



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SISTEMA DE CONTROL RETROALIMENTADO PARA ROBOTS MODULARES  
BLANDOS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

GABRIEL ALEJANDRO OLIVARES SÁNCHEZ

PROFESOR GUÍA:

Rubén Marcos Fernández Urrutia

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

Rodrigo Hernández Pellicer

Harold Valenzuela Coloma

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:

UNIVERSIDAD DE CHILE

SANTIAGO DE CHILE

2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: GABRIEL ALEJANDRO OLIVARES SÁNCHEZ  
FECHA: 2023  
PROF. GUÍA: Rubén Marcos Fernández Urrutia

## **SISTEMA DE CONTROL RETROALIMENTADO PARA ROBOTS MODULARES BLANDOS.**

La robótica blanda es una área relativamente nueva que busca beneficiarse de la flexibilidad y elasticidad de materiales no metálicos como la silicona para crear componentes adaptables al contacto, pero estas mismas propiedades que le dan grandes beneficios también pueden considerarse sus debilidades, en especial, su elasticidad causa gran pérdida de precisión en sus movimientos aumentando la importancia de su forma de control.

Por ello es de relevancia optimizar las formas de control para lograr mayores estabilidades mediante el típico control de una válvula solenoide o logrando un nuevo enfoque al estudiar el control de una bomba de diafragma para aumentar la precisión y estabilidad.

Por otra parte, también se demostrará como las plantas tipo escalón simples, no siempre requieren control moderno, pudiendo utilizarse una simplificación que mantenga los típicos parámetros que definen al control, como es el tiempo de establecimiento y el sobrepaso.

Por consiguiente el trabajo inicia por rediseñar los moldes de los robot blandos modulares de Valenzuela para simplificar su manufactura sin alterar los patrones requeridos para la producción de núcleos por litografía blanda (patrones en la superficie), esto para continuar realizando simulaciones sobre el comportamiento de estos módulos y confirmar que puedan realizar las deformaciones deseadas, y en la etapa final ver si las simulaciones son acorde a las pruebas experimentales.

Además, se incluye el proceso de diseño y confección de los circuitos electrónicos de control, pasando por los componentes usados hasta llegar al método de calibración del sensor, incluyendo los códigos de manejo del sistema, así como la selección de los tiempos de espera (delay) on-off adecuados a cada actuador. Todo esto a la vez que se plantean diferentes ecuaciones de controladores aplicables al problema de planta tipo escalón, lo cual llevará a demostrar que este paso puede ser sumamente simplificado sin requerir pasar por el espacio de Laplace y todo lo que implica usar el método del lugar de la raíz de los métodos modernos de control.

Lo anterior concluirá en que la bomba es un elemento que puede ser un componente que trabaja como actuador, entregando incluso mejor estabilidad que las válvulas solenoides producto de las altas amplitudes en las vibraciones que se generan al accionarse el cambio de estado de la válvula.

# Agradecimientos

Completar este trabajo fue gracias a la ayuda de muchas personas que me apoyaron a lo largo de mi carrera, en especial, a mí madre Isabel Sánchez que siempre creyó en mí y me apoyo desde atrás sin nunca pedirme ni exigirme nada durante todos los años que me llevaron a este punto, ella formó mis valores y me dio la suficiente confianza para seguir este camino.

A mis amigos y familiares por creer en mí, ayudándome no solo con palabras sino con muchas acciones, pero en particular, agradezco a mí amiga Pamela Arias que siempre creyó y motivaba con sus comentarios de confianza, aunque yo mismo dudaba muchas veces si iba a lograr terminar la carrera, comentarios y frases que me motivaban a seguir adelante y que tal vez, ella mismo no se dio cuenta de lo importante que fueron para mí.

Agradezco en gran manera a los profesores Rubén Fernández y Harold Valenzuela que aceptaron guiarme en mi momento de mayor necesidad cuando creía que no iba a poder terminar este trabajo, me guiaron y me ayudaron con acceso a laboratorios y asesoramiento cuando lo requería, también agradezco a los miembros del Fablab de la Universidad de Chile por permitirme usar sus máquinas y resolver dudas cuando lo requería.

Y por último a todas las grandes personas que conocí a lo largo de los años, profesores y compañeros que permitieron llevar una vida amena en la universidad.

Gracias a todos.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2. Objetivos específicos . . . . .	2
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Robótica blanda . . . . .	3
2.2. Robótica modular . . . . .	5
2.3. Robótica modular blanda . . . . .	7
2.4. Orden de sistemas . . . . .	9
2.5. Control de sistemas . . . . .	10
2.5.1. Lazo abierto . . . . .	11
2.5.2. Lazo cerrado . . . . .	11
2.5.3. Variable through y variable across . . . . .	12
2.5.4. Controladores modernos . . . . .	12
2.5.4.1. Control PID-PI-PD . . . . .	12
2.5.5. Control ON-OFF . . . . .	13
<b>3. Caracterizaciones de controladores</b>	<b>14</b>
3.1. Control moderno . . . . .	14
3.1.1. Control PI . . . . .	15
3.1.2. Control PID . . . . .	17
3.1.3. Control por segundo orden ideal . . . . .	18
3.2. Control simplificado . . . . .	20
3.2.1. Control por serie de ciclo . . . . .	20
3.2.1.1. Ejemplo: serie $1/n$ . . . . .	20
3.2.1.2. Ejemplo: serie $\sin(1/n)$ . . . . .	21
3.2.2. Control por inversa de función continuamente creciente . . . . .	21
3.2.2.1. Ejemplo función $1/t^3$ . . . . .	21
3.2.2.2. Ejemplo función $1/\exp(t-1)$ . . . . .	22
<b>4. Metodología</b>	<b>23</b>
4.1. Validación de robot . . . . .	23
4.2. Planteación de controladores . . . . .	24

4.3.	Diseño físico de sistema de control . . . . .	26
4.4.	Pruebas experimentales . . . . .	27
4.5.	Métrica de trabajo . . . . .	28
4.5.1.	Error medio . . . . .	28
4.5.1.1.	Estabilidad . . . . .	28
4.5.2.	Seguimiento de comportamiento . . . . .	28
4.5.2.1.	Software Tracker . . . . .	29
<b>5.</b>	<b>Modelado de robots modulares</b>	<b>30</b>
5.1.	Simulación ansys . . . . .	30
5.1.1.	Materiales . . . . .	30
5.1.2.	Fixed y distribución de esfuerzos . . . . .	31
5.1.3.	Presiones a medir . . . . .	32
5.1.4.	Puntos de medición . . . . .	32
5.1.5.	Mallado . . . . .	32
5.2.	Resultados de simulaciones . . . . .	33
5.2.1.	Uniaxial . . . . .	34
5.2.2.	Rotator . . . . .	35
<b>6.</b>	<b>Fabricación</b>	<b>37</b>
6.1.	Métodos de construcción . . . . .	37
6.1.1.	Moldes . . . . .	37
6.1.1.1.	Núcleos . . . . .	37
6.1.1.2.	Inyección . . . . .	38
6.1.1.3.	Devanado . . . . .	39
6.1.2.	Cubo . . . . .	39
<b>7.</b>	<b>Circuito control</b>	<b>41</b>
7.1.	Componentes . . . . .	41
7.1.1.	Placa de desarrollo . . . . .	41
7.1.2.	Sensor de presión XGZP (DIP 6 pins) . . . . .	41
7.1.3.	Bomba . . . . .	42
7.1.4.	Válvula solenoide . . . . .	43
7.2.	Circuito de sensor . . . . .	43
7.2.1.	Calibración . . . . .	44
7.3.	Accionamiento de bomba y válvula . . . . .	45
<b>8.</b>	<b>Caracterización de actuadores</b>	<b>47</b>
8.1.	Descripción del sistema . . . . .	48
8.1.1.	Componentes de control . . . . .	48
8.1.1.1.	Control de bomba . . . . .	49
8.1.1.2.	Válvula de alivio . . . . .	52

8.1.1.2.1 Válvula de paso . . . . .	55
<b>9. Resultados</b>	<b>58</b>
9.1. Comparaciones de métodos en vacío . . . . .	58
9.2. Pruebas en módulos . . . . .	60
<b>10. Discusión</b>	<b>65</b>
10.1. Simulación y fabricación . . . . .	65
10.2. Circuito . . . . .	65
10.3. Controladores . . . . .	65
10.4. Desempeño . . . . .	66
10.5. Limitaciones . . . . .	67
10.6. Posibles mejoras . . . . .	67
10.7. Trabajo futuro . . . . .	67
<b>11. Conclusiones</b>	<b>68</b>
11.1. Cumplimiento de objetivos . . . . .	69
<b>Bibliografía</b>	<b>70</b>
<b>Anexo A. Códigos</b>	<b>72</b>
A.1. Definición de controladores . . . . .	72
A.2. Código de control de válvula . . . . .	75
A.3. Código de control de bomba de diafragma . . . . .	81
<b>Anexo B. Modelado de robots modulares</b>	<b>87</b>
B.1. Biaxial . . . . .	87
B.2. Shear . . . . .	87
B.3. Tilt . . . . .	88
<b>Anexo C. Moldes</b>	<b>89</b>
C.1. Molde núcleo uniaxial y shear . . . . .	89
C.2. Molde núcleo Biaxial . . . . .	90
C.3. Molde núcleo tilt . . . . .	91
C.4. Molde núcleo rotator . . . . .	92
C.5. Molde formación cubo . . . . .	93
C.5.1. Cara cubica de cubo . . . . .	93
C.5.2. Cara cilíndrica de cubo para etapa 1 . . . . .	94
C.5.3. Caras de molde para cubo shear . . . . .	95
<b>Anexo D. Seguimiento</b>	<b>96</b>
D.1. Seguimiento de controladores en vacío . . . . .	97

# Índice de Tablas

2.1.	Extracto de “Benefits and shortcoming of reconfiguration categories and architectures”[18]	7
5.1.	Características de material Cured Ecoflex <sup>TM</sup> 00-30 de la empresa Smooth-On [26]. . .	30
5.2.	Parámetros de Mooney-Rivlin de 3 términos[20]. . . . .	33
5.3.	Ecuaciones de deformación asociadas a robot uniaxial, esto para tres tamaños de módulos y tres grosores internos. . . . .	34
5.4.	Ecuaciones de deformación asociadas a robot rotator, esto para tres tamaños de módulos y tres grosores internos. . . . .	36
7.1.	Parámetros de sensor XGZP de 6 pins tipo resistivo extraídos de su datasheet[27]. . .	42
7.2.	Extracto de datasheet de bomba KPM14A[27]. . . . .	42
7.3.	Extracto de datasheet de válvula solenoide genérica de 12[V]. . . . .	43
7.4.	Parámetros de pendiente medidos para los 24 circuitos probados. . . . .	45
9.1.	Tabla resumen de errores asociados a los métodos de control estudiados, considerando un error para estado estacionario y un error para estado transiente con desviación de 0.02 [mm]. . . . .	59
9.2.	Salidas de deformación para una presión de entrada de 5 [Psi]. . . . .	61
9.3.	Variación de amplitud de deformación en casos de estudio con reducción porcentual destacada. . . . .	64
B.1.	Ecuaciones de deformación asociadas a robot biaxial, esto para tres tamaños de módulos y tres grosores internos. . . . .	87
B.2.	Ecuaciones de deformación asociadas a robot shear, esto para tres tamaños de módulos y tres grosores internos. . . . .	87
B.3.	Ecuaciones de deformación asociadas a robot tilt, esto para tres tamaños de módulos y tres grosores internos. . . . .	88

# Índice de Ilustraciones

2.1.1.	Ejemplos de robots suaves: (A) Optopus Robot [2], (B) Starfish robot [3], (C) Universal Gripper [4], y (D) Bionic Handling Assistant [5]. . . . .	4
2.1.2.	Robots blandos de variado tamaño y complejidad, van desde simples núcleos limitados por hilos hasta formas animales complejas como un pulpo. . . . .	4
2.2.1.	Tabla comparativa de métodos de unión designados por Mendoza en el trabajo <i>A Vacuum-Based Bonding Mechanism for Modular Robotics</i> [14]. . . . .	5
2.2.2.	Robot MORI con junta de bisagra[15]. . . . .	6
2.2.3.	“Three classification of reconfigurable robots based on structural properties” . . . . .	6
2.3.1.	Tipos de módulos presentados por Valenzuela[20]. . . . .	8
2.3.2.	División de grados de libertad típicos de robots modulares, a la derecha se presenta los 8 tipos de movimientos de un robot modular, y a la izquierda se aprecian los grados de libertad en un robot blando construido por Toribio como ejemplo[21]. . . . .	9
2.5.1.	Diagrama de bloques de sistema de lazo abierto, en la parte inferior se ejemplifica sistema de robots blando por control de presión. . . . .	11
2.5.2.	Diagrama de bloques de sistema de lazo cerrado, en la parte inferior se ejemplifica sistema de robots blando por control de presión y sensor de presión. . . . .	12
2.5.3.	Ejemplo de funcionamiento on-off de un regulador de temperatura. . . . .	13
3.1.1.	Respuesta al escalón unitario para controlador PI y distintos valores $t_s$ . . . . .	17
3.1.2.	Respuesta al escalón unitario para controlador PID diseñado en función de $k_d$ y distintos valores de $t_s$ . . . . .	18
3.1.3.	Diagrama de proceso para control de bomba. . . . .	19
3.2.1.	Respuesta al escalón unitario al usar serie $a(n)=1/n$ . . . . .	20
3.2.2.	Respuesta al escalón unitario al usar serie $a(n)=\sin(1/n)$ . . . . .	21
3.2.3.	Respuesta al escalón unitario ante la función convergente $1/t^3$ . . . . .	22
3.2.4.	Respuesta al escalón unitario ante la función convergente $1/exp(t)$ . . . . .	22
4.0.1.	Diagrama de proceso de investigación a seguir. . . . .	23
4.1.1.	Diagrama de proceso para aalidación de robot Modulares. . . . .	24
4.2.1.	Controladores a plantear en el estudio de control. . . . .	25
4.2.2.	Diagrama de proceso para realización de pruebas en vacío. . . . .	26
4.3.1.	Diagrama de diseño de sistema de control físico. . . . .	26
4.3.2.	Diagrama de pruebas de controlador físico. . . . .	27
4.4.1.	Diagrama simple de proceso de pruebas experimentales. . . . .	27
4.5.1.	Muestra de calibración de seguimiento en programa “Tracker”. . . . .	29

5.1.1.	Disposición de parámetros de material en data engineer del programa ANSYS para una simulación de tipo Transient Structural. . . . .	31
5.1.2.	Disposición de soporte y presiones en modelo ANSYS. . . . .	31
5.1.3.	Distribución temporal de las presiones para la realización de las simulaciones. . . . .	32
5.1.4.	Ejemplo de mallado expresado por software ANSYS. . . . .	33
5.2.1.	Evolución de deformación para robot uniaxial. . . . .	35
5.2.2.	Evolución de deformación para robot rotator. . . . .	36
6.1.1.	Ejemplo de piezas modeladas para realizar operación Booleana y resultado esperado. . . . .	38
6.1.2.	Ejemplo de caras de molde de núcleo previo ha hilado, se incluye el núcleo de vaciado. . . . .	38
6.1.3.	Muestra de método de inyección de silicona, este se realiza mediante una jeringa conectada a alguno de los dos canales de inyección-respiración. . . . .	39
6.1.4.	Devanado de núcleo uniaxial y rotator, (a) muestra la secuencia teórica y (b) una muestra real de devanado. . . . .	39
6.1.5.	Caras de molde para primera etapa de cubicación, una de estas es cilíndrica para centrar el cubo a la altura deseada. . . . .	40
6.1.6.	Caras de molde para segunda etapa de cubicación, una de estas caras se le agrega un agujero de 2 [mm] como entrada de manguera de bombeo. . . . .	40
7.1.1.	Placa de desarrollo Arduino MEGA. . . . .	41
7.1.2.	Sensor de presión 6 pins tipo esfigmómetro. . . . .	42
7.1.3.	Bomba de accionamiento de diafragma KPM14A. . . . .	43
7.1.4.	Válvula Solenoide de 6mm 12V generica. . . . .	43
7.2.1.	Circuito de sensor usado. . . . .	44
7.2.2.	Prueba de salida de sensor en función de distintas presiones medidas por un manómetro para 24 sensores distintos. . . . .	45
7.3.1.	Circuito de manejo de actuadores. . . . .	46
7.3.2.	Módulo de control transistor tipo MOSFET. . . . .	46
8.0.1.	Diagrama de funcionamiento general del sistema, indicando las etapas del proceso y los posibles componentes de control. . . . .	47
8.0.2.	Estrategia de operación en función del error medido por la placa de desarrollo arduino Mega. . . . .	48
8.1.1.	Comparación de efecto esperado entre un usar delay continuos o usar delay escalonados. . . . .	49
8.1.2.	Diagrama de proceso para control de bomba. . . . .	49
8.1.3.	Estabilidad de presión para distintas presiones para componente de control bomba. . . . .	50
8.1.4.	Diagrama de proceso para control de válvula de alivio. . . . .	51
8.1.5.	Valores de error y ancho de banda asociados al caso de estudio de bomba como actuador. . . . .	51
8.1.6.	Aproximación de ecuación temporal para función de relación presión versus delay on en bomba de diafragma para distintos delay off. . . . .	52
8.1.7.	Diagrama de proceso para control de válvula de alivio. . . . .	53
8.1.8.	Estabilidad de presión para distintas presiones para componente de control válvula de alivio en incremento de delay off. . . . .	53

8.1.9. Estabilidad de presión para distintas presiones para componente de control válvula de alivio en incremento de delay on. . . . .	54
8.1.10. Valores de error y salida promedio asociados al caso de estudio de válvula de alivio como actuador. . . . .	55
8.1.11. Diagrama de proceso para control de válvula de paso. . . . .	55
8.1.12. Estabilidad de presión para distintas presiones para componente de control válvula de paso en incremento de delay off. . . . .	56
8.1.13. Valores de error y salida promedio asociados al caso de estudio de válvula de paso como actuador. . . . .	57
9.1.1. Gráficas comparativas para los controladores diseñados. (Más ejemplos en Anexo D) .	60
9.2.1. Respuesta del robot cúbico rotator ante una entrada escalón de 4 [psi], las gráficas contrastan los 3 métodos de control seleccionados. . . . .	62
9.2.2. Respuesta del robot cúbico uniaxial ante una entrada escalón de 4 [psi], las gráficas contrastan los 3 métodos de control seleccionados. . . . .	63
9.2.3. Comportamiento ante la descarga de robot uniaxial de 28[mm]. . . . .	64
C.1.1. Plano de molde núcleo uniaxial y núcleo Shear. . . . .	89
C.2.1. Plano de molde núcleo biaxial. . . . .	90
C.3.1. Plano de molde núcleo tilt. . . . .	91
C.4.1. Plano de molde núcleo rotator. . . . .	92
C.5.1. Plano de medio molde de cubicación correspondiente a soporte de núcleo. . . . .	93
C.5.2. Plano de medio molde de cubicación correspondiente a medio cubo. . . . .	94
C.5.3. Plano de piezas de molde de cubo para núcleo shear. . . . .	95
D.1.1. Gráficas comparativas para los controladores diseñados. . . . .	97

# Capítulo 1

## Introducción

La robótica blanda es un área relativamente nueva que busca dar mayor flexibilidad y elasticidad a la robótica mediante el uso de materiales previamente descartados por sus características como lo son la silicona o las telas, las cuales permiten entregar mejor respuesta ante esfuerzos al distribuir cargas o simular mejor a los seres vivos por el contacto de superficie adaptable.

La robótica modular por otra parte es otra rama que busca crear entidades que puedan adaptarse al medio ambiente usando módulos especializados que mejoren la versatilidad, robustez y reduzcan los costos de producción.

Por otro lado, la robótica modular blanda es un área de gran interés que busca implementar las ventajas de la robótica blanda y la robótica modular, para lograr construir robots de menor costo y de fácil manufactura al usar componentes especializados que pueden ser reemplazados con facilidad en caso de falla.

Pero, aunque unir ambas áreas trae grandes beneficios, también trae defectos, donde el más destacable es el aumento en la dificultad del control, principalmente producto de que muchos sistemas implican accionamiento de control on-off que pueden ser afectados por vibraciones que se originan en el cambio de estado de carga-descarga.

Por ello, el siguiente trabajo se focaliza en desarrollar una filosofía de control que permita facilitar el manejo de robots modulares blandos al simplificar su control y estudiar a la bomba de diafragma como un componente actuador, siendo típicamente usada la válvula como el actuador. Todo esto enfocándose mayoritariamente en los métodos de control más que la creación o el estudio de los robots blandos que ya han sido estudiados en múltiples trabajos de investigación.

## **1.1. Objetivo general**

- Diseñar, simular y aplicar controladores retroalimentados adecuados al problema de control de robótica blanda.

## **1.2. Objetivos específicos**

- Evaluar y comparar funcionamiento de bombas de diafragma y válvulas solenoides como componente actuador.
- Plantear y simular controladores enfocados en el problema de robótica blanda.
- Contrastar modelos de control modernos con control simplificado.
- Implementar circuito de sistema de control, poniendo en práctica los actuadores seleccionados en distintas secuencias constructivas.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. Robótica blanda

Entre las variadas áreas de la robótica, la robótica blanda es una de las más recientes con poca más de 30 años, esta área permite dar suavidad y flexibilidad que previamente era escasa, dando a los eslabones que forman mecanismos una mejor deformación elástica [1]. Esto gracias a que los materiales usados permiten emular de mejor forma como sería el contacto con la piel aumentando la capacidad de interactuar con el entorno, así como la absorción de esfuerzos que reducen presión de las regiones de contacto que aumentan su seguridad.

En especial, la robótica blanda entrega grandes beneficios al usar materiales más económicos como la silicona, telas o láminas de plástico entre variados otros, además de que permiten crear formas complejas con mayor simplicidad como lo son tentáculos o actuadores de agarre de objetos presentados en la Figura 2.1.1. Siendo uno de sus mayores beneficios su bajo costo, ya que se puede reducir el uso de actuadores jugando con la forma de los robots, por demás que muchos de los robots blandos se basan en el uso de siliconas que solo requieren moldes y reducen la acción de ensamblaje.

Pero, a pesar de sus muchos beneficios, también hay limitaciones a tener en cuenta, como el hecho de ser una área relativamente nueva, las diversas investigaciones que existen están sesgadas a puntos específicos como los materiales derivados de siliconas y telas entre otros o sus accionamientos, donde predomina la actuación por dieléctricos elastoméricos[6] (DEA), aleaciones con memoria (SMA) o hasta fluidos presurizados por neumática[7] además de reacciones químicas[8][9].

Además, de que, al ser de materiales flexibles como la silicona, se requieren pequeños esfuerzos para crear grandes perturbaciones en los sistemas, lo cual implica que su control sea extremadamente complejo para acciones que requieren gran detalle de operación. Por ello, uno de las concentraciones de los estudios se enfocan principalmente en diseño de nuevas formas, dando lugar a creaciones simples como la morfología de gusano *Eartworm* de Ugalde[10] hasta creaciones mucho más complejas como el pulpo autónomo del equipo de Wehner[8] o los robots de origami *miliDelta* de la universidad Harvard (Figura 2.1.2).

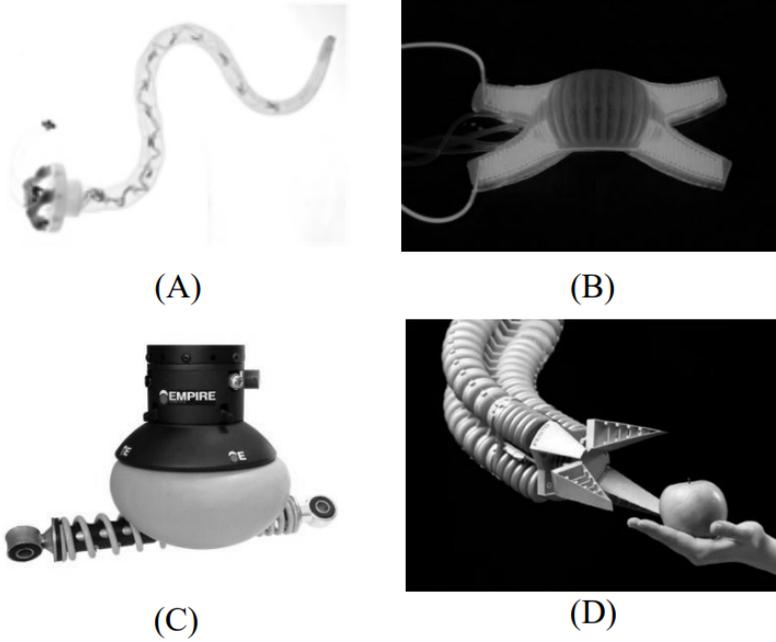
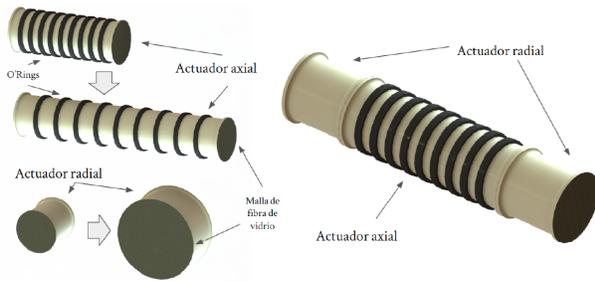


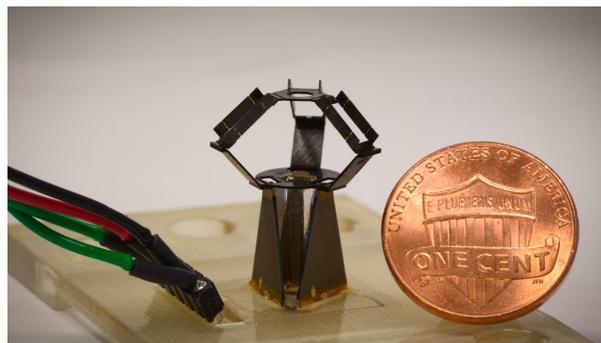
Figura 2.1.1: Ejemplos de robots suaves: (A) Optopus Robot [2], (B) Starfish robot [3], (C) Universal Gripper [4], y (D) Bionic Handling Assistant [5].



(a) Soft Robots Eartworm[10].



(b) Soft Robots autonomus ocotopus[8].



(c) Robot Origami MiliDelta.

Figura 2.1.2: Robots blandos de variado tamaño y complejidad, van desde simples núcleos limitados por hilos hasta formas animales complejas como un pulpo.

## 2.2. Robótica modular

La robótica modular es una rama de la robótica que se basa en el uso de componentes especializados de pequeño tamaño que pueden configurarse de forma simple y variaba para adaptarse al medio ambiente en que se emplearan[11]. Estos módulos deben dar la capacidad de realizar acciones que un módulo por su simplicidad no puede realizar de forma independiente, dando al robot mayor robustez y versatilidad.

Al diseñar modulares es central la búsqueda de mayor versatilidad, robustez y bajo costo de producción [12], buscando que el conjunto sea confiable, para que si se daña cualquier módulo, esta pueda auto-repararse o ser de fácil intercambio.

Lo anterior se vuelve de vital importancia para cuando la cantidad de componentes es muy grande, donde al construir, se tiende a agregar componentes adicionales que actúan en redundancia para aumentar la solidez, pero también aumentan la complejidad de control de matriz. Los módulos además deben poder compartir momentos mecánicos, transferencias de fuerzas y comunicaciones entre otros, esto mediante juntas especialmente diseñadas para estos propósitos[13].

Para considerarse un módulo adecuado debe poseer juntas para ser de fácil intercambio, considerando los sensores y actuadores necesarios para realizar acciones independientes, ya sea de una forma auto-reconfigurable, es decir, que tengan la capacidad de organizarse de forma autónoma según la situación, o ser solo reconfigurables, es decir, se puedan configurar manualmente.

Estas juntas de acoplamiento pueden ser conexiones tan simples como el uso de velcro, ganchos hasta herramientas más complejas como soldaduras o magnetismo, siendo posible establecer una comparativa entre distintos acoplamientos como la realizada por Mendoza[14] (Ver Figura 2.2.1) en su estudio del acoplamiento por vacío, en la Figura 2.2.2 se muestra el robot MORI de forma triangular capaz de teselar el plano con una junta de bisagra.

TABLE II  
STRENGTHS AND WEAKNESSES OF CONNECTION MECHANISMS FOR MODULAR ROBOTS

Connector type	Simplicity	Strength	Power saving	Ease of attachment	Ease of detachment	Integrability <sup>a</sup>
Active hooks	XX	√	√	√	√	X
Passive hooks	√	√	√√	X <sup>b</sup>	X <sup>b</sup>	√
Permanent magnets	√√	X <sup>c</sup>	√√	√√	X <sup>c</sup>	√
Electro magnets	X	X	XX	√√	√√	X
Magswitches	XX	X	√√	√√	√√	X
Electro-permanent magnets	X	X	√√	√√	√√	√ <sup>d</sup>
Velcro	√√	XX	√√	√√	√√	√
Soldered pads	√√	√√	√	√	√	√√
Vacuum	√ <sup>e</sup>	√	√√	√	X <sup>e</sup>	X

Note: XX, weakness inherent to the connection mechanism; X, weakness improvable by design; √, strength achievable by design; √√, strength inherent to the connection mechanism.

<sup>a</sup> With other hardware, such as electronic components for computation, communication, power, actuation, and sensing.

<sup>b</sup> Modules are easy to attach/detach by hand but not so autonomously by robots.

<sup>c</sup> Tradeoff. Modules with strong magnets are difficult to detach.

<sup>d</sup> Electropermanent magnets can be also used for communication and power transfer.

<sup>e</sup> Tradeoff. Modules of simple systems (i.e., powered by a single pump) are all-at-once easy but one-by-one difficult to detach.

Figura 2.2.1: Tabla comparativa de métodos de unión designados por Mendoza en el trabajo *A Vacuum-Based Bonding Mechanism for Modular Robotics*[14].

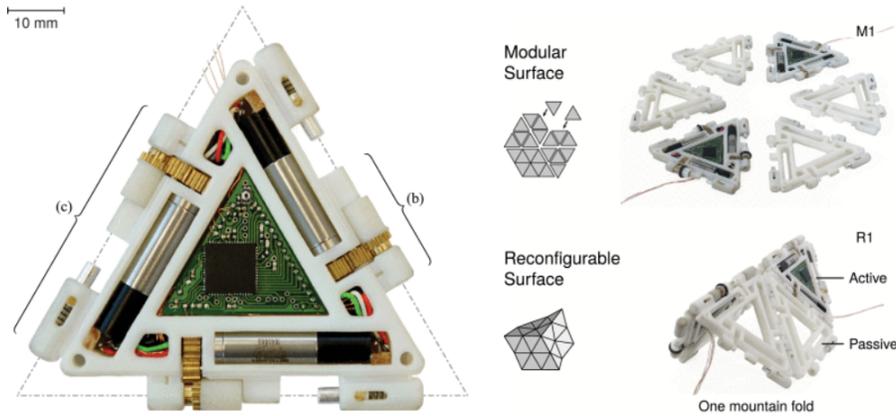


Figura 2.2.2: Robot MORI con junta de bisagra[15].

Para variados autores, la deficiencia de crear un sistema auto-reconfigurable radica en el aumento en la complejidad del control, ya que se aumenta el número de sensores y actuadores requeridos para cambiar de posición [16], requiriendo dotar al sistema de una biblioteca de configuraciones solo para hacer coincidir las celdas, mientras se limita el efecto que pueda causar la reconfiguración en las celdas adyacentes, siendo que los robots auto-reconfigurables funcionan mejor entre menos módulos sean, y aunque autores como Park [17] proponen algoritmos que facilitan el control, es extremadamente difícil llegar al límite de 50 unidades propuesto por Moubakat [18] para los robots auto-reconfigurables.

