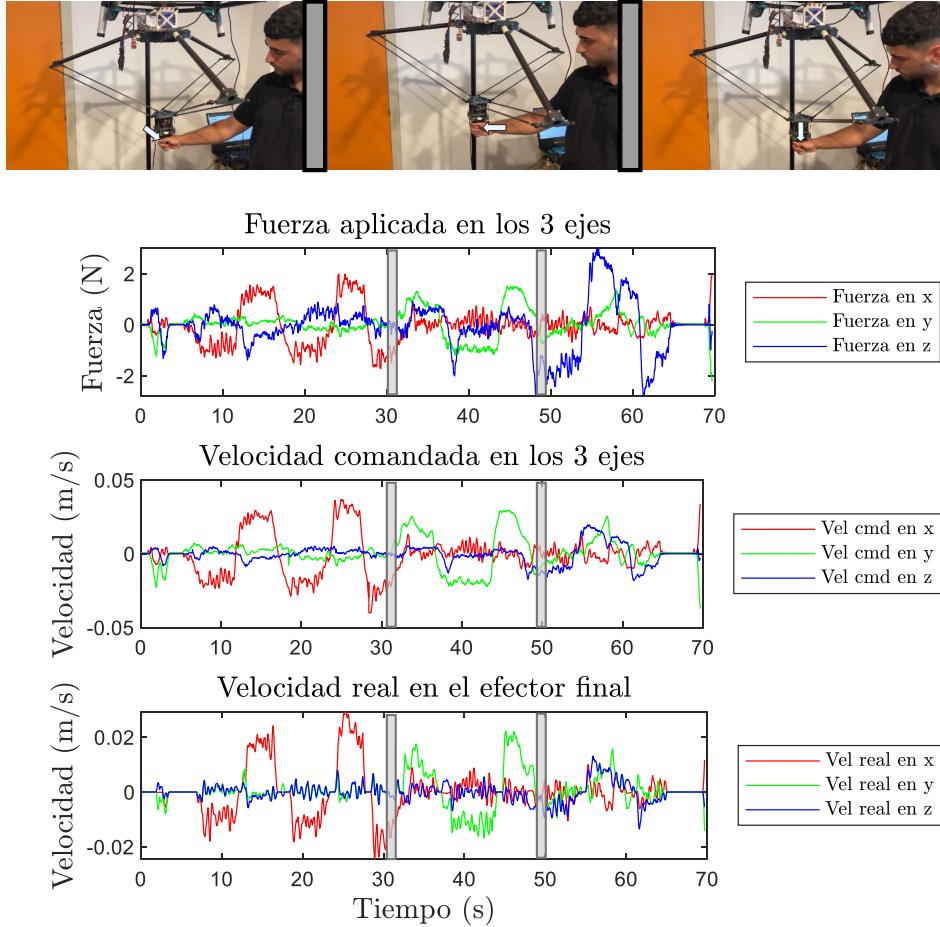


Figura 4.6: Conjunto de gráficas que describen el comportamiento del sistema ante una entrada de fuerza de forma independiente y espaciada en el tiempo para cada uno de los ejes.

concluir, se incluye una última gráfica donde se registran los valores de velocidad del efecto final del manipulador delta. De modo que siendo los valores similares a la respuesta del controlador, se puede afirmar que el comportamiento del modelo es el esperado.

Para poder visualizar la respuesta del sistema en cada uno de los ejes, se divide la prueba en 3 intervalos de tiempo, donde se aplican las fuerzas en cada uno de los ejes de forma independiente. En el primer intervalo de tiempo, que abarca desde el inicio hasta el segundo 32 del experimento, se lleva a cabo la prueba para el eje x. La primera de las gráficas de la figura 4.7 muestra la lectura de fuerza del sensor en este eje, la cual presenta una forma similar a una cuadrada con un rango de valores que oscila entre 2 y -1.75, repitiéndose cada 5 segundos. Como es posible observar, los valores de lectura tienen cierto ruido y fluctuaciones en la medida. Por otro lado, la salida del controlador muestra los valores de velocidad comandados, los cuales han sido suavizados mediante el control,

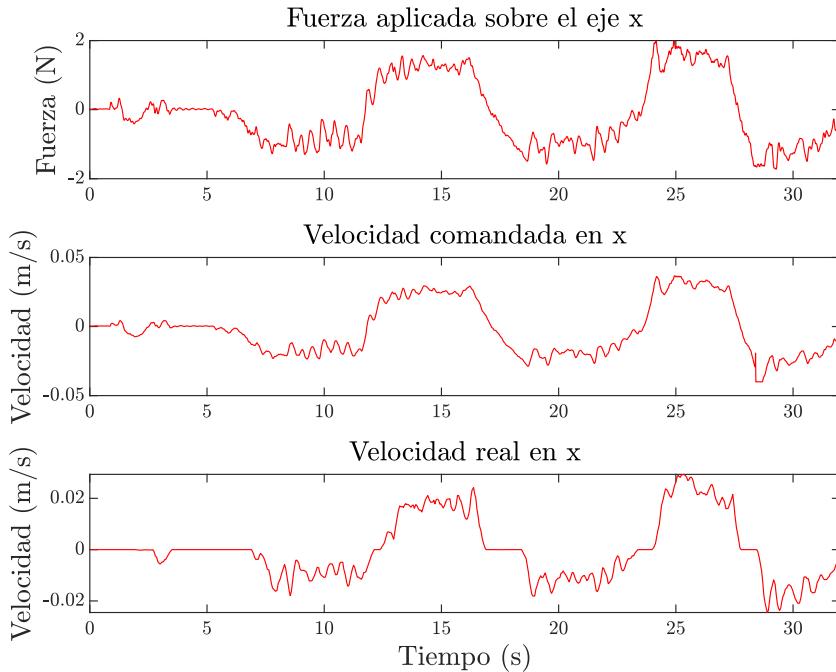


Figura 4.7: Conjunto de gráficas que representan la evolución del eje x al aplicar una señal de fuerza de forma cuadrada.

eliminando así los picos en la señal. Se alcanza una velocidad máxima de 0.036 m/s, acercándose al límite de velocidad impuesto. Para concluir el estudio del controlador en el eje x, se presenta la velocidad del efecto final del manipulador delta. En este caso, el valor de la velocidad real es menor que el de la velocidad comandada. Esto se debe a que el manipulador emplea motores Dynamixel, y la frecuencia de publicación del manipulador delta es inferior. A pesar de esto, se logra una cierta similitud en los resultados proporcionados por el controlador.

En el segundo intervalo, se encuentra el experimento en el eje y, el cual se desarrolla entre el segundo 32 y el 50 (figura 4.8). En este eje, se aplica una señal de fuerza similar a una cuadrada, que varía entre un valor de 1.5N y -1.2N y aplicándose cada 5 segundos aproximadamente. Como se puede observar en la segunda gráfica, la velocidad máxima comandada es de unos 0.03 m/s, como bien se ha comentado para la anterior figura 4.7, la respuesta en este caso también es óptima, ya que el sistema logra suavizar el efecto de las fuerzas aplicadas sobre el efecto final del manipulador. Sin embargo, la velocidad real del efecto final es inferior a la velocidad comandada, lo que se atribuye a cuestiones de diseño y a la frecuencia de publicación del sistema.

En el tercer intervalo se lleva a cabo el estudio del control en el eje z durante los últimos instantes del experimento (figura 4.9). En este caso, no se presenta un ruido excesivo en la entrada, ya que el sensor está diseñado para proporcionar valores más precisos en el eje z, aprovechando un mango saliente de la herramienta. Además, los resultados obtenidos reflejan una mayor suavidad en la

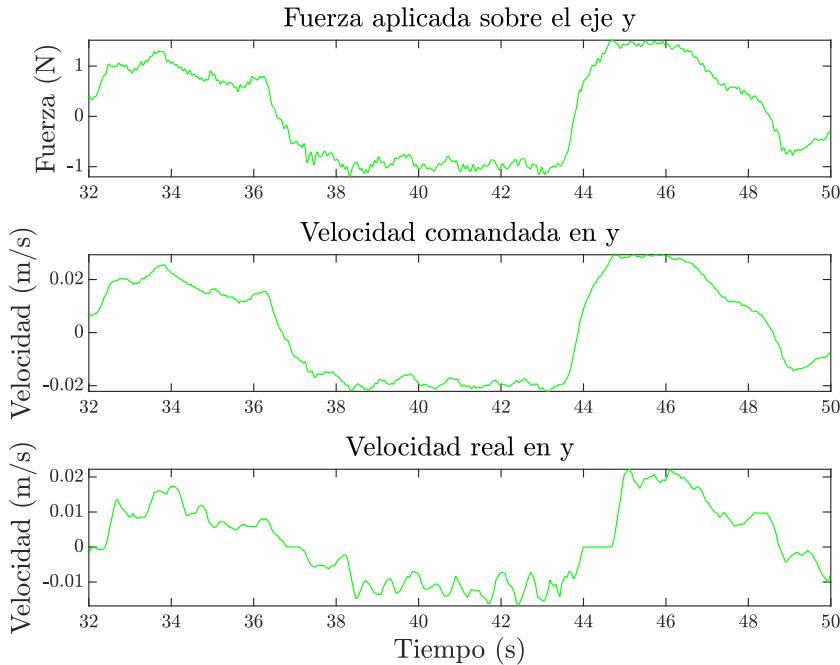


Figura 4.8: Conjunto de gráficas que representan la evolución del eje y al aplicar una señal de fuerza de forma cuadrada.

respuesta del sistema de control. Sin embargo, la velocidad real del manipulador no muestra la misma suavidad que se espera del control. Esto se debe a que, durante la realización del experimento, el manipulador se encuentra montado en un soporte destinado a alojar un dron de grandes dimensiones, lo que dificulta evitar vibraciones en el efecto final. No obstante, en una prueba real llevada a cabo por el dron, no se generaría pares de esta magnitud.

