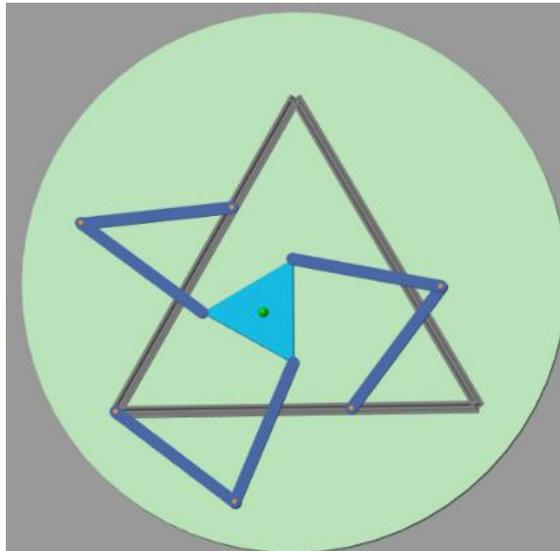


MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CONTROL, AUTOMATIZACIÓN Y ROBÓTICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO, MODELADO Y CONTROL DE ROBOT PARALELO NEUMÁTICO RECONFIGURABLE



Estudiante: Pousa Piñeiro, Samuel

Director/Directora: Artaza Fano, Fernando

Codirector/Codirectora:

Curso: 2022-2023

Fecha: Bilbao, 20, septiembre, 2023

Resumen

El empleo de bancos de pruebas para generar nuevos conocimientos científicos y tecnológicos es uno de los pilares de la investigación. En el presente Trabajo Fin de Máster, se aborda el diseño, modelado y control de un robot paralelo planar 3RRR que pueda servir como banco de ensayos para el testeo y exploración de nuevos algoritmos de control y de técnicas de aprendizaje autónomo. Como elemento de actuación se emplean músculos neumáticos artificiales. El robot es reconfigurable, de forma que es posible modificar fácilmente el número, la posición y el tamaño de los músculos y elementos rígidos que lo conforman, obteniendo así una amplia variedad de relaciones cinemáticas y dinámicas. Previamente al diseño del prototipo, se realiza un estudio sobre la robótica paralela y sobre el funcionamiento de los actuadores de tipo McKibben. Para el diseño y simulación de la solución se utiliza el entorno de Simscape-Simulink, obteniendo buenos resultados de posicionamiento y seguimiento de trayectorias por parte del robot. Además, se propone una lista de componentes y consideraciones para su construcción física.

Palabras clave: *Músculos neumáticos; Simscape; Robótica paralela; Robot planar 3RRR; Modelado y Simulación; Banco de ensayos.*

Abstract

The use of test benches to generate new scientific and technological knowledge is one of the pillars of research. This Master's thesis deals with the design, modelling and control of a 3RRR planar parallel robot that can serve as a test bench for testing and exploring new control algorithms and autonomous learning techniques. Artificial pneumatic muscles are used as the actuation element. The robot is reconfigurable, so that it is possible to easily modify the number, position and size of the muscles and rigid elements that make it up, thus obtaining a wide variety of kinematic and dynamic relationships. Prior to the design of the prototype, a study of parallel robotics and the operation of McKibben-type actuators was carried out. The Simscape-Simulink environment is used for the design and simulation of the solution, obtaining good results in terms of positioning and trajectory tracking by the robot. In addition, a list of components and considerations for its physical construction is proposed.

Keywords: *Pneumatic muscles; Simscape; Parallel robotics; 3RRR planar robot; Modelling and simulation; Test bench.*

Laburpena

Ezagutza zientifiko eta teknologiko berriak sortzeko saiahuntza-bankuak erabiltzea ikerketaren euskarrietako bat da. Master Amaierako Lan honetan, 3RRR robot paralelo planar bat diseinatu, modelatu eta kontrolatzeari ekiten zaio, kontrol-algoritmo berriak eta ikaskuntza autonomoko teknikak probatzeko eta esploratzeko saiakuntza-banku gisa balio dezakeena. Eragingailu gisa muskulu pneumatiko artifizialak erabiltzen dira. Robota birkonfiguratu egin daiteke, eta, beraz, erraz alda daitezke hura osatzen duten muskulu eta elementu zurrunen kopurua, posizioa eta tamaina; horrela, erlazio zinematiko eta dinamiko ugari lortuz. Prototipoa diseinatu aurretik, robotika paraleloari eta McKibben motako eragingailuen funtzionamenduari buruzko azterketa egiten da. Soluzioa diseinatzeko eta simulatzeko Simscape-Simulink ingurunea erabiltzen da, eta emaitza onak lortzen dira robotaren posizionamenduaren eta ibilbideen jarraipenaren aldetik. Gainera, haien eraikuntza fisikorako osagaien eta kontsiderazioen zerrenda bat proposatzen da.

Hitz gakoak: *Muskulu pneumatikoak; Simscape; Robotika paraleloa; 3RRR robot planarra; modelatzea eta simulazioa; saiakuntza-bankua.*

AGRADECIMIENTOS

Ya han pasado 2 años desde que empecé la aventura de venir a Bilbao a hacer un máster, y como todo, toca cerrar una etapa e iniciar otra. Quiero darle las gracias a todos aquellos y aquellas que me han ayudado a que esta experiencia haya sido tan gratificante tanto a nivel personal como profesional.

Quiero agradecerle a mi director del proyecto en Ikerlan, Iker Elorza, los meses de consejos y ayuda para la elaboración de este trabajo, al propio Ikerlan y Carlos Calleja por la oportunidad y a Fernando Artaza por ser mi tutor desde la escuela.

Especiales gracias a esas personas que ahora son amigos, que desde el primer día en clase me arroparon y me hicieron sentir uno más; Eskerrik asko lagunak!

E como non, cun pouco de morriña, moitas grazas ós que sempre están aí dende o meu fogar. Grazas mamá, papá e Pablo por sempre darme folgos cando máis o preciso. Non me esquezo de volas dúas tampoco, Eva e avoa.

INDICE DE CONTENIDOS

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	2
1.1	Contexto actual.	2
2	OBJETIVOS Y ALCANCE	5
2.1	Objetivos.....	5
2.2	Alcance	6
3	ESTADO DEL ARTE	8
3.1	Introducción	8
3.2	Análisis y selección de la arquitectura del banco de pruebas.....	8
3.2.1	Robots paralelos.....	9
3.2.2	Arquitectura seleccionada	14
3.3	El robot paralelo planar 3RRR	15
3.3.1	Problema de posición.....	16
3.3.2	Problema de velocidad.....	19
3.3.3	Problema de aceleración.....	20
3.3.4	Análisis de singularidades	21
3.3.5	Análisis del espacio de trabajo (Workspace).....	22
3.4	Músculos neumáticos artificiales	24
3.4.1	Construcción y funcionamiento del músculo.....	27
3.4.2	Análisis de tipos de músculos neumáticos.....	30
3.4.3	Selección del músculo	33
3.5	Modelo matemático de los músculos neumáticos.....	34
3.5.1	Chou-Hannaford, el modelo elegido.....	38
3.6	Control.....	39
4	DISEÑO DE LA SOLUCIÓN	42
4.1	Introducción.	42
4.2	Diseño del robot neumático paralelo planar 3RRR	42
4.2.1	Configuración antagonista	43
4.2.2	Requisitos y consideraciones para el diseño del robot planar 3RRR	45
4.3	Análisis de componentes necesarios para la construcción del robot planar 3RRR y dimensionamiento	45

4.3.1	Músculo neumático.....	46
4.3.2	Resorte del sistema antagonista	47
4.3.3	Válvula proporcional reguladora de presión.....	48
4.3.4	Tarjeta de corriente de Beckhoff	52
4.3.5	Sensor de Presión.....	53
4.3.6	Tubería suministro de aire	53
4.3.7	Unidad de mantenimiento	54
4.3.8	Sensor posición angular	54
4.3.9	Rueda polea unión actuador-cadena cinemática robot.....	55
4.3.10	Cuerpos rígidos.....	56
4.3.11	Juntas rotativas	57
4.4	Programación de código en Matlab	58
4.4.1	Estructura Parámetros	58
4.4.2	Scripts de la cinemática del robot.....	58
4.4.3	Script principal ("Script_main").....	63
4.4.4	Workspace.....	63
4.5	Modelado en Simscape-Simulink	65
4.5.1	Principales bloques y parametrización	65
4.5.2	Cuerpos rígidos y librería Multibody.....	73
4.5.3	Modularidad y modelado de las cadenas cinemáticas	79
4.6	Modelo final robot planar 3RRR.....	83
4.6.1	Reconfigurabilidad del robot planar 3RRR	84
4.6.2	Control Implementado.....	87
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	90
5.1	Introducción.	90
5.2	Resultados y Análisis	91
5.2.1	Posicionamiento en $x=0,45$; $y=0,45$	91
5.2.2	Posicionamiento en $x=0,48$; $y=0,48$: Caso de preposicionamiento del resorte 94	
5.2.3	Posicionamiento en $x=0,5$; $y=0,5$	96
5.2.4	Otros puntos del espacio de trabajo.....	99
5.2.5	Generación de trayectorias.....	100
6	CONCLUSIONES.....	105
6.1	Conclusiones.....	105
6.2	Acciones futuras.....	106
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108

ANEXO I: CÓDIGOS SCRIPTS MATLAB	116
A: Estructura Parámetros.....	116
B: Código Problema Posición Inverso	118
C: Código Matriz Jacobiana (J) y matriz ecuaciones de cierre (f).....	122
D: Código Problema Posición Directo	123
E: Código Main Script.....	125
F: Código Workspace	126
G: Código Problema Velocidad directo.....	128
H: Código Problema Velocidad inverso.....	130
I: Código jacobianas resolución problema de velocidad	132

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Logo de Ikerlan[1]	2
Figura 2: Ejemplo de robot Delta de Omron[6]	9
Figura 3: Mecanismo paralelo Gwinnett 1928	10
Figura 4: Hexápodo octaédrico de Gough: 1954(derecha) y 2000(izquierda)[12]	10
Figura 5: Esquema original de la plataforma Stewart	11
Figura 6: Manipulador Paralelo Planar 5R.....	13
Figura 7: Manipuladores Paralelos Planares de 3 GDL	13
Figura 8: Esquema cinemático robot paralelo planar 3RRR	15
Figura 9: Simplificación esquema cinemático robot 3RRR	17
Figura 10: Espacio de trabajo e índice de destreza robot planar 3RRR [28]	23
Figura 11: Índice de manipulabilidad para un robot 3RRR	24
Figura 12: Ejemplos actuadores hidráulicos	25
Figura 13: Ejemplos actuadores eléctricos.....	25
Figura 14: Cilindro neumático de Festo.....	26
Figura 15: En la derecha, McKibben y su familia. Izquierda, primeros músculos.	26
Figura 16: Exoesqueleto para el movimiento de la mano con músculos McKibben.	27
Figura 17: Acción del músculo ante el incremento de presión	28
Figura 18: Representación Fuerza Vs Contracción de un músculo neumático	28
Figura 19: Funcionamiento del músculo a carga constante	29
Figura 20: Funcionamiento del músculo a presión constante	29
Figura 21: "Dexterous Hand" creada por Shadow Robot[40]	30
Figura 22: Rubber Actuator de Bridgestone	31
Figura 23: Conjunto de Rubber Actuator funcionando como manipulador	31
Figura 24: Fluidic Muscle de Festo.....	32
Figura 25: Ejemplo Fluidic Muscle de 10 mm de diámetro y 100 mm de longitud.....	32
Figura 26: Personalización del Fluidic Muscle de Festo.....	34
Figura 27: Relación Fuerza-Presión-Contracción músculo artificial neumático	35
Figura 28: Izquierda: Variación ángulo fibras malla. Derecha: Forma fibras en la malla	35
Figura 29: Modelo de cálculo del ángulo θ de deformación de la malla.....	36
Figura 30: Esquema para el cálculo del ángulo inicial θ_0 del músculo neumático.....	36
Figura 31: Relación Fuerza-Contracción en función de la rigidez de la cámara de aire.	37
Figura 32: Representación músculo neumático en Simscape	39
Figura 33: Prototipo de robot planar 3RRR y diseño CAD	42
Figura 34: Robot planar 3RRR accionado por músculos neumáticos	43
Figura 35: Configuración antagonista de 2 músculos neumáticos	44

Figura 36: Tipos de extremos DMSP: Press-fitted (derecha) y Screwed (izquierda)	46
Figura 37: Relación Fuerza-Constracción-Presión DMSP-20-500.....	47
Figura 38: Resorte de extensión.....	47
Figura 39: Fuerza máxima para un porcentaje de constracción del 10% (azul) y 14% (naranja)	47
Figura 40: Gráfica para el cálculo de la constante de rigidez (K) del resorte	48
Figura 41: Válvula 2/2 (derecha) y válvula 3/2 (izquierda)	49
Figura 42: Gráficas corriente-caudal y presión-caudal válvula VPWS de Festo [72].....	49
Figura 43: Válvula PVQ30 de SMC	50
Figura 44: Relación Corriente-Caudal-Presión PVQ30	50
Figura 45: Relación Corriente-Caudal-Presión para PVQ30 y 6 bar	51
Figura 46: Relación caudal máximo y presión para PVQ30	51
Figura 47: Tarjeta con salida de corriente controlada EL2535 de Beckhoff.....	53
Figura 48: Sensor de presión SDE5-D10	53
Figura 49: Racor y tubo de Festo	54
Figura 50: Unidad de mantenimiento MSB6 de Festo.....	54
Figura 51: Transductor potenciómetro angular P2250 de Mapro	54
Figura 52: Sensor de posición angular sin contacto Series Vert-X 13	55
Figura 53: Rueda polea	55
Figura 54: Perfil de aluminio en V.....	56
Figura 55: Lámina aluminio.....	56
Figura 56: Junta pivotante.....	57
Figura 57: Junta pivotante aluminio.....	57
Figura 58: Diagrama script cinemática inversa.....	60
Figura 59: Diagrama script cinemática directa.....	62
Figura 60: Diagrama script principal Cinemática Inversa.....	63
Figura 61: Diagrama script espacio de trabajo.....	64
Figura 62: Ejemplo funcionamiento script "Workspace"	65
Figura 63: Interfaces de conversión de dominio de trabajo	65
Figura 64: Estilos de color de línea para cada dominio de Simscape	66
Figura 65: Interfaz de configuración músculo neumático Simscape.....	67
Figura 66: Conexiones músculo neumático Simscape	67
Figura 67: Representación resorte Simscape	68
Figura 68: Interfaz configuración resorte Simscape.....	68
Figura 69: Representación polea Simscape.....	69
Figura 70: Interfaz configuración polea Simscape.....	69

Figura 71: Representación válvula direccional proporcional 2/2 Simscape	69
Figura 72: Interfaz configuración válvula direccional 2 vías Simscape.....	70
Figura 73: Modelado parte neumática fase retracción músculo.....	70
Figura 74: Interfaz configuración tubo neumático Simscape.....	71
Figura 75: Modelado parte neumática parte estiramiento músculo.....	71
Figura 76: Bloque conversión dominio mecánico de rotación a Simscape Multibody	71
Figura 77: Convertidor señal física-Simulink	72
Figura 78: Sensores Simscape más utilizados en el proyecto	72
Figura 79: "Transform Sensor" de Simscape Multibody	72
Figura 80: Interfaz de configuración Transform Sensor Simscape Multibody	73
Figura 81: Librería Multibody de Simscape	73
Figura 82: Menú de configuración de sistemas de referencia (Frames).....	74
Figura 83: Bloque Rigid Transform y menú de configuración	75
Figura 84: Modelo CAD articulación rotativa	75
Figura 85: Primer elemento rígido cadena serie.....	76
Figura 86: Segundo elemento rígido cadena serie	76
Figura 87: Diagrama de bloques y modelo CAD cuerpo rígido cadenas cinemáticas	78
Figura 88: Modelo CAD plataforma móvil triangular	78
Figura 89: Modelo CAD perfil aluminio en V (bastidor)	79
Figura 90: Sistema antagonista músculo-resorte Simscape	79
Figura 91: Cadena serie robot planar 3RRR Simscape	80
Figura 92: Posicionamiento articulación activa qai mediante bloque Rigid Transform	80
Figura 93: Control PID implementado para cada cadena cinemática	81
Figura 94: Parámetros controlador PID control una cadena cinemática	81
Figura 95: Representación 3D en Simscape de una cadena cinemática.....	82
Figura 96: Gráfica comparación qai con referencia funcionamiento par antagonista.....	82
Figura 97: Error qai prueba funcionamiento par antagonista.....	83
Figura 98: Modelo robot planar 3RRR con bastidor triangular	83
Figura 99: Modelo robot planar 3RRR con bastidor cuadrado	84
Figura 100: Diagrama bloques reconfiguración forma bastidor.....	85
Figura 101: Configuración cuadrada(izda.) y triangular(dcha.) bastidor perfil V aluminio	85
Figura 102: Menú configuración bloque articulación rotativa Simscape.....	86
Figura 103: Modelo bloques par antagonista músculo-músculo.....	86
Figura 104: Diferentes modelos de cuerpos rígidos y plataformas móviles	87
Figura 105: Sintonización controlador PID para cada cadena robot planar 3RRR.....	88

Figura 106: Espacio de trabajo pruebas experimentales	90
Figura 107: Resultado gráfico posicionamiento robot $x=0,45$ $y=0,45$	91
Figura 108: Gráfica $qa1$ vs $qa1_ref$: $x=0,45$ $y=0,45$	92
Figura 109: Gráfica $qa2$ vs $qa2_ref$: $x=0,45$ $y=0,45$	92
Figura 110: Gráfica $qa3$ vs $qa3_ref$: $x=0,45$ $y=0,45$	93
Figura 111: Gráfica $X(t)$: $x=0,45$ $y=0,45$	93
Figura 112: Gráfica $Y(t)$: $x=0,45$ $y=0,45$	93
Figura 113: Gráficas posición TCP. Prueba $x=0,48$ $y=0,48$ (Sin ajuste de resorte).....	94
Figura 114: Error $qa2$ prueba $x=0,48$ $y=0,48$ (Sin ajuste de resorte).....	95
Figura 115: Modificación deformación inicial del resorte ($X=0,48$ $Y=0,48$).....	95
Figura 116: Gráficas posición TCP. Prueba $x=0,48$ $y=0,48$ (Con ajuste de resorte)	95
Figura 117: Error $qa2$ prueba $x=0,48$ $y=0,48$ (Con ajuste de resorte).....	96
Figura 118: Gráficas posición TCP. Prueba $x=0,5$ $y=0,5$	97
Figura 119: Resultado gráfico posicionamiento robot $x=0,5$ $y=0,5$	97
Figura 120: Error $qa1$ prueba $x=0,5$ $y=0,5$	98
Figura 121: Error $qa2$ prueba $x=0,5$ $y=0,5$ (Articulación ajustada inicialmente)	98
Figura 122: Error $qa3$ prueba $x=0,5$ $y=0,5$	98
Figura 123: Valor articular $qa2$ vs $qa2_Ref$ (Prueba $X=0,55$ $Y=0,55$)	99
Figura 124: Gráficas posición TCP. Prueba $x=0,55$ $y=0,55$	100
Figura 125: Entrada senoidal para crear trayectoria circular.....	100
Figura 126: Trayectoria circular para una amplitud de función seno de 10 cm	101
Figura 127: Valor $qa1(t)$ trayectoria circular	101
Figura 128: Valor $qa2(t)$ trayectoria circular	102
Figura 129: Valor $qa3(t)$ trayectoria circular	102
Figura 130: Trayectoria circular para una amplitud de función seno de amplitud 5 cm.....	103

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Principales tipos de articulaciones empleadas en robótica.....	12
Tabla 2: Comparativa de Air Muscle de Shadow Robot.....	30
Tabla 3: Descripción general Fluidic Muscle DMSP-MAS.....	33
Tabla 4: Comparativa entre los 3 músculos candidatos	33
Tabla 5: Error (%) entre diferentes modelos para la fuerza de Fluidics Muscles	38
Tabla 6: Músculo seleccionado: DMSP-20-500	46
Tabla 7: Tabla dimensionamiento de polea.....	55
Tabla 8: Densidades promedio materiales robot planar 3RRR	57

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1 Introducción

El presente trabajo Fin de Máster se ha desarrollado dentro del programa de cooperación educativa entre la Escuela de Ingeniería de Bilbao y el centro tecnológico IKERLAN S. Coop. (Figura 1), situado en Arrasate (Gipuzkoa). Esta cooperativa, es miembro de la Corporación Mondragón y del Basque Research and Technology Alliance (BRTA) del Gobierno Vasco. La aparición de nuevas tecnologías y el crecimiento de la Industria 4.0, hacen necesaria la apertura de nuevas vías de investigación y desarrollo para satisfacer las crecientes demandas del mercado.



Figura 1: Logo de Ikerlan[1]

Gracias a la labor realizada en centros tecnológicos como Ikerlan, se consiguen nuevos conocimientos que luego podrán ser aplicados en diferentes campos científicos o tecnológicos. Al realizar una labor de investigación sobre una determinada temática, es necesario estudiar y analizar la documentación existente sobre la misma, y a su vez realizar pruebas que den lugar a ese nuevo conocimiento o lo verifiquen. Dichas pruebas, pueden realizarse a nivel software mediante simulaciones que partan de las ecuaciones que definen a un sistema, pero en ocasiones es necesario disponer de una representación física del sistema o proceso para poder trabajar con unos datos que se ajusten más a la realidad; esta representación física, se denomina comúnmente **maqueta** o **banco de pruebas** (“Test Bench”).

Existen diversas empresas que se dedican a la realización de bancos de ensayo para su uso en laboratorios como es el caso de Inteco (especializados en sistemas de estudio de algoritmos de control) [2] o Gunt [3]. Estas maquetas, pueden ser una representación de un sistema a escala como por ejemplo un control de nivel de líquido, un sistema ABS de un coche o el sistema de propulsión de un helicóptero, pero también pueden emplearse para realizar investigación en otros campos que no sean para los que fueron diseñados inicialmente.

Sin embargo, en ocasiones se busca un banco de pruebas muy concreto o con unas características particulares para un determinado tipo de ensayo o prueba. Esto hace que se valore la realización insitu del prototipo deseado, pudiendo modificarla y utilizando los recursos que el investigador considere oportunos para alcanzar sus hitos.

1.1 Contexto actual.

En la actualidad, es común que, en lugar de realizar el encargo de un banco de pruebas a una empresa externa, sea el propio centro tecnológico el encargado de realizar su propio banco en base a los conocimientos que posee y con sus propios medios. Una de las ventajas que presenta esto, es que se puede llegar a un ahorro de los costes de producción y permite una mayor flexibilidad al poder ajustar las características del modelo según se desee y sin intermediarios, ahorrando tiempo.

Como se ha comentado, el presente trabajo se ha desarrollado en Ikerlan, dentro del equipo de investigación de Control Inteligente del departamento de Control y Monitorización. Dicho equipo se dedica, entre otras cosas, a la modelización de sistemas dinámicos complejos y técnicas avanzadas de control, al modelado y control integral de componentes, aerogeneradores y parques eólico; diseño de metodologías para la programación estandarizada del control sobre plataformas comerciales, etc.

Actualmente, se quiere profundizar en la investigación y testeo de nuevos algoritmos de control y en técnicas de aprendizaje autónomo, pero para ello es necesario un banco de pruebas que lo permita. En el instante de inicio de este proyecto, el centro no dispone de ninguna maqueta para realizar ensayos de este tipo, por lo que existe la necesidad de diseñar un prototipo que satisfaga las exigencias del equipo. Para lograrlo, se hará uso tanto de los equipos informáticos disponibles como de las licencias de Software de que dispone Ikerlan.

CAPITULO 2

OBJETIVOS Y ALCANCE

2 Objetivos y alcance

2.1 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consiste en diseñar un banco de ensayos para el testeo e investigación de nuevos algoritmos de control y que a su vez sirva de banco de pruebas para técnicas de aprendizaje autónomo. Para la realización del proyecto, se deben tener en cuenta los requisitos de diseño proporcionados por Ikerlan. Durante el transcurso de este, no se han tenido en cuenta limitaciones estructurales más allá del tamaño para proponer posibles diseños del banco de prueba. Inicialmente, se realizaron diferentes propuestas de modelos (los cuales se comentarán en el siguiente capítulo), observándose que las estructuras y el posible funcionamiento tienen similitudes con las de algunos robots paralelos. De este hecho, viene el título del presente Trabajo Fin de Máster.

Entre los principales requisitos solicitados, destacan particularmente dos:

- Empleo de **músculos neumáticos** de tipo McKibben: estos actuadores son ligeros, tienen un coste bajo, son compactos y brindan una alta relación potencia- peso con una larga vida útil. En el capítulo 3, se tratarán de forma más específica y se explicará más en detalle su funcionamiento.
- **Reconfigurabilidad**: debe ser posible modificar fácilmente el número, la posición y el tamaño de los músculos neumáticos, así como el tamaño y posición de los diferentes elementos de unión del robot, de forma que se puedan obtener una amplia variedad de relaciones cinemáticas y dinámicas.

De cara a simplificar un poco los objetivos de diseño del banco experimental, se limita el control a 3 grados de libertad; la posición en \mathbf{X} e \mathbf{Y} , y el giro (θ) en torno al eje \mathbf{Z} del elemento central. Para desarrollar el modelo teórico y realizar las pruebas de simulación apropiadas, así como facilitar la comprensión y estudio de los resultados obtenidos de las mismas, se emplea el software de cálculo de Matlab, junto al entorno de diagramas de bloque que se utiliza para diseñar sistemas de Simulink y Simscape.

A su vez, para la consecución del objetivo principal de este proyecto, se deben cumplir los siguientes objetivos parciales:

- Análisis de estudios previos, bibliografía y estudio de la viabilidad de los diferentes diseños.
- Identificación de las funciones que definen el funcionamiento del músculo neumático.
- Dimensionado y búsqueda de componentes para el banco de pruebas, así como la obtención de las ecuaciones que lo definen.
- Desarrollo de los modelos y simulaciones mediante el empleo de Matlab, Simulink y Simscape.
- Validación de los modelos y evaluación de los resultados obtenidos, así como de su funcionalidad. Correcto posicionamiento del elemento central de la maqueta.

2.2 Alcance

El alcance de este proyecto es el completo desarrollo del robot paralelo neumático para su utilización como banco de pruebas en el laboratorio de Control Inteligente de Ikerlan. Su desarrollo, lleva consigo la obtención de conocimientos en el campo de los actuadores neumáticos y de la robótica paralela.

Para la consecución de todos los objetivos se dispone de aproximadamente 6 meses (dando comienzo el 15 de Febrero de 2023 y finalizando el 31 de agosto del mismo año) los cuales no son suficientes para poder llegar a realizar la construcción física de la maqueta neumática, pero sí permiten obtener diferentes modelos y configuraciones con posibilidad de ser simuladas. La elaboración de este proyecto es el primer paso necesario para la elaboración física del robot, que servirá posteriormente para el estudio de algoritmos avanzados de control.

CAPITULO 3

ESTADO DEL ARTE

3 Estado del Arte

3.1 Introducción

Como se ha comentado en la introducción del presente trabajo, existen empresas que se dedican a la realización de maquetas experimentales, pero en este caso, se ha preferido reducir costes y generar el conocimiento de forma interna. Previamente al desarrollo del proyecto, se estudia: la existencia de bancos de pruebas de control de otros autores, el diseño de robots paralelos, el funcionamiento de los músculos neumáticos y de trabajos en los cuales se emplean estos. Además, es de interés el estudio de otras tecnologías disponibles, así como de los diferentes componentes y materiales que se podrían utilizar para construir el robot.

La realización de este estudio previo es fundamental para comprender cómo será el funcionamiento del robot según la configuración que adopte, y cómo se relacionan los diferentes componentes entre sí para alcanzar la posición deseada.

3.2 Análisis y selección de la arquitectura del banco de pruebas

La elección de la arquitectura es el primer problema que se debe tratar, dado que su diseño y funcionamiento, estarán condicionados por ello. Como se ha visto en la introducción, las estructuras para estudiar algoritmos de control y aprendizaje autónomo no tienen una forma fija y son flexibles. En [4] se tiene un ejemplo práctico con el banco de ensayos “RT580 Control Systems” de Gunt Hamburg, y en [5], otro ejemplo de un artículo basado en el modelado y el diseño de un control reset a partir del prototipo de la empresa Inteco. Partiendo de los requisitos de empleo de músculos neumáticos como el de actuación y el de reconfigurabilidad, se proponen distintas soluciones que puedan funcionar como bancos de prueba para la realización de ensayos de control.