Moubarak [18] también presenta variados tipos de robots modulares según su uso y especialización de los eslabones, en la Figura 2.2.3 se presenta una clasificación de robots reconfigurables, en especial, se destacan los de *cambio de configuración móvil (MCC)* que se definen por tener un movimiento único asociado a cada módulo, teniendo de cierta forma una independencia uno de otro, aunque en el control no son completamente independientes.

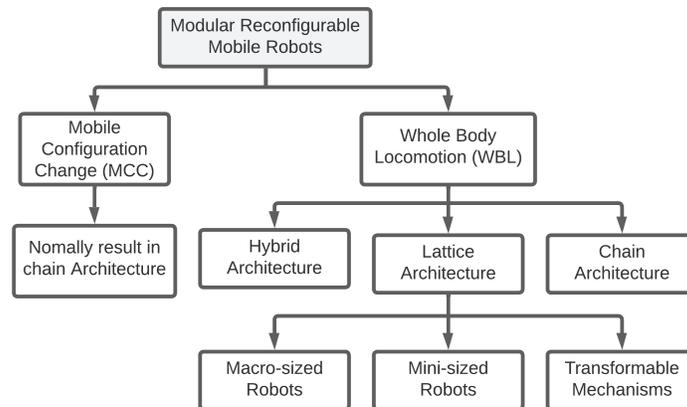


Figura 2.2.3: “Three classification of reconfigurable robots based on structural properties”

Dentro de los de *locomoción de cuerpo completo (WBL)* que se caracterizan por la poca independencia de los módulos, se dividen los de *arquitectura de cadena (Chain architecture)* que tienen el beneficio de tener una alta versatilidad de reconfiguración, pero con el defecto de ser altamente complejo en el control general, pero existe un autor llamado Moreno[19] que sugiere que este problema de control es solucionable mediante el uso de sistemas de control descentralizados que evita la susceptibilidad a las fallas.

Por otro lado, la *arquitectura de enrejado (Lattice architecture)* requiere un control más simple por la disposición de sus componentes que tienden a ser más especializados a su posición fija en el enrejado, pero este mismo factor que simplifica su control limita la movilidad del conjunto.

Por ello muchas veces es conveniente la modulación híbrida que permite aumentar la movilidad de un sistema al colocar eslabones poco especializados en posiciones claves de un enrejado que en su mayoría está dominado por componentes especializados.

Moubarak en su trabajo *Modular and reconfigurable mobile robotics, Robotics and autonomous systems* presente de una forma resumida los beneficios de un sistema de cadena y de enrejado, en especial, la Tabla 2.1 permite apreciar como la hibridación permite combinar los beneficios de versatilidad de ambos tipos, pero también nos dice que elevar la versatilidad lleva a complejizar el sistema obligando muchas veces a general protocolos propios de control, por ello, al momento de decidir el tipo de reconfiguración es de relevancia analizar los pros y contras.

Tabla 2.1: Extracto de “Benefits and shortcoming of reconfiguration categories and architectures”[18]

	Benefits	Shortcoming
Chain architecture	* Provides a higher versatility in reconfiguration where a chain formation can reach any point or orientation in space.	* Control and motion planing is arduous since the number of neighboring components to every module in the chain is not necessarily finite and know at all time.
Lattice architecture	* Control and motion generation is easier because the ensemble of positions a module can occupy on the grid is finite and the well-defined. * The simpler computational representation allows scalability to more complex formations.	* Discrete motions are often associated with inefficient mobility patterns since the formations are reconfigured in 3D patterns, such as a cubical or parrallelepipedic lattice, providing mobility via continual relocation of indivial modules on the grid.
Hybrid architecture	* Combines the benefits of both chain and lattice architectures in terms of versatility, task space and parallel control.	* Higher versatility and hybrid formations complicate the mechanical infrastrutura and pattern generation protocols of the robot.

## 2.3. Robótica modular blanda

Entendiendo las bases de ambos tipos de robótica, se logra obtener sistemas en donde se extraen beneficios de ambas áreas, logrando así reducir costos de producción, lo cual es fundamental en este tipo de procesos producto de que implica el uso de múltiples robots en repetición, reduciendo la necesidad de crear componentes diferenciados. El uso de robótica blanda para crear robots modulares le entrega a un sistema la capacidad de usar materiales más económicos, diseñar componentes especializados y más seguros.

El autor Valenzuela en su trabajo *Diseño y fabricación de robots modulares blandos heterogéneos* del año 2019 creó 5 tipos de módulos cúbicos de la Figura 2.3.1 que son capaces de realizar distintos movimientos asociados a grados de libertad conocidos, como el robot *tilt* con la capacidad de flectarse al crear un movimiento de *pitch* desplazado (a), el robot biaxial que logra una deformación de expansión en los tres ejes del espacio cartesiano (b), el robot *shear* que combina una deformación en dos ejes para asemejarse a la acción de corte (c), el robot uniaxial que concentra la elongación en el eje Z (d) y finalmente el robot *rotator* con la capacidad de crear un movimiento de *yaw* torno al eje Z.

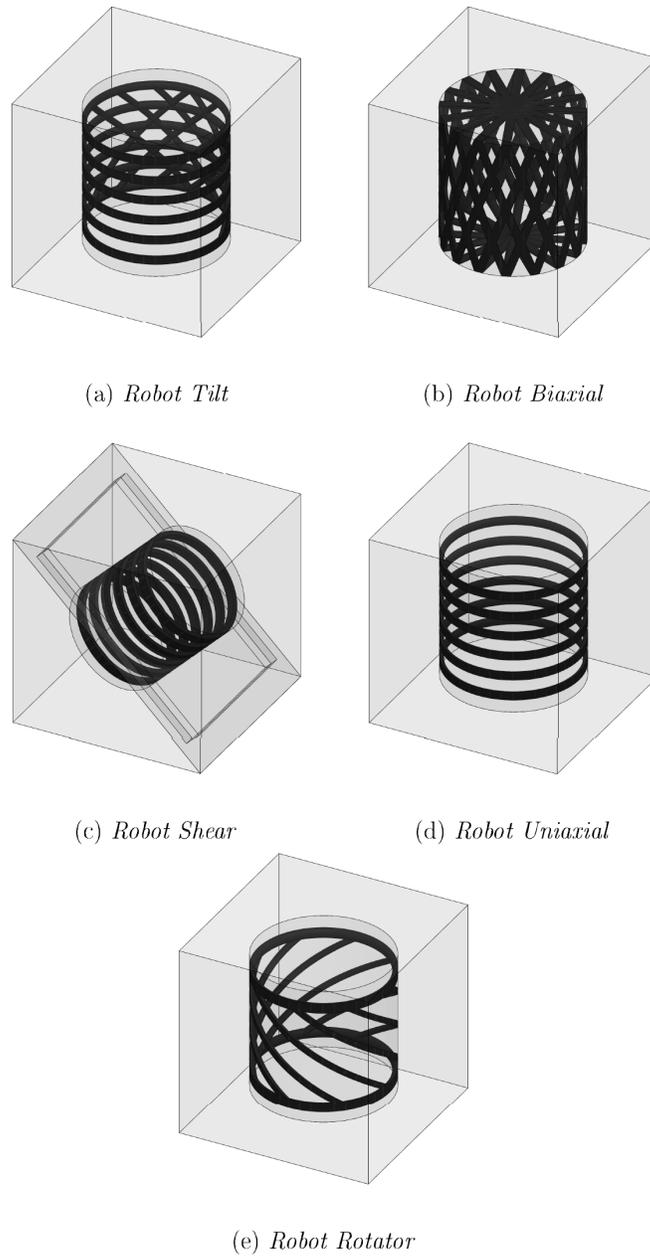
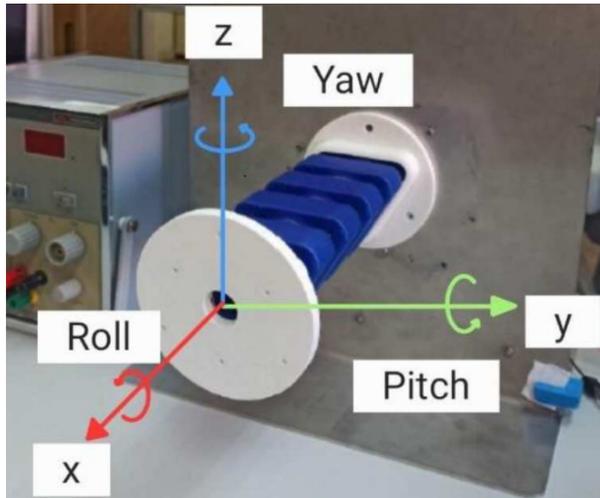
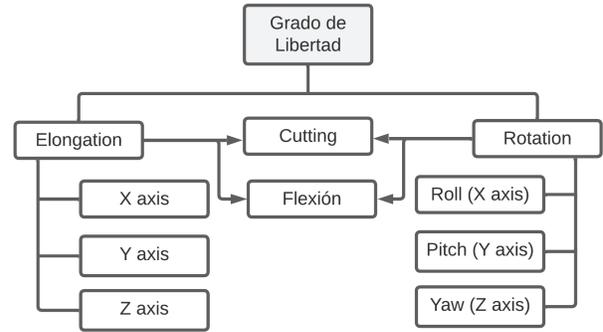


Figura 2.3.1: Tipos de módulos presentados por Valenzuela[20].

En general, los cinco módulos son capaces de cubrir los 6 grados de libertad básicos (Ver figura 2.3.2.(a)), e incluso ser capaces de combinarse para crear dos nuevos movimientos como lo es el corte y la flexión (Figura 2.3.2.(b))



(a) Ejemplo de grados de libertad en robot de articulación blanda[21].



(b) Diagrama de grados de libertad de robots blandos y modulares.

Figura 2.3.2: División de grados de libertad típicos de robots modulares, a la derecha se presenta los 8 tipos de movimientos de un robot modular, y a la izquierda se aprecian los grados de libertad en un robot blando construido por Toribio como ejemplo[21].

## 2.4. Orden de sistemas

Al trabajar con funciones o sistemas que dependen del tiempo, es común que se implique el uso de derivadas temporales, siendo la derivada mayor la que define los sistemas, por ejemplo, si te tiene un sistema con la forma general expresada en la ecuación 2.1, el orden del sistema es “m”.

$$f(t) = a_m \frac{d^m x}{dt^m} + a_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots \quad (2.1)$$

Pero existen sistemas en los cuales no aplica esta definición producto de que no dependen de derivadas temporales o simplemente no dependen del tiempo, como por ejemplo, el caso de un sistema de velocidad definido por la ecuación 2.2 o la presión de un estanque de llenado rápido (al indicar rápido se habla de velocidad en torno a [ms]), el cual puede ser considerado como independiente del tiempo según la ecuación 2.3.

$$v(t) = v_0 + at \quad (2.2)$$

$$P(t) \approx p \quad t > 0 \quad (2.3)$$

En ambos casos, no se poseen derivadas temporales, pero aún deben ser controlados para llegar a los valores estables deseados, ya que puede ser requerido una salida diferente a la convergencia del sistema (Eqn. 2.3) o simplemente el sistema no converge (Eqn. 2.2).

## 2.5. Control de sistemas

Al tener sistemas donde se tiene una entrada o variable de control conocida y una salida deseada es relevante tener un comportamiento controlado que siga órdenes específicas para evitar riesgos como movimientos bruscos o salidas de voltaje fuera de lo deseado entre otras.

Ahí es donde entra en vigor el control de sistemas, el cual tiene como objetivo determinar un control que derive en una salida que posee características determinadas por el usuario, estas características son típicamente:

- **Frecuencia natural**  $\omega_n$ : Es a la frecuencia que oscila la respuesta para llegar a la salida deseada, es decir, define la velocidad del sistema, típicamente se selecciona de tal forma que sea dependiente del coef. de amortiguamiento.
- **Coef. amortiguamiento**  $\zeta$ : Define la tasa de caída de la amplitud de oscilación de un sistema, típicamente es usado el valor de  $\zeta = 0.7071$  quedando la frecuencia natural es base a este parámetro.
- **Sobrepaso**: Es el valor porcentual del *pick* sobre la salida deseada que tiene un sistema a la entrada de escalón unitario, siendo este valor dependiente del amortiguamiento como se define en la ecuación 2.4.

$$M_p(\zeta) = 1 + e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (2.4)$$

- **Tiempo de establecimiento** 2%  $t_s$ : Es el tiempo que el sistema tarda en que su oscilación este torno al 2% cercano a la salida deseada, es decir, que tan rápido se espera llegar al estado estacionario.

$$t_s \approx \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (2.5)$$

- **Rise time**  $t_r$ : Es el tiempo que tarda un sistema en subir desde el 10% hasta llegar al 90% de la salida deseada.

$$t_r = \frac{2.16\zeta + 0.6}{\omega_n} \quad 0.3 \leq \zeta \leq 0.8 \quad (2.6)$$

- **Peak time**  $t_p$ : Es el tiempo que tarda un sistema en alcanzar su punto de sobrepaso o máximo principal.

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.7)$$

Donde en los sistemas se tiende a buscar converger a los sistemas de segundo orden o similares mediante el uso de controladores para poder definir el sobrepaso y tiempo de establecimiento acorde a la salida deseada.

Pero, aunque estos parámetros son relevantes, también lo es el tipo de sistema, donde todos los autores están de acuerdo en definirlo es dos tipos, a ser, sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado, siendo el primer caso raramente utilizado hoy en día por su alta sensibilidad ante perturbaciones y poca confiabilidad ante perturbaciones.

En el libro “Sistemas de control moderno”[22] definen los lazos de las siguientes formas:

### 2.5.1. Lazo abierto

Un lazo abierto sigue la secuencia mostrada en la Figura 2.5.1, donde el sistema espera que el actuador controle el proceso sin conocer la salida, pero estos sistemas son susceptibles a perturbaciones que actúan directamente sobre el proceso alterando la salida y desviándola de lo esperado.

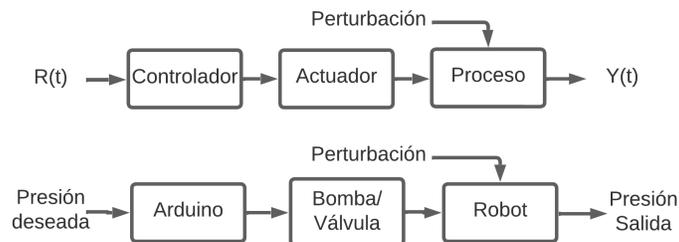


Figura 2.5.1: Diagrama de bloques de sistema de lazo abierto, en la parte inferior se ejemplifica sistema de robots blando por control de presión.

Un ejemplo típico es un semáforo, donde se regula el flujo de autos sin conocer la congestión del momento, lo cual puede requerir el aumento o disminución de los tiempos de cada estado.

### 2.5.2. Lazo cerrado

Un sistema en lazo cerrado utiliza una medida de la señal de salida (salida real) y la salida deseada (entrada) para generar una señal de error que se aplica al actuador[22]. Aunque este lazo también es susceptible a las perturbaciones, al reconocer la salida es capaz de corregirse continuamente, hecho no posible con el lazo abierto.

En la Figura 2.5.2 se puede apreciar como el controlador en este caso no funciona basándose en la salida esperada, sino en relación con una medida de error, siendo la salida medida mediante sensores y filtros que adecuen la salida a la entrada para una correcta comparación.

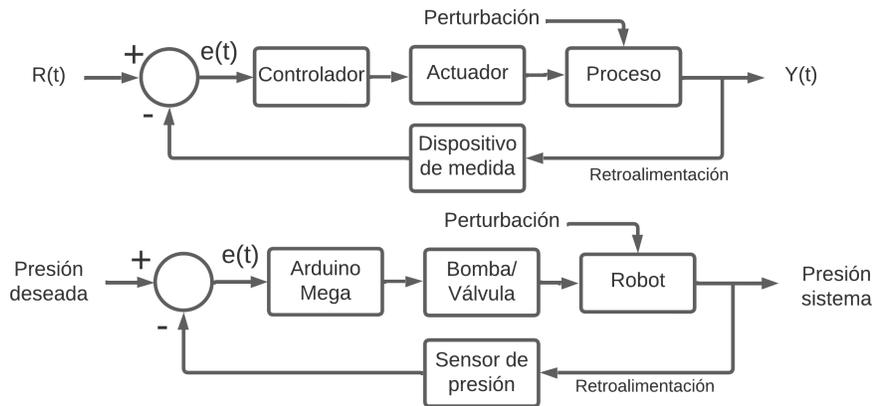


Figura 2.5.2: Diagrama de bloques de sistema de lazo cerrado, en la parte inferior se ejemplifica sistema de robots blandos por control de presión y sensor de presión.

### 2.5.3. Variable through y variable across

Otro factor importante es reconocer como se miden las señales, lo cual puede ser de tipo **through** que se mide en serie, como la corriente, y también están las variables **across** que se miden en paralelo como lo es voltaje, en particular, los sensores de presión implican mediciones de voltaje, por lo cual, se consideran sistemas con variable *across*.

### 2.5.4. Controladores modernos

Muchos autores denominan controladores modernos a los controladores más usados y estudiados hoy en día, los cuales en general son aplicables a cualquier sistema sin importar su grado o complejidad, pero cabe destacar que sean utilizables no los vuelve perfectos, sino que dependiendo de la planta funcionan en mejor o peor medida.

En la práctica, es común combinar tales controladores con las denominadas mallas de adelanto y atraso para lograr que la ecuación característica de lazo cerrado sea lo más cercana a un sistema de segundo orden, sobre el cual puede realizarse una aproximación al sistema de segundo orden ideal controlando la frecuencia natural y el coeficiente de amortiguamiento.

#### 2.5.4.1. Control PID-PI-PD

El controlador más común es el controlador proporcional-integral-derivativo o PID para simplificar, este controlador posee la forma expuesta en la Ecuación 2.8, siendo posible derivar nuevos

controladores en base a la denominación entregada a las constantes K.

$$C_{PID}(t) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.8)$$

Así por ejemplo un controlador PI el caso de considerar  $K_d = 0$  o un controlador PD el caso de  $K_i = 0$ , donde los autores concuerdan que los sistemas PI son adecuados para sistemas de primer orden con linealidad producto de que permiten minimizar las fluctuaciones mejorando el control al estado transiente[23].

Contrariamente, el controlador PID tiene un enfoque más hacia los sistemas de orden 2 y superiores, ya que la componente derivativa permite controlar de mejor forma las sobre oscilaciones llevando a mejorar el control en el estado estacionario.

### 2.5.5. Control ON-OFF

Se denomina sistema on-off a aquel que solo posee dos estados, uno encendido y otro apagado, evitando la existencia de estados intermedios mediante una carga y descarga continua que obliga a un sistema a mantenerse torno a un valor deseado.

En el ejemplo de la Figura 2.5.3 se establece el escalonamiento on-off mediante la ubicación de la función sobre el valor de establecimiento (*setting value*), donde si se ubica bajo la curva se activa la carga, pero al superarla se activa la descarga obligando a la temperatura a oscilar dentro de cierta banda de operación (*hunting*) torno al establecimiento.

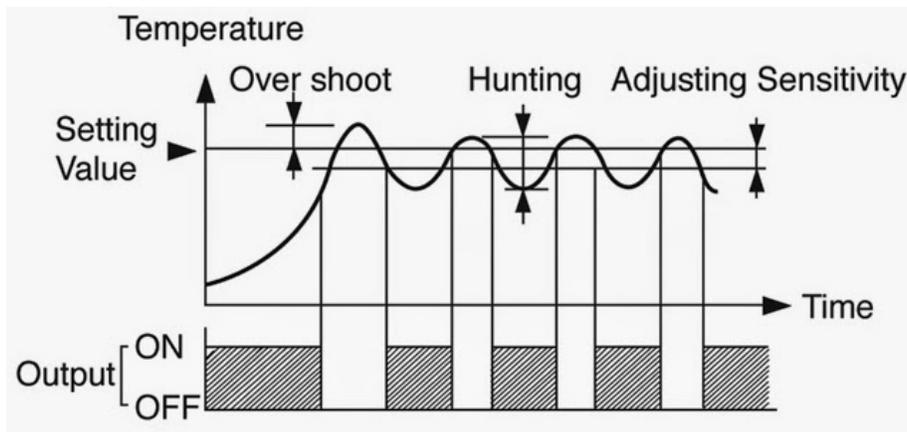


Figura 2.5.3: Ejemplo de funcionamiento on-off de un regulador de temperatura.

Este método de control, aunque rudimentario es uno de los más utilizados para el control de presiones, temperatura, luz entre otros[24], todos elementos sumamente utilizados en variadas industrias y vuelve por tanto al control on-off un sistema fundamental de conocer y operar.

# Capítulo 3

## Caracterizaciones de controladores

Los métodos modernos de control como lo son el uso de PI, PID, mallas de atraso, mallas de adelanto, sistemas de segundo orden entre otros son aplicables a todo tipo de plantas, sin importar el grado del sistema, pero muchas veces se deja de lado a los sistemas simples de escalón.

En general, aunque los sistemas de tipo escalón pueden controlarse por métodos modernos como se verá a continuación, también es posible establecer un método de control simplificado que no requiera el uso de transformada al espacio de Laplace, obteniendo así un sistema en donde se controla el tiempo establecido con sobrepaso nulo.

Además, de que este control simplificado no solo puede ser de carácter temporal sino también en base a las iteraciones on-off por las que pasa la planta a controlar.

### 3.1. Control moderno

Al hablar de control moderno, es típico hablar sobre el proceso en el que es importante definir la ecuación de la planta, así como la ecuación del tipo de control, lo cual permite trabajar en el espacio de Laplace para simplificar el proceso de cálculo.

Para un sistema en que es requerido llevar la presión interna de un espacio a un valor específico, la planta se define por la ecuación 3.1 donde se realiza una simplificación de que la presión del interior del robot se considera un escalón unitario, producto de que el llenado de aire es tan rápido que solo tarda algunos milisegundos al trabajar a máxima carga.

$$G_p(t) = 1 \implies G_p(s) = \frac{1}{s} \quad (3.1)$$

En especial, como se conoce la presión deseada y la presión registrada por el sensor, se considera un sistema de lazo retroalimentado unitario (Eqn. 3.2), es decir,  $H(s) = 1$  producto de que ambas señales poseen similares unidades no es requerido el uso de filtro o conversores de señales.

$$\frac{R(s)}{Y(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + H(s)G_c(s)G_p(s)} \quad (3.2)$$

Donde  $G_c(s)$  puede establecerse mediante lugar geométrico de la raíz que nos entrega una ecuación más ideal, o también es posible usar un método de “forzamiento” tal que se establece una función  $G_c(s)$  definida por constantes que son obligadas a ajustarse a la respuesta al escalón unitario que se desea.

En especial, los dos primeros casos estudiados actúan de la forma anterior, estos son los controladores PI y PID, siendo el tercer caso un forzamiento del controlador para que el sistema en general sea un control de segundo orden ideal.

### 3.1.1. Control PI

El control PI se define por poseer una componente proporcional  $k_p$  y una componente integradora  $k_i$  como se presenta en la ecuación 3.3, siendo que al aplicarla a la ecuación 3.2 con la planta de la ecuación 3.1 llegamos a la relación de transferencia de la ecuación 3.4.

$$G_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{k_p s + k_i}{s} \quad (3.3)$$

$$\frac{R(s)}{Y(s)} = \frac{(k_p + \frac{k_i}{s})\frac{1}{s}}{1 + (k_p + \frac{k_i}{s})\frac{1}{s}} = \frac{k_p s + k_i}{s^2 + k_p s + k_i} \quad (3.4)$$

Definiendo la función de transferencia en el espacio de Laplace, la pregunta es como controlamos este sistema, lo cual se resuelve usando el método usado para los sistemas de segundo orden ideal mediante el método del lugar de la raíz al igualar ecuaciones características, con algunas simplificaciones como se plasma en la ecuación 3.5 que permite dejar todo el sistema en base a un solo parámetro conocido como tiempo de establecimiento (eqn. 3.6), presentado en antecedentes.

$$E.C. = \begin{cases} s^2 + k_p s + k_i \\ s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \end{cases} \implies \begin{cases} 2\zeta\omega_n = k_p & \zeta = 0.7071 \\ \omega_n^2 = k_i & \omega_n \approx \frac{4}{t_s \zeta} \end{cases} \implies \begin{cases} k_p = \frac{8}{t_s} \\ k_i = \frac{16}{0.7071^2 t_s^2} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{R(s)}{Y(s)} &= \frac{(s + \frac{4}{t_s})}{(s + \frac{4}{t_s})^2 + \frac{16}{t_s^2}(\frac{1}{0.7071^2} - 1)} + \frac{\frac{2}{t_s} \frac{1 - 2 \cdot 0.7071^2}{0.7071^2}}{(s + \frac{4}{t_s})^2 + \frac{16}{t_s^2}(\frac{1}{0.7071^2} - 1)} \\ &= T_1(s) + T_2(s) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Definido es sistema en base a un solo parámetro, solo basta resolver el sistema al seccionarlo en  $T_1(s)$  y  $T_2(s)$  y encontrar las inversas de la transformada de Laplace (Eqns. 3.9 a 3.12).

En general, para casos de trabajo con ecuaciones grandes como lo obtenido en la ecuación 3.12 se comienza realizando fracciones parciales para encontrar formas conocidas de inversa de Laplace, esto es algo que se utiliza continuamente en todos métodos que siguen, más específicamente los pasos son los siguientes:

1. Reducir a forma conocida (Eqn. 3.7).
2. Definir a que parámetro corresponde cada valor dentro de la ecuación (Eqn. 3.8).
3. Reescribir la solución en el espacio temporal (Eqn. 3.9).
4. Repetir para los siguiente componentes (Eqn. 3.10 a 3.12).

$$T_1(s) = \frac{(s + \frac{4}{t_s})}{(s + \frac{4}{t_s})^2 + \frac{16}{t_s^2}(\frac{1}{0.7071^2} - 1)} \quad (3.7)$$

$$L \left\{ \frac{s - a}{(s - a)^2 + b} \right\} = \cos(bt)e^{at} \implies \begin{cases} a = -\frac{4}{t_s} \\ b = \frac{16}{t_s^2}(\frac{1}{0.7071^2} - 1) \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} L^{-1} \{T_1(s)\} &= \cos\left(\frac{16}{t_s^2}(\frac{1}{0.7071^2} - 1)t\right)e^{-\frac{4t}{t_s}} \\ &= T_1(t) \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$T_2(s) = \frac{t_s(1-2*0.7071^2)}{8(1-0.7071^2)} \frac{\frac{16}{t_s^2}(\frac{1}{0.7071^2}-1)}{(s+\frac{4}{t_s})^2 + \frac{16}{t_s^2}(\frac{1}{0.7071^2}-1)} \quad (3.10)$$

$$L \left\{ \frac{b}{(s - a)^2 + b} \right\} = \sin(bt)e^{at} \implies \begin{cases} a = -\frac{4}{t_s} \\ b = \frac{16}{t_s^2}(\frac{1}{0.7071^2} - 1) \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} L^{-1} \{T_2(s)\} &= \frac{t_s(1-2*0.7071^2)}{8(1-0.7071^2)} \sin\left(\frac{16}{t_s^2}(\frac{1}{0.7071^2} - 1)t\right)e^{-\frac{4}{t_s}t} \\ &= T_2(t) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Lo cual finalmente nos permite ver como se comporta la salida a la entrada de escalón unitario para distintos  $t_s$  en la Figura 3.1.1, primero debe recordarse que el tiempo de establecimiento es dependiente de  $\omega_n$  y  $\zeta$ , por ello al disminuir los valores de  $t_s$  implica aumentar la relación  $\zeta\omega_n$  que se traduce indirectamente en un aumento del sobrepaso por su dependencia con  $\zeta$ .

Siendo así que un controlador PI es aplicable a la planta, pero siempre existirán sobrepasos que se hacen cada vez más notorios con la disminución del establecimiento, lo cual puede ser un problema si se requiere una reacción rápida.

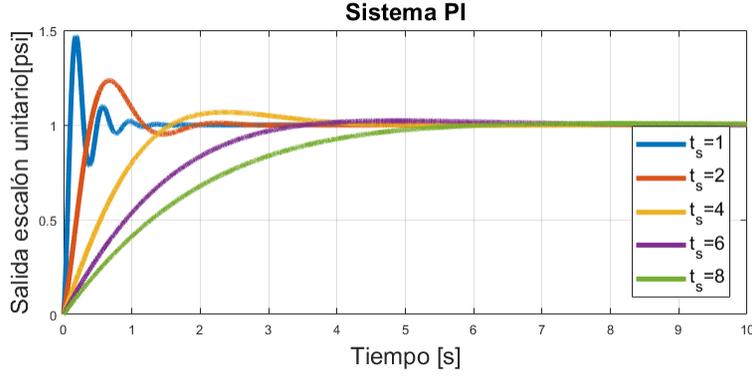


Figura 3.1.1: Respuesta al escalón unitario para controlador PI y distintos valores  $t_s$ .

### 3.1.2. Control PID

Para el sistema de control PID, se sigue el mismo procedimiento que para el sistema PI, solo que en este caso la ecuación del controlador ya no solo se define por la constante proporcional e integradora, sino también por una nueva constante que se denomina constante derivativa  $K_d$  que define la ecuación del controlador 3.13.

$$G_{PID}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = \frac{k_p s + k_i + k_d s^2}{s^2} \quad (3.13)$$

Definida la ecuación del controlador, solo queda reemplazarlo en la ecuación de transferencia y seguir los pasos realizados en el controlador PI.

$$\frac{R(s)}{Y(s)} = \frac{\frac{(k_p s + k_i + k_d s^2) \frac{1}{s}}{s}}{1 + \frac{(k_p s + k_i + k_d s^2) \frac{1}{s}}{s}} = \frac{\frac{k_d}{(1+k_d)} s^2 + \frac{k_p}{(1+k_d)} s + \frac{k_i}{(1+k_d)}}{s^2 + \frac{k_p}{(1+k_d)} s + \frac{k_i}{(1+k_d)}} \quad (3.14)$$

$$E.C. = \begin{cases} s^2 + \frac{k_p}{(1+k_d)} s + \frac{k_i}{(1+k_d)} \\ s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2\zeta\omega_n = \frac{k_p}{(1+k_d)} & \zeta = 0.7071 \\ \omega_n^2 = \frac{k_i}{(1+k_d)} & \omega_n \approx \frac{4}{t_s \zeta} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} k_p = \frac{8(1+k_d)}{t_s} \\ k_i = \frac{16(1+k_d)}{0.7071^2 t_s^2} \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{R(s)}{Y(s)} &= \frac{(s + \frac{4(1+k_d)}{t_s})}{(s + \frac{4(1+k_d)}{t_s})^2 + \frac{16(1+k_d)}{t_s^2} (\frac{1}{0.7071^2} - (1+k_d))} + \frac{\frac{2}{t_s} \frac{1-2*0.7071^2(1+k_d)}{0.7071^2}}{(s + \frac{4(1+k_d)}{t_s})^2 + \frac{16(1+k_d)}{t_s^2} (\frac{1}{0.7071^2} - (1+k_d))} \\ &= T_1(s) + T_2(s) \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} L^{-1} \{T_1(s)\} &= \cos\left(\frac{16(1+k_d)^2}{t_s^2} (\frac{1}{0.7071^2} - (1+k_d)) t\right) e^{-\frac{4(1+k_d)}{t_s} t} \\ &= T_1(t) \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned}
L^{-1}\{T_2(s)\} &= \frac{t_s(1-2*0,7071^2(1+k_d))}{8(1+k_d)(1-0,7071^2(1+k_d))} \sin\left(\frac{16(1+k_d)^2}{t_s^2}\left(\frac{1}{0,7071^2} - (1+k_d)\right)t\right) e^{-\frac{4(1+k_d)}{t_s}t} \\
&= T_2(t)
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Como se espera del controlador PID, tiene una gran relación con el controlador PI, ya que este es una versión relativamente mejorada del PI, no siempre se cumple, por lo cual, se espera que al hacer  $k_d = 0$  se obtenga la respuesta al escalón unitario PI.