Al analizar los resultados de la prueba, se observa que, al aplicar una fuerza que oscila entre 3 y -3 N, se logra una respuesta de control de aproximadamente 0.019 m/s. Este comportamiento se atribuye a la baja admitancia del eje z, dado que los valores de admitancia en esta prueba son diferentes para cada uno de los ejes. Antes de iniciar el experimento, se modificaron todos los parámetros con el objetivo de que cada eje tuviera un comportamiento distinto, permitiendo así observar las diferencias entre ellos.

4.3.2. Experimento variando la admitancia en el eje z

En el segundo experimento, se busca comprobar la adaptabilidad del modelo, permitiendo la variación de los parámetros en tiempo real y la alteración de la admitancia en cada uno de los ejes. Para facilitar la realización del experimento, se decide disminuir la admitancia del eje z hasta lograr que la velocidad comandada por el controlador sea prácticamente nula. Este objetivo se alcanza aumentando el parámetro de masa y el factor de amortiguamiento en el eje z, estableciendo valores de 500 kg y 2000 Ns/m, respectivamente (tabla 4.3). Los parámetros restantes se mantienen constantes, lo que simplifica la comparación entre los resultados de ambos experimentos. El video del

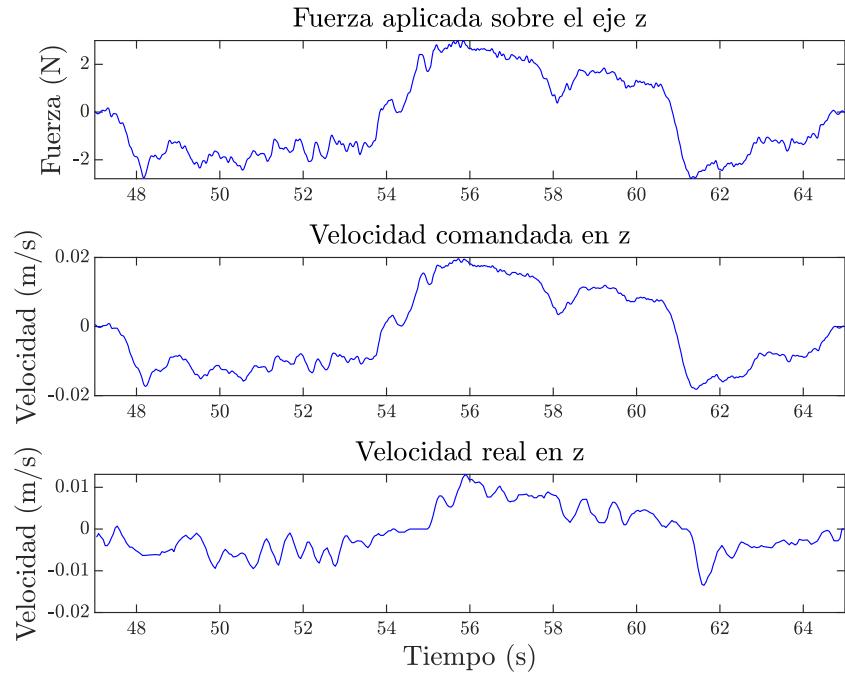


Figura 4.9: Conjunto de gráficas que representan la evolución del eje z al aplicar una señal de fuerza de forma cuadrada.

experimento descrito se encuentra en el siguiente enlace².

Matriz	Parámetros					
	mx	my	mz	mrx	mry	mrz
Mass (M)	5.0	5.0	500.0	5.0	5.0	500.0
Damping (B)	bx	by	bz	brx	bry	brz
	50.0	50.0	2000.0	50.0	50.0	2000.0
Stiffness (K)	kx	ky	kz	krx	kry	krz
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 4.2: Tabla de parámetros del controlador para el segundo experimento.

²Enlace del segundo experimento: [Variación de los parámetros del controlador en el eje z](#)

Especificaciones	
Tipo de manipulador	Delta paralelo ligero
Material de fabricación	Fibra de carbono
Peso (Kg)	2.2
Peso soportado (Kg)	3.5
Grados de libertad	3
Vel máx del efecto final (m/s)	4.0
Número de actuadores	3
Modelo de actuadores	DYNAMIXEL XM540-W270-T
Peso actuador (g)	165
Velocidad máx actuadores (rpm)	256

Tabla 4.3: Tabla de parámetros del controlador para el segundo experimento.

Se estudia el comportamiento de la dinámica del sistema para los 3 ejes (figura 4.10). En este experimento, no se busca generar una señal controlada de fuerza; en cambio, se utiliza para adquirir información sobre el modelo desarrollado y las posibilidades que ofrece la variación de los parámetros del controlador en tiempo real. La primera gráfica presenta una serie de picos en el eje z, tanto en dirección negativa como positiva. Posteriormente, el sensor registra fuerzas de manera similar para todos los ejes, concluyendo con otros cuatro picos en la señal de fuerza del eje z. Sin embargo, como se puede observar en las otras dos gráficas, que representan la velocidad comandada y la velocidad real del efecto final, la velocidad en el eje z es prácticamente nula en comparación con la de los otros ejes. Este fenómeno es un ejemplo claro del impacto que tiene la disminución de la admitancia en el movimiento de dicho eje.

Al igual que en el experimento anterior, los resultados se dividen de forma independiente para permitir un estudio más detallado de cada eje por separado. En el análisis de los resultados en el eje x (figura 4.11), se observa que la respuesta del sistema es óptima, ya que logra filtrar el ruido de la lectura del sensor. Aunque la señal de entrada no presenta una forma definida, es importante señalar que se realiza un menor esfuerzo en comparación con el experimento anterior, aplicándose en este caso un rango de fuerzas que va de 1.5 N a -2 N. En cuanto a la salida del controlador, la velocidad máxima alcanzada es de aproximadamente -0.038 m/s. Por último, la gráfica final muestra el ruido generado por los motores y la velocidad de publicación del manipulador delta, en contraste con el control diseñado.

En el análisis del comportamiento del modelo para el eje y (figura 4.12), se ejerce una fuerza máxima que varía desde 1.9 N hasta -1.7 N. Esto da lugar a una velocidad comandada de aproximadamente 0.037 m/s y -0.032 m/s, respectivamente. Al igual que en el eje x, el controlador suaviza la señal de entrada, permitiendo que los actuadores conectados al manipulador realicen el movimiento del efecto final. Como resultado, se logra que la velocidad real del sistema sea equivalente a la señal de velocidad comandada, evidenciando la efectividad del control implementado.

