

Diseño y Validación de un Sistema de Control de Fuerza en la Reproducción de Movimientos

Básicos de la Mano

Ingrid Yurany Rangel Alvarado, Jennifer Alejandra Avellaneda Ojeda y

Juan Sebastián López Escobar

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Rodolfo Villamizar Mejía

Doctor en Tecnologías de la Información

Codirector

William Razvan Castro Jaluba

Magíster en Ingeniería Electrónica (C)

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Doy gracias a Dios por permitir ser parte de la UIS y culminar esta etapa de mi vida. A mis padres Diana, Angel, Ricardo y Berta infinitas gracias por el impulso, comprensión y apoyo emocional. A mis hermanos, familiares y amigos, gracias por las sonrisas, apoyo y hacer de esta meta cumplida un resultado de todos

Ingrid Yurany Rangel Alvarado

A Dios forjador de mi camino, mi amigo y confidente por darme fortaleza e inteligencia para culminar satisfactoriamente un nuevo logro en mi vida. A la personas mas especiales que tengo en mi vida mi familia, pero sobre todo a mi papá Manuel y mi mamá Jeanne quienes con su gran esfuerzo, dedicación y apoyo en cada instante de mi vida han logrado hacer de mi una persona que lucha por sus sueños y no se rinde tan fácilmente. A Yiyin y amigas por ser mi apoyo emocional y siempre tener un consejo o una palabra de aliento en los momentos mas difíciles.

Jennifer Alejandra Avellaneda Ojeda

A mis padres Jaime y Diana por su confianza y apoyo durante el desarrollado de mi carrera profesional, a mis hermanos por su fraternidad y guía en el desarrollo de mi vida, a mis profesores que encendieron en mi luz para el planteamiento y consecución de objetivos académicos y profesionales. Una dedicatoria muy especial a Martin A. Escobar Montero, ser de luz que me acompaña desde una mejor vida, ser que con su ejemplo de vida me enseñó que con trabajo duro podía seguir mis anhelos.

Juan Sebastián López Escobar

Agradecimientos

Primeramente, queremos agradecerle a Dios por permitirnos enfrentarnos a nuevos retos, pero sobre todo por darnos salud, vida, inteligencia, conocimiento y sabiduría para poder desarrollar con satisfacción. A nuestros padres por los valores y principios que nos infundaron, porque gracias a ello no nos rendimos en primer bache, por su apoyo emocional y confianza a lo largo de la carrera. A nuestros amigos y compañeros por los consejos y palabras de ánimo en los momentos donde más lo necesitábamos.

Un reconocimiento y agradecimiento especial a nuestro director Rodolfo Villamizar por su tiempo, disposición y conocimiento ante la guía del desarrollo del proyecto. A nuestro codirector William Razvan Castro Jaluba por potencializar las capacidades y habilidades de cada uno, con sus enseñanzas a lo largo de la carrera universitaria, para desarrollarnos tanto profesional como personalmente de la mejor manera.

Finalmente, agradecemos a la Universidad industrial de Santander, por abrirnos sus puertas, ofrecernos oportunidades para la adquisición de nuevos conocimientos y experiencias que nos fortalecen en el crecimiento como profesionales, como también mejorar nuestras habilidades blandas.

Tabla de Contenido

Introducción	16
1. Objetivos	17
1.1. Objetivo general	17
1.2. Objetivos específicos	17
2. Marco conceptual y antecedentes	18
2.1. Exoesqueleto	18
2.2. Movimientos básicos de la mano	20
2.2.1. Agarres de fuerza	20
2.2.2. Agarres de precisión	21
2.3. Estrategias de control	22
2.3.1. Control de posición-velocidad	23
2.3.2. Control híbrido de posición-velocidad y fuerza	24
2.4. Identificación de sistemas dinámicos	26
2.4.1. Modelado de caja negra	26
2.4.1.1. Estructura Box-Jenkins	27
2.5. Sensor de fuerza	28

3. Metodología	33
3.1. Diseño General	33
3.1.1. Sistema mecánico	33
3.1.2. Microcontrolador Utilizado: Arduino Mega 2560	35
3.1.3. Actuadores	36
3.1.4. Elemento sensor de fuerza	39
3.1.5. Sistema de alimentación	43
3.1.6. Diseño tarjeta electrónica	44
3.1.7. Integración del diseño	45
3.2. Modelo Dinámico	47
3.2.1. Experimento	49
3.2.2. Sistema de control de fuerza	54
3.2.2.1. Controlador Proporcional	54
3.2.2.2. Controlador de Atraso	56
4. Resultados	58
4.1. Resultados experimentales de los controladores diseñados	59
4.1.1. Control Proporcional	59
4.1.2. Controlador de Atraso	63
4.2. Comportamiento de la fuerza del dedo índice con el control de atraso	69
5. Conclusiones	72

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE FUERZA EN LA REPRODUCCIÓN DE MOVIMIENTOS BÁSICOS DE LA MANO	6
6. Recomendaciones	74
Referencias Bibliográficas	75
Apéndices	79

Lista de Figuras

Figura 1.	<i>Sistema de exoesqueleto con distintas estructuras y actuadores.</i>	19
Figura 2.	<i>Exoesqueleto robótico para rehabilitación de mano.</i>	20
Figura 3.	<i>Clasificación de los patrones funcionales. Agarres de fuerza.</i>	21
Figura 4.	<i>Clasificación de los patrones funcionales: Agarre de precisión.</i>	22
Figura 5.	<i>Sistema de Control Proporcional.</i>	24
Figura 6.	<i>Diagrama de bloques del control híbrido posición-velocidad y fuerza.</i>	25
Figura 7.	<i>Proceso de estimación Box-Jenkins.</i>	27
Figura 8.	<i>Diagrama de caja negra.</i>	28
Figura 9.	<i>Vista superior del Sensor FSR-402.</i>	29
Figura 10.	<i>Método de medición para sensado de fuerza.</i>	30
Figura 11.	<i>Curva de caracterización resistencia vs Fuerza del FSR-402.</i>	31
Figura 12.	<i>Curva característica de sensores ante distintas resistencias de ajuste.</i>	31
Figura 13.	<i>Esquema general del dispositivo construido.</i>	33
Figura 14.	<i>Sistema de flexión del exoesqueleto.</i>	34
Figura 15.	<i>Diseño del exoesqueleto.</i>	34
Figura 16.	<i>Microcontrolador Arduino Mega AT2560.</i>	35
Figura 17.	<i>Desplazamiento del actuador lineal.</i>	37
Figura 18.	<i>Sistema para caracterizar el actuador lineal.</i>	37

Figura 19.	<i>Comportamiento del actuador lineal ante distintos k_p.</i>	38
Figura 20.	<i>Comparación del modelo identificado $H(s)_{cl}$ con el modelo experimental, ante un $k_p=0.7$.</i>	39
Figura 21.	<i>Configuración mecánica para medición de fuerza.</i>	40
Figura 22.	<i>Estructuras para la caracterización del sensor de fuerza.</i>	41
Figura 23.	<i>Curva de caracterización de tensión vs masa del sensor de fuerza fsr-402.</i>	42
Figura 24.	<i>Curvas características experimentales del sensor de fuerza.</i>	43
Figura 25.	<i>Tarjeta electrónica diseñada.</i>	45
Figura 26.	<i>PCBs.</i>	46
Figura 27.	<i>Exoesqueleto con modificaciones.</i>	47
Figura 28.	<i>Objetos experimentales para agarre de fuerza.</i>	48
Figura 29.	<i>Capacidad de deformación de los objetos utilizados.</i>	48
Figura 30.	<i>Adaptación del sensor FSR al exoesqueleto.</i>	49
Figura 31.	<i>Repuesta experimental del sistema de fuerza en lazo abierto para cada objeto.</i>	50
Figura 32.	<i>Repuesta al escalón de los sistemas identificados y media en lazo abierto.</i>	52
Figura 33.	<i>Respuesta al escalón de las medias de los sistemas identificados.</i>	53
Figura 34.	<i>Ganancia en el que el sistema se hace inestable.</i>	54
Figura 35.	<i>Simulación de control proporcional para distintas referencias de fuerza y k_p.</i>	55
Figura 36.	<i>Simulación controlador de atraso.</i>	56
Figura 37.	<i>Diagrama de bloques en simulink del sistema.</i>	57
Figura 38.	<i>Simulación controlador de atraso ante distintas referencias.</i>	57

Figura 39.	<i>Flujograma de control.</i>	58
Figura 40.	<i>Comportamiento de la acción de control proporcional.</i>	60
Figura 41.	<i>Respuesta del sistema de control de fuerza con controlador proporcional ante el agarre del objeto 1.</i>	61
Figura 42.	<i>Respuesta del sistema de control de fuerza con controlador de atraso ante el agarre del objeto 1.</i>	64
Figura 43.	<i>Respuesta del sistema de control de fuerza con controlador de atraso ante el agarre del objeto 2.</i>	65
Figura 44.	<i>Respuesta del sistema de control de fuerza con controlador de atraso ante el agarre del objeto 3.</i>	66
Figura 45.	<i>Posición del actuador ante el agarre del objeto 3.</i>	67
Figura 46.	<i>Respuesta del sistema en dedo Índice para el controlador de Atraso para 6 [N].</i>	69
Figura 47.	<i>Respuesta del sistema en dedo Índice para el controlador de Atraso para 9 [N].</i>	70
Figura 48.	<i>Respuesta del sistema para el objeto 1.</i>	79
Figura 49.	<i>Respuesta del sistema para el objeto 2.</i>	80
Figura 50.	<i>Respuesta del sistema para el objeto 3.</i>	81
Figura 51.	<i>Respuesta del sistema para el objeto 1.</i>	82
Figura 52.	<i>Respuesta del sistema para el objeto 2.</i>	83

Figura 53. *Respuesta del sistema para el objeto 3.* 84

Lista de Tablas

Tabla 1.	Algoritmos de control utilizados en prótesis de miembro superior.	23
Tabla 2.	Ventajas y desventajas de los sensores de fuerza FSR.	29
Tabla 3.	Especificaciones del sensor de fuerza fsr-402.	32
Tabla 4.	Consumo máximo de corriente del sistema electrónico.	44
Tabla 5.	Función de transferencia estimada para cada objeto.	51
Tabla 6.	Condiciones para comprobación del controlador proporcional ante la presión del objeto 1.	60
Tabla 7.	Índices de desempeño del controlador proporcional ante la presión del objeto 1.	62
Tabla 8.	Índices de desempeño del controlador de atraso ante la presión de los distintos objetos.	67

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Respuesta del sistema en el dedo anular	79
Apéndice B. Video de la validación experimental	85

Glosario

Controlar corresponde a la acción ejercida cuando se aplica la variable manipulada al sistema, para que la variable controlada que se mide, corrija su valor respecto al deseado.

Proceso “ El Diccionario Merriam-Webster define un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden unos a otros de una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados”(Ogata, 2003, p.3).

Planta “parte de un equipo o un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular” (Ogata, 2003, p.3).

Sistema combinación de un conjunto de elementos o componentes que trabajan juntos para cumplir con un objetivo.

Variable Controlada “cantidad o condición que se mide y controla”(Ogata, 2003, p.3).

Variable Manipulada “es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada”(Ogata, 2003, p.3).

Resumen

Título: Diseño y validación de un sistema de control de fuerza en la reproducción de movimientos básicos de la mano. ¹

Autores: Jennifer Alejandra Avellaneda Ojeda, Ingrid Yurany Rangel Alvarado y Juan Sebastián López Escobar. ²

Palabras Clave: control de fuerza, mano, exoesqueleto

Descripción: En este documento se plantea el diseño y validación de un sistema de control de fuerza, para un dispositivo que reproduzca los movimientos básicos de la mano, correspondientes a los agarres de fuerza. Se propone este proyecto con el fin de mejorar el desempeño dinámico de los dispositivos, perfeccionando su funcionalidad y naturalidad en la reproducción de los movimientos de la mano. Como punto de partida, se toma un exoesqueleto previamente construido en la UIS capaz de reproducirlos. Posteriormente, se realiza la selección de los elementos que constituyen el sistema de control, como lo son controlador implementado en la placa de adquisición de datos, actuador para la transmisión del movimiento y sensor para la medición de la fuerza. Luego se caracteriza el sistema de Tensión-fuerza, a partir de los datos obtenidos del sensor de fuerza ubicado en el dedo medio. Para obtener la dinámica del sistema, se emplea el método de caja negra, con la finalidad de obtener un modelo para la sintonización del controlador.

Por último, se evalúa el desempeño dinámico del sistema de control de fuerza, implementándolo en el exoesqueleto. En este se aplica una serie de fuerzas para cada movimiento de la mano y se analiza la respuesta temporal obtenida para medir el error de seguimiento de la fuerza que presenta el sistema.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director:Rodolfo Villamizar Mejía. Codirector: William Razvan Jaluba.

Abstract

Title: Design and validation of a force control system in the reproduction of basic movements of the hand.³

Author: Jennifer Alejandra Avellaneda Ojeda ,Ingrid Yurany Rangel Alvarado y Juan Sebastián López Escobar. ⁴

Keywords: force control, hand, exoskeleton

Description: This document proposes the design and validation of a force control system, for a device that reproduces the basic movements of the hand, corresponding to the force grips. This project is proposed in order to improve the dynamic performance of the devices, perfecting their functionality and naturalness in the reproduction of hand movements. As a starting point, an exoskeleton previously built in the UIS capable of reproducing them is taken. Subsequently, the selection of the elements that constitute the control system is made, such as controller implemented in the data acquisition board, actuator for the transmission of movement and sensor for the measurement of force. Then the Voltage-force system is characterized, from the data obtained from the force sensor located on the middle finger. To obtain the dynamics of the system, the black box method is used, in order to obtain a model for the tuning of the controller.

Finally, the dynamic performance of the force control system is evaluated, implementing it in the exoskeleton. In this, a series of forces are applied for each movement of the hand and the temporal response obtained is analyzed to measure the error of tracking the force presented by the system.

³ Bachelor Thesis

⁴ Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director:Rodolfo Villamizar Mejía. Codirector: William Razvan Castro Jaluba.

Introducción

A lo largo del tiempo, ha existido un interés importante en el desarrollo tecnológico orientado a recuperar en las personas la funcionalidad de alguna extremidad sin o con baja movilidad. Actualmente, existen diversas propuestas tecnológicas para reproducir movimientos básicos de la mano, con el fin de sustituir o rehabilitar el miembro superior afectado. Estas tecnologías son adaptables, compactas y fáciles de manipular, lo que facilita las rutinas diarias. Sin embargo, teniendo en cuenta que requieren un proceso de aprendizaje para su manejo, este tipo de dispositivos requieren una reproducción adecuada de la posición, velocidad y fuerza deseada. Por consiguiente, en este trabajo se abordó de manera experimental el control en lazo cerrado de la fuerza deseada para diferentes tipos de movimientos a una velocidad constante.

Específicamente, en este proyecto se identificó un modelo, diseñó y validó el sistema de control de fuerza en lazo cerrado, sobre un dispositivo capaz de reproducir los movimientos básicos de la mano, denominado exoesqueleto. Como parte de la metodología, se establecieron y seleccionaron los elementos de lazo abierto para el control de fuerza de este. Lo cual, logró mejorar el desempeño dinámico de los movimientos básicos del exoesqueleto ubicado en la mano. Por tanto, este estudio aportó en el desarrollo de nuevas estrategias de control para los dispositivos de miembro superior, debido a que se tiene un control independiente de fuerza, con el fin de hacer que el usuario tenga mejor control de los movimientos de agarre de su mano, permitiéndole realizar las tareas cotidianas.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Mejorar el desempeño dinámico de los movimientos básicos de la mano con una fuerza controlada a partir del control de lazo cerrado.

1.2. Objetivos específicos

- Reproducir mecánicamente un rango de fuerzas durante los movimientos básicos de la mano, a partir de la selección y montaje de elementos necesarios, en una configuración de lazo abierto.
- Obtener un modelo dinámico de la fuerza aplicada en un exoesqueleto, a partir de modelos matemáticos existentes y sintonización experimental de parámetros.
- Seguir una referencia de fuerza a partir de una estrategia de control, diseñada usando el modelo dinámico obtenido, comprobando su funcionamiento por medio de simulación.
- Validar experimentalmente el funcionamiento del lazo de control de fuerza, sobre un exoesqueleto funcional a nivel de laboratorio previamente construido.

2. Marco conceptual y antecedentes

2.1. Exoesqueleto

Un exoesqueleto es una estructura para ser utilizada sobre el cuerpo humano a manera de prenda de vestir, tal y como lo define su término en inglés “wearable robots”, ya sea para complementar la función de una extremidad o de sustituirla por completo. Mediante esta, se combinan la operabilidad humana y la potencia de la máquina, lo que resulta en que el usuario puede lograr operaciones de su brazo que no logra hacer por sí mismo (Pons, 2008, p.1).

Estos dispositivos emplean sensores de electromiografía (EMG) conectados a los músculos del cuerpo, para leer los potenciales eléctricos de estos y así a través del uso de un controlador y motores, generando movimiento en los dedos (Geethanjali, 2016, p.248). “Al realizar actividad muscular se genera una señal eléctrica, las principales características de esta señal” según (Delgado y Cordero, 2010, p.2), son:

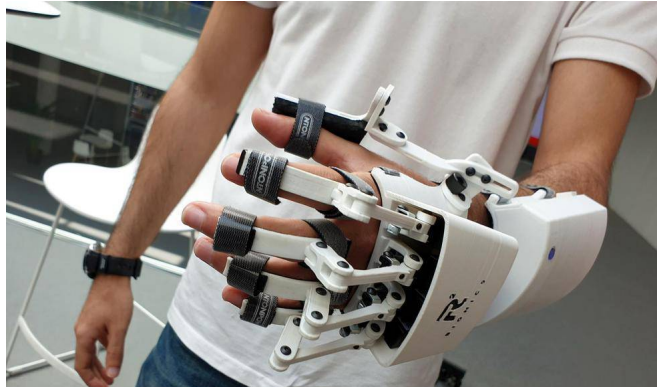
- La señal es de naturaleza estocástica y puede ser representada por una función de distribución Gaussiana.
- La amplitud de la señal está en el rango de 10m[Vpp].
- El espectro de la señal se encuentra entre el rango de 0 a 500 [Hz].

Existen exoesqueletos con actuadores, los que transmiten una fuerza controlada a los dedos, disminuyendo y simplificando su estructura. “El exoesqueleto deja la cara palmar libre y es

accionado por actuadores lineares ubicados en el dorso, donde su movimiento de flexión se ve limitado por sus componentes mecánicas” (Cambiaso, 2017, p.62).