Sin embargo, la Figura 3.1.2 nos permite ver no solo la relación con el PI, sino que también nos muestra como al variar  $k_d$  puede ir disminuyendo la influencia del sobrepaso, hasta llegar a  $k_d = 1$  donde el sobrepaso aumenta, pero también se concentra en los primeros momentos de la operación.

El tener sobrepasos tan altos y considerando que el sistema de carga es extremadamente rápido, se descarta usar un valor  $k_d$  mayor a 1, siendo el valor 1 el caso ideal que reduce el sobrepaso.

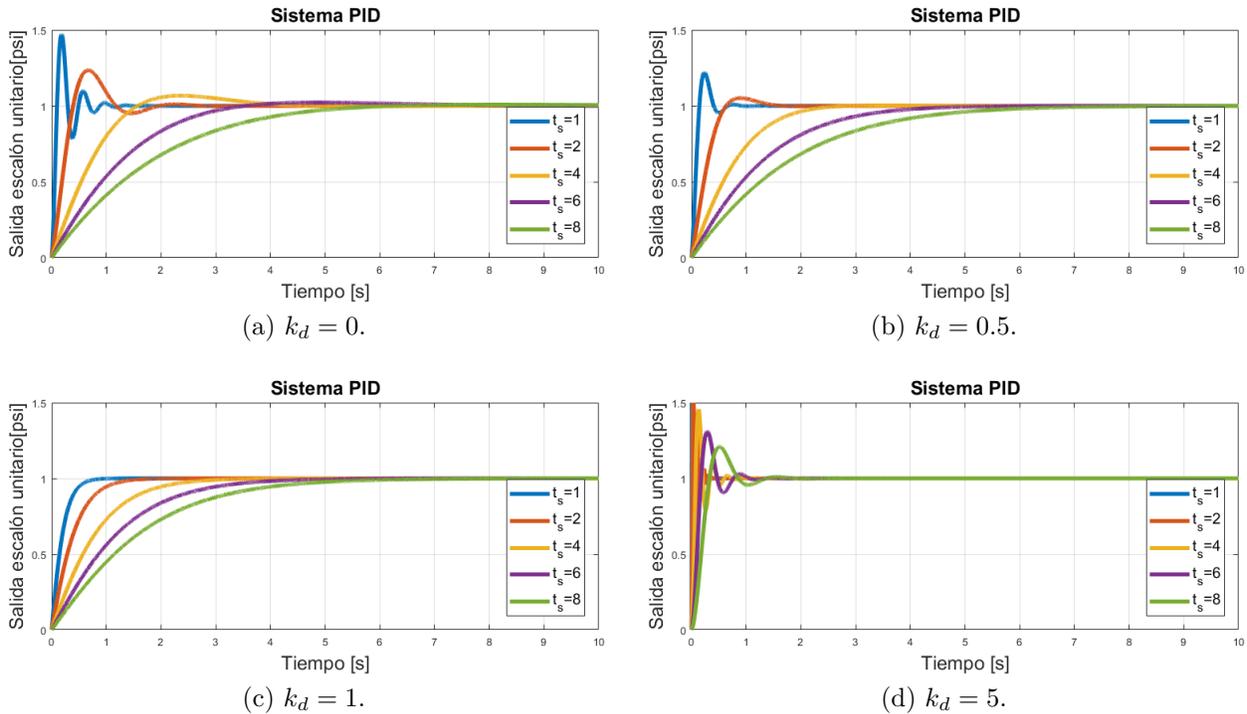


Figura 3.1.2: Respuesta al escalón unitario para controlador PID diseñado en función de  $k_d$  y distintos valores de  $t_s$ .

### 3.1.3. Control por segundo orden ideal

Para el caso de un sistema de segundo orden ideal, es conocido la forma del lazo cerrado  $G_c(s)G_p(s)$  con los parámetros de amortiguamiento y frecuencia natural conocidos presentados en

la ecuación 3.19.

$$\frac{R(s)}{Y(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \left. \begin{array}{l} \zeta = 0.7071 \\ \omega_n \approx \frac{4}{t_s \zeta} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{R(s)}{Y(s)} = \frac{\frac{16}{(0.7071 t_s)^2}}{s^2 + \frac{8}{t_s} + \frac{16}{(0.7071 t_s)^2}} \quad (3.19)$$

Para este sistema, no es requerido cálculos para conocer la solución temporal, producto que es una solución conocida y se plasma en la ecuación 3.20, donde al igual que los caso PI y PID es posible despejarla en función del tiempo de establecimiento.

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin\left(\omega_n(\sqrt{1-\zeta^2})t + \sin^{-1}(\sqrt{1-0.7071^2})\right) \\ &= 1 - \frac{1}{\sqrt{1-0.7071^2}} e^{-\frac{4}{t_s}t} \sin\left(\frac{4\sqrt{1-0.7071^2}}{t_s \cdot 0.7071}t + \sin^{-1}(\sqrt{1-0.7071^2})\right) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Pero, aunque la solución ya es conocida, podemos dejar en claro la forma del controlador al despejar el lazo abierto y sabiendo la forma de la planta tal como se muestra en la ecuación 3.1, lo cual nos establece que para que el sistema sea de segundo orden ideal, se debe tener el controlador de la forma de la ecuación 3.21.

$$\frac{R(s)}{Y(s)} = \frac{1}{s} \frac{\omega_n^2 s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \Rightarrow G_c(s) = \frac{\omega_n^2 s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.21)$$

La Figura 3.1.3 permite apreciar la mayor característica del caso ideal, en este caso el sobrepaso es continuo sin importar el tiempo característico, algo que no sucedía en el caso PI y PID producto del forzamiento excesivo que se realiza para poder controlar al sistema.

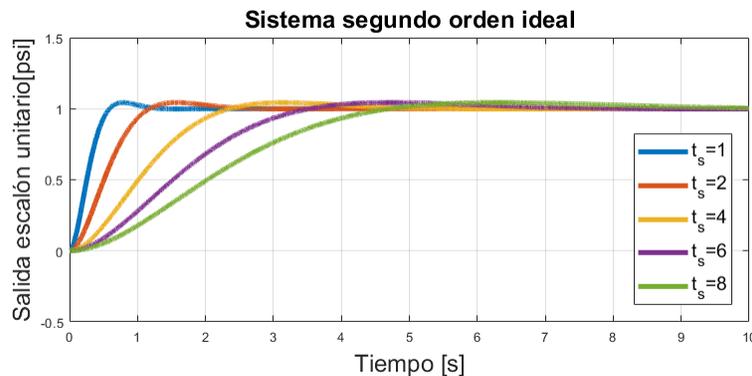


Figura 3.1.3: Diagrama de proceso para control de bomba.

## 3.2. Control simplificado

Los métodos anteriores nos permiten ver como al final del día lo que se quiere lograr es que la respuesta al escalón unitario converge a 1 para un tiempo de establecimiento dado, esto disminuyendo el sobrepaso lo mayor posible. Por ello, en el caso de trabajar con placas de desarrollo es conveniente siempre disminuir la carga computacional, lo cual implica disminuir el uso de cálculos trigonométricos, logarítmicos y exponenciales.

Entonces, si define la respuesta al escalón unitario como una convergencia a 1, de tal forma que se controle cuando el sistema alcanza el 2% de error en función de un tiempo de establecimiento es posible obtener soluciones similares a los controladores avanzados.

### 3.2.1. Control por serie de ciclo

Al usar una serie convergente se puede lograr una salida al escalón que tienda a 1 en el estado estacionario, donde si se agrega una constante “A” que multiplique a “n” podemos controlar el tiempo de establecimiento al 2% según la ecuación 3.22.

$$n_{2\%} \implies a(A(t_s)n) = 0.02 \quad \& \quad n_{t_s} = \frac{t_s}{t_{on} + t_{off}} \quad (3.22)$$

#### 3.2.1.1. Ejemplo: serie 1/n

$$a(n) = \frac{1}{n} \implies \begin{cases} R(t) = 1 - \frac{1}{A(t_s)n} \\ A(t_s) = \frac{1}{0.02n_{t_s}} \end{cases} \quad (3.23)$$

La respuesta al escalón unitario de la Figura 3.2.1 muestre como el sistema es controlable por esta serie, pero se aprecia que el rise time es muy elevado, casi sin ninguna diferencia a pesar de tener  $t_s$  diferentes, algo que no pasa con los controladores modernos, donde cada  $t_s$  muestra un  $t_r$  diferente entre cada caso.

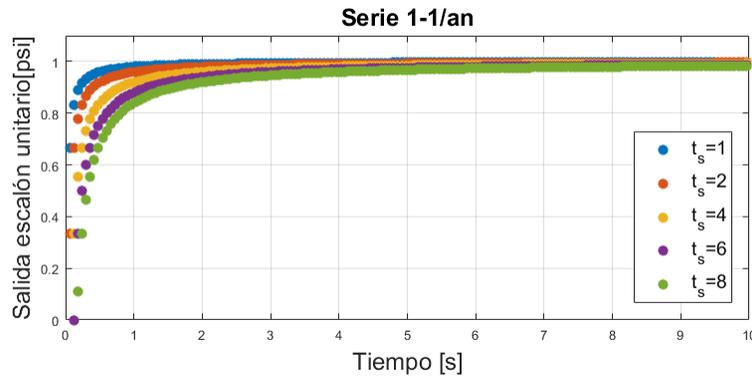


Figura 3.2.1: Respuesta al escalón unitario al usar serie  $a(n)=1/n$ .

### 3.2.1.2. Ejemplo: serie $\sin(1/n)$

$$a(n) = \sin\left(\frac{1}{n}\right) \implies \begin{cases} R(t) = 1 - \sin\left(\frac{1}{A(t_s)n}\right) \\ A_{t_s} = \frac{1}{n_{t_s} \text{asin}(0.02)} \end{cases} \quad (3.24)$$

Similar al caso de la serie  $1/n$ , la serie  $\sin(1/n)$  muestra un comportamiento similar al tener un  $t_r$  elevado.

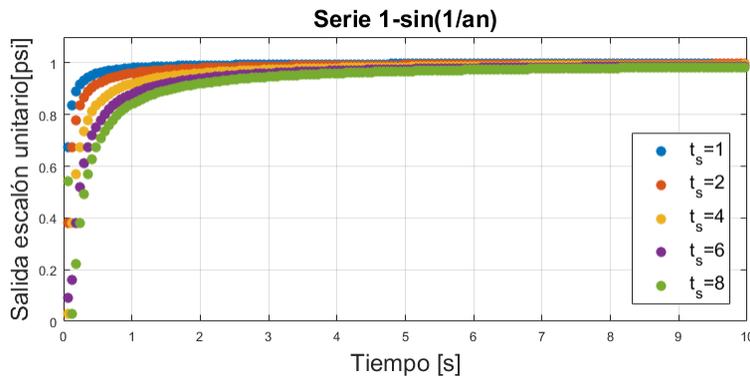


Figura 3.2.2: Respuesta al escalón unitario al usar serie  $a(n)=\sin(1/n)$ .

Entonces, en virtud de que ambas series muestran comportamiento poco controlables, hace a esta forma poco utilizable, a pesar, de que existe cierto control.

## 3.2.2. Control por inversa de función continuamente creciente

Para el control mediante una función convergente (o la inversa de una divergente), se sigue un procedimiento similar al caso de las series, donde el tiempo de establecimiento al 2% se define como el tiempo que hace cumplir la ecuación 3.25.

En especial, para lograr el control del tiempo de establecimiento se agrega una constante “a” que multiplica a “t”, valor que puede obtenerse de la ecuación 3.25 al igual a 0.02.

$$t_{2\%} \implies \frac{1}{f(t_{2\%})} = 0.02 \quad (3.25)$$

### 3.2.2.1. Ejemplo función $1/t^3$

$$f(t) = t^3 \implies \begin{cases} R(t) = 1 - \frac{1}{at^3} \\ a = \frac{1}{0.02t_s^3} \end{cases} \quad (3.26)$$

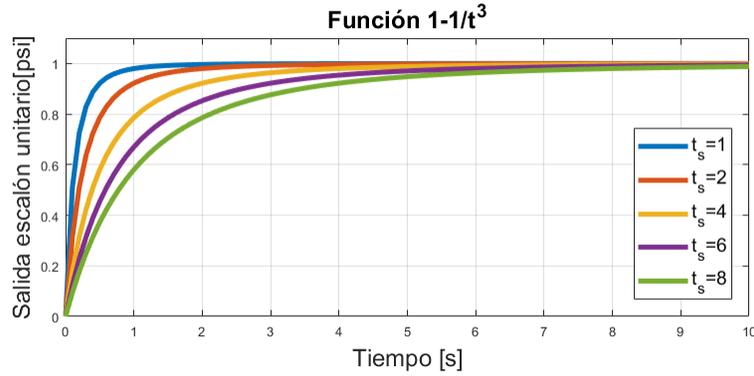


Figura 3.2.3: Respuesta al escalón unitario ante la función convergente  $1/t^3$ .

### 3.2.2.2. Ejemplo función $1/\exp(t-1)$

$$f(t) = \exp(t) \implies \begin{cases} R(t) = 1 - \frac{1}{\exp(at-1)} \\ a = \frac{\ln(\frac{1}{0.02})+1}{t_s} \end{cases} \quad (3.27)$$

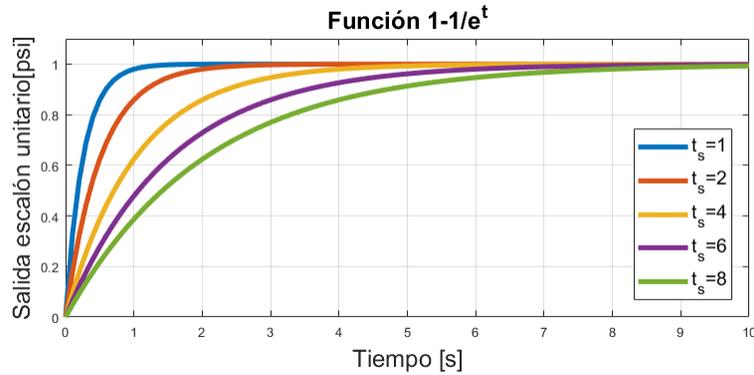


Figura 3.2.4: Respuesta al escalón unitario ante la función convergente  $1/\exp(t)$

En los ejemplos de las funciones inversamente convergentes, se logra un control más suave sin sobrepasos, ambos casos demuestran ser óptimos para su uso, siendo el caso de la función exponencial el de menor crecimiento.

En particular, se debe notar que ambos casos son similares en forma al controlador PID con  $k_d = 1$  demostrando que incluso el método simplificado por función convergente puede lograr salidas cercanas a lo esperado en control moderno.

# Capítulo 4

## Metodología

Para llevar a cabo el trabajo, se realizó una segmentación de 4 etapas que serán descritas en detalle a continuación, lo cual permite seguir el proceso de la Figura 4.0.1, donde como en todo proceso de investigación se comienza por establecer la indagación de antecedentes que será la base del trabajo por realizar.

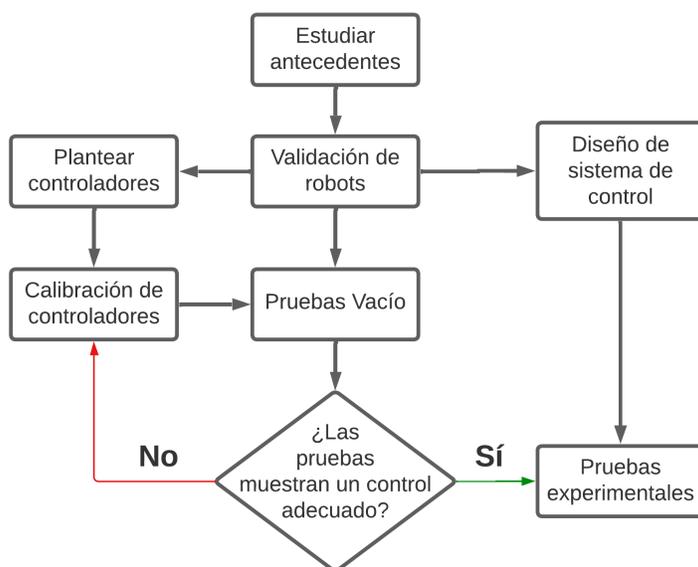


Figura 4.0.1: Diagrama de proceso de investigación a seguir.

Aunque el diagrama anterior puede parecer complejo, a grandes rasgos se divide en tres ramas posteriores a la etapa de antecedentes y reconocimiento de robots modulares de Valenzuela[20], a ser, planteo de controladores, validación de robots y diseño del sistema de control físico que serán detalladas seguidamente.

### 4.1. Validación de robot

Como parte de los objetivos es entender como establecer un sistema de control adecuado a los robots modulares blandos, se comenzó por simular y fabricar los robots modulares blandos esta-

blecidos por Valenzuela en su trabajo de título para el grado de magíster denominada “Diseño y fabricación de robots modulares blandos heterogéneos”[20], esto producto de que el enfoque principal del trabajo es acerca del sistema de control y no el diseño de robots que ya han sido creados.

Esta etapa implica primero rediseñar los moldes de los robots modulares, pero con la salvedad de usar 3 tamaños de cubos diferentes que son de 20 [mm], 24 [mm] y 28 [mm] de lado, lo cual permite ver que tanto afecta el grosor y el tamaño sobre la base de diferencias de solo 4 [mm] en su núcleo hilado, los cuales poseen un diámetro de 4 [mm] menos que sus lados.

Con los 3 diferentes tamaños se plantea simular su comportamiento en el software ANSYS para análisis FEA utilizando diferentes para mallas de análisis para lograr validar la convergencia de los resultados, considerando en este punto que el enfoque de los análisis FEA se enfoca en los robots modulares uniaxial y rotator.

Una vez validado que los nucleos hilados permiten controlar la deformación en la forma deseada, se pasa a la etapa de diseño de moldes que deriva en su manufactura en impresión 3D mediante el uso de impresoras XYZprinting PRO, buscando una fabricación de calidad suficiente para lograr patrones en las paredes del núcleo adaptados al hilo utilizado con su centro hueco lo más perfectamente centrado, factor que puede causar concentraciones de deformación en alguna cara del robot que descarten su uso para el estudio.

A grandes rasgos, se espera que esta etapa de trabajo siga el flujo mostrado en el diagrama de la Figura 4.1.1 que busca concluir en la validación del robot modular blando.

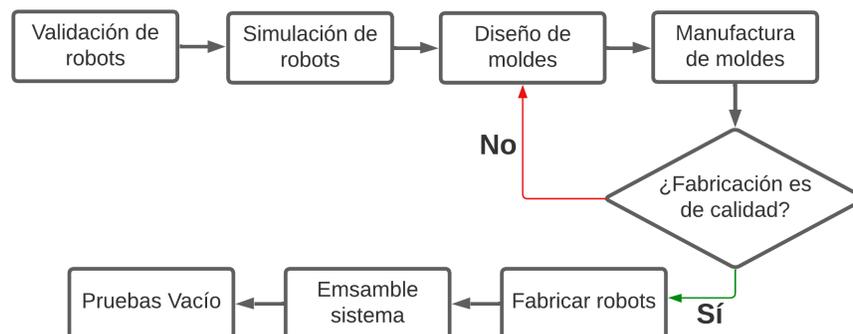


Figura 4.1.1: Diagrama de proceso para aalidación de robot Modulares.

## 4.2. Planteación de controladores

La segunda etapa corresponde a definir los controladores de prueba, para lo cual, se toma la decisión de usar 2 tipos de controladores denominados “método moderno” y “método simplificado” en virtud del grado del sistema de la planta que define a un robot modular blando, esta planta

puede simplificarse como una función escalón producto de su rápido crecimiento torno a unos pocos milisegundos.

Sobre los modelos modernos se trabaja sobre controladores PI, PID y de segundo orden ideal, siendo estos tres los controladores más usados en la industria no solo de robótica, sino en múltiples otras como manufactura o diseño de mecanismos.

Por otro lado, se establece usar un método simplificado que implica usar series y funciones convergentes a 1 estableciendo un parámetro de control denominado “tiempo de establecimiento” y “sobrepaso”, que actúa de forma similar a los métodos avanzados de segundo orden, definiendo el máximo y el tiempo del estado transiente.

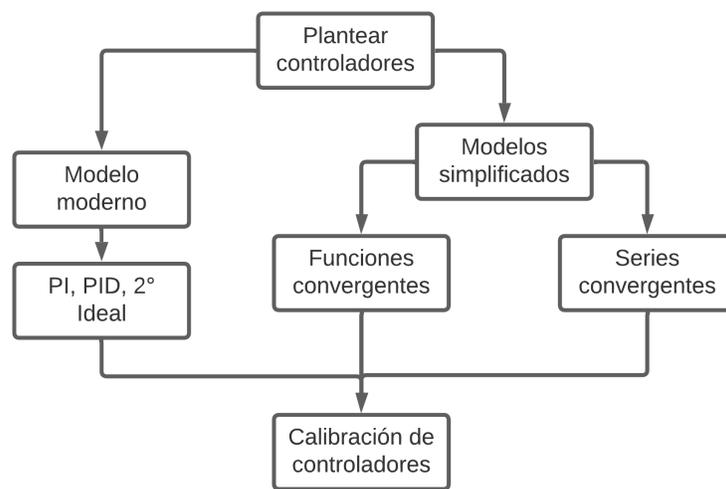


Figura 4.2.1: Controladores a plantear en el estudio de control.

En específico, al definir los controladores y sus constantes que los caracterizan, se realiza una prueba sobre como estas logran controlar el sistema principalmente en el estado transiente, siendo que si la respuesta es positiva se pasa a una etapa de medir desempeño, de lo contrario, se vuelve a la etapa de diseño de controladores para corregir posibles fallas, esto se diagrama en la Figura 4.2.2.

Al medir el desempeño se utilizan mediciones en un estado denominado en vacío, lo cual implica realizar las conexiones del piping sin conectar el robot al sistema utilizando únicamente el sensor de presión, la bomba, la válvula y el manómetro.

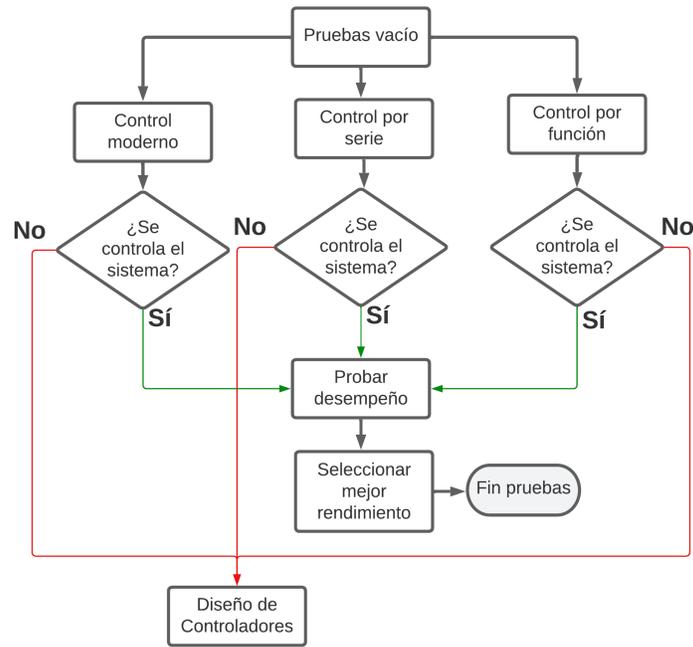


Figura 4.2.2: Diagrama de proceso para realización de pruebas en vacío.

### 4.3. Diseño físico de sistema de control

La tercera etapa se caracteriza por establecer e implementar el controlador físico, diseñando el circuito electrónico con la selección de los componentes a usar como válvulas, bombas y placa de desarrollo. Para esta etapa también se define la estrategia de operación estudiando como opera cada actuador, definiendo la calibración del sensor y como se interconectan las distintas partes del circuito lo cual incluye seleccionar módulos de transistores para el control de potencia de los actuadores (Figura 4.3.1).

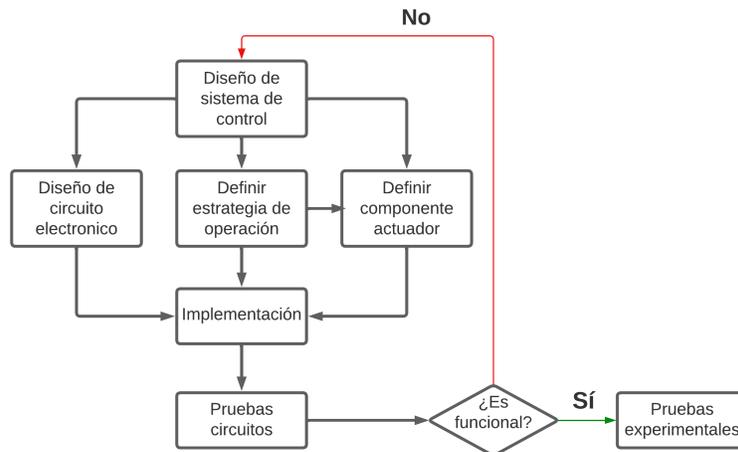


Figura 4.3.1: Diagrama de diseño de sistema de control físico.

Además, se trabaja en la redacción del algoritmo de respuesta (Anexo A), formalmente, determinado el circuito, el código de control y la implementación general, se procede a determinar si el sistema es estable, con un rango de amplificación adecuado, la programación sea funcional y que el actuador responda sin problemas, lo cual se corresponde a seguir el algoritmo de la Figura 4.3.2.

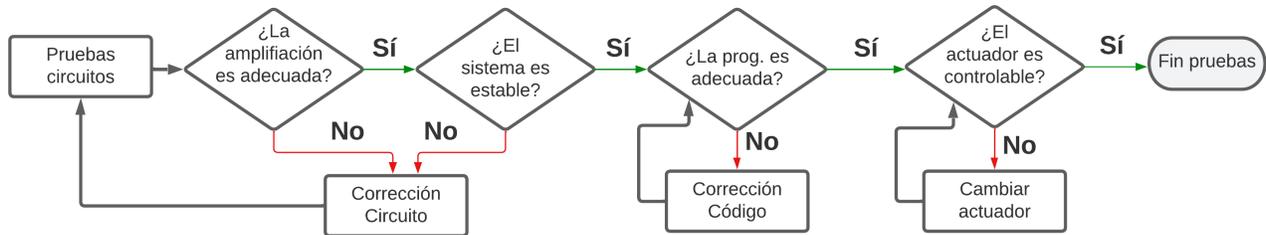


Figura 4.3.2: Diagrama de pruebas de controlador físico.

Cabe destacar que estas pruebas para el controlador físico se realizan en un estado denominado en “vacío”, donde se conecta la bomba, la válvula y el manómetro al sensor sin utilizar el robot, para de esa forma reducir las perturbaciones y posibles fugas en la construcción de los módulos de silicona.

## 4.4. Pruebas experimentales

La etapa final corresponde a las pruebas experimentales de cómo reaccionan los robots modulares blandos ante los controladores, los cuales corresponderán al mejor de cada método analizado, el moderno y el simplificado, esto para cada configuración de actuador a utilizar.

En esta etapa se busca analizar no solo que el sistema sea controlado, sino también la estabilidad y su comportamiento en el estado transiente y el estado estacionario mediante el establecimiento de una métrica en función a los errores de cada tramo de funcionamiento.

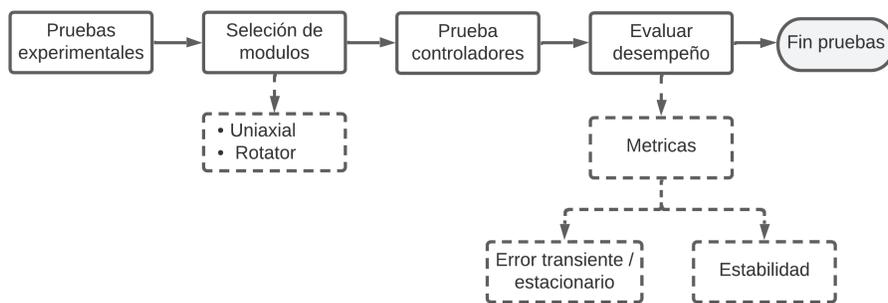


Figura 4.4.1: Diagrama simple de proceso de pruebas experimentales.

## 4.5. Métrica de trabajo

En esta sección se espera expresar los métodos de métrica que permitan hacer comparaciones, ya que, todo trabajo que busca comparar sistemas, se debe de establecer una métrica que permita comparar para determinar los pros y contras de cada método usado.

### 4.5.1. Error medio

El principal factor de medida es el error que existe entre los valores de salida requeridos y los censados, estableciendo de esa forma un valor promedio que abarque cierto rango de tiempo, estos rangos temporales corresponden al estado transiente y al estado estacionario.

Para el estado transiente se establece abarcar el tiempo desde el inicio hasta cumplir con rango de 1.5 veces el tiempo de establecimiento, por consiguiente, el estado estacionario es considerado en el tramo de tiempo mayor a 30 [s] hasta llegar a los 50 [s].

Matemáticamente, el error promedio en cada estado se define por la ecuación 4.1, donde al trabajar sobre un sistema discreto se decide sumar el error en cada iteración para finalmente calcular el promedio en función de la cantidad de ciclos realizados en el tramo de tiempo abarcado.

$$e_{total} = \begin{cases} e_{transiente} & = \frac{\sum_i e_i}{i} & t \leq 1.5t_s \\ e_{estacionario} & = \frac{\sum_i e_i}{i} & t \geq 30 \leq 50 \end{cases} \quad (4.1)$$

Con estos valores de error para los 7 casos de estudio (6 controladores + caso sin control) se espera ver como se comporta el sistema en cada tramo de funcionamiento, pero además de reconocer los 7 casos de estudio se destaca que las pruebas de funcionamiento práctico en el control de robots modulares, solo será realizada en dos tipos de robots, el robot uniaxial y el robot rotator, producto de que estos 2 poseen las mayores deformaciones haciendo más fácil el registro de las variaciones mediante el software de seguimiento temporal.

#### 4.5.1.1. Estabilidad

Otro factor relevante es la estabilidad del estado estacionario, el cual puede derivarse del error estacionario medio, pero también debe analizarse visualmente las gráficas de desplazamiento en función del tiempo, producto de que puede existir la posibilidad de que en estado vacío las señales del sensor muestren baja estabilidad, pero que esa baja estabilidad sea solo producto del ruido de los sensores.

### 4.5.2. Seguimiento de comportamiento

En la industria existen variados programas y formas de medir variaciones espaciales, dentro de los que destacan **Optitrack** que requiere un complejo sistema de cámaras, o programas más simples como **Tracker** que solo requiere un computador con suficiente capacidad computacional,

así como una cámara con una resolución mayor a 720 píxeles.

En especial, en este trabajo se tomó la decisión de usar Tracker por ser de fácil acceso, y ser utilizado en muchas investigaciones de física experimental, lo cual demuestra su fiabilidad.

#### 4.5.2.1. Software Tracker

Tracker es un programa de análisis de vídeo mediante seguimiento de partículas o formas mediante comparación de fotogramas en función de un cuadro demuestra[25].

El software permite seguir una región o punto estableciendo un punto de origen con la dirección de sus ejes, además de requerir una escala de píxeles a distancia al usar dos puntos de referencia en el fotograma con distancia conocida.

En la Figura 4.5.1 se muestra la calibración usada en las mediciones, donde las rectas de color púrpura representan a los ejes de coordenadas cartesianas, siendo su punto de intersección su origen, por otro lado, la recta azul corresponde a la escala de calibración.

