



Tesis

**Para obtener el grado de
maestro en ciencias**



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias en Mecatrónica

Controlador de fuerza de dedo antropomórfico

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Mecatrónica

Presenta:

Bart Antonio Ramírez Padrón

Dirigido por:

Dr. Luis Morales Velázquez

SINODALES

Dr. Luis Morales Velázquez

Presidente

Firma

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

Secretario

Firma

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

Vocal

Firma

Dr. Jesús Rooney Rivera Guilen

Sinodal

Firma

M.C. Luisa Ramírez Granados

Sinodal

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala

Firma

Director de la Facultad

Dr. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña

Firma

Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario

Querétaro, QRO

México.

Septiembre 2020

Resumen

Esta tesis comprende el diseño de una arquitectura de control para un dedo robótico. La arquitectura del controlador propuesto esta basada en dos instancias: en el modelo dinámico y cinemático del dedo robótico y el control de posición con lazo esclavo de corriente, las cuales unidas, mediante nuestro algoritmo se obtendrá el controlador de fuerza. Un modelo específico es desarrollado para poder estimar y predecir la retroalimentación de fuerza basado en la torca generada por el actuador del dedo. Esto permitirá evitar el uso de sensores de fuerza para lograr un correcto control de fuerza en el agarre. El actuador utilizado en la investigación fue el motor Pololu 25D rk-370ca-22170, el cual demostró la presencia de retroceso en presencia del controlador lineal PID. Mediante el control modos deslizantes, controlador no lineal, se pudo eliminar la no linealidad. Con ello se garantiza una posición específica sin la presencia de oscilaciones. El hardware y el software fueron diseñados e implementados como prototipo. La precisión de la predicción de fuerza es comprobada experimentalmente mientras se agarra un objeto. Estudios muestran que el dedo robótico es capaz de lograr el agarre gracias al control de fuerza.

Abstract

This thesis addresses the design of control architecture for a robotic finger. The proposed control architecture is based on both a proper kinematic and dynamic modeling of a robotic finger and a positional controller with an inner current loop. The combination of the former and the latter by a suggested algorithm expels a force controller. A specific model is developed to estimate and predict the force feedback based on the input motor torque. This allows avoiding using force sensors for achieving a proper grasping force control. The investigation uses the RK-370ca-2217 Pololu 25D motor, showing backlash in the presence of the PID controller, as a result, a sliding mode controller is implemented to vanish the backlash. Therefore the positional control is established without oscillations. Hardware and software of the proposed control are developed and implemented in a prototype. The force prediction accuracy is tested experimentally while grasping an object. Tests show that the robotic finger can accomplish the needed grasping with proper force feedback control.

Key words: Force controller, robotic finger, grasping, experimental testing, PID controller, SMC controller.

Agradecimientos

A mi madre, padre y hermanos.

La gente involucrada en el proyecto. En especial al Dr. Juan Carlos Jauregui Correa y el Dr. Giuseppe Carbone, por la confianza, la increíble experiencia y el privilegio de trabajar con ustedes.

A CONACYT por permitir nombrar lo que me gusta trabajo.



Contenido

Resumen	1
Abstract	2
Agradecimientos	3
1 Introducción	10
1.1 Antecedentes	10
1.1.1 Precedentes prótesis de mano	10
1.1.2 Precedentes de prótesis de mano en México y la UAQ	12
1.1.3 Dispositivo LARM	13
1.1.4 Precedentes en el control de prótesis de mano	15
1.2 Descripción del problema	15
1.3 Justificación	16
1.4 Planteamiento teórico	17
1.4.1 Hipótesis	17
1.4.2 Objetivo general	17
1.4.3 Objetivos particulares	17
1.5 Planteamiento general	17
2 Fundamentación teórica	19
2.1 Anatomía del tipo de agarre	19
2.2 Mecanismos	19
2.3 Principio de movilidad del dedo antropomórfico	19
2.4 Actuador	19
2.4.1 Motores DC	20
2.4.2 Modelo del motor DC	20
2.5 Control lineal	21
2.5.1 Respuesta del sistema	21
2.5.2 Tiempo pico t_p	23
2.5.3 Sobrepasso máximo M_p	23
2.5.4 Espacio de estados	23
2.6 Control no lineal	24
2.6.1 No linealidades comunes en sistemas de control	25
2.7 Modos deslizantes	26
2.7.1 Control convencional	28
2.7.2 Controlador Quasi-modos deslizantes	28
3 Metodología	29
3.1 Diseño mecanismo dedo LARM	29
3.2 Resolución de la cinemática	30
3.3 Simulación de la dinámica	31
3.4 Precisión en la simulación	33
3.5 Instrumentación	35
3.6 Bloque Digital	37
3.7 Interfaz de usuario PC	37
3.8 Bloque de control	38
3.8.1 Controlador PID	38
3.8.2 Modo deslizante convencional	39

3.8.3	Identificación de la planta (Motor DC)	39
4	Experimentación y resultados	41
4.1	Comparación de controladores en simulación	41
4.1.1	Eliminación del chattering	42
4.1.2	Controladores en presencia de retardo (backlash)	43
4.1.3	Controladores de posición en presencia del dedo robótico	44
4.1.4	Resumen de los controladores utilizados hasta el momento	46
4.2	Identificación de la planta (Motor Pololu 25D)	47
4.3	Implementación de controladores de posición en dedo robótico	48
4.4	Controladores de posición ante perturbaciones	51
4.5	Comparación del cinemática simulada contra la real	53
4.6	Implementación de controladores de posición y fuerza en dedo robótico . . .	54
4.7	Primera experimentación	55
5	Conclusiones	57
	Bibliografía	58

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Lista de imágenes

1	(a) Four-Fingered Hand . (b) Toronto/BloorviewMAcMillan Hand. (c) Oxford intelligent hand. (d) IOWA hand. (e) Robotic Hand MA-I. (f) RCH- 1. (g) UB Hand 3. (h) SKKU Hand II. (i) Modular prosthetic limb.	10
2	(a) Michelangelo prosthetic hand. (b) SensorHand Speed. (c) Taska arm. (d) I-limb ultra.(e) Bebionic.	12
3	Tesis de prótesis de mano 1.0 UAQ de Castro (2011)	13
4	Dedo LARM. (a) Dedo LARM individual. (b) Configuración de dedos LARM para actuar como efector final de cualquier robot de n-grados de libertad.	13
5	Software y Hardware del dedo LARM. (a) GInterfaz de usuario Microsoft Visual Studio 2003. (b) Proceso de trabajo del hardware dedo LARM.	14
6	Contracción del mecanismo	16
7	Diagrama planteamiento general	18
8	Dedo LARM y sus movimientos	19
9	Señales de prueba. (a) Escalón unitario. (b) Rampa. (c) Parábola. (d) Senoidal.	22
10	Respuesta transitoria.	22
11	Diagrama de un sistema de control	25
12	No linealidades. (a) Saturación. (b) Zona muerta.	26
13	Retardo (Backlash).(a) Interacción entre engranes. (b) Representación gráfica del retardo (Backlash).	26
14	(a) Arquitectura de control de dedo robótico. (b) Estación de pruebas. (1) Alimentación para puente H y parte digital. (2) Alimentación parte analógica. (3) FPGA. (4) Dedo robótico y motor Pololu 25D. (5) PCB motor.	29
15	Dedo antropomórfico. (a)Cinemática del sistema.(b) Dinámica del sistema.	30
16	Solución de la cinemática por medio de Newton Raphson. El método es aplicado primero para (3) y (4), posteriormente mediante los cálculos obtenidos se resuelve (5) y (6).	31
17	Simulación de la cinemática dedo antropomórfico. (a) Simulación del sistema con $\theta_2 = -74.2$ grados. (b) Simulación del sistema con $\theta_2 = 29$ grados. La simulación fue desarrollada mediante el interprete Python y el algoritmo fig.16.	31
18	Dinámica del dedo robótico. (a) Dinámica de un mecanismo de 4 barras. (b) Algoritmo para la obtención de las fuerzas ejercidas por los falanges del dedo robótico.	32
19	Simulación del movimiento completo del dedo antropomórfico. (a) Simulación del sistema con $\theta_2 = -63.85$ grados. (b) Simulación del sistema con $\theta_2 = -32$ grados. La simulación fue desarrollada mediante el interprete Python y el algoritmo fig.18 (b).	33
20	Mecanismo de 4 barras.	34
21	(a) Simulación de mecanismo de 4 barras con $\theta_2 = 0.54$ radianes. La simulación mostró un error para el método aproximado θ_4 de 0.01 radianes, θ_3 de 0.02 radianes y $\dot{\theta}_3$ de 0.01 radianes/segundo. El tiempo de ejecución del método exacto fue más rápido. (b) Simulación de mecanismo de 4 barras con $\theta_2 = -0.059$ radianes. La simulación mostró un error para el método aproximado θ_4 de 0 radianes, θ_3 de 0.07 radianes y $\dot{\theta}_3$ de 0.01 radianes/segundo. El tiempo de ejecución del método exacto fue más rápido.	34
22	Componentes motor Pololu 25D	35
23	Componentes para la instrumentación	36
24	PCB fabricado	37

25	Interfaz de usuario PC	38
26	Diagrama controlador lineal PID	39
27	Diagrama controlador no lineal Modos deslizantes (SMC)	39
28	Comparativa de desempeño de controladores. (a) Simulación con $\theta_{ref} = 1$ radianes. (b) Visualización de las leyes de control de los controladores, en el caso del modos deslizantes se puede apreciar el "zigzag" mejor conocido como chatering.	41
29	Comparativa de desempeño de controladores. (a) Simulación con $\theta_{ref} = 1$ radianes. (b) Visualización de las leyes de control de los controladores. En este caso ya no se presenta el chatering por parte de las variantes de controladores por modos deslizantes.	42
30	Comparativa de desempeño de controladores. (a) Simulación con $\theta_{ref} = 1$ radianes, backlash = 0.5. (b) Visualización de las leyes de control de los controladores. En este caso se puede observar que el PID presenta oscilaciones debido a lo no-linealidad de retardo (Backlash).	43
31	Comparativa de desempeño de controladores. (a) Simulación con $\theta_{ref} = 1$ radianes, backlash = 2.5. (b) Visualización leyes de control. Lo interesante en este caso es que mientras aumenta la zona muerta del retardo el PID se ve más afectado mientras el SMC no se ve afectado.	44
32	Representación en bloques del controlador de posición para el dedo robótico. (a) Controlador de posición PID para el dedo antropomórfico.(b) Controlador de posición PID, con bloque de retardo (backlash), para el dedo antropomórfico.	44
33	Resultados de la simulación, seguimiento del senoidal con controlador lineal. (a) Dedo siguiendo senoidal.(b) Dedo siguiendo senoidal ante backlash = 1.	45
34	Representación en bloques del controlador de posición para el dedo robótico. (a) Controlador de posición SCM/sigmoide y SCM/saturación para el dedo antropomórfico.(b) Controlador de posición SCM/sigmoide y SCM/saturación, con bloque de retardo (backlash), para el dedo antropomórfico.	45
35	Resultados de la simulación, seguimiento del senoidal con controlador no-lineal. (a) Dedo siguiendo senoidal.(b) Dedo siguiendo senoidal ante backlash = 1.	46
36	Resultados de la simulación, seguimiento del senoidal con controlador no-lineal. (a) Sobe paso máximo motor Pololu 25D. (b) Tiempo de levantamiento motor Pololu 25D.	48
37	Estación de pruebas dedo robótico. (a) Vista lateral dedo robótico. (b) Vista isométrica dedo robótico.	49
38	Controlador de posición PID ante perfil de velocidad. $\theta_{ref} = 1.5$ radianes.	49
39	Controlador de posición PID ante perfil de velocidad. Presencia de la no linealidad backlash.	50
40	Controlador de posición SMC ante perfil de velocidad. $\theta_{ref} = 1.5$ radianes.	50
41	Controlador de posición SMC/Saturación ante perfil de velocidad. $\theta_{ref} = 1.5$ radianes.	50
42	Controlador de posición SMC/Sigmoide ante perfil de velocidad. $\theta_{ref} = 1.5$ radianes.	51
43	Controlador PID ante perfil de velocidad. (a) Control PID $\theta_{ref} = 1.5$ radianes, perturbaciones en los segundos: 14, 16, 22, 26, 32. (b) Presencia de backlash.	51
44	Ley de control PID. En el segundo 65 se tiene el primer intento de alcanzar la posición deseada, en el segundo 88 el segundo.	52

45	Controlador SMC/Saturación ante perfil de velocidad. (a) Control SMC/Saturación $\theta_{ref} = 1.5$ radianes, perturbaciones en los segundos: 14, 18, 21, 23, 37. (b) Ley de control.	52
46	Controlador SMC/Sigmoide ante perfil de velocidad. (a) Control SMC/Sigmoide $\theta_{ref} = 1.5$ radianes, perturbaciones en los segundos: 14, 17, 20, 23, 26, 32, 36. (b) Ley de control.	53
47	Comparación del cinemática simulada contra la real. (a) Cinemática simulada: $\theta_2 = 75.75^\circ$, $\theta_5 = 78.547^\circ$ y $\theta_8 = 136.87^\circ$. (b) Cinemática simulada: $\theta_2 = 61.15^\circ$, $\theta_5 = 66.13^\circ$ y $\theta_8 = 207.76^\circ$. (c) Cinemática simulada: $\theta_2 = 45.08^\circ$, $\theta_5 = 57.31^\circ$ y $\theta_8 = 249.41^\circ$. (d) Cinemática real: $\theta_2 = 75^\circ$, $\theta_5 = 73^\circ$ y $\theta_8 = 149^\circ$. (e) Cinemática real: $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_5 = 61$ y $\theta_8 = 200$. (f) Cinemática real: $\theta_2 = 45$, $\theta_5 = 65$ y $\theta_8 = 230$	53
48	Controlador de fuerza.	54
49	Agarre del dedo robótico. Posición de referencia $\theta_{ref} = 0.78$ radianes. corriente máxima medida 1.2 A.	55
50	Robotic finger grasping. The reference position $\theta_{ref} = 1.2$ radians. The maximum constant measured current is 2.98 A.	55
51	Agarre del dedo robótico.	56

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Lista de tablas

1	Características de la curva de respuesta	21
2	Dimensiones reales del dedo LARM.	29
3	Dimensiones propuestas para el dedo antropomórfico.	30
4	Resumen del desempeño entre métodos.	35
5	Tabla comparativa de controladores	42
6	Tabla comparativa de controladores	46

Dirección General de Bibliotecas UAQ

1 Introducción

1.1 Antecedentes

El presente documento va encaminado a la obtención de un dispositivo con la capacidad de controlar la fuerza de agarre, dando como consecuencia una correcta manipulación de los objetos. En primera instancia se dará un breve acercamiento, en donde se presente los espacios, donde se ha utilizado e investigado este tipo de dispositivo. Es importante destacar que dicho dispositivo figura para utilizarse en el campo biomédico, como prótesis de mano. Sin embargo, su proyección al aspecto industrial, es decir, incorporar el mecanismo de la prótesis de mano a un manipulador industrial es factible. Durante toda la redacción se hará mención de los aspectos biomédicos con más ahínco.

1.1.1 Precedentes prótesis de mano

A lo largo de la historia se fueron archivando primeras tentativas de cómo debería ser una mano robótica, resultando en un diversos prototipos. Dichos prototipos marcaron la resolución para ciertas problemáticas. En el siguiente apartado se exponen las aportaciones en forma cronológica del las prótesis de manos en el campo de la investigación, figura 1.



Figura 1: (a) Four-Fingered Hand . (b) Toronto/Bloorview/MacMillan Hand. (c) Oxford intelligent hand. (d) IOWA hand. (e) Robotic Hand MA-I. (f) RCH- 1. (g) UB Hand 3. (h) SKKU Hand II. (i) Modular prosthetic limb.

En primera instancia se encuentra Four-Fingered Hand (Zhang et al., 2001), figura 1(a). La cual cuenta a grandes rasgos con: 4 grados de libertad (gdl), es actuada por Servomotores y contiene 4 falanges idénticos, cada uno de los cuales presenta 4 gdl actuados por 4

servomotores y contiene 8 sensores de posición. El control de posición es por medio de un DSP (Procesador Digital de Señales). Toronto/BloorviewMAcMillan Hand (Dechev et al., 2001), figura 1(b). Cuyas características son: 1 gdl, actuado por un motor DC y su diseño le permite trabajar sin la necesidad de sensores. Utiliza un mecanismo que reduce la movilidad del dedo a un grado de libertad. Oxford intelligent hand (Kyberd and Pons, 2003), figura 1(c). Contiene: 1 gdl, es actuado por un motor DC y su control es implementado en el microcontrolador LonWorks. El dedo contiene un mecanismo de 4 barras. Utiliza sensores de fuerza (Sensor-resistor de fuerza). IOWA hand (Yang et al., 2004), figura 1(d). Presenta: 3 gdl, su actuador es cable/motor DC y los dedos están compuestos por resortes y un cable el cual al estirarse simulará la contracción de las falanges. Robotic Hand MA-I (Grosch et al., 2004), figura 1(e). Muestra: 4 gdl, actuados por motores DC y se utiliza una interfaz gráfica de usuario para determinar la posición del punto de contacto del dedo. En caso del posicionamiento se utiliza la cinemática inversa. RCH- 1 (Rocella et al., 2004), figura 1(f). Contiene: 1 gdl, actuado por un motor DC y esta compuesta por 4 dedos y un pulgar. Cada dedo esta actuado mediante un cable, movido por un motor DC. Su máxima fuerza de agarre es de $30N$. Cuenta con 16 sensores de contacto, 2 sensores 3D y un sensor de fuerza FSR. UB Hand 3 (Lotti et al., 2005), figura 1(g). Presenta 3 gdl, actados por Tendón/Motor DC y mediante el movimiento del motor y poleas se da el direccionamiento del dedo. La actuación del dedo se da por medio de un controlador de corriente/torca, mediante una computadora personal. SKKU Hand II (Choi et al., 2006), figura 1(h). Esta constituida por: 3 gdl, actuados por motores DC y la mano se comunica con sus componentes mediante el protocolo CAN. La transmisión de poder se hace mediante engranes. Contiene 10 tarjetas de control para cada motor, donde el microprocesador es el PIC16F458 en conjunto de un sensor de corriente. Se utiliza un controlador de fuerza PID. Modular prosthetic limb (Fase 2) (Hopkins, 2019) (Hopkins, 2011), figura 1(i). Donde sus características son: 2 gdl, actuados por motores DC, además de que contiene 21 sensores de posición, 10 sensores de contacto, 14 sensores de torca, 17 sensores de temperatura, 3 acelerómetros, 3 sensores de fuerza y 41 sensores adicionales. Utiliza el protocolo CAN para la medición de sensores. Trabaja con un voltaje de 24 V.

De acuerdo a lo antes expuesto se muestra el direccionamiento de la investigación, que rescata ciertos aspectos como la actuación por motores DC, así como el uso de mecanismos para la movilidad de los falanges. Con la única diferencia de que la investigación usara menos sensores e implementara una técnica no lineal para el control del falange de una prótesis de mano.