Figura 1:

Sistema de exoesqueleto con distintas estructuras y actuadores.



Nota. Tomado de Prototipo de exoesqueleto biónico, Sánchez y Martín, 2019, Noticia (<https://www.20minutos.es/noticia/3708887/0/>).

El dispositivo de la figura 2 cuenta con una estructura de exoesqueleto con 5 grados de libertad, 2 canales de lectura de señales de electromiografía (EMG). Esta topología es implementada con el fin de disminuir el volumen, número de piezas, portabilidad y autonomía. Esto permite flexionar las articulaciones metacarpofalángicas y las interfalángicas proximales, mediante el uso de resortes entre las falanges distales, para realizar terapias de movimiento pasivo continuo, EMG y bilateral o de espejo (Niño, 2021, p.40).

Este diseño consta de dos partes: el exoesqueleto que va sobre la mano soportando los actuadores, la estructura mecánica y una pequeña caja que se ubica en el antebrazo, la cual protege la PCB y la batería. Este dispositivo se sujeta al paciente con correas y puede usarse con o sin electrodos, dependiendo del modo de operación (Niño, 2021, p.35).

Figura 2:

Exoesqueleto robótico para rehabilitación de mano.



Nota. Tomado de Implementación del exoesqueleto diseñado, Niño, 2021.

2.2. Movimientos básicos de la mano

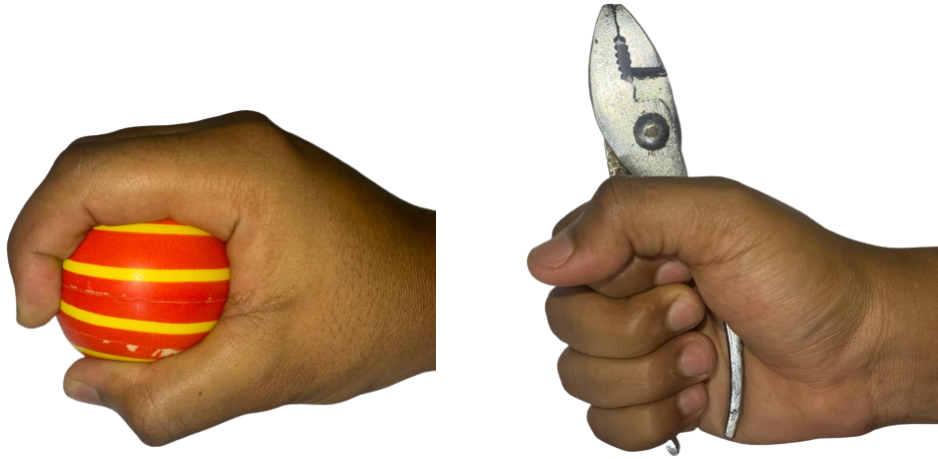
En la literatura existen diferentes clasificaciones para los movimientos básicos de la mano, sin embargo, en este proyecto se abordará el agarre y manipulación de objetos. La función prensil de la mano depende de la integridad cinética, la estabilidad proximal de antebrazo, el balance de los músculos sinérgicos y los antagonistas entre los extrínsecos y los intrínsecos. En López (2012) se afirma que los diferentes patrones de la mano se clasifican de la siguiente manera (p.22):

2.2.1. Agarres de fuerza

Son aquellos donde: i) los dedos están flexionados en las tres articulaciones, ii) el objeto se encuentra entre los dedos y la palma, iii) el pulgar se aduce y queda posicionado sobre la cara palmar del objeto, iv) hay una ligera desviación cubital y v) se realiza una ligera dorsiflexión para aumentar la tensión de los tendones flexores (López, 2012, p.22).

Figura 3:

Clasificación de los patrones funcionales. Agarres de fuerza.



Nota. Adaptado de “Clasificación de los patrones funcionales. Agarres de fuerza” (p.23), por López, 2012, Morfolia, 4 (1).

2.2.2. Agarres de precisión

Son aquellos utilizados para la manipulación de pequeños objetos entre el pulgar y las caras flexoras de los dedos, donde la muñeca se posiciona en dorsiflexión, los dedos permanecen semiflexionados, el pulgar se aduce y se opone. Los agarres de precisión se clasifican de acuerdo con las partes de las falanges utilizadas para soportar el objeto que se está manipulando, como lo son: pinza terminal, pinza palmar, pinza lateral o de llave, pinza de pulpejo o cubital (López, 2012, p.22).

Figura 4:

Clasificación de los patrones funcionales: Agarre de precisión.



Nota. Adaptado de “Clasificación de los patrones funcionales. Agarres de precisión” (p.23), por López, 2012, Morfolia, 4 (1).

La mayoría de actividades instrumentales de la vida diaria, requieren de combinaciones de agarres fuertes y de precisión, tales como abrir un frasco, martillar una puntilla, entre otros. Mientras que la actividad de escribir a mano, específicamente, accionar un lápiz es una actividad de precisión, pero que necesita de la estabilidad específica de los patrones de fuerza (Duarte, 2000, p.58).

2.3. Estrategias de control

En esta última década, la literatura científica recoge diferentes técnicas y estrategias de control de prótesis robóticas y exoesqueletos. En la mayoría de las ocasiones son elementos externos controlados mediante las señales eléctricas que se producen cuando se contrae el músculo de forma voluntaria. Estos subsistemas están basados en el procesado de las señales electromiográficas obtenidas por medio de los sensores EMG colocados sobre la piel. Esta técnica permite

la detección y medición de los diferentes biopotenciales eléctricos, que a su vez son adquiridos mediante los electrodos ubicados en la superficie del brazo (Sevil et al., 2018, p.570).

Las prótesis biónicas comerciales pueden estar equipadas con algoritmos de control, ajustados para realizar actividades de contacto o no contacto con objetos. Esta última posee un grado de complejidad un poco mayor, debido a que implican una integración directa entre la prótesis y las características físicas del objeto que se manipula, como son forma, tamaño y rigidez. En la tabla 1 se presentan algunos algoritmos de control utilizados para prótesis de miembro superior.

Tabla 1

Algoritmos de control utilizados en prótesis de miembro superior.

Name	# of Electrodes	EMG Control Category	Controllability user	Control Type
Southampton Hand	2	Hierarchical/Shared	Hand opening + some level of Force	Force control + Position control
Manus Hand	2	Direct Control	Grip type	Active stiffness control
Cyber Hand M1		Hierarchical/Autonomous	Grip type	Position control
Cyber Hand M2	2	Hierarchical/Shared	Grip type + Force	(PID) for preshaping
Cyber Hand M3		Hierarchical/user controlled	All hand movements + Force	+ FSM force control for grasping
AR III	6	Direct Control	—	Force control in future
Design Choice	2	Hierarchical/Shared	Grip type + Force	Impedance control

Nota. Adaptado de “Diseño e implementación de un sistema de control para una prótesis mioeléctrica de miembro superior con control de fuerza y posición” (p.13), por Yaringaño, 2020.

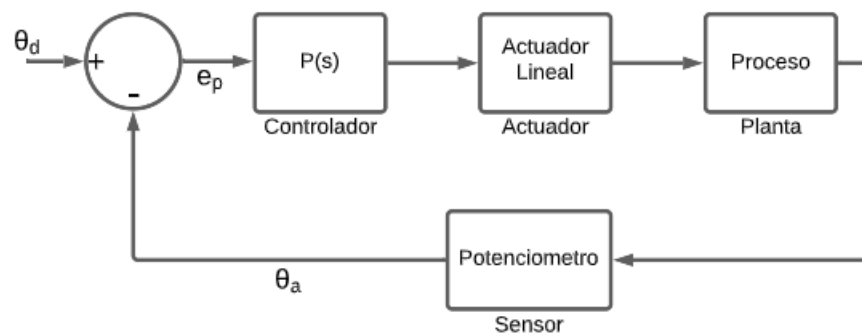
2.3.1. Control de posición-velocidad

Los algoritmos de control de posición y velocidad se diseñan generalmente para la reproducción de movimientos básicos, en actividades de no contacto tal como posicionamiento rápido

de dedos, usos estéticos y funcionales. (Yaringaño, 2020, p.13).

Un algoritmo de control realimentado simple, pero bastante efectivo, es el control proporcional. En la figura 5 se observa que la entrada del sistema es una posición deseada θ_d , que respecto a la posición sensada θ_a calcula un error de posición e_p , usado para que el controlador proporcional toma una decisión a ser enviada a los actuadores que en este caso son los motores que desplazan el mecanismo de los dedos. Para medir la posición actual generalmente se usa un sensor resistivo cuyo desplazamiento lineal es proporcional al valor de resistencia.

Figura 5:
Sistema de Control Proporcional.



Nota. Adaptado de Diagrama de control de posición de la Child's Hand, por Yaringaño, 2020.

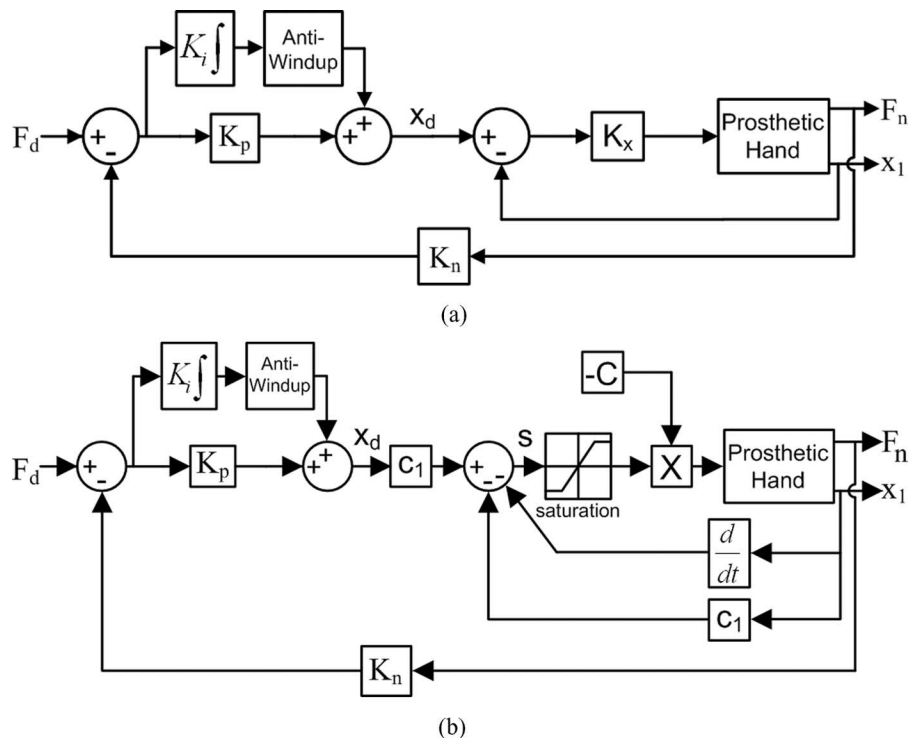
2.3.2. Control híbrido de posición-velocidad y fuerza

Las señales de control para manos motorizadas clínicamente se generan mediante señales de electromiografía. Por lo general, para manos protésicas se usa un esquema de control de lazo abierto donde se depende únicamente del usuario para monitorear visualmente la mano, controlando la velocidad o la fuerza de pellizco en relación con el nivel de contracción muscular del usuario. Esta condición supone un problema, pues para el paciente es difícil determinar con exactitud la

magnitud de la fuerza a aplicar para sujetar un objeto específico. Es por ello que actualmente, se han desarrollado sistemas de control con retroalimentación interna de fuerza, entre los que está el sistema híbrido de posición-velocidad y fuerza. Esta técnica de control híbrida aborda la naturaleza dual del control de la mano protésica, mediante el uso de una sola entrada para controlar la posición y la velocidad de los dedos, antes de que entren en contacto con el entorno, sino también la fuerza ejercida sobre el entorno una vez que se establece el contacto (Engeberg et al., 2008, p.4).

Figura 6:

Diagrama de bloques del control híbrido posición-velocidad y fuerza.



Nota. Tomado de (a) Controlador híbrido de fuerza-velocidad con retroalimentación de posición, fuerza y esquema antiwindup. (b) Controlador híbrido robusto de modo deslizante de fuerza-velocidad con retroalimentación de posición, velocidad y fuerza, Yaringaño, 2020.

Los controladores de la figura 6, tienen el mismo lazo de control de fuerza externo, que usa

un esquema de control proporcional-integral (PI) para minimizar la discrepancia entre las fuerzas reales y las deseadas. Sin embargo, cada controlador de fuerza-velocidad es diferente porque uno usa solo retroalimentación de posición en el interior lazo de control de posición-velocidad, mientras que el otro utiliza un controlador de modo deslizante robusto con retroalimentación de posición y velocidad en el lazo de retroalimentación interna (Engeberg et al., 2008, p.4).

2.4. Identificación de sistemas dinámicos

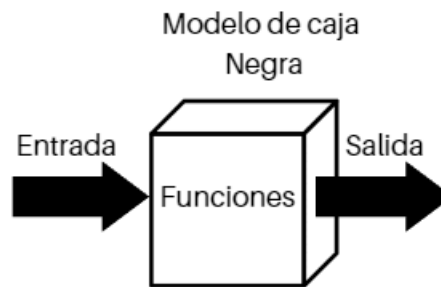
La identificación de sistemas hace referencia al área de la teoría de control donde se plantea una serie de técnicas que permiten obtener modelos experimentales de sistemas dinámicos a partir de mediciones de entrada/salida sobre el sistema. Para este trabajo de grado se enfocará en la identificación de sistemas mediante los métodos de caja negra.

2.4.1. Modelado de caja negra

Los modelos totalmente negros o también llamados modelos empíricos o experimentales, son familias de modelos cuyos parámetros no tienen significado físico y el objetivo es encontrar un modelo a partir de los datos observados, capaz de representar la dinámica del sistema. Para modelos lineales se puede pensar en cajas negras como parametrizaciones de funciones en el dominio de la frecuencia, mientras que, para modelos no lineales, las redes neuronales artificiales representan el tipo de estructura de caja negra que ha recibido más interés (Ljung, 1994, p.156).

Figura 7:

Proceso de estimación Box-Jenkins.

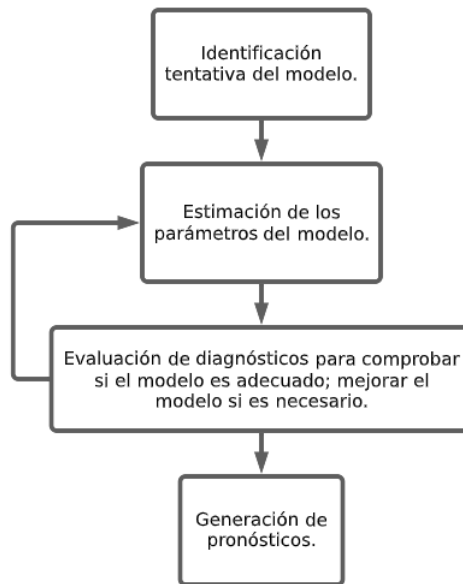


Nota. Adaptado de La prueba de Caja Negra se centra principalmente en los requisitos funcionales del software, de Castro Sancan, 2001.

2.4.1.1. Estructura Box-Jenkins

Este método permite identificar claramente las entradas, salidas y estudiar las relaciones que existen entre ellas. Permitiendo así maximizar la eficiencia de los sistemas, sin tener que introducir en los procesos complejos que se encuentran dentro. Los modelos de pronóstico de la Box-Jenkins se basan en conceptos y principios estadísticos, capaces de modelar un amplio espectro de comportamiento de series de tiempo (Samaniego et al., 2012, p.18). El proceso requiere de cuatro pasos gráficamente mostrados a continuación:

Figura 8:
Diagrama de caja negra.



Nota. “Adaptado de proceso estimación Box-Jenkins” (p.18), por Samaniego et al., 2012, por UNL Electrónica, 7 (1).

2.5. Sensor de fuerza

La importancia del sensor de fuerza en un exoesqueleto o prótesis biónica, radica en que se puede medir la fuerza aplicada y consiguientemente ser controlada en forma realimentada para movimientos de la mano. Para el desarrollo de este proyecto se utiliza los sensores de fuerza piezo-resistivos o FSR. Estos son dispositivos con una película de polímero que reduce la resistencia eléctrica del material, al incrementar la fuerza aplicada a su superficie (Resistors, 2002).

Figura 9:

Vista superior del Sensor FSR-402.



Nota. Tomado de Grove - Round Force Sensor FSR402, Interlink Electronics, 2008, seeedstudio (https://wiki.seeedstudio.com/Grove-Round_Force_Sensor_FSR402/).

Tabla 2

Ventajas y desventajas de los sensores de fuerza FSR.

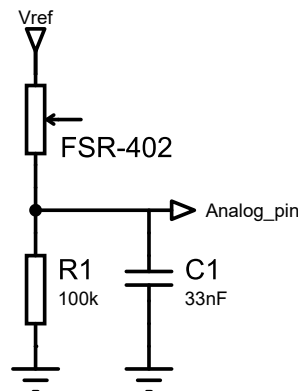
Ventajas	Desventajas
Bajo costo Alta disponibilidad en el mercado Alta flexibilidad Alta Durabilidad Bajo consumo de potencia Baja complejidad en sistema de medición Varios tamaños estándar	Las láminas de poliéster del que están fabricados con su uso conducen a problemas como la repetibilidad, histéresis, fluencia y no linealidad de la salida del sensor

Nota. Esta tabla muestra un panorama general de las particularidades del sensor FSR. Adaptado de Flexiforce ventajas y desventajas (p.35), por Gomez, 2020.

En los FSR mejora la sensibilidad si estos están totalmente en contacto con su superficie. Aunque no son celdas de cargas, sus propiedades son similares, y tienen la característica de reproducir una resistencia que va desde el orden de los mega ohmios en reposo hasta los kilos ohmios con presión en su superficie activa. La figura 9, presenta un ejemplo de sensor FSR denominado FSR 402 que tiene forma circular con diámetro 12.7 [mm], y en el que un circuito de acondicionamiento típicamente utilizado, es un divisor de tensión, como el que se muestra en la figura 10.

Figura 10:

Método de medición para sensado de fuerza.