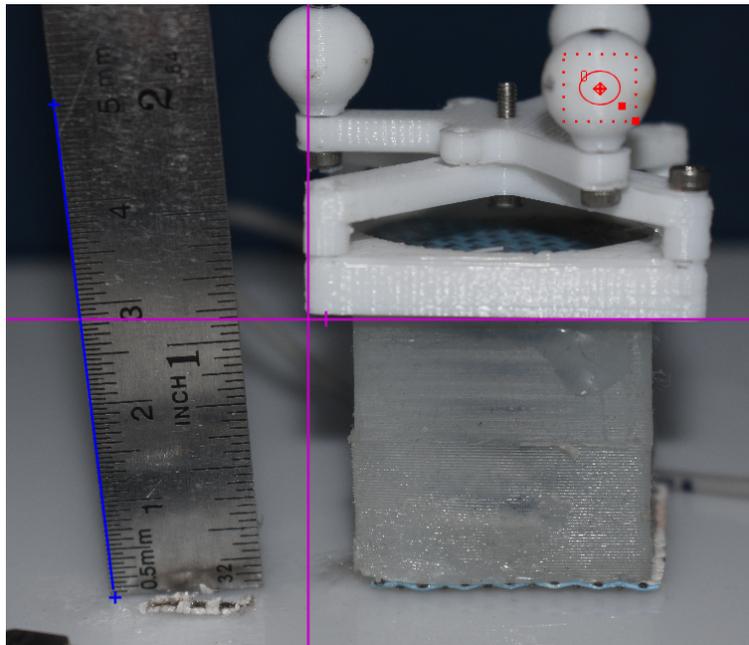


Figura 4.5.1: Muestra de calibración de seguimiento en programa “Tracker”.

Para su correcto funcionamiento, el seguimiento requiere 3 factores que determinan su funcionamiento, a ser, primero es requerido claridad de la imagen para que la marca de seguimiento sea comparable en cada fotograma, lo cual implica no perder el foco y que el foco este a la altura del punto de medición, segundo, la grabación debe ser estática, es decir, debe usarse un soporte para evitar vibraciones, y tercero es requerido un computador idealmente con tarjeta de vídeo y amplia memoria RAM para que el programa fluya sin reiniciarse por sobre uso de recursos computacionales.

# Capítulo 5

## Modelado de robots modulares

El siguiente apartado tiene como objetivo plasmar de una forma sencilla los parámetros y formas usadas para realizar una simulación de deformación de los diferentes tipos de robot modulares planteados por Valenzuela[20].

Para tales simulaciones se plantea usar el software ANSYS para diseño y simulación de elementos finitos FEA, en su pestaña “Workbench” versión 2023. En específico, las simulaciones se basan en sistema de estudio “Transient Structural” definiendo desde los materiales, formas de contacto y fuerzas que definen al sistema.

### 5.1. Simulación ansys

#### 5.1.1. Materiales

Establecido el tipo de simulación, se crean los parámetros de los materiales, en específico, para la silicona se utilizan sus valores extraídos del respectivo datasheet[26] de la silicona ecoflex 00-30 y que se encuentran resumidos en la Tabla 5.1, estos valores corresponden a la densidad, módulo de Young y coeficiente de Poisson, dispuestos en “data engineer” cómo se presenta en la Figura 5.1.1.(a), por otro lado, para el material de representación del devanado se utilizan los parámetros usados por Valenzuela[20] y descritos en la Figura 5.1.1.(b).

Tabla 5.1: Características de material Cured Ecoflex<sup>TM</sup> 00-30 de la empresa Smooth-On [26].

Specific gravity [g/cc] (ASTM D-1475)	1.07
Shore Hardness (ASTM D-2240)	00-30
Tensile strength [psi] (ASTM D-412)	200
100 % modulus (ASTM D-412)	10
Useful T range	-53°C to 232°C
Elongation break [%]	900

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1,07	g cm <sup>-3</sup>
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
6	Young's Modulus	0,068948	MPa
7	Poisson's Ratio	0,49	
8	Bulk Modulus	1,1491E+06	Pa
9	Shear Modulus	23137	Pa

(a) Parámetros silicona ecoflex 00-30.

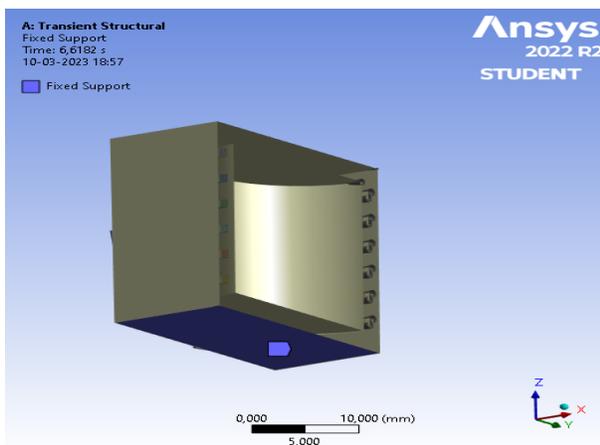
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1,1E-06	kg mm <sup>-3</sup>
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
6	Young's Modulus	3000	MPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	2,5E+09	Pa
9	Shear Modulus	1,1538E+09	Pa

(b) Parámetros hilo devanado.

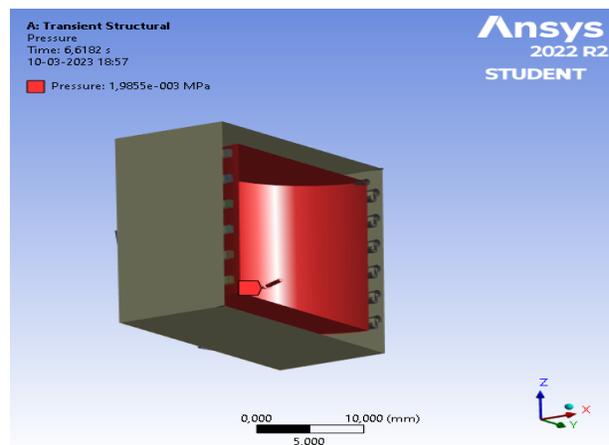
Figura 5.1.1: Disposición de parámetros de material en data engineer del programa ANSYS para una simulación de tipo Transient Structural.

### 5.1.2. Fixed y distribución de esfuerzos

Para mantener una referencia fija, se determina ubicar un “fixed support” (soporte fijo) en una de las caras que sea paralela a la cara plana del núcleo, esto determina cuál es la base inferior del modelo de la Figura 5.1.2.(a), después, para las fuerzas se sugiere ejercer una presión distribuida en la cara interna de los cubos, como se dispone en la Figura 5.1.2.(b).



(a) Fixed Support.



(b) Presión distribuida.

Figura 5.1.2: Disposición de soporte y presiones en modelo ANSYS.

### 5.1.3. Presiones a medir

El siguiente punto a definir son los valores numéricos de la presión distribuida a la que se ejercerá el modelo, para ello, se establece un rango de medición que va de 0 a 0.0048 [MPa] (0 a  $\approx 0.696$  [psi]) en saltos de 0.003 [MPa] para distribución temporal de 1 [s] entre cada variación (Figura 5.1.3), usando valores relativamente pequeños al máximo de la bomba para asegurar que se está midiendo en la zona lineal de la deformación del material hiperelástico.

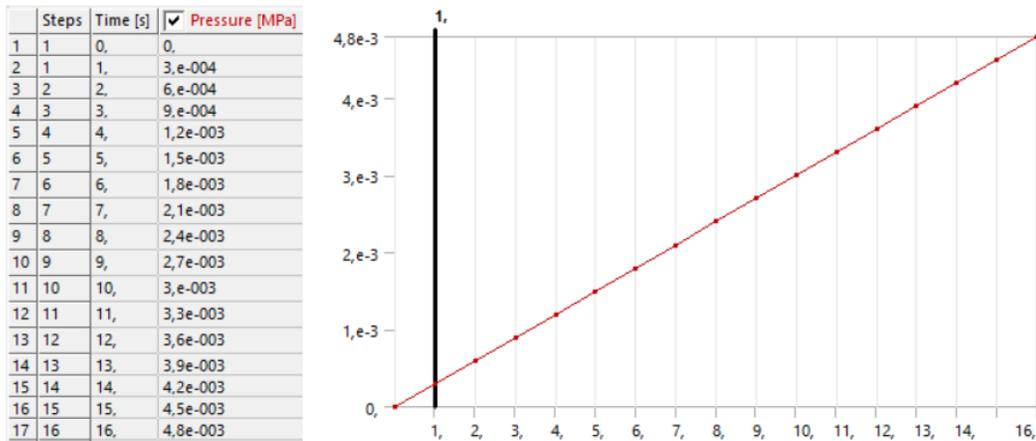


Figura 5.1.3: Distribución temporal de las presiones para la realización de las simulaciones.

### 5.1.4. Puntos de medición

Determinado las presiones de trabajo, se determina que se medirá, lo cual puede ser deformaciones promedio, esfuerzos o hasta factores de seguridad, en particular, se miden las deformaciones direccionales de puntos específicos para el tipo shear, rotator y tilt, en cambio, para el modelo uniaxial y biaxial se mide las deformaciones direccionales máximas.

Para el tipo shear, rotator y tilt se busca un punto que permita medir diferencias de ángulos en función de la posición inicial del proceso, siendo los casos uniaxial y biaxial más directos al no requerir transformación de los datos y usar la deformación promedio.

### 5.1.5. Mallado

El punto final y uno de los más importantes, corresponde al mallado que se usara, donde para conocer el comportamiento general del proceso de carga, se utilizan 4 tipos de mallas, a ser, [1; 1.5; 2; Default] [mm].

Usar distintas mallas permite reconocer convergencia, con lo cual se aprecia si existen problemas en el cálculo de la simulación, donde finalmente si se cumple que hay convergencia, se utiliza un promedio de las 4 mallas para determinar una ecuación que relacione la presión en [psi] con la

deformación del grado de libertad asociado a cada robot en [mm] o [deg] según sea correspondiente.

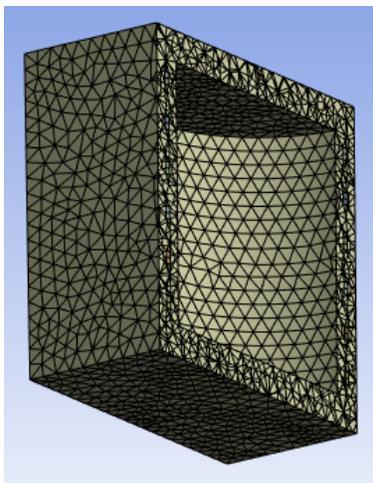


Figura 5.1.4: Ejemplo de mallado expresado por software ANSYS.

## 5.2. Resultados de simulaciones

Establecidos las configuraciones de la simulación FEA, se realizan las mediciones para cada uno de los módulos, y en virtud de los resultados se realizan aproximaciones lineales para definir una función de presión [psi] en virtud del desplazamiento (deg) deseado.

Cabe destacar como la silicona no posee un comportamiento típico producto de que es un material hipereelástico se utiliza una aproximación de Mooney-Rivlyn de tres términos que a mostrado el mejor desempeño en otros trabajos como el de Valenzuela[20] no solo por su precisión sino también por el costo computacional y tiempo requerido.

Tabla 5.2: Parámetros de Mooney-Rivlin de 3 términos[20].

Mooney-Rivlyn 3T	Value [MPa]
$C_{10}$	8.90E-04
$C_{01}$	8.002E-03
$C_{11}$	1.35E-03
$D_1$	0
$D_2$	0
$D_3$	0

Con el modelo completamente definido, se realizan mediciones para cada uno de los 5 tipos de módulos, pero en especial para los módulos uniaxiales y rotator, los cuales serán usados para las pruebas experimentales.

Las pruebas con distintas mallas se traducen en obtener curvas de deformación en función de la presión, las cuales se espera que para presiones menores a 10 [psi] sean relativamente lineales, por

ello, al utilizar puntos de medición de presiones de 0-0.7 [psi] se extrapolan para presiones cercanas a 8 [psi], la presión máxima de la bomba de diafragma.

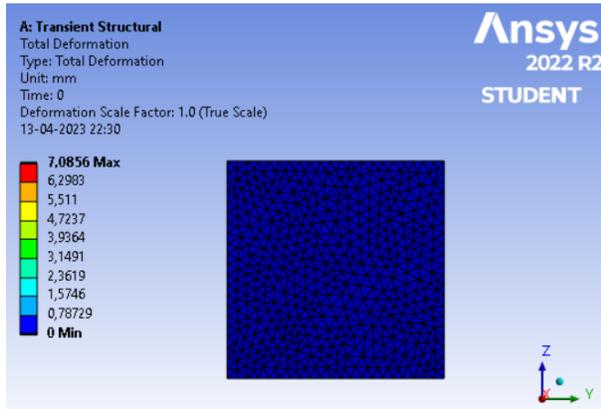
### 5.2.1. Uniaxial

La definición del robot uniaxial nos dice que se enfoca en las deformaciones sobre el eje Z, también existe una deformación en los otros ejes que no puede ser ignorada, aunque esta elongación de los ejes Y-Z es de carácter de compresión oponiéndose a la elongación del eje Z.

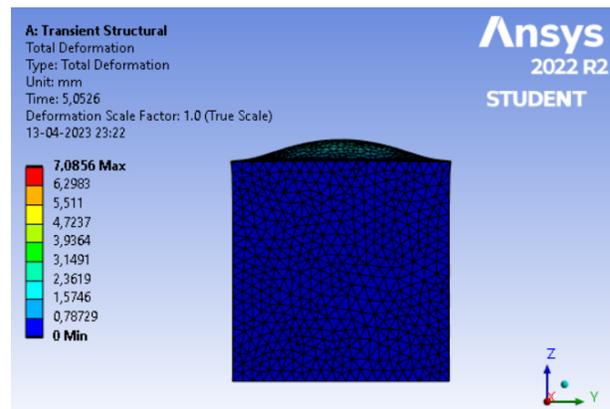
Analizando solo el eje Z, se produce un aumento de la deformación con el aumento de tamaño cerca de un 12-13%, así como existe una disminución de la deformación cercana al 14-15% con el aumento del grosor.

Tabla 5.3: Ecuaciones de deformación asociadas a robot uniaxial, esto para tres tamaños de módulos y tres grosores internos.

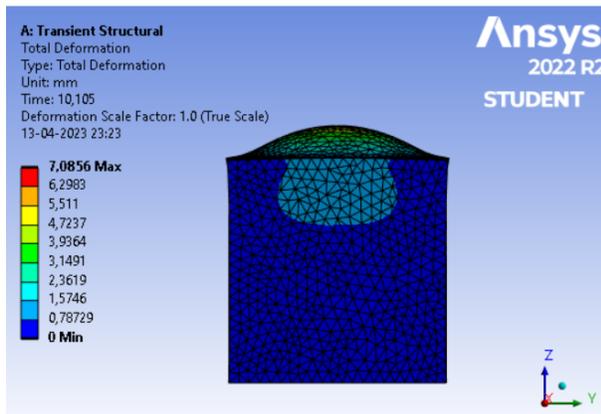
Tamaño	Grosor	Eje X-Y	Eje Z
Grande (28 mm)	2.5	$-1.59P + 0.118$	$10.30P + 0.836$
	3.0	$-1.47P + 0.096$	$9.33P + 0.583$
	3.5	$-1.39P + 0.076$	$8.53P + 0.390$
Mediano (24 mm)	2.5	$-1.18P + 0.077$	$7.54P + 0.425$
	3.0	$-1.10P + 0.055$	$6.69P + 0.258$
	3.5	$-1.04P + 0.038$	$5.96P + 0.114$
Pequeño (20 mm)	2.5	$-2.22P - 0.032$	$4.78P + 0.090$
	3.0	$-1.72P + 0.018$	$4.02P + 0.077$
	3.5	$-1.63P + 0.010$	$3.50P + 0.037$



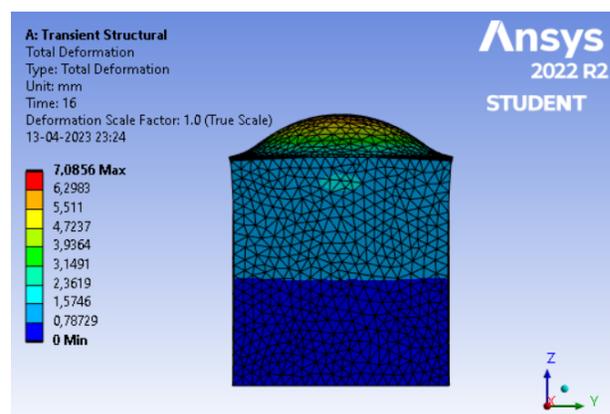
(a)  $P = 0.0000$  [Mpa](0 [psi]).



(b)  $P = 0.0012$  [Mpa](0.17 [psi]).



(c)  $P = 0.0024$  [Mpa](0.35 [psi]).



(d)  $P = 0.0048$  [Mpa](0.70 [psi]).

Figura 5.2.1: Evolución de deformación para robot uniaxial.

### 5.2.2. Rotator

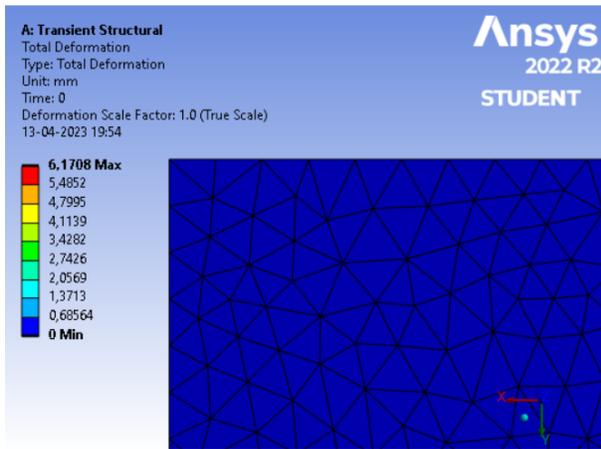
Por otro lado, el módulo rotator que tiene un enfoque hacia la rotación también presenta una alta deformación en el eje Z, es decir, presenta una elongación significativa, tal que, el caso del módulo grande de 28 [mm] es incluso el doble del caso uniaxial, al menos teóricamente hablando.

Similar al caso uniaxial, la Tabla 5.4 expone un crecimiento cercano al 12-13% con la variación del grosor, y la disminución del tamaño implica una reducción del 14-15% similar al uniaxial, por otro lado, para el ángulo la disminución del tamaño reduce en un 10% la rotación y un 30% con el grosor, haciendo este caso más susceptible a la variación del grosor.

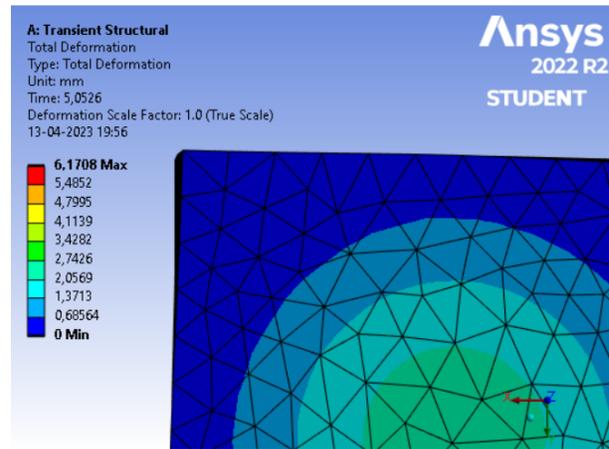
Cabe mencionar que las relaciones de deformación en función de la presión para los módulos shear, tilt y biaxial se pueden encontrar en el Anexo B.

Tabla 5.4: Ecuaciones de deformación asociadas a robot rotator, esto para tres tamaños de módulos y tres grosores internos.

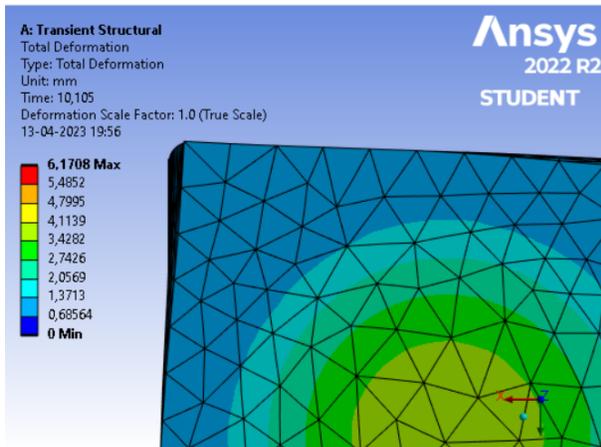
Tamaño	Grosor	Eje Z	Ángulo
Grande (28 mm)	2.5	$5.032P - 0.0320$	$9.28P + 0.836$
	3.0	$4.574P - 0.0274$	$8.44P + 0.572$
	3.5	$4.182P - 0.0236$	$7.69P + 0.369$
Mediano (24 mm)	2.5	$3.814P - 0.0332$	$6.78P + 0.424$
	3.0	$5.032P - 0.0320$	$5.99P + 0.250$
	3.5	$3.163P - 0.0240$	$5.24P + 0.133$
Pequeño (20 mm)	2.5	$2.140P - 0.0146$	$3.59P + 0.070$
	3.0	$1.973P - 0.0107$	$3.54P + 0.070$
	3.5	$1.782P - 0.0117$	$3.05P + 0.027$



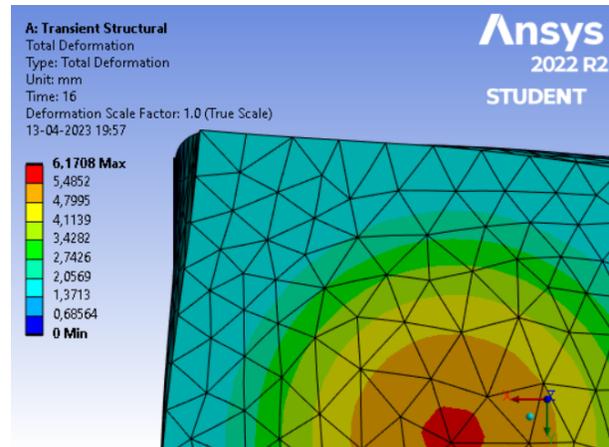
(a)  $P = 0.0000$  [Mpa](0 [psi]).



(b)  $P = 0.0012$  [Mpa](0.17 [psi]).



(c)  $P = 0.0024$  [Mpa](0.34 [psi]).



(d)  $P = 0.0048$  [Mpa](0.70 [psi]).

Figura 5.2.2: Evolución de deformación para robot rotator.

# Capítulo 6

## Fabricación

### 6.1. Métodos de construcción

Como parte del trabajo requiere ver el comportamiento de los métodos de control en los módulos blandos cúbicos creados por Valenzuela, se construyen solo 2 tipos de robots desde cero, por ello, esta sección busca plasmar tal proceso de diseño y construcción de moldes, así como su posterior inyección de silicona 00-30, curado, devanado de núcleos y sellado para su uso final.

#### 6.1.1. Moldes

##### 6.1.1.1. Núcleos

Para poder obtener los moldes de los núcleos usados para inyección de silicona se comienza por crear un modelo 3D del núcleo a fabricar, lo cual implica inscribir los patrones como salientes de un cilindro del tamaño del núcleo deseado.

Una vez tenido el núcleo grabado en un software de modelado 3D como “Autodesk Inventor Professional 2023”, se diseña un cubo de 4 [mm] mayor al cilindro con el centro de masa céntrico, este cubo se crea como una pieza distinta, con la cual es posible realizar una operación Booleana que entrega como resultado la forma del centro con los patrones inscritos, método comúnmente denominado litografía blanda, lo cual se expresa visualmente en la Figura 6.1.1, donde ya grabado se realiza un corte vertical con una conexión para el tornillo que centra al “núcleo de vaciado”.

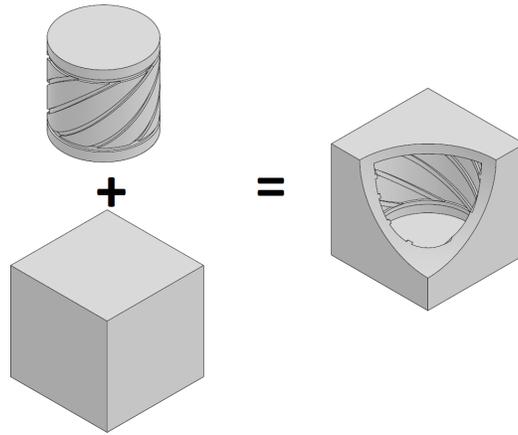
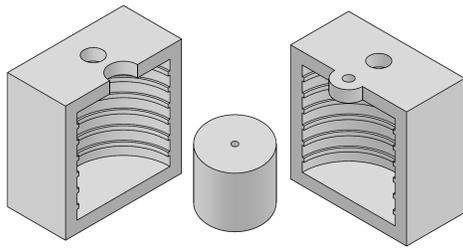
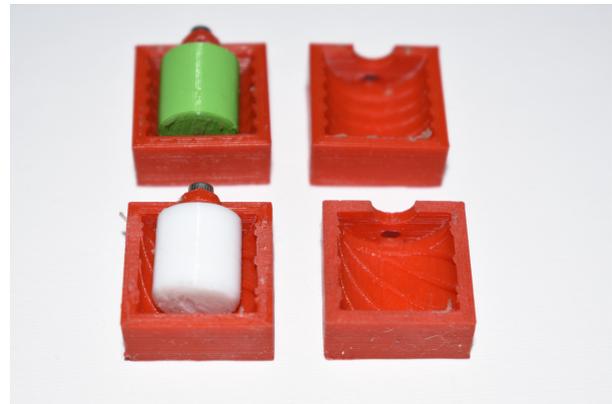


Figura 6.1.1: Ejemplo de piezas modeladas para realizar operación Booleana y resultado esperado.



(a) Modelado de molde de núcleo, este se compone de 3 piezas, dos caras y el núcleo de vaciado.



(b) Piezas de molde impresas en 3D con filamento PLA y unidas a núcleo de vaciado mediante un tornillo de 2 mm.

Figura 6.1.2: Ejemplo de caras de molde de núcleo previo ha hilado, se incluye el núcleo de vaciado.

Para más detalles acerca de los planos de los moldes referirse a Anexo C.

### 6.1.1.2. Inyección

Definido el molde del núcleo, se procede a inyectar la silicona Ecoflex 00-30 al molde cerrado, el cual posee su propio núcleo centrado (Figura 6.1.3) y cerrado mediante un elástico que facilita la separación.

Para el núcleo de vaciado se establece de tal manera que el diámetro sea de 4 mm menos que el núcleo, es decir, 2 [mm] a cada lado del hilo del patrón para permitir que la silicona fluya adecuadamente, ya que, mediante pruebas experimentales se encontró que diámetro con 2 y 3 [mm] de diferencia no permiten el relleno adecuado de la pieza inyectada.

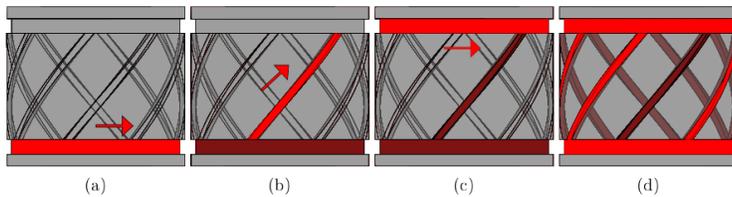


Figura 6.1.3: Muestra de método de inyección de silicona, este se realiza mediante una jeringa conectada a alguno de los dos canales de inyección-respiración.

### 6.1.1.3. Devanado

Una vez curada la silicona durante 2 horas y extraído del molde, se pasa a la etapa de devanado, donde se utiliza un hilo genérico de coser para dar la componente rígida al núcleo, este hilado implica usar entre 2 o 3 vueltas por cada canal grabado en la pieza hasta completar todo el modelo.

En la Figura 6.1.4 se presenta una muestra de un núcleo uniaxial que fue hilado con un hilo de coser negro genérico, en particular, en la parte (a) se aprecia el devanado de una matriz rotator y como se debe seguir el hilado, la parte (b) por otro lado nos muestra un núcleo uniaxial devanado.



(a) Ejemplo de devanado de núcleo rotator en dirección derecha[20].



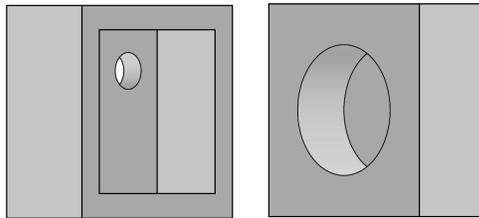
(b) Muestra de núcleo uniaxial devanado con hilo negro.

Figura 6.1.4: Devanado de núcleo uniaxial y rotator, (a) muestra la secuencia teórica y (b) una muestra real de devanado.

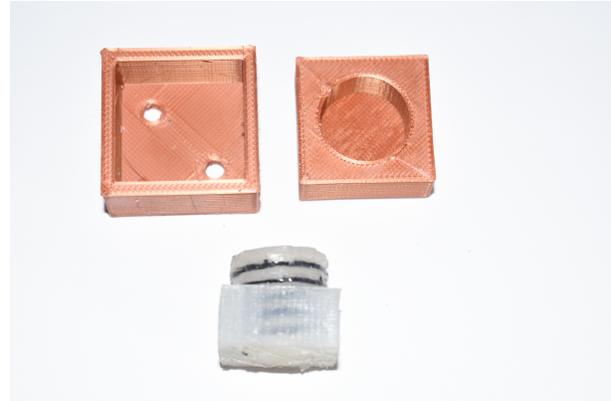
### 6.1.2. Cubo

Armado el núcleo, se procede a establecer la forma cúbica mediante una secuencia de dos etapas en las que se establece primero la mitad inferior del cubo, para proseguir con la parte superior con su respectivo canal de bombeo.

Siguiendo las etapas de la Figura 6.1.5 y Figura 6.1.6 se forma primero medio cuerpo del cubo, y una vez curado se inyecta la segunda mitad, donde previamente de realizar la segunda etapa se procede a ubicar el canal de bombeo de 2 [mm] mediante un calado predispuesto en el molde para la segunda etapa.

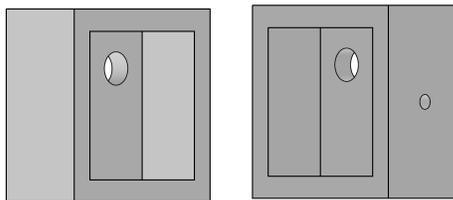


(a) Piezas 3D modeladas.

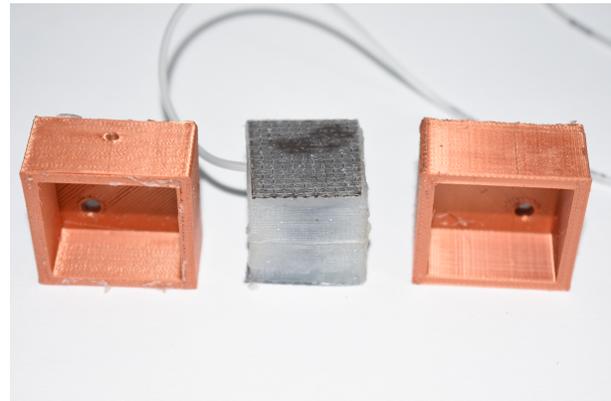


(b) Ejemplo de piezas 3D impresas.

Figura 6.1.5: Caras de molde para primera etapa de cubicación, una de estas es cilíndrica para centrar el cubo a la altura deseada.



(a) Piezas 3D modeladas.



(b) Ejemplo de piezas 3D impresas.

Figura 6.1.6: Caras de molde para segunda etapa de cubicación, una de estas caras se le agrega un agujero de 2 [mm] como entrada de manguera de bombeo.

Para más detalles acerca de los planos de los moldes referirse a Anexo C.

# Capítulo 7

## Circuito control

### 7.1. Componentes

#### 7.1.1. Placa de desarrollo

El primer elemento a seleccionar para los trabajos de control es la placa de desarrollo, para lo cual en este trabajo se decide usar la placa de desarrollo Arduino Mega (Figura 7.1.1) que posee gran capacidad de cómputo, robustez y mayor cantidad de puertos en caso de ser requeridos.