En primer lugar, se propone la realización de un banco basado en la forma y funcionamiento de una grúa pórtico (tiene 3 grados de libertad, pudiendo posicionar una carga según unas coordenadas cartesianas en los ejes x , y , z). En él se tienen 3 músculos unidos por un extremo a la mesa y al circuito neumático, y por otro a una carga central, la cual se desea posicionar. Los músculos pueden moverse y fijarse de forma independiente en cualquier punto de la mesa, permitiendo que se puedan adoptar diferentes configuraciones iniciales en función de las necesidades del usuario.

Esta arquitectura, presenta un problema relacionado con la fuerza de flexión y torsión a la que se verían sometidos los músculos neumáticos, los cuales no están diseñados para realizar controles de cargas que exijan esa clase de esfuerzos. Además, la realización y el control del sistema tiene una complejidad que no se desea alcanzar con este proyecto, por lo que se opta por buscar más opciones. Si se observa la forma que tiene, se asemeja en cierto modo a un robot paralelo delta como el que se muestra en la Figura 2.



Figura 2: Ejemplo de robot Delta de Omron[6]

Partiendo de esta observación, se opta por realizar un banco de pruebas basado en la **robótica paralela**, el cual consiga integrar el empleo de músculos neumáticos de forma satisfactoria.

3.2.1 Robots paralelos

Una definición general que podría darse a la robótica paralela podría ser la siguiente:

Un **robot paralelo** es un mecanismo de cadena cinemática cerrada, formado por un efector final con **n** grados de libertad y una base fija, unidos entre sí por al menos dos cadenas cinemáticas independientes [7].

El uso de cadenas cinemáticas cerradas como manipuladores, es una opción que se lleva explorando desde incluso antes de la existencia del término de “Robot”. Se pueden poner de ejemplo algunas teorías anteriores al siglo XX, como podrían ser los estudios de Cauchy (1813) sobre la estructura y el movimiento de poliedros rígidos [8], o los estudios de Lebesgue (1867) y Bricard (1897) sobre el octaedro articulado [9].

No sería hasta el año 1931, cuando se patentó (pero no se llegó a construir) el primer mecanismo paralelo. Este mecanismo, el cual se puede observar en la Figura 3, fue inventado por James E. Gwinnett (1928) [10]. Esta plataforma giratoria adaptable, podría inclinarse en cualquier dirección en combinación con una imagen en movimiento, de forma que se acentúe la sensación de realismo y acción durante el visionado de las películas o de otro tipo de espectáculos de entretenimiento.

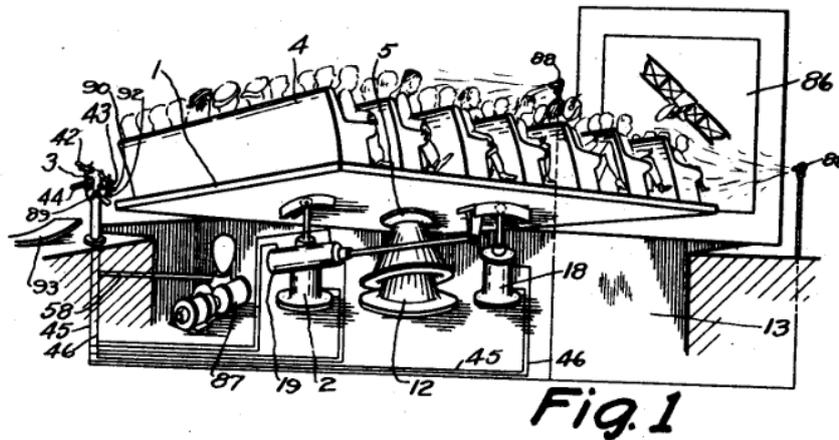


Figura 3: Mecanismo paralelo Gwinnett 1928

A partir de mitad de siglo, se comienzan a establecer los principios básicos que definen el funcionamiento de los mecanismos paralelos, desde un punto de vista práctico. Uno de los padres de la robótica paralela, y que sentó las bases de los desarrollos futuros, fue el ingeniero inglés Eric Gough. En el año 1947, Gough [11] diseñó el hexápodo octaédrico de longitud de brazos variable para la empresa Dunlop, en la cual trabajaba. Este mecanismo, se creó con el fin de realizar pruebas de desgaste sobre los neumáticos producidos. Al colocar la rueda sobre la plataforma móvil, se puede orientar y posicionar según se requiera al cambiar la longitud de los actuadores. En la Figura 4 se muestra la versión original de 1954, y a la derecha, la evolución que ha tenido hasta el año 2000.

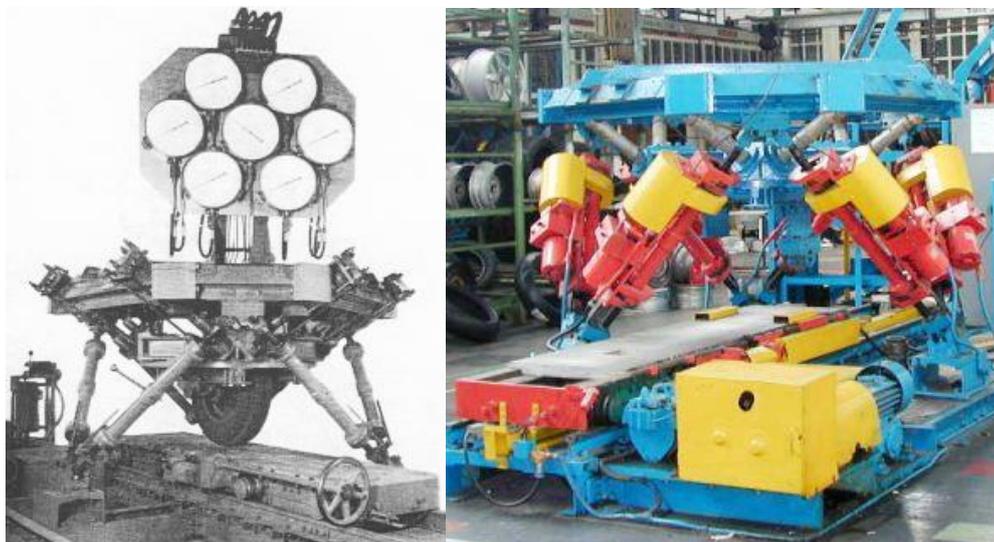


Figura 4: Hexápodo octaédrico de Gough: 1954(derecha) y 2000(izquierda)[12]

Tras ver el éxito de su construcción y utilidad, el mecanismo de Gough sirvió como referencia para que otros ingenieros vieran la viabilidad de seguir profundizando en el estudio de los mecanismos paralelos. Durante la década de los 60, el desarrollo de la industria aerodinámica, el aumento del coste del entrenamiento de los pilotos, junto a la necesidad de testear nuevos equipamientos sin tener que volar, incentivó la búsqueda de mecanismos con varios grados de libertad que pudieran simular una plataforma pesada con grandes dinámicas

[7]. Un ejemplo de ello es el artículo escrito por D. Stewart [13] en 1965, en el cual describe una plataforma de 6 grados de libertad (**GDL** en el resto del documento) para su uso como simulador de vuelo (Figura 5). El mecanismo diseñado, es muy similar al implementado por Gough (de ahí el hecho de que este tipo de mecanismos sean denominados comúnmente “Plataformas Stewart”) pero presenta algunas diferencias como puede ser la forma de la plataforma móvil; la de Gough es hexagonal, mientras que la propuesta por Stewart tiene forma triangular. Aunque este último no llegó a reproducir físicamente su artículo, sus investigaciones tuvieron un gran impacto en el desarrollo posterior en el campo de la cinemática paralela, al realizar sugerencias para el uso del hexápodo, muchas de las cuales han resultado ser predicciones muy útiles de lo que se puede encontrar hoy en día en el mercado.

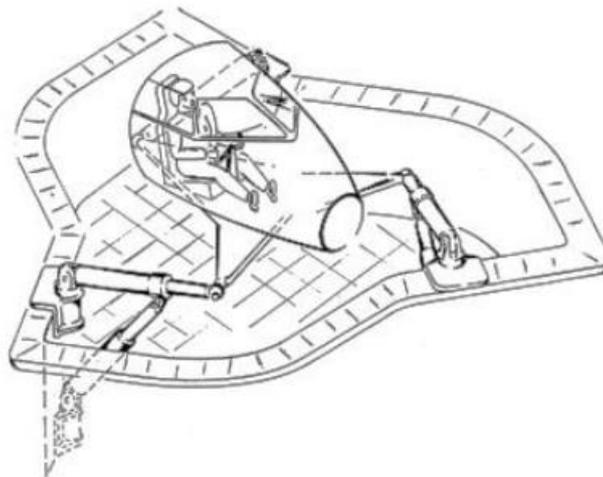


Figura 5: Esquema original de la plataforma Stewart

Las plataformas Stewart, han sido usadas históricamente como máquinas herramienta, en investigación marítima, simulación de olas, posicionamiento de antenas terrestres y telescopios espaciales, cirugía ortopédica... Pero hay aplicaciones o situaciones en las cuales no se necesita un robot con tantos grados de libertad y tan complejo mecánicamente, por lo que, en la actualidad, existen diversas opciones de mecanismos paralelos más sencillos, los cuales tienen un menor coste de fabricación, aportan un mayor espacio de trabajo y sobre los que es más fácil realizar el control.

Tanto las Stewart (6 GDL), como los robots Delta (3 GDL) como el mostrado en la Figura 2, son robots paralelos espaciales dado que pueden posicionarse en todo el espacio tridimensional. Sin embargo, existen otro tipo de robots paralelos denominados **planares** (que se comentarán brevemente en el siguiente subapartado), los cuales solo tienen capacidad de posicionarse en el plano (ejes x e y). Estos robots, tienen entre 2 y 3 GDL, dependiendo de si pueden orientarse en el eje z o no.

El número de grados de libertad, indica la cantidad de movimientos independientes que puede realizar un robot. Para realizar el cálculo de los GDL de un robot paralelo se utiliza comúnmente el criterio de Chebyshev-Grübler (utilizado también para los robots serie), el cual varía en función de si se trabaja con un robot espacial o paralelo[14]. La ecuación general para un mecanismo tridimensional es la siguiente:

$$M = 6(N - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (1)$$

Para el caso de un robot planar, la ecuación es similar, pero cambia al no tener posicionamiento en el eje Z:

$$M = 3(N - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (2)$$

Los parámetros que se utilizan en este par de ecuaciones son:

- **M**: Número de grados de libertad del mecanismo.
- **N**: El número de cuerpos rígidos del mecanismo, incluyendo la base (fija).
- **J**: El número total de articulaciones (joints).
- **f_i**: El número de grados de libertad que aporta cada articulación.

Existen diferentes tipos de articulaciones, cada una de las cuales aporta un movimiento y un número de grados de libertad diferente. En la siguiente tabla, se realiza una clasificación de los principales tipos de articulaciones usados en robótica, junto al número de GDL que aportan.

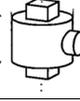
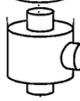
Tipo articulación	Número GDL	GDL Traslación	GDL Rotación	Imagen
Rotacional	1	0	1	
Prismática	1	1	0	
Cilíndrica	2	1	1	
Planar	3	2	1	
Esférica	3	0	3	

Tabla 1: Principales tipos de articulaciones empleadas en robótica

3.2.1.1 Manipuladores Paralelos Planares

Como se ha comentado con anterioridad, el movimiento de los robots planares se reduce al plano, y no todos tienen un tercer grado de libertad perteneciente a la rotación en el eje z. La clasificación de esta clase de manipuladores se hace con relación a los distintos tipos de

articulaciones que componen cada una de sus cadenas cinemáticas. Principalmente, se utilizan dos tipos: las articulaciones de rotación (**R**) y las prismáticas (**P**). Un ejemplo de robot planar de 2 GDL podría ser el robot 5R que se muestra en la Figura 6. A la izquierda, se observa el esquema cinemático, y cómo está compuesto de 5 ejes de rotación, dos de los cuales están conectados con los actuadores (Active joints). A la derecha, una de las utilidades que tiene el mecanismo en el mundo real, siendo utilizado como dispositivo de neurorrehabilitación.

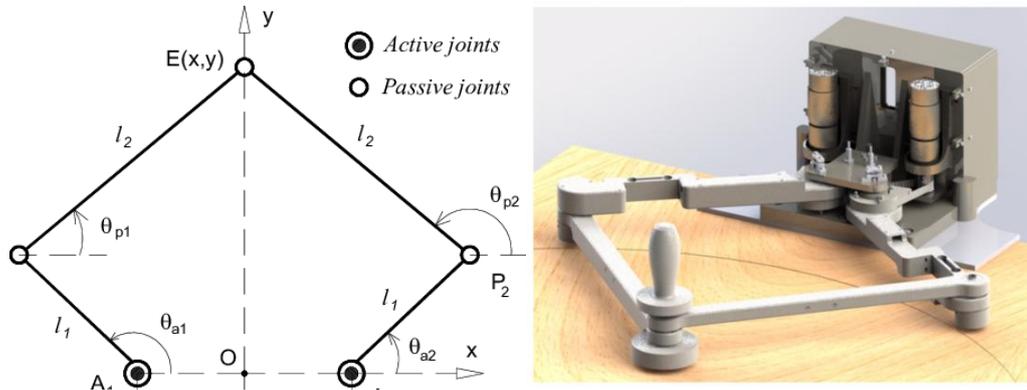


Figura 6: Manipulador Paralelo Planar 5R

Para este proyecto, se busca una maqueta que tenga 3 GDL, por lo que, para aplicarlo a los mecanismos planares, y de acuerdo con la definición de robótica paralela dada en el inicio del apartado 3.2, debería poseer 3 cadenas cinemáticas independientes actuada cada una por un actuador. Cada una de estas cadenas, está unida con una base fija y una plataforma móvil al mismo tiempo, y está constituida por dos cuerpos rígidos unidos entre sí por una articulación, dando lugar a un total de 3 por cada cadena. Según el tipo de articulación (o rotacional o prismática) y según cuál esté actuada, se tienen configuraciones diferentes.

En cada cadena serie, se tiene una articulación actuada y 2 pasivas, lo que da lugar a que combinando las diferentes opciones posibles y eliminando las estructuras equivalentes, se tengan 10 arquitecturas con posibilidad de ser empleadas. Estas arquitecturas son: RRR, RRR, RPR, RPR, RPP, PRR, PRR, PRP, PPR y RRP [15]. El guion bajo una de las articulaciones representa cuál es la actuada en cada caso. En la siguiente figura, se puede ver con más detalle qué mecanismos representan estas nomenclaturas:

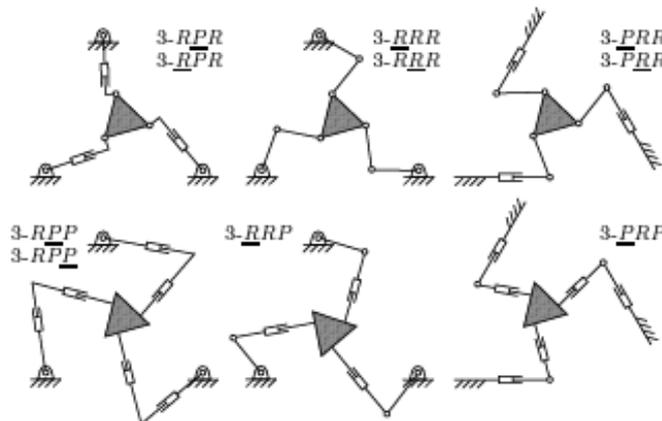


Figura 7: Manipuladores Paralelos Planares de 3 GDL

3.2.1.2 *Ventajas e inconvenientes de la robótica paralela*

Se podrían resumir las principales ventajas que presenta la robótica paralela como [16]:

- Alta rigidez y ligereza, lo cual dota a estos mecanismos de una alta precisión.
- Buena relación carga/potencia: pueden manipular cargas superiores a su propio peso.
- Alta velocidad de operación y baja inercia.

Pero también presentan algunos inconvenientes como:

- Complejidad de la cinemática de los mecanismos.
- Espacios de trabajo relativamente pequeños, a lo que se suma el acoplamiento entre la posición y la orientación.
- Dificultad para diseñar el control.
- Configuraciones singulares variables entre cada robot y complejidad de resolución.

Respetto de la robótica serie, presenta no solo diferencias funcionales y estructurales, sino que cambia también el ámbito de empleo y las características de operación. Tales diferencias, hacen que se deban replantear la mayoría de los problemas teóricos; de hecho, sucede que algo que es complejo de resolver para un tipo de estructura, no lo es para la otra y viceversa. Un ejemplo podría ser la resolución de la cinemática inversa, la cual es difícil de resolver para los robots serie, pero en cambio es sencilla para los paralelos [17].

Por ello en las últimas décadas, tanto por la aparición de nuevas necesidades que los robots serie no pueden cubrir, como por el avance tecnológico y el aumento de la capacidad de cómputo, se ha intensificado la investigación en este tipo de robótica obteniendo un mejor conocimiento de este tipo de estructuras.

3.2.2 *Arquitectura seleccionada*

Se busca una arquitectura que sea un mecanismo o un robot paralelo actuado con músculos neumáticos. Tras el primer diseño propuesto, se indaga acerca de la posibilidad de crear un robot delta con este tipo de actuación. Esta clase de robots, destacan por tener una gran rigidez y fuerza, así como poca inercia (debido principalmente a su estructura, en la cual los motores están fijos sobre la base situada encima del espacio de trabajo, permitiendo que las partes móviles del robot sean ligeras) y su alta capacidad para la realización de movimientos rápidos y con mucha precisión [18].

Realizando una breve búsqueda sobre la viabilidad para realizarlo con una actuación neumática, se encuentran proyectos como en [19], donde se puede ver el empleo de un robot delta con accionamiento por músculos neumáticos como prototipo de un dispositivo háptico para la realización de experimentos de control de posición y control de rigidez. Esta arquitectura presenta algunos problemas como: la relación entre el espacio de trabajo y el tamaño del robot es pequeño, la carga que puede mover es reducida, hay que tener precaución con las singularidades de su espacio de trabajo y el control es complejo. Como banco de pruebas, este robot podría ser válido, pero su complejidad, sumado a que está pensado más para un uso industrial, y se desea que sea reconfigurable fácilmente, hace que se busque otra arquitectura distinta.

Como se comentó en el apartado 3.2.1.1, una forma sencilla de robot paralelo, que podría usarse como un banco de pruebas de aprendizaje autónomo, podría ser un planar de 3 GDL. De entre todas las arquitecturas posibles, la arquitectura más común para un manipulador paralelo de 3 grados de libertad es la $3R\bar{R}R$ por razones prácticas, al ser la más sencilla de construir, por lo que se opta por usarla de base para este proyecto. En el siguiente apartado, se entra en más detalle en el funcionamiento y la cinemática del manipulador.

3.3 El robot paralelo planar $3R\bar{R}R$

El robot paralelo planar $3R\bar{R}R$, es un manipulador de 3 grados de libertad que se caracteriza por estar formado estructuralmente por 3 cadenas cinemáticas, compuestas por 2 cuerpos rígidos cada una, y cuyas uniones son articulaciones rotativas. Los actuadores están situados en la primera articulación de cada cadena, iniciando así el movimiento de todo el mecanismo. Este tipo de robots, han sido ampliamente estudiados debido al problema de síntesis dimensional, la dificultad del análisis de las singularidades y el espacio de trabajo, la rigidez y el equilibrio. En la Figura 8 se puede ver un esquema de la cinemática.

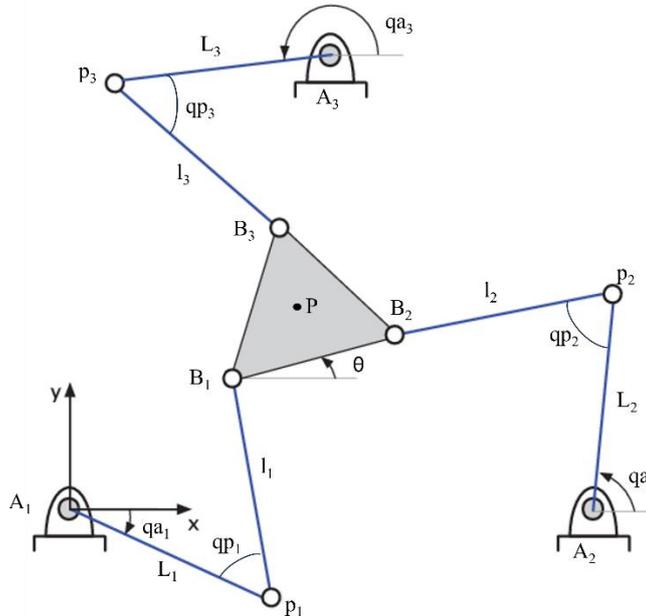


Figura 8: Esquema cinemático robot paralelo planar $3R\bar{R}R$

El hecho de colocar los actuadores en la articulación unida con la base fija, permite reducir el peso de la estructura y la carga de la plataforma móvil [20]. El sistema de referencia absoluto se sitúa sobre la primera articulación activa (A_1) y los ángulos q_{a_i} , q_{p_i} y θ , representan el giro de las articulaciones activas, el giro de las articulaciones pasivas y el giro del punto medio de la plataforma respectivamente. Los puntos A_i , P_i y B_i se corresponden con los puntos donde están situadas las juntas rotativas. El punto P define la posición deseada del robot, y está situado en el centro de la plataforma.

Se sabe que, en manipuladores paralelos con plataformas configurables, el uso de topologías simétricas conduce a posturas óptimas de los mismos. Por lo tanto, en lo que sigue, las ecuaciones de restricción cinemáticas del robot en cuestión se formulan en base a una arquitectura simétrica del manipulador (en la mayor parte de los estudios se emplean los

triángulos equiláteros) [21]. El movimiento se define como la unión de la variación de las coordenadas articulares de las diferentes cadenas serie y los cambios en las coordenadas cartesianas en la plataforma móvil.

Sea el espacio articular tal que:

$$q = \begin{bmatrix} q_a \\ q_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde q_a son las variables articulares activas y q_p las variables articulares pasivas:

$$q_a = \begin{bmatrix} q_{a1} \\ q_{a2} \\ q_{a3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$q_p = \begin{bmatrix} q_{p1} \\ q_{p2} \\ q_{p3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Y el espacio de salida los 3 grados de libertad del robot planar 3RRR:

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

Se plantean el problema cinemático, el cual se puede descomponer en el de posición, el de velocidad y el de aceleración, pero no se entra en detalle en el planteamiento de la dinámica de este tipo de robots, dado que no tiene relevancia en este proyecto. El desarrollo de los siguientes apartados se basa en el libro de *Parallel Robots* [7] y en los conocimientos adquiridos durante la impartición de la asignatura de Robótica Industrial Avanzada del Máster de Ingeniería de Control, Automatización y Robótica.

3.3.1 Problema de posición

La relación entre la posición del TCP, definida por el espacio de salida \mathbf{X} , y las variables articulares \mathbf{q} se denomina problema de posición. Se tienen dos tipos de problemas de posición: inverso y directo (también denominados problemas cinemáticos). Para resolverlos, destacan principalmente dos métodos: la teoría de Screws (también llamada del tornillo) y las ecuaciones de cierre o de lazo (método geométrico).

La teoría de Screw es una herramienta matemática desarrollada por Robert Stawell a principios del siglo XX con el propósito de estudiar las características estáticas y dinámicas de los cuerpos rígidos, bajo la filosofía de que entidades como las fuerzas o velocidades, podrían agruparse en pares de vectores concatenados capaces de formar vectores de hasta 6 dimensiones. A finales de siglo, la teoría se revitalizó y se aplicó con éxito en el análisis y síntesis de manipuladores robóticos incluyendo análisis cinemáticos de orden alto como los de jerk y rebotes [21]–[23].

La teoría del tornillo permite realizar un análisis completo del sistema, pero en este caso, es más compleja la obtención de los vectores y es más sencillo realizarlo mediante ecuaciones de lazo. Las ecuaciones de cierre describen el lazo cerrado que forman las diferentes cadenas del mecanismo partiendo de la geometría, donde la relación entre las variables de posición es no

lineal al estar sujetas a relaciones trigonométricas. Para comprenderlo mejor, se realiza una simplificación de la Figura 8 y que se recoge en la siguiente.

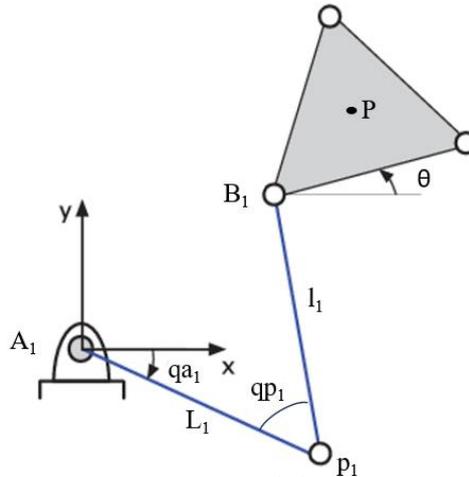


Figura 9: Simplificación esquema cinemático robot 3RRR

La ecuación de cierre o de lazo se representa como:

$$f_i(x, q_i) = 0_{n_d \times 1} \quad (7)$$

Al ser un robot planar, el valor de n_d es 2. Para que el problema esté totalmente definido, se debe cumplir:

$$n + n_a = m \quad (8)$$

Donde:

- **n**: Número de Grados de Libertad del mecanismo.
- **n_a**: Número de articulaciones pasivas.
- **m**: Dimensión de la ecuación vectorial de cierre.

En este caso, como se tiene que tanto el número de grados de libertad de un robot planar 3RRR como el número de articulaciones pasivas es 3, el valor de **m** es 6. Este valor es correcto, dado que se tienen 3 cadenas cinemáticas cada una de las cuales tienen 2 ecuaciones de cierre referidas a las componentes x e y.

Partiendo de la cadena cinemática mostrada en Figura 9, se busca la ecuación de cierre general que modela cualquiera de los 3 lazos. Se empieza por el punto de anclaje de la cadena serie sobre la base fija A_i , y se sigue avanzando hacia el punto **P** a través de los diferentes vectores que están asociados a cada cuerpo rígido y articulación, de manera que la suma total sea 0. La siguiente ecuación representa la ecuación de lazo general:

$$a_i + \vec{L}_i + \vec{l}_i - \vec{d}_i - P = 0 \quad (9)$$

Agrupando las ecuaciones de cierre de las 3 cadenas cinemáticas del robot, se llega a la ecuación vectorial de cierre, la cual modela las restricciones a las que está sometido. Se debe tener en cuenta el giro de la plataforma móvil, el cual modifica el valor del vector \vec{d}_i , siendo este

último el vector que define la posición de \mathbf{P} respecto de \mathbf{B}_i . Si se desarrolla la ecuación 9, se obtiene la expresión matricial de cada cadena serie:

$$\begin{bmatrix} a_{ix} \\ a_{iy} \end{bmatrix} + L_i \begin{bmatrix} \cos(q_{ai}) \\ \text{sen}(q_{ai}) \end{bmatrix} + l_i \begin{bmatrix} \cos(q_{ai} + q_{nai}) \\ \text{sen}(q_{ai} + q_{nai}) \end{bmatrix} - \text{Rot}_z(\theta) \begin{bmatrix} d_{ix} \\ d_{iy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\text{Rot}_z(\theta)$ es la matriz de rotación en torno al eje z:

$$\text{Rot}_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.3.1.1 Cinemática inversa

El análisis de la cinemática inversa en el caso de los robots planares 3RRR con la primera articulación activa, da lugar a 8 posicionamientos o soluciones diferentes para alcanzar un mismo punto dentro del espacio de trabajo (esto se denomina **modos de trabajo**). Su estudio es importante, dado que a partir de las variables de salida \mathbf{X} del TCP, permite encontrar el valor de las variables articulares actuadas \mathbf{q}_a que se deben dar para posicionar la plataforma móvil en el lugar deseado. La resolución que se lleva a cabo es por medio del método geométrico, pues permite encontrar el valor de los ángulos necesarios sin tener que calcular el valor angular de las articulaciones pasivas.

Para obtener el valor de las articulaciones activas \mathbf{q}_a para una posición y orientación determinados del elemento final, se parte de la ecuación 9, despejando el valor de \mathbf{l}_i tal que:

$$\vec{l}_i = \text{Rot}_z(\theta)\vec{d}_i + \vec{P} - \vec{a}_i - \vec{L}_i \quad (12)$$

Descomponiendo el vector de \mathbf{l}_i en sus componentes en \mathbf{x} e \mathbf{y} , y elevándolo al cuadrado, se elimina la dependencia de las articulaciones pasivas, por lo que simplemente se tiene que despejar el valor de las articulaciones activas, quedando la función final tal que:

$$l_i^2 = (\text{Rot}_z(\theta)\vec{d}_i + \vec{P} - \vec{a}_i - \vec{L}_i)^T (\text{Rot}_z(\theta)\vec{d}_i + \vec{P} - \vec{a}_i - \vec{L}_i) \quad (13)$$

El valor de las articulaciones pasivas se puede obtener por medio de algún método geométrico como por corte de circunferencias, o descomponiendo las cadenas cinemáticas en triángulos y empleando la trigonometría.