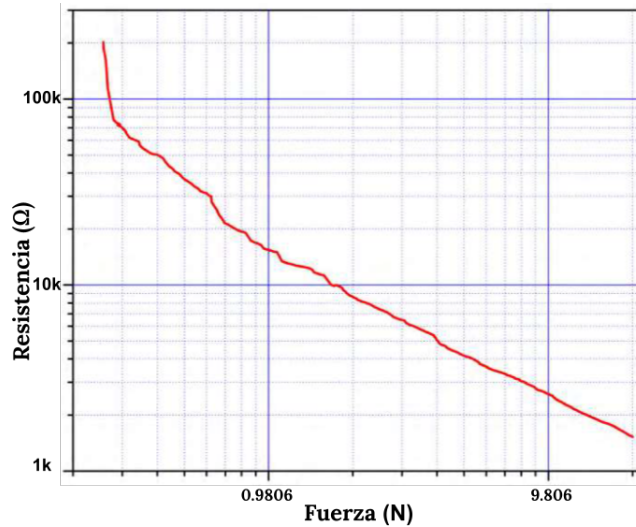
Nota. Configuración para la medición de fuerza, $V_{ref} = 5v$, $Salida = Analogpin$. Adaptado de Relaciones resistencia-voltaje-fuerza, por Microlab, 2021.

La resistencia de compensación, R_1 , está asociada con la respuesta de la curva característica de sensores FSR (ver figura 12). Los valores de la resistencia de compensación son los que determinan que la curva característica tenga un comportamiento logarítmico muy evidente, o que sea mínimo y se pueda despreciar. Lo anterior, explica la linealidad que puede darse en la respuesta de

estos sensores como consecuencia de los valores R_1 , así como se muestra en la figura 11. (Moreno y Valderrama, 2014, p.30).

Figura 11:

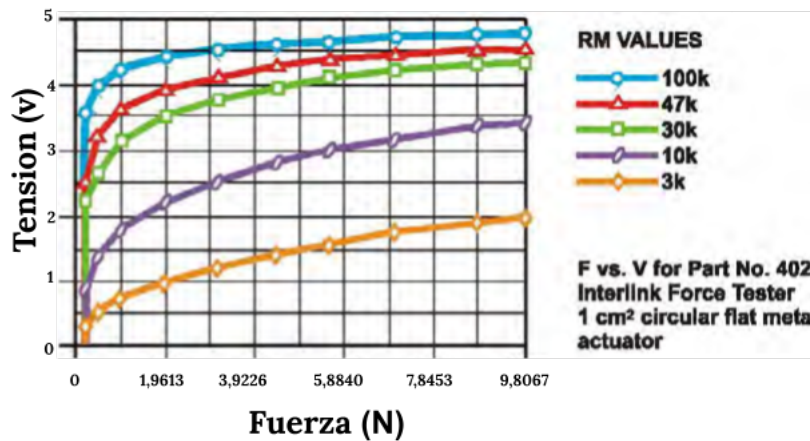
Curva de caracterización resistencia vs Fuerza del FSR-402.



Nota. Adaptado de Resistance vs. Force, Interlink Electronics, 2017, Interlink.

Figura 12:

Curva característica de sensores ante distintas resistencias de ajuste.



Nota. Adaptado de FSR Voltage Divider, Interlink Electronics, 2017.

En la tabla 3 se muestran algunas “especificaciones y características comunes para todos los modelos de FSR, siendo básicas” las que se presentan en la tabla (Moreno y Valderrama, 2014, p.28).

Tabla 3
Especificaciones del sensor de fuerza fsr-402.

Parámetros	Valor
Rango de sensibilidad de la fuerza	<0,980 [N] hasta >98,067 [N]
Rango de sensibilidad de la presión	<1.034 [bar] hasta >10.342 [bar]
Parte a parte repetitividad de la fuerza	$\pm 15\%$ a $\pm 25\%$ de la resistencia nominal establecida
Parte individual repetitividad de la fuerza	$\pm 2\%$ a $\pm 5\%$ de la resistencia nominal establecida
Resolución de la fuerza	>0,5 % (full escala)
Resistencia sin aplicar la fuerza	>1 [M Ω]
Rango de temperatura	-30°C a +70°C
Máxima corriente	1 [mA/cm ²] de la fuerza aplicada

Nota. Tomado de Especificaciones y características generales de los sensores de fuerza resistivos FSR, Interlink Electronics, 2017.

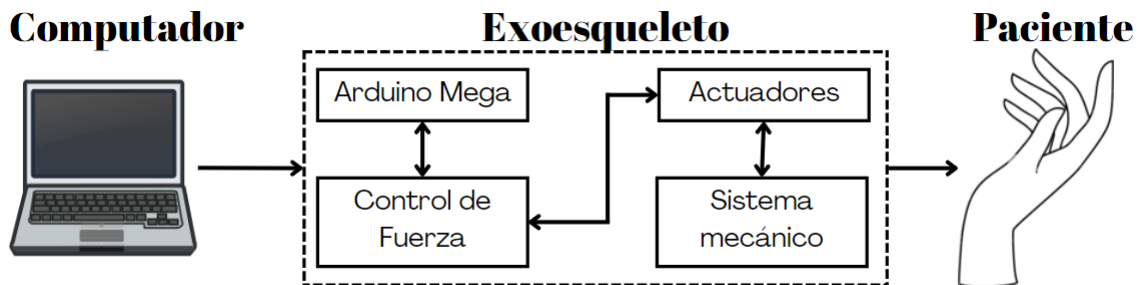
3. Metodología

3.1. Diseño General

Con base en los movimientos básicos de la mano presentados en el marco conceptual, se realiza el patrón de movimiento de agarre de fuerza para un exoesqueleto diseñado previamente en la UIS Niño (2021). El sistema global al ejecutar el movimiento, cuenta con un sistema de control de fuerza, que activa un conjunto de actuadores controlados mediante una tarjeta de adquisición y procesamiento de datos, y un sensor de fuerza para realimentar la variable controlada.

Figura 13:

Esquema general del dispositivo construido.



3.1.1. Sistema mecánico

Para el diseño mecánico del exoesqueleto UIS se apoyaron en los criterios propuesto por (Sarac et al., 2019). Donde determinan factores importantes tales como: volumen, cantidad de piezas móviles, comodidad del paciente, costos de producción y mantenimiento. En la figura 14, se presenta el sistema mecánico del exoesqueleto, que cuenta con el sistema de transmisión de movimiento para flexar las articulaciones interfalángicas proximales (PIP) y metacarpofalángicas

(MCP). En el caso del dedo pulgar, cuenta con articulaciones MCP e interfalángicas (IP) como se observa en la figura 15 .

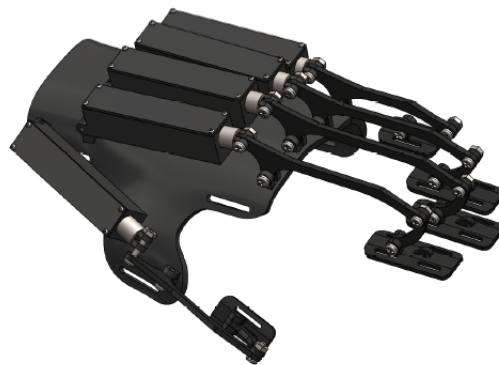
Figura 14:
Sistema de flexión del exoesqueleto.



Nota. Tomado de Sistema de flexión del exoesqueleto, por Niño, 2021.

El exoesqueleto está diseñado para un adulto promedio, donde dentro del conjunto de piezas que lo conforman están, tornillos que recrea las articulaciones y un resorte para la unión de estas con la falange distal, incorporándose el concepto de ortesis de woo, para mejorar el movimiento (Niño, 2021).

Figura 15:
Diseño del exoesqueleto.



Nota. Tomado de Exoesqueleto diseñado, por Niño, 2021.

3.1.2. Microcontrolador Utilizado: Arduino Mega 2560

En el mercado actual, los microcontroladores más populares, sencillos y versátiles con fines educativos y de investigación, son desarrollados por la compañía Arduino. Para esta aplicación se seleccionó la tarjeta de adquisición de datos de Arduino mega 2560, que incorpora el microcontrolador AT2560, el cual tiene un bajo costo para las prestaciones de la misma. El criterio principal para usar esta placa, es la cantidad de entradas y salidas tanto analógicas como digitales. Dado que cuenta con 54 entradas y salidas digitales, en donde 15 de las salidas proveen modulación por ancho de pulso (PWM) y cuenta con 16 entradas análogas. Tiene 256 [KB] de memoria flash, donde 8 [KB] son operados por el bootloader, la SRAM es de 8 [KB] y EEPROM es de 4 [KB], con una frecuencia de reloj de 16 [MHz].

Figura 16:

Microcontrolador Arduino Mega AT2560.



Nota. Tomado de Arduino Mega 2560, Arduino, 2019.

Para la presente aplicación, el microcontrolador registra una señal analógica por cada potenciómetro lineal y cada sensor de fuerza. Además, se utilizan 23 entradas/salidas digitales, en las

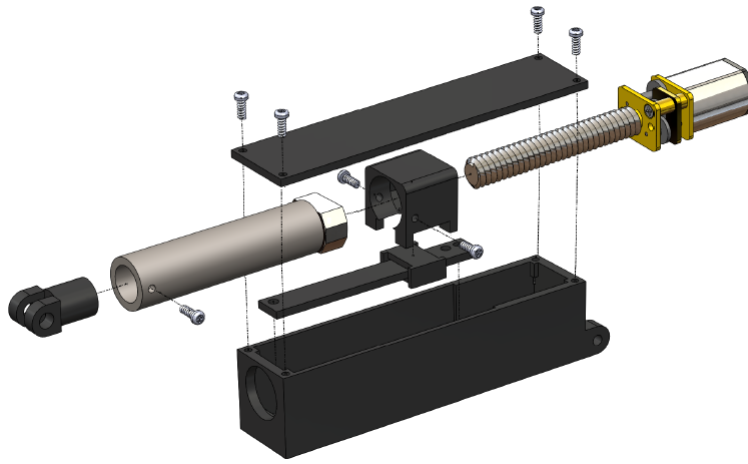
que 9 son PWM utilizadas para la activación de los actuadores a través del CI TB661FNG. Este se comunica por puerto serial con el computador por medio de dos conectores, RX (recepción) y TX (transmisión). Por otra parte, se dispone de 4 unidades UART (universally asynchronous receiver/transmitter), encargadas de convertir los datos a una secuencia de bits y transmitirlos o recibirlos a una velocidad determinada. El TTL (transistor-transistor logic) realiza la comunicación mediante variaciones en la señal entre 0 [V] y 5 [V] (Arduino, 2019).

3.1.3. Actuadores

El conjunto de actuadores que permiten el movimiento mecánico de los dedos, está compuesto por un actuador de Pololu N20 con relación 50:1, con alta calidad, buena relación torque-velocidad y bajo costo. El movimiento del motor se transmite al potenciómetro lineal, mediante un arreglo de una tuerca unida a un tubo de aluminio. Sobre dicho arreglo, se le incluye una pieza que cumple la función de desplazar el potenciómetro lineal, que varía el valor de la señal análoga de posición (Niño, 2021, p.36). El desplazamiento es de 24 [mm], en los cuales efectivos son 18 [mm], convertido a lectura analógica de 10 bits es de [350 -900], se realiza esta limitación con el fin de cuidar la integridad de la estructura.

Figura 17:

Desplazamiento del actuador lineal.

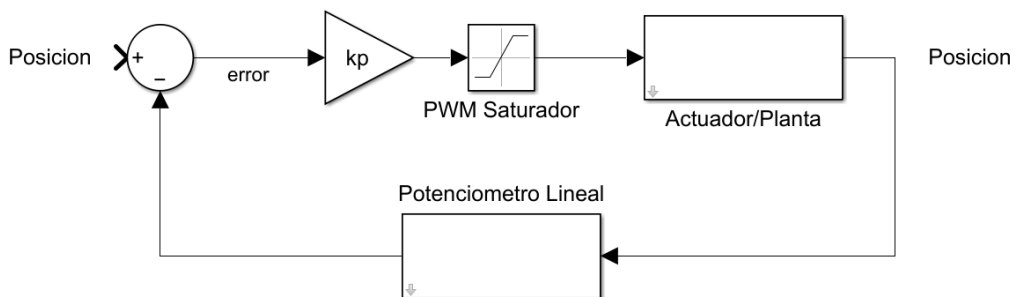


Nota. Tomado de Despiece actuador lineal, por Niño, 2021.

Un motor DC dependiendo de sus parámetros de fabricación, puede ser modelado como un sistema de segundo orden sin ceros en su función de transferencia. Para identificar el comportamiento se realiza un proceso de caracterización del motor en lazo cerrado (ver figura 18), suministrándole a la entrada una señal PWM y sensando la variación de tensión en el potenciómetro lineal.

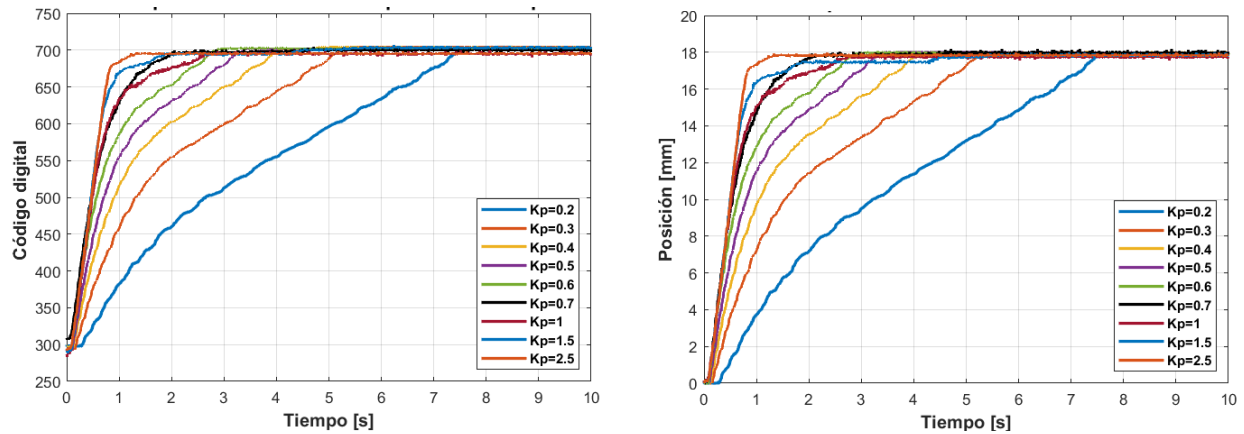
Figura 18:

Sistema para caracterizar el actuador lineal.



De esta forma se obtiene el comportamiento dinámico del motor ante distintas tensiones, como se observa en la figura 19(a) y la figura 19(b).

Figura 19:
Comportamiento del actuador lineal ante distintos k_p .



(a) Cambio del valor analógico del sensor de posición en el tiempo.

(b) Cambio de posición del actuador lineal en el tiempo.

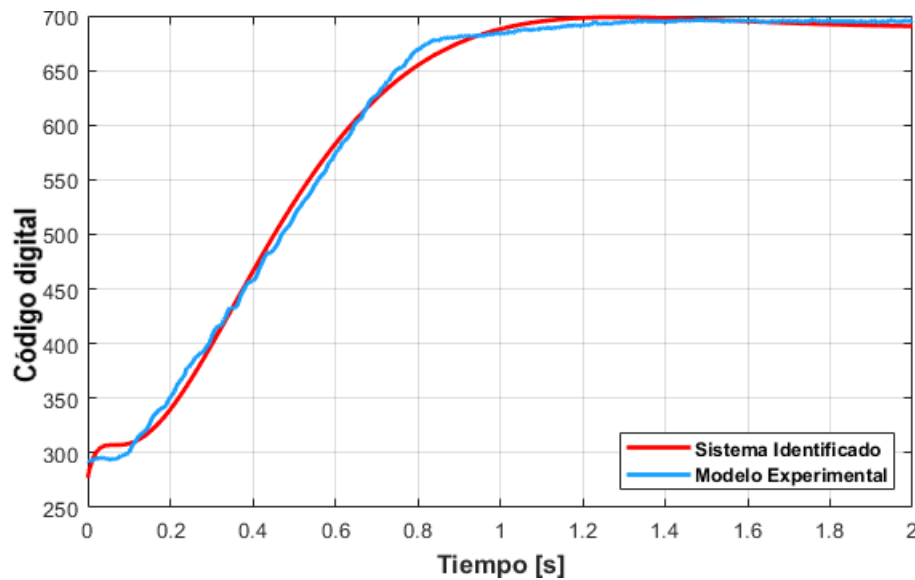
Nota. Los gráficos presentan una equivalencia entre el valor analógico leído figura 19(a) y la posición en [mm] figura 19(b).

Analizando el comportamiento de las distintas repuestas del sistema, se optó por identificar la respuesta del motor para un $k_p=0.7$. Mediante las pruebas realizadas se observó que para valores altos de k_p , el sistema es muy rápido, lo que produce un sobrecalentamiento del actuador y un desgaste mecánico de las piezas que lo conforman. Como resultado de la identificación de la función de transferencia de lazo cerrado se obtuvo una función de transferencia de 3 polos:

$$H(s)_{cl} = \frac{699,5164}{s^3 + 48,84 \cdot s^2 + 283 \cdot s + 710} \quad (1)$$

Figura 20:

Comparación del modelo identificado $H(s)_{cl}$ con el modelo experimental, ante un $k_p=0.7$.



Teniendo en cuenta que la planta es una función de segundo orden, con polos reales, de la ecuación 1 se despeja el lazo abierto obteniendo:

$$H(s)_{op} = k_p \frac{1014,2}{(s + 6,71) \cdot (s + 42,12)} \quad (2)$$

3.1.4. Elemento sensor de fuerza

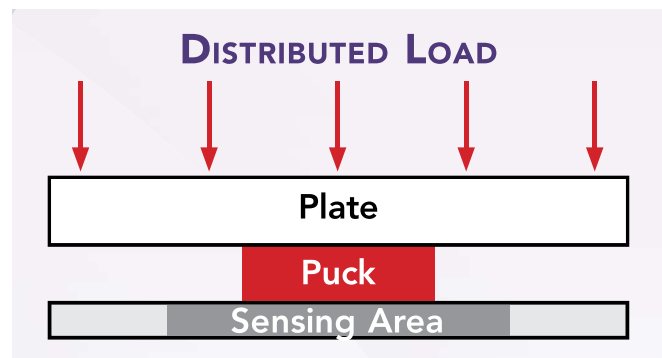
Para realizar la caracterización del sensor de fuerza FSR-402, es importante elegir una configuración electrónica y mecánica adecuada. Como modelo de sensado, se usa un divisor de tensión resistivo (ver figura 10), debido principalmente a su simplicidad en la implementación y ajuste rápido de sensibilidad mediante la modificación de la resistencia R1.