Se analizan los datos para el eje z (figura 4.13), el cual presenta una menor admitancia en compara-

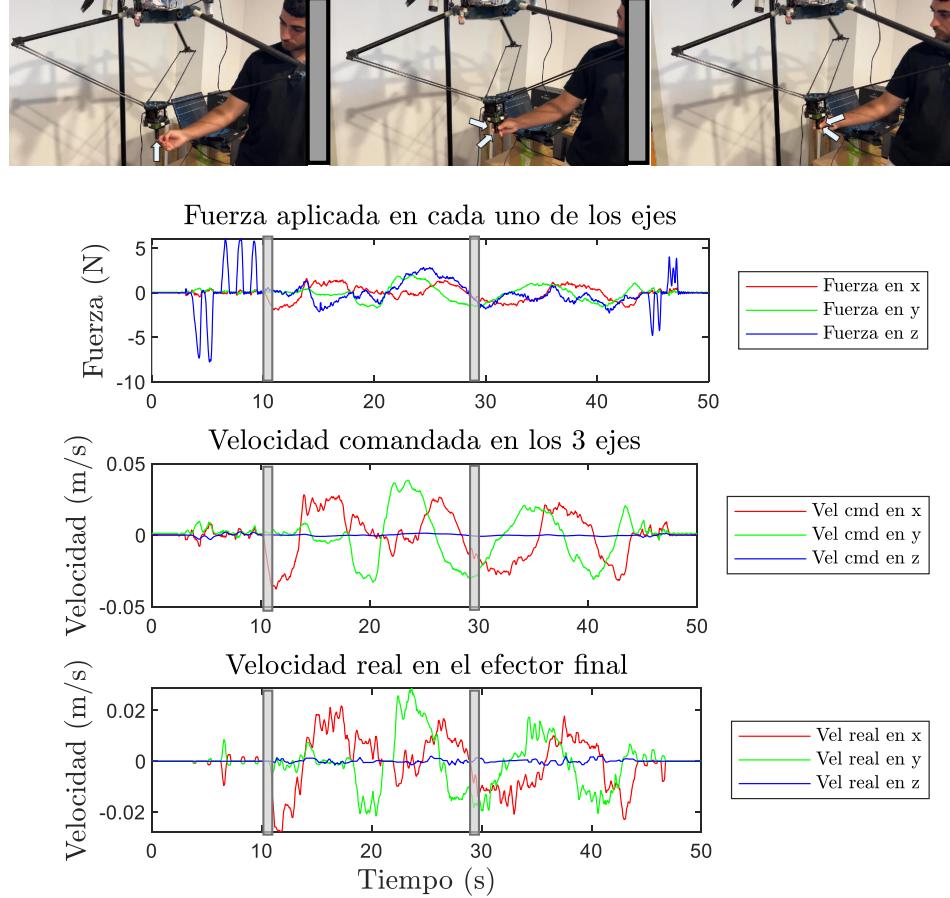


Figura 4.10: Gráfica que muestra el comportamiento del sistema ante una baja admitancia en el eje z.

ción con los otros ejes. En primer lugar, es importante mencionar que los picos observados en la señal de fuerza se generan de manera intencionada, ya que se buscaba comprobar que, a pesar de aplicar grandes esfuerzos, el control lograría suavizar estos picos, minimizando su relevancia. Asimismo, se puede apreciar que, ante una fuerza progresiva, el control la suaviza aún más, evitando la aparición de picos en la señal de salida. En este caso, la fuerza aplicada alcanza valores de hasta -7.5 N, mientras que la velocidad comandada para ese instante es de -0.003 m/s. Este valor es significativamente menor, representando menos de una décima parte de la velocidad que se podría haber alcanzado si el valor de la admitancia en este eje hubiera sido similar al de experimentos anteriores.

Por concluir con el segundo experimento, se muestra una gráfica con la posición sobre el plano xy del efecto final del manipulador delta (figura 4.14). En esta representación se aprecian dos

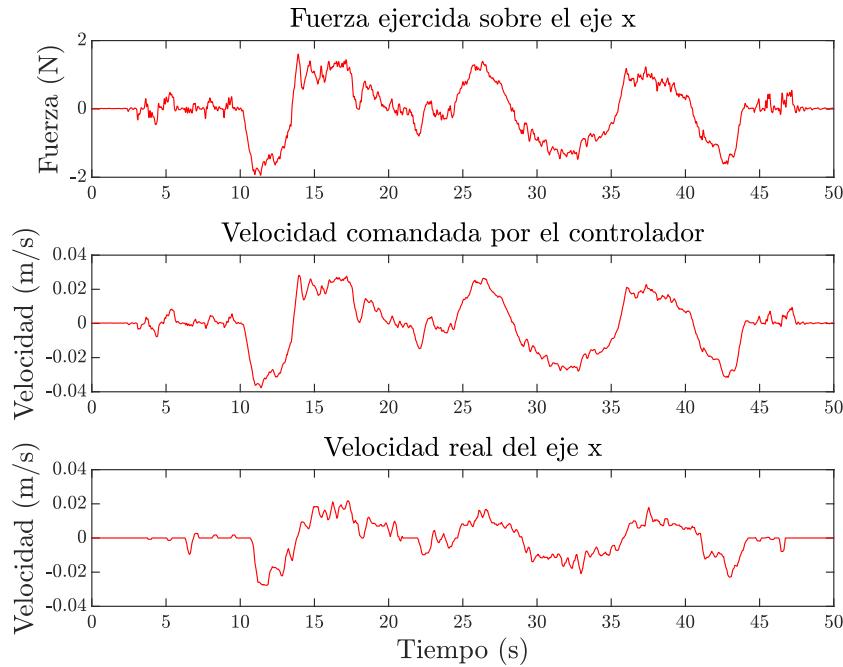


Figura 4.11: Gráfica donde se aprecia el comportamiento del sistema en el eje x, teniendo en cuenta que existe una baja admitancia en el eje z.

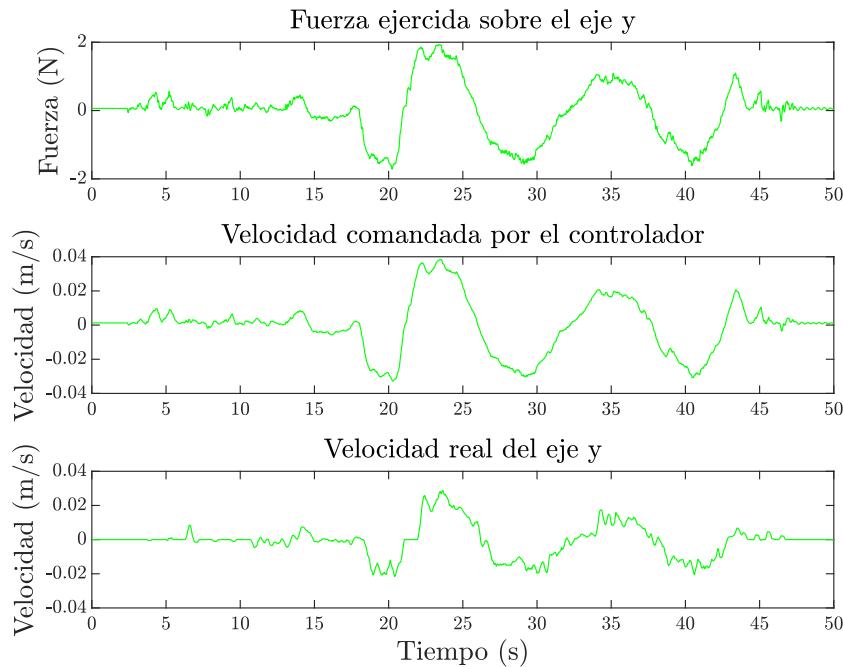


Figura 4.12: Gráfica donde se aprecia el comportamiento del sistema en el eje y, teniendo en cuenta que existe una baja admitancia en el eje z.

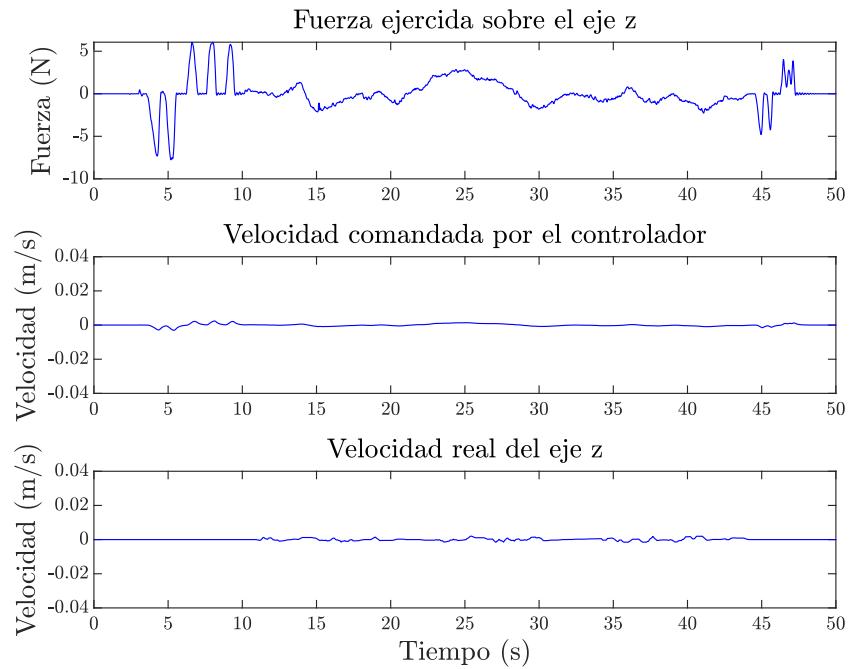


Figura 4.13: Gráfica donde se aprecia el comportamiento del sistema en el eje z, siendo en este eje donde se aplica una baja admitancia.

circunferencias dibujadas a mano. El objetivo de este experimento es comprobar que, utilizando este controlador, el efecto final puede desplazarse con facilidad sobre un plano. Sin embargo, es importante señalar que, de haberse realizado el movimiento con una máquina, el resultado habría sido considerablemente más preciso, y las siluetas de las dos figuras habrían sido más nítidas y definidas.