3.3.1.2 Cinemática directa

El problema cinemático directo calcula el valor que tendrán las variables de salida (posición y orientación del elemento final) para unos determinados valores de las variables articulares actuadas \mathbf{q}_a . Como se explicó en el apartado 3.2.1, la resolución de la cinemática directa de los robots paralelos es compleja, y no tiene solución analítica en el caso general. Igual que en el problema de cinemática inversa había múltiples soluciones para un mismo punto, en este caso sucede lo mismo y reciben el nombre de **modos de ensamblaje**.

Existen varios métodos para resolver esta cuestión, como pueden ser: el método geométrico, basado en la ecuación vectorial de cierre (ecuación 10), pero solo es aplicable en casos muy concretos; mediante sensorización redundante, lo cual significa sensorizar algunas de las articulaciones pasivas, de cara a obtener más información del sistema; el método de Newton-

Raphson, el cual es el más utilizado dado que cubre un mayor número de casos, pero requiere de mayor coste computacional.

El método de Newton-Raphson es un procedimiento iterativo y abierto que permite hallar las raíces de una función a partir de una semilla (un valor numérico cercano a la posible raíz) [24]. En general, converge rápidamente y es muy eficiente, menos en el caso de que existan raíces múltiples. Para resolver el problema cinemático directo, se estiman posiciones a partir de una semilla $\mathbf{X0}$ mediante la función:

$$x_{k+1} = x_k - J_k^{-1}f(x_k, q_a) \quad (14)$$

Como se ve en la ecuación 14, el cálculo de las posiciones siguientes depende de las ecuaciones de cierre y del cálculo del jacobiano con respecto al espacio de salida como se muestra en la ecuación 15:

$$J_k = \left. \frac{\partial f(x, q_a)}{\partial x} \right|_{x=x_k} \quad (15)$$

Además de una semilla, se establece una condición de parada, por la cual, si la diferencia entre el valor siguiente iterado y el actual son muy cercanos, se ha llegado al punto buscado. Puede ocurrir también que la Jacobiana tienda a 0, lo cual significaría que se está cerca de una singularidad, por lo que se saldría de la iteración.

Tras aplicar el método de Newton-Raphson, también se pueden calcular los valores de las variables articulares no actuadas \mathbf{q}_{na} de la misma forma que se procedió para la resolución de la cinemática inversa.

3.3.2 Problema de velocidad

Para resolver el problema de velocidad, es necesario resolver antes el de posición. Este problema, establece la relación entre las velocidades de las variables articulares y las velocidades del elemento final. El problema de velocidad es lineal respecto del resto de velocidades y se caracteriza por el uso de Jacobianas, por lo cual es necesario el empleo de la ecuación de cierre de cada cadena cinemática ($\Gamma(\mathbf{x}, \mathbf{q}_i)$). La ecuación general de velocidad del lazo es:

$$\frac{\partial \Gamma_i(x, q_i)}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial \Gamma_i(x, q_i)}{\partial x} \dot{x} = 0 \quad (16)$$

Antes de continuar y presentar las ecuaciones que resuelven el problema de velocidad directo e inverso, se presentan qué son cada una de las jacobianas:

- **Ji:** Jacobiana de las cadenas cinemáticas
- **Jq:** Jacobiana de las variables articulares
- **Jqa:** Jacobiana de las variables articulares activas.
- **Jqna:** Jacobiana de las variables articulares pasivas.
- **T:** Relaciona las variables articulares.

La ecuación 16 simplificada queda como:

$$J_{qi}\dot{q}_i + J_{xi}\dot{x} = 0 \quad (17)$$

La expresión que define la jacobiana de una cadena cinemática (\mathbf{J}_i) es:

$$\dot{q}_i = J_{qi}^{-1}J_x\dot{x} = J_i\dot{x} \quad (18)$$

Al estudiar las ecuaciones de velocidad de las variables articulares, se obtienen algunas expresiones que las relacionan entre sí. La relación entre la velocidad de las articulaciones activas y la de las pasivas es tal que:

$$q_{na}\dot{q}_a = J_{qna}\dot{x} \quad (19)$$

$$\dot{q}_{na} = J_{qna} J_{qa}^{-1}\dot{q}_a \quad (20)$$

Por otro lado, la relación entre la derivada del espacio articular y la velocidad de las articulaciones activas es:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} I_n \\ J_{qna} J_{qa}^{-1} \end{bmatrix} \dot{q}_a = T\dot{q}_a \quad (21)$$

Una vez comentadas las diferentes Jacobianas y las relaciones existentes, se procede a mostrar la forma de calcular el problema de velocidad directo e inverso.

3.3.2.1 Problema de velocidad directo

El problema de velocidad directo busca encontrar cuál es la velocidad del centro de la plataforma móvil en función de las velocidades de las articulaciones activas, siendo la función:

$$\dot{x} = J_{qa}^{-1}\dot{q}_a = J_p\dot{q}_a \quad (22)$$

3.3.2.2 Problema de velocidad inverso

El problema de velocidad inverso calcula el valor de las velocidades articulares conocidas las velocidades del TCP. La forma de resolverlo se muestra en la ecuación 25:

$$\dot{q}_a = J_{qa}\dot{x} \quad (23)$$

3.3.3 Problema de aceleración

El problema de aceleración permite obtener las aceleraciones del centro de la plataforma conocidas las aceleraciones de las variables articuladas y viceversa. Su resolución parte de los cálculos realizados para el problema de velocidad y posición. Para ello, se calcula la derivada de la ecuación 13, obteniendo la siguiente expresión:

$$J_{qi}\ddot{q}_i + \dot{J}_{qi}\dot{q}_i + J_{xi}\ddot{x} + \dot{J}_{xi}\dot{x} = 0 \quad (24)$$

Esta ecuación se puede reordenar, de forma que se obtenga la aceleración del espacio articular en función de velocidad y aceleración del TCP:

$$\dot{J}_i = -J_{qi}^{-1}(\dot{J}_{xi} + J_{qi} \dot{J}_i) \quad (25)$$

Dando lugar a:

$$\ddot{q}_i = J_i \ddot{x} + \dot{J}_{xi} \dot{x} \quad (26)$$

3.3.3.1 Problema de aceleración inverso

El problema de aceleración inverso trata de encontrar la aceleración de las variables articulares activas conocida la aceleración del TCP. La función que la resuelve se muestra a continuación:

$$\ddot{q}_{ai} = J_{qa} \ddot{x} + \dot{J}_{qa} \dot{x} \quad (27)$$

3.3.3.2 Problema de aceleración directo

Al contrario que con el inverso, el problema de aceleración directo trata de encontrar los valores de aceleración del TCP, para unos valores de aceleración de las articulaciones activas conocido. La expresión que define la relación entre ambas aceleraciones se muestra a continuación:

$$\ddot{x} = J_{qa}^{-1} \ddot{q}_a - (J_{qa}^{-1} \dot{J}_{qa} J_{qa}^{-1}) \dot{q}_a = J_p \ddot{q}_a + J_p \dot{q}_a \quad (28)$$

El problema de aceleración de las variables articulares queda tal que:

$$\ddot{q} = J_q \ddot{x} + \dot{J}_q \dot{x} \quad (29)$$

3.3.4 Análisis de singularidades

Una configuración singular, es aquella en la que el manipulador pierde o gana algún grado de libertad. En estas configuraciones, el robot pierde capacidad de movimiento y requiere de velocidades articulares infinitas, por lo que no es realizable. Para poder realizar el análisis de singularidades, se debe resolver el problema de velocidad, dado que para determinar si una posición es singular o no, se calcula el determinante de los jacobianos de la ecuación 17 (J_q y J_x) y se comprueba si tienen un valor nulo [25]. Existen diferentes tipos de singularidades, los cuales se comentan a continuación [26]:

- **Singularidades de tipo inverso o de tipo 1:** El manipulador pierde un grado de libertad. Se presentan en los límites del espacio de trabajo cuando alguna de las extremidades está totalmente extendida o retraída, perdiendo el grado de libertad en la dirección de la cadena cinemática. Cuando esto ocurre, el determinante de la matriz jacobiana \mathbf{J}_q , es cero. Tras el estudio de diferentes documentos se aprecia que las regiones que tienen mayor probabilidad de contener una singularidad de este tipo son la zona externa del espacio de trabajo y las zonas que están pegadas a la articulación activa (cuando los brazos de la cadena cinemática están paralelos uno encima del otro). No existe pérdida de controlabilidad.

- **Singularidades de tipo directo o de tipo 2:** En vez de perder un grado de libertad, el manipulador lo gana. La plataforma móvil tiene un único CIR (Centro Instantáneo de Rotación), de forma que, si las tres cadenas cinemáticas se bloquean, la plataforma terminal puede realizar una rotación infinitesimal alrededor del CIR. Se da cuando el determinante de la matriz jacobiana de \mathbf{Jx} es nulo. Existe pérdida de control.
- **Singularidades combinadas o tipo 3:** Como su propio nombre indica, se dan cuando aparecen los dos tipos de singularidades anteriores a la vez ($\mathbf{Jq}=\mathbf{0}$ y $\mathbf{Jx}=\mathbf{0}$). En el caso de las plataformas 3RRR como la creada en este proyecto, se dan cuando una de las cadenas está totalmente extendida y las líneas de proyección de los elementos pasivos se cortan en un solo punto. Transiciones entre modos de trabajo y ensamblaje.

Para el diseño de la maqueta se deben tener en cuenta estas zonas, por lo que se estudia cuál debe ser el tamaño más propicio de los elementos físicos y en qué zonas se podrían instalar de cara a reducir el número de singularidades. Realizando pruebas con las longitudes de los elementos que componen las cadenas serie, se deduce que, si las longitudes de los dos elementos son iguales, las singularidades inversas tienden a convertirse en puntos. Un aumento de las longitudes lleva consigo un aumento del espacio de trabajo.

3.3.5 *Análisis del espacio de trabajo (Workspace)*

El espacio de trabajo define las zonas que son alcanzables por el elemento terminal del robot. Existen varios factores que pueden restringir los movimientos de los robots paralelos como: límites mecánicos en las articulaciones pasivas, colisiones entre elementos del propio robot, limitaciones de los actuadores y diferentes singularidades que podrían partir el espacio de trabajo en zonas distintas... En el capítulo 7.3 del libro *Parallel Robots* se puede encontrar una explicación detallada de cómo obtener el workspace de un robot planar, así como los diferentes métodos que existen [7].

En el caso del robot planar 3RRR, la orientación que se le dé a la plataforma móvil influye directamente en el tamaño del espacio de trabajo, obteniendo el mayor espacio con una orientación de 0° [27]. Otros aspectos como el tamaño de los elementos que componen el robot también pueden afectar. Si aumenta el radio o el tamaño de la plataforma móvil, el espacio de trabajo aumenta y las singularidades inversas no cambian de tamaño, pero cambian su ubicación al encontrarse más cerca del centro de la maqueta. Cabe destacar también la pérdida de calidad de posicionamiento al aumentar el tamaño de la plataforma. Otro tamaño que se puede modificar es el de posicionamiento de los actuadores del robot; es decir, al separar mucho los actuadores, la circunferencia que los contiene también aumenta, disminuyendo el espacio de trabajo (menos posibilidad de movimiento de las cadenas cinemáticas) pero aumenta la calidad del posicionamiento.

3.3.5.1 *Índice de destreza, Número de Condición e Índice de Manipulabilidad*

Como se ha visto, el espacio de trabajo se puede ver condicionado por varios factores, afectando a las posiciones alcanzables por el robot, así como a las posibles trayectorias que pueda desarrollar. Para medir la capacidad que tiene un robot de posicionarse y orientarse en un determinado workspace, existen algunos índices, como el índice de destreza [28]. Este índice, además de mostrar algunas propiedades del manipulador, da información de los puntos singulares y de las configuraciones singulares más cercanas. Por otro lado, está el “Número de condición”, el cual aporta información acerca de la amplificación del error en el TCP y se quiere

tener lo más bajo posible. Este número expresa la relación de cómo un error en una articulación actuada se multiplica y se traslada a un error relativo en el espacio de salida \mathbf{X} . Caracteriza la destreza del robot y se usa como un índice de rendimiento.

El índice de destreza es la inversa del número de condición y su valor cambia entre 0 y 1. Cuanto más cerca esté del valor unitario, quiere decir que el manipulador tiene una precisión muy cercana a la de los actuadores y presenta unos valores de rigidez aceptables. Sea η el índice de destreza:

$$\eta = \frac{\text{valor singular más pequeño}}{\text{valor singular más grande}} \quad (30)$$

En la Figura 10 se presenta el espacio de trabajo de un robot 3RRR junto a los índices de destreza de cada zona. Los máximos valores, se localizan en el centro mostrando un buen rendimiento en esa zona; sin embargo, los valores mínimos se localizan alrededor de las articulaciones activas.

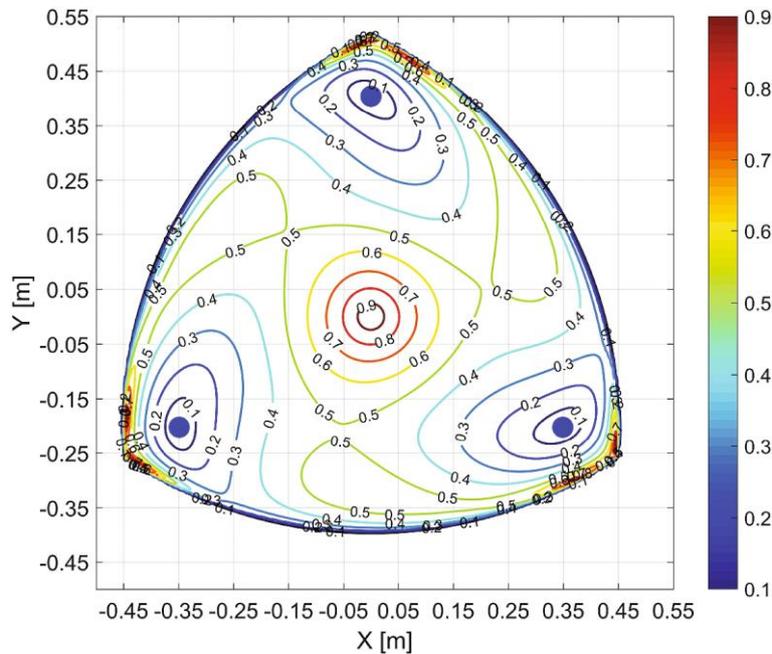


Figura 10: Espacio de trabajo e índice de destreza robot planar 3RRR [28]

El índice de manipulabilidad, muestra la capacidad de un robot para realizar una tarea en un espacio de trabajo determinado. Este factor, muestra cuán cerca está la precisión en la velocidad entre el TCP y las juntas. En la Figura 11 se muestra una representación de cómo se distribuyen los diferentes valores según la zona.

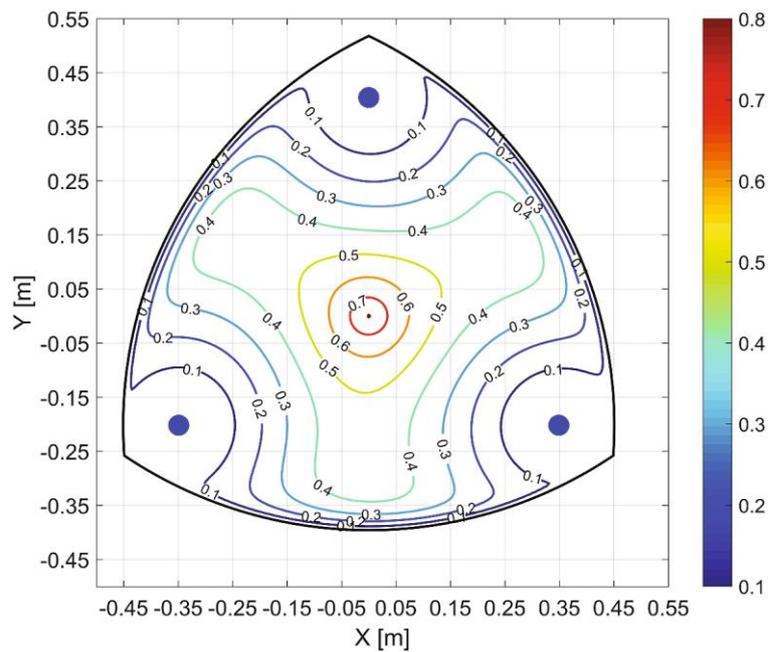


Figura 11: Índice de manipulabilidad para un robot 3RRR

Estos índices son útiles para usarse en una maqueta real y en simulación, pues permiten estudiar cómo afectan los errores que se suceden a través de las articulaciones y cómo afectan al valor final.

3.4 Músculos neumáticos artificiales

El progreso en conceptos de actuación es importante para la evolución en la robótica. La selección del actuador afecta al rendimiento del robot, a su peso y tamaño, al tipo de sensores y la arquitectura de control a diseñar, entre otras variables. La finalidad de la actuación es convertir una señal de entrada en una salida mecánica, encontrándose diferentes tipos de robots en función de la naturaleza del estímulo que recibe el actuador: térmico, magnético, reacción química... pero principalmente los actuadores se podrían agrupar dentro de tres grandes grupos: los hidráulicos, los eléctricos y los neumáticos[29].

Los actuadores hidráulicos (Figura 12), convierten la presión ejercida por un fluido en energía mecánica. Normalmente, se encuentran en forma de cilindro, aunque también existen motores hidráulicos, por lo que el movimiento de salida del dispositivo puede ser lineal, rotativo u oscilatorio. Este tipo de actuadores tiene una elevada capacidad de carga y una buena relación potencia-peso, por lo que suele utilizarse en aplicaciones de robots de grandes dimensiones que requieren el movimiento de cargas pesadas. El funcionamiento es similar al que presentan los actuadores neumáticos, pero trabajan con presiones mucho mayores y con aceites con una compresibilidad menor, por lo que la precisión y la estabilidad es mayor. Entre las desventajas que presentan, podrían destacarse la falta de control por parte del usuario, la sensibilidad a la temperatura, el continuo mantenimiento que hay que tener, y la complejidad del montaje debido a todos los componentes complementarios que se necesitan.

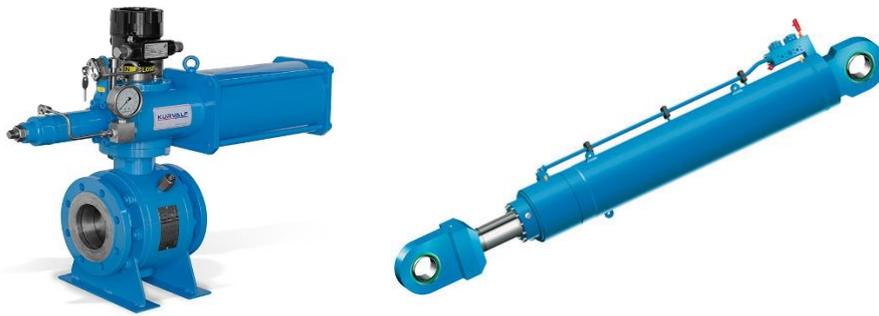


Figura 12: Ejemplos actuadores hidráulicos

Por otro lado, los actuadores eléctricos (Figura 13) son los más empleados debido a su alta precisión, a la compatibilidad con la mayoría de los sistemas de control y al desarrollo de la fuerza instantánea [30]. Estos dispositivos, convierten la electricidad en energía cinética. La variedad de actuadores eléctricos es amplia, abarcando tanto la robótica convencional, como la robótica suave (“Soft Robots”) [31]. Estos dispositivos, aportan fiabilidad al control del movimiento, un coste de mantenimiento bajo y no tienen peligro de sufrir fugas como es el caso de los actuadores hidráulicos. Sin embargo, el coste inicial es mayor que en otros actuadores, son dispositivos sensibles a vibraciones y su producción es más compleja.

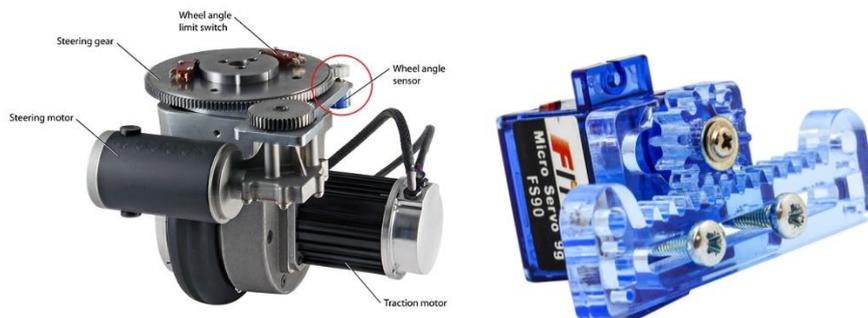


Figura 13: Ejemplos actuadores eléctricos

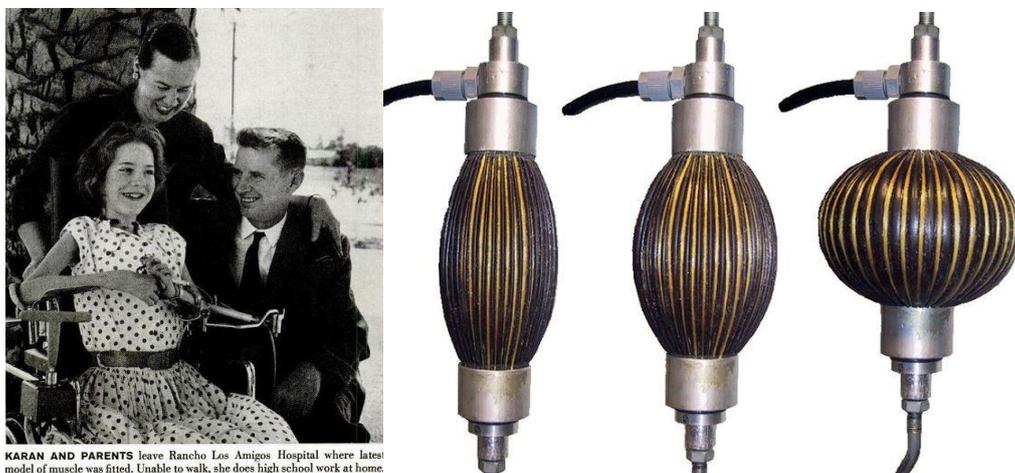
Por otra parte, los actuadores neumáticos tienen un uso generalizado en robótica debido a su ligereza, alta eficiencia, su carácter no contaminante, buena flexibilidad y adaptación ambiental [32]. Aunque los diseños son diversos y diferentes, el principio de funcionamiento básico es similar entre sí. El diseño básico es el de un cilindro, en el cual entra aire o un gas presurizado e intenta expandirse hasta alcanzar la presión atmosférica, lo cual empuja un pistón u otro dispositivo mecánico, creando el movimiento. En la Figura 14 se puede ver uno de los cilindros más comúnmente usados.



Figura 14: Cilindro neumático de Festo

Es cierto que estos dispositivos pueden tener pérdidas de presión, y la compresibilidad del aire es un factor a tener en cuenta. En cambio, son fiables, seguros y tienen un coste muy bajo en comparación con otros tipos de actuación, lo cual, sumado a las anteriores ventajas citadas, justifican su empleo en tantos campos de la industria.

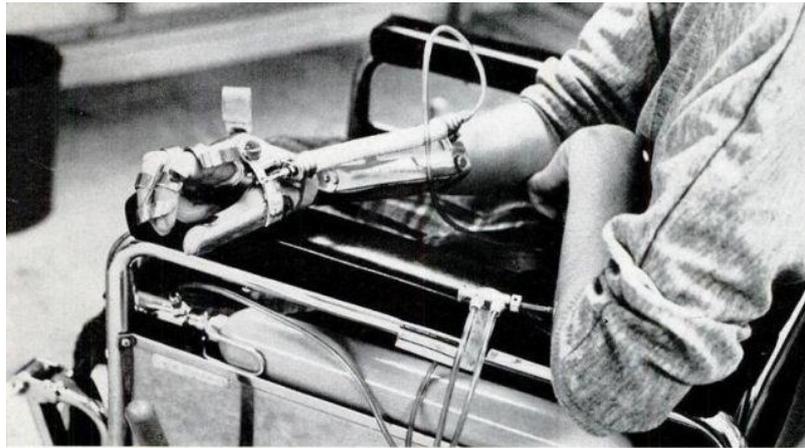
Uno de los tipos de actuadores que han mostrado mayor evolución y capacidad para la fabricación en la última década, son los músculos neumáticos artificiales (conocidos en inglés por las siglas PAM “Pneumatic Artificial Muscle”). En los últimos años de la década de los 50, el físico e ingeniero estadounidense Joseph L. McKibben, desarrolló el primer músculo neumático, que llevaría su propio nombre: McKibben (ver Figura 15) [33], [34].



KARAN AND PARENTS leave Rancho Los Amigos Hospital where latest model of muscle was fitted. Unable to walk, she does high school work at home.

Figura 15: En la derecha, McKibben y su familia. Izquierda, primeros músculos.

Diferentes variantes de PAM, han sido desarrolladas a lo largo de los años partiendo de este diseño, el cual nació inicialmente para asistir a personas paralizadas por la enfermedad del polio. Con esta creación, se buscaba reproducir el comportamiento de los músculos humanos, de forma que, al unirlo con otros componentes, se pudiera crear un mecanismo que sirviera como un exoesqueleto y facilitara el movimiento articular de las personas enfermas. En la Figura 16 se puede ver con más detalle [35].



TO USE PARALYZED FINGERS, Diane Hiruko pushes valve with her left elbow. This lets gas from cylinder flow through tubes into artificial muscle on right arm. Muscle contracts and pulls index and middle fingers toward thumb.

Figura 16: Exoesqueleto para el movimiento de la mano con músculos McKibben.

3.4.1 Construcción y funcionamiento del músculo

Los 3 principales componentes de un músculo neumático son:

- **Tubo de goma interior:** funciona a modo de cámara de aire y se infla cuando se aumenta la presión con un fluido, en este caso aire. Las cámaras delgadas hacen que el actuador sea más eficiente, al necesitarse menos energía para estirar el material, pero se corre el riesgo de que puedan aparecer grietas por la fricción con la malla exterior (uno de los causantes de la histéresis de estos actuadores), provocando fugas de aire.
- **Funda tejida exterior:** una malla trenzada cubre la cámara de aire, restringiendo su movimiento y transformando esta expansión radial en una contracción lineal. Su construcción depende del fabricante.
- **Cierre o abrazadera:** Los extremos del músculo se utilizan para unirlos a una carga o bien para unirlos a otros elementos de un sistema mayor, por lo que, en función de su objetivo, se pueden distinguir diferentes tipos de cierres.

Juntando los anteriores puntos, estos músculos se construyen colocando coaxialmente un tubo de goma dentro de una funda tejida. El tubo de goma crea una cámara de aire hermética mientras que la funda tejida protege la cámara y convierte el inflado de la misma en trabajo mecánico (Figura 17). La naturaleza tejida de la envoltura da como resultado un acortamiento axial y una expansión radial del actuador cuando se infla el tubo de goma interno.

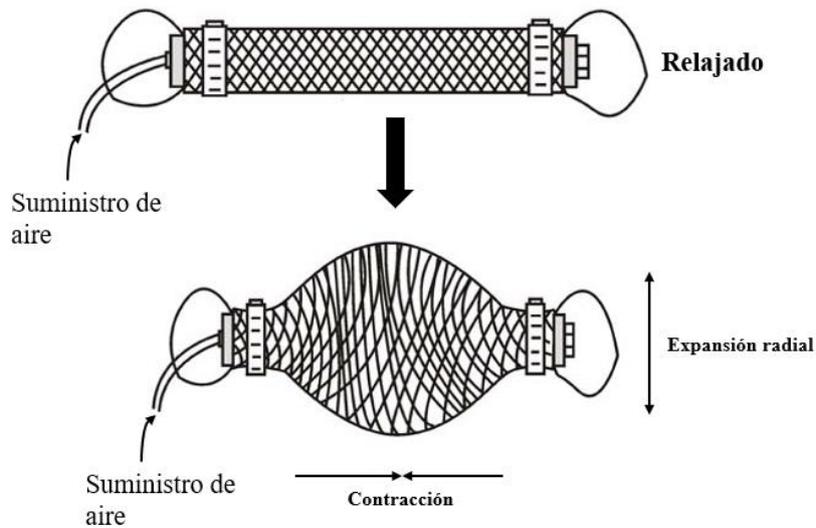


Figura 17: Acción del músculo ante el incremento de presión

La fuerza que ejercen los músculos depende de la contracción de este (en porcentaje) y de la presión del aire en su interior. La relación entre estas 3 variables permite entender el comportamiento del actuador, el cual tendrá una forma similar al ejemplo general que se muestra en la Figura 18. Como se puede comprobar, al ejercer una presión constante el músculo se contrae y la fuerza disminuye, siendo su máximo al inicio de la contracción [36]. La identificación de estas curvas es compleja, como se podrá ver en el apartado 3.5.