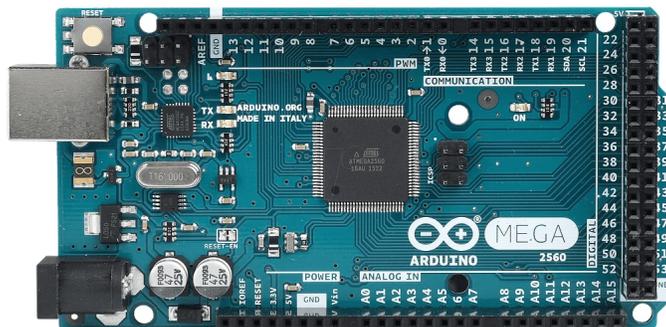


Figura 7.1.1: Placa de desarrollo Arduino MEGA.

#### 7.1.2. Sensor de presión XGZP (DIP 6 pins)

A lo largo de la construcción material del sistema de control de un robot modular blando se usa el sensor tipo esfigmómetro XGZP de 6 pines de la Figura 7.1.2, sensor que tiene un rango de funcionamiento de 0 a 14.5 [psi] para una temperatura de funcionamiento cercana a 25°C.

Este sensor tiene un funcionamiento que puede decirse lineal al suministrarle un voltaje DC de 5 [V], los datos más generales se presentan en la Tabla 7.1 que corresponde a un extracto del datasheet del sensor.

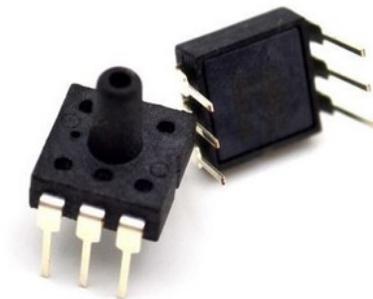


Figura 7.1.2: Sensor de presión 6 pins tipo esfigmómetro.

Tabla 7.1: Parámetros de sensor XGZP de 6 pins tipo resistivo extraídos de su datasheet[27].

Code	101G[0 a 100kPa ](0 a 14.5psi)
Type	R
Working temp [°C]	-30 a +100
Medium Temp [°C]	25±1
Power Supply [VDC]	5±0.005
Pressure Range [kPa]	100 (14.5 psi)
Offset/Zero Output [mV]	-5 a +10

### 7.1.3. Bomba

Para la bomba se utiliza la bomba KM14A con una presión de funcionamiento máxima cercana a 7 [psi] para un voltaje de operación de 3 [V], esta bomba actúa mediante un accionamiento de diafragma y se puede detallar su datasheet en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2: Extracto de datasheet de bomba KPM14A[27].

Marca	KOGE
Name	Mini bomba de aire
Modelo	KPM14A
Voltaje	3 VDC
Presión	7 psi
Peso	14 gr
Ruido	<60 db



Figura 7.1.3: Bomba de accionamiento de diafragma KPM14A.

#### 7.1.4. Válvula solenoide

La válvula a estudiar corresponde a una válvula solenoide de la Figura 7.1.4 de carácter genérico que es capaz de 0.40 [Mpa] con un voltaje de accionamiento de 12 [V], en la Tabla 7.3 se resume parte de sus características.

Tabla 7.3: Extracto de datasheet de válvula solenoide genérica de 12[V].

Material	Plástico con recubrimiento metálico
Presión	0-0.4 Mpa (58 psi)
Temperatura	0-80 °C
Voltaje	12 V
Diámetro In	6mm(2mm)
Diámetro Out	6mm(2mm)

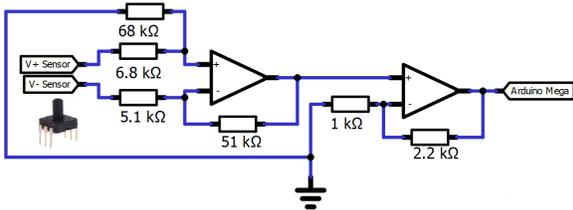


Figura 7.1.4: Válvula Solenoide de 6mm 12V generica.

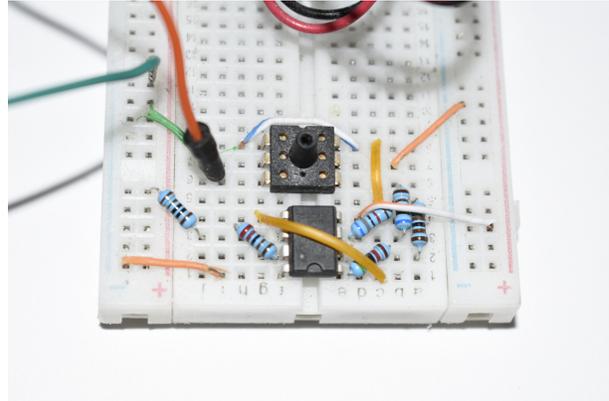
## 7.2. Circuito de sensor

El sensor de presión resistivo funciona mediante una diferencia de voltaje en sus dos terminales de salida, pero este voltaje es muy pequeño para ser utilizable directamente, por ello, mediante

el uso de un circuito OPAM diferencial seguido de un circuito OPAM amplificador no inversor (Circuito de Figura 7.2.1) se puede tener un voltaje de trabajo adecuado.



(a) Circuito sensor de presión con factor de amplificación 32.2.



(b) Circuito sensor de presión construido.

Figura 7.2.1: Circuito de sensor usado.

Mediante algunas pruebas se decidió usar valores de resistencia tales de obtener una amplificación de 10 en el lazo diferencial y de 3.2 en el lazo no inversor, lo cual se traduce a obtener una salida diferencial amplificada por 32 veces, lo cual se expresa en la ecuación 7.1.

$$v_{out} = \begin{cases} = \frac{R_1 R_3}{R_2 R_4} \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) (v_+ - v_-) \\ = \frac{68k \cdot 51k}{6.8k \cdot 5.1k} \left(1 + \frac{2.2k}{1k}\right) (v_+ - v_-) \\ = 32(v_+ - v_-) [V] \end{cases} \quad (7.1)$$

### 7.2.1. Calibración

Ahora, si bien teóricamente se espera que la amplificación sea de 32.2 veces, en la realidad los componentes usados no son ideales y existen que pequeñas diferencias unos con otros.

En especial, en este circuito existen errores de arrastre que hacen varían la salida en pequeños márgenes, haciendo que al medir la linealidad entre el voltaje censado y la presión real, la curva tenga pendientes con pequeñas diferencias, por lo cual, se calcula tal pendiente para 24 circuitos de amplificación, pendientes de las curvas registradas en el gráfico de la Figura 7.2.2.

Al ir a la Tabla 7.4 se resumen los valores de las pendientes “m”, donde en el sistema de control se usa el valor promedio correspondiente a 28.7. Pero, otro factor que afecta al censado, es el valor inicial o de intersección de la curva, el cual es dependiente de cada sensor, y no posee una similitud clara uno con otros.

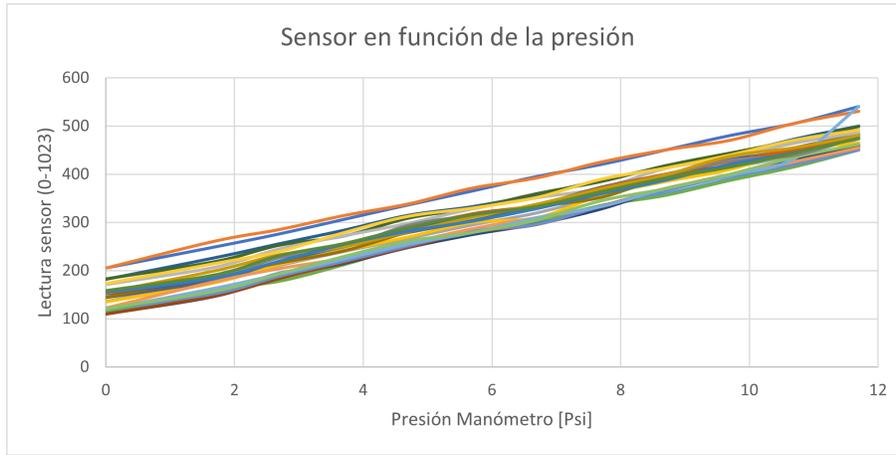


Figura 7.2.2: Prueba de salida de sensor en función de distintas presiones medidas por un manómetro para 24 sensores distintos.

Tabla 7.4: Parámetros de pendiente medidos para los 24 circuitos probados.

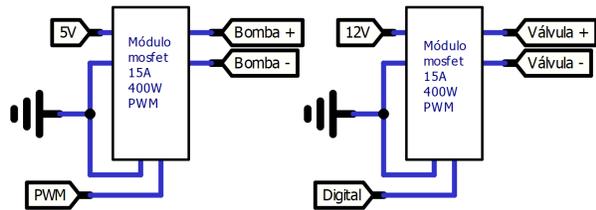
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$	$S_{12}$
m	28.6	27.4	28.9	28.8	28.8	28.7	30.3	30.1	29.4	28.6	26.9	27.4
n	201.3	210.8	132.9	132.3	112.7	110.7	102.5	104.1	138.8	141.7	182.4	176.8
	$S_{13}$	$S_{14}$	$S_{15}$	$S_{16}$	$S_{17}$	$S_{18}$	$S_{19}$	$S_{20}$	$S_{21}$	$S_{22}$	$S_{23}$	$S_{24}$
m	28.8	28.1	27.4	27.7	32.1	29.5	28.7	28.4	28.0	28.4	27.8	27.1
n	112.6	124.8	168.5	172.2	104.1	115.0	147.4	150.2	150.7	151.5	147.4	155.3

Por ello, se debe de medir “n” de forma manual mediante la medición directa con el sensor en vacío, esto para cada sensor con su circuito, quedando así la presión medida según la ecuación 7.2.

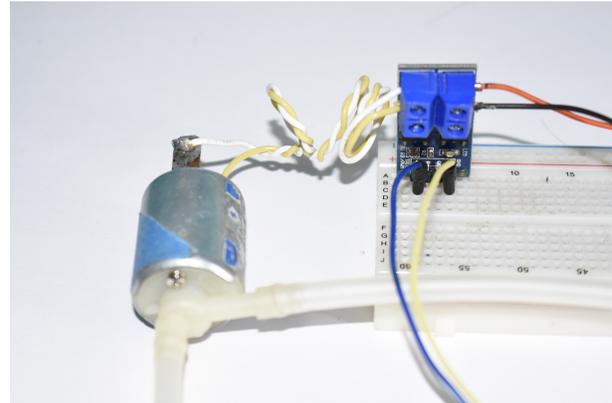
$$P_{med}(v_{out(0-1023)}) = \begin{cases} \frac{v_{out}}{m} - \frac{n}{m} \\ \frac{v_{out}}{28.7} - \frac{n}{28.7} [psi] \end{cases} \quad (7.2)$$

### 7.3. Accionamiento de bomba y válvula

El manejo de la bomba de diafragma y la válvula solenoide pueden ser controlador directamente desde la placa de desarrollo mediante el uso de módulos de transistores MOSFET, esto evita tener que diseñar circuitos, además de que estos módulos son aptos para control analógico (control de bomba) o control digital (control de válvula) (Figura 7.3.1).



(a) Circuito control por módulo MOSFET.



(b) Ejemplo de circuito MOSFET para válvula.

Figura 7.3.1: Circuito de manejo de actuadores.

El uso de un módulo de accionamiento tipo MOSFET con controlador pwm para placas de desarrollo tipo arduino facilita el manejo de corrientes y voltajes en corriente directa siempre que se mantenga dentro de sus límites operativos de 5-36 [V] de entrada con un máximo de 15 [A].



Figura 7.3.2: Módulo de control transistor tipo MOSFET.

# Capítulo 8

## Caracterización de actuadores

En la práctica, aunque se debe controlar el desplazamiento de algún grado de libertad de un robot, la tarjeta de desarrollo actúa mediante un sensor de presión y por tanto, las órdenes deben de ser en valores de presión.

Para tener una transformación inicial se utilizan las relaciones presión-desplazamientos obtenidas en la sección “Modelado”, recordando nuevamente, que por el tipo de material hiperelástico, estas simulaciones no son precisas, pero para las pruebas iniciales son aptas para su uso.

Por ello, el sistema estudiado se comienza por reconocer la acción deseada para transformarla a presión, valor sobre el cual actúa el controlador, esto ordena al actuador, que puede ser la bomba o la válvula, esta secuencia queda clara en el diagrama de la Figura 8.0.1, donde se definen 5 etapas, que van desde el grado de libertad a controlar hasta definir el actuador y su tipo para el caso de la válvula.

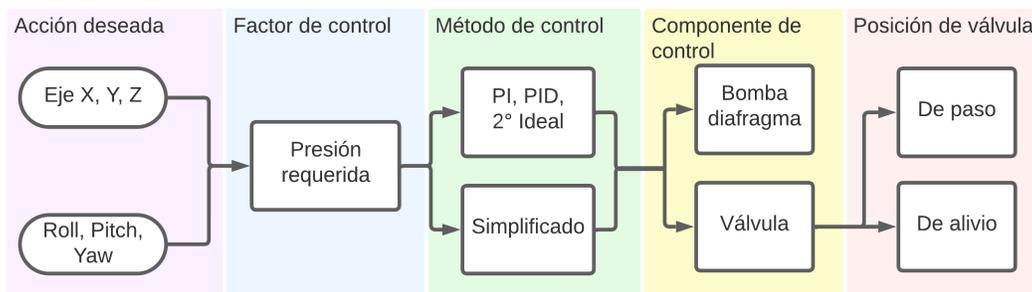


Figura 8.0.1: Diagrama de funcionamiento general del sistema, indicando las etapas del proceso y los posibles componentes de control.

Con la acción de salida que se requiere en el robot determinada se procede a trabajar en la definición de la estrategia de operación sobre la cual el sistema de control cambia el estado de operación de los actuadores, en el diagrama de la Figura 8.0.2 se muestra tal operación, donde si el error entre el sensor y la salida es negativo se procede a aumentar la presión interna del robot, siendo el caso contrario, se produce una descarga del sistema.

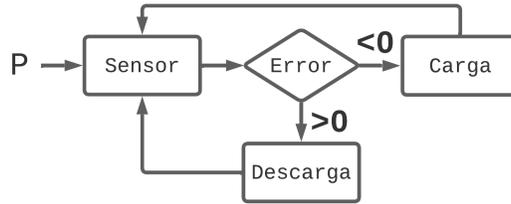


Figura 8.0.2: Estrategia de operación en función del error medido por la placa de desarrollo arduino Mega.

## 8.1. Descripción del sistema

Los sistemas de operación on-off típicamente actúan como su nombre lo indica, encendiendo y apagando según un límite de trabajo establecido, pero existen estudios que muestran que es conveniente no realizar un on continuo, sino escalarlo con un off que evite los aumentos bruscos que se traduzcan en picks lo cual evita también alteración en las mediciones producto de los cambios de corriente al cambiar el estado de los actuadores.

- **Clásico:** Se define por encender y apagar en función del error.

$$\begin{cases} t_{on} = f(p) & e \leq 0 \\ t_{off} = g(p) & e > 0 \end{cases} \quad (8.1)$$

- **Escalonado:** Aunque similar a la operación clásica, este caso usa un delay tipo off luego de operar la carga del sistema, lo cual evita que la presión interna del robot siga aumentando en el tiempo de calculo del sensor y la toma de decisión.

$$\begin{cases} \left. \begin{array}{l} t_{on} = f(p) \\ t_{off} = g(p) \end{array} \right\} & e \leq 0 \\ t_{off} = g(p) & e > 0 \end{cases} \quad (8.2)$$

Al usar el método de carga escalonada se espera que se reduzca la probabilidad de sobrepaso al inicio como se muestra en un ejemplo plasmado en la Figura 8.1.1, donde al tener un crecimiento continuo se espera un sobrepaso al inicio, luego al llegar a la presión deseada se activa el funcionamiento on-off, pero al tener el método escalonado, la subida es más lenta y estable, y no tiene sobrepaso notorios además de que se detecta que al apagar el actuador durante la medición del sensor se estabiliza la señal reduciendo la necesidad de filtros para la señal sensada.

### 8.1.1. Componentes de control

Ya sea se trabaje controlando la bomba de diafragma o la válvula solenoide, un factor que debe aclararse son los valores de los delay asociados al estado en “on” o al estado en “off”.

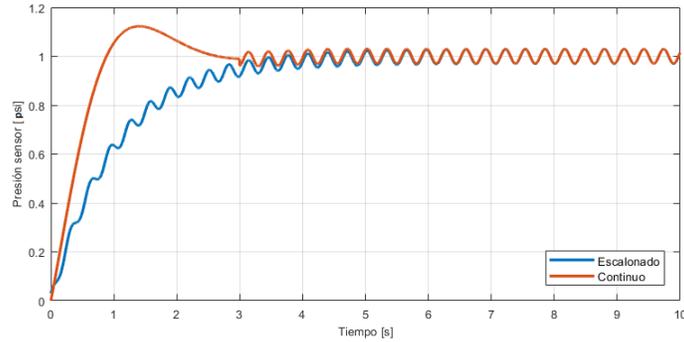


Figura 8.1.1: Comparación de efecto esperado entre un usar delay continuos o usar delay escalonados.

Como se verá a continuación, los valores delay determinan en gran parte el comportamiento de un sistema, ya sea, porque el estado de carga no logra obtener la presión deseada, o porque el estado abierto de la válvula libere demasiada presión, entre otros.

Por ello, se analizará el efecto del delay para tres casos de control, el primero será un control de tiempo de encendido de bomba, y los siguientes dos sobre control de la válvula y su posición en el sistema de bombeo.

### 8.1.1.1. Control de bomba

El sistema de control mediante accionamiento de encendido y apagado de la bomba, en primera instancia se compone de conectar la bomba, sensor y manómetro al mismo nodo piping de entrada al robot cúbico, tal como se dispone en el diagrama de la Figura 8.1.2.

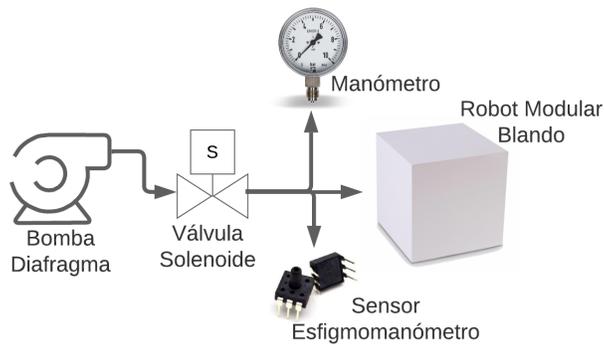


Figura 8.1.2: Diagrama de proceso para control de bomba.

Con la conexión realizada y la programación cargada a la placa de desarrollo (Anexo A) con la adecuada conexión del circuito, se procede a grabar los valores de presión del sistema en función del tiempo, tal como se gráfica en la Figura 8.1.3 que registra 8 mediciones asociadas a 8 valores de presión esperada que van de 1 hasta 8 [psi] con saltos de 1 [psi].

En el caso de tener un sistema clásico sin controlar el on-off como de la Figura 8.1.3.(a) se

aprecia que el sistema muestra un sobrepaso notoriamente superior a la salida esperada con un amplio ruido en el registro de la señal, lo cual se produce por los cambios de corriente que ocurren al cambiar el estado de operación del actuador.

En el caso (b), al poner un escalonamiento fijo de 4 [ms] para el delay on y off, se obtienen señales aún ruidosas debido al pequeño delay off, también resultan salidas más cercanas a lo esperado mostrando como el escalonamiento reduce los sobrepasos, pero a la vez existen pick de ruido notorios que pueden afectar a la operación del sistema.

Posteriormente, los casos (c) a (d) utilizan delay off más elevados que van desde 20 a 60 [ms] presentan un ruido reducido, sin los pick del caso (b) pero pasar a tener un tiempo de estabilización a la salida esperada mucho más largo que puede superar los 5000 [ms].

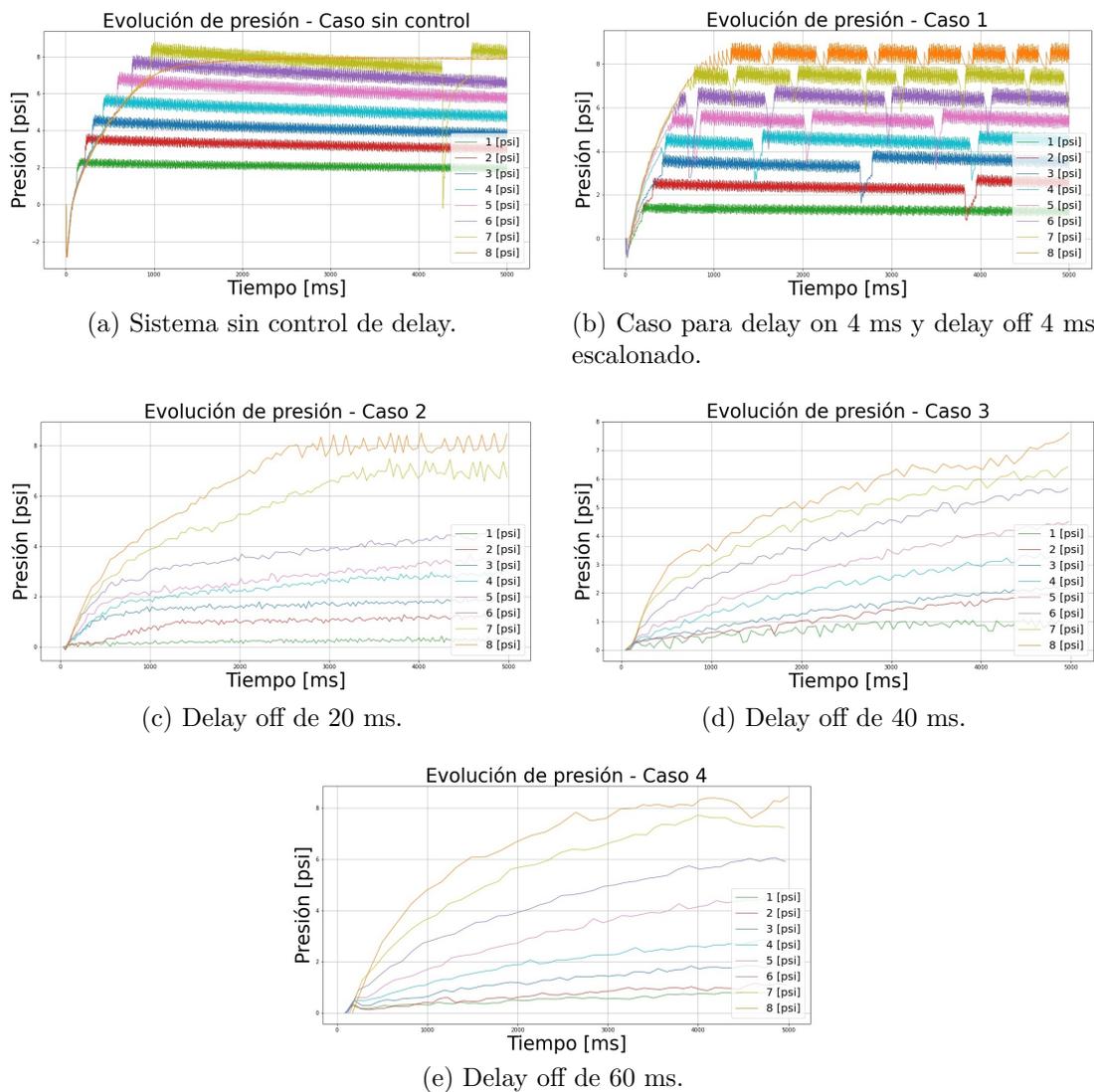


Figura 8.1.3: Estabilidad de presión para distintas presiones para componente de control bomba.

Lo anterior demuestra como esta operación de manejo de los tiempos lleva a estabilizar la salida, reducir el ruido sin necesidad de filtros pero a la vez aumenta el tiempo de establecimiento al 2 %, lo cual puede evitar una correcta definición de su controlador en el estado transiente.

Cabe destacar que aunque visualmente se muestran diferencias en las gráficas de la Figura 8.1.3, al medir la salida promedio del estado estacionario del sistema se muestra como todos los casos de estudio muestran que la salida promedio de presión que se acerca a lo deseado, por ello, se calcula otros factores que determinen el mejor caso de estudio.

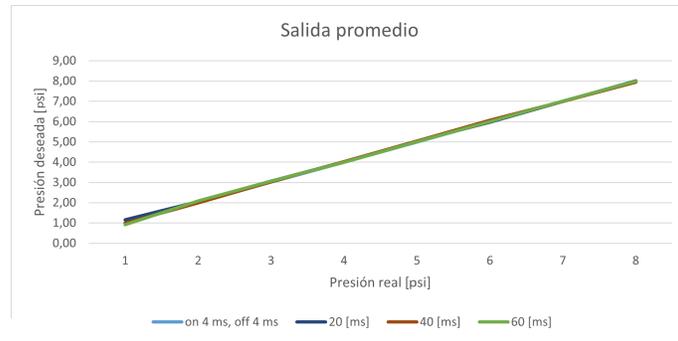
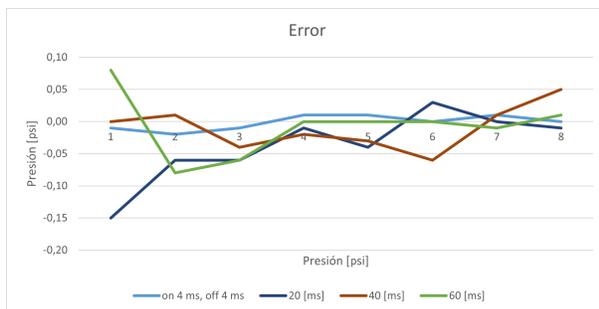
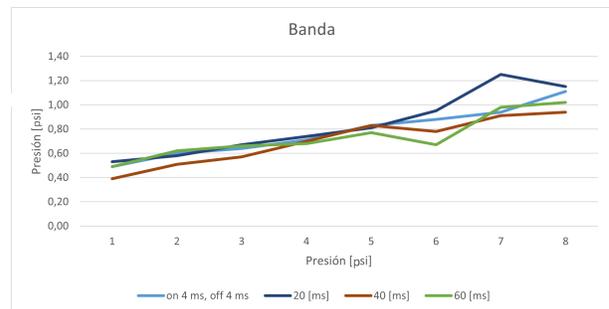


Figura 8.1.4: Diagrama de proceso para control de válvula de alivio.

La Figura 8.1.5 presenta otros 2 datos asociados a los casos de estudio, a ser, el error y el ancho de banda en el estado estacionario para el sistema en vacío, para el caso (a) asociado al error se detecta como los errores son mayores para presiones bajos como 1 ó 2 [psi], estabilizándose a presiones mayores pero no permite destacar cual de los tres casos de delay off alto es más conveniente, mostrando unicamente que el caso de 20 [ms] es menos estable y por tanto, queda inicialmente descartado, por ello, se pasa a estudiar la banda en la figura (b) donde aunque muestran cierta estabilidad a bajas presiones, ocurre que la banda aumenta con la presión de salida siendo el caso de 20 [ms] el menos estable lo cual demuestra nuevamente su descarte.



(a) Error registrado por sensores para los casos de estudio de la Figura 8.1.3.



(b) Ancho de banda registrado para los casos de estudio de la Figura 8.1.3.

Figura 8.1.5: Valores de error y ancho de banda asociados al caso de estudio de bomba como actuador.

A raíz de lo anterior se permite notar como los casos de 40 y 60 [ms] son indiferentes sobre su selección para las siguientes mediciones, tomando así arbitrariamente el valor de 40 [ms] de estado off como valor de trabajo.

Otro punto que debe destacarse que se encontró durante las operaciones anteriores es la relación entre la presión máxima que alcanza el sistema en base al tiempo fijo asignado al estado on, donde es posible llegar a la presión deseada solo con este parámetro aunque sin una adecuada estabilidad.

En la Figura 8.1.6 se resumen los delay para los tres casos de tiempo off mostrados con anterioridad, al medir el tiempo on requerido, se muestran 2 detalles notorios, a ser, primero es como existe cierto patrón de los valores lo que permite definir un ajuste exponencial que relaciona el tiempo on en virtud de la presión de la salida deseada. Además de que a mayores tiempos de off la curva aumenta su valor siendo que en la Ecuación 8.3 se define la ecuación asociada al tiempo off de 40 [ms].

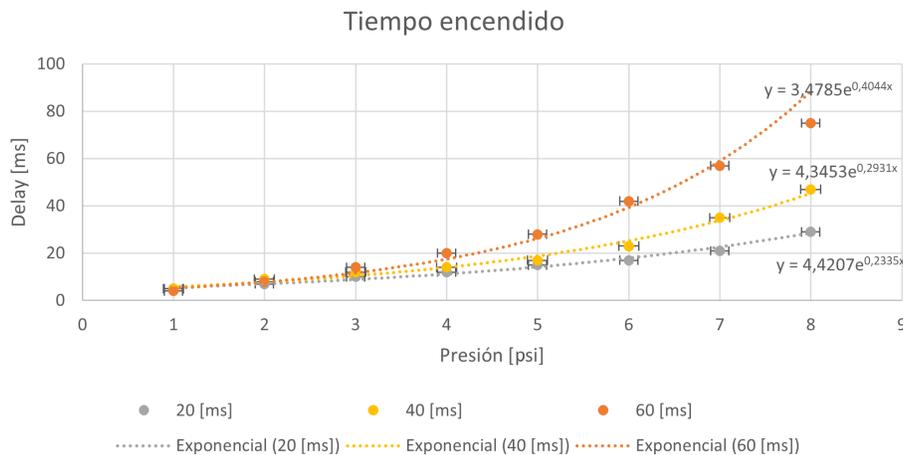


Figura 8.1.6: Aproximación de ecuación temporal para función de relación presión versus delay on en bomba de diafragma para distintos delay off.

$$g(p) = 4.345e^{0.293p} [ms] \tag{8.3}$$

### 8.1.1.2. Válvula de alivio

El sistema de control mediante accionamiento de válvula, primero se estudia como afecta el control al usarla como una válvula de alivio que se conecta directamente al nodo que se conecta la bomba y el robot, tal como se dispone en el diagrama de la Figura 8.1.7.

Al estar conectado la válvula como mecanismo de alivio, y tener una carga-descarga rápida, es requerido reconocer como afectan los tiempos de estado abierto y estado cerrado. Primero, se debe probar el tiempo mínimo requerido para que la válvula pueda ser accionada, de lo cual fue determinado que la válvula usada tiene un tiempo mínimo de 4 [ms], sobre el cual se probará el efecto de ir variando el tiempo off (mantener cerrada la válvula).

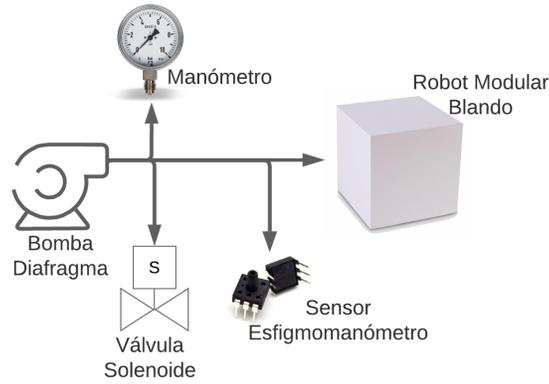


Figura 8.1.7: Diagrama de proceso para control de válvula de alivio.

Sin requerir otros elementos, es directo como mantener un delay on de 4 [ms] y variar el delay off no permite obtener las salidas de presión requeridas (Figura 8.1.8), por ello queda descartado este proceso, continuando por variar el tiempo on.