Otro factor clave para realizar el proceso de caracterización, es asegurarse de distribuir la

carga sobre 70%-80% del área sensitiva del FSR-402. Una solución es utilizar concentradores de carga o puck como se describe en (TEKSCAN TM, 2019, p.2), que de acuerdo con la figura 21 el área de contacto con la carga, es más grande que el área de detección y se utiliza el puck como interfaz entre el "Plate" y el área sensitiva.

Figura 21:

Configuración mecánica para medición de fuerza.

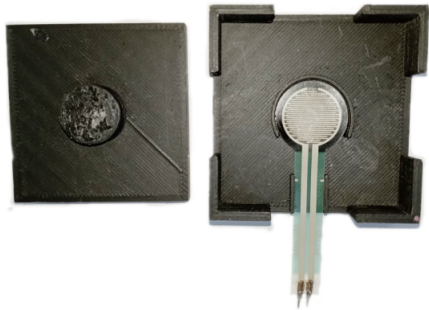


Nota. Tomado de minimize shear force to preserve sensor sensitivity, TEKSCAN TM, 2019.

De acuerdo con lo anterior, para la caracterización del sensor se construye una estructura en forma de báscula adaptado de Sarmentero Medina et al. (2018), con un concentrador de carga sobre el sensor FSR-402 (ver figura 22(a)). Esta estructura permite la medición de la variación de tensión y fuerza ante distintas masas.

Figura 22:

Estructuras para la caracterización del sensor de fuerza.



(a) Estructura para caracterización.

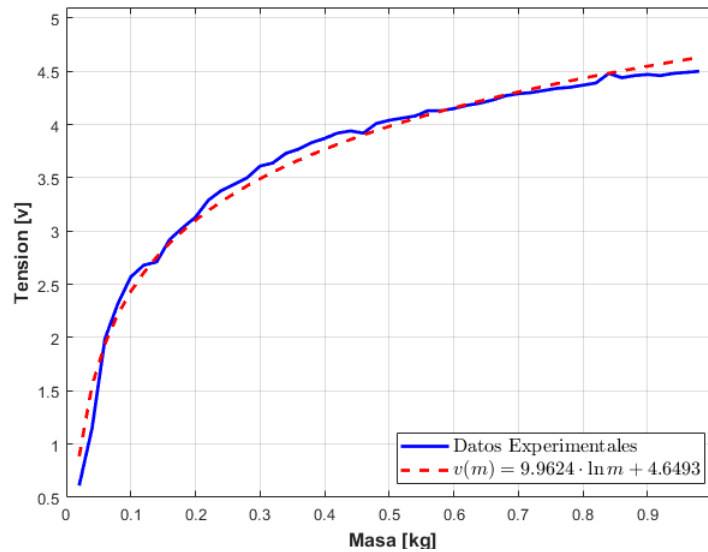


(b) Montaje para caracterización.

Se toman los datos obtenidos de la medición del FSR402 ubicado en la estructura de la figura 22(b), obteniendo una gráfica de tensión del divisor vs la masa aplicada (ver figura 10). De esta manera, se obtiene la respuesta dinámica en la que se evidencia un comportamiento no lineal. Por medio de un ajuste de curvas, se aproxima a la función logarítmica (ver ecuación 4) con un coeficiente de determinación R^2 del 0,9858.

Figura 23:

Curva de caracterización de tensión vs masa del sensor de fuerza fsr-402.



Para obtener la relación de la fuerza ejercida en función de la tensión, se parte de la expresión identificada en el ajuste de curva. De esta se despeja la masa, para expresarla en función de la tensión de acuerdo con la ecuación 4.

$$v(m) = 9,9624 \cdot \ln m + 4,6493 \quad (3)$$

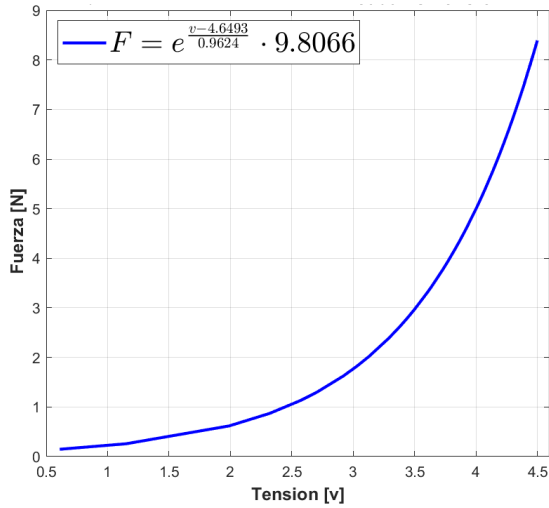
$$m = e^{\frac{v}{9,9624} - 0,4666} \quad (4)$$

A partir de la primera ley de Newton, definida como $F = m \cdot a$, donde $a=9,8066 \text{ [m/s}^2\text{]}$, se calcula la variación de fuerza aplicada sobre el sensor vs el cambio en la tensión del mismo (figura 24(a)). Teóricamente, se conoce que a medida que aumente la fuerza sobre el sensor, la resistencia de este debe disminuir exponencialmente desde aproximadamente $100 \text{ [k}\Omega\text{]}$, tal como se observa en la

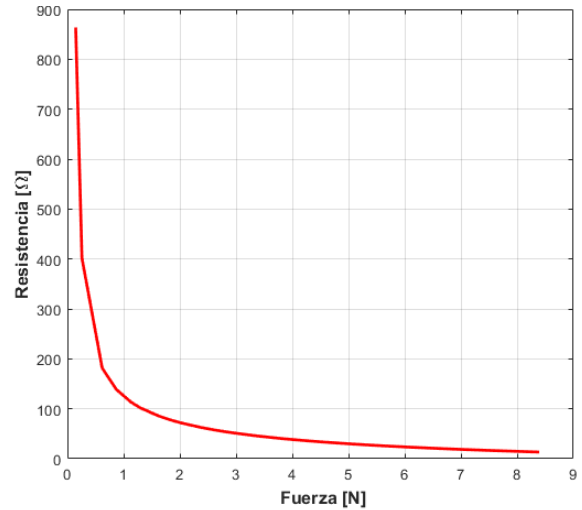
figura 24(b).

Figura 24:

Curvas características experimentales del sensor de fuerza.



(a) Variación de fuerza aplicada vs tensión leída.



(b) Variación de la resistencia vs la fuerza aplicada.

3.1.5. Sistema de alimentación

Para energizar el sistema, se hace uso de la batería de litio de 2 celdas con voltaje nominal de 7.4 [v] y capacidad de 460 [mAh]. En cuanto a las características físicas, tiene un peso de 31 [g] y dimensiones de 55x30x10 [mm], lo que permite ser adaptable al exoesqueleto. Se le conecta a la batería un módulo con el integrado MP1482 con el objetivo de regular la tensión de entrada y corriente entregada. Debido a que tiene una corriente de salida de 2 [A] y un voltaje de salida ajustable de 0.923 a 15 [V], con eficiencia alrededor del 93 %.

El consumo necesario para energizar el sistema del dispositivo, se calcula con base en los elementos que lo conforman.

Tabla 4

Consumo máximo de corriente del sistema electrónico.

Elemento	Cantidad	Consumo [mA]	Total [mA]
Arduino mega 2560	1	300	300
TB6612FNG	3	2.2	6.6
MP1482	1	21.462	21.462
		Total	328.062

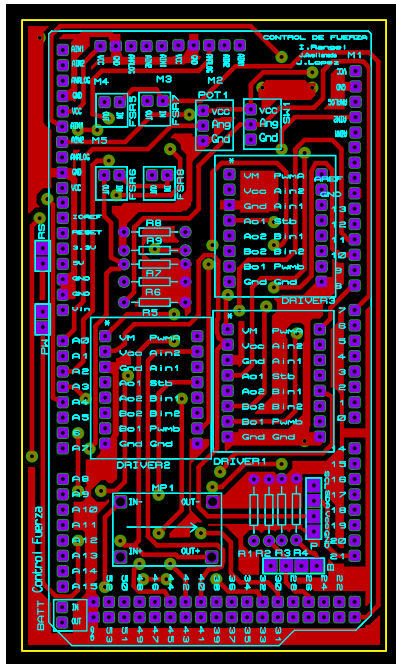
El consumo del exoesqueleto es de 328.062 [mA], obteniendo una durabilidad de la batería de 1.402 [h] (Ver ecuación 5). En algunos casos, el Arduino Mega se comunica con el computador por medio del puerto serial para la adquisición de datos, comportándose como la fuente externa constante que lo alimenta. Sin embargo, para la alimentación del sistema de actuación se conecta la batería de litio.

$$Tiempo(h) = \frac{Capacidad\ Batera(mAh)}{Corriente\ necesaria\ del\ sistema(mA)} = \frac{460[mAh]}{328,062[mA]} = 1,402[h] \quad (5)$$

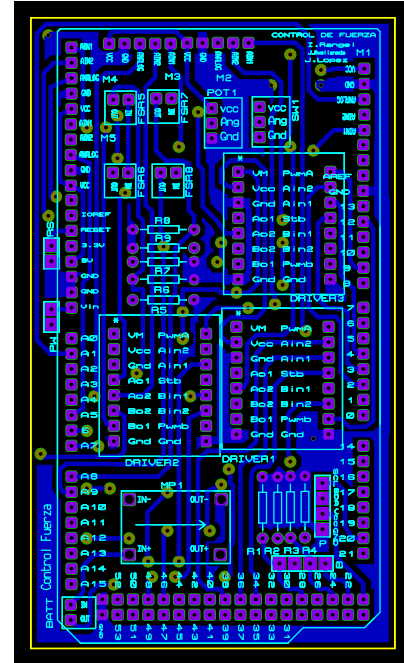
3.1.6. Diseño tarjeta electrónica

Para la integración de la parte electrónica, se diseñó una placa PCB principal con doble cara, tipo shield para la conexión con el Arduino mega AT2560, cuyas medidas son similares a la Tarjeta de Arduino (Largo 104.2 [mm] y ancho 60.3 [mm]). Esta cuenta con tres módulos puentes H que habilitan 5 actuadores para ser controlados, cuatro conexiones para sensores de fuerza FSR-402. Adicionalmente, incluye una interfaz por medio de pantalla Oled con pulsadores para configuración del sistema, permitiendo aumentar o disminuir el setpoint e iniciar, detener o reiniciar el algoritmo de control.

Figura 25:
Tarjeta electrónica diseñada.



(a) Cara top copper.

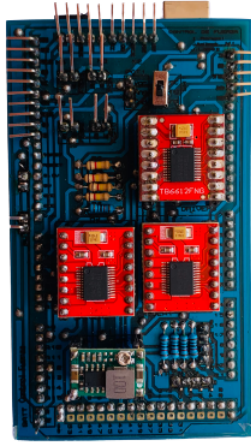


(b) Cara bottom copper.

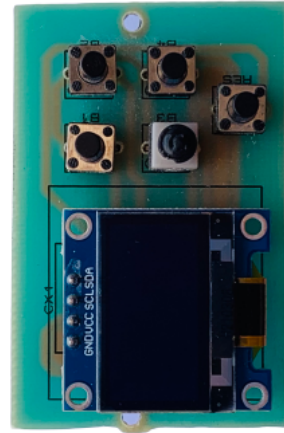
3.1.7. Integración del diseño

El diseño de la PCB principal y auxiliar, son fabricados en Colombia y todos los componentes de tipo Through-hole. Esta tiene la facilidad de cambiar los módulos en caso de falla, debido a que tiene una base desmontable de manera rápida (Ver figura 26(a)).

Figura 26:
PCBs.



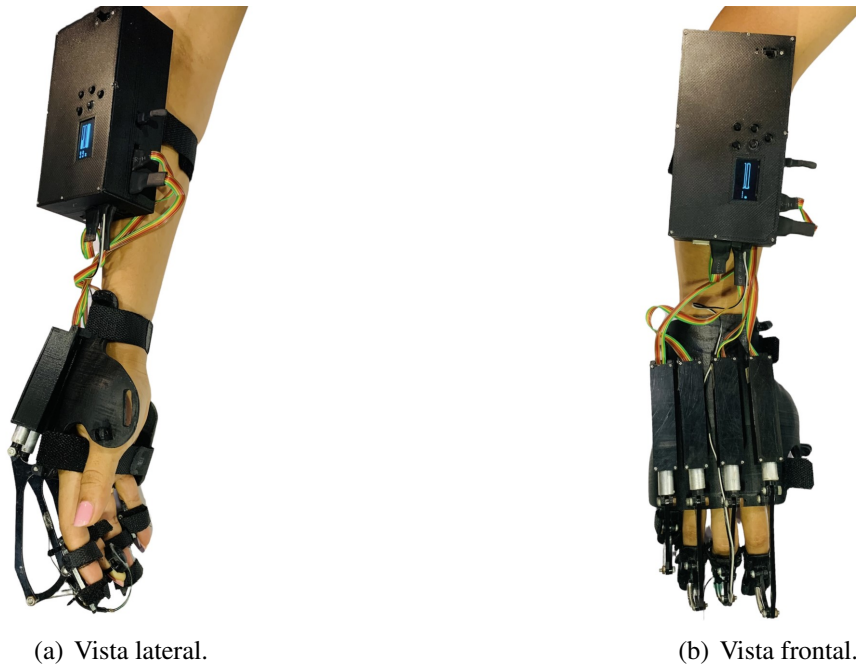
(a) Cara Top del Shield.



(b) PCB auxiliar.

Adicionalmente, se diseña e imprime una caja 3D, con el fin de contener la batería, el Arduino mega con la shield (PCB principal) y la PCB auxiliar para conectar la pantalla con los pulsadores de configuración (Ver figura 27).

Figura 27:
Exoesqueleto con modificaciones.



3.2. Modelo Dinámico

Para este proyecto se tomaron tres objetos de diferentes capacidades de deformación, con el fin de simular el patrón de agarre de los objetos que se encuentran en las tareas sencillas de la vida diaria, como un objeto de cristal (figura 28(a)), una bomba que contiene harina (figura 28(b)) y pelota antiestrés que está formada por espuma de poliuretano muy blanda (figura 28(c)). De manera que se expone el sistema de control de fuerza ante diferentes materiales, permitiendo que la parte sensible del sensor toque la superficie y comprima el material, según lo permita este.

Figura 28:
Objetos experimentales para agarre de fuerza.



(a) Objeto 1.



(b) Objeto 2.

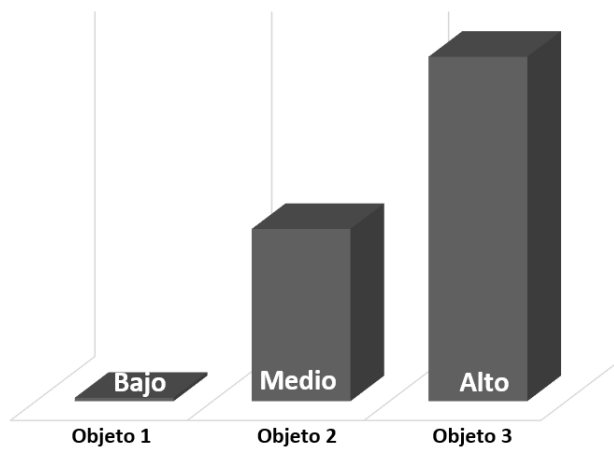


(c) Objeto 3.

Nota. Objeto 1: Material de Vidrio, Objeto 2: Bomba con harina y Objeto 3: Pelota de espuma.

Los objetos se clasifican por la capacidad que tienen de deformarse por una fuerza aplicada.

Figura 29:
Capacidad de deformación de los objetos utilizados.



3.2.1. Experimento

Para obtener el modelo dinámico de lazo abierto, se realizaron tres pruebas sobre diferentes objetos. El experimento consiste en ubicar el sensor de fuerza en el dedo medio y agarrar a cada objeto con el exoesqueleto (figura 30). Este, al ser accionado mediante los actuadores, se cierra realizando presión al objeto y paralelamente se toman los datos obtenidos, con el fin de determinar la fuerza máxima que el exoesqueleto realiza sobre cada uno y así delimitar un rango de fuerza óptimo (ver figura 31).

Figura 30:
Adaptación del sensor FSR al exoesqueleto.



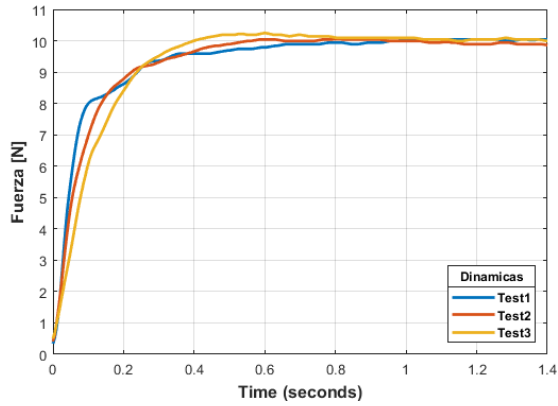
(a) Vista Lateral.



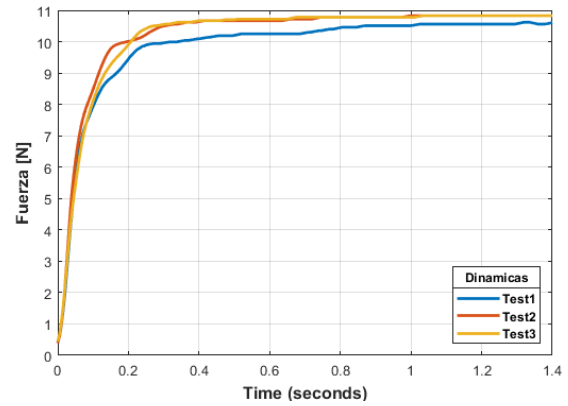
(b) Vista Superior.

Figura 31:

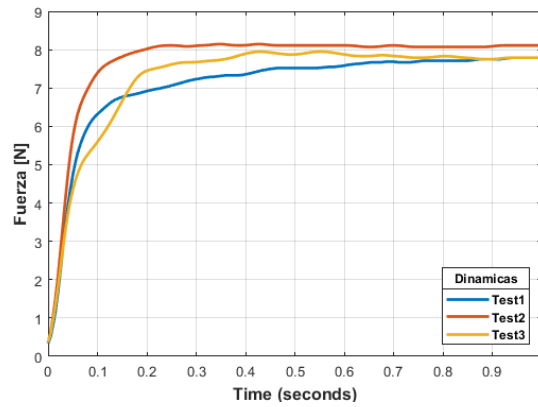
Respuesta experimental del sistema de fuerza en lazo abierto para cada objeto.