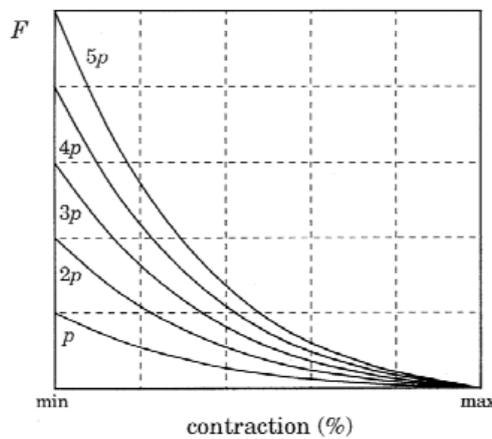


Figura 18: Representación Fuerza Vs Contracción de un músculo neumático

Para comprender mejor la anterior gráfica, se plantean los dos siguientes casos. En el primero de ellos, si en la configuración mostrada en la Figura 19 se tiene una carga constante de valor M , y la presión relativa es nula, se tiene el volumen mínimo (V_{min}) y la longitud del músculo es máxima. Si se aumenta la presión dentro del músculo al inyectar aire, este comienza a contraerse y a la vez genera una fuerza que tira de la carga elevándola. Cuando la fuerza que genera el músculo sea igual a la fuerza de la carga (en este caso el peso Mg) entonces cesará el movimiento y se tendrá un volumen $V1$ y una longitud de músculo menor de valor $L1$. Para poder continuar con el levantamiento, si se observa la Figura 18, será necesario incrementar la presión dentro del músculo, de modo que en dicha gráfica cambie de curva y se pueda generar más fuerza.

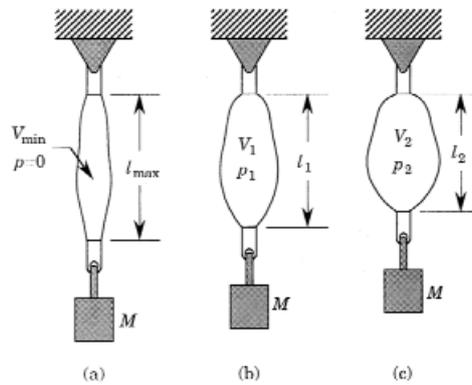


Figura 19: Funcionamiento del músculo a carga constante

El segundo caso, que se muestra en la Figura 20, si se parte de una masa M_1 y con una presión relativa de valor P , y se mantiene constante, pero se reduce la masa a un valor M_2 , entonces el músculo se contraerá hasta que se iguale la fuerza ejercida por el músculo con el valor de la carga. Si se retira completamente, el actuador se contraerá hasta alcanzar el punto de máximo volumen y menor longitud, punto en el cual la fuerza ejercida es nula. El PAM no puede contraerse más allá de este punto, comportándose como un muelle al comprimirlo, generando fuerzas de empuje en vez de retracción.

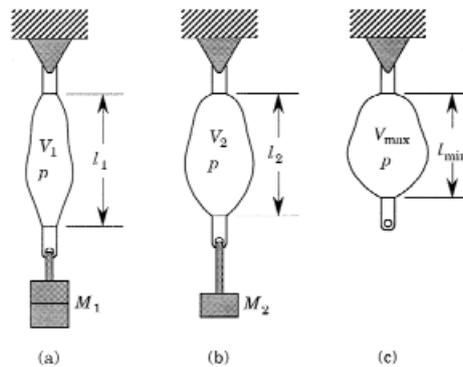


Figura 20: Funcionamiento del músculo a presión constante

Uno de los inconvenientes que presentan los PAM, es la no linealidad basada en la histéresis de la presión frente a la longitud y fuerza, lo cual hace que el control sea un reto. A esto se le debe sumar el hecho de que los parámetros del modelo identificados son muy inciertos. Múltiples autores [37], [38] han propuesto técnicas de control neumático basadas en PWMs, SMC, PID... con el fin de poder mantener el sistema estable. A pesar de ello, los músculos neumáticos presentan unas características por las cuales han sido elegidos para este proyecto de antemano: son de bajo peso, bajo coste, compactos, inherentemente compatibles y tolerantes a daños, y también brindan una alta relación potencia-peso con una larga vida útil. Esto, sumado a su comportamiento dinámico, son ventajas frente a otros modelos de actuadores. Son especialmente adecuados para aplicaciones robóticas donde la interacción con un entorno físico real en presencia de personas es esencial.

3.4.2 Análisis de tipos de músculos neumáticos

En la actualidad, hay muchos tipos de diseños de músculos neumáticos artificiales [39], cada uno con unas características determinadas adaptadas a una aplicación concreta. Su construcción y personalización in situ sería posible dado la existencia de suficiente contenido que lo explica paso a paso, pero no se obtendría la calidad que garantiza un músculo comercial. Para este proyecto, se ha valorado el empleo de músculos basados en la tipología McKibben de 3 marcas diferentes: Shadow Robot, Bridgestone y Festo.

3.4.2.1 Air Muscle

El actuador Air Muscle, fue un actuador creado por la empresa inglesa Shadow Robot. Actualmente, se dedican a la construcción y desarrollo de la siguiente generación de manos robóticas y sistemas con un alto grado de destreza y precisión para ayudar a impulsar el estado del arte de la investigación en el área de “Dexterous Manipulation”, un área de la robótica en el cual múltiples manipuladores (Figura 21), o dedos, cooperan para sujetar y manipular objetos.



Figura 21: "Dexterous Hand" creada por Shadow Robot[40]

Su diseño de músculo neumático se caracteriza por ser pequeño, ligero, simple y fácilmente controlable a la vez de tener una buena relación potencia-peso (400:1). Con una capacidad de contracción de hasta un 40%, un actuador de 30mm de diámetro podría levantar cargas de 70kg con una presión de 4 bar. La máxima presión de trabajo son 6 bar, mientras que se reduce a 3 bar en caso de no tener ninguna carga. En la siguiente tabla se recogen los 3 principales tipos de músculos de Shadow Robot [41].

Imagen	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Tracción a 3.5 bar (Kg)	Máxima carga (Kg)
	6	150	10	3	7
	20	210	40	12	20
	30	290	80	35	70

Tabla 2: Comparativa de Air Muscle de Shadow Robot

Actualmente, este actuador no se fabrica, pero puede encontrarse todavía en algunos mercados, motivo por el cual se ha realizado una valoración.

3.4.2.2 Rubber Actuator

El “Rubber Actuator” es la creación de Bridgestone, una empresa japonesa tradicionalmente conocida por la fabricación de neumáticos para diferentes tipos de medios de transporte. Debido a la continua investigación necesaria para mejorar el producto basado los materiales de goma han abierto el camino a crear soluciones avanzadas en otros campos como podría ser la robótica convencional y la blanda. Como se puede ver en la Figura 22, han desarrollado su propio músculo neumático, el cual está compuesto por un tubo de caucho y una funda de fibra de alta resistencia que lo rodea, aplicando el aprendizaje obtenido de la tecnología de neumáticos y mangueras hidráulicas.

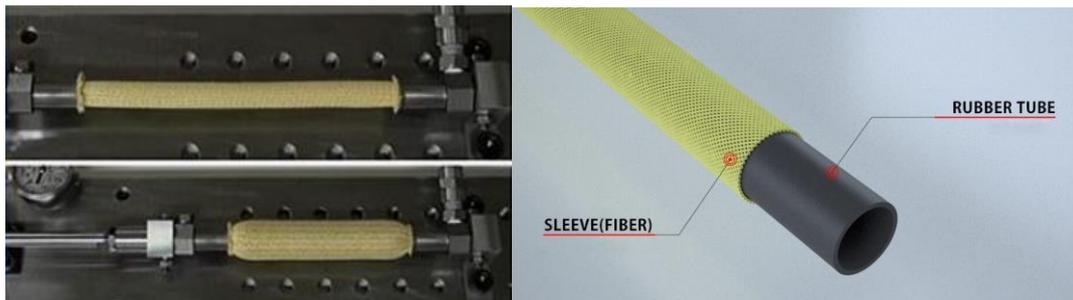


Figura 22: Rubber Actuator de Bridgestone

Al igual que la mayoría de los PAM, tienen una relación potencia-peso muy buena. Los Rubber Actuator, son más resistentes a impactos y tienen mayor flexibilidad, pudiendo operar aun estando enroscados o doblados, lo cual permite integrarlos en estructuras con formas complejas. Como se puede ver en la Figura 23, pueden acometer tareas que impliquen interactuar de forma segura con humanos o con objetos delicados, haciéndolo adecuado para aplicaciones donde la seguridad es una prioridad.



Figura 23: Conjunto de Rubber Actuator funcionando como manipulador

En este caso, no se dispone de una hoja de características que permita obtener los diferentes valores de presión, fuerza y contracción máxima de estos actuadores, pero existen diversos artículos donde se mencionan sus características para algunas aplicaciones. Por ejemplo, en el artículo de Tagami [42], se puede ver el uso de estos músculos para crear una maqueta experimental que simula una parte del mecanismo de un robot de asistencia para

usuarios de máquinas de correr. Este mecanismo, se utiliza para realizar experimentos de evaluación del desempeño de diferentes métodos de control de presión sobre los músculos.

3.4.2.3 Fluidic Muscle

Los Fluidic Muscle (Figura 24) pertenecen a la empresa alemana Festo, la se ha consolidado como la empresa líder en automatización neumática, electroneumática y electromecánica ofreciendo soluciones integrales en su ramo.



Figura 24: Fluidic Muscle de Festo

Este actuador posee las mismas ventajas que las de los dos músculos anteriormente presentados, pero además tiene algunas mejoras como: tiene una capacidad de carga de hasta 6000N, mejor comportamiento dinámico, mejor protección contra el polvo y suciedad al estar sellado herméticamente, existen diseños más compactos que permiten integrarlo en espacios reducidos y capacidad de trabajo a mayor presión (800kPa)[43].

A diferencia de los otros fabricantes, Festo facilita al cliente una hoja de características de estos actuadores [44] (denominados DMSP-MAS), que contiene todas las opciones y reconfiguraciones posibles, así como las gráficas que relacionan la fuerza con la presión y la contracción del músculo según sus criterios (se verá en el apartado 3.5 que en la realidad sufren variaciones) y guías para realizar el dimensionado según las necesidades del usuario (Figura 25). Además, indica los rangos de operación más efectivos y las recomendaciones de uso para aumentar la durabilidad del producto (Tabla 3).

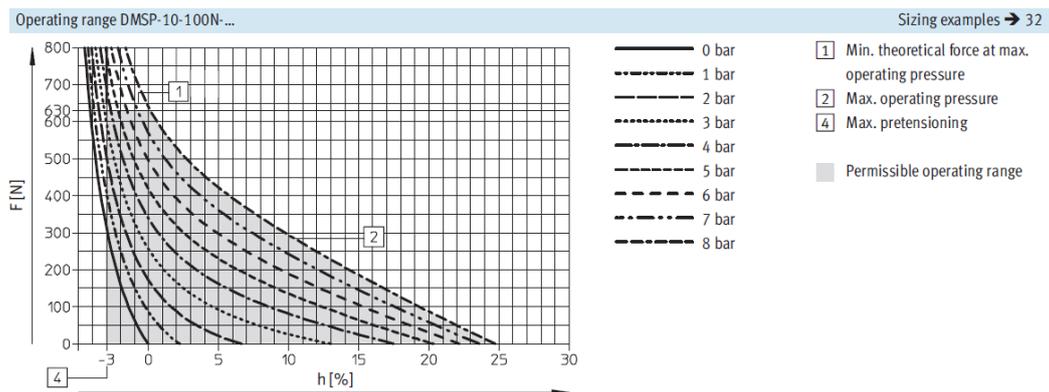


Figura 25: Ejemplo Fluidic Muscle de 10 mm de diámetro y 100 mm de longitud

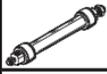
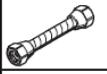
Function	Version	Type	Inside dia. [mm]	Nominal length [mm]	Lifting force [N]	Max. permissible pretensioning	Max. permissible contraction	Operating pressure [bar]	→ Page/Internet	
Single-acting, pulling	Fluidic Muscle with pressed connection									
		DMSP	10	40 ... 9000	0 ... 630	3% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 8	8	
		DMSP	20	60 ... 9000	0 ... 1500	4% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 6	8	
		DMSP	40	120 ... 9000	0 ... 6000	5% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 6	8	
	Fluidic Muscle with screwed connections									
		MAS	10	40 ... 9000	0 ... 630	3% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 8	18	
		MAS	20	60 ... 9000	0 ... 1500	4% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 6	18	
		MAS	40	120 ... 9000	0 ... 6000	5% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 6	18	

Tabla 3: Descripción general Fluidic Muscle DMSP-MAS

Una vez comentadas brevemente las características de cada músculo, se procede a realizar la selección del que será el actuador del robot planar 3RRR en este proyecto.

3.4.3 Selección del músculo

Si se recoge en una tabla los valores **máximos** de fuerza, contracción y presión de cada uno de los músculos se obtiene lo siguiente:

PAM	Fuerza (N)	Contracción relativa (%)	Presión (kPa)
Fluidic Muscle	6000	25	800
Air Muscle	700	37	400
Rubber Actuator	220	20	300

Tabla 4: Comparativa entre los 3 músculos candidatos

Observando la Tabla 4 se puede ver claramente como el actuador de Festo tiene unas características que permiten mayor libertad para tomar decisiones relacionadas con el dimensionado y del diseño de la maqueta. Realizando una comparación más detallada:

- **Origen y experiencia:** Bridgestone es conocido por el desarrollo tecnológico del caucho, Festo por la automatización (y robótica en menor medida) y Shadow Robot por la robótica. Cada uno, es experto en un campo determinado.
- **Aplicaciones:** Los músculos neumáticos de Bridgestone y Festo pueden utilizarse en un rango más amplio de aplicaciones; desde la investigación hasta la industria. Por otro lado, los Air Muscles están más especializados en tareas de manipulación robótica.

- **Control:** Aunque las 3 tecnologías dependen de la presión del aire para el control, los Fluidic Muscles de Festo enfatizan más con la precisión de este.
- **Complejidad:** Los actuadores de Festo y los de Shadow Robot, están diseñados para imitar de forma más natural el movimiento muscular.

Cada tecnología tiene sus propios puntos fuertes, pero en este caso, se necesita de un músculo que cubra un mayor número de aplicaciones, por lo que la opción elegida es el Fluidic Muscle de Festo. Otra ventaja de esta elección es que, desde la web de Festo, se puede personalizar directamente el músculo antes de su compra, lo cual permite obtener la ficha técnica y su representación en CAD, así como la documentación (ver Figura 26).

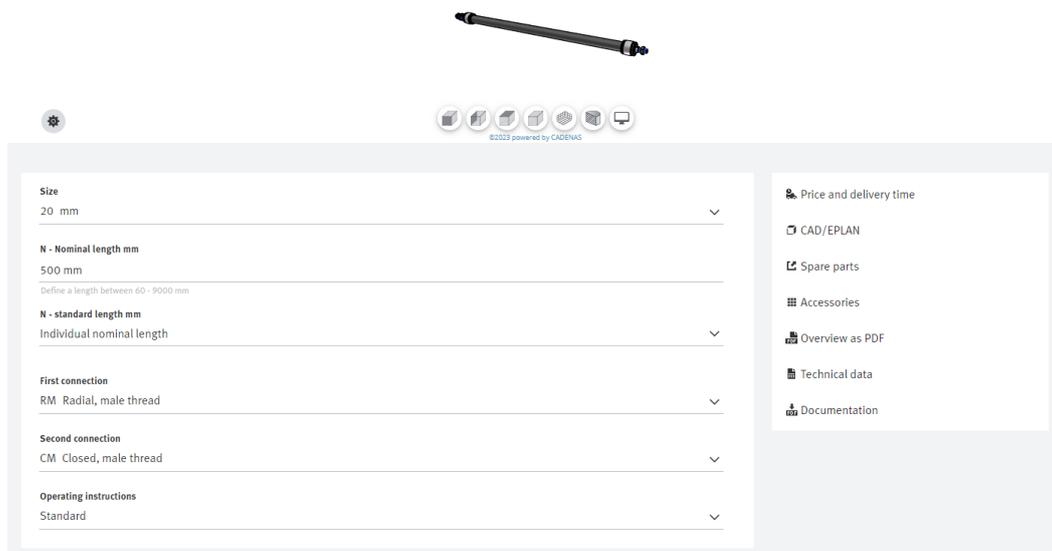


Figura 26: Personalización del Fluidic Muscle de Festo

3.5 Modelo matemático de los músculos neumáticos

Excepto las demostraciones de FESTO, los PAM no han sido estandarizados como productos comerciales y ni en aplicaciones que contengan estos actuadores. Por lo tanto, es de gran importancia escoger un músculo neumático adecuado que encaje en la aplicación y utilice el correcto modelo matemático del músculo. Las grandes no linealidades debidas a la existencia de aire a presión, el material viscoelástico de las dos cubiertas y las características geométricas, son el primer problema con el que se tiene que lidiar de cara a deducir y utilizar un modelo matemático propio [45]. Lo que se desea es encontrar la relación matemática “Fuerza-Presión-Contracción” que represente el comportamiento de un determinado PAM, como el que se muestra en la Figura 27.

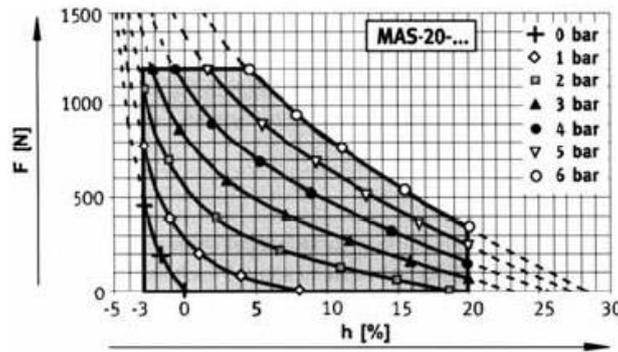


Figura 27: Relación Fuerza-Presión-Contracción músculo artificial neumático

Actualmente existen varios modelos de músculos neumáticos, pero presentan muchas desventajas, como el hecho de que solo puedan ser aplicados a tipos específicos de PAMs, su precisión es baja y presentan muchos parámetros de ajuste[46]. La aplicación práctica de estos modelos está limitada por su complejidad, dado que algunos parámetros son difíciles de medir o de ser evaluados, y algunas formulaciones son válidas solo en un rango determinado. En el caso de los músculos de Festo (como el mostrado en la anterior figura) la mayoría de los modelos existentes son inapropiados, dando lugar a grandes desviaciones respecto de las curvas experimentales del catálogo [44]. Hay varios factores que pueden provocar estas desviaciones a la hora de modelar las características del músculo, entre las que podríamos destacar:

- **Geometría:** El diámetro y el grosor del tubo en reposo, y el ángulo de la malla exterior inicialmente. La malla que recubre el tubo de goma está compuesta por fibras trenzadas, las cuales pueden diferir entre los diferentes actuadores a nivel de diámetros, tamaño de las fibras, materiales... Un parámetro importante para la obtención del modelo estático es el ángulo (θ) formado entre el eje longitudinal de la malla y las fibras, el cual se puede apreciar en la Figura 28. En ella, además de una visualización de cómo son las fibras en realidad, también se puede ver un esquema de la variación del ángulo ante el incremento de la presión.



Figura 28: Izquierda: Variación ángulo fibras malla. Derecha: Forma fibras en la malla

Una de las formas de obtener el ángulo θ , es realizar una relación geométrica entre el cambio del tamaño en el eje longitudinal y radial. En la Figura 29 se tiene uno de los rombos que forma la malla antes y después de presurizarla. Si se toma un cuarto de este, obteniendo un triángulo, es sencillo obtener el valor angular de la variación. Sea r la diagonal menor del rombo, l la diagonal mayor, b la hipotenusa y θ el ángulo de interés, aplicando trigonometría y trabajando con variables incrementales, se establece la relación entre todas las variables[47].

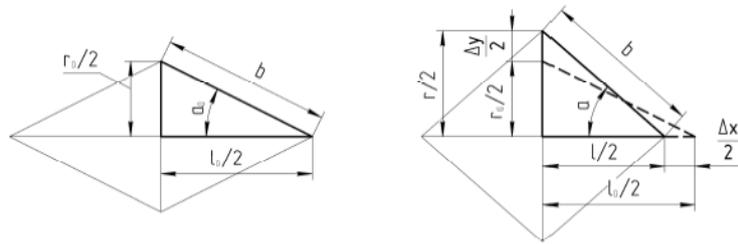


Figura 29: Modelo de cálculo del ángulo θ de deformación de la malla

El problema ahora pasa por encontrar cuál es el ángulo que forman inicialmente las fibras de la malla dado que, sin él, no es posible calcular la deformación. Este dato, depende del fabricante y del tipo de músculo, y no suele ser dado. Varios investigadores han intentado obtener una fórmula que permita calcularlo de forma sencilla, o al menos un convenio sobre cuál debería ser aproximadamente para poder partir de una base sólida. En [48] se explica una de las formas más comunes de obtener de forma aproximada el ángulo inicial θ_0 y que se muestra en la Figura 30. Sea l_0 la longitud inicial del músculo, r el radio y n el número de giros de la fibra alrededor del actuador, si se coge una de las fibras y se desenvuelve, se puede representar como un triángulo de altura l_0 y base la longitud de las n “circunferencias” $2\pi nr$. Obtenido el triángulo, y de nuevo utilizando la trigonometría, se puede obtener el ángulo θ_0 buscado.

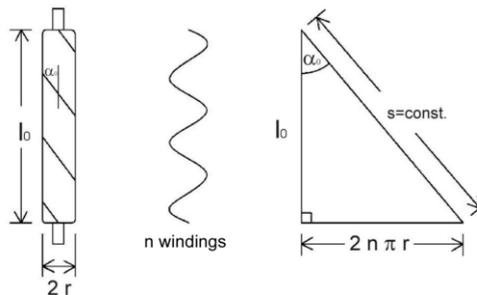


Figura 30: Esquema para el cálculo del ángulo inicial θ_0 del músculo neumático

De nuevo, estos cálculos son aproximaciones, por lo que, al ser utilizados para el cálculo del modelo estático y dinámico del músculo, ya aportan un error al compararlo con lo que sucede en la realidad. En el caso de los Fluidic Muscle de Festo (los empleados en este proyecto), se debe tener en cuenta que las fibras de la envoltura de la cámara de aire tienen un patrón romboidal con una malla de tres dimensiones. La única documentación encontrada que comenta haber obtenido resultados de medidas reales de los músculos de Festo, es la tesis del ingeniero alemán Ivo Boblan [49]. En ella, se comenta que se ha comprobado que el ángulo inicial de las fibras es $\theta_0 = 28,6^\circ$, mientras que el grosor inicial de la membrana alcanza los **1,8 mm**. Estos datos son válidos para los músculos de 10 y 20 mm de diámetro, dado que no se ha comprobado todavía que se cumplan con el resto de los actuadores dentro de la familia de los DMSP-MAS.

- **Material de la cámara de aire:** En función del material del tubo de goma interior, varía la rigidez del músculo, de la cual depende la relación fuerza-presión. Los actuadores más rígidos tardan más tiempo en alcanzar la fuerza pedida. Si la presión se mantiene constante, aquellos actuadores que tengan mayor

flexibilidad pueden obtener una mayor contracción a la vez que aplican mayor fuerza [50] (Figura 31).

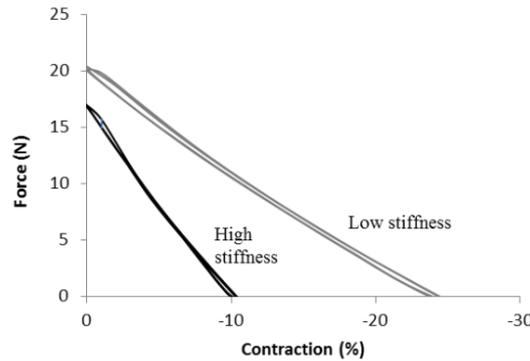


Figura 31: Relación Fuerza-Contracción en función de la rigidez de la cámara de aire.

- **Presión de operación y carga externa aplicada sobre el músculo:** Como consecuencia tanto de los motivos anteriores como del montaje que tengan los músculos, la presión y la fuerza externa ejercida, influirán de forma diferente.

Hay muchos trabajos dedicados a la elaboración de los modelos matemáticos de la fuerza estática de los PAM, los cuales se pueden obtener principalmente de tres formas: mediante parametrización geométrica, mediante modelos teóricos que derivan de la ley de conservación de la energía y mediante expresiones empíricas que consisten en factores de ajuste. Las expresiones obtenidas mediante parametrización geométrica difieren en algunos casos hasta en un 50% de las curvas experimentales presentadas en el catálogo de Festo. Por otro lado, las expresiones empíricas contienen muchos factores de corrección (desde 6 hasta 21) y no son universales para cualquier longitud del músculo o modo de operación[51].

Las teorías que se han ido desarrollando en las últimas décadas, parten de una aproximación basada solo en el aire comprimido, propuesta por Schulte en el año 1961 [52]. Nace a raíz de los primeros avances en el músculo McKibben, por lo que su precisión es muy baja. En el año 1996, C. P. Chou y Blake Hannaford [53] establecieron un nuevo modelo que junta la ley de conservación de la energía con un estudio de la geometría del actuador. La precisión del modelo sigue siendo baja, pero se consigue que converja hacia un menor error. El desarrollo de Chou-Hannaford da lugar a la siguiente ecuación, en la cual la fuerza F depende de la presión relativa P , del diámetro máximo D_0 el cual se da cuando el ángulo de las fibras es 90° y del propio ángulo de las fibras de la malla θ :

$$F = \frac{\pi D_0^2 P}{4} (3 \cos^2 \theta - 1) \quad (31)$$

Para llegar a esta ecuación se han realizado 4 consideraciones:

- La cámara de aire es infinitamente fina; es decir, no hay grosor.
- La malla exterior es inelástica.
- No hay fugas.
- Se ignoran los efectos de la inercia y de la fricción.

El modelo propuesto, es considerado la base sobre la que los diferentes autores, han ido diseñando sus teorías; es decir, con el paso del tiempo se han añadido factores de corrección o enfoques diferentes, que tengan en cuenta variables como las vistas anteriormente que introduzcan error de no ser consideradas.

Algunos autores a tener en cuenta para comprender la complejidad del diseño y las múltiples opciones que pueden surgir podrían ser: Andrikopoulos [54], el cual incorpora al modelo el componente de la expansión térmica entre otros; Hildebrandt A. [55], Wickramatunge K. C. [56] que propone el funcionamiento del músculo como si fuese un muelle con rigidez variable; Tsagarakis N. [57] tiene en cuenta el estiramiento de las fibras de la malla y las formas cónicas de los extremos del músculo; Sárosi J. [58]–[60] el cual ha dedicado gran parte de su trayectoria en investigación a estudiar el comportamiento de los músculos neumáticos artificiales (en concreto los de Festo) creando maquetas experimentales para ello.

El artículo de Mirco Martens [61] muestra una aproximación del modelo de la fuerza estática característica de los Fluidic Muscle que son de interés para este proyecto, demostrando un error por debajo del 2,35%. Además, realiza una comparación con los modelos existentes previamente a 2017, enfrentándolos a los mismos resultados experimentales obtenidos, por lo que este documento es de interés por dos motivos: el primero, por conseguir un modelo con una tasa de error reducida y una precisión óptima, y el segundo, por aunar en un mismo artículo los modelos de otros autores, de forma que se puedan ver de un vistazo las diferencias entre sí, así como el error respecto de los datos experimentales. Los modelos con los que compara el suyo propio, son evoluciones de la expresión de fuerza de Chou-Hannaford (Ecuación 3) pero añaden factores de corrección para aumentar la precisión del modelo. En la tabla 5 se recogen los errores de la estimación de la fuerza de cada modelo en porcentaje, al compararlo con dos músculos: DMSP-10-250 y DMSP-20-300 (DMSP-Diámetro-Longitud).