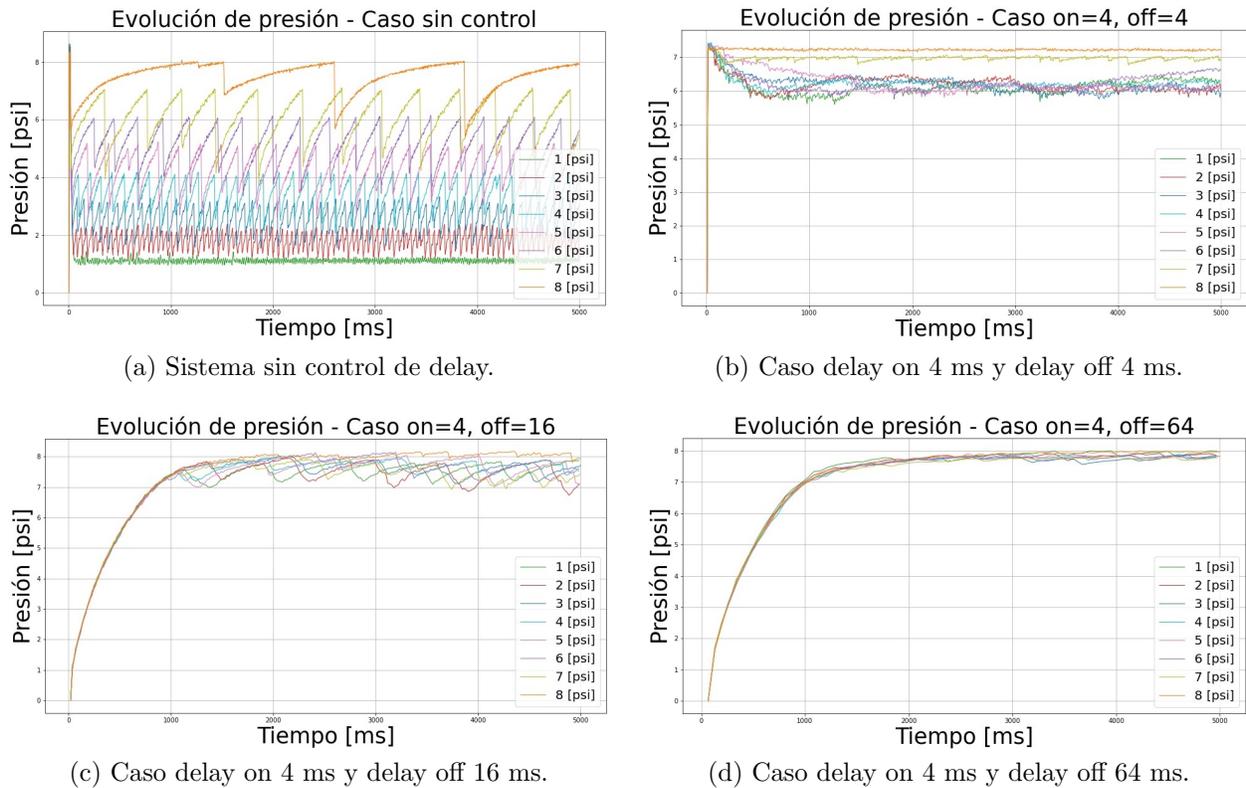


Figura 8.1.8: Estabilidad de presión para distintas presiones para componente de control válvula de alivio en incremento de delay off.

Por otro lado, al variar el tiempo apagado, se logra evitar estancarse solo en presiones altas, pero el ruido plasmado es notorio en las gráficas de la Figura 8.1.9, haciendo poco claro si alguna de las diversas re combinaciones es factible. Por lo anterior, se procede a analizar los siguientes

parámetros correspondientes al error y la salida promedio al estado estacionario.

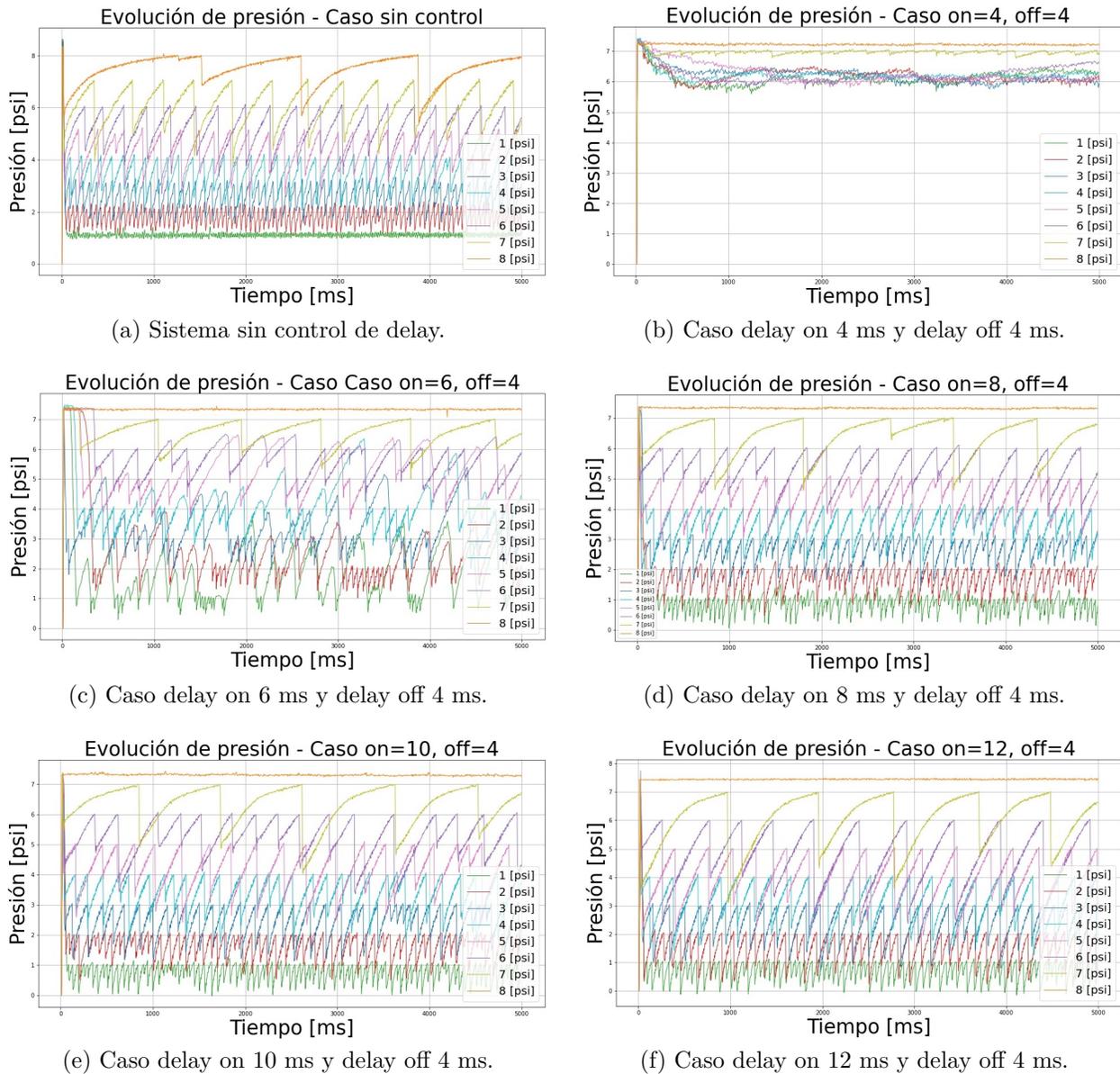
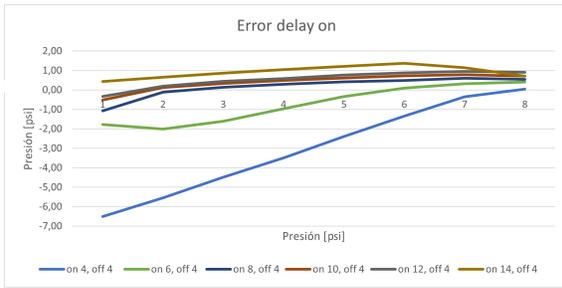


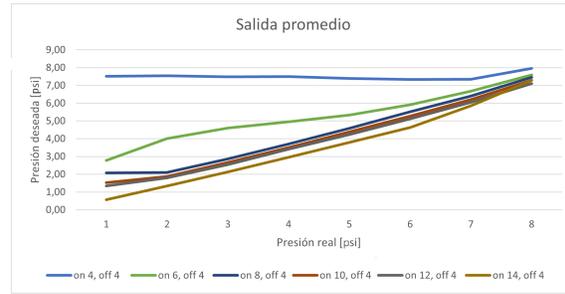
Figura 8.1.9: Estabilidad de presión para distintas presiones para componente de control válvula de alivio en incremento de delay on.

De la Figura 8.1.10 se aprecia como el menor error puede indicarse para “on 9, off 4”, pero solo para presiones mayores a 4 [psi], siendo que al ver la salida promedio predomina el caso “on 12, off 4” como el más óptimo, no permitiendo una clara determinación del mejor caso.

En la práctica, al operar este sistema con un robot, es claro que los pick de las gráficas no son solo errores del sensor, sino que representan movimientos bruscos producto de la rápida liberación de la presión, por la cual usar una válvula de alivio queda descartado.



(a) Error registrado por sensores para los casos de estudio de la Figura 8.1.9.



(b) Salida promedio por sensores para los casos de estudio de la Figura 8.1.9.

Figura 8.1.10: Valores de error y salida promedio asociados al caso de estudio de válvula de alivio como actuador.

### 8.1.1.2.1. Válvula de paso

Para establecer un sistema de válvula de paso, se interfiere el piping que va desde la bomba hacia el nodo de conexión del robot y el sensor, tal como se plantea en el diagrama de la Figura 8.1.11.

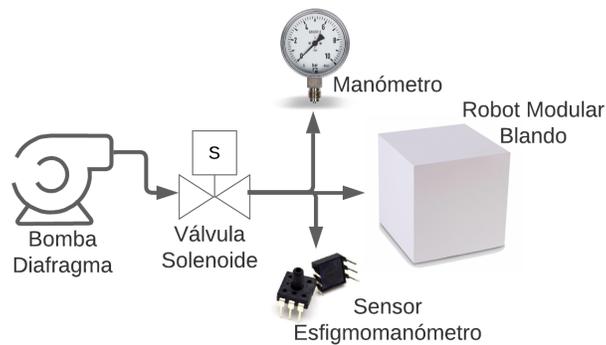
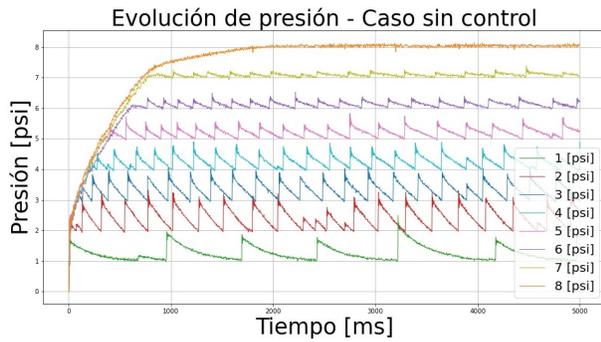


Figura 8.1.11: Diagrama de proceso para control de válvula de paso.

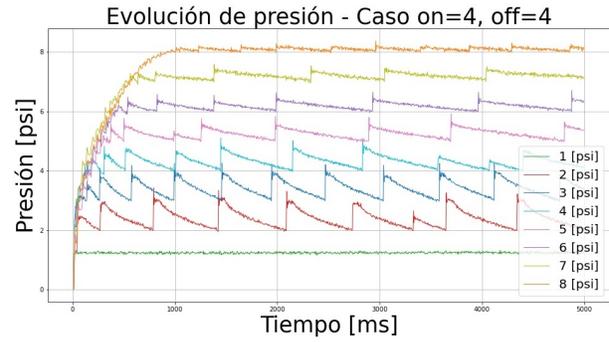
Para este caso al igual que el estudio del caso de alivio, se realizan un estudio de aumento de  $t_{off}$  manteniendo la variable contraria constante.

Primero que nada se destaca como incluso el caso en que no se controlan los delay, como el caso (a) de la Figura 8.1.12, se aprecia una tendencia cercana al punto de presión requerido, sin embargo, hacer un aumento del tiempo en off va disminuyendo el ruido de las mediciones.

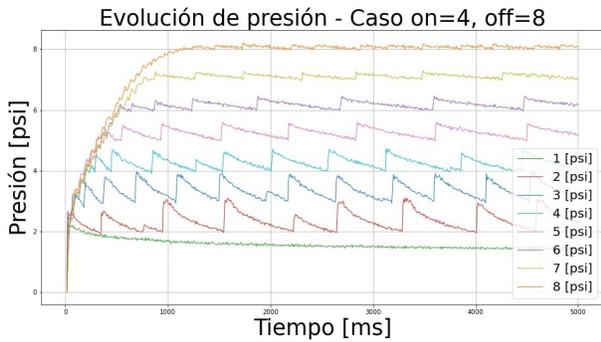
De los casos (b), (c) y (d) se produce que los pick de aumento al cambiar de estado cerrado a abierto son claramente notorios, siendo el caso (e) el que se aprecia más estable, por otro lado, el caso (f) es el caso con menos estabilidad de todas las muestras.



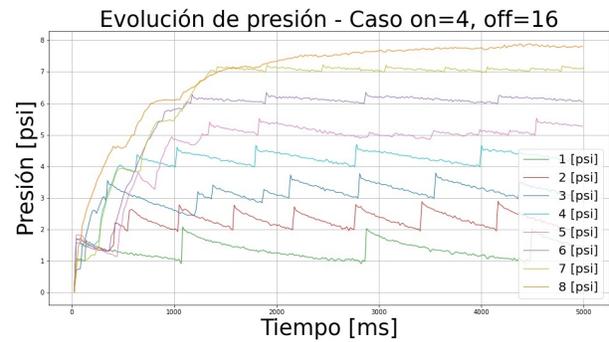
(a) Sistema sin control de delay.



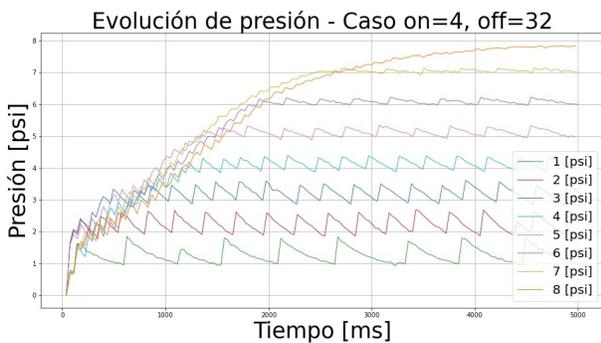
(b) Caso delay on 4 ms y delay off 4 ms.



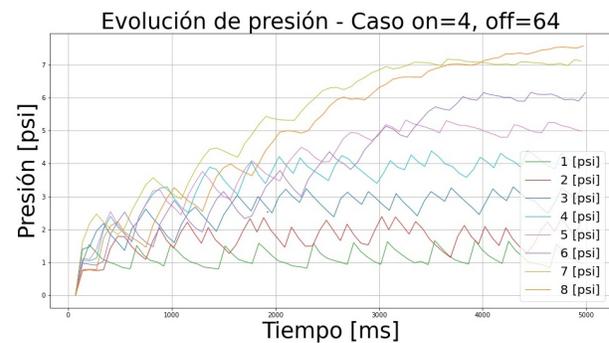
(c) Caso delay on 4 ms y delay off 8 ms.



(d) Caso delay on 4 ms y delay off 16 ms.



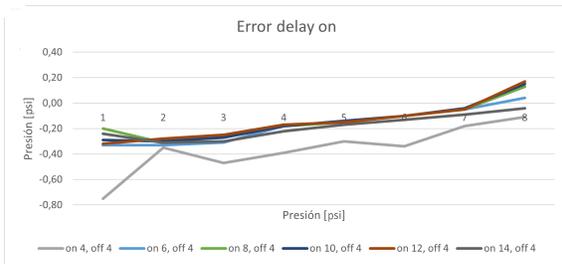
(e) Caso delay on 4 ms y delay off 32 ms.



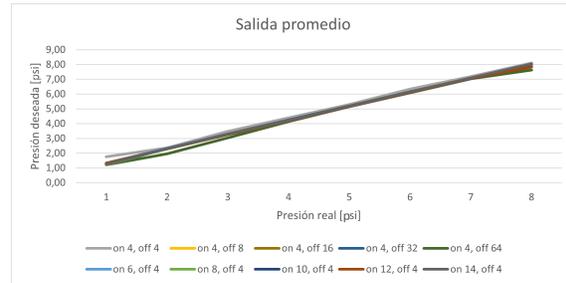
(f) Caso delay on 4 ms y delay off 64 ms.

Figura 8.1.12: Estabilidad de presión para distintas presiones para componente de control válvula de paso en incremento de delay off.

Por otro lado, al analizar los anchos de banda y el error presentados en la Figura 8.1.13 se aprecia que el caso de  $t_{off} = [8, 16, 32][ms]$  los errores son similares y bajos, siendo de caso de  $t_{off} = 64[ms]$  el de menor error, descartando el caso de  $t_{off} = 4[ms]$  por ser el de mayor error. En el caso de la banda, se aprecia que el caso de “on=4, off=32” es el más conveniente.



(a) Error registrado por sensores para los casos de estudio de la Figura 8.1.12.



(b) Salida promedio por sensores para los casos de estudio de la Figura 8.1.12.

Figura 8.1.13: Valores de error y salida promedio asociados al caso de estudio de válvula de paso como actuador.

Siendo que los datos muestran una intersección de conveniencia, se selecciona ese caso como el óptimo, el caso de “on=4, off=3”.

# Capítulo 9

## Resultados

Los métodos de control aplicados a los robot modulares blandos muestran ser funcionales para la válvula de paso y para la bomba, por lo cual, se aplican en primera instancia al sistema en vacío (sin modulo conectado) lo que permite comparar cada controlador y ver su respuesta ante el escalón unitario.

### 9.1. Comparaciones de métodos en vacío

Al realizar las mediciones para los 8 controladores presentados en la Tabla 9.1 se registran los valores de error asociados al estado estacionario y al estado transiente divididos en tres bloques caracterizados por el un sistema sin control, sistema de control moderno y el método simplificado.

Estos datos muestran que un controlador tipo ideal tiene mejores resultados para el caso moderno a la vez que un sistema que funciona en base a un función de grado 3 decreciente es mejor para el caso simplificado.

Dentro de los 3 casos seleccionados, si se incluye directamente el caso sin control, se detecta que existe una tendencia a tener menor errores en el estado transiente para la válvula, donde en el caso opuesto existe mejor desempeño de la bomba en el estacionario.

Con tales resultados se procede a obtener la salida en función del tiempo para los dos controladores evaluados, considerando también la salida esperada en base al controlador trabajado.

En la Figura 9.1.1 se destacan en azul los registro de la bomba, rojo para la válvula de alivio y verde para el controlador, seleccionando una operación que trabaja en base a un tiempo de establecimiento al 2% de 5000 [ms] y una presión deseada de 5 [psi], en particular, se nota como la definición de la bomba no sigue el controlador, siendo en la realidad que muestra un comportamiento independiente del controlador con las cuatro gráficas de similar forma.

Tabla 9.1: Tabla resumen de errores asociados a los métodos de control estudiados, considerando un error para estado estacionario y un error para estado transiente con desviación de 0.02 [mm].

Tipo	Método	Accionamiento	Transiente	Estacionario
-	<i>Sin Control</i>	<i>Bomba</i>	<b>-1.07</b>	<b>0.01</b>
	<i>Sin Control</i>	<i>Válvula</i>	<b>0.13</b>	<b>0.19</b>
Moderno	PI	Bomba	0.51	0.10
	PI	Válvula	0.14	0.20
	PID	Bomba	0.57	0.08
	PID	Válvula	0.32	0.20
	<i>Ideal</i>	<i>Bomba</i>	<b>0.45</b>	<b>0.05</b>
	<i>Ideal</i>	<i>Válvula</i>	<b>0.05</b>	<b>0.20</b>
Simplificado	Exponencial	Bomba	0.41	0.09
	Exponencial	Válvula	0.17	0.21
	<i>Grado 3</i>	<i>Bomba</i>	<b>0.35</b>	<b>0.09</b>
	<i>Grado 3</i>	<i>Válvula</i>	<b>0.25</b>	<b>0.21</b>
	Serie lineal	Bomba	0.79	0.01
	Serie lineal	Válvula	0.48	0.21
	Serie seno	Bomba	0.76	0.08
	Serie seno	Válvula	0.29	0.18

Por otro lado, la válvula muestra un mejor seguimiento en el transiente para los casos (b) control ideal y (c) control función exponencial, siendo el caso (d) control por serie lineal inversa muestra un seguimiento defectuoso producto de que este controlador se asemeja demasiado a un sistema sin control producto de su rápida carga.

Ahora dentro de los dos mejores casos destacados, el sistema de control ideal muestra una mejor operación en el transiente producto de que su carga inicial esta más amortiguada que el caso asociado a la función exponencial.

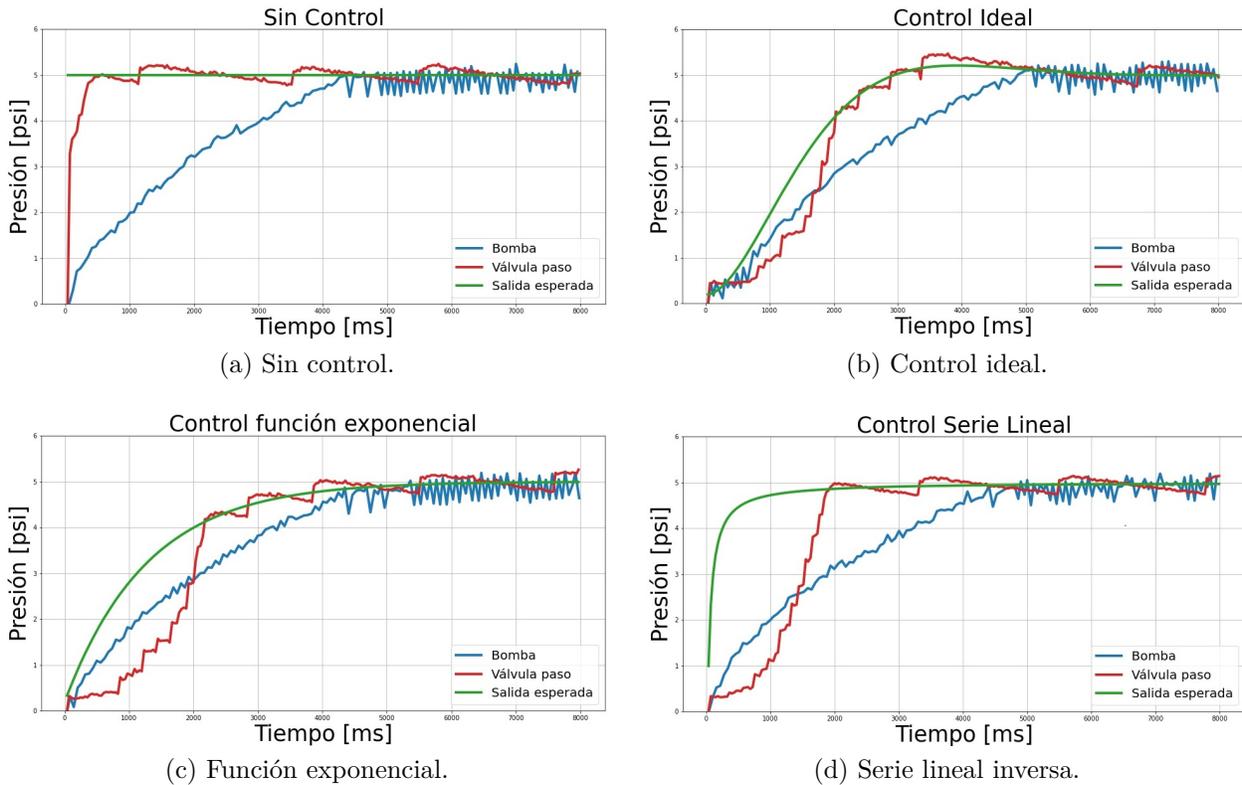


Figura 9.1.1: Gráficas comparativas para los controladores diseñados. (Más ejemplos en Anexo D)

## 9.2. Pruebas en módulos

Seleccionados los 2 mejores controladores, uno de cada método se procede a evaluar su desempeño en los robots uniaxiales y rotatores para sus tres tamaños, donde se espera que la salida converja a los datos plasmados en la Tabla 9.2 o al menos que sigue una tendencia cercana, al recordar que estos son simulaciones y no una clonación del proceso lo que se traduce en múltiples factores de discrepancia como lo son el comportamiento del hilo, la homogeneidad del material y el centrado perfecto del núcleo.

Aun así, las simulaciones permiten ver si la forma dada sigue el grado de libertad deseado y si la deformación se acerca a la realidad, en particular, la Tabla 9.2 registra el comportamiento de los robots uniaxiales y rotatores para una presión interna de 4 [psi], pero debe mencionarse como el caso uniaxial puede verse limitada su deformación producto de que en la práctica se encuentra una capa semi-dura de tela en sus caras planas respecto al núcleo para evitar concentraciones de esfuerzo que llevan al robot a generar bolsas de aire que pueden romperse.

De los datos de la Tabla 9.2 se aprecia que entre mayor sea el tamaño de los robots existe un aumento de la capacidad de deformación esperada, no solo en un valor numérico, sino también

Tabla 9.2: Salidas de deformación para una presión de entrada de 5 [Psi].

Tamaño [mm]	20	24	28
Grosor [mm]	3.5	3.5	3.5
Presión [psi]	4	4	4
Eqn. Rotator	1.782P - 0.0117	3.163p - 0.0240	4.182p - 0.0236
Ángulo [deg]	7.12	12.63	16.70
Factor giro [deg/mm]	0.356	0.526	0.596
Eqn. Uniaxial	8.53P + 0.390	5.96p + 0.114	3.50p + 0.037
Deformación [mm]	14.04	23.95	34.51
Factor Deformación [mm/mm]	0.702	0.997	1.233

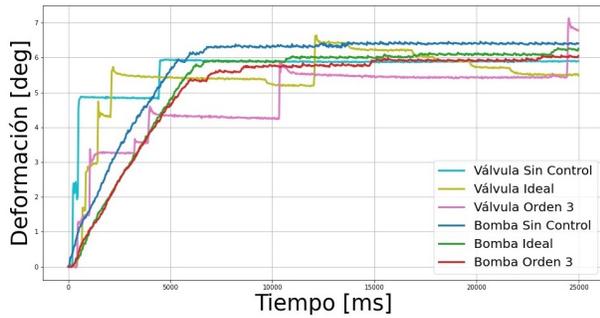
en un factor porcentual creciente lo cual quiere decir que entre mayor sea el tamaño del robot modular cúbico, mayor es su capacidad de deformación respecto a su tamaño.

Con lo anterior, se procede a analizar las deformaciones reales registradas por el software de seguimiento para los robots uniaxiales y rotadores de las Figura 9.2.1 y 9.2.2 que retratan el comportamiento para 3 controladores y los dos actuadores seleccionados, los controladores seleccionados fueron “Sin control”, “Segundo orden ideal“ y ”Función convergente a 1 tipo orden 3“.

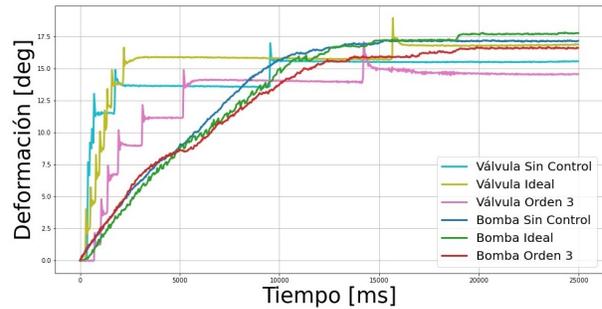
La Figura 9.2.1 al presentarnos las gráficas de los módulos cúbicos, presenta un comportamiento en el que los seguimientos para la válvula son inestables al mostrar pick de crecimiento rápido cada cierto tiempo, pick que se vuelven menos notorios con el crecimiento del robot, mostrando una tendencia a estabilizarse en algún momento, aunque el limite estudiado no permite definirlo con claridad.

Por otro lado, los datos asociados al mecanismo de la bomba, muestran gran estabilidad, con poco ruido que en la práctica no puede demostrarse su procedencia, al ser de baja variación, puede deberse al ruido de la señal del sensor, problemas con el tracker o hasta la estabilidad del video grabado para el seguimiento, lo que si es posible destacar es que este ruido es menor al 10 % asociado al ruido de la válvula.

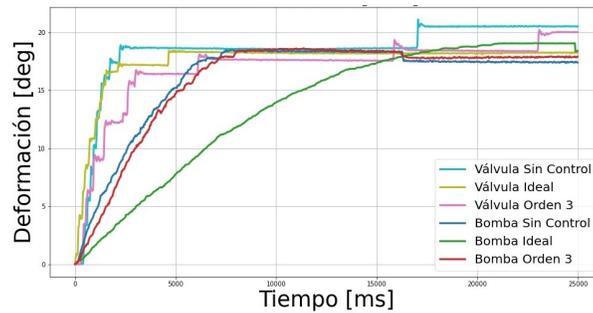
El tercer factor destacable, se asocia al control del estado transiente, siendo notorio como la válvula muestra un mejor comportamiento, siendo que para la bomba puede notarse un nulo seguimiento, mostrando únicamente una carga dependiente de la definición on-off escalonada ya analizada. Estos gráficos además permite ver como seguimiento de la bomba empeora al aumentar el tamaño, factor asociado a que el método on-off en la realidad limita el caudal de entrada, siendo que a mayor tamaño de llenado, es claro que se requiere mayor tiempo para alcanzar una misma presión interna.



(a) Robot cúbico de 20 mm.



(b) Robot cúbico de 24 mm.



(c) Robot cúbico de 28 mm.

Figura 9.2.1: Respuesta del robot cúbico rotator ante una entrada escalón de 4 [psi], las gráficas contrastan los 3 métodos de control seleccionados.

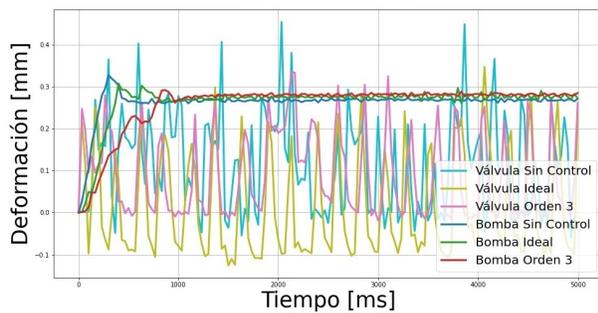
El ultimo factor relevantes se asocia a la deformación final, ya que aunque los tres casos llegan a la misma presión de 4 [psi] se logran rotaciones mayores al aumentar el tamaño del robots, donde al compararlo con las simulaciones se cumple la tendencia, pero es claro que numéricamente existen discrepancias, ya que en las mediciones se logran deformaciones medias de 5.8, 15.4 y 18.7 [deg] ligeramente diferentes a las 7.12, 12.63 y 16.70 [deg] de las simulación, lo cual muestra a priori que en cierto punto un aumento del tamaño del robot ya no tendrá efecto sobre la capacidad de deformación esperando la existencia de un tamaño óptimo que maximice la deformaciones para una misma presión de entrada.

El caso de la Figura 9.2.2 asociado a la deformación de los robots uniaxiales, sigue la tendencia del caso rotator anterior con la salvedad de que el seguimiento en el transiente se vuelve más claro de diferencia su control en el transiente para la válvula, claridad que aumenta con el tamaño del robot como que claro en la gráfica (c) si se realiza el contraste con las figuras (a) y (b), en especial con la (a) donde la válvula expone un seguimiento nulo.