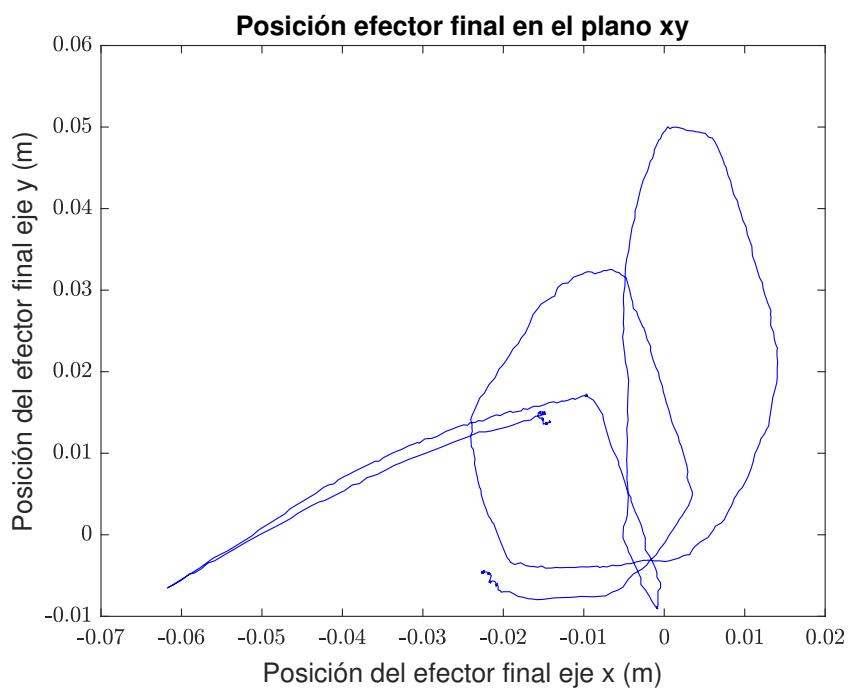


Figura 4.14: Gráfica que muestra la evolución de la posición del efector final sobre el plano xy.

Conclusiones

En este capítulo se revisan los objetivos planteados a lo largo del proyecto y se evalúa si se cumplen de manera satisfactoria. Se analiza si el control de admitancia adaptativo diseñado para un manipulador delta de 3 grados de libertad tiene la capacidad de implementarse en manipuladores de hasta 6 grados de libertad. También se examina la integración de un sensor de fuerza personalizado y si su rendimiento cumple con las necesidades del modelo. Por último, se proponen mejoras, como la inclusión de un sensor de pares y la realización de experimentos más complejos en entornos reales o simulados, con el fin de ampliar las aplicaciones del controlador.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

A lo largo de este Trabajo de Fin de Grado, se han cumplido los objetivos propuestos, consiguiendo los resultados esperados en cada una de las áreas de desarrollo.

En primer lugar, se ha diseñado, fabricado y calibrado un sensor de fuerza de 3 grados de libertad. Tras el montaje y la calibración mediante un manipulador industrial, se ha demostrado que el sensor funciona correctamente y ofrece lecturas precisas de fuerza. Asimismo, se ha desarrollado un diagrama de comunicación en ROS, garantizando un intercambio de información entre los distintos dispositivos del sistema. Otro logro ha sido la integración del sensor de fuerzas en el framework del manipulador. Mediante la utilización de rosserial se ha conseguido una conexión estable y eficiente entre el sensor y el manipulador delta. Además se ha cumplido con éxito el desarrollo de un control de admitancia adaptable, en el que se pueden cambiar los parámetros del controlador de forma online. En este caso, el control desarrollado se puede implementar en manipuladores de 6 grados de libertad. Por último, se han llevado a cabo simulaciones que verifican el correcto funcionamiento del controlador, y que han permitido comprobar la capacidad del controlador para ajustar sus parámetros en tiempo real.

Durante el desarrollo del proyecto, se ha ampliado el conocimiento de distintas herramientas y tecnologías que han permitido avanzar en las diferentes áreas técnicas. Se ha profundizado en la programación utilizando C++ y en el control de sistemas robóticos mediante ROS. Así como en el uso de Simulink y Matlab para realizar simulaciones y análisis de sistemas dinámicos. Además, se ha aprendido a utilizar herramientas de modelado CAD, como Onshape. Otra competencia relevante adquirida ha sido el desarrollo del entorno Arduino IDE, programando un microcontrolador que se implementa en el hardware del proyecto. Asimismo, se ha obtenido experiencia práctica en la soldadura de placas y en la manipulación de componentes electrónicos.

Este aprendizaje es el resultado de un conocimiento previo obtenido en el Grado en Electrónica, Robótica y Mecatrónica:

- **1º curso:** Informática, Expresión gráfica y Física I.
- **2º curso:** Fundamentos de control, Teoría de circuitos, Fundamentos de electrónica y Electrónica general.
- **3º curso:** Proyectos integrados, Sistemas electrónicos y Fundamentos de robótica.
- **4º curso:** Sistemas embebidos, Instrumentación electrónica y control y Robótica y automatización.

Este proyecto, pese a haber logrado cumplir con los objetivos impuestos, presenta un amplio margen de mejora. La primera mejora sería el diseño de un nuevo sensor capaz de medir pares en el efecto final, lo cual permitiría implementar el control de admitancia desarrollado para 6 grados de libertad. Otra línea de mejora sería implementar el control de admitancia en un manipulador de 6 grados de libertad, y comprobar la precisión del controlador. En el apartado de experimentación, se podría profundizar en el desarrollo de nuevos experimentos más realistas, tales como pintar

una pared, lijado de muebles, realizar agujeros, abrir puertas, etc. Estas pruebas permitirían validar el controlador en situaciones prácticas. Otra propuesta podría ser cambiar los motores a una versión más actualizada, y visualizar los cambios en la respuesta del sistema. Por último, una propuesta innovadora sería la realización de experimentos donde el manipulador sea transportado por un dron de grandes dimensiones en el exterior. Permitiendo analizar la respuesta del sistema en entornos no controlados.