Al mismo tiempo gracias al conocimiento aportado y su perfeccionamiento, la industria busco la manera de posicionar prótesis al alcance del publico desprendido una gama de marcas a la venta del público, figura 2. Comercialmente se encuentra Michelangelo prosthetic hand (ottobock, 2019a), figura 2(a). La cual genera $70N$ en el agarre, de forma neutral $15N$. Trabaja a partir de señales mioeléctricas. Contiene 7 posiciones para la mano y opera a un voltaje de 11.1 V. La SensorHand Speed (ottobock, 2019b), figura 2(b). Presenta una fuerza en el agarre de $100N$, consta de una pinza que internamente es un mecanismo de 4 barras. Sensores que permiten evitar la caída de objetos. La Taska arm (motioncontrol, 2019), figura 2(c). Contiene 23 patrones en el agarre, es resistente al agua y tiene rotación de pulgar. Funciona a partir de señales mioeléctricas. Movimiento de dedos es independiente. La I-limb ultra (bionics, 2019), figura 2(d). Muestra una app que permite 14 patrones de agarre, contiene un control de fuerza que permite que los objetos no se caigan en el agarre. Movimiento de dedos es independiente. Por ultimo se encuentra la mano Bebionic (Bebionic, 2019), figura 2(e). Provee una fuerza máxima de $140N$. Contiene 14 patrones de agarre. Los movimiento de dedos es independiente. Controla la fuerza para evitar que los objetos se caigan y trabaja a partir de señales mioeléctricas.

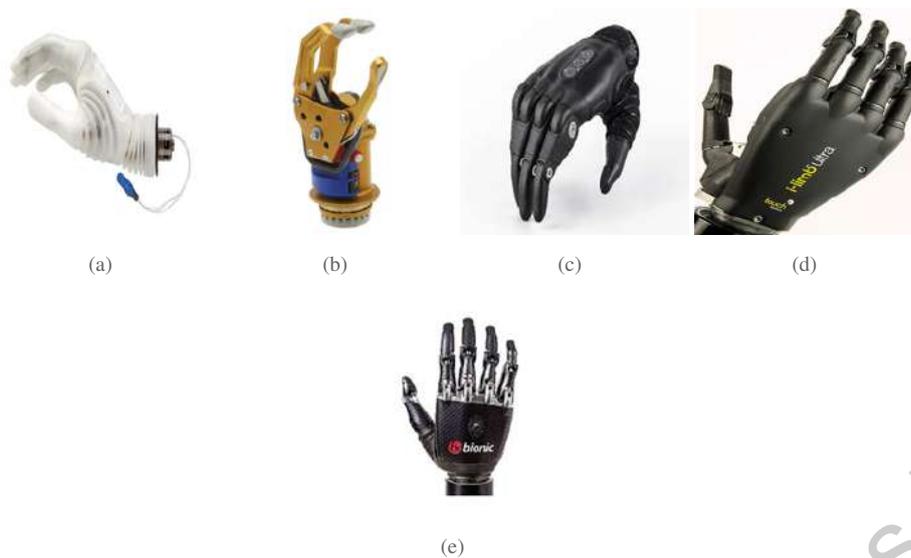


Figura 2: (a) Michelangelo prosthetic hand. (b) SensorHand Speed. (c) Taska arm. (d) I-limb ultra.(e) Bebionic.

En el aspecto nacional se ha visto la participación de trabajos que aluden a dos campos, el científico y comercial. Y aunque es contando, este tipo de labor sigue en expansión y como consecuencia cada vez en más recurrente su mención como en el siguiente apartado.

1.1.2 Precedentes de prótesis de mano en México y la UAQ

En México el Lic. Luis Armando Bravo, egresado de la Universidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (UPIITA), es director y fundador de Pro-bionics (empresa mexicana especializada en el desarrollo de prótesis de mano mioeléctricas). La empresa está bajo certificación NOM-001-SCFI-1993, además de una certificación del organismo de Normalización y certificación Electrónica S.C.(NYSE) que regula los productos electrónicos y eléctricos vendidos en México. El tipo de prótesis generadas es de un grado de libertad y se asemeja a la SensorHand de ottobock.

Por parte de la maestría en instrumentación y control que imparte la Universidad Autónoma de Querétaro, la alumna Castro (2011), quien atendió la tesis , se muestra el desarrollo del direccionamiento del dedo índice para ocuparlo en el desarrollo de una prótesis de mano. El movimiento del dedo actúa por medio del bio-potencial muscular y además de un controlador PID.

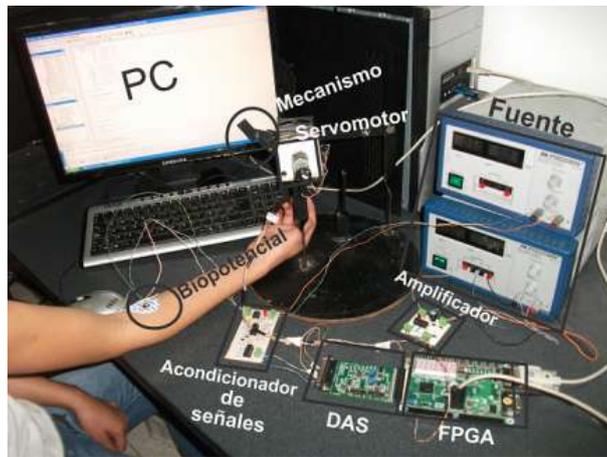


Figura 3: Tesis de prótesis de mano 1.0 UAQ de Castro (2011)

Sin embargo, a pesar del desarrolló de nuevos dispositivos, la investigación ha permitido evidenciar la obligación de seguir mejorando las prótesis de mano, pues con ello se podrá alcanzar el principal objetivo que es mimetizar la funcionalidad de la mano humana. Como consecuencia se han creado dispositivos que cada vez se aproximan más al comportamiento idéntico de la mano humana.

1.1.3 Dispositivo LARM

En LARM (Laboratorio de Robótica y Mecatrónica en Cassino Italia) se ha desarrollado un mecanismo de bajo costo, de fácil direccionamiento para el agarre con un grado de libertad. Este dispositivo que replica un dedo antropomórfico a base de mecanismos articulados, Fig. 4, normalmente se usa como efector final de cualquier robot de n-grados de libertad. .

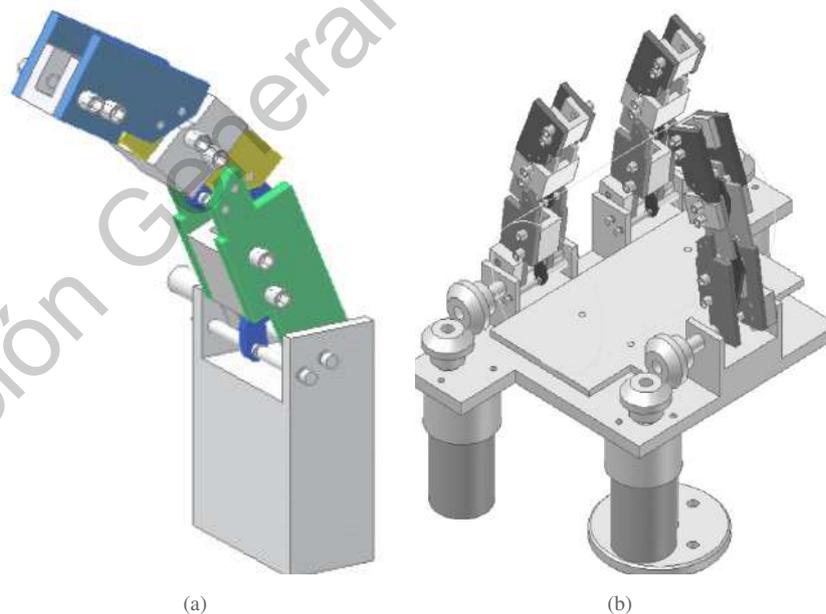


Figura 4: Dedo LARM. (a) Dedo LARM individual. (b) Configuración de dedos LARM para actuar como efector final de cualquier robot de n-grados de libertad.

En su implementación se advierte que es un dispositivo constituido por 3 mecanismos

idénticos controlados por DSP (Procesador Digital de Señales), además está conformado por 3 motores DC con su caja de engranes. Para la medición de fuerza, se hizo uso de sensores piezoresistivos. Este tipo de sensores se escogieron debido a su tamaño y su bajo costo. Además de un encoder, para cada dedo, con lo cual se detecta la posición del dedo.

Con respecto al control del Hardware, se desarrollaron algunos comandos de operación, para un agarre por posición, agarre por fuerza, soltar y paro de emergencia. Monitorear los valores de fuerza y ángulos.

El controlador implementado en el DSP TMS320LF2407A, está conformado por dos partes, las cuales se comunican por RS232. La primera parte consta de una interfaz de usuario programada en Microsoft Visual Studio 2003, con el cual el usuario puede interactuar con la mano LARM. La segunda parte consta de un controlador en un DSP que controla el accionamiento de los 3 motores por medio de PWM (Modulación de Ancho de Pulso).

El panel de control consta de 5 partes:

1. Debug: Tres botones que controlan el movimiento de la mano LARM.
2. Control de Fuerza: Contiene 3 opciones de edición de los parámetros de fuerza para los 3 dedos, enviados por RS232. Donde el rango va desde 0.5 a 100 N.
3. Control de posición: Contiene 4 campos de configuración, donde los primeros 3 son la posición angular de cada dedo, mientras que el último es la relación de reducción de la caja de engranajes conectada a cada motor.
4. Fuerzas: Aquí se vislumbra los valores detectados por los sensores de fuerza en los tres dedos y la palma.
5. Velocidades: Se plasma las velocidades de los tres motores.

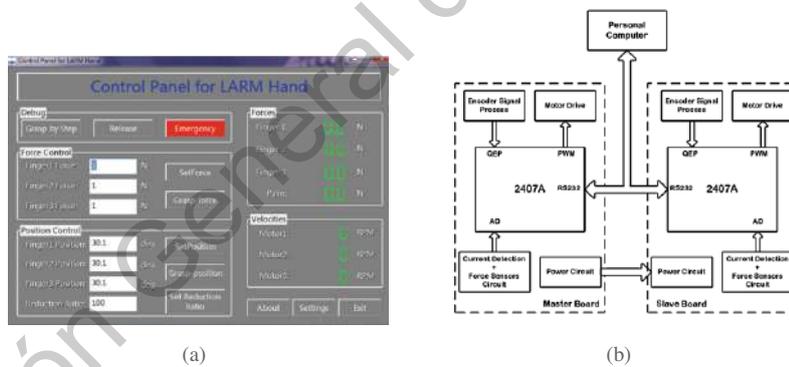


Figura 5. Software y Hardware del dedo LARM. (a) Interfaz de usuario Microsoft Visual Studio 2003. (b) Proceso de trabajo del hardware dedo LARM.

Respecto al control, dos DSP fueron utilizados. El primero, como maestro, contiene el controlador de dos motores, mientras que el segundo, como esclavo, tiene solo uno.

Aunque la aproximación obtenida mediante la interfaz de usuario, en la figura 5, haya permitido el control de tres dedos, es menester plantear una mejora en la forma de controlar la fuerza en el dispositivo LARM. Para ello es esencial conocer qué se ha hecho en el control lineal y no lineal de prótesis de mano.

1.1.4 Precedentes en el control de prótesis de mano

Con la necesidad de controlar una prótesis de mano, diferentes investigaciones se condujeron a partir de diferentes técnicas de control. Algunas estrategias de control, son las siguientes:

1. Controladores lineales: Choi et al. (2006) presentó la prótesis de mano SKKU, la cual utiliza un controlador proporcional integral derivativo (PID) en la retroalimentación de la fuerza. Para éste propósito se utiliza un sensor de corriente, además de sensores de deslizamiento PVDF que acompaña la punta de cada uno de los dedos. Engeberg (2008a) desarrollaron un controlador Proporcional y un Proporcional Derivativo con el objetivo de controlar la fuerza generada por la prótesis de mano al momento del agarre de algún objeto, con la finalidad de que no se resbale de la mano. Castro (2011) generó un controlador PID, para poder manipular un mecanismo, que se asemeja al dedo humano. De acuerdo a las señales mioeléctricas capturadas, estas se mandaban por RS232 al FPGA donde el patrón adquirido sería puesto como señal de referencia para controlar el sistema. Zhang et al. (2016) mostró un controlador para evitar la expulsión de algún objeto al momento del agarre. Si la prótesis de dedo no presenta un estabilidad en el agarre, el objeto es expulsado. El agarre es ajustado por dos métodos, corrigiendo la fuerza de referencia o cambiando la postura en el agarre para volver a intentar. El controlador consta del control de fuerza aunado con el control de posición.
2. Controladores no lineales: Engeberg (2008b) presentó cuatro métodos para el control de prótesis de mano. Lazo abierto, retroalimentación de fuerza, retroalimentación de fuerza y velocidad, retroalimentación de fuerza-velocidad y modos deslizantes. De acuerdo a la experimentación se determinó que la técnica no lineal es más robusta y por lo tanto permite un agarre más deseable. Engeberg (2009) con la finalidad de trabajar las no linealidades que proveen inherentemente las prótesis de manos de acuerdo a sus componentes (un motor pequeño presenta grandes cantidades de fricción de Coulomb, retroceso, fricción viscosa), se mejoró el control de velocidad y la transición de velocidad a control de fuerza en prótesis de mano, a partir del comparativo de tres técnicas no lineales: Backstepping, Modos deslizantes y un híbrido entre Backstepping y Modos deslizantes, en donde el híbrido dio mejores resultados.

1.2 Descripción del problema

Normalmente las prótesis están constituidas por un mecanismo, el cual se ve actuado por un motor, un servomotor, etc. Esta activación permite la movilidad de la prótesis de mano, que aunado con un controlador trata de imitar los movimientos innatos en la mano humana. Sin embargo, debido a la complejidad de la mano humana, normalmente los dispositivos se ven limitados en los movimientos y con ello el prototipo final es acreedor a mejoras.

De acuerdo a lo abordado en los antecedentes, se conoce que han habido aproximaciones en el campo del control lineal y no lineal, así como el aspecto del mecanismo, para la manipulación de una prótesis de mano, dando como conclusión que para replicar los movimientos de la mano se debe tener en cuenta:

1. La prótesis de mano es un dispositivo altamente no lineal.
2. Implementar técnicas de control no lineales es una opción lógica para combatir las no linealidades de la mano.

Como resultado (ver figura 6), en el contexto de la investigación, se presenta un sistema, que en cuanto se le posicione un objeto entre sus digitales, éste tendrá que sujetarlo. Gracias a la literatura se conoce que en el agarre de objetos se tiene los siguientes problemas:

- * Al momento que el mecanismo sujete el objeto, éste puede salir proyectado si la fuerza empleada por el mecanismo es muy excesiva.
- * Una vez agarrado el objeto, éste puede deformarse debido a que la fuerza empleada es demasiada.

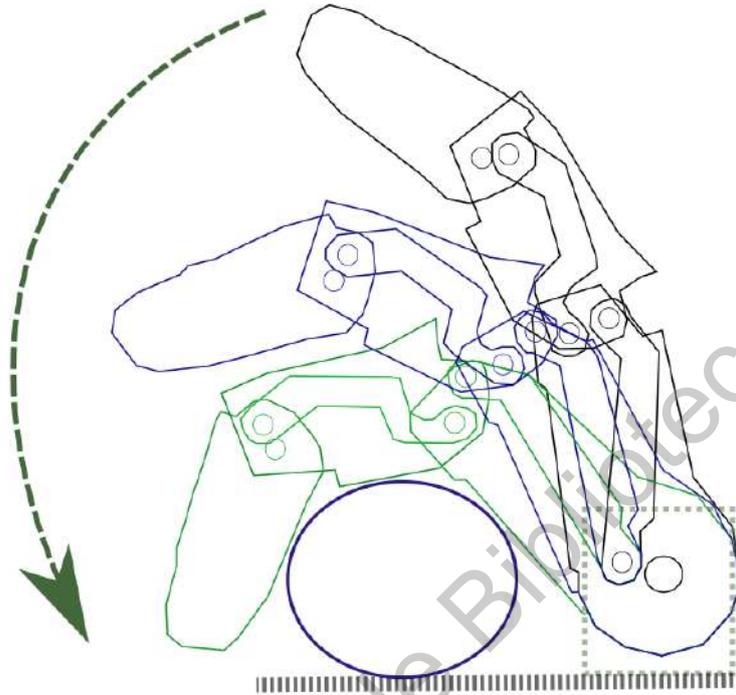


Figura 6: Contracción del mecanismo

Como conclusión se tiene un mecanismo con altas no linealidades (Engeberg, 2009) y presenta inconvenientes en el agarre, que por lo visto necesita la presencia de controladores no lineales y una fusión de lecturas en la mediciones pertinentes para socavar o atenuar las mencionadas problemáticas en la aplicación de la fuerza.

1.3 Justificación

En el contexto antes descrito, el interés de la presente investigación se centra en la implementación de un controlador para poder controlar fuerza y posición del mecanismo LARM. Garantizando una correcta manipulación de objetos y poder extraer el mecanismo del campo robótico y posicionarlo en el mundo prótesis. Gracias a las investigaciones conducidas, se pueden ver los tipos de controladores normalmente empleados y además denotar que las aproximaciones requeridas por los investigadores son:

1. Obtener un controlador que atenúe las no linealidades de motor, debido a sus dimensiones. Ya sea fricción de Coulomb, retroceso, fricción viscosa o fricción estática.
2. Controlar el mecanismo de tal forma, que en el agarre de algún objeto, esté no se deforme o salga proyectado.

Este estudio, se centra en lo antes mencionado, permitirá distinguir con claridad las potencialidades que cada uno de los controladores (controlador lineal y no lineal) presentan para la resolución de problema propuesto:

- Sujeción de un huevo de gallina sin romperlo.

Esto permitiría, no solo aumentar la eficacia en la relación de control fuerza y posición, sino vislumbrar si la respuesta del controlador no lineal es mejor que la del lineal.

1.4 Planteamiento teórico

1.4.1 Hipótesis

Con base al mecanismo de dedo LARM, implementando un controlador no lineal y una fusión de cálculos dinámicos y sensores de fuerza (para validación de los resultados dinámicos), se obtendrá un desempeño de las variables de fuerza y posición similar o mejor al de un controlador lineal en el agarre de los objetos que sean posicionados entre sus falanges.

1.4.2 Objetivo general

Diseñar e implementar un controlador lineal y uno no lineal de par y posición, basado en el mecanismo LARM, mediante cálculos dinámicos y la fusión de sensores de tacto (para validación de los resultados dinámicos), para mejorar el agarre de objetos y comparar su desempeño.

1.4.3 Objetivos particulares

1. Diseñar un controlador lineal, por medio de una técnica lineal, para controlar fuerza y posición del mecanismo LARM.
2. Diseñar un controlador no lineal, por medio de una técnica no lineal, para controlar fuerza y posición del mecanismo LARM.
3. Comparar la respuesta transitoria de los controladores, en las condiciones de operación mediante simulación, para vislumbrar qué controlador desprende una mejor respuesta.
4. Instrumentar el dispositivo LARM, con sensores de fuerza y corriente, para poder controlar el sistema de forma física.
5. Diseñar e implementar el sistema de control, en una tarjeta electrónica, para el accionamiento del dedo LARM.
6. Comparar los resultados obtenidos, sometiendo a los controladores a las mismas pruebas, para verificar cual resulta más efectivo en la relación fuerza-posición en el agarre de algún objeto.