Modelo	$F_{Schulte}$	$F_{Andrikopoulos}$	$F_{Wickramatunge}$	$F_{Hildebrandt}$	$F_{Sárosi}$	$F_{Martens}$
DMSP-10-250	46,1%	20,05%	13,49%	10,12%	5,1%	4,4%
DMSP-20-300	30%	13,04%	8,2%	5,75%	3,59%	2,35%

Tabla 5: Error (%) entre diferentes modelos para la fuerza de Fluidics Muscles

De la tabla anterior, se concluye que los modelos propuestos por Sárosi y Martens, son los que mejor se ajustan a los músculos neumáticos de Festo. Además, se puede ver la evolución temporal del error a la baja conforme se tiene mayor conocimiento de los músculos y se van considerando más factores. Sin embargo, aunque se tengan en cuenta algunos parámetros de Sárosi y Martens para el desarrollo del proyecto, ninguno de los dos son el modelo elegido para realizar el modelado de la maqueta, lo cual se explica en el siguiente apartado.

3.5.1 Chou-Hannaford, el modelo elegido

Como se ha comentado anteriormente, el modelo matemático elegido para definir los Fluidic Muscle de Festo en este proyecto es el de Chou-Hannaford. Cada modelo está creado

para un tipo de PAM determinado, por lo que los resultados obtenidos para un músculo neumático concreto, no se replican con otro. Es cierto que se podrían emplear las ecuaciones de Sárosi o de Martens, dado que tienen un error muy pequeño y se ha comprobado que para los músculos de clase DMSP de Festo, los utilizados para el banco de pruebas, consiguen buenos resultados; pero durante la realización de este proyecto, no se ha tenido acceso a ningún músculo neumático para poder realizar una identificación experimental y por tanto confirmar los resultados de dichos autores. Sumado a esto, la disposición y la utilización de los músculos va a ser diferente y eso podría afectar al modelo matemático de la fuerza.

Por tanto, se prefiere utilizar inicialmente una fórmula básica como la vista en la ecuación 3 y después modificarla en el momento que se tengan los componentes físicos y se puedan realizar pruebas experimentales en el propio laboratorio de Ikerlan. Sumado a esto, cabe indicar que la utilización de la ecuación de Chou-Hannaford facilita el modelado de la maqueta en Simscape, al incluir un bloque como el de la Figura 32 que representa un músculo McKibben, cuya fuerza está basada en esta ecuación, pero con dos correcciones con respecto a la forma simplificada del modelo, lo cual reduce el error y aporta mayor precisión.

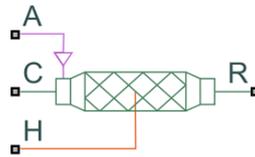


Figura 32: Representación músculo neumático en Simscape

3.6 Control

En este proyecto, el control del banco de pruebas es complejo debido a la unión del empleo de la robótica paralela y los músculos neumáticos. El control es un elemento indispensable en la robótica paralela ya que permite coordinar los movimientos de las articulaciones del robot y respetar las restricciones. La estrategia de control se puede dividir en dos:

- Control cinemático: Utiliza el modelo cinemático para generar una trayectoria interpolada de referencia que el robot sea capaz de seguir.
 - Trayectoria suavizada para los actuadores.
 - La trayectoria debe estar contenida dentro del espacio de trabajo no singular
 - Respeto de las restricciones del robot.
- Control dinámico: el objetivo principal del control dinámico es que el robot siga la trayectoria de posición generada con el mínimo error posible.
 - Control local: Controla cada actuador asociado a **qa** de forma independiente.
 - Control basado en modelo: Controla el robot como un conjunto. Es más complejo y tiene un mayor coste computacional.

El control local se centra en controlar cada articulación por separado, y es más rápido y sencillo de implementar. Este tipo de estrategias, permiten un buen rendimiento en aplicaciones de baja capacidad dinámica. Debido al acoplo que existe entre articulaciones, el rendimiento se ve limitado.

Por otro lado, y como se ha comentado dentro del apartado 3.5, los músculos neumáticos son complejos de controlar debido a sus fuertes no linealidades, la variación del valor de los parámetros en el tiempo, la histéresis... Diferentes artículos como [45], [62]–[64], muestran la enorme variedad de controles que se pueden implementar, desde los más sencillos como los controladores de tipo PID, hasta el empleo de redes neuronales y visión artificial para conseguir implementar un controlador robusto y eficiente.

En este trabajo, la forma que se tiene de definir los controladores es en el espacio de salida; es decir, se toman las coordenadas de la posición del elemento terminal (centro de la plataforma) y se calcula el error con respecto a la posición deseada. Es importante tener bien calculada la cinemática directa e inversa para poder obtener cuales son los valores angulares óptimos que hay que entregarles a los actuadores como consigna. Como se verá en el capítulo 4, el control que se implementa inicialmente en este proyecto es un PID, dado que no se necesita un modelo y para el control de los PAM muestra buenos resultados siendo un control sencillo de implementar.

CAPITULO 4

DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

4 DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

4.1 Introducción.

Tras realizar un estudio exhaustivo de las posibilidades de diseño de la maqueta y de los músculos neumáticos, se procede a realizar el desarrollo del robot planar 3RRR con actuación neumática. En el presente capítulo, se presenta el modelo del robot realizado en Simscape-Simulink. Además, se han programado en Matlab los diferentes scripts necesarios para obtener las variables que necesita el robot para funcionar. Como se ha mencionado en el apartado 2.2, no se ha llegado a realizar la construcción física, pero sí se hace una propuesta de los diferentes componentes necesarios para su elaboración.

4.2 Diseño del robot neumático paralelo planar 3RRR

El primer paso dado para el desarrollo de este proyecto es establecer la arquitectura física del robot. Partiendo del concepto del robot planar 3RRR, se debe obtener un diseño que permita utilizar los músculos neumáticos a modo de actuador y que permita que sea reconfigurable, tanto desde el punto de vista del posicionamiento de los elementos, hasta el empleo de diferentes materiales para los elementos que componen las cadenas cinemáticas y las dimensiones de estos.

Si se realiza una búsqueda en Internet, fácilmente se pueden encontrar algunos ejemplos de estos robots construidos con una finalidad educativa o de investigación, que es el ámbito de interés para este Trabajo Fin de Máster. En la Figura 33 se muestran el ejemplo de un prototipo realizado en el instituto Harpeth Hall [65] (izquierda) y el diseño CAD de un robot planar utilizado para el estudio del control de trayectorias[66]. Otros ejemplos del uso en investigación de estos robots podrían ser el recogido en [67], el cual se utiliza para el estudio de la cinemática inversa de los robots planares basándose en el artículo de Williams R. [68], o el diseño de una estación de dibujo [69], [70].

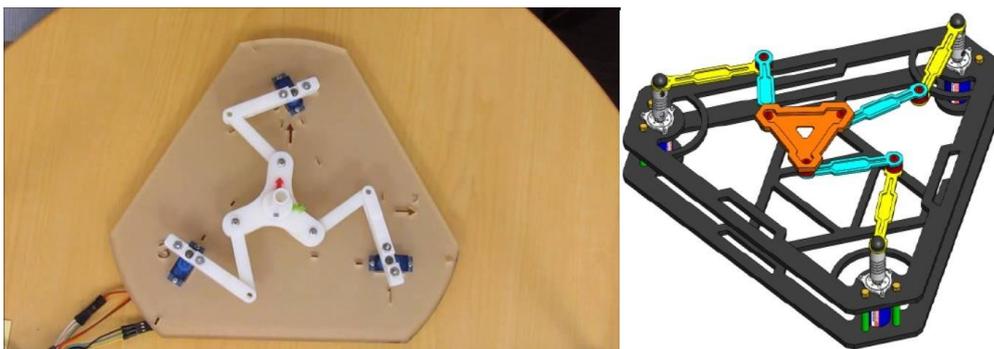


Figura 33: Prototipo de robot planar 3RRR y diseño CAD

Todas estas estructuras robóticas anteriormente citadas, tienen en común algunos factores como:

- Tanto la base, como la distribución de los actuadores, como el elemento central, tienen forma de triángulo equilátero. Esto se debe a que en etapas iniciales de desarrollo y del estudio del comportamiento del robot planar, es más sencillo trabajar sobre una distribución simétrica; es decir, al encontrarse los actuadores

separados equidistantemente, los cálculos son iguales indistintamente de con cual se esté trabajando. Además, esta estructura facilita el cálculo del espacio de trabajo y observar mejor las posiciones singulares que se puedan dar.

- Los actuadores son eléctricos. Una ventaja que tienen es que su control es sencillo y ocupan muy poco espacio, pudiendo así crear estructuras que ocupen poco espacio. En este proyecto, hay que tener en cuenta que los músculos neumáticos ocupan más espacio y es necesario introducir componentes adicionales para que puedan funcionar, como son las válvulas, los tubos de suministro de aire o una unidad de mantenimiento, la cual permite regular la presión de entrada desde el suministro de aire y cambiar las condiciones del gas.
- Los materiales de construcción de los prototipos no son iguales entre ellos, mostrando que esta arquitectura funciona bien independientemente de la composición de los elementos.

Buscando si existe algún caso de empleo de músculos neumáticos para los robots planares 3RRR, se encuentra un único artículo [71] que desarrolla el prototipo mostrado en la Figura 34. En ella, se ve como la actuación se realiza mediante un Fluidic Muscle de Festo de 200 mm de longitud y un resorte que funciona como fuerza de retracción del músculo. Además, incluye una válvula proporcional por cada actuador, un potenciómetro para la medición del ángulo de giro de la articulación activa y un sensor de presión para monitorizar la presión de trabajo. Este trabajo (junto a los demás vistos) sirven de base para poder implementar una posible solución.

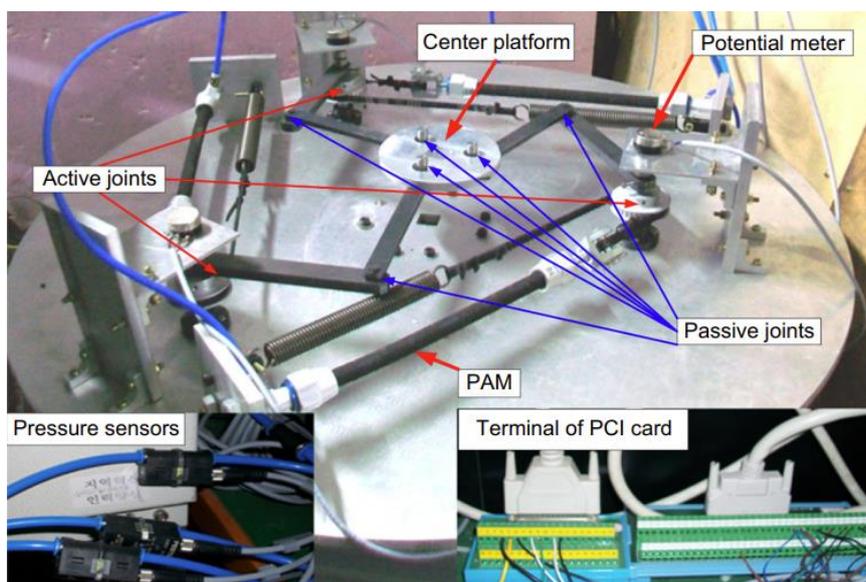


Figura 34: Robot planar 3RRR accionado por músculos neumáticos

4.2.1 Configuración antagonista

Una de las cosas a tener en cuenta, y que se puede apreciar en la anterior figura, es que los músculos neumáticos, generan movimiento en una única dirección. Cabe recordar que estos músculos tienen una base biológica (como se comentó previamente en el apartado 3.4) por lo que, para generar un movimiento bidireccional, igual que ocurre con la musculatura humana, es necesaria la acción de una actuación en el sentido contrario. Un ejemplo podría ser el sistema bíceps-tríceps; cuando el bíceps se contrae y acorta tira de los huesos del antebrazo doblándolo,

mientras tanto el tríceps está relajado, y viceversa. Este tipo de sistemas, se dicen que tienen una configuración antagonista, y puede servir tanto para realizar movimientos lineales como rotacionales. Aplicando esto al proyecto, se debe introducir una configuración antagonista que permita un movimiento de rotación, como por ejemplo el que se representa en la Figura 35.



Figura 35: Configuración antagonista de 2 músculos neumáticos

Para diseñar el sistema antagonista deben tenerse en cuenta algunos factores como los que se explican a continuación:

- **Pretensionado:** Los músculos neumáticos, pueden estirarse debido a un esfuerzo mecánico externo, ya sea por causa de la disposición adquirida en el montaje, o por un ajuste realizado por el usuario. Esta acción se conoce como pretensionado, y el porcentaje con respecto de la longitud nominal del actuador depende del músculo neumático elegido. En el caso de Festo, se sitúa entre el 3% y el 5%. Al introducir una configuración antagonista, el extremo del músculo estará conectado con una de las cadenas cinemáticas y por otro lado con el respectivo elemento que provoque su retracción.
- **Contracción máxima:** Del mismo modo que existe un valor máximo de alargamiento del músculo por encima de su longitud original, hay un valor máximo de contracción. Este valor, de nuevo, varía dependiendo del fabricante y está asociado con el ángulo que forman las fibras de la malla exterior del actuador. Aunque se puede trabajar con la máxima contracción, se trabajará con un valor inferior.
- **Polea de unión del sistema antagonista y transmisora del movimiento:** Para mantener la tensión entre las dos partes de una configuración antagonista, y a la vez poder transmitir el movimiento de rotación deseado a las cadenas cinemáticas, se utiliza una rueda de polea. Su dimensionamiento, el cual se verá en los próximos apartados, dependerá del tamaño del músculo y de la máxima contracción de operación que se desee. La polea, se encarga de convertir el movimiento longitudinal de la contracción del músculo en un movimiento angular.

Inicialmente, se propone realizar un par antagonista formado por dos músculos neumáticos (como el mostrado en la Figura 35) dado que se considera que es la mejor solución posible al tener el control sobre el movimiento de la articulación en los dos sentidos. Esto implicaría la compra de 6 músculos neumáticos y sus respectivas válvulas y equipamiento, lo que supone un gasto superior a lo que se pretende invertir inicialmente y se descarta la idea para esta versión inicial. Lo que se propone finalmente, es crear un sistema antagonista músculo-resorte como el visto en [71]. En los próximos apartados se irá comentando qué tipos de músculos y resortes se eligen, así como las características que tienen que se le dan.

4.2.2 Requisitos y consideraciones para el diseño del robot planar 3RRR

El modelo del robot planar debe cumplir con una serie de requisitos predefinidos por la propia empresa y otros que se han surgido posteriormente durante el desarrollo. A continuación, se hace una enumeración de estos:

- **Músculos neumáticos artificiales:** La consigna inicial, era desarrollar un modelo de una maqueta de pruebas para algoritmos de control y aprendizaje autónomo utilizando como elemento de actuación músculos neumáticos. Una vez decidida la base de la maqueta como un robot planar 3RRR, se fija que el número máximo de músculos por cada articulación sea 1. El dimensionamiento de estos debe hacerse acorde con las necesidades de la maqueta, siendo el porcentaje de contracción de los músculos en el punto de operación de entre el 10% y el 15% de su longitud nominal. Para esos valores máximos, se propondrán diferentes tamaños de la rueda de la polea de forma que, en caso de que sea necesario, pueda rotar 360°.
- **Reconfiguración:** Siguiendo con lo comentado en la última parte del párrafo anterior, se propone modelar diferentes tamaños de los elementos rígidos de las cadenas cinemáticas, así como diferentes plataformas móviles. Además, debe ser posible variar las posiciones de los actuadores y de los puntos de anclaje de las articulaciones activas, de forma que se puedan probar diferentes relaciones cinemáticas y dinámicas.
- **Tamaño:** Para este proyecto, se ha establecido un área de trabajo dentro del laboratorio de tecnologías digitales (Digilab) de 1-2m², por lo que el tamaño de la maqueta, contando con el bastidor, debe tener un tamaño aproximado de un cuadrado de 1 metro de lado.
- **Posicionamiento del elemento terminal:** Como se ha dicho previamente, aunque el robot tiene 3 grados de libertad (posicionamiento en **X** e **Y**, y el giro en torno al eje **Z**), se le da prioridad a obtener un buen posicionamiento dentro del plano, dejando el control de posición de la plataforma como un añadido en caso de que dé tiempo.
- **Controladores:** Como se ha visto, tanto por ser un robot paralelo, como debido al uso de músculos neumáticos, el control es muy complejo, por lo que se implementará un controlador sencillo que proporcione unos resultados aceptables, dejando abierta una línea futura de investigación en la temática.
- **Empleo del entorno de Matlab y Simulink-Simscape:** Se ha dado libertad para la elección del software de modelado, optando por los diferentes productos de Mathworks, debido a la cantidad de recursos de los que dispone para temáticas de modelado, simulación y control.

4.3 Análisis de componentes necesarios para la construcción del robot planar 3RRR y dimensionamiento

Antes de comentar el desarrollo del robot en el entorno de Matlab/Simulink, se procede a comentar qué componentes se han elegido y sus características. Estos elementos, se eligen pensando en la próxima construcción física en el laboratorio acorde a las condiciones anteriormente planteadas.

4.3.1 Músculo neumático

Como ya se ha dicho a lo largo de este documento, se opta por alguno de los músculos de la serie DMSP-MAS de Festo. Si se toma el catálogo [44], lo primero que se tiene que elegir es el tipo de extremo del músculo neumático. Festo ofrece dos variantes: conexiones “Press-fitted” o conexiones “Screwed”. En la siguiente figura se muestran los dos tipos:

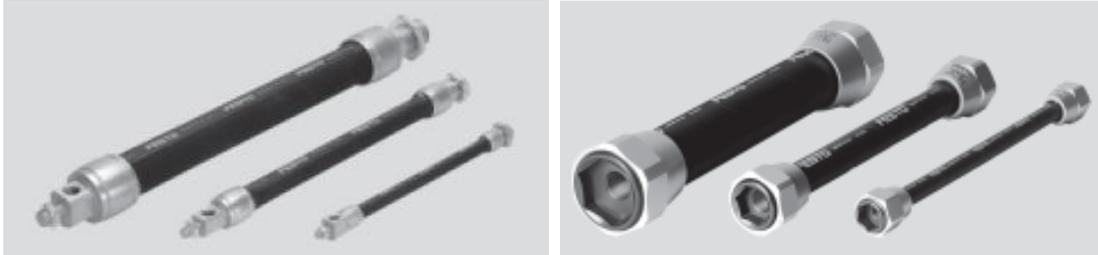


Figura 36: Tipos de extremos DMSP: Press-fitted (derecha) y Screwed (izquierda)

Se elige la tipología “Press-fitted” dado que facilita la conexión con los demás elementos de la maqueta. Además, el diseño es más compacto y ligero, aumentando la relación peso/fuerza con respecto de la conexión Screwed.

El siguiente paso, es elegir el diámetro del músculo, para el cual se ofrecen 3 tamaños: 10 mm, 20 mm y 40 mm. Para este proyecto y en base a poder tener un actuador que sea reutilizable para el mayor rango de aplicaciones posibles, se elige el músculo de 20 mm. La longitud es personalizable al realizar el encargo como se pudo ver en la Figura 26, siendo el mínimo 60 mm y el máximo 9000 mm. Para seleccionarla, es necesario tener en cuenta la contracción máxima fijada en el punto de operación, la cual se toma aproximadamente en el 10% de la longitud nominal del músculo (siendo la máxima permitida según la hoja de características del 25%). La longitud tomada es de 500 mm para cada uno de los músculos, permitiendo un movimiento longitudinal de 50 mm. Además, el pretensionado es del 4%, lo cual da margen para realizar ajustes previos al funcionamiento. En la siguiente tabla se recogen todas las características:

Músculo	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Fuerza max. (N)	Pretensionado (%)	Contracción max (%)	Rango de presión(bar)
	20	500	1500	4%	25%	0...6

Tabla 6: Músculo seleccionado: DMSP-20-500

En la siguiente figura se muestra la gráfica que representa la relación Fuerza-Contracción- Presión para este PAM:

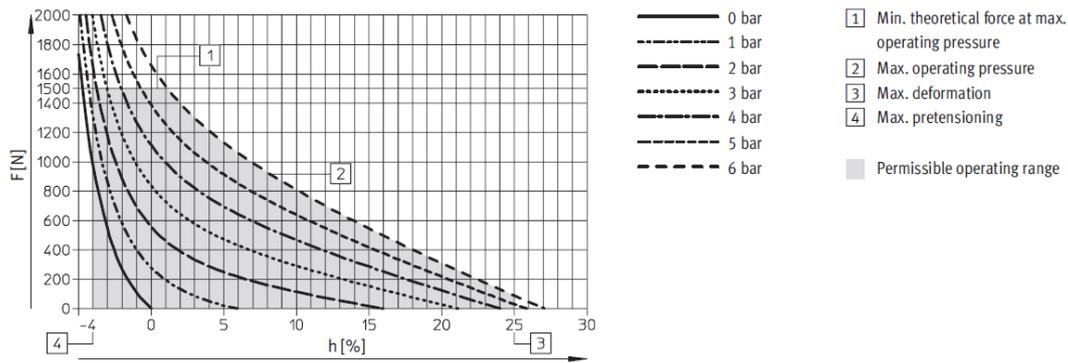


Figura 37: Relación Fuerza-Contracción-Presión DMSP-20-500

En el propio catálogo se tienen explicaciones y ejemplos sobre cómo trabajar con la anterior gráfica en función de la aplicación para la que use el músculo. Esta selección influye en la elección del siguiente elemento: la válvula distribuidora de caudal.

4.3.2 Resorte del sistema antagonista

Al contraerse el músculo neumático, el resorte debe extenderse y permitir el movimiento natural de este dentro del rango de operación elegido. Por ello, se debe utilizar un resorte de extensión como el mostrado en la Figura 38.



Figura 38: Resorte de extensión

Para dimensionar el resorte, se parte de la gráfica de Fuerza-Presión-Contracción del actuador. En base al porcentaje de contracción máximo y a la presión de operación, se obtiene una fuerza determinada, como se puede ver en la siguiente figura:

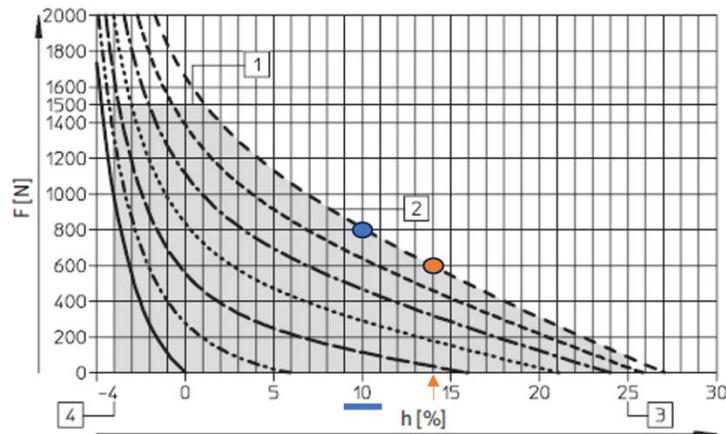


Figura 39: Fuerza máxima para un porcentaje de contracción del 10% (azul) y 14% (naranja)

Para una presión de operación de 6 bar, si la contracción es del 10% la fuerza que se alcanza es de 800N, mientras que para el 14% se obtienen 600N. La fuerza que ejerce el resorte es:

$$F = K * \Delta x \quad (32)$$

Donde K es la constante de rigidez el muelle, y Δx es la variación de la longitud de este al verse sometido a una fuerza externa. La función de fuerza del muelle es lineal, y es inversa a la función de la fuerza ejercida por el PAM. Llegado a esto, se tiene que seleccionar una constante de rigidez para la compra del resorte. Se puede tomar una constante que se calcule en el límite del movimiento del músculo para la fuerza obtenida con una contracción máxima, o bien transformar la gráfica de Fuerza-Contracción en una gráfica Par-Contracción. Se realizaría un cambio en la polea, dándole más forma de balancín con dos brazos distintos para resorte y músculo, de forma que el par ejercido por el músculo sea mayor que el del resorte en el instante de ejercer una determinada fuerza. De este modo, se convierte la función del resorte en una función menos lineal y con una curva de ascenso que tiende a suavizar su pendiente hacia el final.

Visto que se va a utilizar una polea normal, se opta por no hacer modificaciones en las gráficas del actuador, y obtener directamente el valor de K partiendo de la fuerza que se alcanza para una contracción límite. Como se puede ver en la Figura 40, cuando la fuerza ejercida por el músculo es máxima, la fuerza ejercida por el resorte es nula, y conforme el músculo se contrae, empieza a aumentar hasta un punto de equilibrio para el cual se calcula la constante de rigidez.

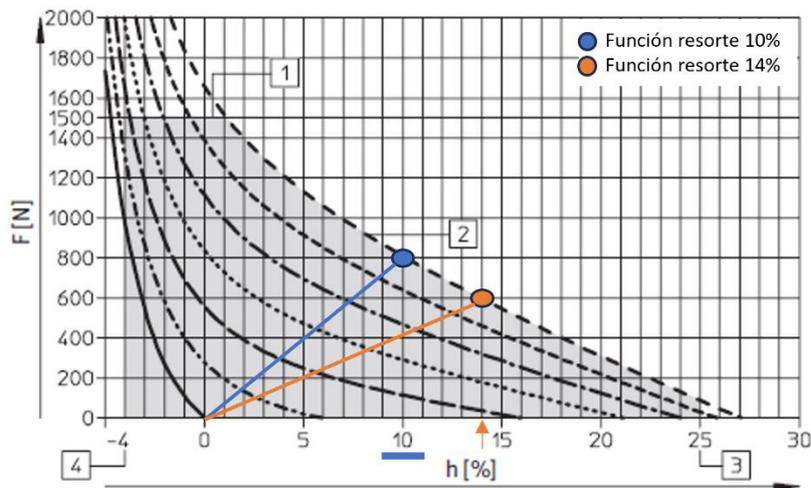


Figura 40: Gráfica para el cálculo de la constante de rigidez (K) del resorte

Para una contracción del 10%, se necesitaría un resorte de 16000 N/m, mientras que para el 14% se tiene que $K=8571,43$ N/m. Como parte de la reconfigurabilidad buscada, se pueden comprar varios resortes con diferentes constantes de rigidez que se puedan aplicar a aplicaciones distintas.

4.3.3 Válvula proporcional reguladora de presión

Para regular el funcionamiento del músculo, es necesario el empleo de válvulas que regulen el cambio de presión en el interior del músculo. Inicialmente, se valora el empleo de dos

tipos de válvulas direccionales: válvulas 2/2 (2 vías y 2 posiciones) y válvulas 3/2 (3 vías y 2 posiciones) (Figura 41).

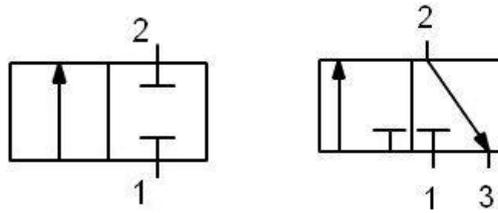


Figura 41: Válvula 2/2 (derecha) y válvula 3/2 (izquierda)

Se pueden realizar dos configuraciones según la válvula elegida. De seleccionarse la 3/2, se utilizaría una válvula por cada configuración antagonista, ahorrando espacio y uso de componentes. Si se elige la 2/2, se deben utilizar 2 válvulas por cada conjunto músculo-resorte, dado que su funcionamiento es como el de una llave de paso, de forma que alterne una válvula abierta y otra cerrada según se contraiga o extienda el músculo. Se opta por el empleo de esta última, principalmente debido al bajo precio que tiene respecto de la 3/2. Al emplear esta distribución, se implementará un controlador que actúe sobre una u otra válvula en función del signo del error (se verá en próximos apartados).

Para la selección de la válvula, se parte de las características del músculo elegido. Si el músculo tiene un volumen pequeño, no se necesita una válvula que tenga unas dimensiones excesivas. Se debería tener en cuenta tanto la presión máxima como la nominal, así como el volumen y el caudal de aire necesario. Las gráficas de corriente-caudal para una presión constante, y de presión-caudal (Figura 42) que se pueden encontrar en las hojas de características son bastante útiles para determinar qué válvula se ajusta mejor.

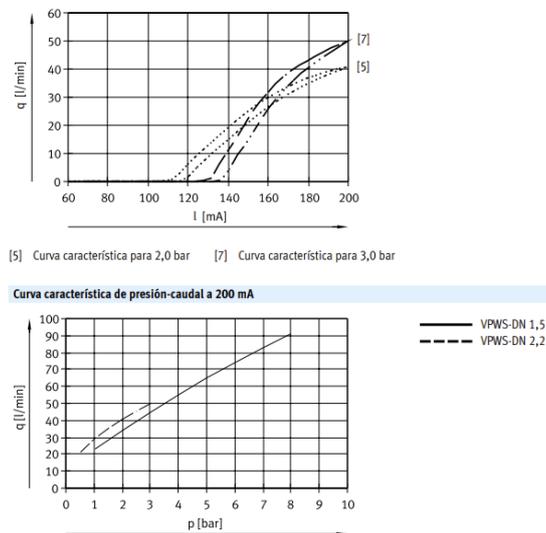


Figura 42: Gráficas corriente-caudal y presión-caudal válvula VPWS de Festo [72]

Existe una amplia gama de válvulas 2/2 en el mercado, pero tras realizar descartes, se elige la válvula proporcional con control de corriente, **PVQ30** de la empresa **SMC** (Figura 43) de 1,6 mm del tamaño del orificio del aire, cuyo catálogo se puede consultar en [73]. Los motivos por los cuales se elige se explican a continuación.