Bibliografía

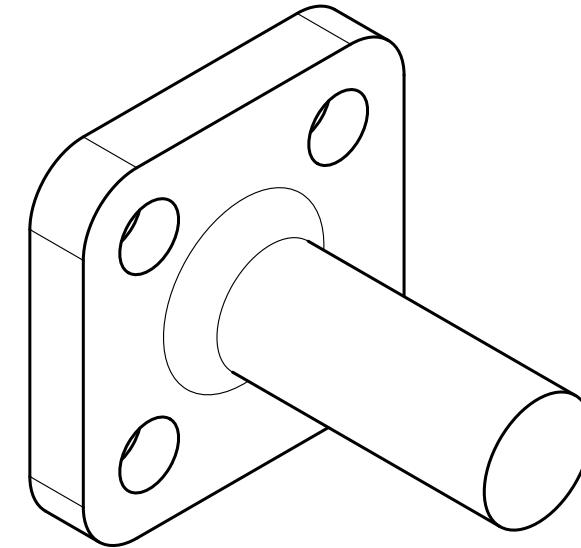
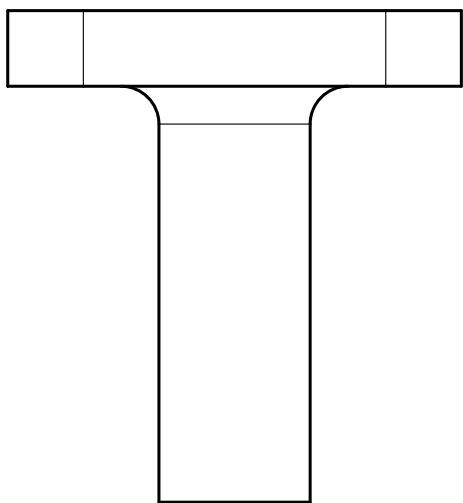
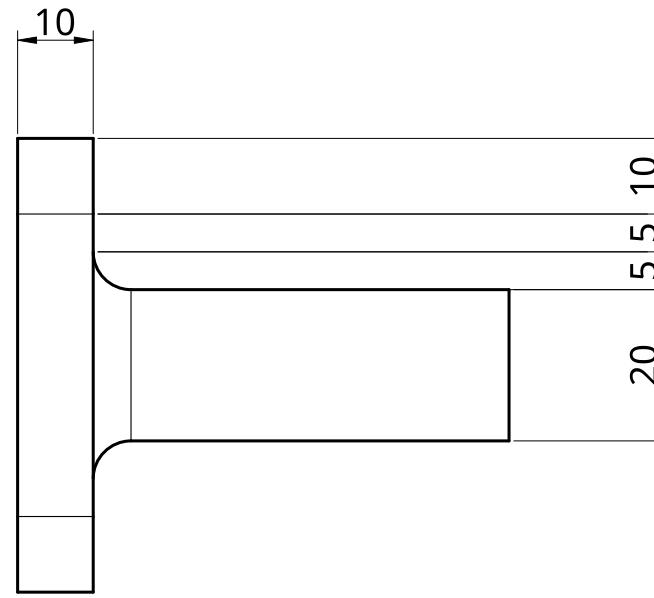
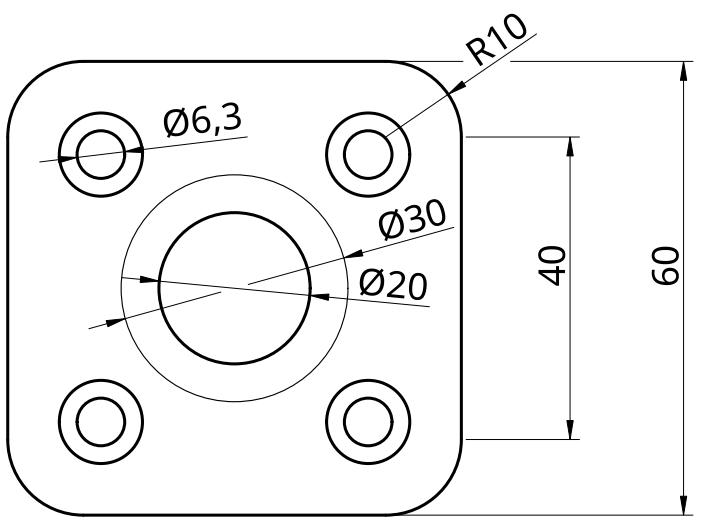
- [1] G. M. Whitesides, “Soft robotics,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 57, no. 16, pp. 4258–4273, 2018.
- [2] K. J. Åström and T. Hägglund, “Pid control,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 1066, 2006.
- [3] R. Masuda and K. Hasegawa, “Control method of industrial robot hand by force signal feedback,” *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol. 10, no. 4, pp. 500–506, 1974.
- [4] R. M. Murray, Z. Li, and S. S. Sastry, *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC Press, 2017.
- [5] S. Dubowsky and D. T. DesForges, “The application of model-referenced adaptive control to robotic manipulators,” 1979.
- [6] J. de Carufel and D. S. Neculescu, “Impact/contact model for the control of mechanical systems in contact motion,” *WIT Transactions on Engineering Sciences*, vol. 7, 1970.
- [7] P. A. Ioannou and J. Sun, “Robust adaptive control,” in *American control conference*, no. 21, 1984, pp. 1574–1578.
- [8] P. S. R. Diniz, *Adaptive filtering*. Springer, 1997, vol. 4.
- [9] N. Hogan, “Impedance control: An approach to manipulation: Part ii—implementation,” 1985.
- [10] G. D. Glosser and W. S. Newman, “The implementation of a natural admittance controller on an industrial manipulator,” in *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1994, pp. 1209–1215.
- [11] F. Caccavale, C. Natale, B. Siciliano, and L. Villani, “Six-dof impedance control based on angle/a-axis representations,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 2, pp. 289–300, 1999.
- [12] H. Krebs, B. Volpe, M. Aisen, and N. Hogan, “Robotic applications in neuromotor rehabilitation,” *Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation*, vol. 5, no. 3, pp. 50–63, 1999.

- [13] S. Jezernik, A. Pfister, H. Frueh, G. Colombo, and M. Morari, “Robotic orthosis lokomat: its use in the rehabilitation of locomotion and in the development of the biology-based neural controller,” in *Annual IFESS conference, Ljubljana*, 1999, pp. 301–303.
- [14] A. De Luca and R. Mattone, “Sensorless robot collision detection and hybrid force/motion control,” in *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 2005, pp. 999–1004.
- [15] J. De Schutter, J. Rutgeerts, E. Aertbelien, F. De Groote, T. De Laet, T. Lefebvre, W. Verdonck, and H. Bruyninckx, “Unified constraint-based task specification for complex sensor-based robot systems,” in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2005, pp. 3607–3612.
- [16] A. Albu-Schäffer, C. Ott, and G. Hirzinger, “A unified passivity-based control framework for position, torque and impedance control of flexible joint robots,” *The international journal of robotics research*, vol. 26, no. 1, pp. 23–39, 2007.
- [17] C. Ott, R. Mukherjee, and Y. Nakamura, “Unified impedance and admittance control,” in *2010 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 2010, pp. 554–561.
- [18] A. I. A. Ahmed, H. Cheng, A. R. Abdalla, and G. Hongliang, “Modified admittance control for maneuverable human-powered augmentation lower exoskeleton systems,” in *2017 2nd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*, 2017, pp. 7–12.
- [19] S. Wolf, T. Bahls, M. Chalon, W. Friedl, M. Grebenstein, H. Höppner, M. Kühne, D. Lakatos, N. Mansfeld, M. C. Özparpucu *et al.*, “Soft robotics with variable stiffness actuators: Tough robots for soft human robot interaction,” in *Soft Robotics: Transferring Theory to Application*. Springer, 2015, pp. 231–254.
- [20] H. Li, X. Nie, D. Duan, Y. Li, J. Zhang, M. Zhou, and E. Magid, “An admittance-controlled amplified force tracking scheme for collaborative lumbar puncture surgical robot system,” *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 18, no. 5, p. e2428, 2022.
- [21] A. Topini, W. Sansom, N. Secciani, L. Bartalucci, A. Ridolfi, and B. Allotta, “Variable admittance control of a hand exoskeleton for virtual reality-based rehabilitation tasks,” *Frontiers in neurorobotics*, vol. 15, p. 789743, 2022.
- [22] A. Suarez, D. Leite, and R. Valero, “Admittance control in aerial manipulation using uavs,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 3012–3019, 2022.
- [23] J. Gu, X. Wang, and W. Liu, “Aerial manipulation with admittance control in unstructured environments,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 116, pp. 44–55, 2019.