1.5 Planteamiento general

El planteamiento general de la metodología a realizarse se muestra en la figura 7, la cual consta de 6 modulos descritos a continuación:

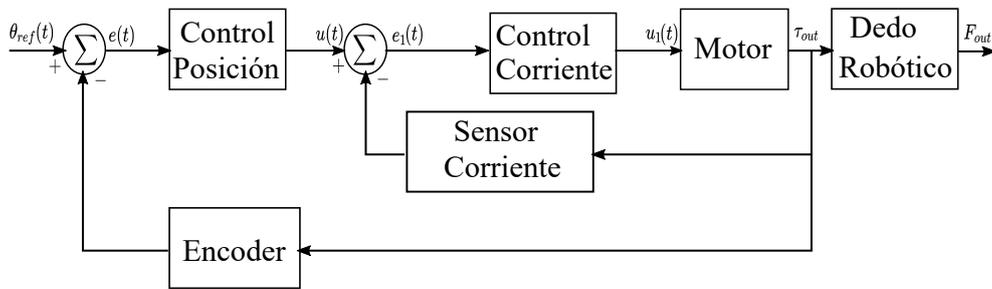


Figura 7: Diagrama planteamiento general

1. θ_{ref} : En este apartado se establece la referencia de posición para el encoder.
2. Controlado: Este bloque contiene los controladores a implementar. En nuestro caso se implementará el controlador lineal o el no lineal.
3. Control de corriente: Este bloque contiene un controlador proporcional integral (controlador PI) para controlar corriente del actuador y garantizar que se está proporcionando el par deseado.
4. Motor: Es el actuador final seleccionado para nuestra investigación.
5. Dedo Robótico: Este bloque presenta los cálculos dinámicos como la obtención de información (señal del encoder, señal de corriente, voltaje de sensores de fuerza para validación) para garantizar una manipulación correcta de los objetos. Los componentes internos de este bloque se esclarecerán al momento de abordar la metodología de la investigación.
6. Sensor de corriente: Comprende la medición de corriente consumida por el actuador.
7. Encoder: Aquí se presenta la medición de posición angular del actuador.

2 Fundamentación teórica

El compendio de fundamentos teóricos mostrados a continuación son base para el desarrollo una un dedo antropomórfico funcional para implementarse en una prótesis de mano. Se presenta el mecanismo LARM, normalmente utilizado como efector final de robots, el cual permite al dedo antropomórfico ser de un grado de libertad. Al mismo tiempo se enuncian conceptos como controladores lineales y no lineales, los cuales permitirán direccionar y controlar la movilidad del dedo.

2.1 Anatomía del tipo de agarre

Se entiende a la mano humana como la amalgama de complejas estructuras de huesos, arterias, venas, nervios y tendones. Dando pie a una modalidad de movilidad concebida como poder de agarre y precisión de agarre. De acuerdo a la imagen se pueden observar cierto tipos de agarre. En el caso de la investigación solo se abordara el agarre cilíndrico.

2.2 Mecanismos

De forma general un mecanismo es un conjunto de objetos unidos, usados para proveer movimientos específicos. Dichos objetos no son más que cuerpos rígidos individuales. Dichos cuerpos rígidos, normalmente conocidos como eslabones, unidos en puntos por pares forman el mecanismo de eslabones (Doane, 2016).

Con respecto a los eslabones, éstos son enumerados partiendo del eslabón estacionario, donde típicamente representa el marco del mecanismo. El eslabón en movimiento es catalogado como en número 2 y los faltantes son enumerados en orden. Existen diferentes formas para clasificar, sin embargo la más común es clasificar por medio del número de conexiones que tiene el sistema. Por ejemplo un mecanismo que contenga dos eslabones se conoce como binario, en presencia de tres se conoce como mecanismo de 3 barras, con 4 es mecanismo de 4 barras y así sucesivamente. En el caso del estudio presente, se abordara un mecanismo altamente estudiado, que trata de emular e equiparar la movilidad de un dedo humano, dedo LARM.

2.3 Principio de movilidad del dedo antropomórfico

Para el mecanismo que asemeje el dedo humano, debe de ser compacto para preservar la medidas normales de inherentes de una persona, además de reproducir los movimientos innatos del mismo. En LARM, Laboratorio de robótica y mecanismos, en Casino Italia, se propuesto un mecanismo que cumple con lo antes mencionado. El resultado el mecanismo, Fig. 8.

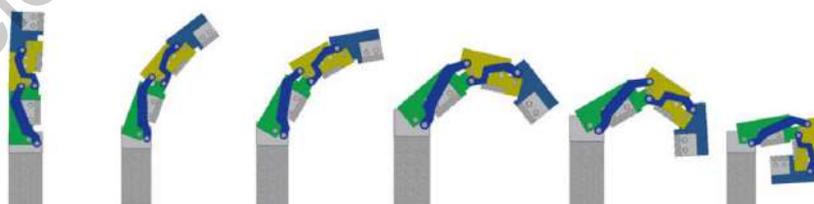


Figura 8: Dedo LARM y sus movimientos

2.4 Actuador

Un dispositivo eléctrico que produce una respuesta física se puede considerar como actuador. En la mayoría de los casos estos actuadores operan bajo la conversión de energía eléctrica,

neumática, hidráulica, magnética, etc.. (Brooker, 2012) En el caso del mecanismo LARM, se utilizara un motor DC como actuador.

2.4.1 Motores DC

Son probablemente los actuadores más utilizados por biomecatrónicos, esto se debe a su eficacia en la transformación de energía eléctrica a mecánica. En la selección de un motor DC, ciertas consideraciones deben plantearse:

1. Corriente constante en un motor DC produce una torca constante independientemente de la velocidad.
2. Dada una carga constante, la velocidad del motor es determinada solamente por el voltaje.
3. El "poder" desprendido es gracias a la velocidad y la torsión.
4. Los motores DC operan típicamente de 70 por ciento a 90 por ciento de su velocidad sin carga y de 10 por ciento a 30 por ciento par de torsión. Esto debido a que es su región de máxima eficiencia.
5. Para un motor DC que opera a un voltaje constante, a mayor par se obtenga, menor la velocidad.

2.4.2 Modelo del motor DC

Un motor eléctrico es un tipo de conversión de energía eléctrica a energía mecánica. En el caso de los motores de corriente directa han sido altamente utilizados para el control de par o de velocidad debido a su facilidad de control.

Un motor DC contiene dos devanados, uno esta localizado en el estator, el cual produce flujo de campo. El otro esta en el rotor, mejor conocido como devanado de la armadura. La corriente de la armadura interactúa con el flujo para producir un par. De acuerdo a esas consideraciones físicas es que la literatura desprende un modelo dinámico del motor DC. El cual puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -b/Jm & Kt/Jm \\ 0 & -Ke/La & -Ra/La \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/La \end{bmatrix} u \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

De donde se puede apreciar:

1. Circuito de la armadura: Su ecuación matemática esta expresada como: $V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a$. Donde i_a es la corriente del devanado, L_a es a inductancia del devanado, R_a es la resistencia del devanado y e_a es la fuerza contra-electromotriz.
2. Fuerza contra-electromotriz: También conocida como K_e , que debido a que el flujo se mantiene constante K_e es proporcional a la velocidad angular.
3. Par: Cuando un conductor de longitud l con corriente i es posicionada en un flujo magnético uniforme B , la fuerza actuando en el conductor sera $F = Bli$. De manera similar, en un motor de DC, la fuerza experimentada por el motor DC esta dada por $T_e = K_T$.

2.5 Control lineal

En primera instancia es menester comprender que para poder direccionar o manipular un actuador de acuerdo a nuestros intereses solamente es posible si este se controla. En nuestro estudio es de suma importancia poder controlar el comportamiento del mecanismo LARM pues con ello se podrá obtener el agarre de algún objeto.

2.5.1 Respuesta del sistema

Debe entenderse que cuando se necesita controlar alguna planta los escenarios de productividad, eficacia y rapidez son muy importantes. Una técnica que responde a esto, de forma cualitativa son los polos y ceros. La cual es muy útil, tal que nos permite a simple vista saber si el sistema es controlable o no (Nise, 2015).

1. Polos: Pueden ser los valores que causan que la función de transferencia tienda a infinito, o son soluciones de ésta, los polos se obtienen del denominador de la función de transferencia.
2. Ceros: Pueden ser los valores que causan que la función de transferencia sea cero, o son soluciones de ésta, los ceros se obtienen del numerador de la función de transferencia.

De acuerdo a la posición de los polos se puede estimar lo siguiente:

Tipo de comportamiento	Características
Sobre amortiguado	Polos: Raíces reales negativas Respuesta: $c(t) = k_1 e^{-\sigma_1 t} + k_2 e^{-\sigma_2 t}$
Bajo amortiguamiento	Polos: Dos raíces complejas Respuesta: $c(t) = A e^{-\sigma_d t} \cos(\omega_d t - \phi)$
Amortiguamiento crítico	Polos: Raíces reales negativas iguales Respuesta: $c(t) = k_1 e^{-\sigma_1 t} + k_2 e^{-\sigma_1 t}$
No amortiguado	Polos: Dos raíces imaginarias Respuesta: $c(t) = A \cos(\omega_d t - \phi)$

Tabla 1: Características de la curva de respuesta

En el análisis y diseño de controladores, se busca la comparación entre varios sistemas de control a partir de su salida. Por lo que contar con una base para el estudio, un estándar, es crítico. Por dicha razón, se cuenta con señales de entrada específicas. Las señales de prueba que se utilizan normalmente son funciones rampa, parábola, sinusoidal, impulso, escalón, entre otras.

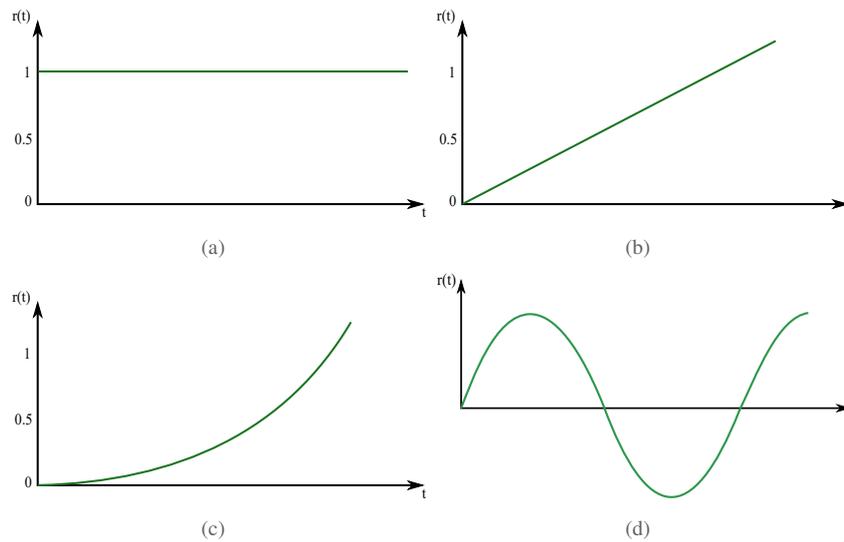


Figura 9: Señales de prueba. (a) Escalón unitario. (b) Rampa. (c) Parábola. (d) Senoidal.

Comenzando con señales a las entradas, la salida no acontece de forma inmediata, sino que se muestra una respuesta transitoria hasta llegar a un estado estable. Es por ende, que la respuesta en el tiempo de una estructura de control, consta de dos partes: una respuesta transitoria y una respuesta en estado estable. Entre ellas forman la curva de respuesta que contiene términos muy importantes:

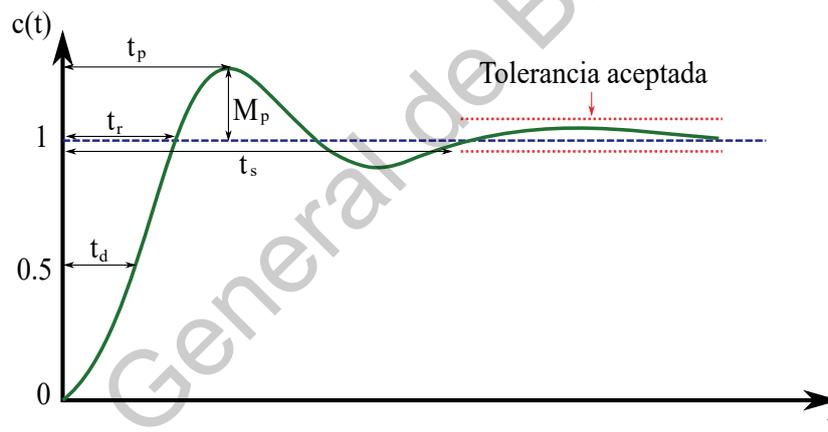


Figura 10: Respuesta transitoria.

1. Tiempo de retardo t_d : Tiempo necesario para que la respuesta alcance la mitad del valor final.
2. Tiempo de levantamiento t_r : Tiempo necesario para que la respuesta pase del 10 al 90 por ciento, del 5 al 95 por ciento o del 0 al 100 por ciento de su valor final.
3. Tiempo pico t_p : Tiempo necesario para que la respuesta alcance el primer sobrepaso.
4. Sobrepaso máximo M_p : Es el valor máximo de la respuesta.
5. Tiempo de asentamiento t_s : El tiempo necesario para que la respuesta alcance un estado estable.

2.5.2 Tiempo pico t_p

El tiempo pico se entiende como:

$$\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t = n\pi \quad (3)$$

o

$$t = \frac{n\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (4)$$

Donde n es el tiempo para el máximo o mínimo local. El primer pico, ocurre en el tiempo pico t_p y para encontrarlo $n = 1$:

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (5)$$

2.5.3 Sobrepaso máximo M_p

El sobrepaso máximo es un porcentaje y está dado por:

$$M_p = \frac{c_{max} - c_{final}}{c_{final}} * 100 \quad (6)$$

El término c_{max} se encuentra evaluando $c(t)$ en el pico máximo $c(T_p)$:

$$c_{max} = 1 - e^{-(\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2})} \left(\cos \pi + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \pi \right) \quad (7)$$

$$c_{max} = 1 - e^{-(\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2})} \quad (8)$$

Para el escalón unitario $c_{max} = 1$, con lo cual sustituyendo el valor de c_{max} y la ecuación 7 en 6 se obtiene:

$$M_p = e^{-(\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2})} * 100 \quad (9)$$

En donde, se puede apreciar que M_p está en función solamente de ζ . Por lo cual si sabemos el M_p deseado podemos obtener ζ , que resulta:

$$\zeta = \frac{-\ln(M_p/100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(M_p/100)}} \quad (10)$$

2.5.4 Espacio de estados

La descripción de una ecuación de variables de estados se puede determinar a partir de diferentes metodologías, sin embargo la literatura establece que en la práctica se presentan sistemas con órdenes altos en sus ecuaciones diferenciales o funciones de transferencia. Por lo tanto, debido a la necesidad de una representación directa de estos sistemas, se opta por la técnica de espacio de estados.

Un sistema en espacio de estados es representado por las siguientes ecuaciones:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (11)$$

$$y = Cx + Du \quad (12)$$

para $t \geq t_0$ y condiciones iniciales $x(t_0)$ donde:

x = Vector de estado
 \dot{x} = Derivada del vector de estado con respecto al tiempo
 y = Vector de salida
 u = Entrada o vector de control
 A = Matriz del sistema
 B = Matriz de la entrada
 C = Matriz de la salida
 D = Matriz de retroalimentación

En busca de la implementación de la técnica por medio de la ecuación 11 y 12, se incurre en cierta terminología que obedece unívocamente al espacio de estados, es decir:

1. Sistema variable: Cualquier variable que responda a un estímulo o valores iniciales en un sistema.
2. Variable de estado: Conjunto de variables del sistema que permite describir el sistema en un intervalo de tiempo.
3. Vector de estado: Vector que contiene como elementos variables de estado.
4. Espacio de estado: Espacio de estado donde sus ejes son las variables de estado.
5. Ecuación de estado: Conjunto de ecuaciones donde las variables son variables de estado.
6. Ecuación de salida: La ecuación algebraica que expresa la salida del sistema como combinación lineal de las variables de estado y las entradas.

2.6 Control no lineal

El control lineal es un campo florido con una gran variedad de técnicas que han sido aplicadas con satisfactorios resultados en la industria. Sin embargo, últimamente, en el campo de robótica, control de procesos, control aeroespacial, ingeniería biomédica ha crecido el interés de implementar controladores no lineales. Las razones pudieran ser (Slotine, 1991):

1. Mejorar los métodos de control existentes: En lo que acontece a los controladores lineales, sus resultados obedecen a rangos de control pequeños, por el contrario, cuando el rango es grande el controlador lineal no trabaja bien o es inestable, debido a que las no linealidades no pueden ser propiamente compensadas. Por el contrario, los controladores no lineales pueden compensar esas no linealidades en grandes rangos de operación.
2. Analizar no linealidades: Otra aproximación de los sistemas lineales es que el modelo de los sistemas es linealizable, sin embargo, en el control de sistemas existen muchas no linealidades que debido a su discontinuidad no permiten una aproximación lineal. Estas no linealidades incluyen la fricción de Coulomb, saturación, zonas muertas, retardo, histéresis, entre otras que son comunes en la ingeniería de control.
3. Tratar la incertidumbre del proceso: Cuando se diseñan controladores no lineales, es necesario asumir que los parámetros del sistema se conocen, pero en muchos problemas de control se involucran incertidumbres en los parámetros del sistema. Un controlador lineal basado en valores obsoletos de los parámetros del sistema podría desprender una degradación en el desempeño o en la estabilidad del sistema.

4. Simplicidad en el diseño: Un buen controlador no lineal puede ser más intuitivo y simple que su contra parte en la teoría de control lineal. Los sistemas físicos inherentemente son no lineales, con ello, todos los sistemas de control son no lineales para un cierto grado. Sin embargo, si el rango de control del sistema es pequeño y si están presente no linealidades suaves es razonable darle una aproximación lineal al sistema.

2.6.1 No linealidades comunes en sistemas de control

Tomando en consideración el sistema a bloques de la figura 15, es conformado por 4 partes: Una planta a controlar, sensores para medir, actuadores y una ley de control. Las no linealidades pueden ocurrir en cualquier parte del sistema, y por ende desprender un sistema no lineal.

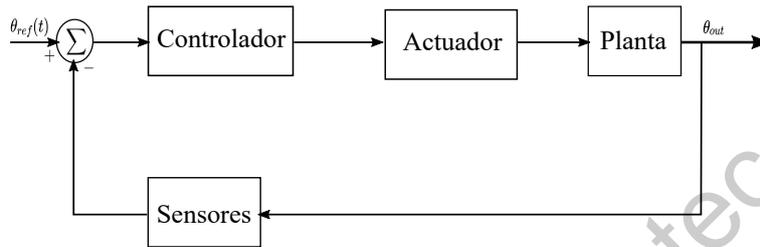


Figura 11: Diagrama de un sistema de control

Las no linealidades pueden ser clasificadas como continuas o discontinuas, y debido a que las no linealidades discontinuas no pueden ser aproximadas con funciones lineales, es que se conocen como "hard" no linealidades. Las no linealidades "hard" son comúnmente encontradas en los sistemas de control. Debido a su ocurrencia, algunas son:

1. Saturación. Cuando se incrementa la entrada en un dispositivo físico, los siguientes aspectos pueden ser observados: cuando la entrada es pequeña, su incremento desprende una frecuente (proporcional) salida, sin embargo, cuando la salida alcanza cierto nivel, el incremento de la entrada no hace cambiar la salida, la salida simplemente se mantiene en un valor máximo. Entonces, se dice que el dispositivo está en saturación. Muchos actuadores presentan este tipo de no linealidad.
2. Zona muerta: En muchos sistemas físicos, la salida es cero aunque la magnitud de la entrada exceda cierto valor. Se considera el funcionamiento de un motor DC, de forma ideal a una entrada de voltaje el motor desprende una rotación, por lo tanto si la entrada de voltaje es pequeña, entonces la rotación es lenta. Sin embargo, en la realidad, debido a la fricción estática, la rotación sólo ocurrirá si la torca es suficientemente grande. Las zonas muertas comúnmente causan una disminución en la precisión de salida estática.
3. Retardo e histéresis: El retardo normalmente ocurre en sistemas de transmisión. Existen debido a pequeñas brechas que existen entre los mecanismo de transmisión. El retroceso y la histéresis, suelen conducir al almacenamiento de energía en el sistema, por lo cual el sistema tiende a la inestabilidad y la auto oscilación.