(a) Objeto 1.



(b) Objeto 2.



(c) Objeto 3.

Posteriormente, se identifican cada una de estas respuestas con la toolbox System Identification del software de Matlab. Esta permite identificar modelos lineales y no lineales a partir de datos de entrada (PWM) y salida (Fuerza) medidos. Obteniendo la identificación para cada sistema, aproximada a una función de transferencia de segundo orden, como se observa en la ecuación

6.

$$H(s)_{planta} = \frac{k_{op}}{(s + a) * (s + b)} \quad (6)$$

En la tabla 5 se encuentran los valores de cada ganancia de lazo abierto (k_{op}), ubicación de los polos a y b, obtenidas del proceso de identificación.

Tabla 5
Función de transferencia estimada para cada objeto.

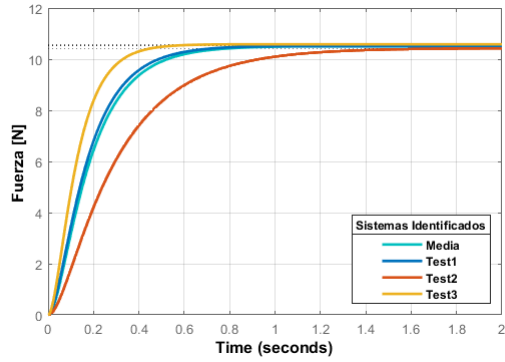
Objeto	Test	k_{op}	a	b	% estimación
1	1	6,3071	23,26	6,88	89,55
	2	2,5529	17,8	3,671	93,71
	3	10,27	24,82	10,44	94,97
	media	5,4888	21,74	6,413	-
2	1	1,3564	17,54	1,842	92,92
	2	2,4791	18,89	3,085	92,6
	3	6,7259	18,22	8,717	94,79
	media	2,828	18,21	3,673	-
3	1	2,0646	24,54	2,734	90,56
	2	7,5843	21,28	11,23	90,06
	3	6,5359	18,52	11,48	90,06
	media	4,6776	21,31	7,064	-

Nota. Relación de los sistemas identificados para cada objeto.

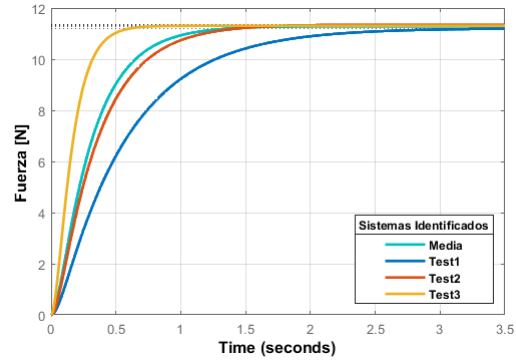
Se gráfica la respuesta de los sistemas identificados para cada objeto y su media respectiva, para corroborar que el comportamiento de esta sea el correspondiente (ver figura 32).

Figura 32:

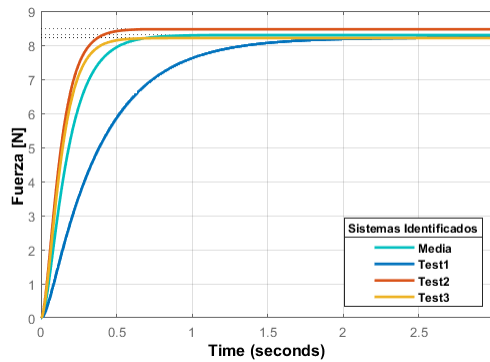
Repuesta al escalón de los sistemas identificados y media en lazo abierto.



(a) Identificación Objeto 1.



(b) Identificación Objeto 2.



(c) Identificación Objeto 3.

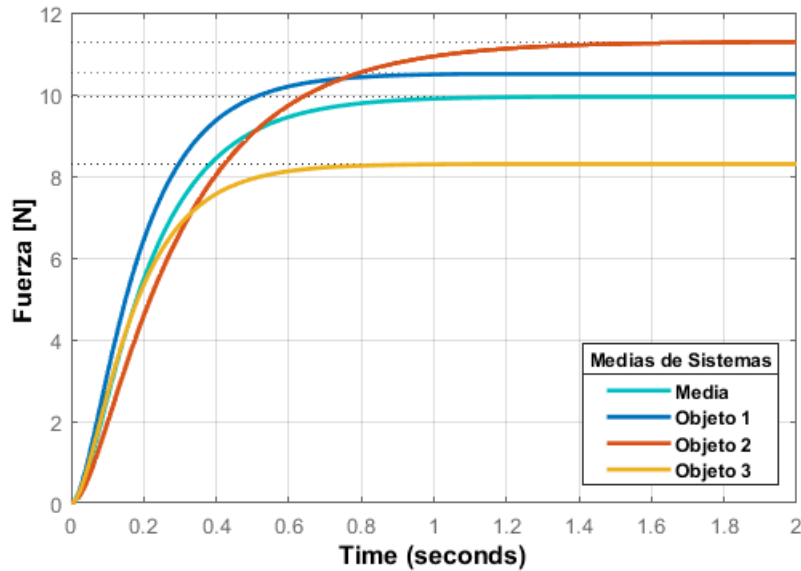
Con el fin de diseñar un controlador adecuado para la fuerza de agarre, se obtiene un modelo dinámico del exoesqueleto, con los experimentos realizados previamente. Donde a partir de los modelos promedio obtenidos para cada objeto, se obtiene un modelo dinámico promedio global (calculados en la tabla 5). Este modelo dinámico es más general, ya que incluye el comportamiento

del sistema de fuerza en lazo abierto antes los tres objetos.

$$H(s)_{PlantaGeneral} = \frac{4,1718}{(s + 20,36) * (s + 5,5)} \quad (7)$$

Figura 33:

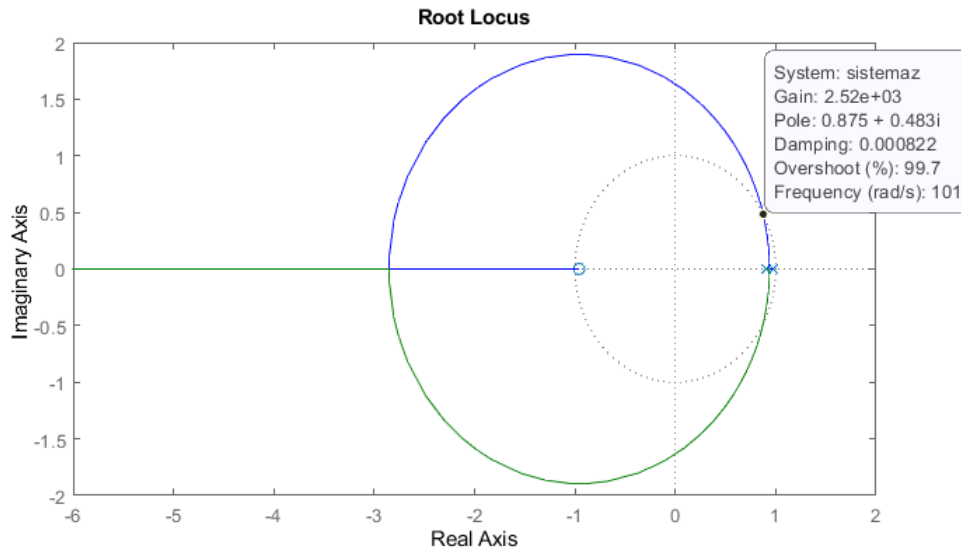
Respuesta al escalón de las medias de los sistemas identificados.



En cuanto al valor en el que la ganancia de lazo abierto del sistema lo hace inestable, en el análisis en tiempo continuo el sistema se comporta de manera estable para cualquier ganancia. Mientras que, para un análisis en tiempo discreto el sistema se hace inestable para ganancias superiores a 2520 (ver figura 34).

Figura 34:

Ganancia en el que el sistema se hace inestable.



3.2.2. Sistema de control de fuerza

A partir del modelo dinámico promedio general encontrado, se realiza el controlador cuyas especificaciones de diseño son que siga una referencia de fuerza con error en estado estable menor al 5% de la referencia deseada y con un tiempo de establecimiento para el 2%, menor a 1.5 segundos.

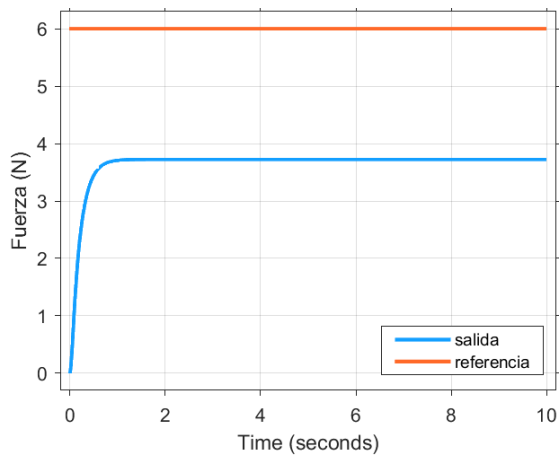
3.2.2.1. Controlador Proporcional

En primera instancia, se planteó sintonizar un controlador proporcional por su simplicidad, además que por la dinámica de la planta se podría seguir la referencia de fuerza tipo escalón con un error pequeño. Al implementar el controlador proporcional se sigue la referencia de fuerza con error significativo (ver la figura 35). Por lo tanto, se plantea el diseño de un compensador de atraso. Debido a que el objetivo de este compensador es aportar ganancia de lazo abierto, evitando alterar

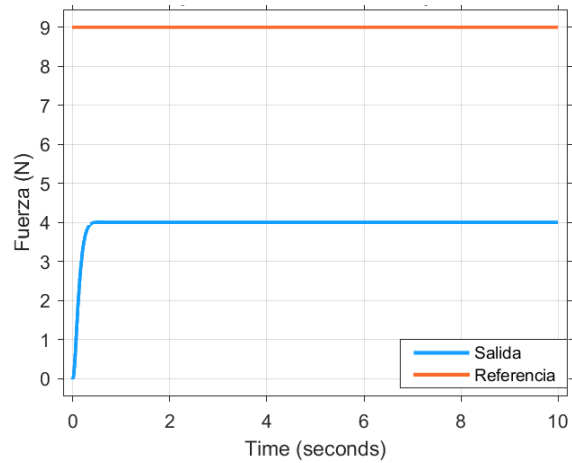
la respuesta transitoria del sistema. Esta ganancia aportada es suficiente para la reducción del error en estado estacionario.

Figura 35:

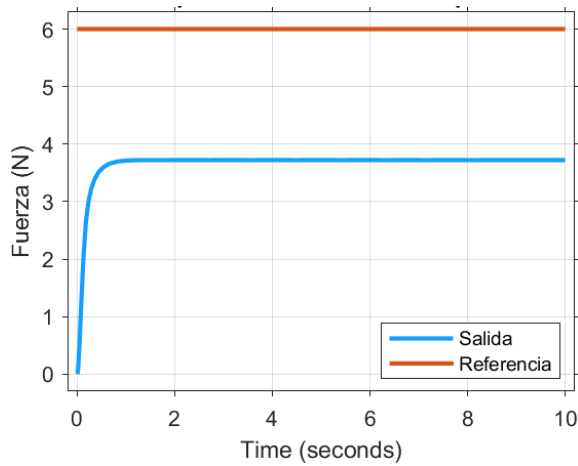
Simulación de control proporcional para distintas referencias de fuerza y k_p .



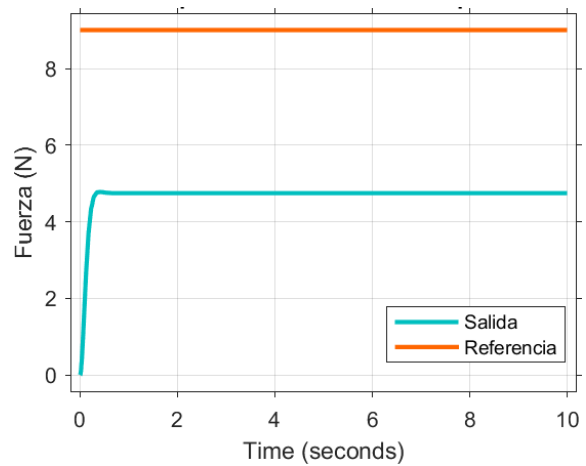
(a) Referencia = 6 [N] y $k_p = 21,5$.



(b) Referencia = 9 [N] y $k_p = 21,5$.



(c) Referencia = 6 [N] y $k_p = 30$.



(d) Referencia = 9 [N] y $k_p = 30$.

3.2.2.2. Controlador de Atraso

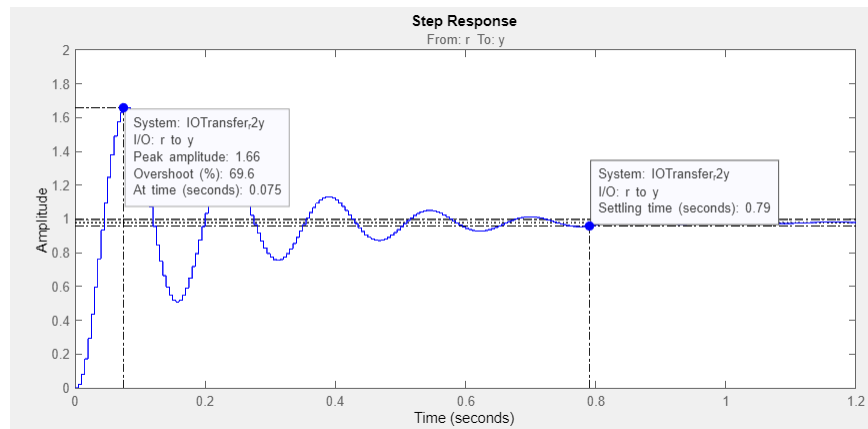
El compensador de atraso propuesto es descrito por la función de transferencia:

$$G_c(z) = (410) \frac{(z - 0,915)}{(z - 0,971)} \quad (8)$$

Como resultado de simulación, la respuesta del sistema en lazo cerrado toma la siguiente forma:

Figura 36:

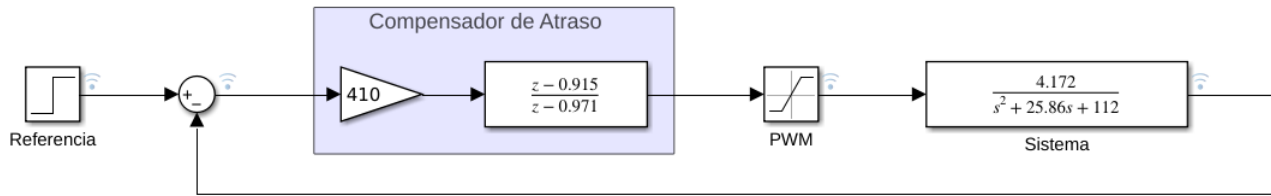
Simulación controlador de atraso.



Para validar el comportamiento del compensador diseñado, se simula con diagrama de bloques en Simulink (Ver figura 37). Donde a diferencia del diseñado en la figura 36, este incluye un saturador de la señal de actuación para lograr mejor aproximación al comportamiento de la planta experimental ante este nuevo controlador.

Figura 37:

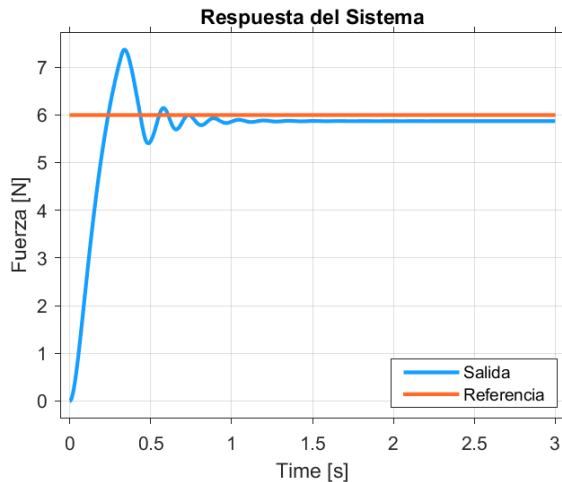
Diagrama de bloques en simulink del sistema.



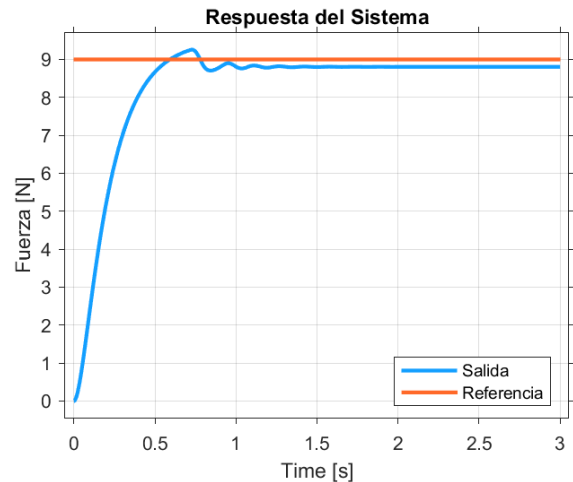
De este modo, en la ecuación 7 se observa que el sistema es de segundo orden y de tipo 0. Por tanto, la respuesta del sistema siempre presentará un error en estado estable. Se realiza la simulación para referencias de 6 [N] y 9 [N], obteniendo un tiempo de asentamiento menor de 1,5 [s] y un error en estado estable por debajo del 5%.

Figura 38:

Simulación controlador de atraso ante distintas referencias.



(a) Respuesta del sistema para una fuerza de 6 [N].



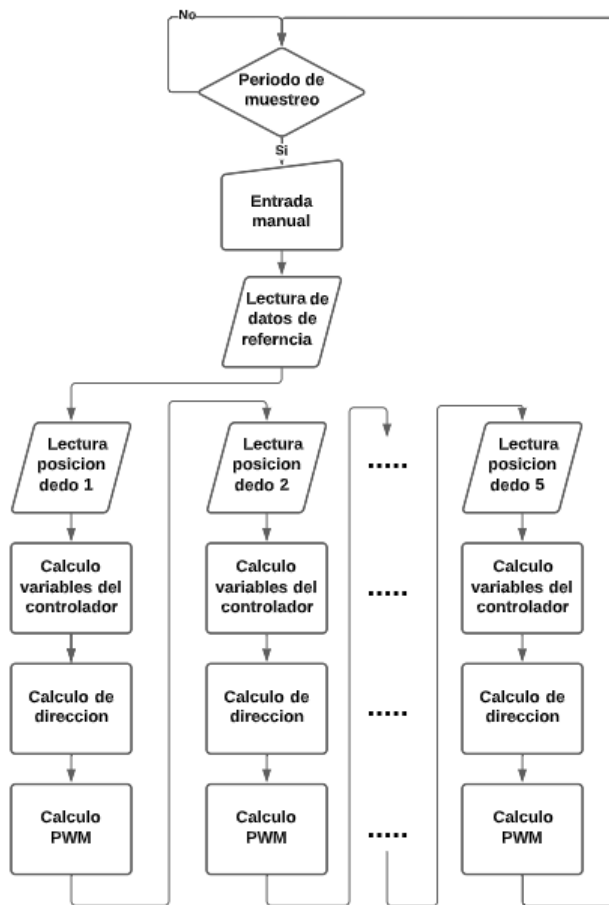
(b) Respuesta del sistema para una fuerza de 9 [N].