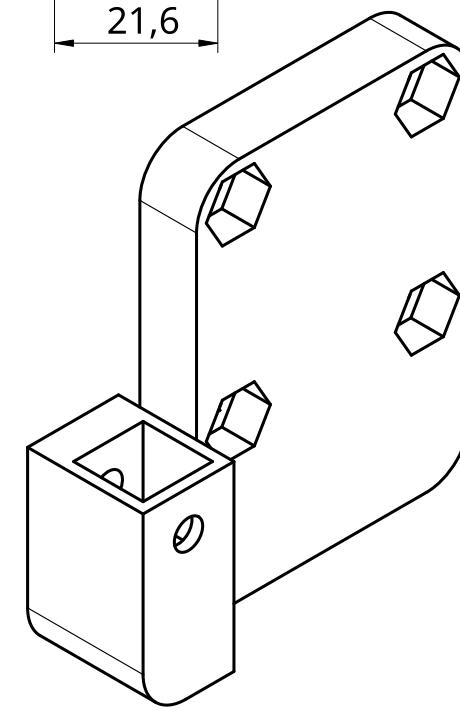
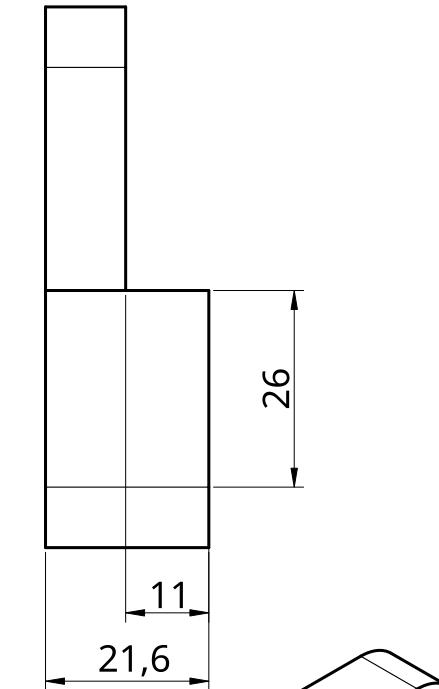
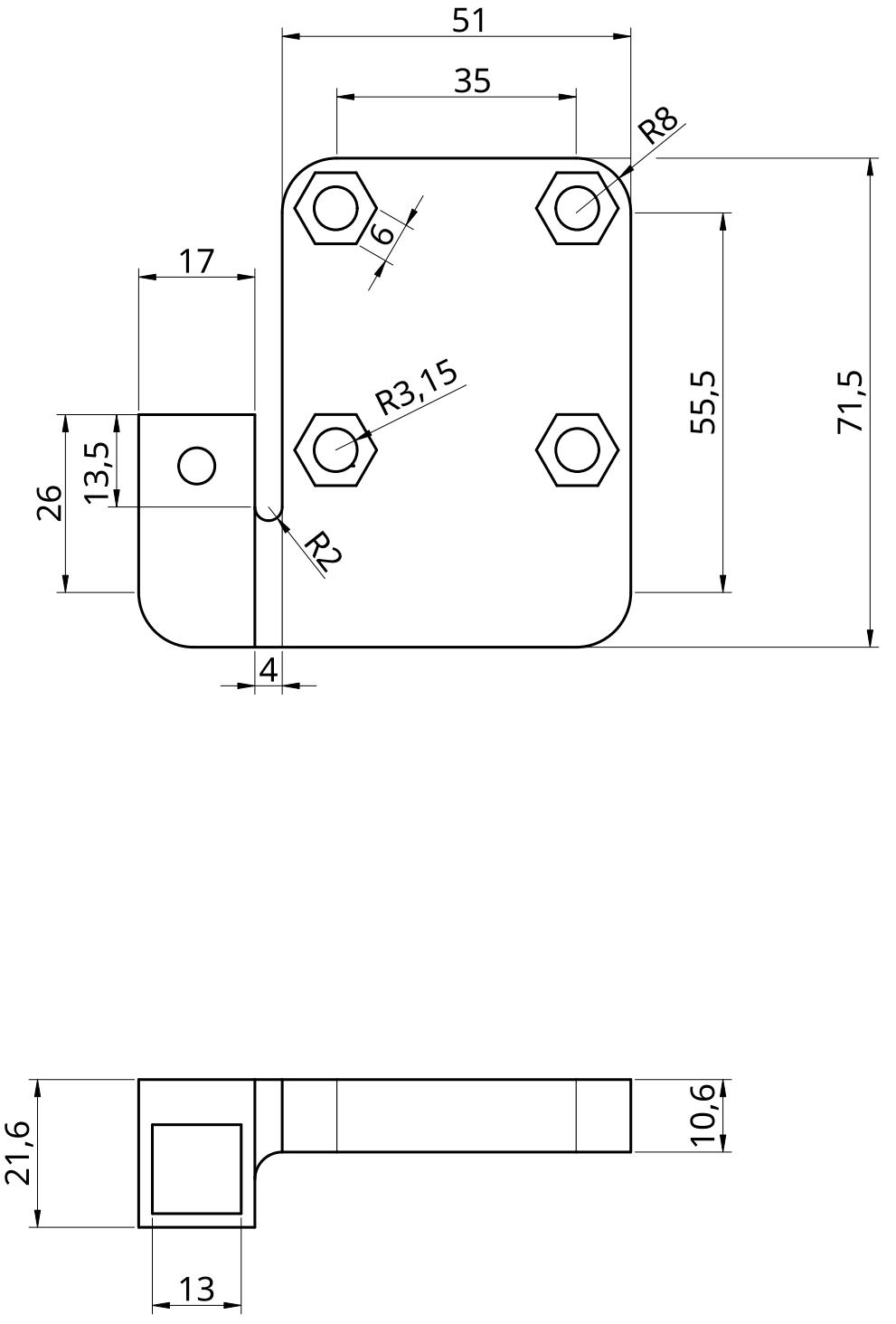
- [24] X. Feng and L. Liu, “Admittance control for quadcopters with a robotic arm,” in *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2018, pp. 3278–3283.
- [25] Y. Zhang, J. Zhang, and J. Wu, “Hybrid control strategies for aerial manipulators with admittance and force sensing,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 37, no. 4, pp. 1053–1068, 2021.
- [26] A. Beyeler and D. Floreano, “Dynamic modeling and control of aerial manipulators for precise tasks,” in *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2016, pp. 4315–4321.
- [27] J. Kim and J. Choi, “Adaptive admittance control for aerial manipulators: Theory and practice,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 133, p. 103663, 2020.
- [28] M. Sharifzadeh, M. T. Masouleh, and A. Kalhor, “Design, construction & calibration of a novel human-robot interaction 3-dof force sensor,” in *2015 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*. IEEE, 2015, pp. 182–187.

Anexo A

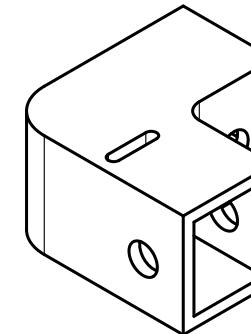
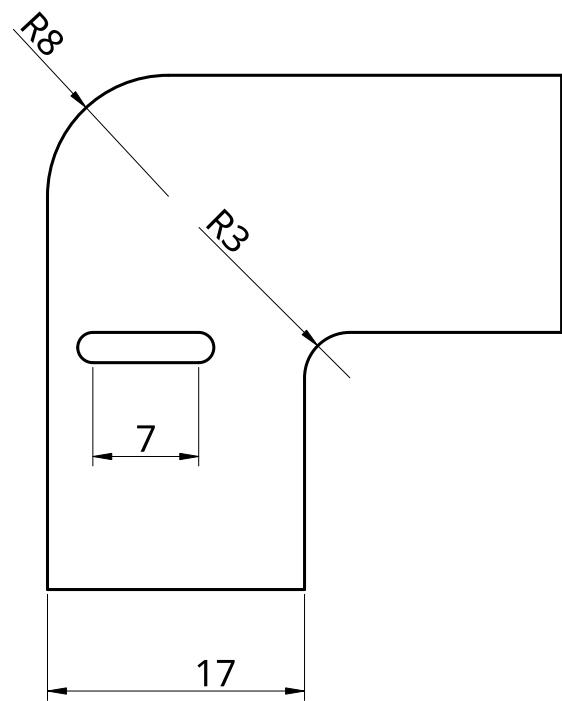
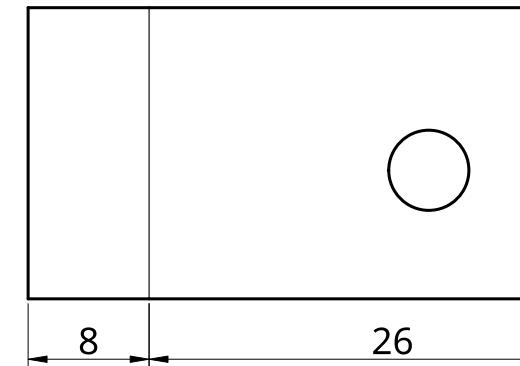
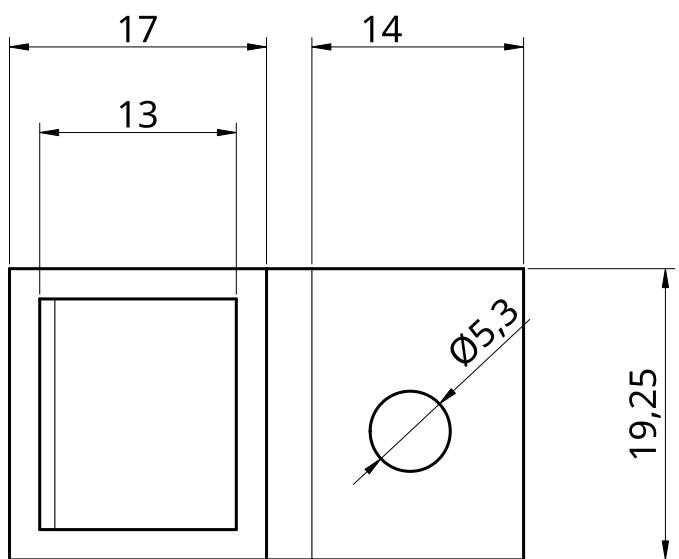
En este anexo se presentan los planos de cada una de las piezas del modelo CAD del sensor de fuerzas.