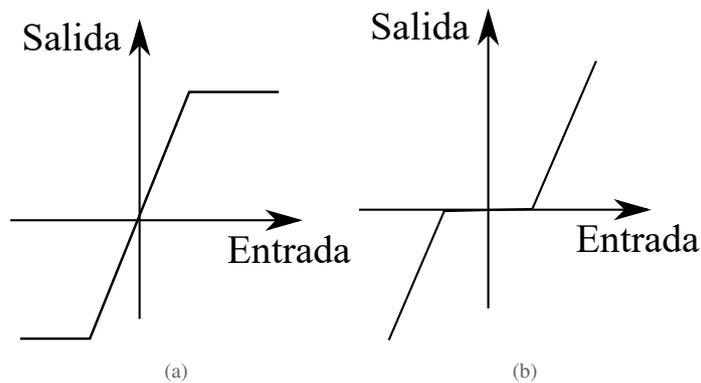


Figura 12: No linealidades. (a) Saturación. (b) Zona muerta.

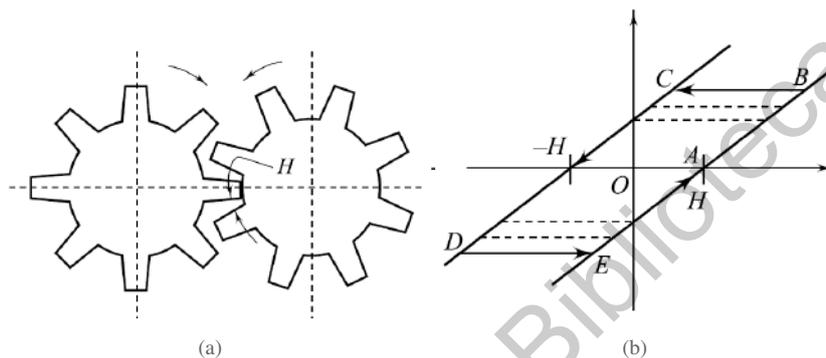


Figura 13: Retardo (Backlash).(a) Interacción entre engranes. (b) Representación gráfica del retardo (Backlash).

2.7 Modos deslizantes

En el diseño de cualquier controlador, siempre existirá la discrepancia entre la planta y su modelo matemático. Dichas discrepancias se deben a perturbaciones externas, desconocimiento de ciertos parámetros, etc. Esto ha dado el creciente interés en el desarrollo de controladores que soporten este tipo de peculiaridades.

Considere el modelo $\dot{x} = f(x, u, d)$ donde $x \in \mathbb{R}^n$ es un vector que representa el estado y $u \in \mathbb{R}^m$ es la entrada de control. Se asume que f es diferenciable con respecto a x y es continuo con respecto al tiempo. La cantidad $d \in \mathbb{R}^q$ representa las incertidumbres del modelo. A partir de una superficie en el espacio de estados dado por

$$S = x : \sigma(x) = 0 \quad (13)$$

Una definición formal de un modo deslizante ideal puede entenderse como, por ejemplo, una entrada de control $u = u(x_1, x_2)$ en $u = -cx_2 - \rho \text{sign}(\sigma)$ que direcciona las variables de estado x_1, x_2 a la superficie de deslizamiento $\sigma = x_2 + cx_1 = 0$, $c > 0$ en un tiempo finito t_r y las mantiene en la superficie en presencia de perturbaciones delimitadas $f(x_1, x_2, t)$, lo cual es conocido como control por modos deslizantes y por lo tanto un modo deslizante ideal se dice que tiene parte en el sistema para toda $t > t_r$.

Para poder alcanzar la convergencia asintótica de las variables de estado a cero, o error cero, en presencia de perturbaciones, se necesita direccionar σ , donde $\sigma = x_2 + cx_1$, ha cero en un tiempo finito por acción de u . Dicha acción se puede alcanzar aplicando una función

de Lyapunov a la dinámica de la superficie.

$$\dot{\sigma} = cx_2 + f(x_1, x_2, t) + u, \quad \sigma(0) = \sigma_0 \quad (14)$$

La función candidata es:

$$V = \frac{1}{2}\sigma^2 \quad (15)$$

Para que exista una estabilidad asintótica en (14) en el punto de equilibrio $\sigma = 0$, la siguiente condiciones debe presentarse

1. $\dot{V} < 0$ para $\sigma \neq 0$.
2. $\lim_{|\sigma| \rightarrow \infty} V = \infty$

En primera instancia el punto 2 se satisface, mientras que el punto 1 se puede modificar, para obtener un estabilidad global en tiempo finito, a

$$\dot{V} \leq -\alpha V^{1/2}, \quad \alpha > 0 \quad (16)$$

Posteriormente separando las variables e integrando (16) en el intervalo $0 \leq \tau \leq t$, se obtiene

$$V^{1/2}(t) \leq -\frac{1}{2}\alpha t + V^{1/2}(0) \quad (17)$$

Como consecuencia, $V(t)$ alcanza cero en un tiempo finito t_r , que esta acotado por

$$t_r \leq \frac{2V^{1/2}(0)}{\alpha} \quad (18)$$

Por lo tanto, una ley de control que satisface (16), direccionara σ a cero en un tiempo finito y la mantendrá en cero posteriormente. La derivada de V es

$$\dot{V} = \sigma \dot{\sigma} = \sigma(cx_2 + f(x_1, x_2, t) + u) \quad (19)$$

Suponiendo que $u = -cx_2 + v$ y sustituyendo en (19) se obtiene

$$\dot{V} = \sigma(f(x_1, x_2, t) + v) = \sigma f(x_1, x_2, t) + \sigma v \leq |\sigma|L + \sigma v \quad (20)$$

Seleccionando $v = -p \text{sign}(\sigma)$ con $p > 0$ y sustituyendo en (20) se tiene

$$\dot{V} \leq |\sigma|L - |\sigma|p = -|\sigma|(p - L) \quad (21)$$

Considerando (15) , (16) se puede escribir

$$\dot{V} \leq -\alpha V^{1/2} = \frac{-\alpha}{\sqrt{2}}|\sigma|, \quad \alpha > 0 \quad (22)$$

Combinando (21) y (22) se genera

$$\dot{V} \leq -|\sigma|(p - L) = \frac{-\alpha}{\sqrt{2}}|\sigma| \quad (23)$$

Finalmente la ganancia p es obtenida como

$$p = L + \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \quad (24)$$

Como consecuencia la ley de control u que direcciona σ a cero en un tiempo finito es

$$u = -cx_2 - p \text{sign}(\sigma) \quad (25)$$

Nota 1. En la ecuación (24) nuestra primera ganancia p esta diseñada para compensar nuestras perturbaciones, mientras que para nuestro termino $\frac{\alpha}{\sqrt{2}}$ es responsable por determinar el tiempo en que tarda en alcanzar la superficie.

Nota 2. La superficie $\sigma = x_2 + c_x 1$, $c > 0$ corresponde a una linea recta en el sistema en el espacio de estados. Entonces la condición (16) es equivalente a

$$\sigma \dot{\sigma} \leq -\frac{\alpha}{\sqrt{2}} |\sigma| \quad (26)$$

Y normalmente es conocida como condición de accesibilidad. Una vez obtenida dicha condición significa que la trayectoria del sistema es direccionada a la superficie y una vez alcanzada el sistema permanecerá ahí.

2.7.1 Control convencional

Se define

$$\sigma = \dot{e} + ce, \quad c > 0, \quad e = y_c(t) - y(t) \quad (27)$$

Donde e representa el error, $y(t)$ valor medido y $y_c(t)$ el valor de referencia. Bajo este contexto el problema se enfoca en desarrollar una ley de control u que haga que la salida y siga asintóticamente el valor de referencia, en un tiempo determinado.

2.7.2 Controlador Quasi-modos deslizantes

Normalmente en el controlador modos deslizantes convencional, la ley de control presenta oscilaciones "zigzag". Este fenómeno se conoce como chattering. Una solución para generar una ley control suave y continua es aproximando la función discontinua $v(\sigma) = -c \text{sign}(\sigma)$ por una función continua. Por ende, un buen sustituto es las función sigmoide.

3 Metodología

La metodología para efectuar en esta investigación se articula de un diseño conceptual y la adecuación del dedo robótico a un dedo antropomórfico, que se utilizara para poder sujetar un objeto.

1. Control de posición. Buscando direccionar al edo robótico en la sujeción de objetos, se usara un controlador lineal y en comparación con un controlador no lineal. Donde se aprecian dos sistemas, un FPGA y una tarjeta diseñada específicamente para la medición de señales del motor Pololu 25D, que colaboran en la medición de variables físicas (posición, corriente, etc) para posteriormente comunicarlo a la PC. En la PC se tendrá una GUI diseñada para generar una ley de control necesaria, misma que el FPGA inyectara al motor. En los siguientes apartados se explicara de mejor manera.
2. Control de fuerza. Una vez establecido el control de posición se procederá al control de fuerza, lazo esclavo de corriente. Teniendo como posición inicial la apertura completa del dedo robótico, se asignara como posición deseada el cierre completo del dedo. Como consecuencia, una vez que el dedo robótico se encuentre un objeto en su trayectoria, este continuara hasta el que el algoritmo le permita.

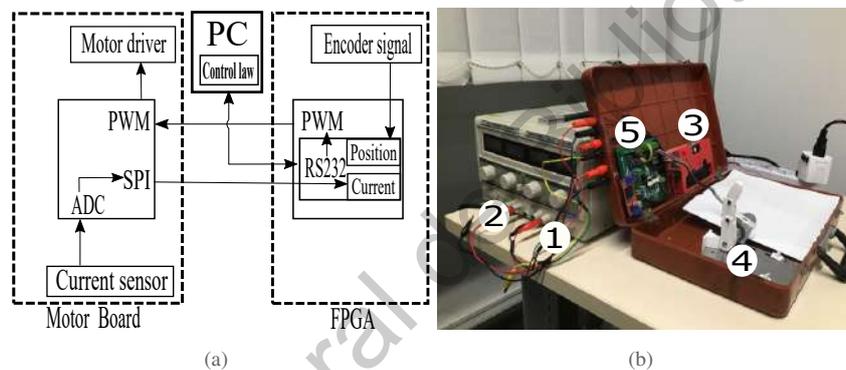


Figura 14: (a) Arquitectura de control de dedo robótico. (b) Estación de pruebas. (1) Alimentación para puente H y parte digital. (2) Alimentación parte analógica. (3) FPGA. (4) Dedo robótico y motor Pololu 25D. (5) PCB motor.

3.1 Diseño mecanismo dedo LARM

Con los parámetros utilizados, tabla 2, para la fabricación, se desarrollo una reducción de las dimensiones del dedo LARM para que el dedo antropomórfico concordara con apariencia física a un dedo humano. Esto se debe a que anteriormente el dispositivo LARM estaba destinado a ser e efector final de cual fuera el robot. Sin embargo, tratándose de una prótesis de mano, fue necesario el escalamiento, tabla 3.

Tabla 2: Dimensiones reales del dedo LARM.

Nombre en fig.15(a)	r_1	r_2	r_{4a}	r_5	r_6	r_7
Longitud (mm)	7.8	54.5	54.1	15.0	4	33.4

Tabla 3: Dimensiones propuestas para el dedo antropomórfico.

Nombre en fig.15(a)	r_1	r_2	r_{4a}	r_5	r_6	r_7
Longitud (mm)	5.6	39.78	39.49	10.95	3	24.38

Como resultado se genero el dispositivo, fig. 15 que obedece a un dispositivo semejante a un dedo antropomórfico.

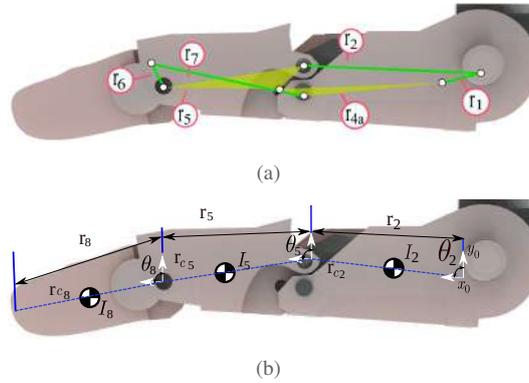


Figura 15: Dedo antropomórfico. (a) Cinemática del sistema. (b) Dinámica del sistema.

La cinemática del sistema, fig. 15(a), se expresa como:

$$r_1 \cos \theta_1 + r_4 \cos \theta_4 - r_2 \cos \theta_2 - r_3 \cos \theta_3 = 0 \quad (28)$$

$$r_1 \sin \theta_1 + r_4 \sin \theta_4 - r_2 \sin \theta_2 - r_3 \sin \theta_3 = 0 \quad (29)$$

$$r_1 \cos \theta_1 + r_{4a} \cos \theta_{4a} + r_7 \cos \theta_7 - r_2 \cos \theta_2 - r_5 \cos \theta_5 - r_6 \cos \theta_6 = 0 \quad (30)$$

$$r_1 \sin \theta_1 + r_{4a} \sin \theta_{4a} + r_7 \sin \theta_7 - r_2 \sin \theta_2 - r_5 \sin \theta_5 - r_6 \sin \theta_6 = 0 \quad (31)$$

El ángulo θ_{4a} se puede calcular mediante relaciones geométricas.

$$\theta_{4a} = \theta_4 + \alpha \quad (32)$$

3.2 Resolución de la cinemática

Para la simulación se incorporan la solución de las ecuaciones, por medio de Newton Raphson fig.16, (33)-(37) figurando encontrar el movimiento de los falanges en el espacio, fig.17. Para tal propósito se utiliza la paquetería, de Python, Tkinter.

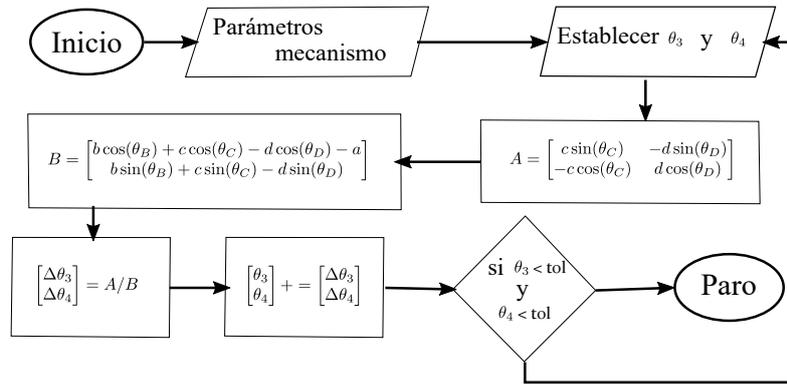


Figura 16: Solución de la cinemática por medio de Newton Raphson. El método es aplicado primero para (3) y (4), posteriormente mediante los cálculos obtenidos se resuelve (5) y (6).

Para dibujar los eslabones ciertas relaciones se establecieron entre θ_5 , θ_2 , y θ_5 , θ_8 .

$$\theta_5 = 0.007\theta_2^3 + 0.1039\theta_2^2 - 0.352\theta_2 + 0.693 \quad (33)$$

$$\theta_8 = -0.3126\theta_5^3 - 1.5614\theta_5^2 - 0.2703\theta_5 + 6.4985 \quad (34)$$

De tal modo, las anteriores relaciones permiten imitar, en software, los movimientos físicos de dedo robótico.

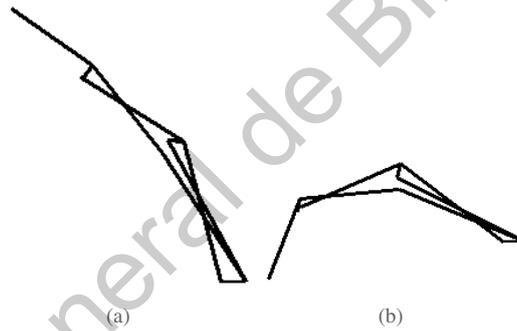


Figura 17: Simulación de la cinemática dedo antropomórfico. (a) Simulación del sistema con $\theta_2 = -74.2$ grados. (b) Simulación del sistema con $\theta_2 = 29$ grados. La simulación fue desarrollada mediante el interprete Python y el algoritmo fig.16.

3.3 Simulación de la dinámica

Contrastando la dinámica del sistema, que se asemeja a un robot de 3 grados de libertad fig. 15 (b), se puede obtener mediante un análisis de fuerzas. El método (35) resolverá todas las fuerzas involucradas en el mecanismo cuando adopte una posición demandada.

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -r_{bc_{1y}} & r_{bc_{1x}} & -r_{cc_{1y}} & r_{cc_{1x}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & r_{cc_{2y}} & -r_{cc_{2x}} & -r_{dc_{2y}} & r_{dc_{2x}} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & r_{dc_{3y}} & -r_{dc_{3x}} & -r_{ac_{3y}} & r_{ac_{3x}} & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 F_{1,2x} \\
 F_{1,2y} \\
 F_{3,2x} \\
 F_{3,2y} \\
 F_{4,3x} \\
 F_{4,3y} \\
 F_{1,4x} \\
 F_{1,4y} \\
 T_2
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 m_2(ax_2) \\
 m_2(ay_2) \\
 I_{G2}(a_2) \\
 m_3(ax_3) \\
 m_3(ay_3) \\
 I_{G3}(a_3) \\
 m_4(ax_4) \\
 m_4(ay_4) \\
 I_{G4}(a_4)
 \end{bmatrix}
 \quad (35)$$

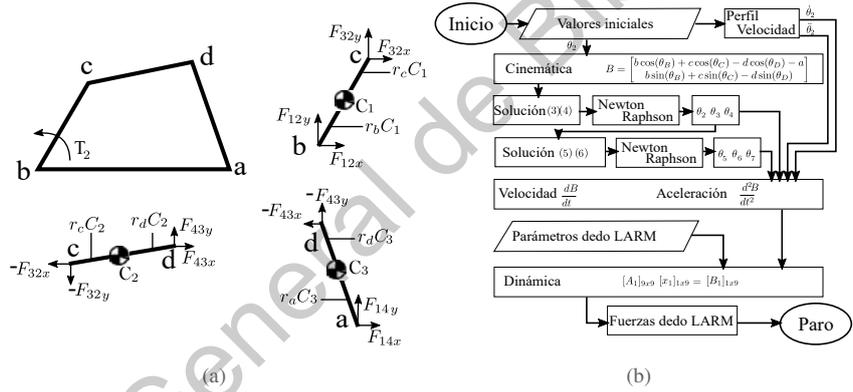
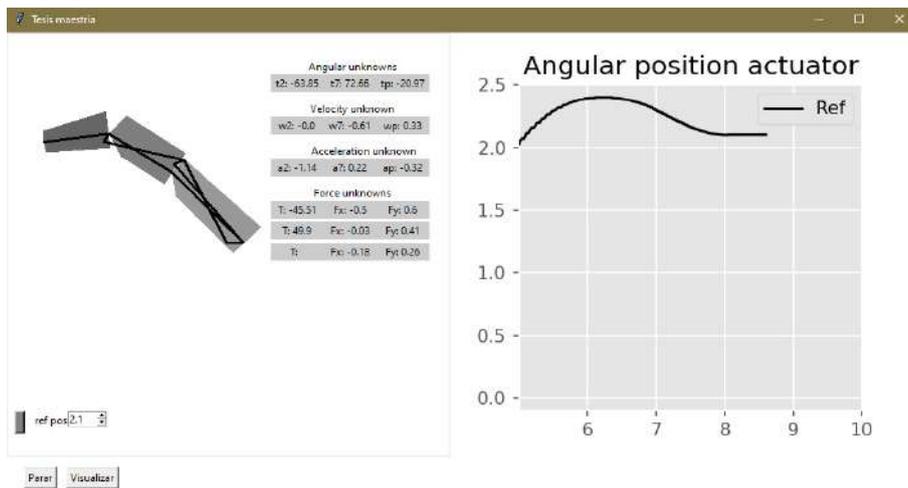
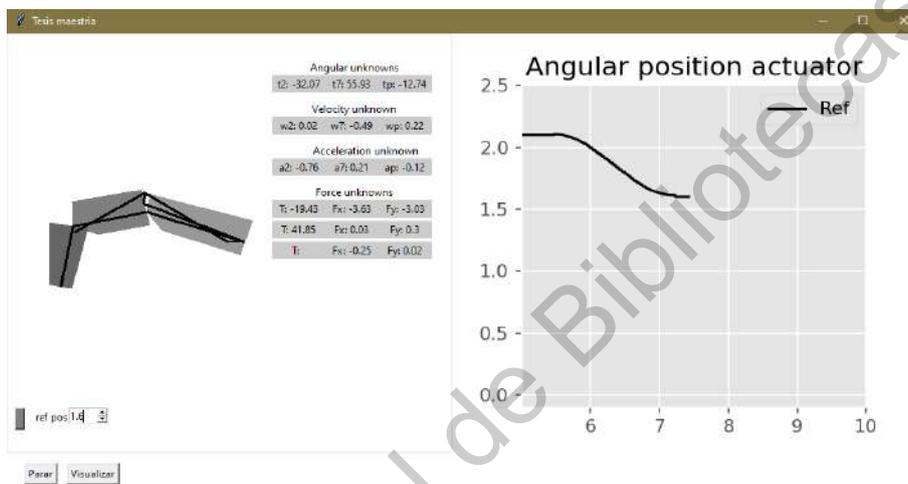


Figura 18: Dinámica del dedo robótico. (a) Dinámica de un mecanismo de 4 barras. (b) Algoritmo para la obtención de las fuerzas ejercidas por los falanges del dedo robótico.