4. Resultados

Para la validación experimental de los controladores presentados en el capítulo anterior, se implementaron cada uno de ellos en el exoesqueleto UIS mejorado. Las leyes de control se realizaron mediante programación directa en el microcontrolador seleccionado, en donde la figura 39 muestra el flujograma de la ley de control programada.

Figura 39:

Flujograma de control.



El esquema de control se ejecuta cada periodo de muestreo t_s , empezando el proceso con

la entrada manual de la referencia de fuerza que se quiere ejercer sobre el objeto, lectura de fuerza actual y posición de los actuadores. Seguido de ello, para cada actuador se calculan y actualizan las variables del controlador. Por último, se envía individualmente a cada motor un PWM y dirección de giro, mediante el módulo del puente H. Este ciclo se repite hasta que se cumple con los parámetros de diseño.

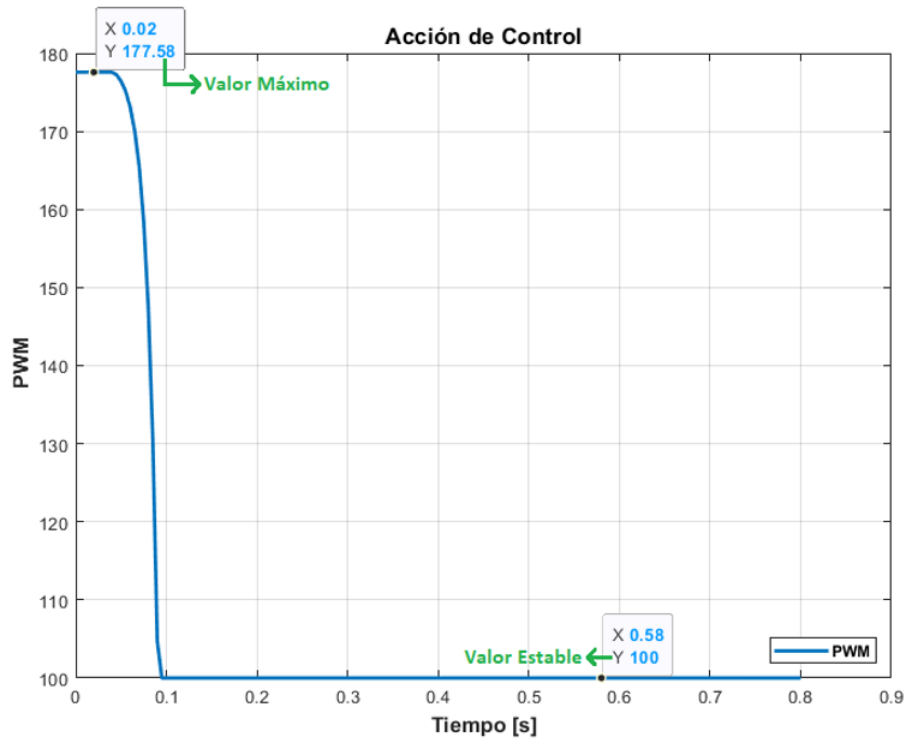
4.1. Resultados experimentales de los controladores diseñados

4.1.1. Control Proporcional

Para analizar el desempeño del sistema implementado con este controlador, se obtiene la respuesta dinámica del sistema fijando dos referencias de fuerza y ganancias proporcionales distintas. Por consiguiente, se analizan los índices de rendimiento del controlador ante estas condiciones, con el objetivo de realizar una correcta sintonización de este controlador. Es de vital importancia, tener presente el comportamiento de la acción de control proporcional, pues ésta en un principio es máxima y desde ese valor decae en amplitud, estableciéndose en un valor constante (ver figura 40). Esto se traduce a que el sistema pueda o no ejercer la fuerza deseada.

Figura 40:

Comportamiento de la acción de control proporcional.



En la tabla 6 se presentan los valores máximos y estables más adecuados, obtenidos experimentalmente de la señal de actuación (PWM) en relación con la referencia y ganancia proporcional.

Tabla 6

Condiciones para comprobación del controlador proporcional ante la presión del objeto 1.

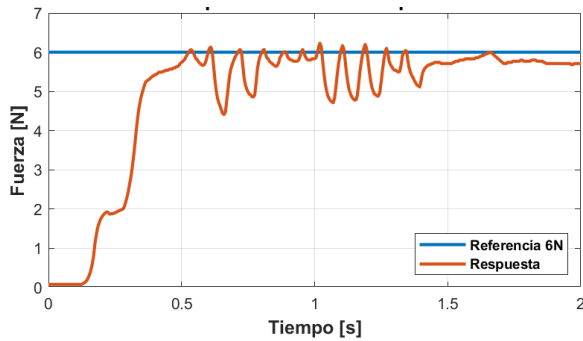
Referencia (N)	Kp	PWM
6	21.5	100-127
	30	100-177
9	21.5	100-191
	30	200-230

Como se observa en la tabla 6 para una referencia de 6 [N], el controlador envía una señal de actuación (PWM) con distintos rangos, pero comparten el mismo valor inferior. Sin embargo,

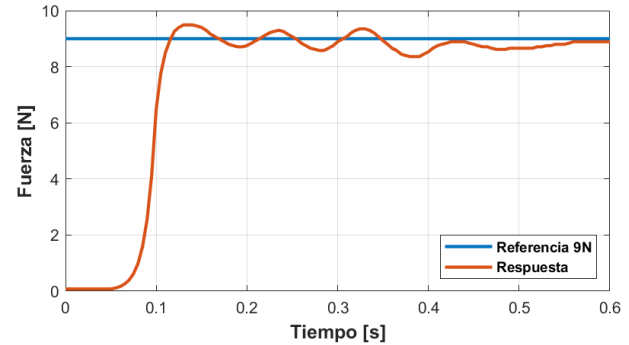
con una referencia de 9 [N] se requiere aumentar los valores del rango de PWM, para que el sistema disminuya el error, aunque esto signifique que el sistema ejerza un mayor esfuerzo de control.

Figura 41:

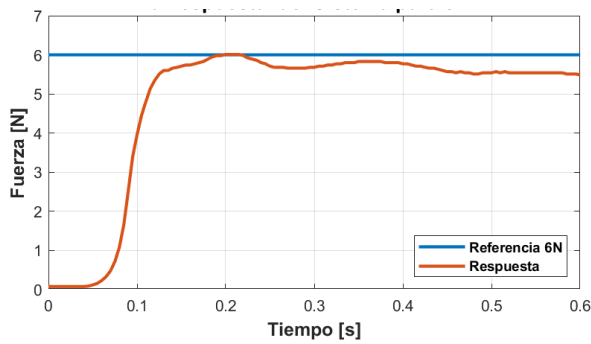
Respuesta del sistema de control de fuerza con controlador proporcional ante el agarre del objeto 1.



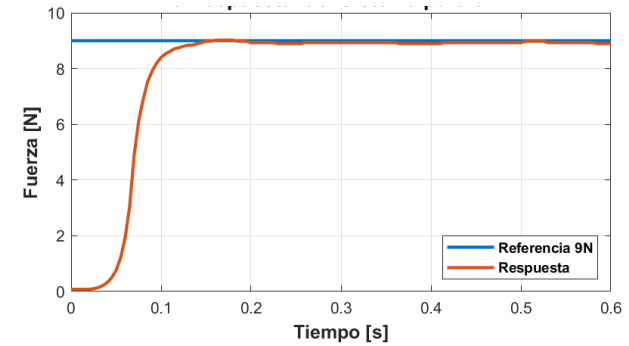
(a) Referencia = 6 [N] y $k_p = 21,5$.



(b) Referencia = 9 [N] y $k_p = 21,5$.



(c) Referencia = 6 [N] y $k_p = 30$.



(d) Referencia = 9 [N] y $k_p = 30$.

A partir de la figura 41 donde se presentan las respuestas dinámicas del sistema de control, con las condiciones mencionadas anteriormente, se calculan los índices de desempeño presentados en la tabla 7.

Tabla 7

Índices de desempeño del controlador proporcional ante la presión del objeto 1.

Referencia [N]	Kp	e_{ss} %	t_s [s]	IAE	ISE	ITAE	ITSE
6	21.5	3.222	1.695	9.702	57.062	7.956	46.522
	30	5.111	0.395	2.072	12.266	0.363	2.146
9	21.5	1.222	0.47	4.014	35.805	0.903	8.056
	30	0.777	0.095	0.446	3.978	0.011	0.099

Se requiere que el sistema diseñado debe establecerse a una fuerza deseada, en menos de 1.5 [s] y presentar una respuesta transitoria satisfactoria aceptando sobrepico. Este comportamiento es evaluado por el e_{ss} % y los índices de desempeño como el criterio de la integral del valor absoluto del error multiplicado por el tiempo o por sus siglas en ingles ITAE (cuando este índice disminuye el controlador tiene mejor desempeño). Al compararlos por cada referencia, se tiene un ITAE menor para una constante proporcional de 30, esto se debe a que el parámetro le da más peso a la respuesta comprendida entre el tiempo de subida y el tiempo de establecimiento.

Por otro lado, el sistema para referencias de 6 [N] y 9 [N], con kp de 21.5 (Ver figuras 41(a)) y 41(b)). Tiene un comportamiento oscilatorio no uniforme, por lo que el índice de desempeño ISE es alto, que denota resultados del experimento negativos para el controlador.

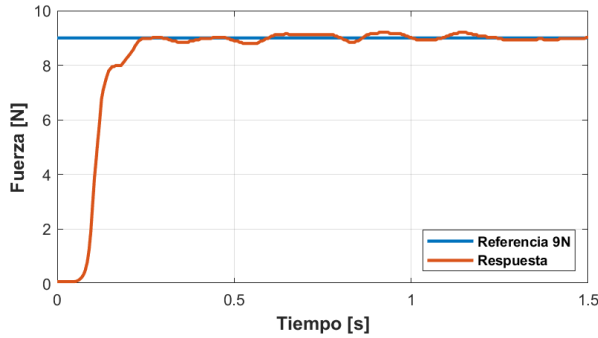
4.1.2. Controlador de Atraso

Se implementó el controlador de atraso descrito en la ecuación 8 y se validó para el agarre de tres objetos de diferente capacidad de deformación, y para cuatro referencias de fuerza, como se observa en la figura 42.

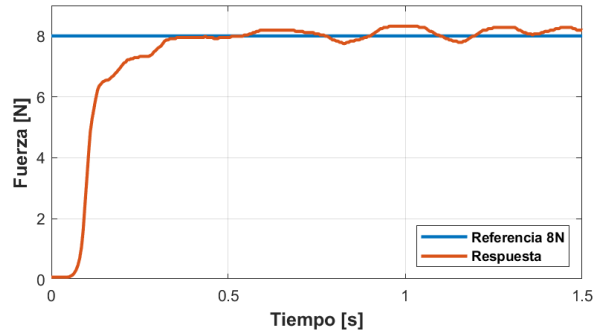
Objeto 1: Para este objeto, el controlador puede establecer el sistema para fuerzas superiores a los 8 [N], mientras que, para referencias de fuerza menores, como se observa en las figuras 42(c) y 42(d), el sistema de control realiza un esfuerzo mayor para tratar de establecer al sistema en la referencia. El esfuerzo se debe a que la señal de actuación tiene amplitud igual a los límites de saturación del controlador y varía entre ellos en un tiempo muy corto, haciendo repetitivo dichos cambios. Esto se presume que está ligado a las características físicas del material que compone al objeto 1.

Figura 42:

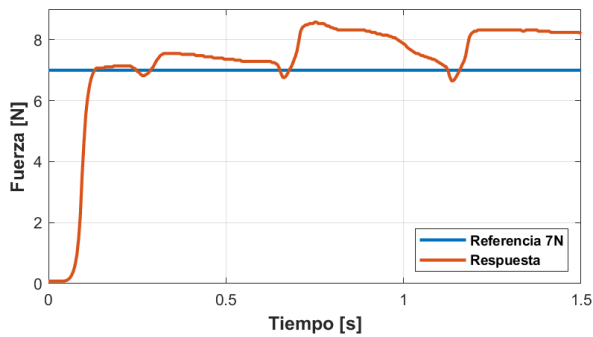
Respuesta del sistema de control de fuerza con controlador de atraso ante el agarre del objeto 1.



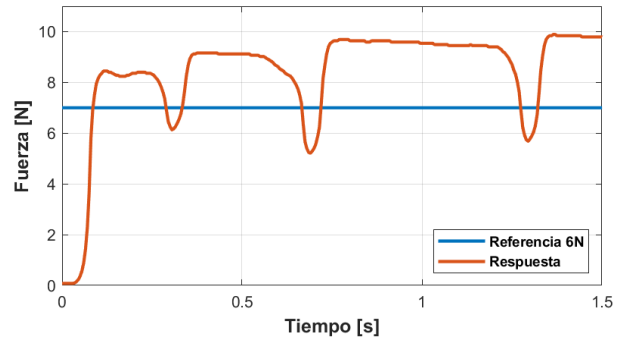
(a) Respuesta para referencia de 9 [N].



(b) Respuesta para referencia de 8 [N].



(c) Respuesta para referencia de 7 [N].

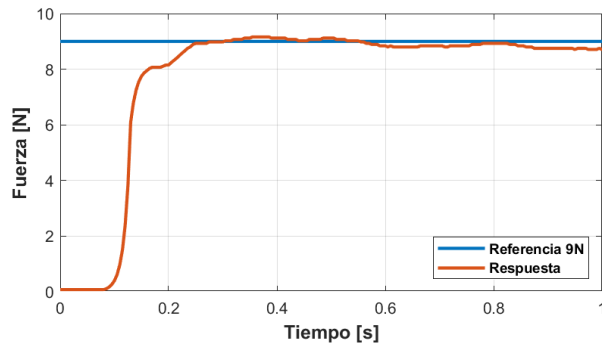


(d) Respuesta para referencia de 6 [N].

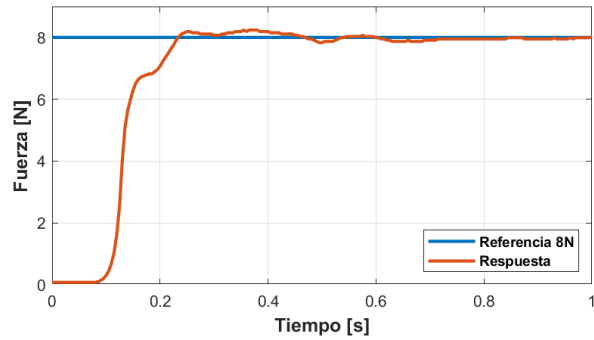
Objeto 2. Para el caso del objeto 2, de acuerdo con la figura 43 hay una disminución significativa del error en estado estable, además de la presencia de pequeños sobrepicos.

Figura 43:

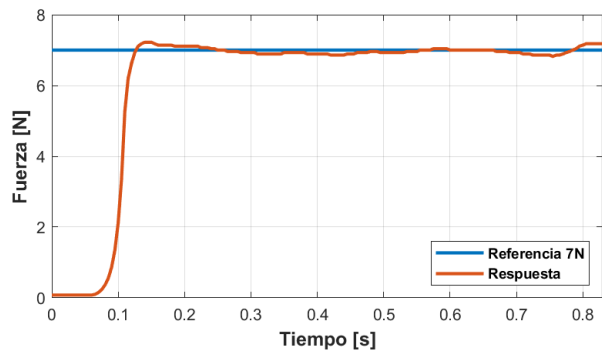
Respuesta del sistema de control de fuerza con controlador de atraso ante el agarre del objeto 2.



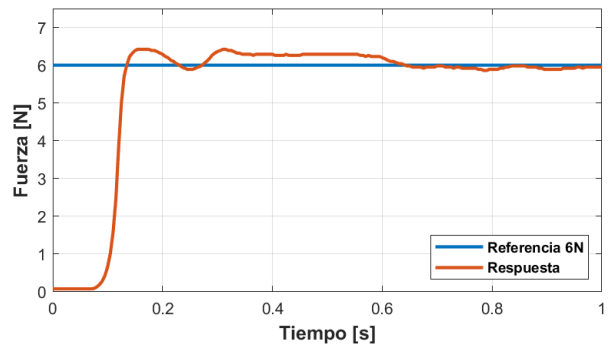
(a) Respuesta para referencia de 9 [N].



(b) Respuesta para referencia de 8 [N].



(c) Respuesta para referencia de 7 [N].

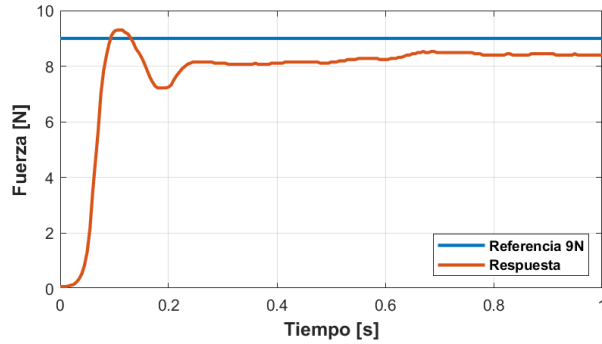


(d) Respuesta para referencia de 6 [N].

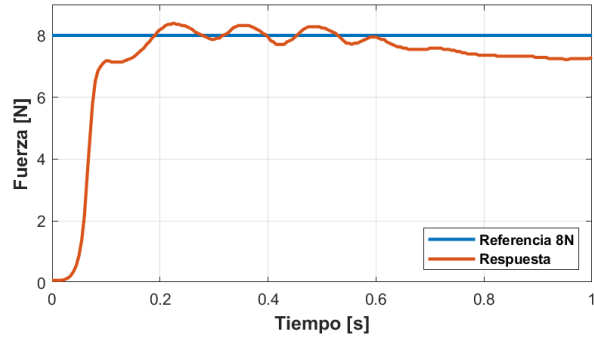
Objeto 3: Para el caso del objeto 3, en un tiempo alrededor de los 0.1 [s], cuando el sistema intenta seguir la referencia se comprime significativamente la pelota, generando un sobrepico en la medición de fuerza. En consecuencia, el exoesqueleto suelta un poco el objeto, el cual ejerce una fuerza hacia afuera en resultado de su compresión, por consiguiente, el exoesqueleto suelta demasiado el objeto y genera un undershoot (figura 44(a) y 44(d)).