Figura 43: Válvula PVQ30 de SMC

Si se consulta la hoja de características de dicha válvula, hay una gráfica que relaciona la intensidad eléctrica, con el caudal del aire y con la variación de la presión y se muestra en la siguiente figura:

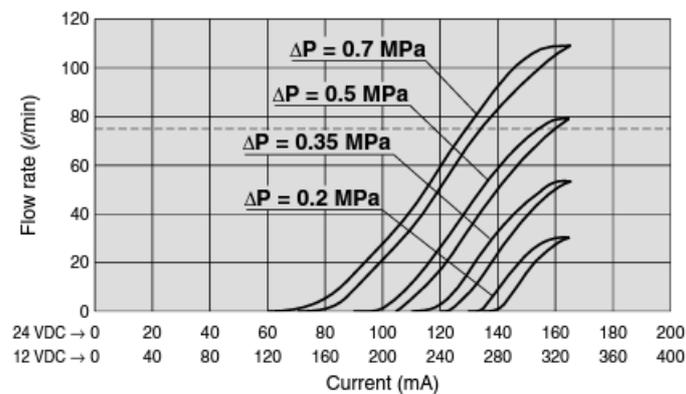


Figura 44: Relación Corriente-Caudal-Presión PVQ30

Si se recuerda, la presión relativa máxima aceptada por el músculo son 6 bar, por lo que está válvula cumple esta condición, permitiendo cambios de presión de hasta 7 bar.

La válvula recibe como referencia, un valor de corriente proporcionado por un PLC de Beckhoff. Para que el sistema funcione de forma correcta, el tiempo que transcurre entre que la señal de corriente sale del PLC y llega a la válvula, tiene que ser menor que el tiempo que tarda en comenzar a aumentar el tamaño del músculo. Por ello uno de los parámetros que se desean obtener, es el tiempo que tarda en empezar a cambiar el volumen del músculo una vez se alcanza la presión necesaria. Para poder conocer este valor, se empieza por trazar en la gráfica de la Figura 44 la función de histéresis de la variación de presión de 6 bar, que se corresponde con el caso de un músculo en estado de reposo que pasa a su presión máxima. Para obtener la función, se utiliza una hoja de cálculo de Excel y se realiza una interpolación entre las curvas de 5 y 7 bar, obteniendo la siguiente representación de la relación Corriente-Caudal-Presión:

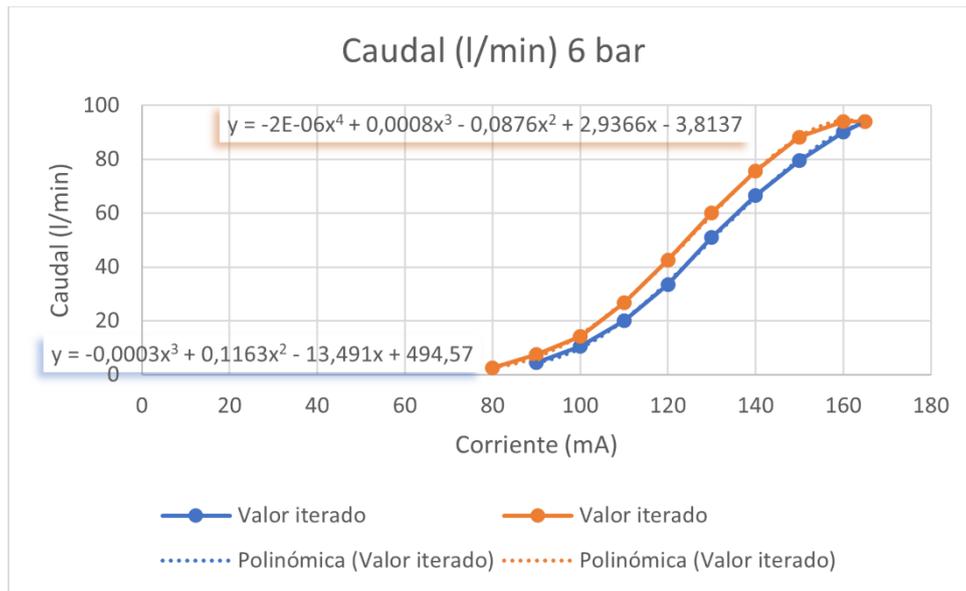


Figura 45: Relación Corriente-Caudal-Presión para PVQ30 y 6 bar

La curva azul representa el incremento de corriente y se ajusta mediante un polinomio cúbico, mientras que la curva naranja es el descenso, y se ajusta por medio de un polinomio de grado 4.

El menor tiempo en el que el músculo tras llegar a la presión deseada comienza a retraerse, se da para el caso de máxima apertura de la válvula (mayor caudal), la cual, si se observa la Figura 44, se da aproximadamente para 160mA independientemente de la curva de presión. En la gráfica de la Figura 46, se tiene la relación entre el caudal máximo y la presión a la cual se alcanza, la cual es lineal.

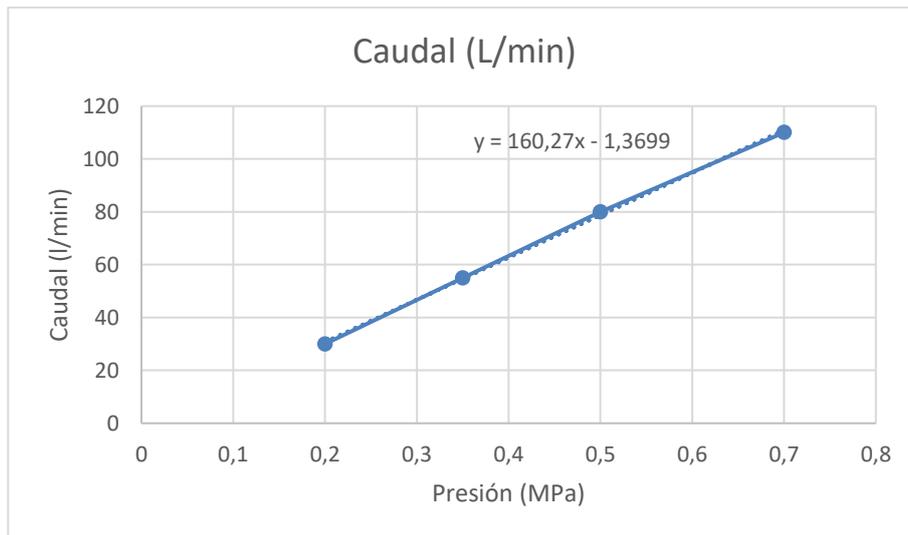


Figura 46: Relación caudal máximo y presión para PVQ30

Aproximando con la ecuación lineal mostrada en la anterior figura, el caudal para 160mA y 6 bar será 94.7921 l/min.

En caso de querer un ajuste mayor si se trabajase con presiones ligeramente superiores a la recomendada, se podría introducir un ajuste polinómico de segundo orden tal que:

$$y = -27,724x^2 + 185,4x - 6.1057 \quad (33)$$

Despejando en x con 6 bar, se obtiene que el caudal es 95.1537 l/min, lo cual se acerca al valor calculado previamente.

Para calcular el máximo tiempo de inicio de cambio de forma del músculo, se emplea la ley de los gases ideales, la cual depende del volumen del músculo, de la presión relativa, de la temperatura y de la constante de los gases ideales R .

El volumen del músculo se corresponde con el que tiene justo en el instante antes de comenzar a retraerse, por lo que se aproxima por el volumen de un cilindro tal que:

$$V_{PAM} = \pi r^2 L \quad (34)$$

Siendo r el radio del músculo (10mm) y L la longitud nominal (500mm). El volumen obtenido es 0.15708 litros. La constante de los gases ideales es $R=0.08206L \cdot atm/mol/K$. Considerando condiciones estándar (273 K y 1 atm), la variación del número de moles de aire que entran en el músculo para un incremento de presión de 6 bar será:

$$\Delta n = \frac{\Delta P * V_{PAM}}{R * T} = \frac{6 * 0,15708}{0,08206 * 273} = 0,04207 \text{ moles} \quad (35)$$

Tomando el caudal anteriormente calculado de la válvula, y la variación del número de moles dentro del músculo, se puede calcular el tiempo que tarda el músculo en alcanzar su presión máxima:

$$t = \frac{R * T * \Delta n}{\Delta P * Q_{Válvula}} = \frac{0,08206 * 273 * 0,0407 * 1000 * 60}{6 * 94.7921} = 96,187 \text{ ms} \quad (36)$$

Visto este valor temporal, se demuestra que la transmisión de corriente del PLC a la válvula es más rápida.

4.3.4 Tarjeta de corriente de Beckhoff

Para realizar el control de todo el banco de pruebas, se tiene un autómatas programable de Beckhoff. Como se ha comentado anteriormente, las consignas a las válvulas se dan en forma de corriente, por lo que es necesario introducir tarjetas de corriente compatibles con el PLC. Tras una breve búsqueda y consultar presupuesto con el departamento comercial de Beckhoff, se ha optado por la tarjeta EL2535 (Figura 47) [74], la cual puede controlar la salida de corriente a través del control del ancho de pulso de la tensión de suministro de 24 VDC. suministrar una salida de corriente de entre 0 y 1 Amperio, además de trabajar con 24 Voltios de continua. Tiene dos canales de salida, por lo que serán necesarias 3 tarjetas de corriente para controlar las 3 cadenas cinemáticas del robot planar.

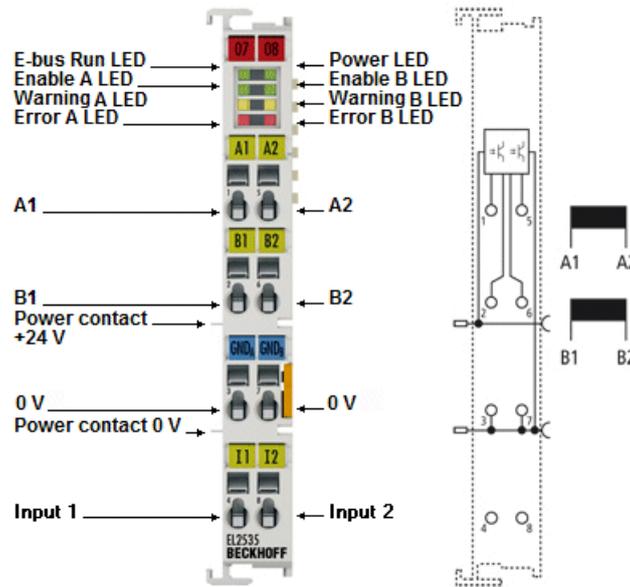


Figura 47: Tarjeta con salida de corriente controlada EL2535 de Beckhoff

4.3.5 Sensor de Presión

Se elige el sensor SDE5-D10 de Festo. Permite la medición de la presión relativa, y tiene un rango de medición de 0-10 bar, lo cual es suficiente para estudiar la presión interna de los músculos (0-6 bar). La precisión que tiene es de $\pm 0,5\%$. Permite controlar la presión de forma sencilla [75].



Figura 48: Sensor de presión SDE5-D10

4.3.6 Tubería suministro de aire

Para el suministro de aire, se utilizará una tubería de Festo. La válvula tiene un orificio de 1,6 mm por lo que la tubería debe ser de un tamaño similar. Si se observa la hoja de características de los tubos, los que tienen menos diámetro son de 3 y 4 mm, por lo que será necesario utilizar un racor (un elemento que sirve para unir tubos de igual o distinto tamaño). Dentro de la gama de tuberías, se elige la Pun-4 [76]. Entre las ventajas, permite presiones de entre -1-10 bar y se puede encargar bobinas con una longitud de entre 50 y 500 metros. Modificar la longitud de los tubos puede ayudar a corregir problemas de fricción o de lentitud en el trabajo de los músculos.



Figura 49: Racor y tubo de Festo

4.3.7 Unidad de mantenimiento

La unidad de mantenimiento, también denominada FRL, cumple 3 funciones: Filtrar, regular y lubricar el aire, garantizando así la calidad del aire comprimido en el sistema. La presión del sistema central siempre debe ser mayor que la presión de trabajo de la maqueta, por lo que el regulador, también se suele llamar **reductor de presión**. Para este proyecto, dado que es un sistema pequeño en comparación con una planta industrial, bastará con una unidad de mantenimiento básica como la MSB6 de Festo [77] que se muestra en la Figura 50.



Figura 50: Unidad de mantenimiento MSB6 de Festo

4.3.8 Sensor posición angular

Para poder controlar el robot planar, es necesario tener conocimiento del ángulo que rotan las articulaciones activas, de forma que se pueda hallar el error. Se han valorado varias opciones, desde el uso de transductores potenciómetros angulares, hasta el empleo de visión artificial (la cual se propone como un futuro trabajo). Se ha optado por proponer dos posibilidades, ambas basadas en un rango de 0° - 360° .

- **Transductor potenciómetro angular:** gama P2250 de Mapro (Figura 51) [78]. Se caracteriza por tener una alta precisión en dimensiones pequeñas sumado a una resolución de $0,01^{\circ}$. Se puede fijar el rango máximo de medida y presenta una buena linealidad de $\pm 0,3\%$.



Figura 51: Transductor potenciómetro angular P2250 de Mapro

- **Sensor de posición angular sin contacto:** Como el anterior, es un transductor potenciómetro angular, pero en este caso, sin contacto con la articulación. Se selecciona el tipo Series Vert-X 13 (Figura 52) [79], el cual tiene un rango de 0-360° y una resolución de 12 bits.



Figura 52: Sensor de posición angular sin contacto Series Vert-X 13

4.3.9 Rueda polea unión actuador-cadena cinemática robot

Para poder formar el sistema antagonista músculo-resorte, y transmitir el movimiento a las cadenas cinemáticas del robot, se utiliza un sistema de polea (Figura 53). Esta polea puede construirse o comprarse fácilmente dependiendo de las condiciones que se pongan en el momento de construcción del banco.



Figura 53: Rueda polea

Un estudio que se hizo inicialmente debido a necesidades del modelado en Simulink, fue el dimensionamiento de la polea. El músculo se contrae longitudinalmente una determinada distancia, pero el ángulo que rota la articulación depende del radio que tenga la rueda de la polea. En la tabla 7 se puede ver el radio mínimo que debería tener en función del ángulo máximo que se desee girar la articulación. Para ello, se utiliza la ecuación mostrada a continuación, la cual relaciona el radio de la polea con la contracción del músculo y el ángulo máximo de variación.

$$R = \frac{\Delta L * 360}{2\pi\Delta\theta} \quad (37)$$

Dimensionamiento Polea			
Longitud PAM (cm)	Deformación 10% (m)	Ángulo máximo de giro (°)	Radio (cm)
50	0,05	90	0,032
		60	0,048
		45	0,064
		30	0,095
40	0,04	90	0,025
		60	0,038
		45	0,051
		30	0,076
30	0,03	90	0,019
		60	0,029
		45	0,038
		30	0,057

Tabla 7: Tabla dimensionamiento de polea

En la mayor parte de los modelos realizados, se trabaja con una polea que cubra 180° para un músculo de longitud nominal de 50 cm. El radio que se necesita es de unos 1,59 cm.

4.3.10 Cuerpos rígidos

Una vez vistos los elementos fundamentales para crear el movimiento, se deben tener en cuenta también cómo se harán los cuerpos rígidos como la plataforma móvil, los elementos de las cadenas cinemáticas y el bastidor que soporte todo el robot planar.

Para el bastidor, se propone utilizar perfiles de aluminio en V como el de la Figura 54, los cuales facilitan el ajuste y fijación del sistema antagonista del actuador, así como su reajuste en otras posiciones. Las dimensiones dependerán de la forma que se le quiera dar al bastidor, sí como del espacio que se pueda ocupar realmente.



Figura 54: Perfil de aluminio en V

Sobre los elementos que componen cada cadena cinemática y la plataforma móvil, se plantean dos opciones: o crear los elementos en el propio laboratorio o comprarlos. Un ejemplo de compra, podría ser el empleo de elementos de aluminio como el que se muestra a continuación en la siguiente figura:



Figura 55: Lámina aluminio

En la presentación de este capítulo, se pudo comprobar que cada cual utiliza unos cuerpos rígidos diferentes. Como se quiere crear un robot reconfigurable, se propone tener juegos de cuerpos rígidos con longitudes y materiales distintos como aluminio, madera o plástico (posibilidad de impresión 3D). En Simscape, se verá cómo se han creado distintos elementos, y para introducir el material del que están formados, se cambia su densidad. En la siguiente tabla se recogen las densidades promedio de cada uno de los materiales citados anteriormente:

Material	Densidad (g/cm ³)
Aluminio	2,7
Madera	0,6
Plástico	1

Tabla 8: Densidades promedio materiales robot planar 3RRR

En cuanto a la longitud de los elementos rígidos que forman las cadenas serie, se toma que el tamaño esté comprendido entre lo 200 y 250 mm.

4.3.11 Juntas rotativas

Por último, se deben tener en cuenta las articulaciones pasivas, que unen el elemento que está unido al actuador (articulación activa) y el elemento unido a la plataforma. Idealmente, se busca que tengan la menor fricción posible y que sean ligeros, por lo que se proponen diferentes soluciones las cuales habrá que probar en el momento de la construcción. A continuación, se muestran algunas:

- **Junta pivotante:** Una de las formas más sencillas. Esta junta tiene un pasador de plástico que permite un movimiento de 180°. Se puede observar en la siguiente figura[80]:



Figura 56: Junta pivotante

- **Junta pivotante aluminio:** La sujeción en este caso se realiza por medio de un tornillo, pudiéndose adaptar el diámetro según las necesidades de construcción (figura--):



Figura 57: Junta pivotante aluminio

4.4 Programación de código en Matlab

Antes de pasar a comentar los modelos creados en Simscape, se comentarán los códigos principales para este proyecto implementados en Matlab. Principalmente, estos códigos se generan con la finalidad de obtener los valores de consigna angular de las articulaciones activas y estudiar otros factores como las singularidades o el espacio de trabajo. Los scripts que se mencionarán a continuación están recogidos en el **Anexo 1**.

4.4.1 Estructura Parámetros

Antes de realizar una simulación para una configuración determinada del robot planar, es necesario indicar cuáles son sus características de forma que, el resto de los códigos utilizados para su funcionamiento, tengan conocimiento de los valores de los parámetros con los que se trabajan. Para evitar tener que cambiar estos valores en todos los scripts que se utilicen, se opta por crear una estructura única que contenga todos los parámetros necesarios, de forma que se ahorra tiempo y se reduce la posibilidad de obtener resultados erróneos al facilitarle la puesta a punto al usuario.

Los parámetros que se pueden ajustar en esta estructura son:

- **Longitudes de los brazos articulados:** Los brazos están formados por dos elementos cada uno, los cuales sirven de enlace entre la articulación activa y la pasiva (longitud L_i) y entre la pasiva y la plataforma (longitud l_i).
- **Datos de la plataforma móvil:** La plataforma móvil, la cual tiene el elemento final y donde se puede poner la carga, tiene unas características geométricas y de composición determinadas. Se configura la estructura para poder modificar la densidad del material fácilmente y las dimensiones. Como se ha visto, lo normal es trabajar con plataformas triangulares. Se aprovecha también para realizar cálculos de vectores que puedan necesitarse en otros códigos, como la relación entre los vértices de la plataforma y su centro.
- **Puntos de anclaje de las articulaciones activas (O_{Ai}):** Una de las primeras configuraciones que se hacen antes de iniciar una simulación, es configurar la posición inicial de la articulación activa (y con ello la posición del sistema antagonista). En función de la forma que tome el bastidor, para lograr una distribución en forma de triángulo, cambia la forma de ajustarlo. En el script se deja indicado cada tipo, de forma que se comenten y descomenten según el interés.
- **Guardado en estructura:** Una vez obtenidos todos los datos, se guardan en la estructura, la cual es llamada en caso de necesidad por parte de alguno de los códigos o del modelo.

4.4.2 Scripts de la cinemática del robot

Como se ha comentado previamente, este proyecto se centra en el apartado cinemático del robot, concretamente en la resolución del problema de posición. La cinemática relaciona la posición, velocidad y aceleración de las diferentes partes que lo componen. A continuación, se presenta el desarrollo del problema de posición, el cual está basado en los artículos [81], [82] y en material propio de la asignatura de Robótica Industrial Avanzada del máster de Ingeniería de

Control, Automatización y Robótica. Los códigos del problema de velocidad se pueden encontrar también en el Anexo 1. Aunque se han realizado los scripts necesarios para resolver el modelo dinámico, este no afecta a la elaboración de este trabajo, por lo que no se le dará relevancia.

4.4.2.1 Problema cinemático inverso

Partiendo del conocimiento de la posición que se desea alcanzar con el punto medio de la plataforma de carga (X), se necesita obtener cuáles serán las variables articulares necesarias para obtener dicha configuración. Una vez obtenidas las variables articulares activas (q_a), se conocerá cuáles son las consignas de movimiento que se deben mandar al músculo (actuador).

Los parámetros con los que trabaja la función “**CinematicaInversa**” son:

- Entradas:
 - **Param:** estructura de parámetros de la maqueta.
 - **P:** posición que se desea alcanzar con la maqueta. La cantidad de datos que aporta esta variable depende principalmente del número de grados de libertad del sistema. Se considerará que hay 3 GDL: posicionamiento en x/y y orientación mediante giro alrededor del eje z. En este proyecto el control se centra en el posicionamiento en x e y.

Se debe estudiar si hay que tener en cuenta el modo de trabajo de la maqueta. Cabe recordar que el modo de trabajo separa los distintos rangos de trabajo antes de alcanzar una configuración singular; es decir, se puede alcanzar un mismo punto con configuraciones articulares diferentes.

- Salidas:
 - **OK:** Se indica si la obtención de las variables articulares se ha realizado correctamente (1 sí, 0 no).
 - Espacio articular **q:** Se obtienen todas las variables articulares; tanto las actuadas como las pasivas.

$$q = \begin{bmatrix} q_a \\ q_p \end{bmatrix} \quad (38)$$

La secuencia que sigue la función, se muestra en el diagrama de la siguiente figura:

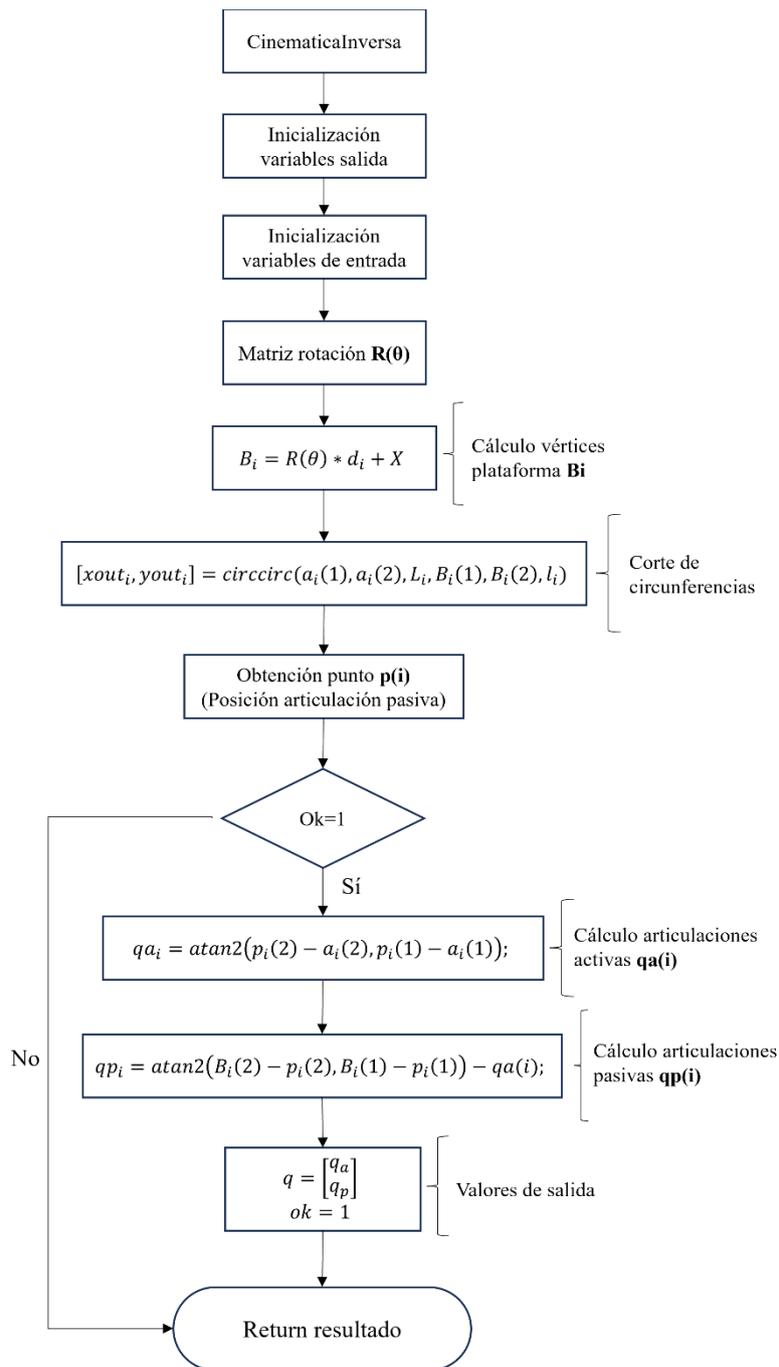


Figura 58: Diagrama script cinemática inversa

Como se puede comprobar, la obtención de las variables articulares partiendo del valor del elemento final, es sencillo de hacer combinando la geometría de la estructura y trigonometría.

4.4.2.2 Problema cinemático directo

Con el cálculo de la cinemática directa del robot se desea obtener la posición del elemento final de carga y de la plataforma conocidas las variables articulares activas. Los parámetros con los que trabaja la función son:

- Entradas:
 - **Param:** estructura de parámetros de la maqueta.
 - **qa:** valor de las articulaciones activas. Siguiendo las ecuaciones de cierre y aplicando trigonometría, se puede llegar a alcanzar el valor de la posición final.
 - **X0:** Vector que contiene el valor inicial de los 3 estados sobre el que iterar (semilla del método de Newton-Raphson).
- Salidas:
 - **X:** Se obtienen las coordenadas cartesianas y el estado final del sistema.
 - **q:** Vector con todas las variables articulares (tanto actuadas como pasivas).

Como se mencionó anteriormente, la resolución del problema cinemático directo es una tarea compleja sin solución analítica. Igual que en el caso anterior, el valor angular de las articulaciones pasivas se calcula mediante trigonometría y se añaden posteriormente a la matriz **q** del espacio articular. Para obtener el valor de posición del elemento terminal, se ha utilizado el método de Newton-Raphson, por lo que es necesario obtener la jacobiana **J**, la cual se calcula con el script “**Jacobiana_X_f**”. Esta función, recibe los valores en simbólico de los diferentes parámetros que definen al robot, y devuelve una matriz (**f**) con las ecuaciones de cierre y otra **J** que es la jacobiana del robot respecto de la posición y orientación de la plataforma móvil. Para el cálculo de la Jacobiana se emplea la función “**jacobian**” de Matlab.

En el diagrama de la Figura 59 se muestra la estructura de esta función. Para aplicar el algoritmo de Newton-Raphson, se introducen las siguientes 3 variables:

- **MaxIter:** Es el número máximo de iteraciones que puede hacer el bucle antes de salirse.
- **Epsilon:** Es el factor de convergencia y una de las condiciones de parada. Si el valor de la norma euclídea de la diferencia entre el punto **X** y el anterior es menor que el valor épsilon fijado por el usuario, entonces se considera que el método ha convergido y se tienen los resultados
- **detLimit:** Si en algún momento el valor absoluto del determinante del jacobiano de robot respecto de **X** es menor que el valor de este parámetro, indicará cercanía con una singularidad, por lo que se cesa inmediatamente la búsqueda de nuevas posiciones.