(a)



(b)

Figura 19: Simulación del movimiento completo del dedo antropomórfico. (a) Simulación del sistema con $\theta_2 = -63.85$ grados. (b) Simulación del sistema con $\theta_2 = -32$ grados. La simulación fue desarrollada mediante el interprete Python y el algoritmo fig.18 (b).

3.4 Precisión en la simulación

Para la solución de la cinemática del dedo antropomórfico existen dos alternativas: Método aproximado y método exacto. Con respecto a la investigación realizada el primero típicamente guarda ventajas, debido a que si el mecanismo es muy complejo la obtención del método exacto puede complicarse demasiado. Como conclusión, el estudio incorporó el método aproximado. Para distinguir la exactitud del método aproximado en contraste con el exacto, el estudio comparó el rendimiento de ambos en un mecanismo de 4 barras, en el cual las ecuaciones del método exacto son ampliamente conocidas y estudiadas. En la simulación se comparó:

1. Error en posición, velocidad y aceleración. Para obtención de la velocidad y aceleración las ecuaciones de posición fueron derivadas,
2. Cada proceso, es puesto a prueba para encontrar su tiempo de ejecución. Tal objetivo es alcanzado con la paquetería de Python `time.clock()`.

Las ecuaciones exactas del mecanismo de 4 barras, pueden expresarse como:

$$\beta = 2 \tan^{-1} \frac{\sin \alpha - (\sin^2 \alpha + B^2 - C^2)^{1/2}}{B + C} \quad (36)$$

$$\theta = 2 \tan^{-1} \frac{\sin \alpha - (\sin^2 \alpha + B^2 - D^2)^{1/2}}{B + D} \quad (37)$$

donde,

$$B = \cos \alpha - \frac{a}{b} \quad (38)$$

$$C = \frac{a^2 + b^2 - c^2 + d^2}{2bd} - \frac{a}{d} \cos \alpha \quad (39)$$

$$D = \frac{a}{c} \cos \alpha - \frac{a^2 + b^2 + c^2 - d^2}{2bc} \quad (40)$$

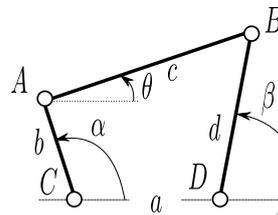


Figura 20: Mecanismo de 4 barras.

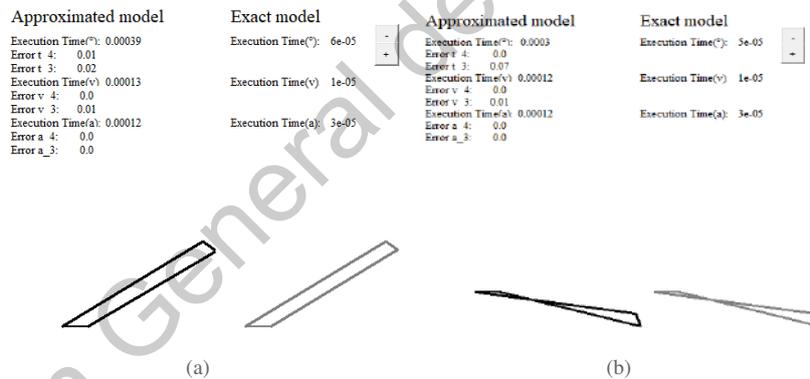


Figura 21: (a) Simulación de mecanismo de 4 barras con $\theta_2 = 0.54$ radianes. La simulación mostró un error para el método aproximado θ_4 de 0.01 radianes, θ_3 de 0.02 radianes y $\dot{\theta}_3$ de 0.01 radianes/segundo. El tiempo de ejecución del método exacto fue más rápido. (b) Simulación de mecanismo de 4 barras con $\theta_2 = -0.059$ radianes. La simulación mostró un error para el método aproximado θ_4 de 0 radianes, θ_3 de 0.07 radianes y $\dot{\theta}_3$ de 0.01 radianes/segundo. El tiempo de ejecución del método exacto fue más rápido.

Tabla 4: Resumen del desempeño entre métodos.

Variable	Promedio (Error de AM contra EM)	Promedio (EAM)	Promedio (EEM)
θ_4 [rad]	0.0109	$1.6639e - 04$	$3.9686e - 05$
θ_3 [rad]	0.16		
$\dot{\theta}_4$ [rad/sec]	0.0032	$9.2273e - 05$	$1.0836e - 05$
$\dot{\theta}_3$ [rad/sec]	0.0101		
$\ddot{\theta}_4$ [rad/sec ²]	$3.7474e - 4$	$9.3159e - 05$	$2.3914e - 05$
$\ddot{\theta}_3$ [rad/sec ²]	0.0016		

AM: Método aproximado. EM: Método exacto.

EAM: Tiempo de ejecución método aproximado. EEM: Tiempo de ejecución método exacto.

Como conclusión el método aproximado no representa problema al calcular la posición de los eslabones, debido a que el error no es considerable.

3.5 Instrumentación

Para la movilidad del dispositivo LARM se hace uso de los siguientes componentes:

Componentes	Cantidad
Motor pololu 25D	1
Driver de motor DC VNH2SP30	1
Convertidor lógico de nivel	1
ADC MCP3008	1
Sensor de corriente 5A ACS712	1

Donde sus características son:

1. Motor Pololu 25D: Es un motor DC, figura 22(a), de 25 mm de diámetro. Se distingue por tener un motor reductor () y su rango de trabajo es de 6 a 12 Volts. El motor se distingue tener incluido un encoder, figura 22(b).



(a) Motor Pololu 25D

(b) Encoder motor Pololu 25D

Figura 22: Componentes motor Pololu 25D

Color	Función
Rojo	Alimentación motor
Negro	Alimentación motor
Verde	GND
Azul	Alimentación encoder (3.5V a 20V)
Amarillo	Señal A encoder
Blanco	Señal B encoder

- Componente VNH2SP30: Es un puente H, figura 23(a), que tiene un voltaje máximo de operación de 41 V, además de una salida de corriente de 30 A. Contiene además un PWM que puede operar hasta 20 KHz.
- Convertidor lógico de nivel: Este dispositivo, figura 23(b), esta compuesto plenamente por transistores BSS138 permite la conversión de 3V a 5V.
- ADC MCP3008: Es un ADC de 10 bits, figura 23(c), presenta 8 canales. Presenta un protocolo de comunicación SPI, con un rango de operación de 2.7-5.5V.
- Componente ACS712: Es un sensor de corriente de 5A, figura 23(d).



Figura 23: Componentes para la instrumentación

Con la finalidad de construir un tarjeta de adquisición y comunicarla con el FPGA, para el control del motor Pololu 25D, se fabricó el PCB figura 24.

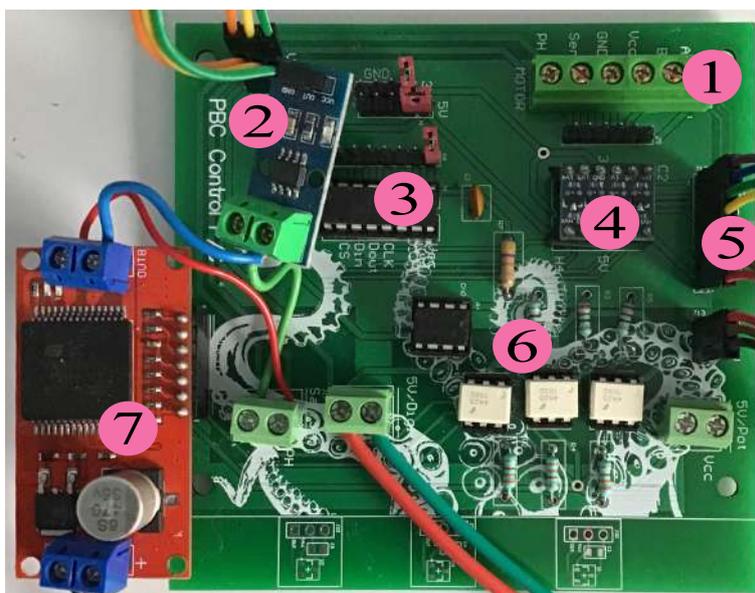


Figura 24: PCB fabricado

3.6 Bloque Digital

Con la tarjeta figura 24 se busca adquirir información del motor y por medio del FPGA se comunica con la PC y manda la ley de control al motor.

La parte digital consta de:

1. Tiempo Base: Tiempo de referencia de todo el proceso.
2. Maquina de estados: Establece las actividades de todos los módulos.
3. Encoder: Desprende las cuentas que genera el encoder del motor.
4. MCP3008: Recibe las lecturas del ADC.
5. PWM: Genera un pwm segundo el porcentaje y frecuencia deseada.
6. Transmisión_Tx: Transmisión UART.
7. Recepción_Rx: Recepción UART.

3.7 Interfaz de usuario PC

A través de la medición de las variables designadas, estas se transmiten por el protocolo UART a la PC donde de acuerdo a la figura 25, se selecciona la opción requerida. Bajo este entorno, desarrollado en Python, el usuario puede referirse a:

1. Comunicación: Establecer el puerto y los baudios para la comunicación UART.
2. Ganancias y valor de referencia: Sentar las ganancias de los controladores además de la posición deseada del motor.
3. Tipo de gráfica: Designar el tipo de variable a desplegar en la gráfica.
4. Opciones: Habilitar, deshabilitar, resetear la visualización de la gráfica o seleccionar el tipo de control a tratar.



Figura 25: Interfaz de usuario PC

3.8 Bloque de control

Un sistema de control es un conjunto de operaciones destinados a la obtención de un error cero. Cada parte de las operaciones están destinadas a cumplir o socavar cierta problemática univoca al objeto a controlar. Es por ello que en este apartado se abordaran las técnicas de control lineal y no lineal para acotar la movilidad del actuador LARM.

A partir de la representación en variables de estado del actuador del dedo LARM, definido a partir de las ecuaciones del (41) y (42) donde x_1 es posición, x_2 velocidad y x_3 corriente, se necesita controlar su posición.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -b/Jm & Kt/Jm \\ 0 & -Ke/La & -Ra/La \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/La \end{bmatrix} u \quad (41)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (42)$$

3.8.1 Controlador PID

De acuerdo a la representación (41) y (42). Se necesita generar un ley de control lineal, mediante el control PID, figura 26, que garantice el control de posición del mecanismo LARM.

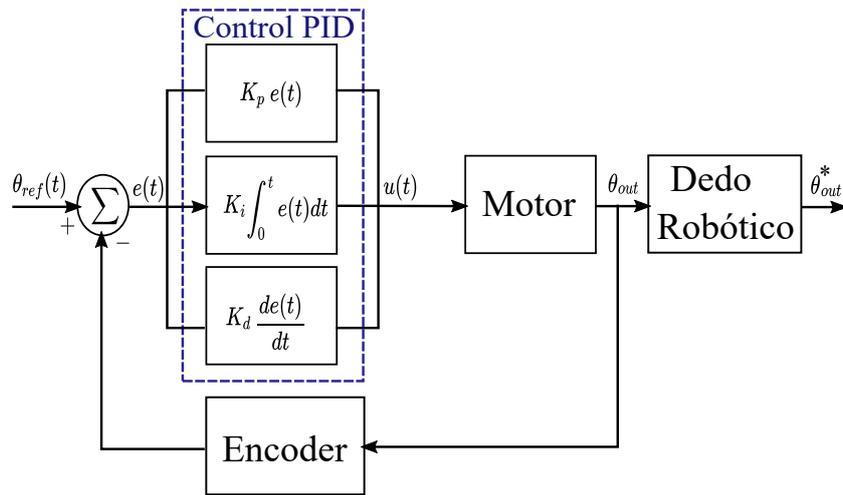


Figura 26: Diagrama controlador lineal PID

3.8.2 Modo deslizante convencional

De acuerdo a la representación (41) y (42). Se necesita generar un ley de control, modos deslizantes convencional, u que haga que la salida siga asintóticamente la referencia, figura 27 que garantice el control de posición del mecanismo LARM. (De acuerdo a lo enunciado en el capítulo Modos deslizantes pág.26).

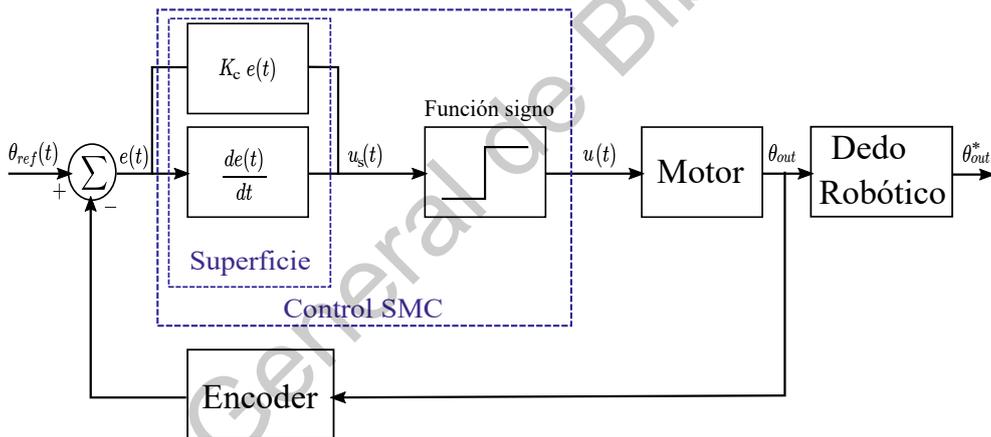


Figura 27: Diagrama controlador no lineal Modos deslizantes (SMC)

3.8.3 Identificación de la planta (Motor DC)

Al abordar la identificación del actuador del dedo LARM, este se somete a adoptar una posición deseada. Bajo una ganancia proporcional, se somete al sistema a una posición deseada, con ello caracterizarlo. De acuerdo a su respuesta transitoria en representación gráfica se obtiene su sobrepaso máximo y su tiempo de levantamiento, que de acuerdo al algoritmo 1, desprenderá la función de transferencia del sistema a controlar.

Algorithm 1 Obtención del modelo de la planta motor DC

```
1: procedure IDENTIFICACIÓN
2:    $vp \leftarrow$  Sobrepaso Máximo
3:    $tr \leftarrow$  Tiempo de levantamiento
4:    $kp \leftarrow$  Ganancia proporcional motor
5:    $ref \leftarrow$  Valor de referencia
6:
7:    $up \leftarrow (vp - ref)/ref.$ 
8:    $A_{zeta} \leftarrow (\log(up))^2.$ 
9:    $B_{zeta} \leftarrow A_{zeta} + \pi^2.$ 
10:
11:    $zeta \leftarrow \text{sqrt}(A_{zeta}/B_{zeta}).$ 
12:
13:    $A_{wd} \leftarrow \text{sqrt}(1 - zeta^2).$ 
14:    $wd \leftarrow (\pi - \text{atan}(A_{wd}/zeta))/tr.$ 
15:    $wn \leftarrow wd/A_{wd}.$ 
16:
17:    $B_b \leftarrow 2 * zeta * wn.$ 
18:    $C_b \leftarrow wn^2.$ 
19:    $ck \leftarrow C_b/kp.$ 
20:    $cp \leftarrow B_b.$ 
21:    $G \leftarrow \text{tf}(ck, [1 \quad cp \quad 0]).$ 
```

4 Experimentación y resultados

En este apartado se enuncian los resultados obtenidos al momento de simular e incorporar los controladores al dedo antropomórfico. En simulación e implementación primero se muestran todas las variantes para posteriormente analizar resultados. Por último se integran ciertas técnicas que pueden mejorar el estudio.

4.1 Comparación de controladores en simulación

Bajo la necesidad de conocer a priori el funcionamiento de los controladores. Se hizo uso de la herramienta Simulink, componente perteneciente de la paquetería de MATLAB[®], para vislumbrar su respuesta transitoria y con ello obtener, en simulación que controlador desprende mejores resultados. En primera instancia se compara el controlador lineal PID con el modos deslizantes convencional.

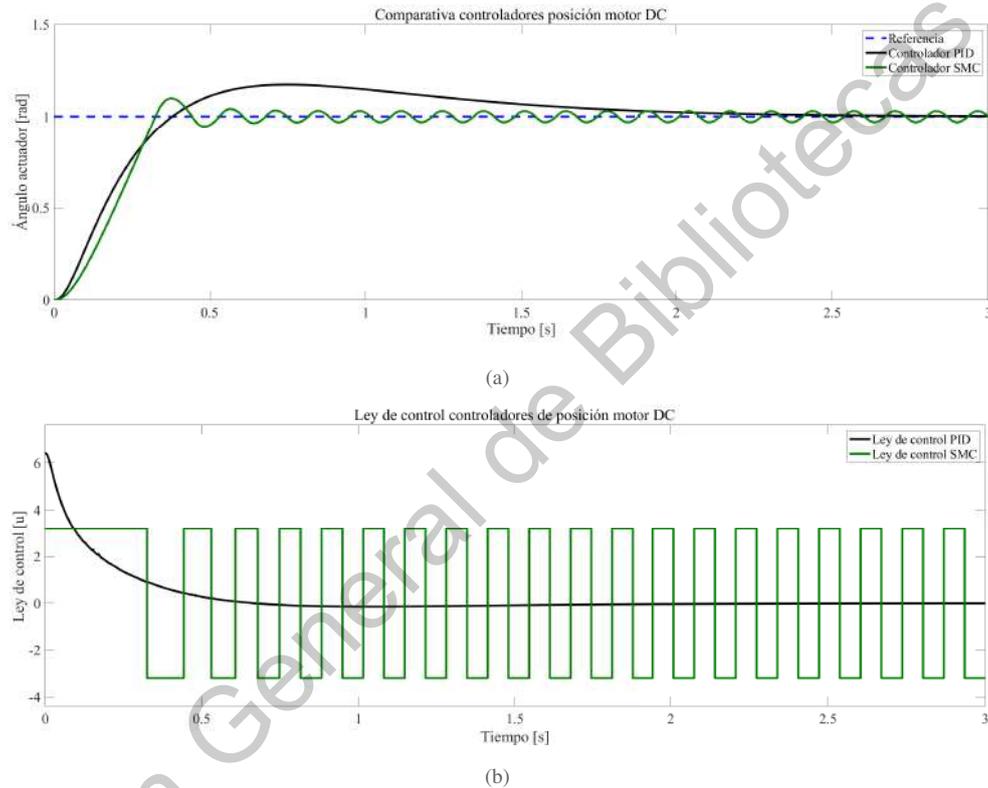


Figura 28: Comparativa de desempeño de controladores. (a) Simulación con $\theta_{ref} = 1$ radianes. (b) Visualización de las leyes de control de los controladores, en el caso del modos deslizantes se puede apreciar el "zigzag" mejor conocido como chattering.