Figura 44:

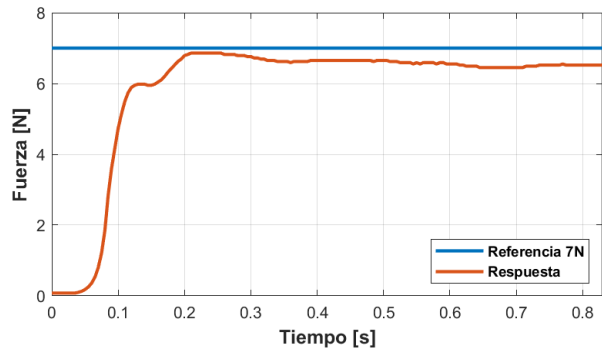
Respuesta del sistema de control de fuerza con controlador de atraso ante el agarre del objeto 3.



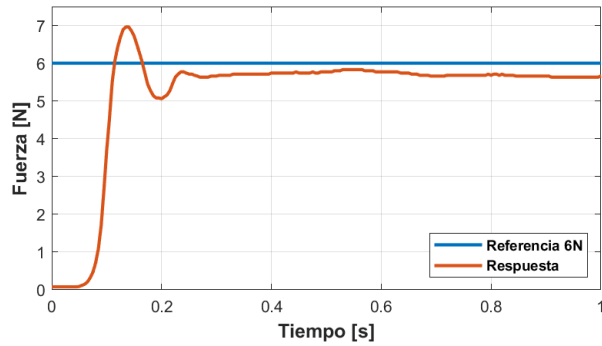
(a) Respuesta para referencia de 9 [N].



(b) Respuesta para referencia de 8 [N].



(c) Respuesta para referencia de 7 [N].



(d) Respuesta para referencia de 6 [N].

Otra limitación del exoesqueleto para ejercer fuerzas altas alrededor de 10 [N], es que fue diseñado para movimientos de la mano específicos. Por lo tanto, cuando la acción de control requiere un alcance superior al diseñado para alcanzar la referencia, el sistema para evitar daños estructurales se satura impidiendo el avance de los actuadores. A nivel de control, se puede observar en la figura 45.

Figura 45:

Posición del actuador ante el agarre del objeto 3.

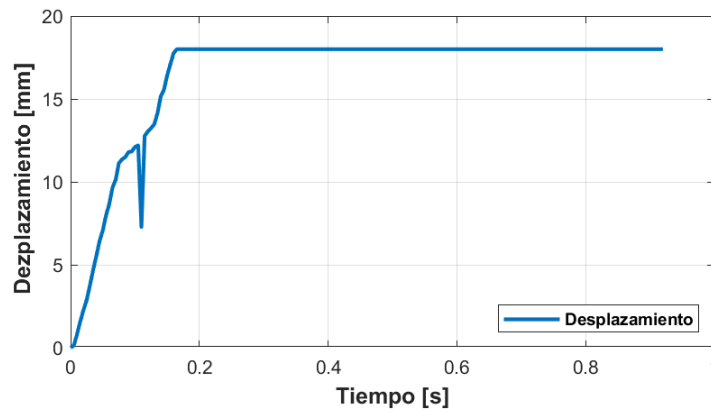


Tabla 8

Índices de desempeño del controlador de atraso ante la presión de los distintos objetos.

Referencia [N]	Objeto	$e_{ss} \%$	$t_s [s]$	IAE	ISE	ITAE	ITSE
9	1	0,222	1,135	9,128	77,222	4,721	38,059
	2	2,222	0,475	4,014	35,805	0,9032	8,056
	3	6,667	0,515	4,336	37,659	1,063	9,060
8	1	0,556	1,480	8,637	60,268	4,918	29,936
	2	0,778	0,610	4,752	37,636	1,426	11,291
	3	8,333	0,770	5,134	37,075	1,709	11,354
7	1	-	-	-	-	-	-
	2	0,778	0,185	1,038	7,183	0,078	0,539
	3	3,889	0,325	2,076	14,366	0,311	2,155
6	1	-	-	-	-	-	-
	2	0,556	0,555	3,256	19,276	0,895	5,301
	3	3,222	0,490	2,664	15,771	0,599	3,548

Nota. Para el objeto 1 con referencia de 6 y 7 [N], no presenta tiempo de establecimiento, por que llega a la referencia con un comportamiento periódico.

Teniendo en cuenta que el sistema diseñado debe establecerse con un error de estado estable menor al 5%, se observa que el $e_{ss} \%$ se ve afectado cuando se trata de establecer el sistema ante

la presión del objeto 3 con referencias mayores a los 8 [N]. Esta limitación se comprueba en la caracterización del sistema realizado con este objeto (ver figura 33). En esta, se asegura que para el objeto 2 no es posible ejercer fuerzas superiores a 8 [N], cuando se realiza el control con 9 [N] o incluso 10 [N] se requiere un mayor recorrido del actuador lineal para comprimir el objeto, tanto así, que en menos de 0.2 [s] la señal de posición se satura (ver figura 45).

Con base en el índice de desempeño ITAE, el controlador presenta mejor desempeño sobre el objeto 2 para referencias 7, 8 y 9 [N]. A diferencia que para una referencia de 6 [N] se desempeña mejor en el objeto 3. Esto debido que le da más importancia en el cálculo al estado estable, mostrando buenos rendimientos en los sistemas que se estabilizan rápidamente. A nivel físico esto se da por que el objeto 2 tiene capacidad de deformación media (ver figura 29) y cuando el sensor de fuerza comprime el objeto, este se adapta al mismo mejorando la precisión en el contacto.

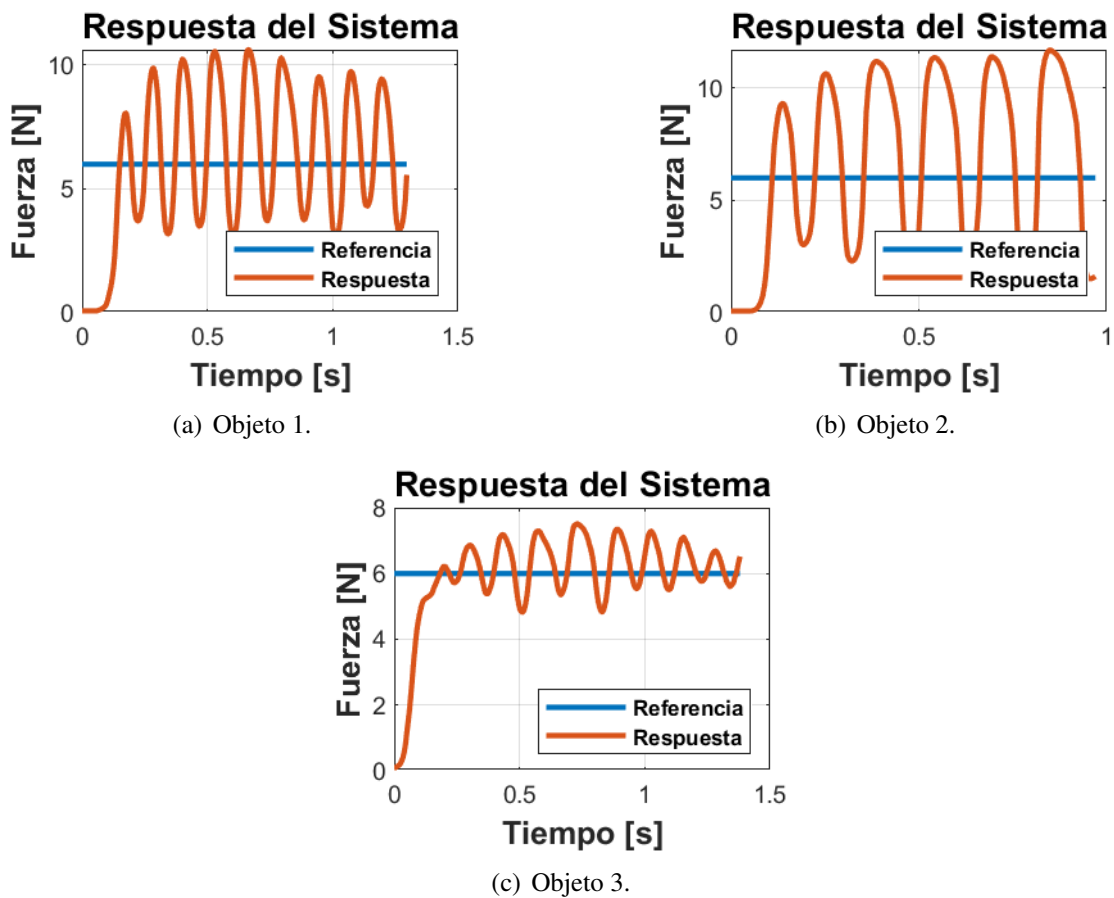
Con el segundo índice ITSE que prioriza las respuestas rápidas y errores oscilatorios pequeños. Muestra que para referencias altas 8 y 9 [N] se desempeña mejor el Objeto 2. Luego, para referencias 6 y 7 [N] tiene mejor desempeño el objeto 3.

4.2. Comportamiento de la fuerza del dedo índice con el control de atraso

En el apartado anterior, el controlador diseñado funciona de acuerdo a los requerimientos. Por tanto, se decide estudiar el comportamiento en el dedo índice, obteniendo las siguientes respuestas para los tres objetos con una referencia de fuerza de 6 [N].

Figura 46:

Respuesta del sistema en dedo Índice para el controlador de Atraso para 6 [N].

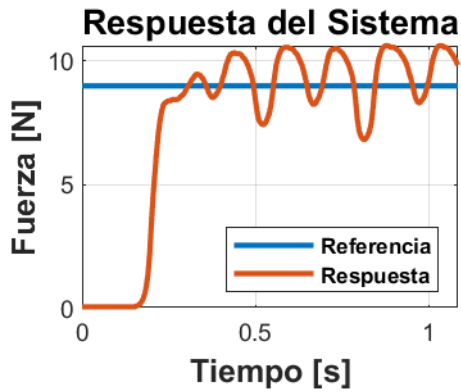


Posteriormente, se realiza el mismo experimento para una referencia de fuerza de 9 [N],

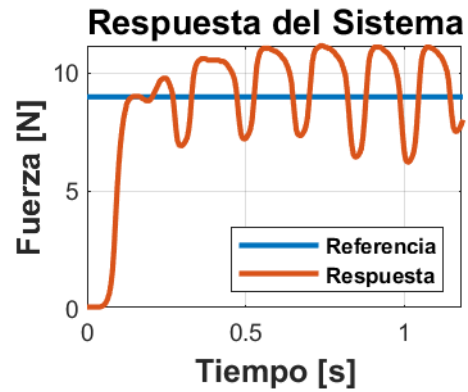
obteniendo los siguientes resultados:

Figura 47:

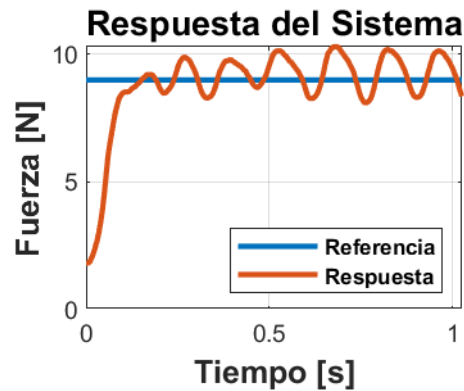
Respuesta del sistema en dedo Índice para el controlador de Atraso para 9 [N].



(a) Objeto 1.



(b) Objeto 2.



(c) Objeto 3.

Se observa que el sistema presenta más oscilaciones para una referencia de fuerza de 6 [N] que para una de 9 [N] (ver las figuras 47 y 46). Con estos resultados obtenidos en ambas gráficas, se puede evidenciar que el controlador trata de realizar su función. Es decir, este sigue la referencia de fuerza por lo que realiza una acción de control apropiada al comportamiento. Sin embargo, el

sistema no se establece debido a los factores que influyen en los resultados del experimento, tales como el rango de fuerza que puede imprimir sobre cada objeto y el rango de desplazamiento de los actuadores en lazo abierto.

En el apéndice 1, se detalla la respuesta del sistema de fuerza, de posición, la acción de control y el error. Para los tres objetos con referencia de fuerza de 6 [N] como para 9 [N].

5. Conclusiones

- En la obtención del modelo dinámico de la fuerza, se debió caracterizar el sistema de fuerza en lazo abierto para obtener los rangos que el dispositivo puede imprimir sobre el objeto y rango de PWM permitido por el sistema mecánico del actuador para que el exoesqueleto no sufra daños. Por tanto, para tener una respuesta adecuada del sistema ante un objeto, es necesario que este se ubique en la posición de agarre adecuada, debido a que el actuador posee un delta de desplazamiento lineal para realizar el agarre adecuado ante diferentes materiales. Finalmente, el tipo de material del objeto influye en la respuesta dinámica del sistema por sus características como tipo de superficie, capacidad de deformación y volumen. En consecuencia de ello, el objeto 1 es el sistema que más tarda en establecerse en las referencias, debido a la superficie liza (Ver tabla 8).
- El comportamiento del sistema de control de fuerza, varía dependiendo en el dedo donde se mida la fuerza. Esto debido a que por su anatomía, para el agarre de distintos objetos su posición varía. Por tanto, se ejerce fuerza en unos más que en otros. Por consiguiente, la ubicación del sensor de fuerza es distinta en cada dedo, obteniendo una respuesta dinámica de lazo abierto diferente para cada uno. Por estas razones, al validar el controlador en el dedo índice no se obtiene buen resultado, lo que se comprobó en la respuesta del sistema (Ver figuras 46 y 47).
- El controlador proporcional puede establecer al sistema en la referencia deseada bajo los

parámetros de diseño, siempre y cuando este cuente con una programación directa que le permita modificar el rango de la señal de actuación, en función de la fuerza que se desea aplicar, algo que resulta no muy práctico, en la medida que el proceso de sintonización resulta ser más tedioso.

- Se establecieron y seleccionaron los elementos de lazo abierto para el control de fuerza del exoesqueleto, logrando mejorar el desempeño dinámico de los movimientos básicos de la mano, por medio del diseño de un compensador de atraso con una ganancia proporcional de 410, que cumple con los requerimientos de diseño establecidos. De esta manera, en la validación experimental del lazo cerrado de control de fuerza en el exoesqueleto, se demuestra que el controlador presenta porcentaje de error en estado estable y tiempo de establecimiento bajos, para objetos con capacidad de deformación alta con un rango de fuerzas de 6 a 7 [N], media con un rango de fuerzas de 6 a 9 [N] y baja con un rango de fuerzas de 8 a 9 [N]. En relación con lo anterior, se ratifica con el índice de desempeño ITAE menor a 5 para todos los objetos, mostrando mejor comportamiento ante el objeto 2.
- Por último, este estudio aportó en el desarrollo de nuevas estrategias de control de fuerza para los dispositivos de miembro superior, debido a que se tiene un control independiente y sencillo de implementar .

6. Recomendaciones

- El exoesqueleto utilizado en este estudio fue construido previamente con el objetivo de ejecutar movimientos básicos de la mano, que le permitan al paciente realizar terapias para la recuperación de la movilidad en el miembro afectado. Sin embargo, como fue mencionado en el apartado de análisis experimentales, con esta estructura no es posible realizar la sujeción y prensión de objetos empleando el dedo pulgar, además presenta algunas limitaciones cuando se requiere ejercer fuerzas superiores a los 10 [N] por cuestión de sus materiales. Se sugiere probar el sistema de control diseñado en un dispositivo que sea construido específicamente para la realización de agarres de fuerza en objetos.
- Las láminas de poliéster con la que está fabricado el sensor de fuerza utilizado (fsr-402), con su uso conduce a problemas como la repetibilidad, histéresis y no linealidad de la salida del sensor. Se espera que con el avance de la tecnología salgan al mercado a un bajo precio, mejores sensores que puedan corregir las falencias mencionadas.

Referencias Bibliográficas

- Arduino. (2019). *Arduino mega 2560 rev3*. Pagina Oficial de Arduino. Descargado de <https://arduino.cl/arduino-mega-2560/>
- Cambiaso, J. S. M. (2017). *Desarrollo de exoesqueleto robótico de bajo costo para rehabilitación motora de manos y dedos de pacientes en tratamiento de accidente cerebrovascular* (Inf. Téc.). Universidad Técnica Federico Santa María.
- Castro Sancan, A. G. (2001, 2). *Pruebas de estructura de control y pruebas de caja negra*. Descargado de <https://www.monografias.com/docs113/pruebas-estructura-control-y-pruebas-caja-negra/pruebas-estructura-control-y-pruebas-caja-negra>
- Delgado, E., y Cordero, E. (2010). *Estimación de la velocidad de los movimientos básicos de la mano, a partir de las señales electromiográficas y usando redes neuronales artificiales*. Escuela de ingeniería electrónica. UIS.
- Duarte, S. C. T. (2000). Factores que inciden en la accion de escribir a mano. *Revista Ocupación Humana*, 8(4), 55-64.
- Engeberg, E. D., Meek, S. G., y Minor, M. A. (2008). Hybrid force–velocity sliding mode control of a prosthetic hand. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 55, 1572-1581. doi: 10.1109/TBME.2007.914672
- Geethanjali, P. (2016). *Myoelectric control of prosthetic hands: State-of-the-art review* (Vol. 9).

Gomez, C. I. C. (2020). *Plantilla instrumentada para medición de la presión plantar* (Inf. Téc.). Universidad Técnica del Norte.

Interlink Electronics, I. (2008). *Fsr® 400 series data sheet* (1.ª ed., Vol. 1). Autor Descargado de https://wiki.seeedstudio.com/Grove-Round_Force_Sensor_FSR402/

Interlink Electronics, I. (2017). *Fsr400 series datasheet* (1.ª ed., Vol. 1). Autor Descargado de <https://f.hubspotusercontent20.net/hubfs/3899023/Integration%20Guides/FSR%20X%20%26%20UX%20Integration%20Guide%20-%20Interlink%20Electronics.pdf>

Ljung, L. (1994). System identification in a mic perspective. *Modeling, Identification and Control*, 15(3), 153-159.