Escuela de Ingenierías Industriales	Universidad de Málaga	
Apellidos: Rosillo Suero	Curso: 2024/25	
Nombre: Víctor	D.N.I: 54202532L	Fecha: 7/10/2024
Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica		
Asignatura: Trabajo Fin de Grado		
TÍTULO: Efector final	Escala: 2:1	Firma:

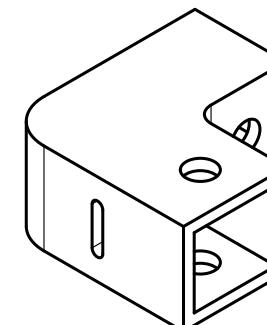
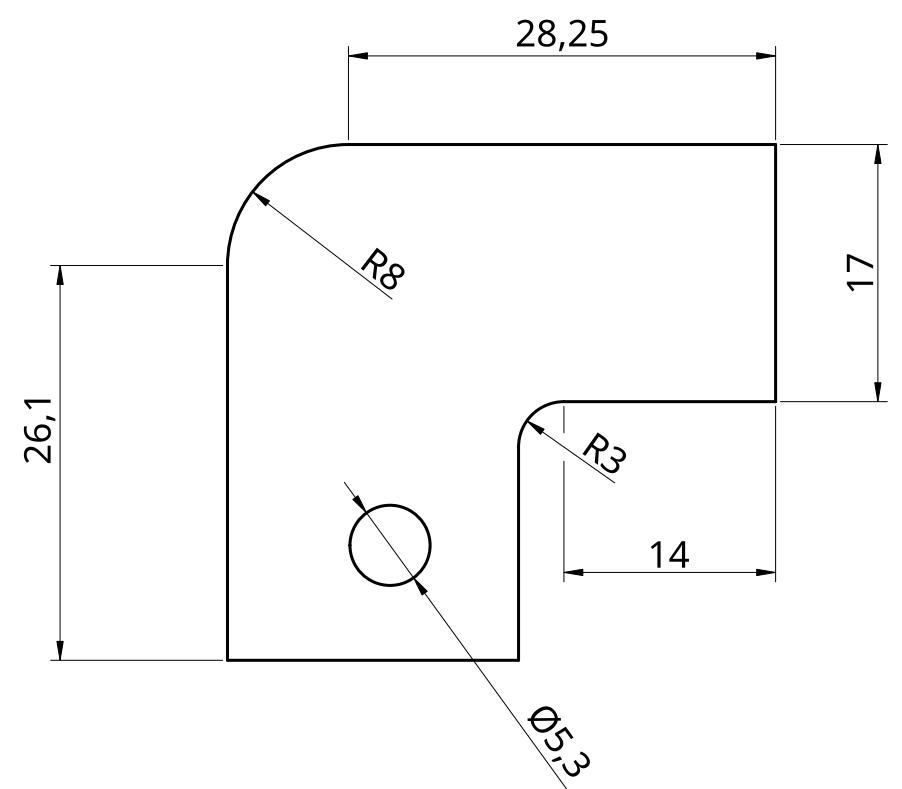
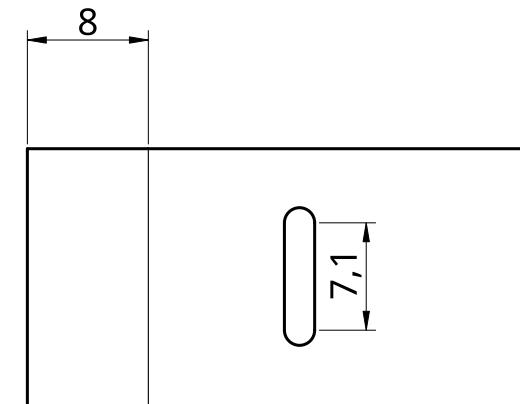
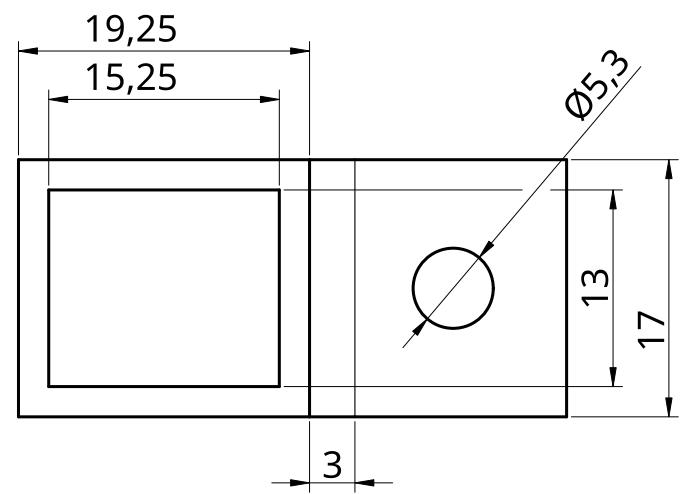


Escuela de Ingenierías Industriales	Universidad de Málaga
Apellidos: Rosillo Suero	Curso: 2024/25
Nombre: Víctor	D.N.I: 54202532L
Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica	
Asignatura: Trabajo Fin de Grado	
TÍTULO:	Escala: 2:1
Soporte móvil	



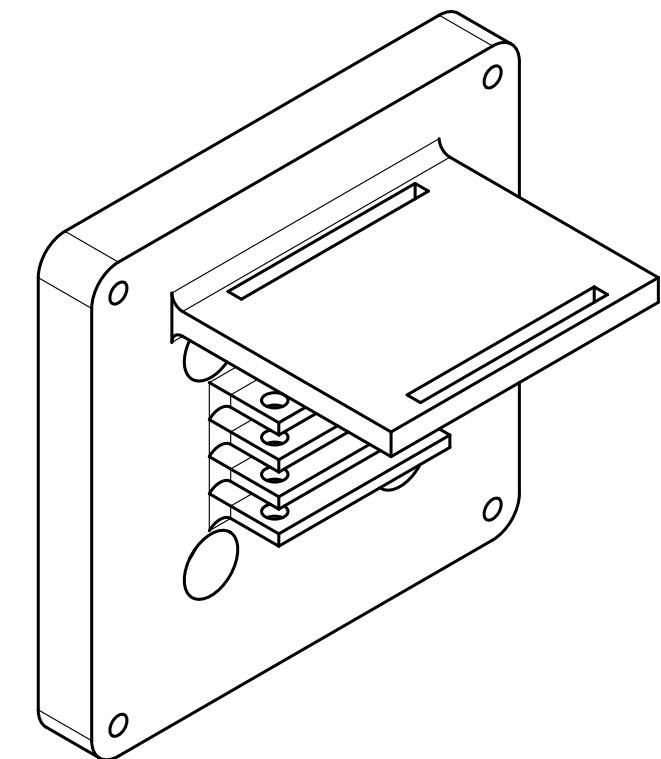
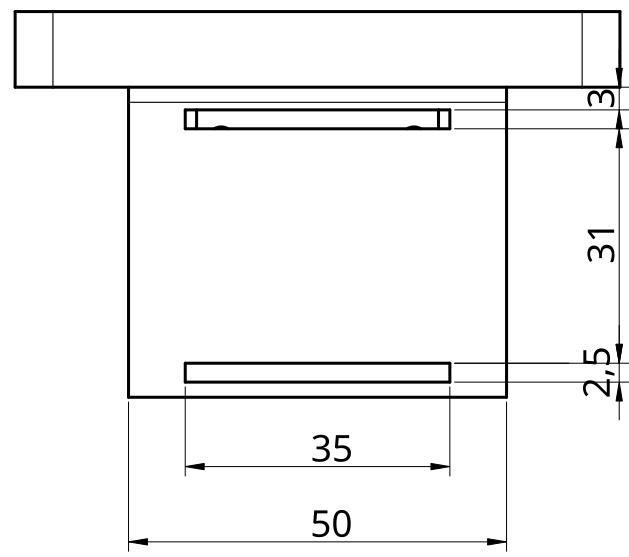
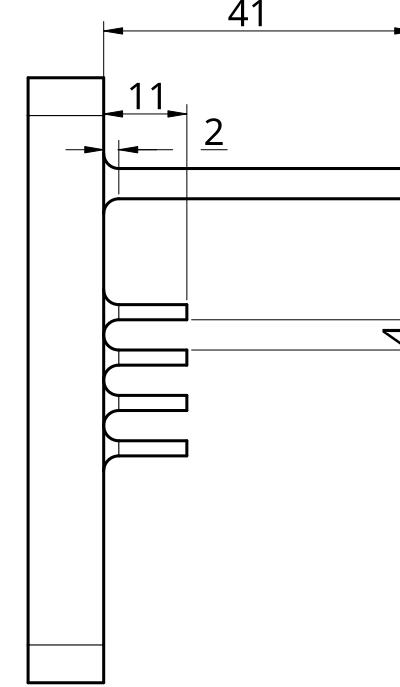
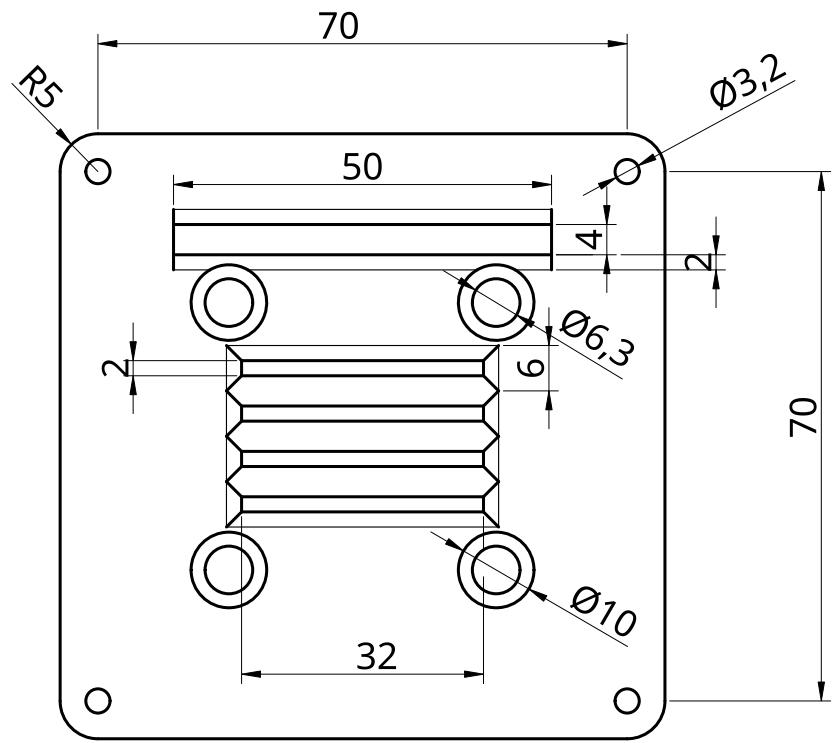
1:1