Controlador PID, características principales: Tiempo de levantamiento, $t_s = 0.38$ segundos; Sobrepasso máximo, $M_p = \frac{c_{max} - c_{final}}{c_{final}} \times 100$. Donde $c_{max} = 1.174$ y $c_{final} = 1$. $M_p = 17\%$; Tiempo de asentamiento $t_s = 2.48$ segundos.

Controlador SMC, características principales: Tiempo de levantamiento, $t_s = 0.32$ segundos; Sobrepasso máximo, $M_p = \frac{c_{max} - c_{final}}{c_{final}} \times 100$. Donde $c_{max} = 1.099$ y $c_{final} = 1$. $M_p = 9.9\%$; Tiempo de asentamiento $t_s = \infty$ segundos.

Tabla 5: Tabla comparativa de controladores

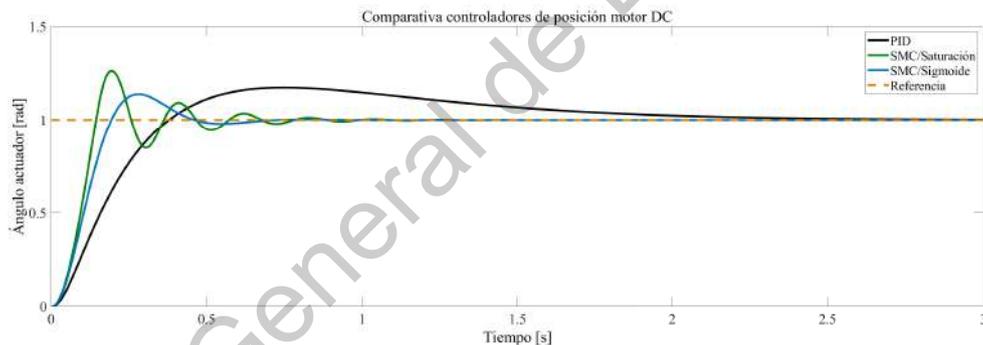
Parámetro	Controlador posición PID	Controlador posición SMC
t_r	0.38 segundos	0.32 segundos
M_p	17%	9.9%
t_s	2.48 segundos	∞ segundos

En resumen, no se puede decir que el controlador SMC presenta mejores características que el PID. Debido a que no tiene tiempo de asentamiento, ya que el "zigzag" en la ley de control (chattering), fig. 28(b), genera vibraciones al sistema a controlar. No obstante, si no existiera la presencia de dichas oscilaciones en la ley de control, el controlador modos deslizantes sería mejor que el PID.

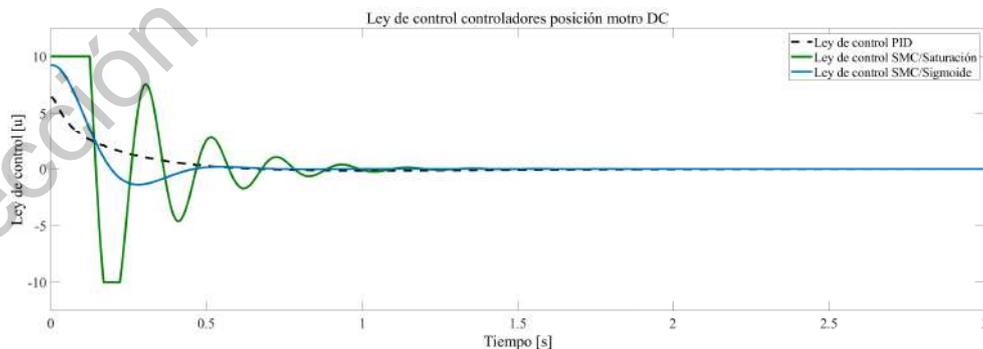
4.1.1 Eliminación del chattering

A partir de la anterior simulación, se pudo observar que la ley de control del modos deslizantes presenta el "zigzag", mejor conocido como chattering. Este fenómeno presenta muchas complicaciones, debido a que suministra, al sistema a controlar, vibraciones. Para poder mitigarlo se hace uso de dos nuevas funciones:

1. Función sigmoide (Quasi-modos deslizantes) : $y = (2/(1 + e^{-x})) - 1$.
2. Función saturación : $y = kx$.



(a)



(b)

Figura 29: Comparativa de desempeño de controladores. (a) Simulación con $\theta_{ref} = 1$ radianes. (b) Visualización de las leyes de control de los controladores. En este caso ya no se presenta el chattering por parte de las variantes de controladores por modos deslizantes.

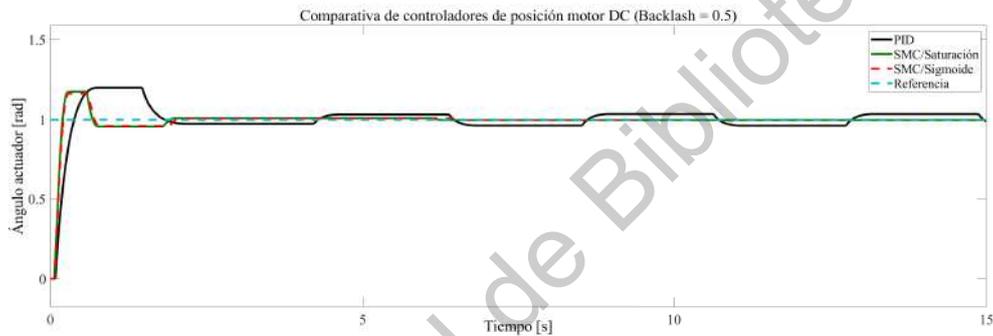
4.1.2 Controladores en presencia de retardo (backlash)

En los tren de engranes existen espacios entre cada par de engranes. Por lo tanto, cuando el engranaje conductor genera un ángulo menor que el intervalo H , fig. 13(b), el engranaje conducido no presenta un movimiento significativo, esto corresponde a la zona muerta. Después de que existe un contacto entre los engranes es que se presenta el movimiento lineal característico de estos componentes. En el caso de la dirección contraria $2H$, fig. 13(b), nuevamente el engrane tiene poco movimiento, casi nada, hasta que hace contacto con el engranaje conducido, teniendo lugar el movimiento lineal. Como resultado, se genera el bucle $EBCD$, fig. 13(b). El fenómeno se puede entender matemáticamente como:

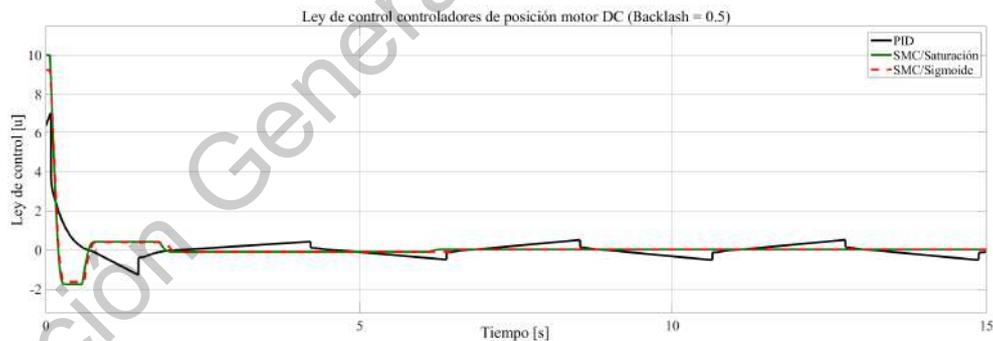
$$N(X) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \beta + \frac{1}{2}v \sin 2\beta - j \cos^2 \beta \right] \quad (43)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left[1 - \frac{2H}{X} \right] \quad (44)$$

Sin embargo, Simulink ya presenta un bloque de retardo, donde solamente especificas que tanta zona muerta va tener el retardo. El cual estaremos usando para las simulaciones aquí expuestas. Presentando en cada prueba que tanta zona muerta se estableció.



(a)



(b)

Figura 30: Comparativa de desempeño de controladores. (a) Simulación con $\theta_{ref} = 1$ radianes, backlash = 0.5. (b) Visualización de las leyes de control de los controladores. En este caso se puede observar que el PID presenta oscilaciones debido a lo no-linealidad de retardo (Backlash).

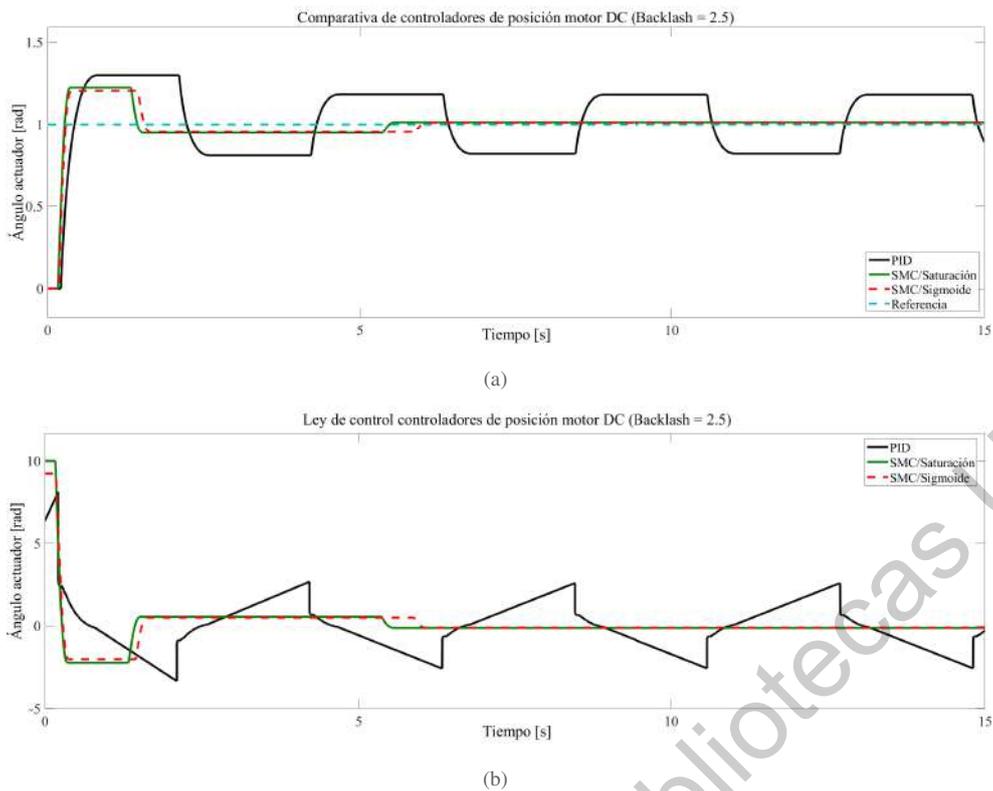


Figura 31: Comparativa de desempeño de controladores. (a) Simulación con $\theta_{ref} = 1$ radianes, backlash = 2.5. (b) Visualización leyes de control. Lo interesante en este caso es que mientras aumenta la zona muerta del retardo el PID se ve más afectado mientras el SMC no se ve afectado.

4.1.3 Controladores de posición en presencia del dedo robótico

Una vez observado los controladores en el actuador, es pertinente situarlos en la dirección del dedo antropomórfico.

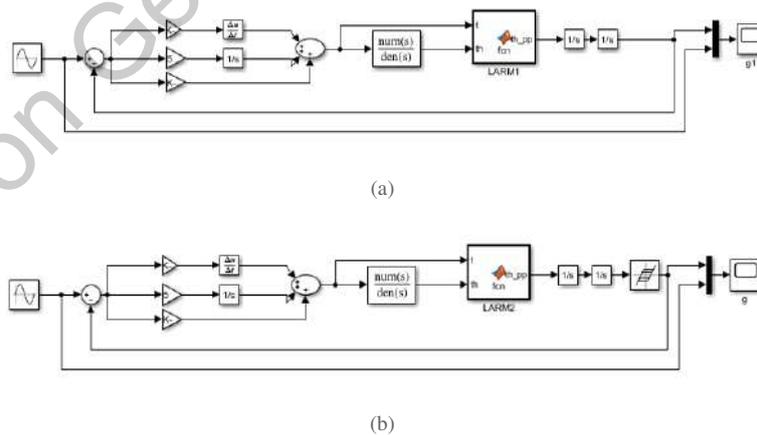
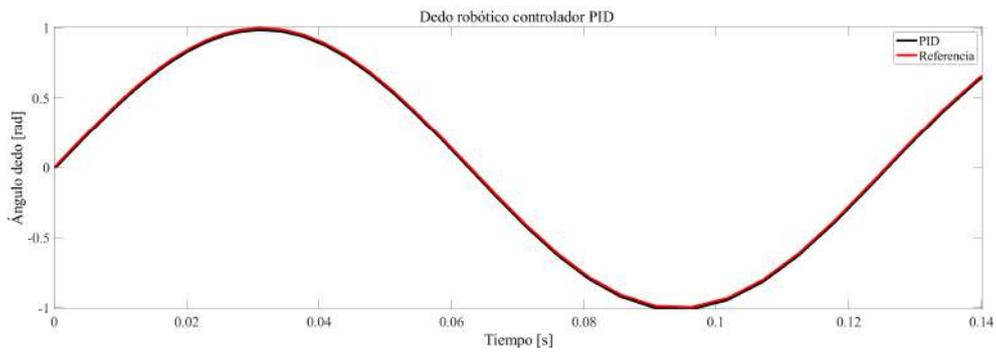
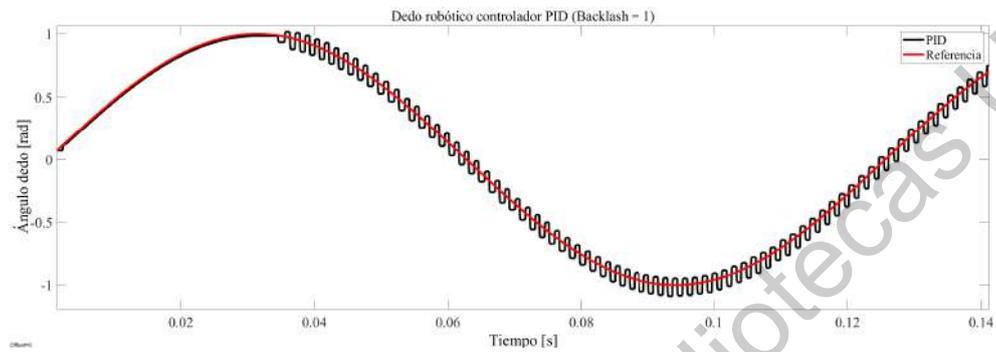


Figura 32: Representación en bloques del controlador de posición para el dedo robótico. (a) Controlador de posición PID para el dedo antropomórfico. (b) Controlador de posición PID, con bloque de retardo (backlash), para el dedo antropomórfico.

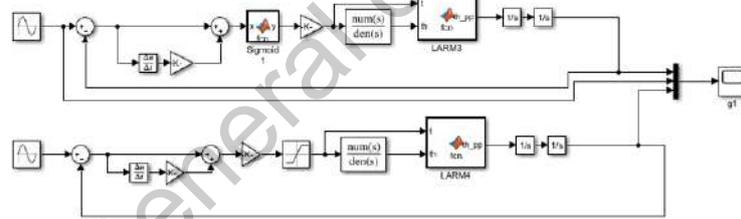


(a)

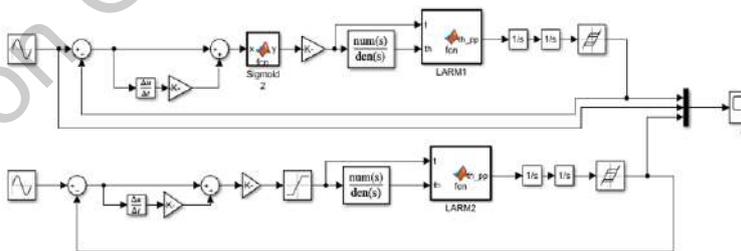


(b)

Figura 33: Resultados de la simulación, seguimiento del senoidal con controlador lineal. (a) Dedo siguiendo senoidal.(b) Dedo siguiendo senoidal ante backlash = 1.



(a)



(b)

Figura 34: Representación en bloques del controlador de posición para el dedo robótico. (a) Controlador de posición SCM/sigmoide y SCM/saturación para el dedo antropomórfico.(b) Controlador de posición SCM/sigmoide y SCM/saturación, con bloque de retardo (backlash), para el dedo antropomórfico.

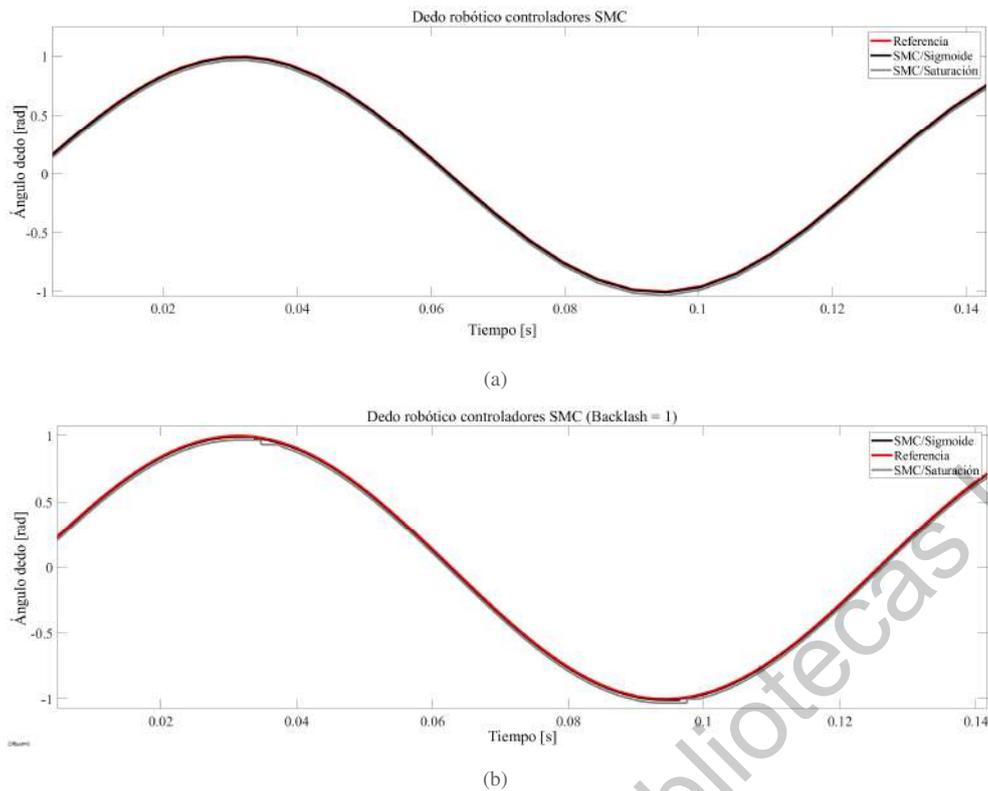


Figura 35: Resultados de la simulación, seguimiento del senoidal con controlador no-lineal. (a) Dedo siguiendo senoidal. (b) Dedo siguiendo senoidal ante backlash = 1.