López, L. A. A. (2012). Biomecánica y patrones funcionales de la mano. *Morfología*, 4(1).

Microlab. (2021, 5). *Sensor de fuerza fsr 406 con arduino*. Descargado de <https://microlab.ec/blog/sensor-de-fuerza-fsr-406-con-arduino/>

Moreno, L. M. C., y Valderrama, A. V. A. (2014). *Prototipo de prótesis transradial para el agarre de objetos* (Inf. Téc.). Escuela de Ingeniería de Antioquia, Universidad CES.

Niño, C. L. F. (2021). *Diseño y validación de un modelo de exoesqueleto robótico funcional a nivel de laboratorio para rehabilitación de mano* (Inf. Téc.).

Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna* (Vol. Quinta edición). Pearson Educación.

Pons, J. L. (2008). *Wearable robots: Biomechatronic exoskeletons*. John Wiley and Sons. doi: 10.1002/9780470987667

Resistors, F. S. (2002). An overview of the technology. *FSR Integration Guide & Evaluation Parts Catalog with Suggested Electrical Interfaces*.

Samaniego, J. P. C., Escobar, J. C., Gonzalez, E. E., y Franklin, G. (2012). *Modelado de caja negra, analisis y diseño del sistema de control de temperatura del invernadero para orquidias del jardín botánico reinaldo espinosa"; utiizando matlab*.

Sarac, M., Solazzi, M., y Frisoli, A. (2019). Design requirements of generic hand exoskeletons and survey of hand exoskeletons for rehabilitation, assistive, or haptic use. *IEEE transactions on haptics*, 12(4), 400–413.

Sarmentero Medina, E., y cols. (2018). Acondicionamiento de sensores.

Sevil, J. S. A., Montañés, J. L., Matamoros, A. A., y Dom´, J. A. (2018). Control de una mano biónica usando técnicas de reconocimiento de gestos en tiempo real a través del dispositivo leap motion sensor. En (p. 569-575).

Sánchez, D., y Martín, R. (2019, 7). *Jóvenes salmantinos buscan financiación para lanzar un exoesqueleto biónico para personas sin movilidad en manos*. Descargado de <https://www.20minutos.es/noticia/3708887/0/jovenes-salmantinos-buscan-financiacion-para-lanzar-exoesqueleto-bionico-para-personas-sin-movilidad-manos/>

TEKSCAN TM. (2019). *Best practices in mechanical integration of the flexiforce sensor* (Rev

B 081020 ed.). TEKSCAN. Descargado 2022-06-03, de [https://www.tekscan.com/
resources/product-guide/best-practices-mechanical-integration-flexiforce
-sensor](https://www.tekscan.com/resources/product-guide/best-practices-mechanical-integration-flexiforce-sensor)

Yaringaño, G. S. (2020). *Diseño e implementación de un sistema de control para una prótesis mioeléctrica de miembro superior con control de fuerza y posición* .

Apéndices

Apéndice A. Respuesta del sistema en el dedo anular

Figura 48:

Respuesta del sistema para el objeto 1.

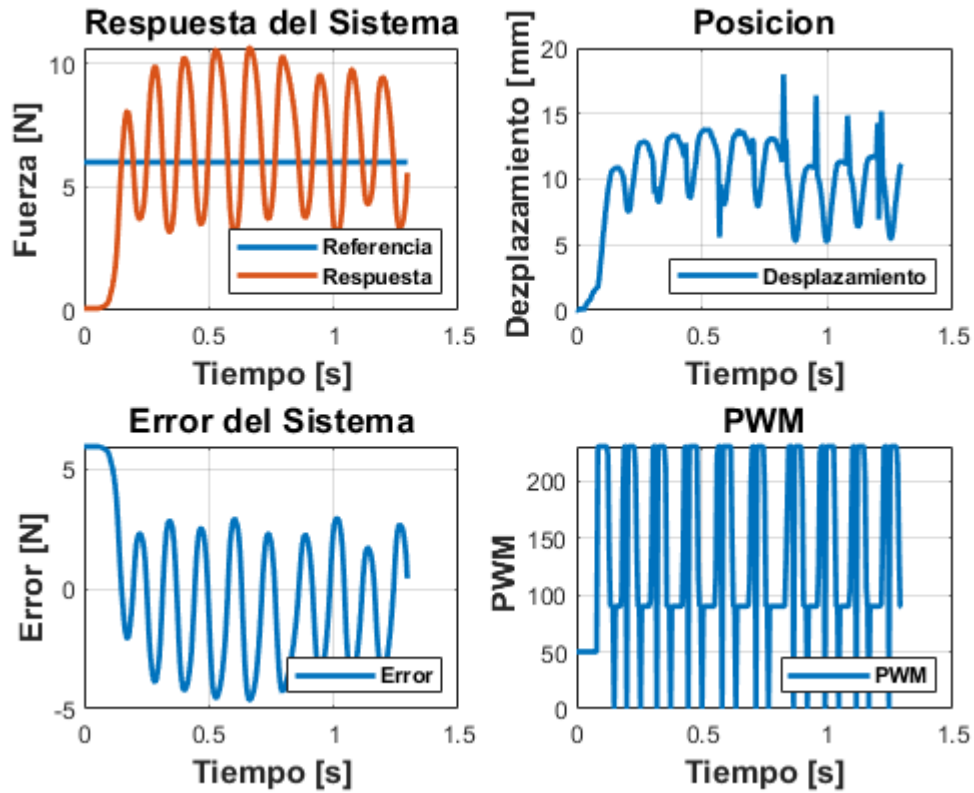


Figura 49:
Respuesta del sistema para el objeto 2.

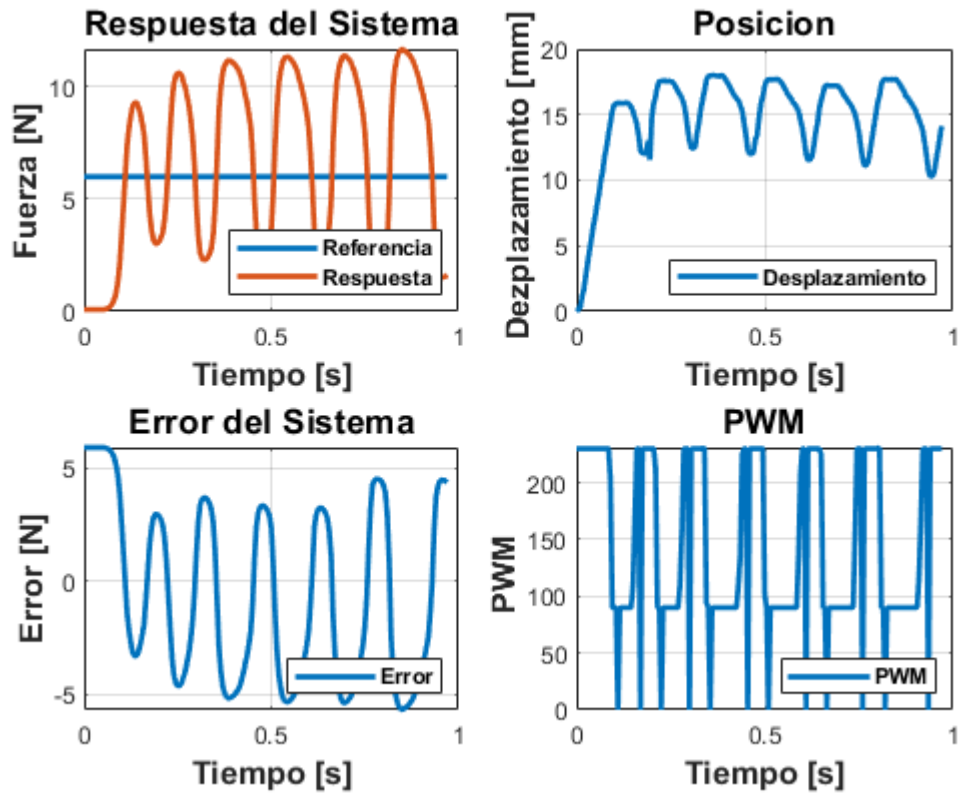


Figura 50:
Respuesta del sistema para el objeto 3.

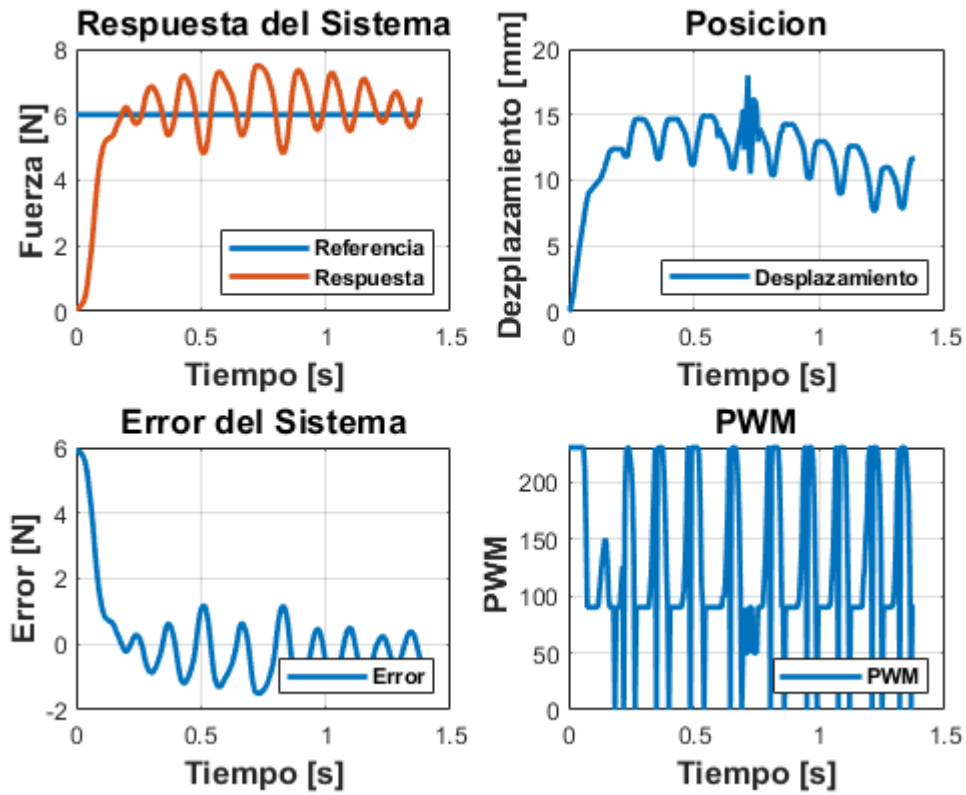


Figura 51:
Respuesta del sistema para el objeto 1.

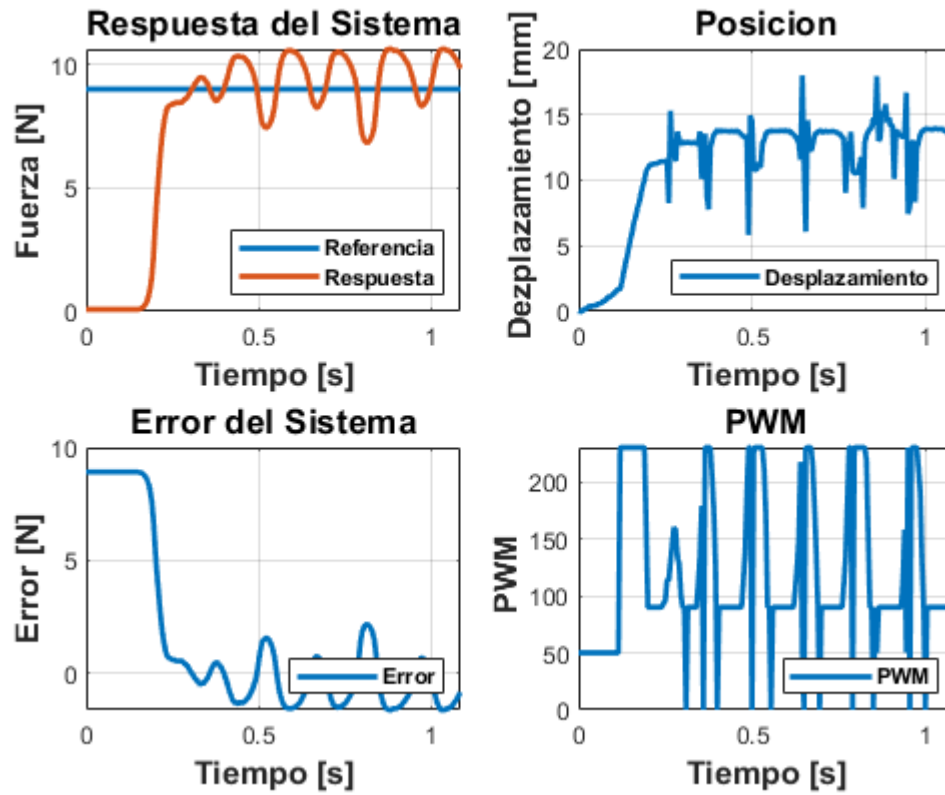


Figura 52:
Respuesta del sistema para el objeto 2.

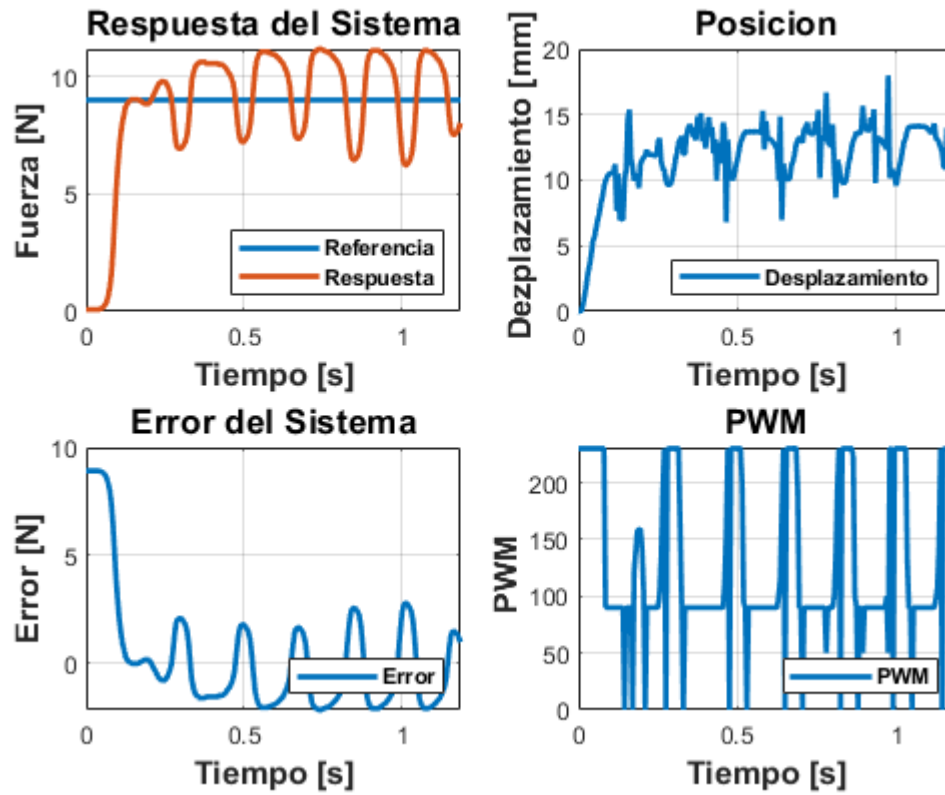
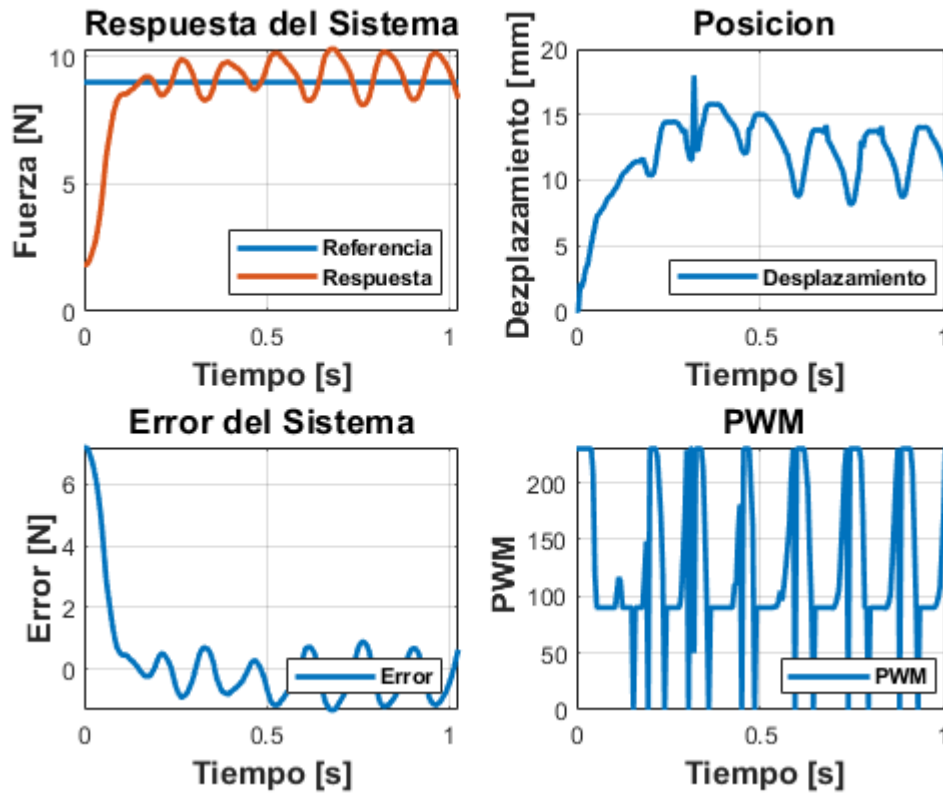


Figura 53:
Respuesta del sistema para el objeto 3.



Apéndice B. Video de la validación experimental

En el siguiente link <https://youtu.be/YHKaX8ap4ns>. Se observa, el video del experimento realizado en los 3 objetos junto con los resultados. Validando experimentalmente el sistema de control de fuerza en el exoesqueleto de mano. Estableciendo una fuerza de referencia para el objeto 1 de 8 [N], el objeto 2 de 9 [N], el objeto 3 de 6 [N].

Adicionalmente, puede encontrar en este *link* los ficheros correspondientes al código implementado y los archivos de diseño de las pcb's.