Escuela de Ingenierías Industriales	Universidad de Málaga	
Apellidos: Rosillo Suero	Curso: 2024/25	
Nombre: Víctor	D.N.I: 54202532L	Fecha: 7/10/2024
Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica		
Asignatura: Trabajo Fin de Grado		
TÍTULO:	Escala:	Firma:
Unión eje y móvil, eje x fijo		2:1

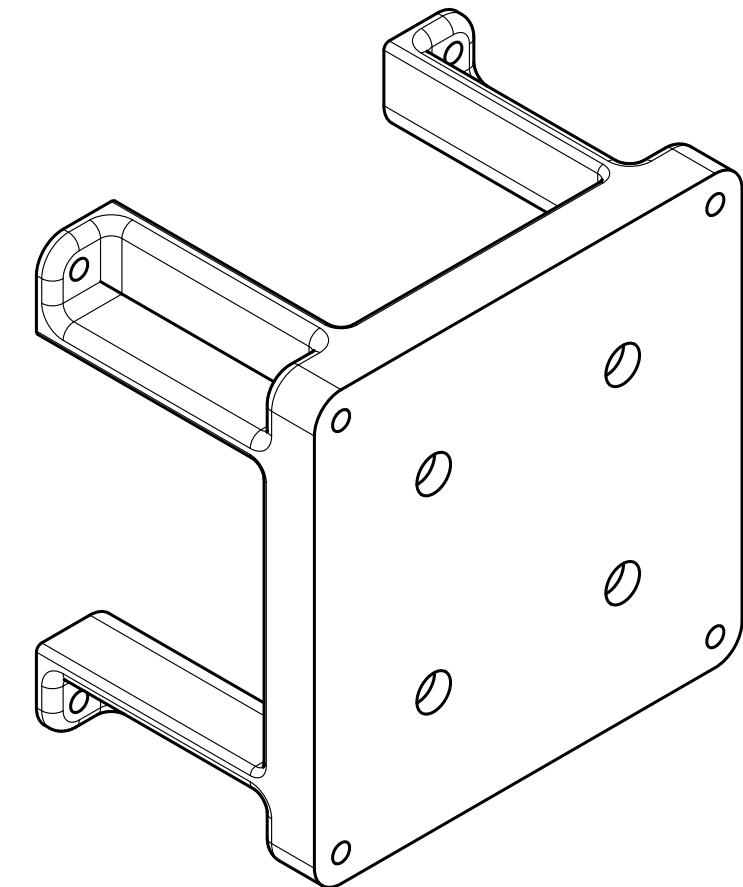
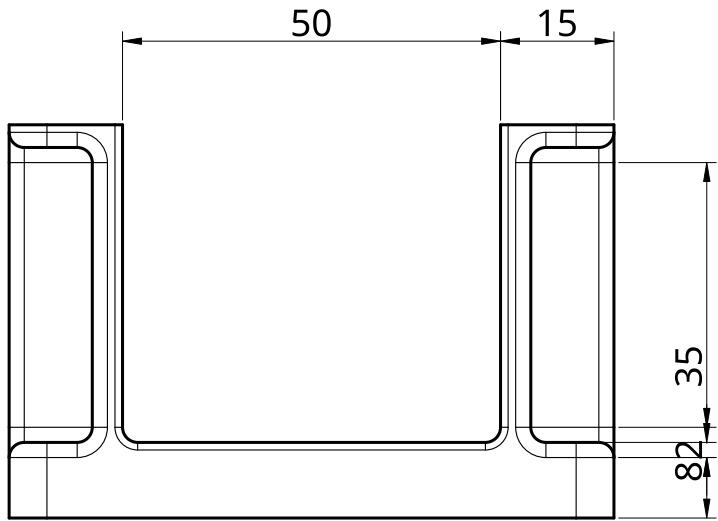
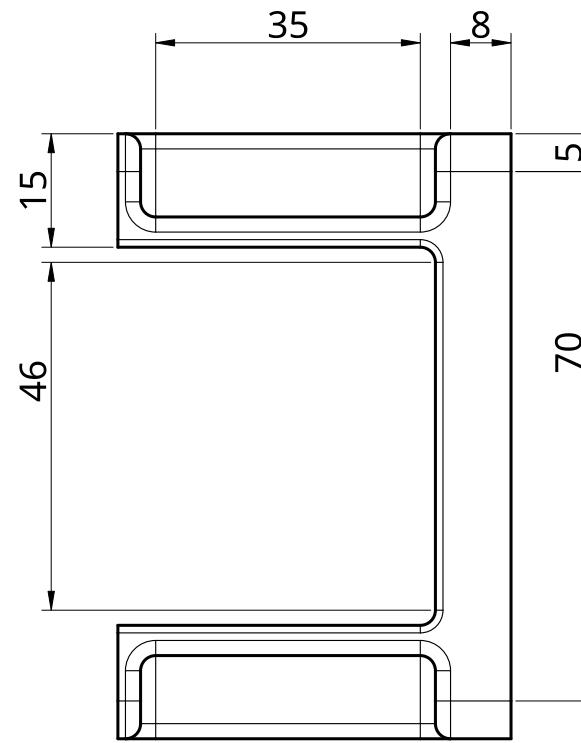
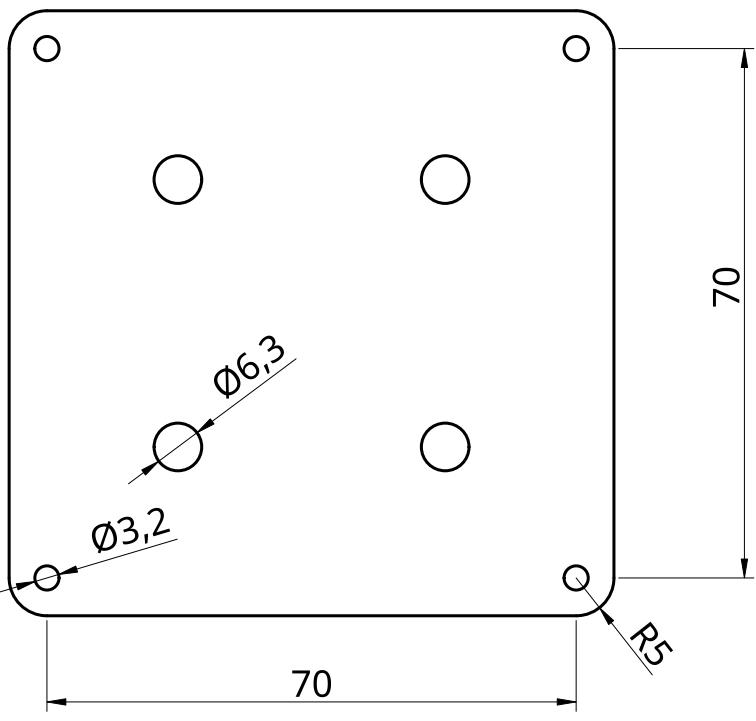


1:1

Escuela de Ingenierías Industriales	Universidad de Málaga	
Apellidos: Rosillo Suero	Curso: 2024/25	
Nombre: Víctor	D.N.I: 54202532L	Fecha: 7/10/2024
Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica		
Asignatura: Trabajo Fin de Grado		
TÍTULO:	Escala:	Firma:
Unión eje x móvil, eje z fijo		2:1



Escuela de Ingenierías Industriales	Universidad de Málaga
Apellidos: Rosillo Suero	Curso: 2024/25
Nombre: Víctor	D.N.I: 54202532L
Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica	
Asignatura: Trabajo Fin de Grado	
TÍTULO:	Escala:
Soporte para microcontrolador y amplificadores	
2:1	



Escuela de Ingenierías Industriales	Universidad de Málaga	
Apellidos: Rosillo Suero	Curso: 2024/25	
Nombre: Víctor	D.N.I: 54202532L	Fecha: 7/10/2024
Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica		
Asignatura: Trabajo Fin de Grado		
TÍTULO:	Escala:	Firma:
Unión del sensor con el manipulador		2:1