4.1.4 Resumen de los controladores utilizados hasta el momento

La dinámica expuesta anteriormente, fue para demostrar paso a paso como el controlador SMC puede desprender mejores resultados, ante no linealidades que el controlador PID. Primero se analizó la respuesta transitoria ante un señal prueba (escalón unitario) para caracterizar cada controlador, fig. 28(a). Donde se observó el problema de usar modos deslizantes con la función signo, fig. 28(b) la ley de control presenta oscilaciones (chattering). A partir de ello bajo la literatura se hizo uso de la función sigmoide (Quasi-modos deslizantes) y la función saturación. Esta última partió de la idea que se visualizó a la función como una función saturación donde la recta intermedia es de pendiente infinita, bajo esa lógica si se tiene entre los límites de la saturación una recta que pasa por el origen solamente necesitaremos multiplicar por una pendiente para tener valores intermedios.

Tabla 6: Tabla comparativa de controladores

Parámetro	Control PID	Control SMC/Saturación	Control SMC/Sigmoide
t_r	0.38 segundos	0.14 segundos	0.19 segundos
M_p	17%	26%	13%
T_s	2.48 segundos	1.29 segundos	0.73 segundos

Bajo los criterios antes expuestos, se tiene una respuesta transitoria mejor que el controlador PID, fig. 29(a). Además de una ley de control sin chattering, listo para implementarse, fig. 29(b). Sin embargo, la razón principal por la cual se buscó implementar el modo deslizantes, era para poder suprimir las no-linealidades del sistema, por el ejemplo el retardo

(backlash), fig. 13(b). Por tanto, mediante al herramienta Simulink y su bloque de backlash, se sometió a los controladores antes tal no linealidad.

1. Backlash = 0.5. De acuerdo a la respuesta transitoria de los controladores, fig. 30(a), las variantes de SMC no se ven afectadas, mientras el PID no consigue llegar a la estabilidad. Dicha incapacidad se puede apreciar de mejor manera de acuerdo a las leyes de control, fig.30(b). Donde se puede apreciar que la ley de control del PID es la única que oscila.
2. Backlash = 2.5. De acuerdo a la respuesta transitoria de los controladores, fig. 31(a), nuevamente las variantes de SMC no se ven afectadas, mientras el PID no consigue llegar a la estabilidad. Si nos centramos en las leyes de control, fig.31(b), se puede observar que mientras las variantes de SMC conservan la misma condición, la ley de control del PID presenta mayor amplitud en su oscilación.

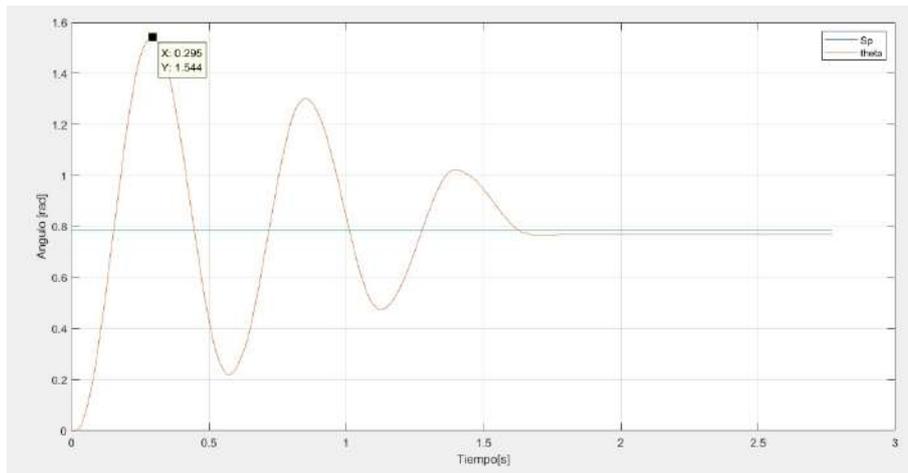
Como conclusión el controlador PID no es robusto para mitigar la no-linealidad de restardo. Sin embargo sera lo mismo al momento de conjuntarla al robot. Para esclarecer dicha duda se obtuvo la dinámica del sistema de acuerdo a la metodología antes expuesta y se simulo a partir de bloques por medio de Simulink.

1. Bloques de control de posición de dedo robótico con PID, fig. 32(a) y variantes de SMC, fig. 34(a). Se impuso un trayectoria senoidal para que el dedo antropomórfico la siguiese y observar su comportamiento. Tanto seguimiento del controlador lineal, fig.33(a), como el no lineal, fig.35(a), demostraron ser suaves y tener una proximidad cerca a la referencia.
2. Bloques de control de posición de dedo robotico con PID con backlash, fig. 32(b) y variantes de SMC con backlash, fig. 34(b). Se impuso un trayectoria senoidal para que el dedo antropomórfico la siguiese, antes la no-linealidad y observar su comportamiento. Se noto un cambio notable en el seguimiento por parte del controlador lineal, fig.33(b), presentó oscilaciones. Mientras el no lineal, fig.35(b), demostró ser suaves y tener una proximidad cerca a la referencia, a pesar de la no linealidad.

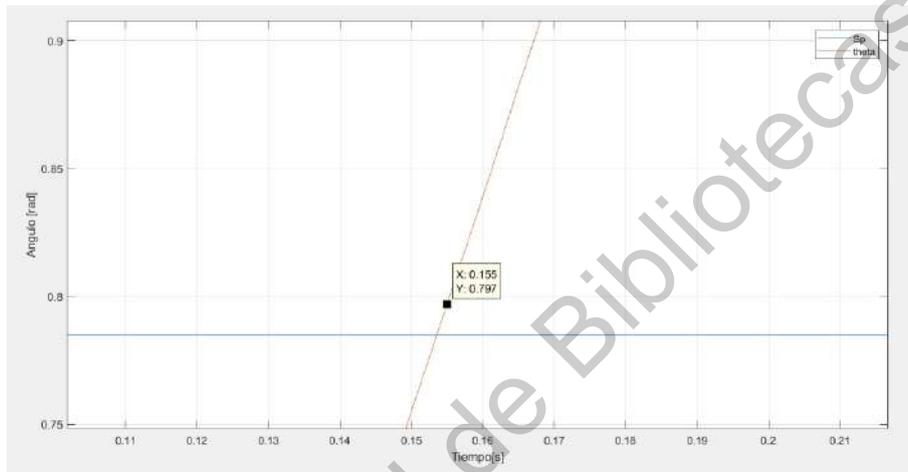
A partir de esto se concluye que el controlador SMC en sus variantes es una mejor alternativa que el PID, pues no solamente cumple la función de direccionar al dedo robótico sino también elimina la no linealidad de backlash en el actuador. Con ello se garantiza que el controlador suministra la posición angular solicitada al dedo. Garantizado, en el bloque de fuerza, con el lazo esclavo de corriente un par deseado.

4.2 Identificación de la planta (Motor Pololu 25D)

Una vez garantizado la funcionalidad de los controladores, es pertinente identificar la planta del actuador del dispositivo LARM. De acuerdo al apartado 3.8.3 el motor Pololu 25D desprende una respuesta transitoria, de la cual se obtiene el sobrepaso máximo, figura 36, y el tiempo de levantamiento 36.



(a)



(b)

Figura 36: Resultados de la simulación, seguimiento del senoide con controlador no-lineal. (a) Sobrepaso máximo motor Pololu 25D. (b) Tiempo de levantamiento motor Pololu 25D.

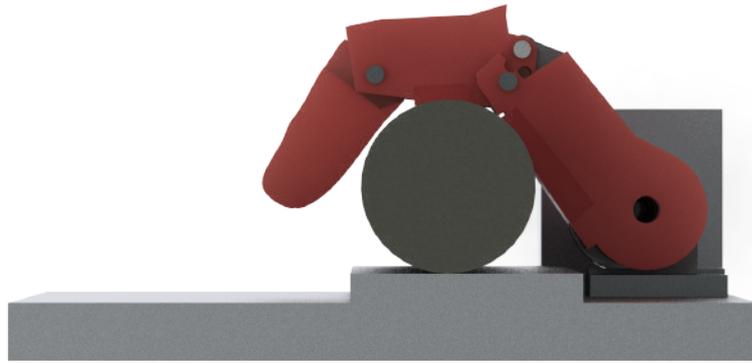
Con los datos de sobrepaso máximo y tiempo de levantamiento se obtiene la función de transferencia de acuerdo al algoritmo 1. Obteniendo

$$\frac{4.59}{0.10s^2 + s} \quad (45)$$

La función de transferencia del actuador del dedo LARM.

4.3 Implementación de controladores de posición en dedo robótico

Los controladores propuestos se implementaron bajo la estación de pruebas, figura 37. Donde se vislumbra el posicionamiento del dedo robótico ante una referencia establecida.



(a)



(b)

Figura 37: Estación de pruebas dedo robótico. (a) Vista lateral dedo robótico. (b) Vista isométrica dedo robótico.

De acuerdo a la función de transferencia del sistema (45), se usó la herramienta PID Tuner, de MATLAB [®], con la cual se obtuvieron las ganancias para el PID: $K_p = 3.3$, $K_i = 0.8$ y $K_d = 0.33$.

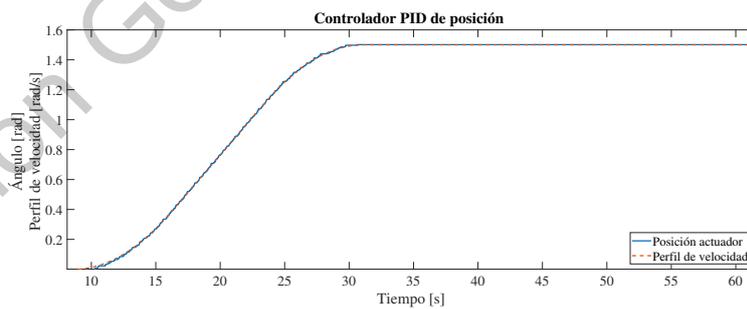


Figura 38: Controlador de posición PID ante perfil de velocidad. $\theta_{ref} = 1.5$ radianes.

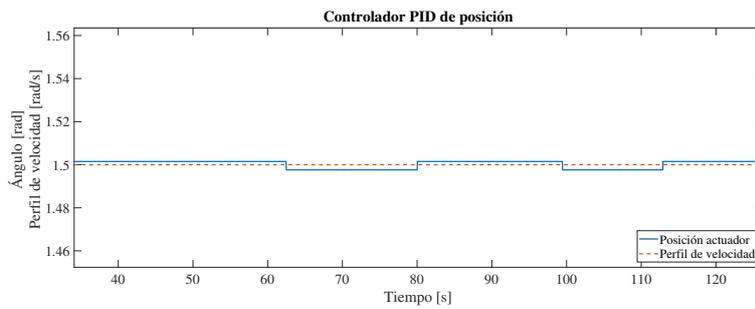


Figura 39: Controlador de posición PID ante perfil de velocidad. Presencia de la no linealidad backlash.

Para el PID los resultados demostraron un seguimiento suave del perfil de velocidad, fig. 38. Sin embargo, después de alcanzar la posición de referencia, en el estado estacionario, se presentan las oscilaciones observadas en la simulación por efecto de la no linealidad backlash del actuador, fig. 39.

Con respecto al controlador modos deslizantes las ganancias fueron, $c = 0.01$ y $p = 34$. En la respuesta del controlador de modos deslizantes, se asevero la existencia de oscilaciones en el seguimiento del perfil de velocidad, fig. 40. Lo cual lo descarta como opción para la movilidad del dedo robótico.

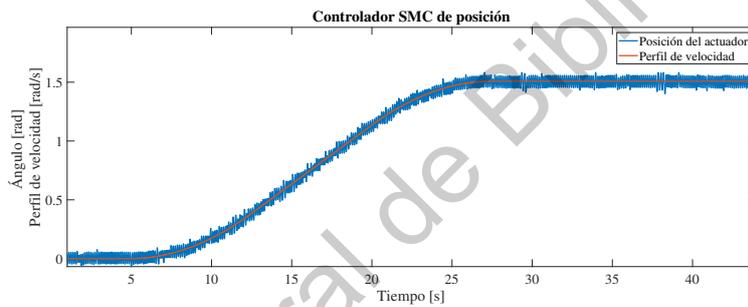


Figura 40: Controlador de posición SMC ante perfil de velocidad. $\theta_{ref} = 1.5$ radianes.

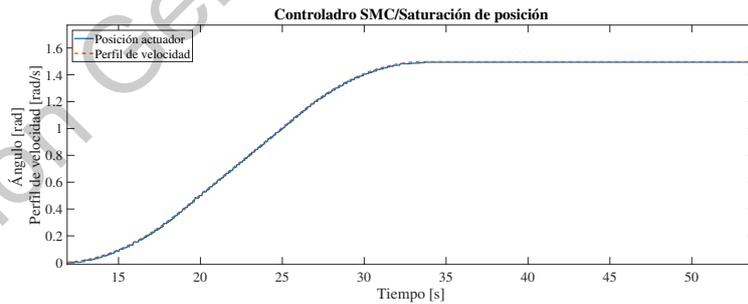


Figura 41: Controlador de posición SMC/Saturación ante perfil de velocidad. $\theta_{ref} = 1.5$ radianes.

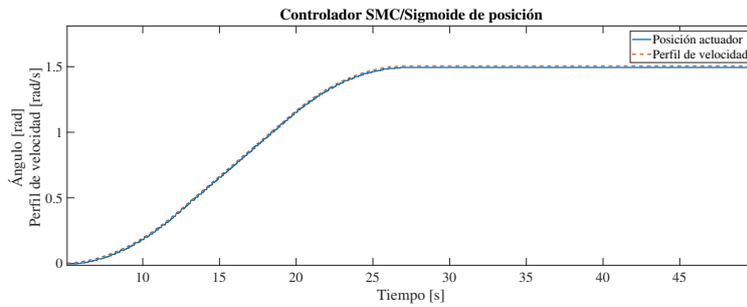
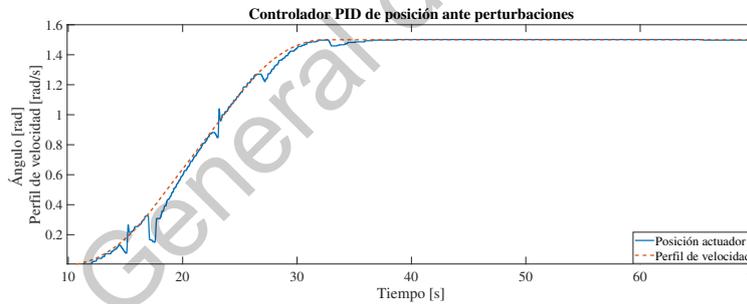


Figura 42: Controlador de posición SMC/Sigmoide ante perfil de velocidad. $\theta_{ref} = 1.5$ radianes.

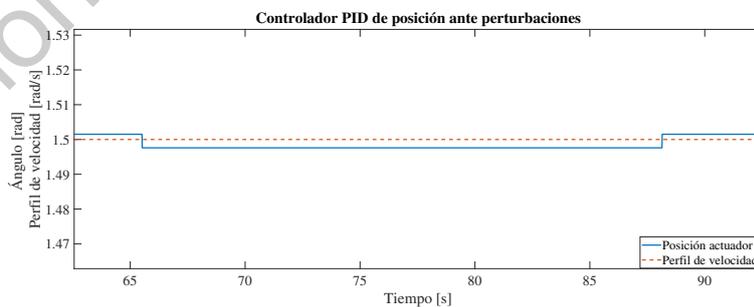
No obstante, se conoce que al cambiar la técnica de la superficie deslizante se pueden quitar las oscilaciones del sistema. Como consecuencia se implementaron las versiones de saturación y sigmoide. Los resultados exhibieron un seguimiento suave y sin presencia de oscilaciones. Individualmente, la versión de saturación de mostró un mejor desempeño, debido a que la versión de sigmoide tiene un pequeño error en estado estacionario. Sin embargo, si se descarta ese pequeño percance, las dos presentan un excelente comportamiento.

4.4 Controladores de posición ante perturbaciones

En este apartado se observan el comportamiento de los controladores ante perturbaciones. En primera instancia se encuentra el controlador lineal PID, fig. 43 (a). La cual, a pesar de las perturbaciones, vuelve a la referencia y no se desestabiliza. Sin embargo, nuevamente cuando se encuentra en el estado estacionario se presentan las oscilaciones por el backlash, fig. 43 (b).



(a)



(b)

Figura 43: Controlador PID ante perfil de velocidad. (a) Control PID $\theta_{ref} = 1.5$ radianes, perturbaciones en los segundos: 14, 16, 22, 26, 32. (b) Presencia de backlash.

La razón de las oscilaciones, se puede vislumbrar a partir de la ley de control, fig. 44. Debido a que no siempre se alcanza la posición deseada, se tiene un error en estado estacionario. Como consecuencia, la ley de control comienza a aumentar para quitar ese error, una vez que la ley de control es tal que vence la inercia estática del actuador, este se mueve, tratando de alcanzar la posición deseada. Si nuevamente no se alcanza la posición deseada, el comportamiento antes expuesto se repetirá hasta alcanzar la posición deseada.

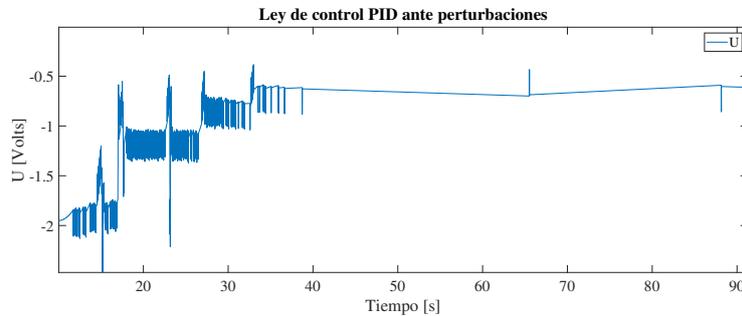
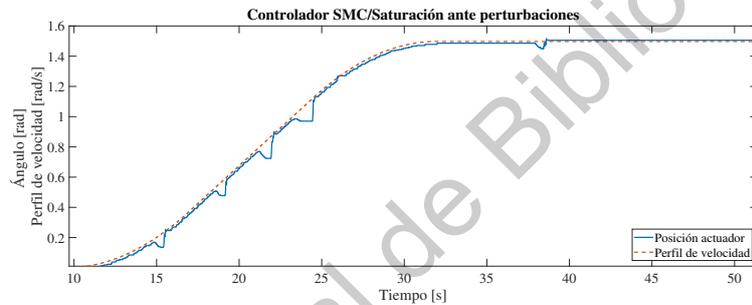
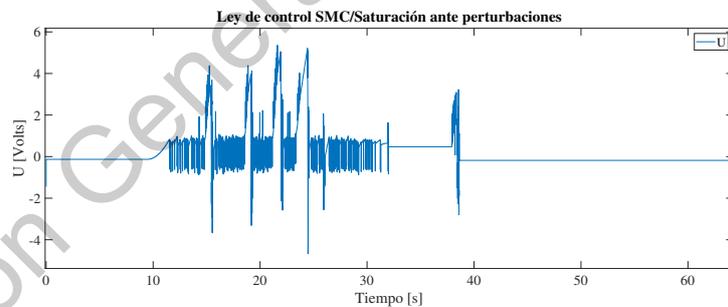


Figura 44: Ley de control PID. En el segundo 65 se tiene el primer intento de alcanzar la posición deseada, en el segundo 88 el segundo.