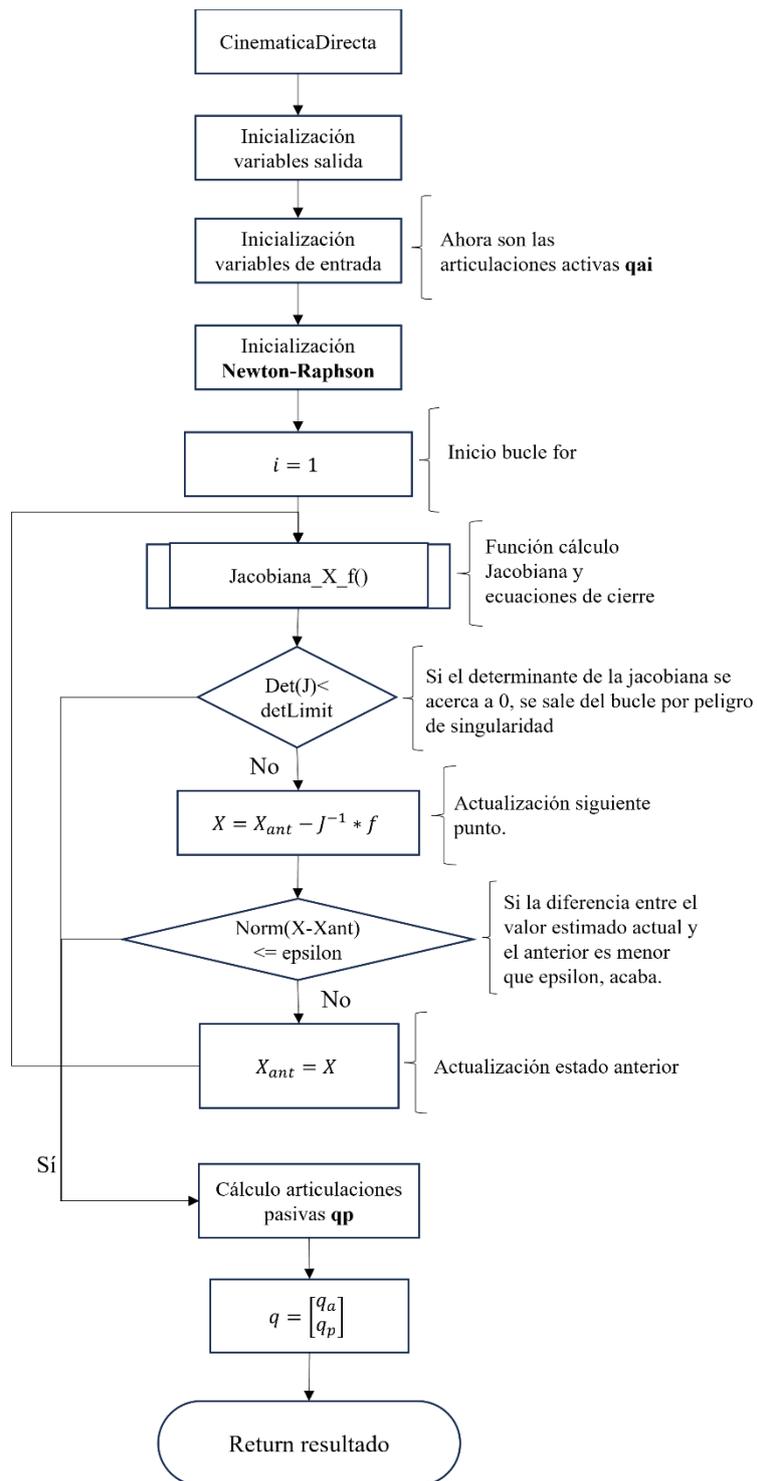


Figura 59: Diagrama script cinemática directa

4.4.3 Script principal (“Script_main”)

La finalidad del código principal es servir de base al usuario para realizar diferentes solicitudes a los códigos aquí mencionados. Se ha creado un script para probar diferentes configuraciones con la cinemática directa de forma que permita comprobar si la posición de la plataforma alcanzada se corresponde con lo obtenido de la función “**CinemáticaDirecta**”. En este proyecto, la más usada, es el script principal de “**CinemáticaInversa**”, debido a que es la función que permite obtener las consignas angulares que pasarle al modelo del robot 3RRR.

En él, el usuario introduce las coordenadas de posición deseadas para la plataforma móvil y el ángulo de giro, de forma que a continuación se llama a la función del problema cinemático inverso y se obtengan las consignas. Una vez finaliza la búsqueda de los valores angulares de las articulaciones activas, estos se guardan en el workspace de Matlab, de forma que son reutilizables directamente en los modelos de Simulink introduciendo el nombre de la variable en los bloques correspondientes. En el diagrama de la Figura 60 se muestra la secuencia de este código.

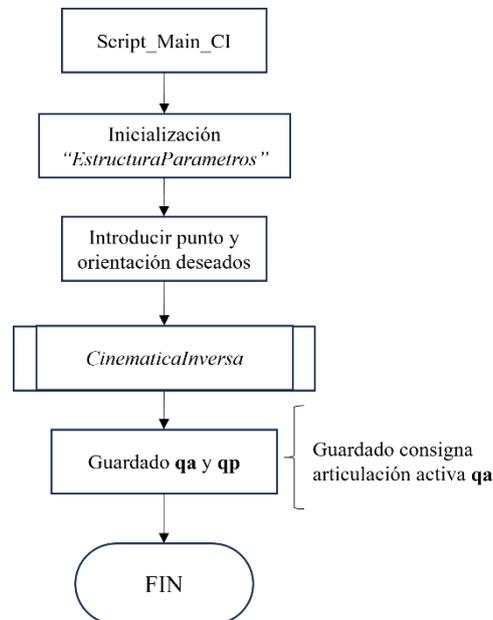


Figura 60: Diagrama script principal Cinemática Inversa

4.4.4 Workspace

Una vez se crea un modelo en Simulink y se desea probar, hay que asignar unas consignas de movimiento angular a los actuadores. Los valores de referencia deben ser tal que el robot pueda alcanzar la posición deseada. El problema surge cuando se selecciona una posición que no es alcanzable y se comete un error de posicionamiento con la consecuente pérdida de tiempo para el usuario. Por ello, se decide crear un programa que muestre el espacio de trabajo del robot en función del posicionamiento de los músculos y la geometría del robot.

El espacio de trabajo se obtiene calculando los puntos de intersección entre las circunferencias creadas por las cadenas serie (función *circirc*) y a continuación trazando el área de intersección entre curvas. A continuación, se muestra el diagrama de la secuencia seguida por la función:

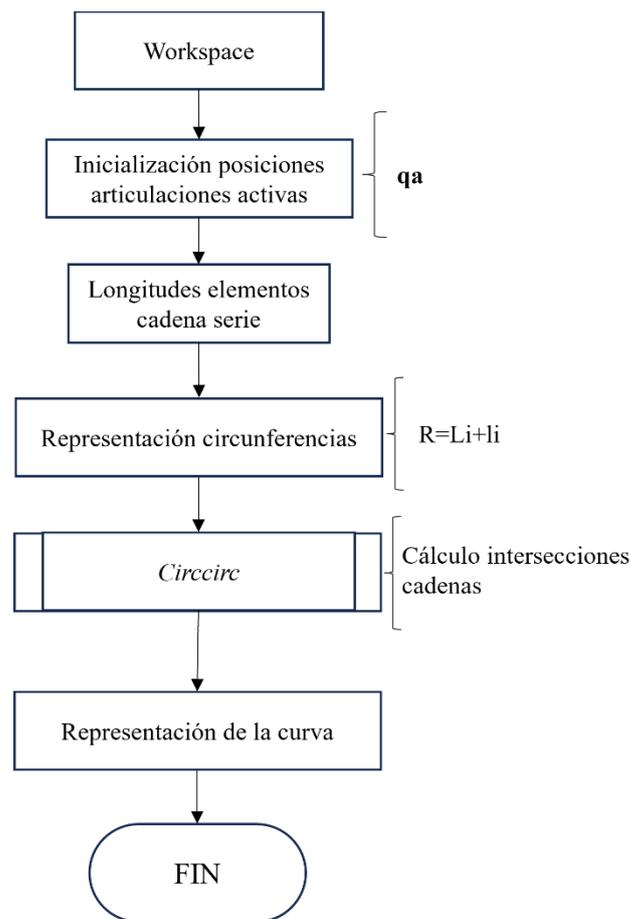


Figura 61: Diagrama script espacio de trabajo

Si se tienen posicionadas las articulaciones activas en:

```

% Posición "Qa1":
a1x=(45-22.5*cos(pi/6))*10^-2;
a1y=(45-22.5*sin(pi/6))*10^-2;
    
```

```

% Posición "Qa2":
a2x=(45+22.5*cos(pi/6))*10^-2;
a2y=(45-22.5*sin(pi/6))*10^-2;
    
```

```

% Posición "Qa3":
a3x=0.45;
a3y=0.45+0.225;
    
```

Y sean las longitudes (en metros) de los brazos tal que:

```

Li=0.25;
li=0.25;
    
```

Se obtiene el espacio de trabajo mostrado en la Figura 62, el cual se corresponde con el área encerrada dentro de la línea negra.

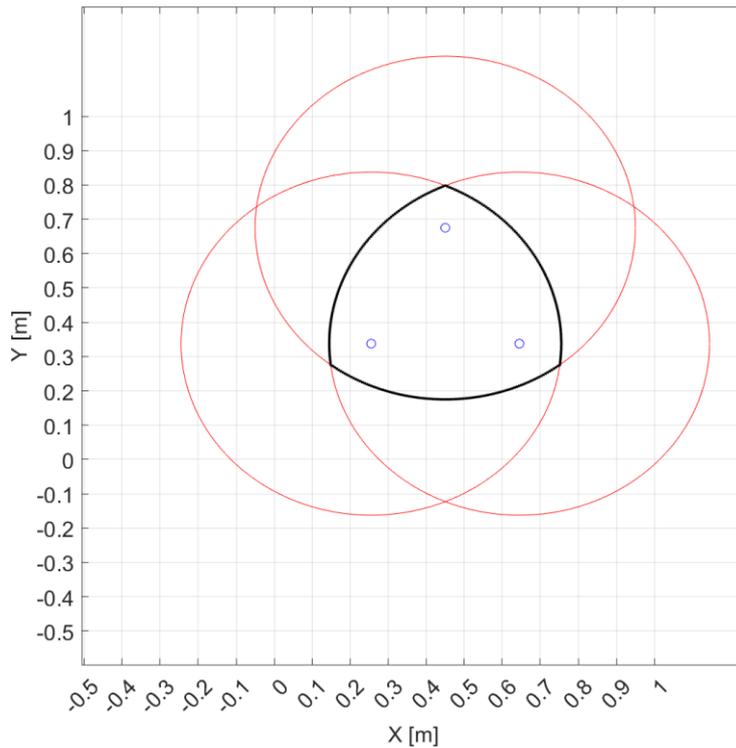


Figura 62: Ejemplo funcionamiento script "Workspace"

4.5 Modelado en Simscape-Simulink

Tras establecer la arquitectura a diseñar, ver los principales componentes necesarios para la construcción física de la maqueta y los principales códigos programados en Matlab, se pasa a realizar el modelado en Simscape-Simulink. A continuación, se comentarán los principales bloques usados para el diseño del robot planar, así como su parametrización, y se mostrará el funcionamiento por separado de cada una de las partes para después juntarlas y dar lugar al prototipo del banco de pruebas.

4.5.1 Principales bloques y parametrización

El entorno de Simscape, es idéntico al de Simulink, con la diferencia de que se tienen algunas librerías extra que introducen nuevos dominios de trabajo (hidráulico, mecánico de rotación y traslación, gases, térmico, eléctrico...). Para poder realizar el paso de un dominio a otro, es necesario el empleo de bloques de interfaz como los que se pueden ver en la Figura 63.

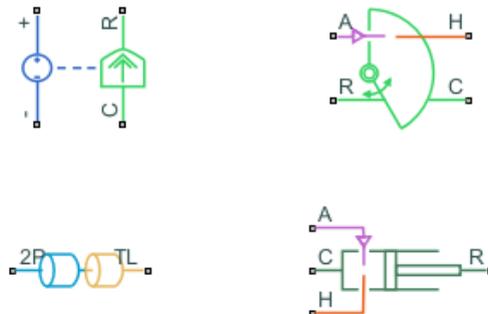


Figura 63: Interfaces de conversión de dominio de trabajo

El código de colores que se muestra en la Figura 64 permite diferenciar los diferentes dominios. En este proyecto se usarán los dominios de gas, mecánico rotacional, mecánico traslacional, térmico, señales físicas y 3-D mecánico.

Color	Name	Path
Blue	Electrical Domain	foundation.electrical.electrical
Light Blue	Three-Phase Electrical Domain	foundation.electrical.three_phase
Purple	Gas Domain	foundation.gas.gas
Olive Green	Hydraulic Domain	foundation.hydraulic.hydraulic
Dark Blue	Isothermal Liquid Domain	foundation.isothermal_liquid.isothermal_liquid
Magenta	Magnetic Domain	foundation.magnetic.magnetic
Green	Mechanical Rotational Domain	foundation.mechanical.rotational.rotational
Dark Green	Mechanical Translational Domain	foundation.mechanical.translational.translational
Light Purple	Moist Air Domain	foundation.moist_air.moist_air
Light Blue-Gray	Moist Air Source Domain	foundation.moist_air.moist_air_source
Orange	Thermal Domain	foundation.thermal.thermal
Yellow-Orange	Thermal Liquid Domain	foundation.thermal_liquid.thermal_liquid
Light Blue	Two-Phase Fluid Domain	foundation.two_phase_fluid.two_phase_fluid
Brown	Physical Signals	-
Dark Gray	3-D Mechanical (Belt-Cable)	-
Dark Gray	3-D Mechanical (Frame)	-
Dark Gray	3-D Mechanical (Geometry)	-

Figura 64: Estilos de color de línea para cada dominio de Simscape

En los siguientes subapartados se comentarán algunos de los bloques usados junto a su parametrización.

4.5.1.1 Músculo neumático (Air Muscle Actuator)

En la librería de “Fluids/Gas/Actuators” se puede encontrar el modelo de un músculo neumático como el que se mostró anteriormente en la figura 32. El funcionamiento de este bloque se basa en la ecuación de Chou-Hannaford, cuya expresión general se corresponde con el mostrado en la ecuación 3 del apartado 3.5.1. Esta expresión, considera que la cámara de aire y la cubierta son infinitamente finas y que la malla no tiene capacidad de estiramiento. La diferencia, es que, de cara a proporcionar un comportamiento más realista del funcionamiento del músculo, introduce dos correcciones: una relacionada con la capacidad de estiramiento C (cambiando la longitud constante por l^*) y la otra relacionada con el grosor de las paredes del músculo t . Las ecuaciones que definen estos factores de corrección se plantean a continuación:

$$l^* = \frac{Cl + \sqrt{(Cl)^2 + 12L^2(C + 1)}}{2(C + 1)} + \frac{2nPD^2}{Ed} \quad (39)$$

C es el factor de corrección del estiramiento de la malla, E es el módulo de elasticidad de Young (dependiente del material del músculo) y d es el diámetro de una de las fibras de la malla. C se define como:

$$C = \frac{n^2 \pi^2 E d^2 N}{PL} \quad (40)$$

N es el número total de fibras en la malla. El factor de corrección del grosor del músculo añade a la fuerza total del actuador un factor F_T tal que:

$$F_T = \pi P \left[t \left(2D - \frac{D_M^2}{D} \right) - t^2 \right] \quad (41)$$

Resultando la fuerza final del actuador (**F**):

$$F = F_{ChouHannaford} + F_T \quad (42)$$

Al hacer doble clic en el bloque del músculo se pueden configurar los parámetros según las necesidades. En la Figura 65 se muestra el interfaz de configuración con los valores utilizados para el actuador neumático en este proyecto, basado en todo lo comentado anteriormente.

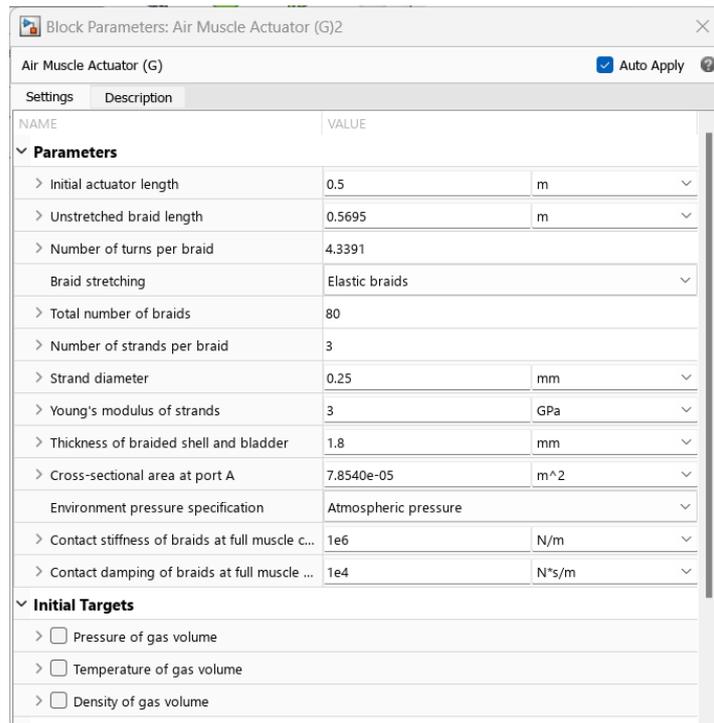


Figura 65: Interfaz de configuración músculo neumático Simscape

Si se toma el músculo neumático, se tienen 4 conexiones diferentes al mismo: A, C, H y R. C y R representan los puntos físicos de unión del músculo con el exterior; en este caso, C está unido con una referencia fija, y R se conecta con un convertidor de movimiento longitudinal a rotacional para crear el sistema antagonista junto al resorte. A es la vía de entrada del aire (color rosa, dominio de gas) y H es el puerto de conservación térmica asociado con la temperatura del gas dentro del actuador; en este caso se le conecta un bloque de “Aislante perfecto” de forma que no se considera ni flujo de calor ni almacenamiento de energía.

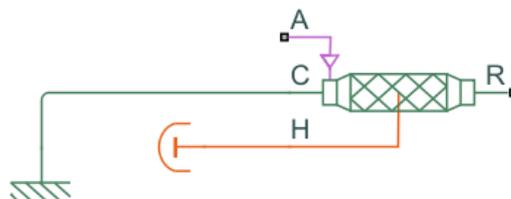


Figura 66: Conexiones músculo neumático Simscape

4.5.1.2 Resorte

El resorte es un sistema mecánico sencillo que se puede encontrar en la librería de “Mechanical”. Como se puede ver en la Figura 67, representa un resorte mecánico ideal, cuya dirección positiva de la fuerza es en el sentido de R a C. El puerto R está conectado con una referencia fija, mientras que C (al igual que pasa con R en el músculo neumático) se conecta con un convertidor de movimiento para poder crear el par antagonista.



Figura 67: Representación resorte Simscape

Como se comentó en la explicación de los posibles componentes de la maqueta, para una contracción del actuador del 10%, se necesitaría un resorte de 16000 N/m, mientras que para el 14% se tiene que $K=8571,43$ N/m (trabajando a presión máxima). La interfaz de configuración del muelle se muestra en la siguiente figura. El valor de la constante puede variar en función de la presión de operación. En el apartado “Deformation”, se observa que hay un valor negativo, el cual se corresponde con un preposicionamiento de la articulación activa para cubrir unas necesidades del usuario.

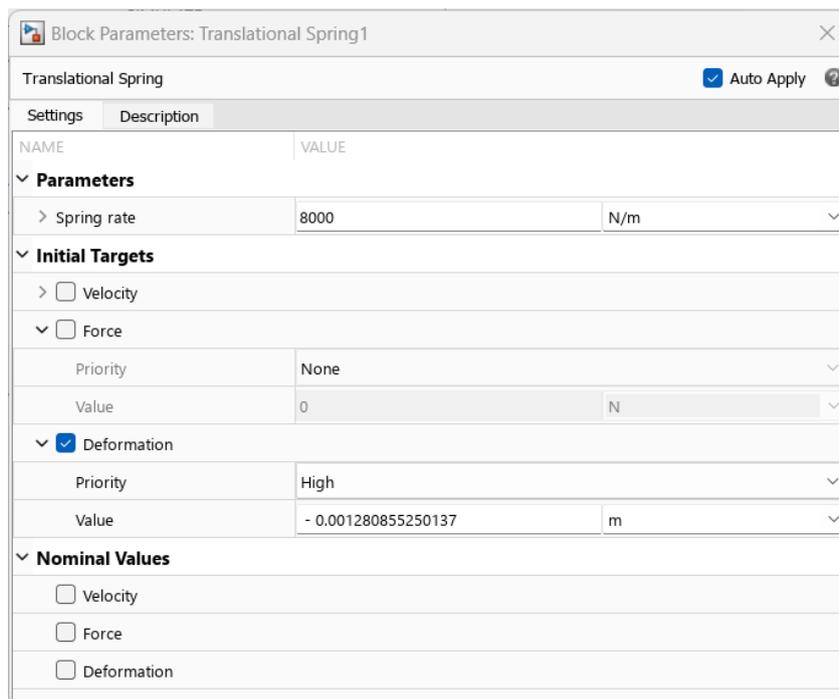


Figura 68: Interfaz configuración resorte Simscape

4.5.1.3 Modelado de la rueda de polea

Para crear el sistema antagonista y unir el resorte y el músculo, se necesita introducir un elemento de rotación, por lo que se opta por introducir una rueda de polea como la que se muestra en la Figura 69. El funcionamiento se basa en traducir los movimientos longitudinales que llegan por los puertos A y B en un movimiento angular que se obtiene en el puerto S.



Figura 69: Representación polea Simscape

La configuración del bloque, como se puede ver en la siguiente figura, es sencilla. Se parte de una suposición de que la correa es ideal y permite el movimiento en dos direcciones y se configuran los parámetros de la rueda, introduciendo su radio (el cual se explicó anteriormente cómo se calcula) y se hace nulo el factor de inercia.

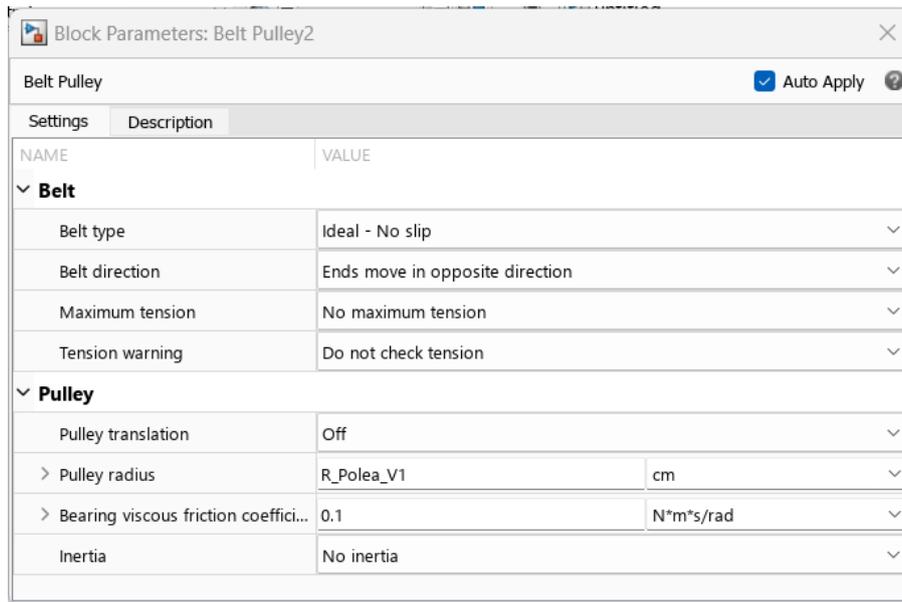


Figura 70: Interfaz configuración polea Simscape

4.5.1.4 Sistema neumático y válvula direccional 2 vías

Para controlar el músculo, se emplean 2 válvulas direccionales de 2 vías; una para la acción de contracción y la otra para permitir que el aire del músculo fluya hacia fuera cuando se estira. La representación de la válvula se corresponde con la Figura 71. Los puertos A y B son las vías de entrada y salida de aire respectivamente. S es el puerto de entrada de la señal física que comanda la apertura de la válvula con un rango de valores entre -1 y 1. Un valor positivo abre la conexión entre los puertos A y B, mientras que uno negativo la cierra.

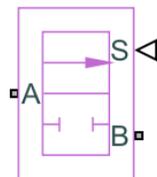


Figura 71: Representación válvula direccional proporcional 2/2 Simscape

En la siguiente figura se muestra la configuración de la válvula utilizada:

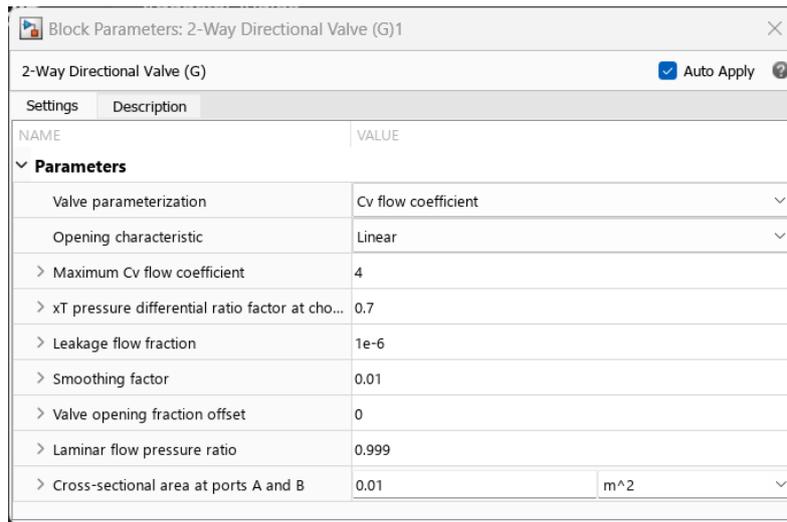


Figura 72: Interfaz configuración válvula direccional 2 vías Simscape

En los siguientes 2 subapartados se muestran los dos sistemas junto a los elementos auxiliares. Todos los elementos vistos en este apartado pertenecen a la librería “Fluids/Gas”.

4.5.1.4.1 Sistema neumático fase retracción músculo

En la Figura 73 se puede ver el modelo de bloques de la parte neumática que regula el suministro de aire al músculo. Una fuente de presión, en la cual se configura la presión relativa deseada en el músculo, toma aire de la atmósfera y lo suministra a través de la válvula cuando esta se abre. La salida a la atmósfera se modela mediante un bloque denominado “Reservorio” y establece la presión a la que se toma el aire (en este caso no se tiene una unidad de mantenimiento, por lo que es la propia fuente de presión la que la incrementa) y su temperatura.

La tubería se representa con el bloque “Pipe”, el cual modela las dinámicas del flujo de aire y contiene un volumen constante de gas. Su cuadro de configuración se muestra en la Figura 74. La longitud del tubo que se toma es de 5 metros, pero esto puede variar según las necesidades de tiempo de respuesta o de la dinámica que se busque en la reacción del actuador.

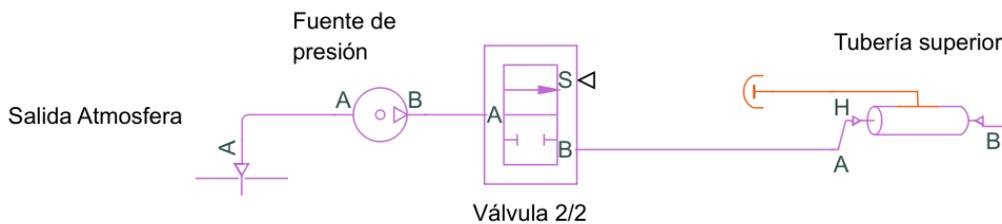


Figura 73: Modelado parte neumática fase retracción músculo

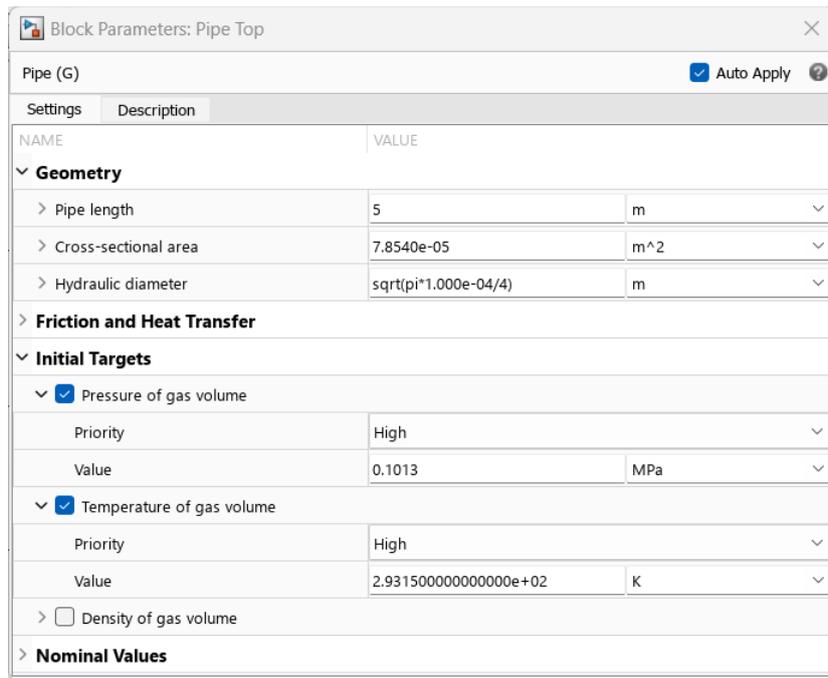


Figura 74: Interfaz configuración tubo neumático Simscape

4.5.1.4.2 Sistema neumático fase estiramiento músculo

Si se compara la Figura 75 con la del sistema de retracción, se observa que la válvula se debe colocar al revés para que permita salir al aire del actuador. La parametrización de todos los elementos es igual al anterior sistema.

