

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Objetivos y alcances	2
2. Metodología	3
2.1. Organización del trabajo	3
2.2. Desarrollo del robot	3
2.3. Desarrollo del sistema de control	4
2.4. Validación de la idea	5
3. Antecedentes	7
3.1. Robótica blanda	7
3.1.1. Contexto general	7
3.1.2. Actuadores usualmente empleados en robótica blanda	9
3.2. Morfología de un gusano	11
3.3. Sensores blandos	12
3.4. Control de sistemas	13
3.4.1. Sobre teoría de control	13
3.4.2. Tipos de control de lazo cerrado	15
4. Diseño, fabricación y caracterización de actuadores y sensores	19
4.1. Diseño	19
4.1.1. Diseño de actuadores	19
4.1.2. Diseño de sensores	21
4.2. Fabricación de componentes	22
4.3. Ensayos de caracterización	25
4.3.1. Mediciones directas	25
4.3.2. Curva resistencia-deformación de sensores	25
4.3.3. Respuesta al impulso de sensores	27
4.3.4. Curva temperatura-resistencia de sensores	28
4.3.5. Curva presión-deformación de actuadores	29
4.3.6. Ensayos de contacto en tubos	30
5. Sistema de control	33
5.1. Estrategia de control	33
5.2. Sistema neumático	35
5.3. Circuito eléctrico	36

5.3.1.	Propósito	36
5.3.2.	Diseño de circuito	36
5.3.3.	Diseño de PCB	40
5.4.	Programa	40
5.4.1.	Modelo	40
5.4.2.	Pseudocódigo	41
5.4.3.	Estructura	45
6.	Resultados y discusión de fabricación, implementación y ensayos	47
6.1.	Fabricación	47
6.2.	Caracterización	51
6.3.	Pruebas de funcionamiento	62
7.	Conclusiones	67
7.1.	Cumplimiento de objetivos	67
7.2.	Conclusiones generales	68
7.3.	Limitaciones	68
7.4.	Trabajo futuro	69
	Bibliografía	70
	Anexos	73
Anexo A.	Recursos utilizados	74
A.1.	Componentes mecánicos	74
A.2.	Componentes electrónicos	74
A.3.	Máquinas	75
A.4.	Materiales	75
Anexo B.	Planos, esquemáticos y otros	76
B.1.	Molde de inyección	76
B.2.	Neumática	77
B.2.1.	Circuito neumático para ensayo de presión-deformación en actuadores	77
B.2.2.	Circuito neumático para ensayo en tubos	77
B.2.3.	Circuito neumático propuesto	78
B.3.	Electrónica	78
B.3.1.	Circuitos para ensayos de caracterización	78
B.3.2.	Diagrama de PCB	80
B.3.3.	Esquema de circuito de control	81
B.4.	Planos de moldes	82
B.4.1.	Actuador axial	82
B.4.2.	Actuador radial	83
B.4.3.	Sensor	84
Anexo C.	Programa	85
C.1.	Funciones generadas	85
C.1.1.	Funciones generadas	85
C.2.	Programa de control	86

Índice de figuras

2.1. Esquema de metodología para ejecutar etapa de desarrollo del robot	4
2.2. Esquema de metodología para ejecutar etapa de desarrollo del sistema de control	5
2.3. Esquema de metodología para ejecutar etapa de validación de la idea	6
3.1. Robot bio-inspirado y robot bio-mimético	8
3.2. Robot blando <i>Crawler</i>	8
3.3. Ejemplos de manos desarrolladas en robótica blanda	9
3.4. <i>Octobot</i> , el primer robot blando completamente autónomo	9
3.5. Estructura y funcionamiento de soft-robot <i>Crawler</i>	10
3.6. Aleación con memoria y robot Meshworm	10
3.7. Esquema de funcionamiento de elastómeros dieléctricos y robot que los emplea	11
3.8. Esquema de locomoción de un gusano	11
3.9. Sensor blando de presión y deformación	12
3.10. Resultados experimentales para sensor blando	14
3.11. Diagrama de bloques de control en lazo abierto y cerrado.	15
3.12. Representación gráfica del estado de un sistema On/Off respecto a la variable de error sin y con histéresis	16
3.13. Ejemplo de curva de un sistema de control On/Off respecto a la variable temperatura	17
3.14. Curva típica de un controlador proporcional ante distintos niveles de ganancia	18
4.1. Concepto de robot blando	19
4.2. Fases en un ciclo de movimiento	20
4.3. Esquema de robot con sensores blandos acoplados	21
4.4. Modelo 3D de moldes para componentes	23
4.5. Esquema de proceso de fabricación de componentes y ensamble del robot	24
4.6. Esquema de montaje para extensión de sensor blando	26
4.7. Esquema de montaje para ensayo de respuesta al impulso de sensor blando	28
4.8. Esquema de montaje para ensayo de curva presión deformación en actuadores	30
4.9. Esquema de montaje para ensayo de contacto en tubos	31
5.1. Diagrama de bloques para controlar un actuador blando	33
5.2. Diagrama del sistema de control para robot blando	35
5.3. Sistema neumático	36
5.4. Diagrama de un puente de Wheatstone	37
5.5. Circuito de amplificación	38
5.6. Circuito de potencia para componentes neumáticas	39
5.7. Diagrama de circuito regulador de voltaje	39

5.8. Diagrama de estados y transiciones	41
5.9. Ejemplo de cálculo de derivada	44
6.1. Moldes fabricados	47
6.2. Actuadores fabricados y robot ensamblado	48
6.3. PCB fabricada	50
6.4. Panel de compresores y válvulas	50
6.5. Sistema completo implementado	51
6.6. Resultados de ensayo de estiramiento a lo largo sobre sensor blando	53
6.7. Resultados de ensayo de estiramiento a lo ancho sobre sensor blando	54
6.8. Cambio de resistencia en función del largo	54
6.9. Resultados de ensayo de respuesta al escalón de sensor blando	55
6.10. Acercamiento de resultados de ensayo de respuesta al escalón de sensor blando	56
6.11. Señal del sensor blando montado en actuador radial inflándose dentro un tubo	57
6.12. Señal del sensor blando y de presión en actuador radial inflándose	58
6.13. Resultados de ensayo presión deformación en actuador radial	59
6.14. Deformación en diámetro y altura de actuador radial	60
6.15. Resultados de ensayo presión deformación en actuador axial	61
6.16. Deformación en diámetro y altura de actuador axial	61
6.17. Actuadores en máxima extensión	62
6.18. Pruebas de contacto en tubos de diámetros 32, 40 y 48 mm	62
6.19. Robot desplazándose en tubo cilíndrico de acrílico de diámetro variable	64
6.20. Robot desplazándose entre 3 tubos cilíndrico de acrílico.	65
6.21. Robot desplazándose entre dos planchas de madera divergentes	65

Índice de tablas

4.1. Dimensiones principales de actuadores de robot gusano	20
4.2. Dimensiones de canales en sensor blando diseñado	22
4.3. Características de cables eléctricos seleccionados	22
5.1. Estado de componentes en cada fase del algoritmo de movimiento	33
5.2. Cálculos para puente de Wheatstone	38
5.3. Condiciones de transición entre fases	41
6.1. Dimensiones principales de sensores blandos	52
6.2. Dimensiones principales medidas de actuadores de robot gusano	52
6.3. Resistencia eléctrica de sensor blando	52
6.4. Variación de resistencia eléctrica de sensor blando respecto a temperatura . . .	52
6.5. Última iteración de parámetros del controlador para movimiento del robot . . .	63