(a)



(b)

Figura 45: Controlador SMC/Saturación ante perfil de velocidad. (a) Control SMC/Saturación $\theta_{ref} = 1.5$ radianes, perturbaciones en los segundos: 14, 18, 21, 23, 37. (b) Ley de control.

Caso contrario del controlador SMC/Saturación, fig. 45 (a). De igual manera que el PID, el controlador SMC/Saturación desprende un seguimiento suave al perfil de velocidad, pero a diferencia del PID este no presenta a no linealidad backlash. Esto se puede constatar con la ley de control del controlador, fig. 45 (b). Donde, una vez se encuentra en estado estacionario la ley de control permanece constante.

En el caso del controlador SMC/Sigmoide, también no presenta la no linealidad backlash.

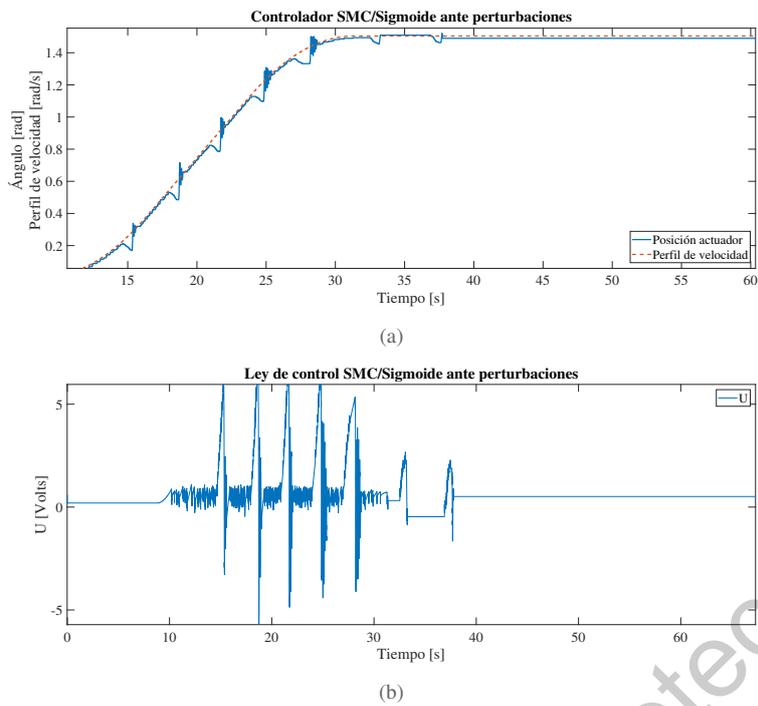


Figura 46: Controlador SMC/Sigmoide ante perfil de velocidad. (a) Control SMC/Sigmoide $\theta_{ref} = 1.5$ radianes, perturbaciones en los segundos: 14, 17, 20, 23, 26, 32, 36. (b) Ley de control.

Y la única diferencia es el sobrepaso máximo que no tiene el SMC/Saturación. Como consecuencia, ya sea el SMC/Saturación o el SMC/Sigmoide son excelentes controladores y queda al gusto elegir cual implementar.

4.5 Comparación del cinemática simulada contra la real

Garantizando la estabilidad en el estado estacionario, se asignaron ciertas posiciones para poder observar concordancia la posición del dedo antropomórfico en simulación y implementada, figura 47. Donde se concluyó que la posición que existen pequeñas discrepancias debido a la fricción del sistema. Sin embargo, no afectan al momento de agarrar algún objeto.

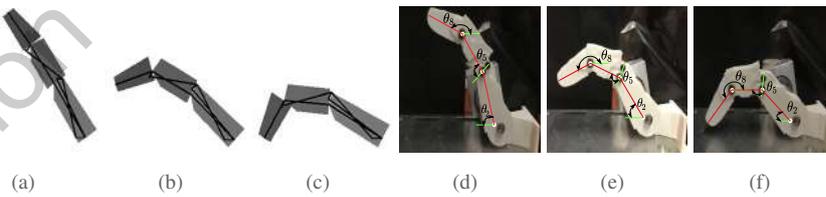


Figura 47: Comparación del cinemática simulada contra la real. (a) Cinemática simulada: $\theta_2 = 75.75^\circ$, $\theta_5 = 78.547^\circ$ y $\theta_8 = 136.87^\circ$. (b) Cinemática simulada: $\theta_2 = 61.15^\circ$, $\theta_5 = 66.13^\circ$ y $\theta_8 = 207.76^\circ$. (c) Cinemática simulada: $\theta_2 = 45.08^\circ$, $\theta_5 = 57.31^\circ$ y $\theta_8 = 249.41^\circ$. (d) Cinemática real: $\theta_2 = 75^\circ$, $\theta_5 = 73^\circ$ y $\theta_8 = 149^\circ$. (e) Cinemática real: $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_5 = 61$ y $\theta_8 = 200$. (f) Cinemática real: $\theta_2 = 45$, $\theta_5 = 65$ y $\theta_8 = 230$.

4.6 Implementación de controladores de posición y fuerza en dedo robótico

El planteamiento general expresa que bajo una posición deseada el dedo LARM buscara seguirla. Por tanto, la localización del dedo antropomórfico es de suma importancia, el garantizar un posición nos permitirá establecer un agarre apropiado en la manipulación de objetos.

En el seguimiento, de la posición, el dedo LARM posiblemente se encuentre con algún objeto, que de alcanzar la posición deseada podría deformar o proyectar al objeto en cuestión. Sin embargo, bajo la acción del controlador de fuerza (cálculos de la dinámica del dedo antropomórfico), se puede condicionar el seguimiento e incluso replantearlo. En este apartado se asignara el controlador de fuerza al controlador de posición, para su valoración y calificar su desempeño bajo el siguiente esquema, figura 48.

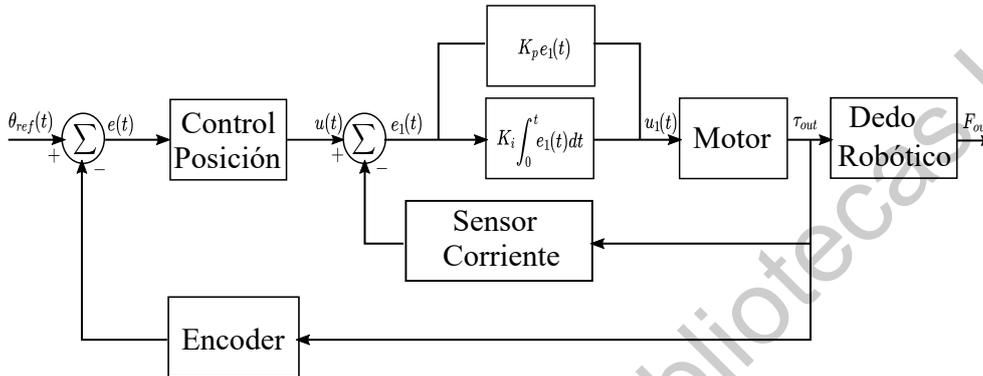


Figura 48: Controlador de fuerza.

El símbolo θ_{ref} , en fig.48, representa la posición angular deseada para el dedo antropomórfico. El encoder del motor proveerá la retroalimentación de la posición angular actual. La diferencia entre la posición actual y la deseada generara el error $e(t)$. El control maestro es un controlador de posición (Controlador SMC o lineal) donde la salida estará dada por $u(t)$. El controlador de fuerza esta conformado por un lazo esclavo de corriente, donde la corriente deseada se establecerá por medio de $u(t)$. La diferencia de la corriente deseada y la corriente medida por el sensor de corriente desprenderá error₁ $e_1(t)$. El lazo esclavo de corriente es un controlador PI (Proporcional integral) con salida $u_1(t)$

$$u_1(t) = k_p e_1(t) + k_i \int_0^t e_1(t) dt \quad (46)$$

Posteriormente la nueva ley de control es multiplicada por la constante mecánica del actuador, Km , para obtener τ_{out} . Dicho valor nos permite bajo el bloque de "Dedo robótico", donde se encuentra el calculo de la dinámica del sistema, conocer las fuerzas de cada falange F_{out} . En la implementación real, el primer ángulo de referencia es tal que el dedo robótico se encuentra completamente abierto. Posteriormente, el nuevo ángulo sera establecido para cerrar completamente el dedo. Como consecuencia, una vez que el dedo encuentre el objeto en su trayectoria, proveída por el perfil de velocidad, este continuara tanto como el algoritmo se lo permita. El algoritmo establece, si el dedo robótico no puede alcanzar la posición deseada, el controlador generara mayor fuerza, más demanda de corriente. Dicha corriente se multiplicara con se multiplicara por la constante Km del actuador, desprendiendo la torca generada. Con el conocimiento de la torca y la cinemática y dinámica del dedo antropomórfico, el algoritmo puede establecer si la fuerza puede dañar el objeto, deteniendo el movimiento del dedo robótico. Con lo anterior expuesto, se pude decir que se estableció un controlador de fuerza en la investigación sin necesidad de sensor de fuerza.

4.7 Primera experimentación

Experimentos preliminares se produjeron para constatar la capacidad del controlador de posición. Donde las ganancias de controlador fueron adquiridas de forma experimental. Respecto a la figura 49, se puede observar la movilidad del dedo robótico a una posición deseada θ_{ref} , es 0.25 radianes. Dicho movilidad, direccionada por el perfil de velocidad, al momento de llegar a la posición de referencia es estable.

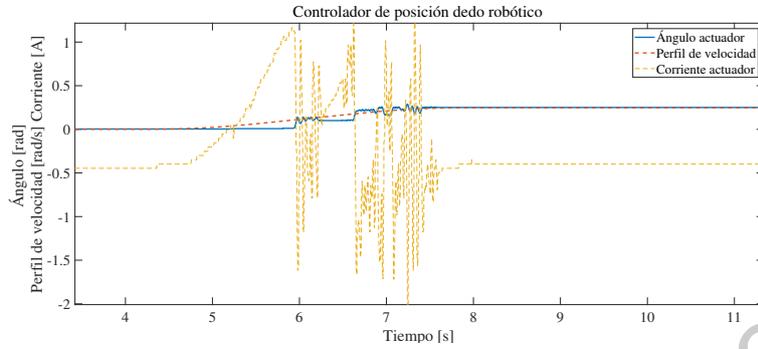


Figura 49: Agarre del dedo robótico. Posición de referencia $\theta_{ref} = 0.78$ radianes. corriente máxima medida 1.2 A.

De acuerdo a los análisis antes establecidos, se puede garantizar que la tarea de agarre del dedo robótico puede darse, es factible. Por lo tanto, como experimentación, un cilindro de plástico es posicionado para su agarre, fig. 51. De acuerdo al algoritmo conocido, necesitamos una posición del dedo robótico que genera su cierre completo, es por ello que se eligió θ_{ref} como 1.2 radianes, fig. 50. La experimentación muestra que la demanda de corriente, en presencia del objeto, aumenta gradualmente. Esto pasa debido a que estable un mayor consumo de corriente para poder alcanzar la posición deseada. Mediante la manipulación de la corriente medida se obtiene la fuerza generada por el dedo antropomórfico y cuando se alcance la fuerza deseada el algoritmo para el movimiento del dedo robótico. Para el estudio, la validación de la cinemática y la dinámica fue desarrollada en el interprete Python 3.6, donde la torca generada esta dada por:

$$\tau = I_G \ddot{\theta}_2 + m_2 g r_c \cos \theta_2 \quad (47)$$

Donde, $m_2 = 0.036$, $I_G = 5.074 \times 10^{-3}$, $r_c = 0.03611$ $\theta_2 = 1.13$ radianes.

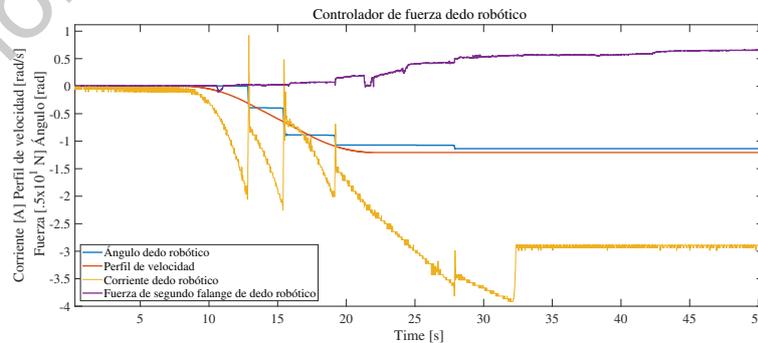


Figura 50: Robotic finger grasping. The reference position $\theta_{ref} = 1.2$ radianes. The maximum constant measured current is 2.98 A.



Figura 51: Agarre del dedo robótico.

El controlador de fuerza, la corriente es transformada en fuerza por medio de la multiplicación con la constante mecánica del motor, $km = 0.21$. En la experimentación las fuerzas obtenidas fueron $r_2 = 5.88$ N, $r_5 = 2.98$ N y $r_8 = 0.8$ N. Para validar los cálculos de la fuerza generada por el segundo falange del dedo antropomórfico, se usó el sensor de fuerza RFP, el cual midió $r_5 = 3.2$ N, similar al calculado.

5 Conclusiones

De acuerdo a la investigación el controlador por modos deslizantes convencional, no es una buena alternativa como controlador debido a que no presenta un tiempo estabilidad, es decir siempre oscila cerca de la referencia. Esto se debe a la discontinuidad de la función signo propia del controlador. De acuerdo a esto, se investigo en la literatura y se encontró que una manera de mitigar dichas oscilaciones es aproximando la función signo, a una función suave y continua. La técnica quasi-modos deslizantes establece que la función sigmoide evita el famoso chattering (proveedor de oscilaciones). La investigación trato también de aproximar la función signo mediante un saturador, donde entre la saturación se encuentra una recta que pasa por el origen con pendiente deseada por el operador. Tales acciones resultaron en un controlador que no solamente desprende mejores resultados que controlador lineal PID, sino que quita la no-linealidad del actuador, motor pololu 25D con caja de engranes. Esto permite garantizar una posición deseada, y con el lazo esclavo de corriente un par deseado.

Esta primera aproximación posibilito tener un controlador de fuerza, que una vez añadido al dedo antropomórfico, genera manipulación correcta de los objetos. Este logro no solamente nos permite tener un dedo de un grado de libertad, sino también permite al dedo, mecanismo LARM, implantarse en el mundo protético, dejando su antigua utilización con efector final de cualquier robot. Esto a la larga permitirá generar una prótesis de mano de 4 grados de libertad, no contando el pulgar. Actualmente se tienen ciertas limitaciones con respecto al objeto a agarrar, debido a que se tiene que conocer ciertos parámetros del objeto antes. Para ello existen investigaciones que se centran en complementar técnicas de control lineal, no lineal con técnicas de control inteligente. En un futuro, sera posible generar una arquitectura de control adaptativo donde un controlador como SMC/Saturación o SMC/Sigmoide sea implantado en el dedo y mediante Q-learning (Técnica de control inteligente) se enseñe al dedo a agarrar cualquiera que sea el objeto. Sin embargo, por el momento se tiene, con mucho éxito, un nuevo acercamiento que permite a un controlador no lineal controlar al dedo antropomórfico con mejores resultados, que si fuera controlador con un PID.

Bibliografía

- Bebionic (2019). *Bebionic*. http://bebionic.com/the_hand/technical_information/.
- bionics, T. (2019). *I-limb ultra*. <http://touchbionics.com/products/active-prostheses/i-limb-ultra>.
- Brooker, M. G. (2012). *Introduction to biomechatronics*. Scitech publishing inc.
- Castro, X. Y. S. (2011). *Prótesis de mao 1.0*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Choi, B., Lee, S., and Choi, H. R. (2006). Development of Anthropomorphic Robot Hand with Tactile Sensor : SKKU Hand II. *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3779–3784.
- Dechev, N., Cleghorn, W. L., and Naumann, S. (2001). Multiple finger, passive adaptive grasp prosthetic hand. *36:1157–1173*.
- Doane, J. (2016). *Machine analysis with computer applications for mechanical engineer*. Wiley.
- Engeberg, Erik D y Meek, S. (2008a). Improved Grasp Force Sensitivity for Prosthetic Hands Through Force-Derivative Feedback. *55(2):817–821*.
- Engeberg, Erik D y Meek, S. G. (2009). Backstepping and Sliding Mode Control Hybridized for a Prosthetic Hand. *17(1):70–79*.
- Engeberg, Erik D y Meek, S. G. y. M. M. A. (2008b). Hybrid Force – Velocity Sliding Mode Control of a Prosthetic Hand. *55(5):1572–1581*.
- Grosch, P., Politécnica, U., Upc, D. C., and Diagonal, A. (2004). DEXTEROUS ROBOTIC HAND MA-I Software and Hardware Architecture. pages 91–96.
- Hopkins, J. (2011). An overview of the developmental process for the modular prosthetic limb. *30(3):207–216*.
- Hopkins, J. (2019). Modular prosthetic limb. <https://www.jhuapl.edu/prosthetics/scientists/mpl.asp>.
- Kyberd, P. J. and Pons, J. L. (2003). A Comparison of the Oxford and Manus Intelligent Hand prostheses. pages 3231–3236.
- Lotti, F., Tiezzi, P., and Vassura, G. (2005). Development of UB Hand 3 : Early Results. pages 4488–4493.
- motioncontrol (2019). *Taska hand*. <http://www.utaharm.com/Taska/>.
- Nise, N. S. (2015). *Control Systems Engineering*. WILEY.
- ottobock (2019a). Fascinated with michelangelo. perfect use of precision technology. <https://www.ottobockus.com/media/local-media/prosthetics/upper-limb/michelangelo/files/michelangelo-brochure.pdf>.
- ottobock (2019b). *Sensorhand speed. variplus speed*. <https://professionals.ottobockus.com/media/pdf/646D321-GB-06-1602w.pdf>.

Roccella, S., Canozza, M. C., Cappiello, G., Dario, P., and Cabibihan, J. J. (2004). Design , fabrication and preliminary results of a novel anthropomorphic hand for humanoid robotics : RCH- 1. pages 266–271.

Slotine, E. (1991). *Applied nonlinear control*. Prince Hall.

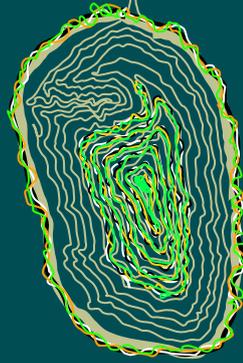
Yang, J., Pe, E., Patrick, A., and Lindkvist, L. (2004). Mechanism and Machine Theory A multi-fingered hand prosthesis. 39:555–581.

Zhang, Y., Han, Z., Zhang, H., Shang, X., Wang, T., and Guo, W. (2001). Design and Control of the BUAA Four-Fingered Hand. pages 2517–2522.

Zhang, Y., Luo, H., and Deng, H. (2016). Grasp Forces Analysis Based on Statistic Model of an Underactuated Prosthetic Finger. (Icsai):633–637.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Tesis



Dirección General de Bibliotecas UAQ