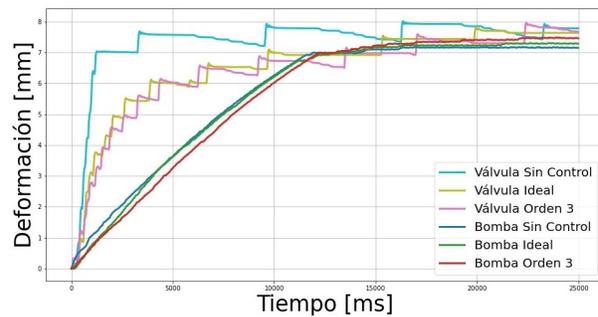
Otro detalle notable es como para el robot de 20 [mm] la bomba si es capaz de seguir u obtener la presión de salida deseada, mostrando gran estabilidad, lo cual puede concluir en su utilidad para ambos tipos de robots, siendo no así para la válvula que solo fue útil para el robot rotator.

Finalmente, el detalle mas destaco corresponde a la correlación con la simulación en donde se producen salidas cercana a 0.26, 7.30 y 10.00 [mm], valores no relacionados a lo esperado, que

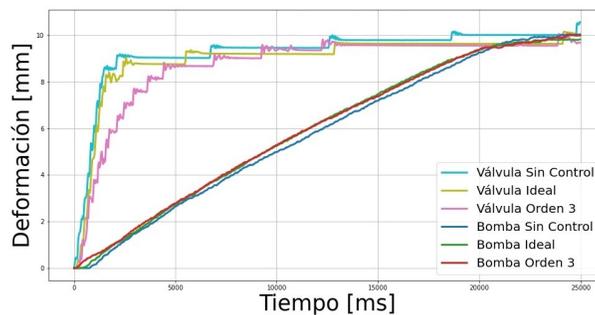
deberían ser cercana a 14.04, 23.95 y 34.51 [mm], lo cual es causa de la utilización de material semi-duro en las caras del robot uniaxial, pero que no pudo ser simulado correctamente, lo cual hace sugerir un mayor estudio de esta característica en futuros trabajos.



(a) Robot cúbico de 20 mm.



(b) Robot cúbico de 24 mm.



(c) Robot cúbico de 28 mm.

Figura 9.2.2: Respuesta del robot cúbico uniaxial ante una entrada escalón de 4 [psi], las gráficas contrastan los 3 métodos de control seleccionados.

Finalmente puede destacarse como el sistema de actuador como bomba permite un sistema de seguimiento más estable que la válvula con la capacidad de reducir su banda de oscilación de deformación hasta valores superiores al 90 %, tal como se registra en la Tabla 9.3 que presenta en ancho de banda para las dos figuras anteriores ya estudiadas.

Y aunque ambos robots presentan notorias reducción de banda por el uso de la bomba, ocurre un efecto no esperado, como que para el uniaxial su ancho de banda aumenta con el aumento del tamaño del robot siendo que para el rotator ocurre lo contrario al disminuir la banda y ser cada vez más estable con el aumento de tamaño lo cual es coincidente con el hecho de que la válvula presenta gráficas mayormente estables el caso del uniaxial.

Pero a pesar de en ambas muestras las medidas registradas se alejan de lo esperado por las simulaciones, los tendencias de comportamiento esperado se mantienen mostrando crecimientos de deformación rápido para la válvula, siendo la bomba un caso en el que carga es más lenta y suave, sin seguir el control esperado, demostrando que el control por bomba no es útil para casos en que el tiempo de establecimiento es menor a 10 [s], lo cual no quita la cualidad de que controlar la

Tabla 9.3: Variación de amplitud de deformación en casos de estudio con reducción porcentual destacada.

	Uniaxial 20 [mm]	Uniaxial 24 [mm]	Uniaxial 28 [mm]	Rotator 20 [deg]	Rotator 24 [deg]	Rotator 28 [deg]
V-SC	0.47	0.68	0.67	1.32	2.56	3.44
V-Ideal	0.35	0.33	0.54	1.47	2.56	2.10
V-Orden3	0.41	0.74	0.86	1.73	1.87	3.86
Banda media válvula	0.41	0.58	0.69	1.51	2.33	3.14
B-SC	0.02	0.01	0.07	0.11	0.19	0.13
B-Ideal	0.01	0.07	0.07	0.17	0.24	0.18
B-Orden3	0.01	0.04	0.05	0.22	0.18	0.14
Banda media bomba	0.01	0.04	0.06	0.14	0.21	0.15
Reducción de banda [%]	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9

bomba permite mayores estabilidades al poseer menor ruido de oscilación.

Finalmente, se debe destacar el comportamiento en la descarga presentado en la Figura 9.2.3, en ella se aprecia como para los 3 casos de estudio asociados a la bomba se puede descargar el sistema al realizar un cambio de componente actuador desde la bomba hacia la válvula, lo cual se produce porque la configuración de las conexiones asociadas al sistema de control de bomba de diafragma presentado en la Figura 8.1.3 favorece la liberación de presión, siendo que el caso de la válvula no tiene punto de fuga controlable a menos que se decida ubicar una segunda válvula como componente de alivio lo cual es contraproducente a lo deseado al querer utilizar solo un componente de cada tipo.

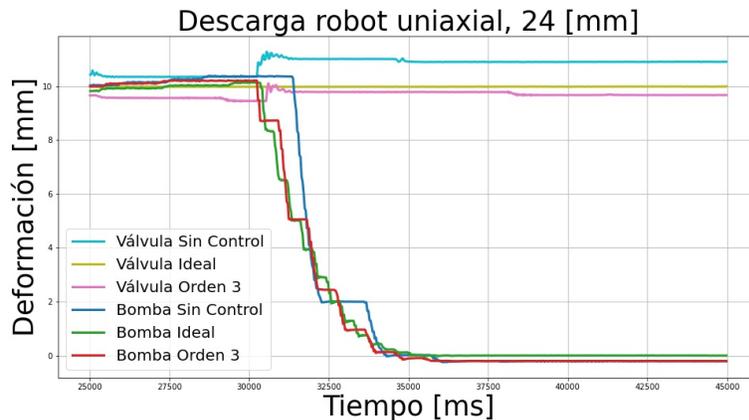


Figura 9.2.3: Comportamiento ante la descarga de robot uniaxial de 28[mm].

Es interesante notar, como la descarga es más simétrica para los dos casos de la bomba, opuesto a la carga donde era posible apreciar ciertas diferencias entre cada controlador analizado, la única permanencia corresponde a la tasa de caída del sistema sin control, donde se mantiene una caída más pronunciado que no es capaz de llegar a su valor mínimo en el menor tiempo posible debido a la definición de control on-off escalonado.

# Capítulo 10

## Discusión

La siguiente sección buscar resumir los logros y dificultades de cada etapa predispuesta en la metodología de trabajo, ya que, a lo largo del trabajo se realizan acciones y resultados que no son aptos para ubicarlos en la sección de resultados.

### 10.1. Simulación y fabricación

La etapa de simulación y fabricación fue llevada a termino sin contratiempos, en particular, se encontró que la manufactura de los moldes puede ser mejorada al construir solo piezas cubicas que reducen los voladizos y mejoran las adherencias en la impresión 3D.

Cada molde fue correctamente impreso demostrando que cambiar su forma exterior facilita el trabajo, además de que las formas de los núcleos son capaces de cumplir los movimientos requeridos. Sin embargo, el trabajo en esta etapa demostró múltiples dificultades que pueden afectar el desempeño de los módulos, entre estos destacan que aunque se requiere que el núcleo de vaciado este centrado, es muy complicado llevarlo a cabo, causando que los robots tengan secciones más delgadas que deforman el desplazamiento esperado.

### 10.2. Circuito

El circuito por su parte fue diseño y construido acorde a los requerimientos del trabajo, definiendo la programación adecuada a la placa de desarrollo usada.

Por otra parte, se logra establecer formas de control adecuadas al manejo de la bomba o válvula como componente actuador determinando la calibración del sensor y los tiempo de delay asociado a los tiempo de carga y descarga.

### 10.3. Controladores

Se establecieron 7 controladores distintos que abarcan desde los métodos modernos hasta estableciendo de un método simplificado. Donde se aprecia como cada modelo permite controlar en

mejor o peor medida al sistema, notando que los controladores simplificados por serie son poco controlables, sin embargo, los métodos modernos y el uso de funciones convergentes a uno se obtienen resultados aceptables en la respuesta al escalón unitario.

## 10.4. Desempeño

A continuación se busca resumir los beneficios y desventajas de los métodos de control utilizados, ya sea asociados al uso de distintos actuadores o al sistema de control del estado transiente.

La válvula demostró tener mejor desempeño en el estado transiente al tener mejor seguimiento del controlador seleccionado a la vez que la bomba predomina en el estado estacionario con una notoria reducción de los pick del seguimiento, mostrando así la bomba una reducción superior al 90 % de la amplitud del ancho de banda de oscilación.

Sin embargo, el uso de un encendido y apagado de una bomba puede concluir en una notoria reducción de la vida útil producto que el componente no fue diseñado para tal operación, además debe de trabajarse en el efecto del accionamiento de la bomba sobre el sistema del sensor producto de que un cambio de estado implica alteración de las corriente del circuito producto de que el sistema requiere tener las tierras conectadas entre si mismas.

Por otra el uso del sistema de on-off escalonado usado a lo largo de las mediciones tiene dos problemas de los cuales se debe estar consiente, el primero es como su uso requiere que previo a su uso se establezca una relación entre el tiempo de estado on en función de la presión que se quiere lograr, lo cual es la causa de que este sistema sea más estable al limitar el pick máximo al que puede llegarse. El segundo factor es como usar un sistema escalonado, reduce el tiempo de carga a tiempos cercanos a 10 [s] lo cual implica que el sistema no pueda seguir los controladores del transiente.

Por otro lado, los métodos de control del transiente asociados al control moderno y a un método de control simplificado mostraron ser ambos utilizables a la planta trabajada, pero se destaca que el método simplificado es de mayor relevancia para el trabajo producto de que requiere menor tiempo de calculo para la placa de desarrollo, factor importante considerando como en la practica se utilizan matrices de robots lo cual lleva a multiplicar el tiempo de cálculo por docenas de veces.

Finalmente, solo el sistema de control que implica tener la válvula como componente de alivio permite tener un sistema descárgale por la posición de la válvula, siendo el caso de válvula de paso no controlable esta componente sin requerir ubicar una nueva válvula como componente de alivio que en la práctica se vuelve ineficiente producto de que implica tener que aumentar los componentes por n veces según la cantidad de módulos que requieran en el uso final saliéndose del requisito de utilizar solo una válvula y una bomba para cada modulo estudiado.

## 10.5. Limitaciones

- Por limitación de componentes el caso de válvula de paso no permite descarga de presión.
- El encendido y apagado de una bomba de diafragma puede reducir la vida útil del componente.
- Válvula solenoide posee un diámetro elevado al compararlo con el tamaño de los robots que implica carga prácticamente instantánea.

## 10.6. Posibles mejoras

- Utilizar filtros sobre las señales de salida del sensor, ya que las mediciones muestran como el ruido del sensor es notoriamente mayor al ruido presentado por las vibraciones en el robot por el accionamiento de la bomba.
- Utilizar válvula de menor diámetro de paso para reducir el paso de flujo.
- Cambiar válvula solenoide por válvula aguja.
- Utilizar 2 válvulas y una bomba para el control utilizando los 3 componentes como actuadores.

## 10.7. Trabajo futuro

- Estudiar el efecto del accionamiento sobre la vida útil de la bomba.
- Probar el control sobre distintos tipos de bombas para comprender como afecta el accionamiento interno al control.
- Probar el control de bomba para matrices de módulos y reconocer como los módulos interfieren unos con otros.

# Capítulo 11

## Conclusiones

La investigación de la robótica modular blanca busca mejorar las formas, los materiales, métodos de producción y en especial, los métodos de control que permitan que los robots sean más accesibles, fácilmente manufacturable y de bajo costo. Este trabajo busco aportar en estas direcciones, en especifico, el control de sistemas al simplificar los métodos numéricos y validar el uso de la bomba como componente actuador, componente que típicamente es usado solo como el generador de la neumática.

Al reconocer que el *tiempo de establecimiento* y el *sobrepaso* son parámetros fundamentales del control de sistemas, es posible establecer una formulación de respuesta al escalón unitario que no requiere pasar por el espacio de Laplace y aun así obtener una salida que se asemeja a un control PID con un  $k_d = 1$ , es decir, un sistema sin sobrepaso.

Además, de que el trabajo mostró como por la escala del sistema no solo es posible controlar la válvula como típicamente se hace, sino que también se puede controlar la bomba como componente actuador dando al sistema una mayor estabilidad al sacrificar la vida útil de tal componente y hacer que el sensor entregue una señal con mayor ruido.

En el uso de la válvula como actuador registra un seguimiento que expone un menor error promedio en el estado transiente, y por el contrario, la bomba tiene menor error promedio en el estado estacionario donde se puede indicar que el control de la bomba tiene mejor comportamiento en la robótica blanda.

Por otra parte y no menos importante, el trabajo plantea un cambio en la manufactura de los moldes al simplificar sus formas exteriores estableciéndolo como un cubo sin voladizos. Además de que las simulaciones para los dos robots modulares blandos estudiados muestran gran cercanía a los desplazamientos esperados, donde las diferencias son producto de las fugas y las deficiencias que se producen en la etapa de inyección y curado.

Finalizando, se puede decir que el control por bomba es muy factible entregando gran esta-

bilidad ante vibraciones, además de demostrar que en plantas de carga rápida no es necesario utilizar controladores modernos, sino que puede simplificarse para obtener resultados similares a un controlador PID siendo posible mejorarlo utilizando una mezcla de actuadores según el estado temporal del proceso.

## 11.1. Cumplimiento de objetivos

En general, se cumplen los objetivos de la siguiente manera:

- Se evaluó el desempeño de 3 sistemas de control utilizando una bomba de diafragma y una válvula solenoide demostrando como la bomba es capaz de reducir el ancho de banda en valores superiores al 90 % según sea el caso.
- Se diseñaron y simularon controladores PI, PID e ideal de segundo grado para la planta así como se diseñaron dos controladores por serie y dos controladores por funciones convergentes que se muestran tener un comportamiento de respuesta ante el escalón unitario con sobrepaso nulo y semejante al caso de controlador PID con  $k_d = 1$  para el caso de las funciones convergentes a 1.
- Se contrastaron los métodos modernos con los métodos simplificados mediante una métrica de error promedio diferenciado entre zona transiente y zona estacionaria de funcionamiento.
- Se implemento un sistema de control capaz de utilizar la válvula o la bomba como componente actuador, mostrando al menos 3 distintas configuraciones al utilizar solo un componente de cada tipo.

# Bibliografía

- [1] Medina, J. y Vélez, P., “Soft robotic: Una nueva generación de robots,” 2014, doi:<https://dx.doi.org/10.1002/andp.19053221004>.
- [2] Margheri, L., Laschi, C., y Mazzolai, B., “Soft robotic arm inspired by the octopus: I. from biological functions to artificial requirements,” 2012, doi:<https://doi.org/10.1088/1748-3182/7/2/025004>.
- [3] Shepherd, R. F., Ilievski, F., Choi, W., Morin, S. A., Stokes, A. A., Chena, A. D. M. X., Wang, M., y Whitesides, G. M., “Multigait soft robot,” 2011, doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.1116564108>.
- [4] Amend, J. R., Jr., Brown, E. M., Rodenberg, N., Jaeger, H. M., y Lipson, H., “A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material,” 2012, doi:<http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2011.2171093>.
- [5] Grzesiak, A., Becker, R., y Verl, A., “The bionic handling assistant: a success story of additive manufacturing,” 2011, doi:<http://dx.doi.org/10.1108/01445151111172907>.
- [6] VERGARA, A. A., “Diseño y fabricación de robots modulares blandos,” 2015, doi:<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/132941>.
- [7] Ilievski, D. F., and Dr. Robert F. Shepherd, D. A. D. M., Chen, D. X., y Whitesides, P. G. M., “Soft robotics for chemists,” 2011, <https://doi.org/10.1002/ange.201006464>.
- [8] Wehner, M., Truby, R. L., Fitzgerald, D. J., Mosadegh, B., Whitesides, G. M., Lewis, J. A., y Wood, R. J., “An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots,” 2016, doi:<https://doi.org/10.1038/nature19100>.
- [9] Shepherd, D. R. F., Stokes, D. A. A., Freake, J., Barber, D. J., Snyder, D. P. W., Mazzeo, D. A. D., Cademartiri, D. L., Morin, D. S. A., y Whitesides, P. G. M., “Using explosions to power a soft robot,” 2013, <https://doi.org/10.1002/ange.201209540>.
- [10] Ugalde, J. C., “Fabricación y caracterización de nuevo robot blando con morfología de un gusano,” 2017, doi:<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146772>.
- [11] Reina, F. L., “Diseño de un robot modular,” 2021, doi:<http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/28836>.
- [12] Yim, M., Duff, D. G., y Xerox, K. D. R., “Polybot: a modular reconfigurable robot,” 2000, doi:<https://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.844106>.

- [13] Zhang, H. X., Xie, J. G.-G. Z., Cheng, S., y Zhang, J. W., “Development of a low-cost flexible modular robot gz-i,” 2008, doi:<https://doi.org/10.1109/AIM.2008.4601663>.
- [14] Mendoza, R. F., Hiller, J. D., Stoy, K., y Lipson, H., “A vacuum-based bonding mechanism for modular robotics,” 2011, doi:<https://doi.org/10.1109/TRO.2011.2153010>.
- [15] Belke, C. H. y Paik, J., “Mori: A modular origami robot,” 2017, doi:<https://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2697310>.
- [16] Grob, R., Bonani, M., Mondada, F., y Fellow, M. D., “Autonomous self-assembly in swarm-bots,” 2006, doi:<https://doi.org/10.1109/TRO.2006.882919>.
- [17] Park, M., Chitta, S., Teichman, A., y Yim, M., “Automatic configuration recognition methods in modular robots, grasp laboratory, university of pennsylvania, usa,” 2008, doi:<https://doi.org/10.1177/0278364907089350>.
- [18] Moubarak, P. y Tzvi, P. B., “Modular and reconfigurable mobile robotics, robotics and autonomous systems,” 2012, doi:<https://doi.org/10.1016/j.robot.2012.09.002>.
- [19] García, R. M., “Diseño y simulación de un algoritmo para el control de un robot modular tipo cadena,” 2010, <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8467>.
- [20] Valenzuela, H. R., “Diseño y fabricación de robots modulares blandos heterogéneos,” 2019, doi:<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170983>.
- [21] A. Toribio, C. R., Monje, C. A., de la Casa, S. M., y Balaguer, C., “Identificación de articulación blanda para brazo robótico mediante redes neuronales,” 2022, doi:<https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498418.0843>.
- [22] Dorf, R. C. y Bishop, R. H., “Sistemas de control moderno, 10º edición.”
- [23] Rao, K. S. y Mishra, R., “Comparative study of p, pi and pid controller for speed control of vsi-fed induction motor,” 2014, doi:<https://doi.org/10.4236/eng.2014.611065>.
- [24] Charre-Ibarra, S. M., Alcalá-Rodríguez, J. A., López-Luiz, N., y Durán-Fonseca, M. A., “Sistema didáctico de control de presión,” 2014, doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062014000500005>.
- [25] “Tracker video analysis and modeling tool,” <https://physlets.org/tracker/>.
- [26] “Sitio web smooth-on,” <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-30/>.
- [27] Datasheet, “Xgzp6857 pressure sensor module.”

# Anexo A

## Códigos

El siguiente anexo busca exponer los código usados en la tarjeta de desarrollo para realizar el control de la bomba y de la válvula.

### A.1. Definición de controladores

```
float Sin_Control(float P_In, float t_0, int con){
    float P_Out = P_In;
    return P_Out;
}
```

```
float C_PI(float P_In, float t_0, int con){
    float t    = (millis()-t_0)*1.0/1000;
    float zeta = 0.7071;
    float a    = -4/ts;
    float b    = 16/pow(ts,2)*(1/pow(zeta,2)-1);
    float P_Out = ts*(1-2*pow(zeta,2))/(8*(1-pow(zeta,2)));
    P_Out = P_Out*exp(a*t)*sin(b*t);
    P_Out = con-(exp(a*t)*cos(b*t)+P_Out);
    P_Out = P_In*(P_Out);
    return P_Out;
}
```

```
float C_PID(float P_In, float t_0, int con){
    float t    = (millis()-t_0)*1.0/1000;
    float zeta = 0.7071;
    float kd   = 0.1;
    float a    = -4*(1+kd)/ts;
    float b    = 16*(1+kd)/pow(ts, 2)*(1/(pow(zeta,2))-(1+kd));
```

```

float P_Out = P_In*(con-(exp(a*t)*cos(b*t)+(ts*(1-2*pow(zeta,2)*(1-kd))/(8*(1+kd)*(1-
pow(zeta,2)*(1+kd))))*exp(a*t)*sin(b*t)));
return P_Out;
}

```

```

float C_Ideal(float P_In, float t_0, int con){
float t = (millis()-t_0)*1.0/1000;
float zeta = 0.7071;
float P_Out = P_In*(con-exp(-4*t/ts)*sin((4*pow((1-pow(zeta, 2)), 0.5))*t/(ts*zeta)+asin(pow((1-
pow(zeta,2)),0.5)))/(pow((1-pow(zeta,2)),0.5)));
return P_Out;
}

```

```

float C_Exp(float P_In, float t_0, int con){
float t = (millis()-t_0)*1.0/1000;
float n = ts;
float a = (log(50))/n;
float P_Out = P_In*(con-1/exp(a*t));
return P_Out;
}

```

```

float C_Orden3(float P_In, float t_0, int con){
float t = (millis()-t_0)*1.0/1000;
float n = ts;
float a = (pow(50,(1/3))+1.0)/n;
float P_Out = P_In*(con-1/pow((a*t+1),3));
return P_Out;
}

```

```

float C_Serie_Lineal_Inversa(float P_In, float t_0, int con){
float toff = 40*1.0;
float ton = 20*1.0;
float n = ts*1000/(toff+ton);
float a = 100/(2*n)*1.0;
float P_Out = P_In*(con-1/(a*aumento_serie));
return P_Out;
}

```

```

float C_Serie_Seno(float P_In, float t_0, int con){
float toff = 40*1.0;
float ton = 20*1.0;

```

```
float n    = ts*1000/(toff+ton);  
float a    = 1/(n*asin(0.02))*1.0;  
float P_Out = P_In*(con-sin(1/(a*aumento_serie)));  
return P_Out;  
}
```

## A.2. Código de control de válvula

```
float desplazamiento_deseado = 4; //Se define la distancia a la que queremos llegar.  
float factor_amplificador = 0;
```

```
float ts=5;
```

```
int d_on = 5;  
int d_off = 32;
```

```
boolean mostrar = true;  
boolean operacion = true;  
boolean activacion_optitrack =true;  
boolean cambio_descarga = true;
```

```
float banda=0;  
float maximo_anterior=0;  
float minimo_anterior=100;  
float outputValue = 0;  
float lectura;  
float registro[10], total=0, presion_promedio=0;
```

```
int t1=0;  
int t2=0;  
int aumento_serie = 1;  
int tiempo_minimo;  
int sensorValue = 0;  
int Val, j=0, numero_muestras=10;  
int t_0;  
int k=0;
```

```
float media = 0;  
float error;  
float n=0;  
float estacionario[300];  
float total_estacionario;
```

```
int signal_optitrack = 22;
```

```

int led_signal = 24;

// Defino las entradas asociadas a los sensores de presion
const int pin_sensor_1 = A0;

//Defino pin de control de bomba.
int pin_bomba_1=2;

// Defino pin de control de valvula.
int pin_valvula_1=23;

float shear(float desplazamiento_deseado){
    return 1*desplazamiento_deseado;
}
float uniaxial(float desplazamiento_deseado){
    return 1*desplazamiento_deseado;
}
float biaxial(float desplazamiento_deseado){
    return 1*desplazamiento_deseado;
}
float rotator(float desplazamiento_deseado){
    return 1*desplazamiento_deseado;
}
float tilt(float desplazamiento_deseado){
    return 1*desplazamiento_deseado;
}

float presion_deseada = uniaxial(desplazamiento_deseado)+(0.0514*desplazamiento_deseado-
0.4448);

unsigned long i;
unsigned long tiempo=millis();
unsigned long delta_t_convergente = 3.48*exp(0.4*presion_deseada) + 0*(presion_deseada/2);
//unsigned long delta_t_convergente = 1.34*exp(0.42*presion_deseada) + 0*(presion_deseada/2);
unsigned long delta_t;

float error_total;
int t_descarga;

```

```

void setup(){
  Serial.begin(115200);

  pinMode(pin_bomba_1,OUTPUT);
  pinMode(pin_valvula_1,OUTPUT);
  pinMode(pin_sensor_1,INPUT);
  pinMode(led_signal, OUTPUT);

  digitalWrite(signal_optitrack,LOW);

  for(j=0; j<10; j++){
    registro[j]=0;
  }

  for(j=0; j<300; j++){
    estacionario[j]=0;
  }

  analogWrite(pin_bomba_1,255);
  digitalWrite(pin_valvula_1, LOW);
  delay(5000);

  if(mostrar==false){
    Serial.println("=====");
    Serial.println("=====Iniciando=====");
    Serial.println("=====");
    Serial.print("La presión deseada es: ");
    Serial.println(presion_deseada);
    Serial.print("La deformación deseada es: ");
    Serial.println(desplazamiento_deseado);
  }
  else{
    Serial.print("Buscada");
    Serial.print(", ");
    Serial.print("Sensor");
    Serial.print(", ");
    Serial.println("error");
    //Serial.print(", ");

```

```

    //Serial.println("Tiempo");
}
t_0 = millis();
t_descarga = millis();
}

float salida = 0;

void loop(){
  if(operacion){

    aumento_serie++;

    presion_promedio = total/numero_muestras;
    error = presion_promedio -Sin_Control(presion_deseada, t_0, 1);
    salida =Sin_Control(presion_deseada, t_descarga, 1);

    // DESCARGA
    if((millis()-t_0) >= 30000 ){
      analogWrite(pin_bomba_1,0);
      if(cambio_descarga){
        t_descarga=millis();
        cambio_descarga = false;
      }
      error = presion_promedio -Sin_Control(presion_deseada, t_descarga, 0);
      salida = -Sin_Control(presion_deseada, t_descarga, 0);
    }

    error_total = (error_total+error)/(aumento_serie+1);

    if((error + banda) > 0){
      digitalWrite(pin_valvula_1,LOW);
      delay(d_off-(t2-t1));
    }
    else{
      digitalWrite(pin_valvula_1,HIGH);
      delay(d_on); // 5 es el minimo
      digitalWrite(pin_valvula_1,LOW);
      delay(d_off-(t2-t1));
    }
  }
}

```

```

t1=millis();

for(j=0; j < numero_muestras; j++){
    total = total - registro[j];
    registro[j] = analogRead(pin_sensor_1)*0.03499-6.8;
    total = total + registro[j];
}

digitalWrite(led_signal, HIGH);

if(mostrar==true){
    Serial.print((salida - (0.0514*desplazamiento_deseado-0.4448)), 4);
    Serial.print(", ");
    Serial.print(presion_promedio);
    Serial.print(", ");
    Serial.println(error);
    //Serial.print(", ");
    //Serial.println(millis()-t_0);
}
if(n==0){
    if(presion_promedio >= presion_deseada){
        tiempo_minimo = millis()-t_0;
        n++;
    }
}

if( (millis()-t_0) >= 45000 ){

    if(mostrar==false){
        Serial.println(" ");
        Serial.print("El t para primera interseccion es: ");
        Serial.print(tiempo_minimo);
        Serial.println(" [ms]");
        Serial.print("El factor de amplificación es: ");
        Serial.println(factor_amplificador);
        Serial.print("El presión minima es: ");
        Serial.println(minimo_anterior);
        Serial.print("El presión maxima es: ");
        Serial.println(maximo_anterior);
        Serial.print("El presión estacionaria es: ");
        Serial.println(total_estacionario/k);
    }
}

```

```

        Serial.print("El error total es: ");
        Serial.println(error_total);
Serial.println("=====");
    }
    n++;
    operacion = false;
}

if((millis()-t_0)>10000){
    if(k>=300){
        estacionario[k]=0;
    }
    if(presion_promedio < minimo_anterior){
        minimo_anterior = presion_promedio;
    }
    if(presion_promedio > maximo_anterior){
        maximo_anterior = presion_promedio;
    }
    else{
        estacionario[k] = presion_promedio;
        total_estacionario = total_estacionario + estacionario[k];
        k++;
    }
}
t2=millis();
}

else{
    analogWrite(pin_bomba_1,0);
    digitalWrite(pin_valvula_1, LOW);
    digitalWrite(led_signal, LOW);
}
}

```

### A.3. Código de control de bomba de diafragma

```
float desplazamiento_deseado = 4; //Se define la distancia a la que queremos llegar.  
float factor_amplificador = 0;
```

```
float ts=5;
```

```
boolean mostrar = true;  
boolean operacion = true;  
boolean activacion_optitrack =true;  
boolean cambio_descarga = true;
```

```
float banda=0;  
float maximo_anterior=0;  
float minimo_anterior=100;  
float outputValue = 0;  
float lectura;  
float registro[10], total=0, presion_promedio=0;
```

```
int d_off=40;  
int t1=0;  
int t2=0;  
float aumento_serie = 0;  
int tiempo_minimo;  
int sensorValue = 0;  
int Val, j=0, numero_muestras=10;  
int t_0;  
int k=0;
```

```
float media = 0;  
float error;  
float n=0;  
float estacionario[300];  
float total_estacionario;
```

```
// Defino las entradas asociadas a los sensores de presion  
const int pin_sensor_1 = A0;
```

```
//Defino pin de control de bomba.
```

```

int pin_bomba_1=2;

// Defino pin de control de valvula.
int pin_valvula_1=23;

float presion_deseada = (desplazamiento_deseado);

unsigned long i;
unsigned long tiempo=millis();
unsigned long delta_t_convergente = 4.35*exp(0.30*presion_deseada) + 0*(presion_deseada/2);
unsigned long delta_t;

float error_total;
int t_descarga;

int led_signal = 24;

void setup(){
  Serial.begin(115200);

  pinMode(pin_bomba_1,OUTPUT);
  pinMode(pin_valvula_1,OUTPUT);
  pinMode(pin_sensor_1,INPUT);
  pinMode(led_signal, OUTPUT);

  for(j=0; j<10; j++){
    registro[j]=0;
  }

  for(j=0; j<300; j++){
    estacionario[j]=0;
  }

  analogWrite(pin_bomba_1,0);
  digitalWrite(pin_valvula_1, HIGH);
  delay(5000);
  digitalWrite(pin_valvula_1, LOW);
  delay(5000);

  if(mostrar==false){
    Serial.println("=====");
  }
}

```

```

    Serial.println("=====Iniciando=====");
Serial.println("=====");
    Serial.print("La presión deseada es: ");
    Serial.println(presion_deseada);
    Serial.print("La deformación deseada es: ");
    Serial.println(desplazamiento_deseado);
}
else{
    Serial.print("Buscada");
    Serial.print(",");
    Serial.print("Sensor");
    Serial.print(",");
    Serial.println("error");
    //Serial.print(",");
    //Serial.println("Tiempo");
}
t_0=millis();
t_descarga = millis();
}

float salida = 0;

void loop(){
    if(operacion){

        delta_t = delta_t_convergente;
        aumento_serie++;

        presion_promedio = total/numero_muestras;
        error = presion_promedio - C_Orden3(presion_deseada, t_0, 1);
        salida = C_Orden3(presion_deseada, t_descarga, 1);

        // DESCARGA
        if((millis()-t_0) >= 30000 ){
            if(cambio_descarga){
                t_descarga=millis();
                cambio_descarga = false;
            }
            error = presion_promedio + C_Orden3(presion_deseada, t_descarga, 0);
            salida = -C_Orden3(presion_deseada, t_descarga, 0);

```

```

if((error + banda) < 0){
    digitalWrite(pin_valvula_1,LOW);
    delay(10);
}
else{
    digitalWrite(pin_valvula_1,HIGH);
    delay(6); // 5 es el minimo
    digitalWrite(pin_valvula_1,LOW);
    delay(50);
}

}

else{
    if((error + banda) < 0){
        analogWrite(pin_bomba_1,255);
        //delay(t_test);
        delay(delta_t);
        analogWrite(pin_bomba_1,0);
        delay(d_off-(t2-t1));
    }

    else{
        analogWrite(pin_bomba_1,0);
        delay(d_off-(t2-t1));
    }
}

error_total = (error_total+error)/(aumento_serie+1);

t1=millis();

for(j=0; j < numero_muestras; j++){
    total = total - registro[j];
    registro[j] = analogRead(pin_sensor_1)*0.03499-6.8;
    total = total + registro[j];
}

digitalWrite(led_signal, HIGH);

```

```

if(mostrar==true){
    Serial.print(salida);
    Serial.print(" ");
    Serial.print(presion_promedio);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(error);
    //Serial.print(" ");
    //Serial.println((millis()-t_0));
}
if(n==0){
    if(presion_promedio >= presion_deseada){
        tiempo_minimo = millis()-t_0;
        n++;
    }
}
if( (millis()-t_0) >= 45000 ){
    if(mostrar==false){
        Serial.println(" ");
        Serial.print("El t para primera interseccion es: ");
        Serial.print(tiempo_minimo);
        Serial.println(" [ms]");
        Serial.print("El factor de amplificación es: ");
        Serial.println(factor_amplificador);
        Serial.print("El presión minima es: ");
        Serial.println(minimo_anterior);
        Serial.print("El presión maxima es: ");
        Serial.println(maximo_anterior);
        Serial.print("El presión estacionaria es: ");
        Serial.println(total_estacionario/k);
        Serial.print("El error total es: ");
        Serial.println(error_total);
        Serial.println("=====");
    }
    n++;
    operacion = false;
}
if((millis()-t_0)>10000){
    if(k>=300){
        estacionario[k]=0;
    }
}

```

```

if(presion_promedio < minimo_anterior){
  minimo_anterior = presion_promedio;
}
if(presion_promedio > maximo_anterior){
  maximo_anterior = presion_promedio;
}
else{
  estacionario[k] = presion_promedio;
  total_estacionario = total_estacionario + estacionario[k];
  k++;
}
}
t2=millis();
}

else{
  analogWrite(pin_bomba_1,0);
  digitalWrite(led_signal, LOW);
}
}

```

# Anexo B

## Modelado de robots modulares

### B.1. Biaxial

Tabla B.1: Ecuaciones de deformación asociadas a robot biaxial, esto para tres tamaños de módulos y tres grosores internos.

Tamaño	Grosor	Eje X-Y	Eje Z
Grande	2.5	$0.08P$	$0.10P$
	3.0	$0.08P$	$0.10P + 0.02$
	3.5	$0.08P$	$0.10P + 0.02$
Mediano	2.5	$0.22P$	$0.13P + 0.001$
	3.0	$0.20P$	$0.14P + 0.001$
	3.5	$0.20P$	$0.15P + 0.001$
Pequeño	2.5	$0.25P$	$0.16P + 0.001$
	3.0	$0.24P + 0.004$	$0.18P + 0.001$
	3.5	$0.23P + 0.005$	$0.19P + 0.005$

### B.2. Shear

Tabla B.2: Ecuaciones de deformación asociadas a robot shear, esto para tres tamaños de módulos y tres grosores internos.

Tamaño	Grosor	Ángulo
Grande	2.5	$6.701P - 0.012$
	3.0	$5.394P - 0.008$
	3.5	$4.598P - 0.003$
Mediano	2.5	$3.264P + 0.009$
	3.0	$3.479P - 0.002$
	3.5	$3.070P - 0.001$

### B.3. Tilt

Tabla B.3: Ecuaciones de deformación asociadas a robot tilt, esto para tres tamaños de módulos y tres grosores internos.

Tamaño	Grosor	Ángulo
Grande	2.5	$9.39P - 1.159$
	3.0	$6.56P - 0.164$
	3.5	$6.29P - 0.159$
Mediano	2.5	$6.63P - 0.164$
	3.0	$5.26P - 0.136$
	3.5	$4.23P - 0.103$
Pequeño	2.5	$3.45P - 0.071$
	3.0	$2.91P - 0.052$
	3.5	$2.50P - 0.035$

# Anexo C

## Moldes

### C.1. Molde núcleo uniaxial y shear

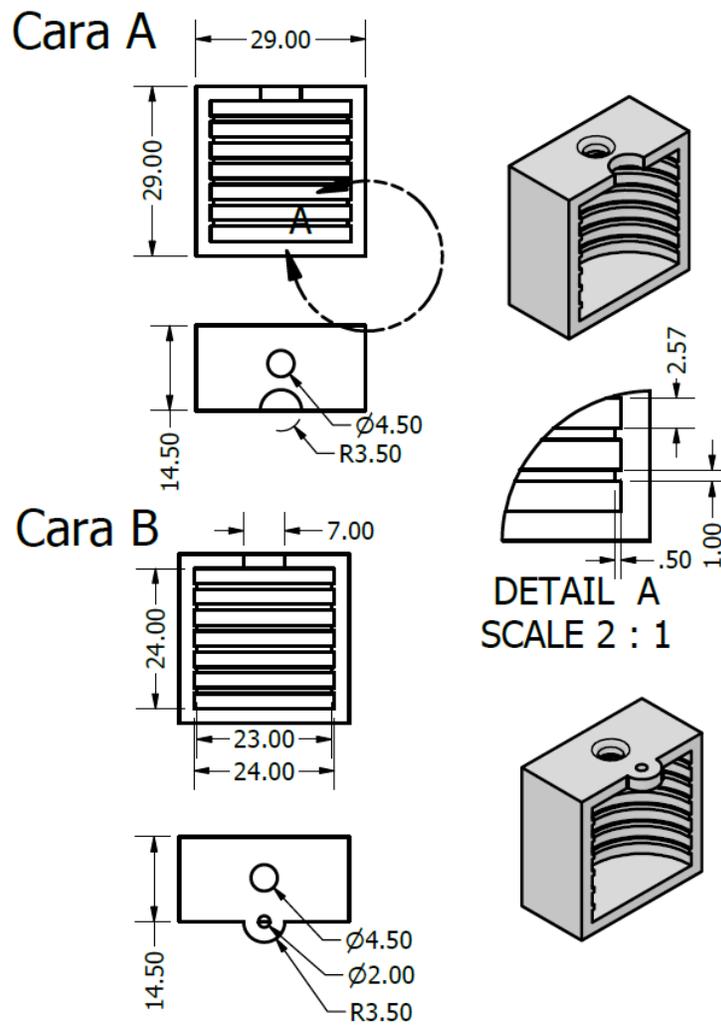
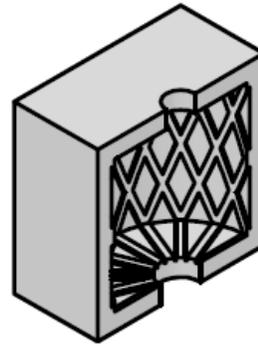
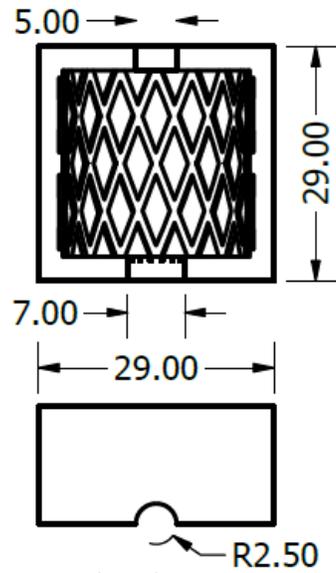


Figura C.1.1: Plano de molde núcleo uniaxial y núcleo Shear.

## C.2. Molde núcleo Biaxial

Cara A



SECTION C-C  
SCALE 1 : 1



Cara B

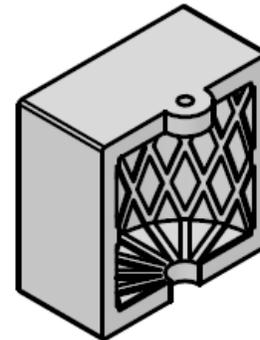
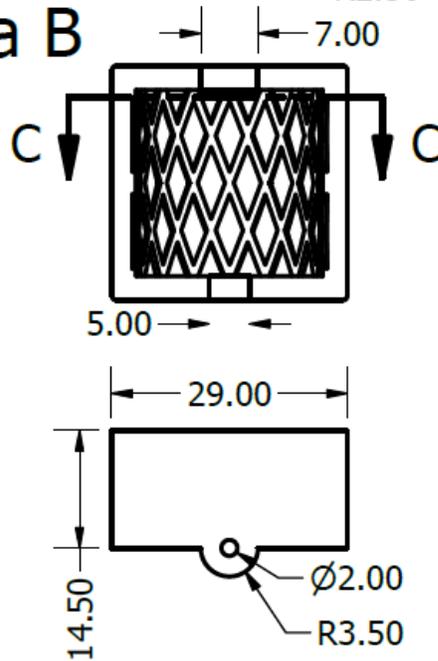


Figura C.2.1: Plano de molde núcleo biaxial.

### C.3. Molde núcleo tilt

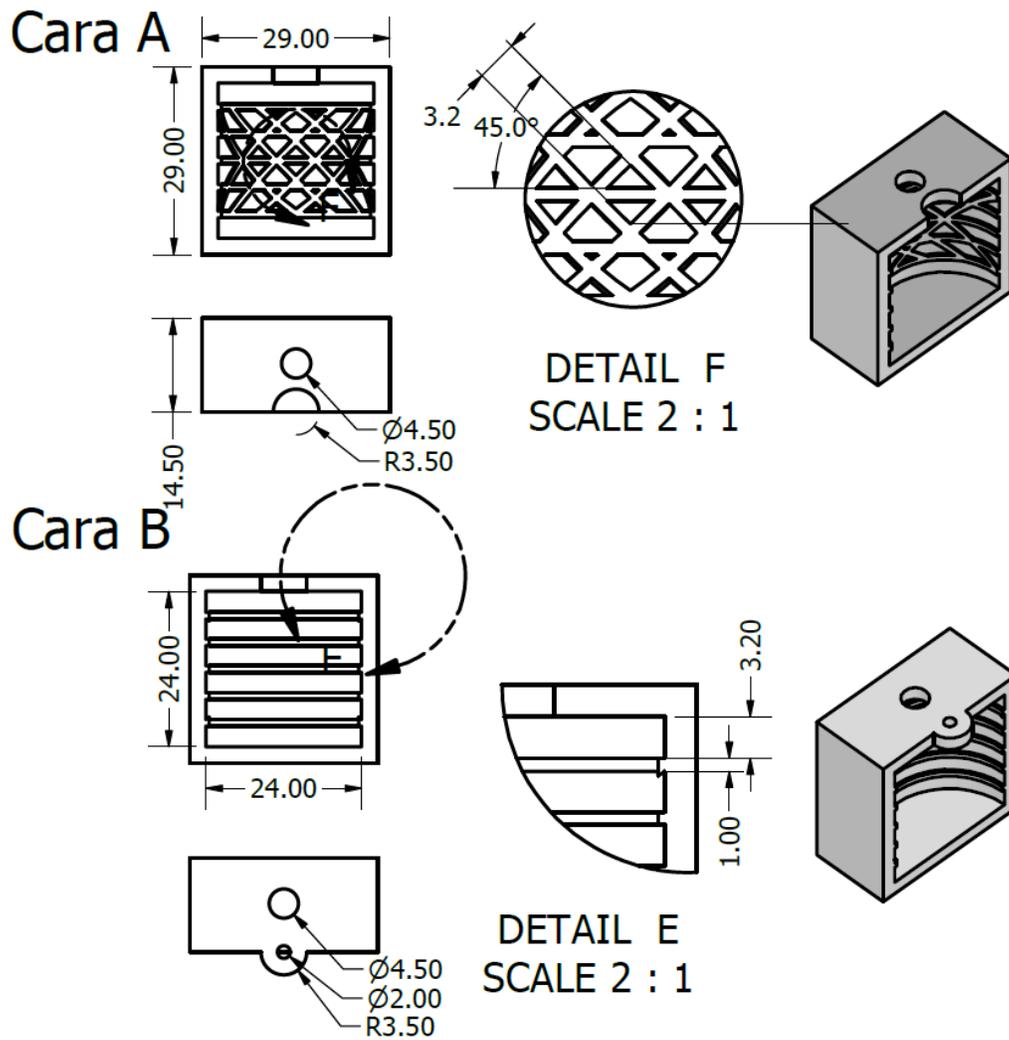


Figura C.3.1: Plano de molde núcleo tilt.

## C.4. Molde núcleo rotator

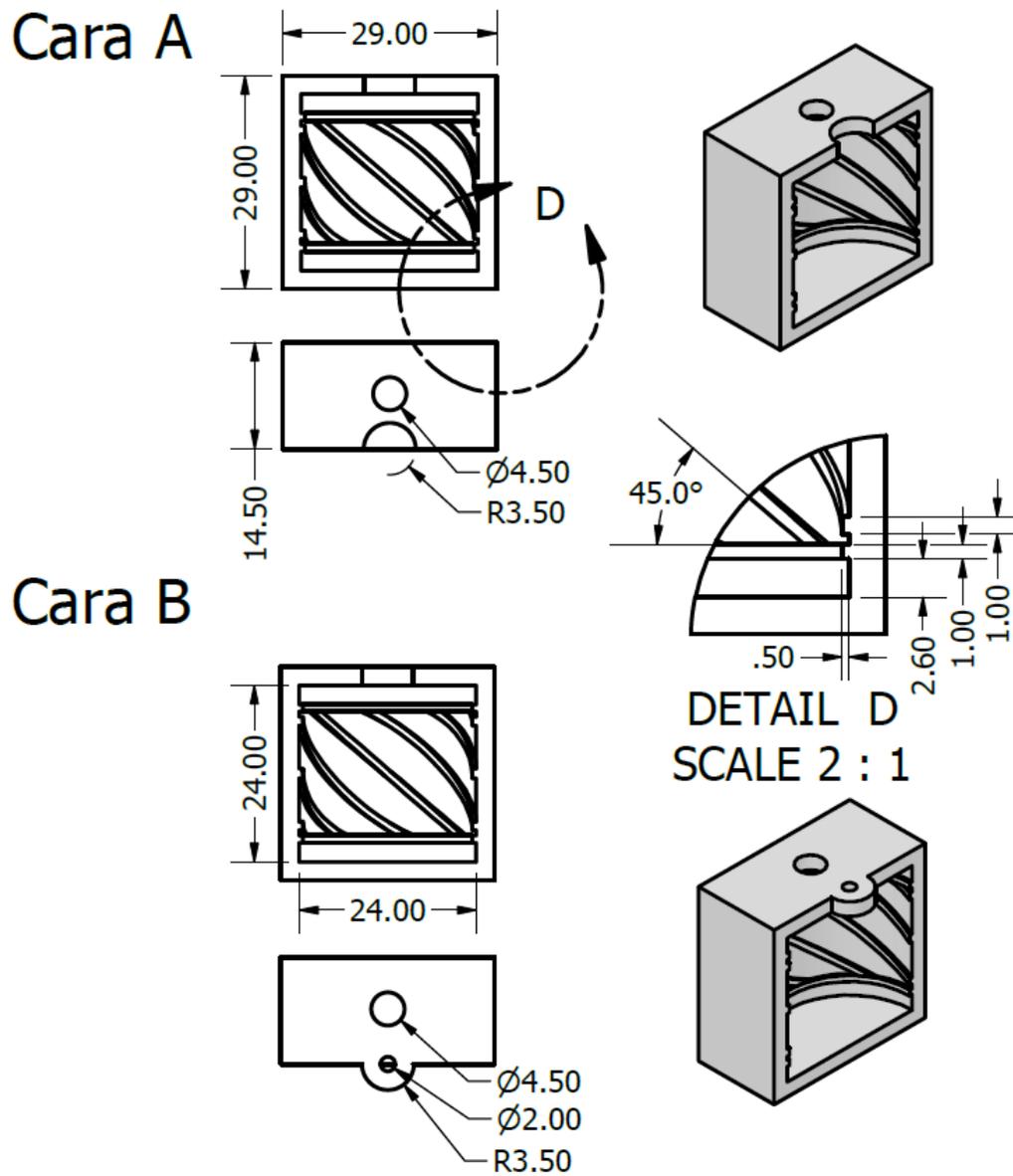


Figura C.4.1: Plano de molde núcleo rotator.

## C.5. Molde formación cubo

### C.5.1. Cara cubica de cubo

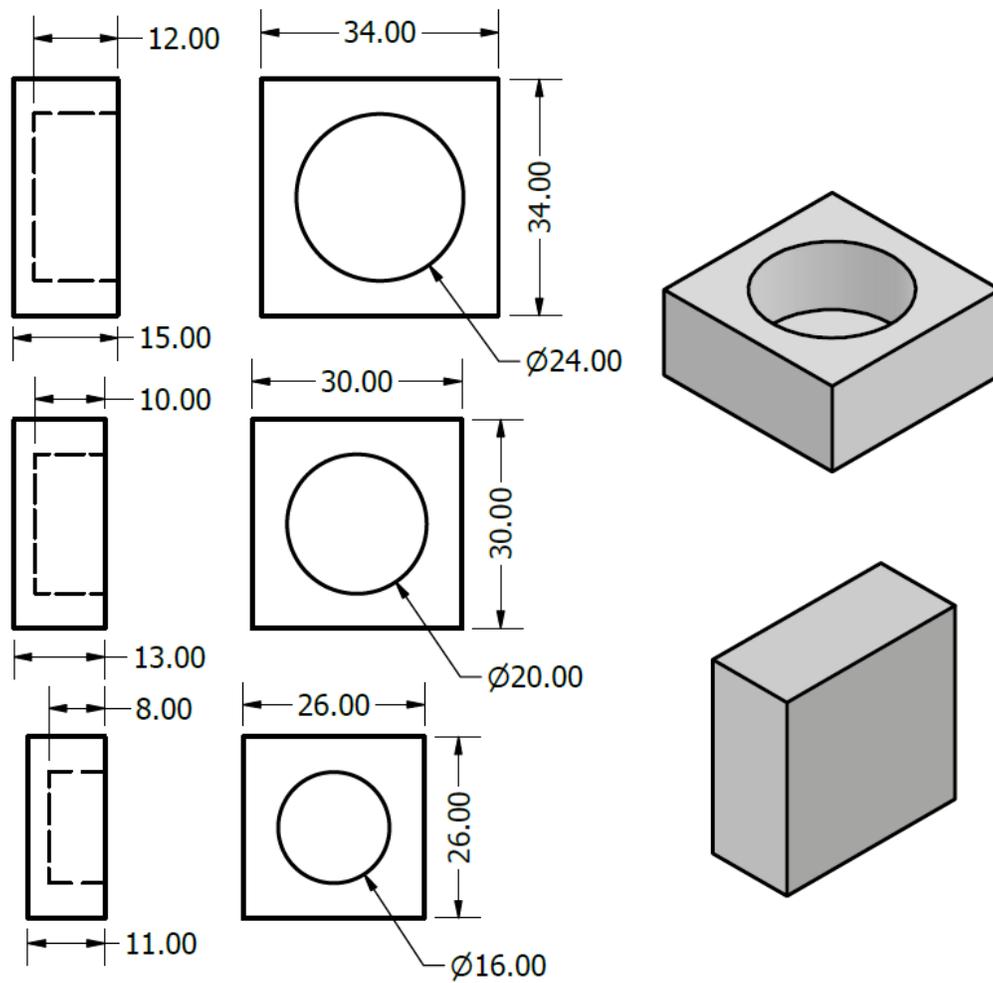


Figura C.5.1: Plano de medio molde de cubicación correspondiente a soporte de núcleo.

### C.5.2. Cara cilíndrica de cubo para etapa 1

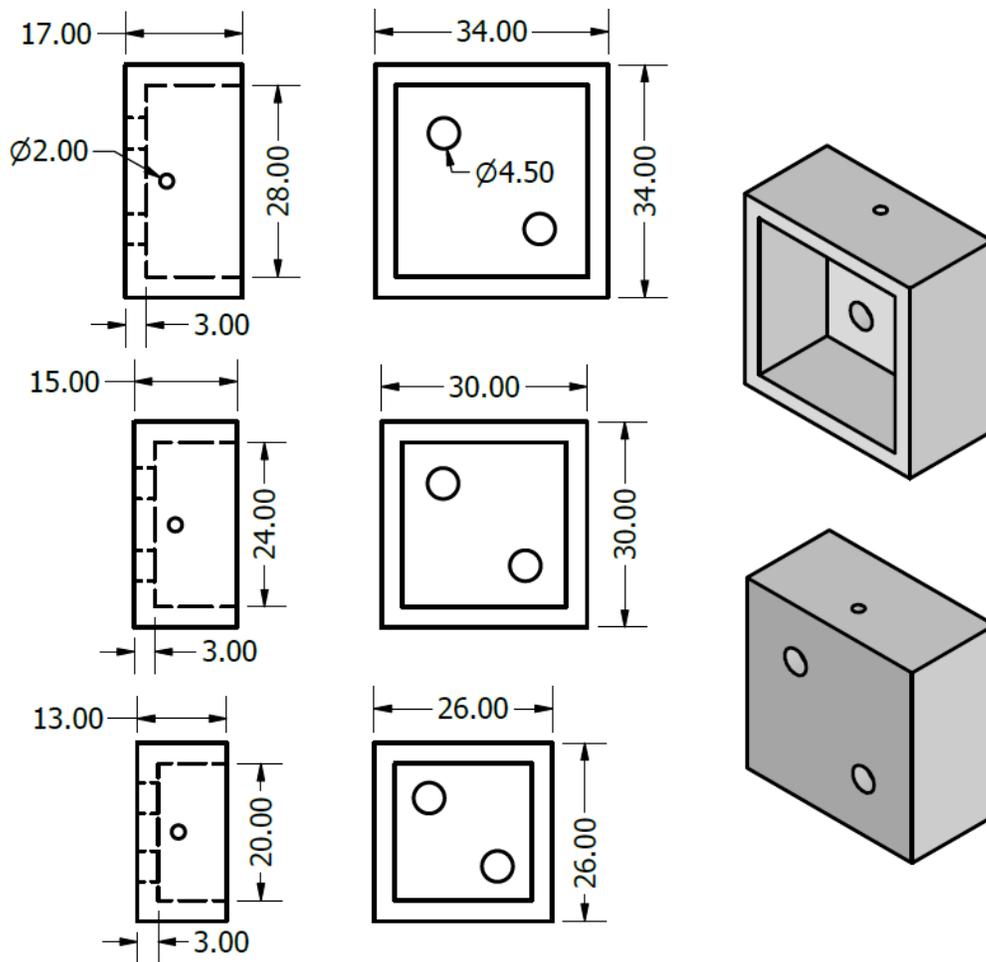


Figura C.5.2: Plano de medio molde de cubicación correspondiente a medio cubo.

### C.5.3. Caras de molde para cubo shear

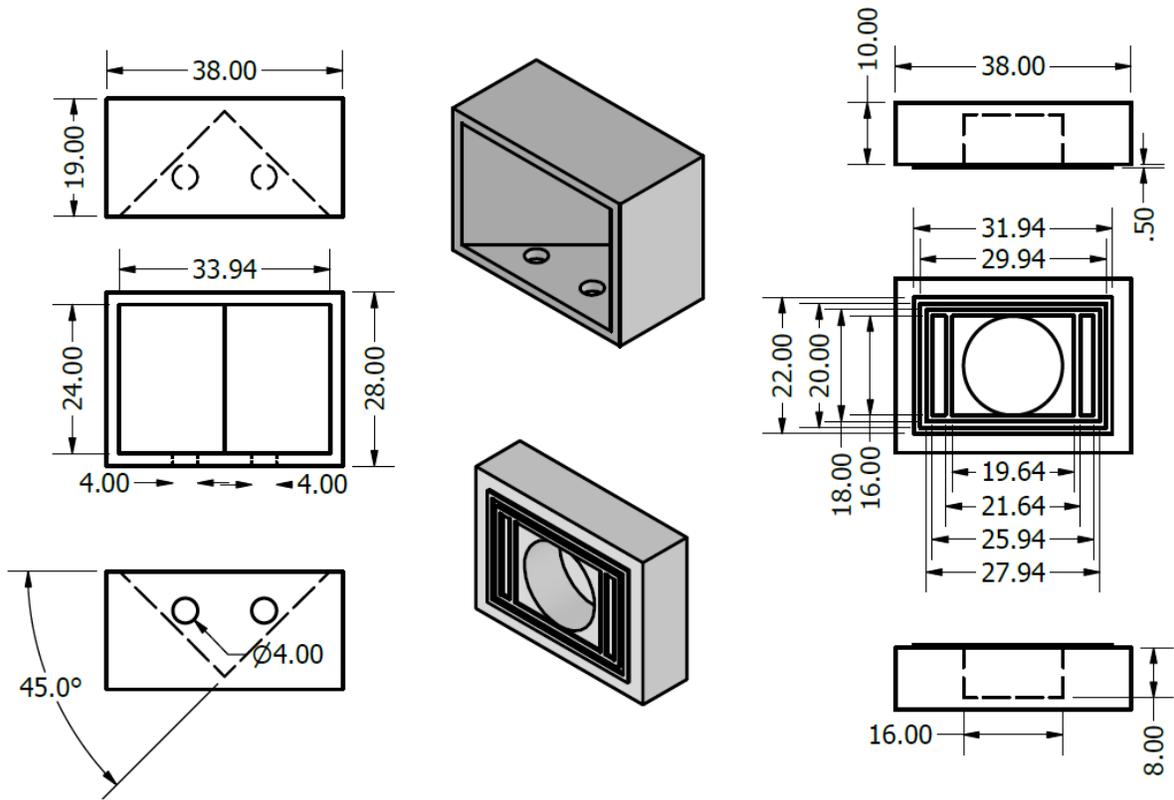
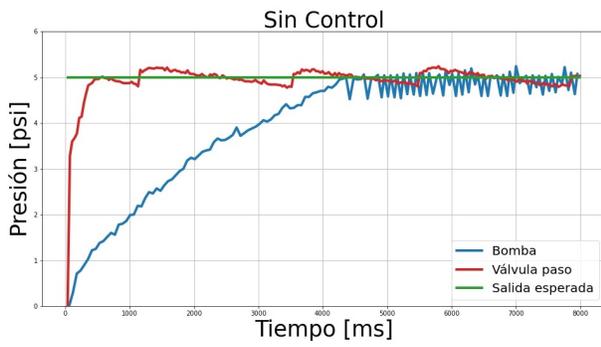


Figura C.5.3: Plano de piezas de molde de cubo para núcleo shear.

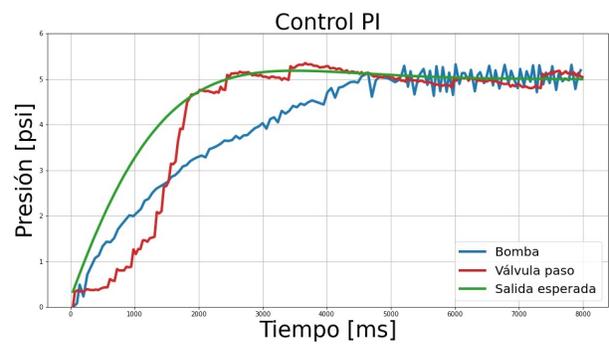
# Anexo D

## Seguimiento

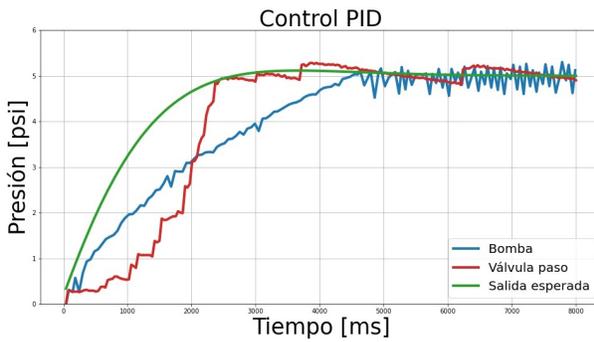
## D.1. Seguimiento de controladores en vacío



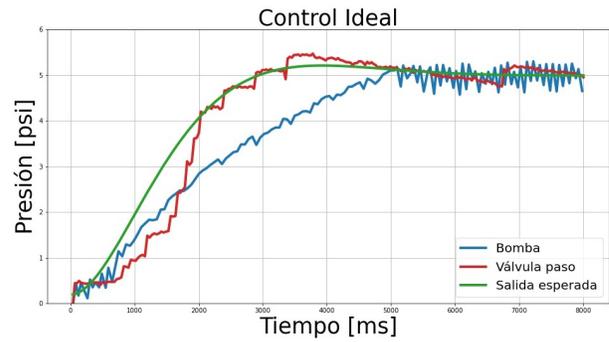
(a) Sin control.



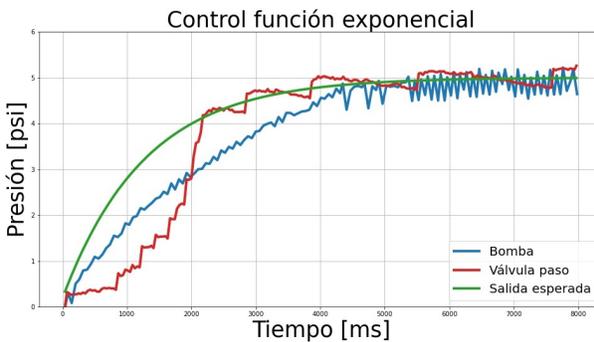
(b) Control PI.



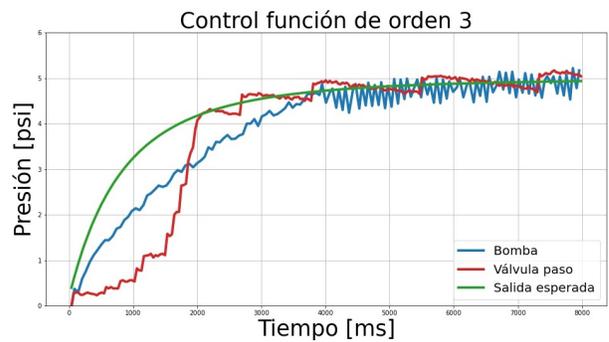
(c) Control PID.



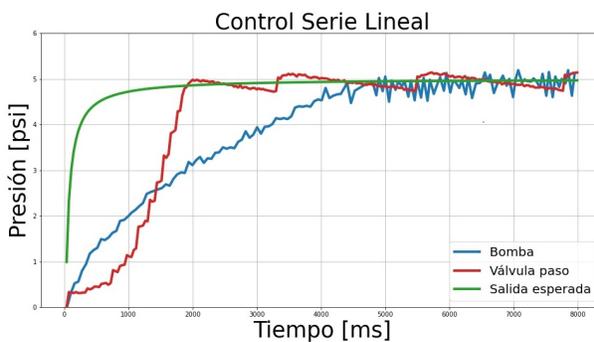
(d) Control ideal.



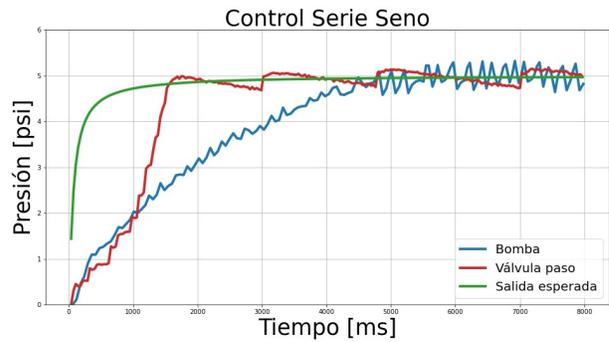
(e) Función exponencial.



(f) Función de orden 3.



(g) Serie lineal inversa.



(h) Serie seno.

Figura D.1.1: Gráficas comparativas para los controladores diseñados.