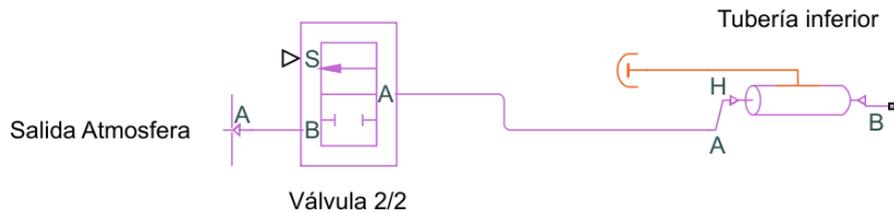


Figura 75: Modelado parte neumática parte estiramiento músculo

4.5.1.5 Interfaz conversión Rotacional-Multibody

Simscape Multibody, permite introducir elementos 3D y CAD para poder realizar una representación tridimensional del modelo implementado al compilar el proyecto. Para poder pasar del dominio mecánico de rotación (la pulea) al Multibody y transmitir el movimiento a las cadenas cinemáticas del robot planar, se necesita un convertor como el de la Figura 76.

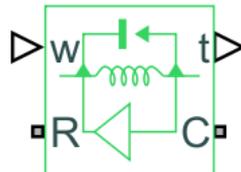


Figura 76: Bloque conversión dominio mecánico de rotación a Simscape Multibody

Para su correcto funcionamiento, al puerto C se le conecta una referencia fija de rotación y a R la pulea vista. Los puertos w y t son señales físicas que se pueden conectar con la

articulación del Multibody. El puerto de entrada w recibe la velocidad angular relativa de la salida de la articulación del espacio tridimensional, y t es un puerto de salida que envía el torque de actuación a la junta primitiva del Multibody.

4.5.1.6 Sensores

A lo largo del proyecto se han utilizado diferentes tipos de sensores para obtener datos y comprobar que el funcionamiento era el correcto. Igual que entre bloques de diferentes dominios es necesario utilizar un convertidor, también es necesario emplear una interfaz entre la naturaleza de las señales de forma que se puedan convertir una señal de entrada física en una señal de salida que pueda ser usada por Simulink y Matlab para estudiar los datos o ser representados. El elemento que se utiliza se muestra en la Figura 77, y su configuración se basa en hacer clic y escoger las unidades de la señal de entrada (bar, V, A, rad...).

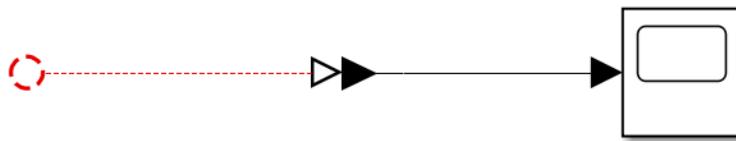


Figura 77: Convertidor señal física-Simulink

Los sensores más utilizados se muestran a continuación:

4.5.1.6.1 Sensores Simscape clásico

En la siguiente figura se tienen los 4 sensores más empleados en este proyecto para la parte de señales y del empleo de los bloques de Simscape clásico. De izquierda a derecha, se tienen: Sensor de presión y temperatura para el aire, sensor de fuerza ideal para los sistemas mecánicos (medición de fuerza del músculo y seguimiento de la curva Fuerza-Constracción- Presión), sensor de movimiento longitudinal y sensor ideal de movimiento rotacional.



Figura 78: Sensores Simscape más utilizados en el proyecto

4.5.1.6.2 Sensores Simscape Multibody

Simscape Multibody tiene un bloque reconfigurable (ver Figura 79) que permite obtener cualquier medición que se desee configurándolo previamente desde su propia interfaz, la cual se muestra en la Figura 80.

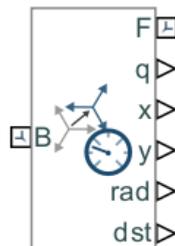


Figura 79: "Transform Sensor" de Simscape Multibody

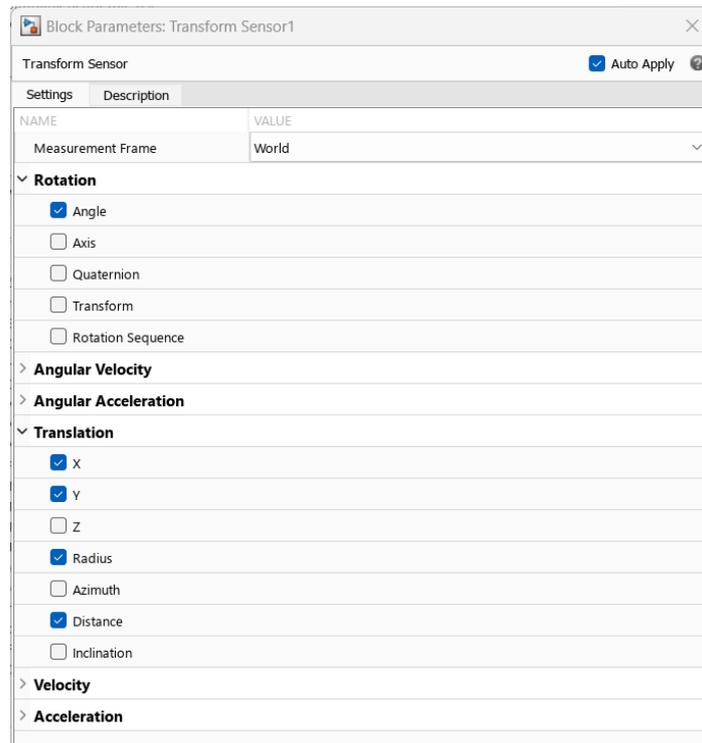


Figura 80: Interfaz de configuración Transform Sensor Simscape Multibody

4.5.2 Cuerpos rígidos y librería Multibody

Un problema que presenta Simscape, es que apenas existe información o cursos que ayuden a obtener el máximo rendimiento de este software, sobre todo cuando se trata de la librería “Multibody” y de todo lo referente al modelado 3D. Si desde Matlab se ejecuta el comando “**simscape**” y se selecciona la biblioteca de Multibody, se abre un menú (Figura 81), en el que se puede ver todas las opciones que ofrece.

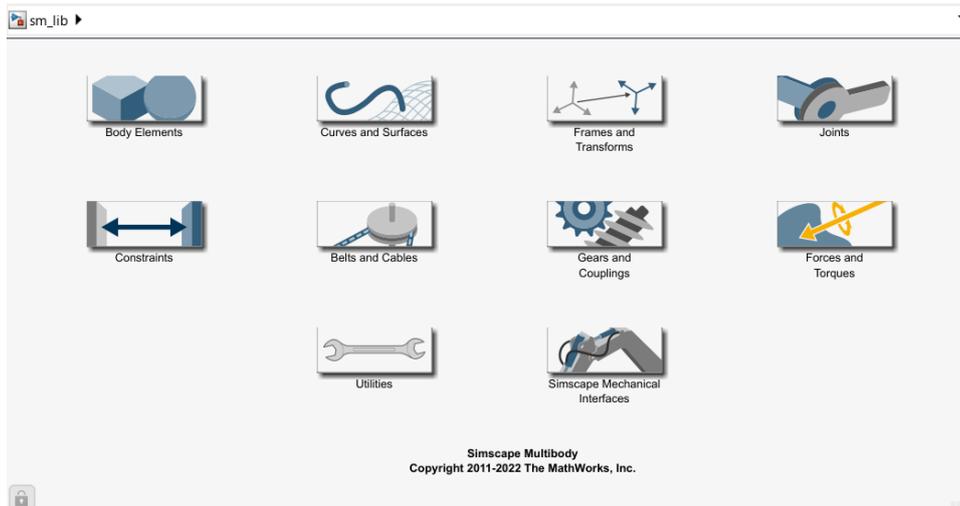


Figura 81: Librería Multibody de Simscape

Este menú es más intuitivo que el de la librería original de Simulink, y permite elegir rápidamente los elementos necesarios, así como reconfigurarlos según las necesidades.

Principalmente, se utilizan las librerías de: “Body Elements” para la creación de cuerpos rígidos para el cuerpo del robot y del bastidor, “Frames and Transforms” para orientar los elementos entre sí y obtener la arquitectura deseada y “Joints” para seleccionar el tipo de articulación, el cual siendo un robot planar 3RRR, todas serán juntas de revolución. En los siguientes subapartados se mostrarán los diferentes cuerpos rígidos creados (modelado CAD) y a continuación las formas de unirlos para dar lugar a las cadenas serie que componen el robot. Antes de pasar a comentarlo, se debe tener en cuenta que se ha considerado que todos los cuerpos rígidos son de aluminio, por lo que la densidad del material será $2,7\text{g/cm}^3$. Antes de mostrarlos, se introducen dos conceptos que estarán presentes en el ensamblado de los elementos: los “Frames” y el bloque “Rigid Transform”.

El **Frame** es un marco de referencia tridimensional (ejes x, y, z). En los cuerpos creados, por defecto aparece uno (denominado puerto R) en su centro de masas. De no crearse más, cualquier elemento que se quiera enlazar con el sólido creado, se unirá al sistema de referencia por defecto. Para poder unirlo con otro punto del cuerpo, se pueden añadir frames, de forma que se elija el punto de unión entre los distintos componentes. En la Figura 82 se muestra la ventana de configuración del frame en un sólido.

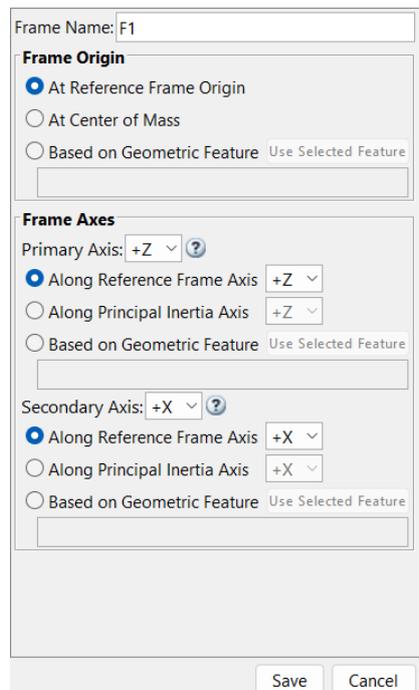


Figura 82: Menú de configuración de sistemas de referencia (Frames)

Por otro lado, se encuentra el bloque “Rigid Transform”, el cual se emplea para realizar transformaciones entre dos sistemas de referencia “frames”. El sistema rota y traslada el puerto de un frame de un cuerpo seguidor (F) con respecto de un frame base (B). Durante la simulación los sistemas de referencia implicados se mantienen fijos el uno respecto del otro. El bloque es el mostrado en la siguiente figura, junto a su configuración.

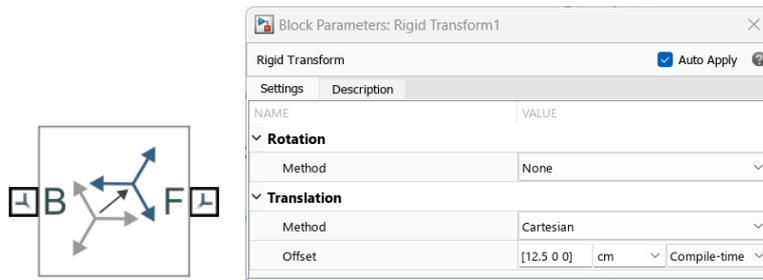


Figura 83: Bloque Rigid Transform y menú de configuración

4.5.2.1 Modelado CAD articulación rotativa

Para representar visualmente las articulaciones rotatorias, se ha creado un cilindro cuyas características y forma se pueden ver en la siguiente figura.

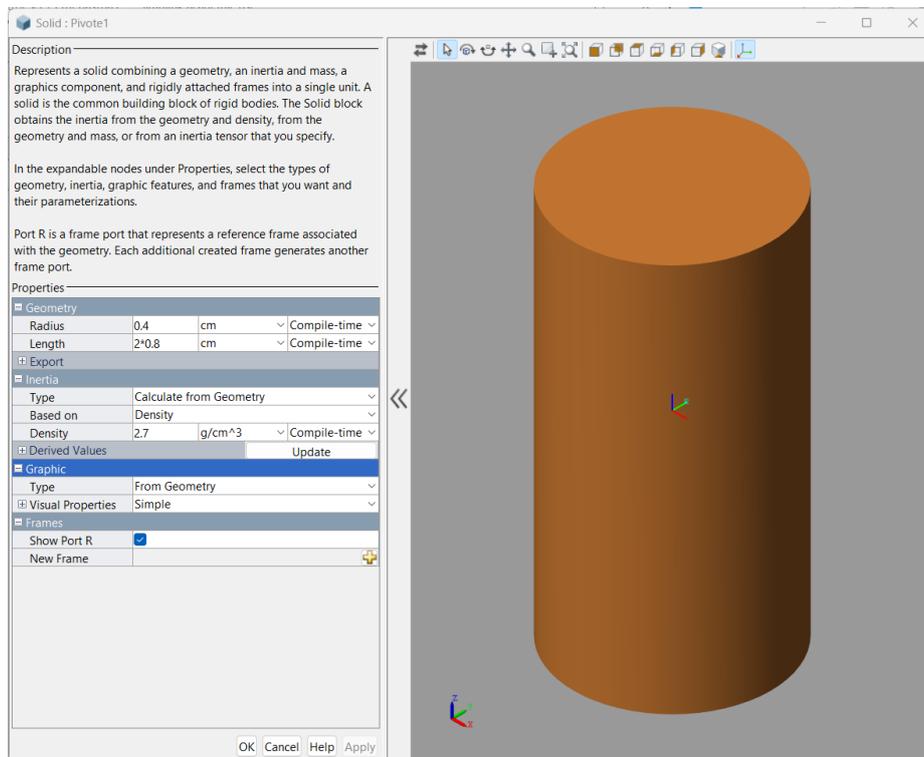


Figura 84: Modelo CAD articulación rotativa

Como se puede ver, la introducción de los parámetros es sencilla y directa. En este caso, se opta por un pivote de 16 mm de alto y un radio de 4 mm.

4.5.2.2 Modelado CAD elementos rígidos cadena serie

Para modelar los enlaces entre articulaciones, se quería dar un aspecto realista tal que tuviera los huecos para encajar los pivotes del subapartado anterior. Para ello, se parte del bloque "Extruded Solid" de "Body Elements". El cuerpo se divide en dos sólidos extruidos distintos: uno con la curva del hueco en el espacio interior y el otro con la curva en el exterior. En las siguientes dos figuras se presentan ambos bloques:

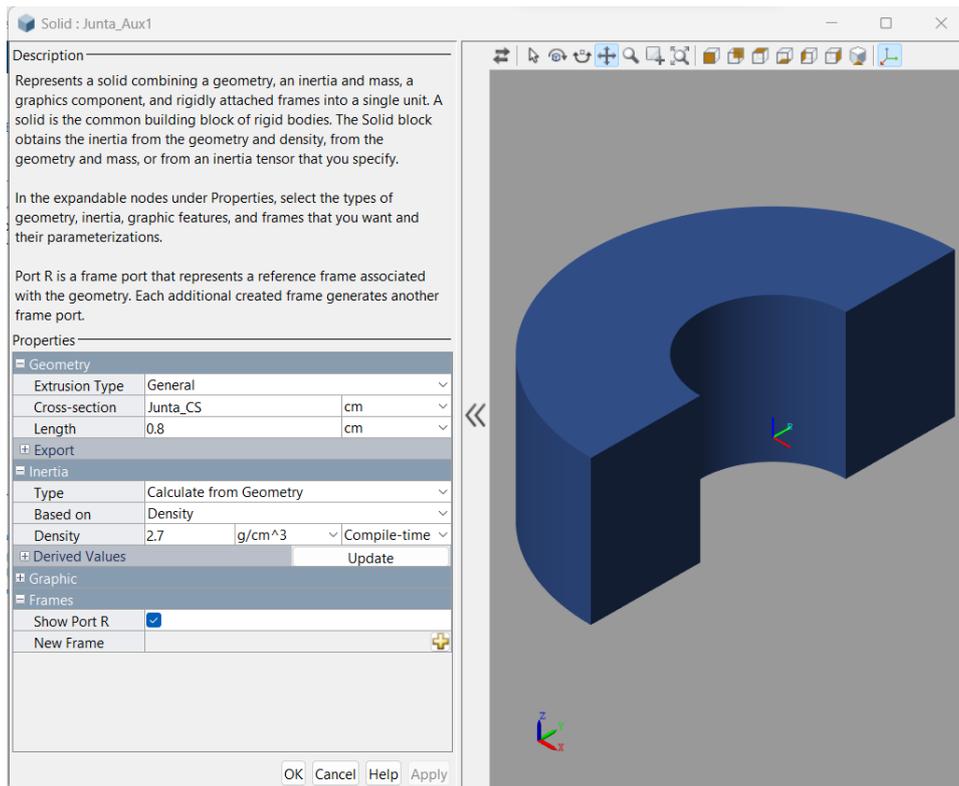


Figura 85: Primer elemento rígido cadena serie

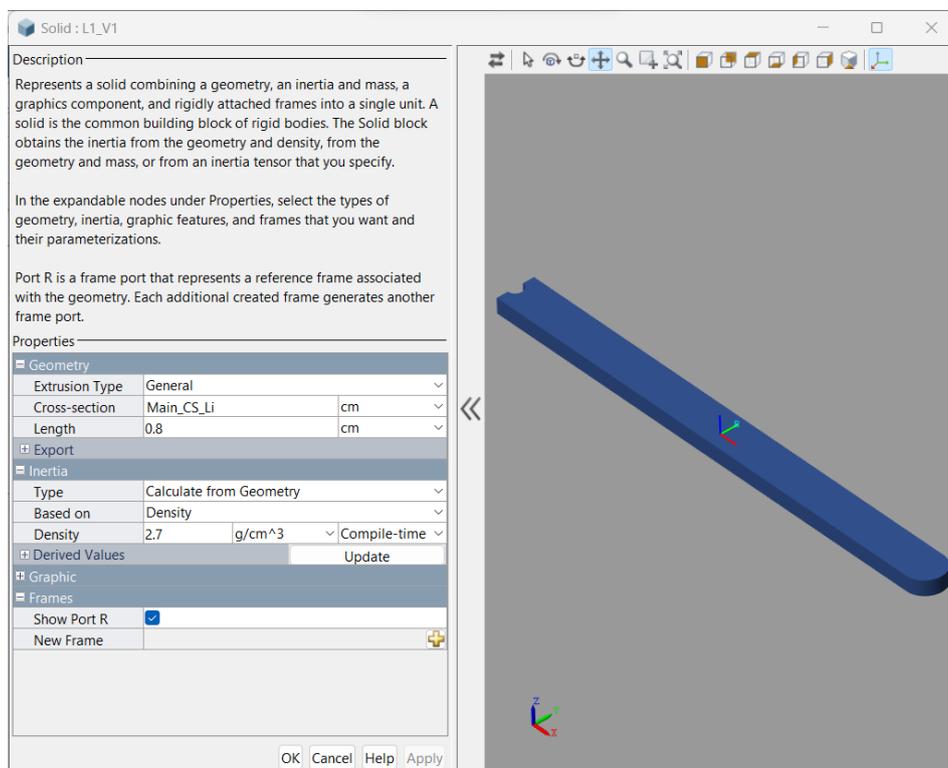


Figura 86: Segundo elemento rígido cadena serie

Las variables “Junta_CS” y “Main_CS_Li” son las matrices necesarias para poder crear formas que no sean regulares, y se declaran dentro de “Propiedades del Modelo”, en el callback

de **InitFcn**, el cual se ejecuta cada vez que se inicia un modelo. A continuación, se presenta el código utilizado:

%Sección transversal Junta_aux:

```
L1= 25; L2=25; L3=25; %Longitud Li
l1 = 25; l2=25; l3=25; %Longitud li
W=2; R=0.4;
Alpha_CS = (pi/2:0.01:3*pi/2)';
Beta_CS= (3*pi/2:-0.01:pi/2)';
Junta_CS= [W/2*cos(Alpha_CS) W/2*sin(Alpha_CS);
R*cos(Beta_CS) R*sin(Beta_CS)];
```

%Sección transversal Li_Vi:

```
Alpha_Li = (-pi/2:0.01:pi/2)';
Beta_Li = (pi/2:-0.01:-pi/2)';
Peg_CS_Li = [L1/2+W/2*cos(Alpha_Li)...
W/2*sin(Alpha_Li)];
Peg_CS_li = [l1/2+W/2*cos(Alpha_Li)...
W/2*sin(Alpha_Li)];
Li_CS_Li = [-L1/2 W/2; -L1/2 + R*cos(Beta_Li)...
R*sin(Beta_Li); -L1/2 -W/2];
Li_CS_li = [-l1/2 W/2; -l1/2 + R*cos(Beta_Li)...
R*sin(Beta_Li); -l1/2 -W/2];
Main_CS_Li = [Peg_CS_Li; Li_CS_Li];
Main_CS_li = [Peg_CS_li; Li_CS_li];
```

Para unir las dos partes y formar un único elemento, se utiliza el bloque Rigid Transform empleado anteriormente, quedando el diagrama de bloques y el resultado final que se muestra en la Figura 87.

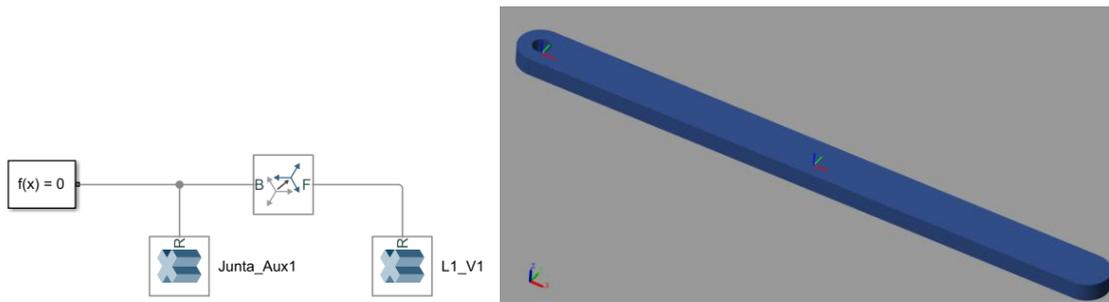


Figura 87: Diagrama de bloques y modelo CAD cuerpo rígido cadenas cinemáticas

4.5.2.3 Modelado CAD plataforma móvil

La plataforma móvil de la que se parte para realizar las pruebas tiene forma de triángulo equilátero. Para ello se usa un sólido de extrusión regular, de 3 lados. Como a la plataforma se le acoplan 3 cadenas cinemáticas, se deben crear 3 sistemas de referencia nuevos además del que está por defecto; uno en cada vértice. La forma final que toma es la mostrada en la Figura 88.

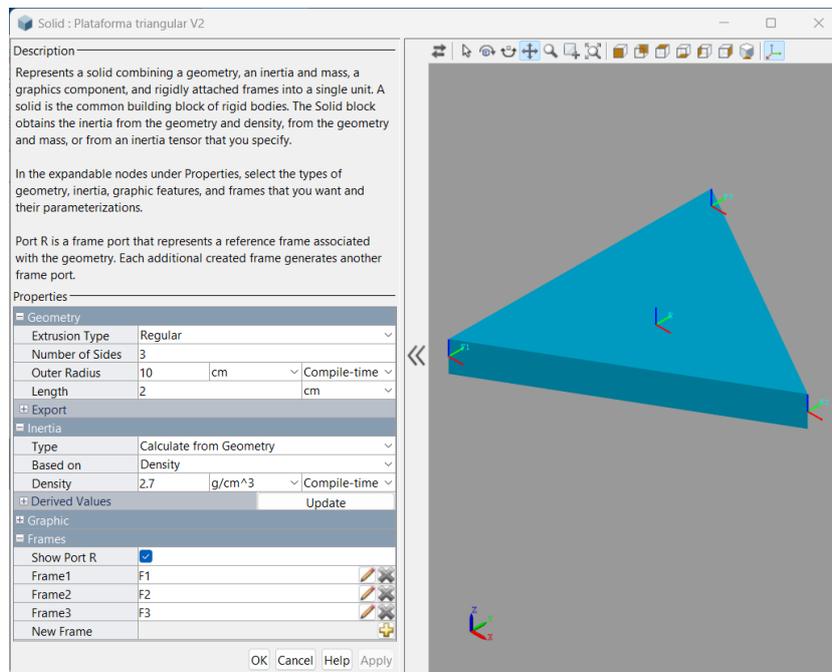


Figura 88: Modelo CAD plataforma móvil triangular

4.5.2.4 Modelado CAD bastidor

Una opción interesante que permite Simscape, es importar archivos CAD creados en otros programas como CATIA, AutoCAD, SolidWorks, etc. mediante el bloque “File Solid”. Para el soporte de todo el robot planar, y teniendo en cuenta que se debe permitir reposicionar las articulaciones activas de manera sencilla, se opta por introducir perfiles en V de aluminio. Se importa un modelo de SolidWorks y se introduce en el bloque citado obteniendo lo siguiente:

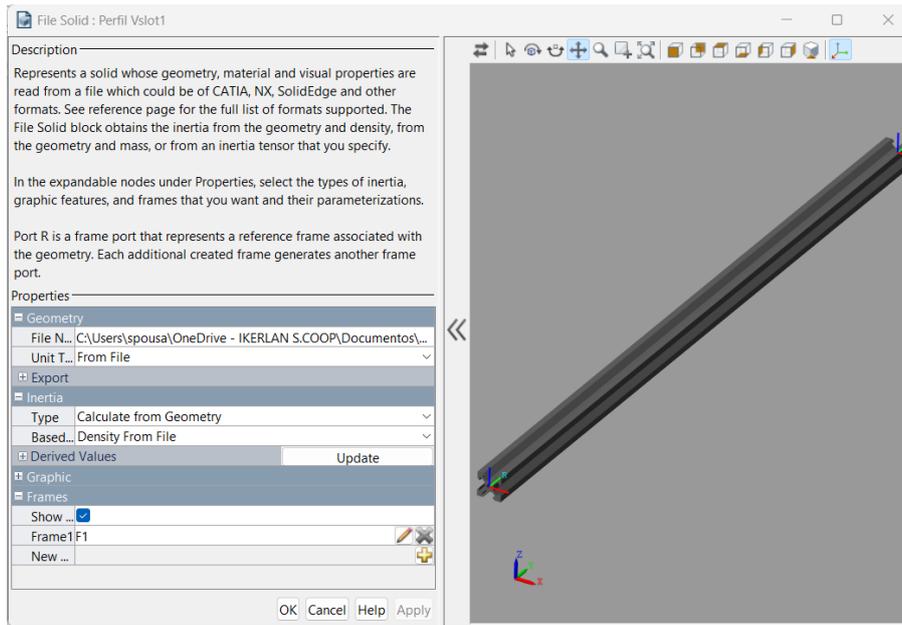


Figura 89: Modelo CAD perfil aluminio en V (bastidor)

4.5.3 Modularidad y modelado de las cadenas cinemáticas

Vistos los principales bloques de Simscape utilizados y los modelos CAD, se procede a conectarlos para poder modelar el robot planar 3RRR. Una de las premisas, es que el banco de pruebas sea reconfigurable, por lo que se crean módulos, de forma que sea sencillo alternar entre diferentes configuraciones. Se podría dividir el modelado en 3 partes diferentes: diseño del sistema antagonista, modelado de las cadenas cinemáticas e implementación del control. Los tres lazos cerrados que forman el robot planar 3RRR son idénticos en cuanto construcción, por lo que opta por crear un módulo que sea una cadena serie.

4.5.3.1 Modelado sistema antagonista músculo-resorte Simscape

Para ello, se parte de la creación del sistema antagonista músculo-resorte, enlazándolos con el sistema neumático y la polea. El resultado de la unión de los bloques se muestra en la Figura 90.

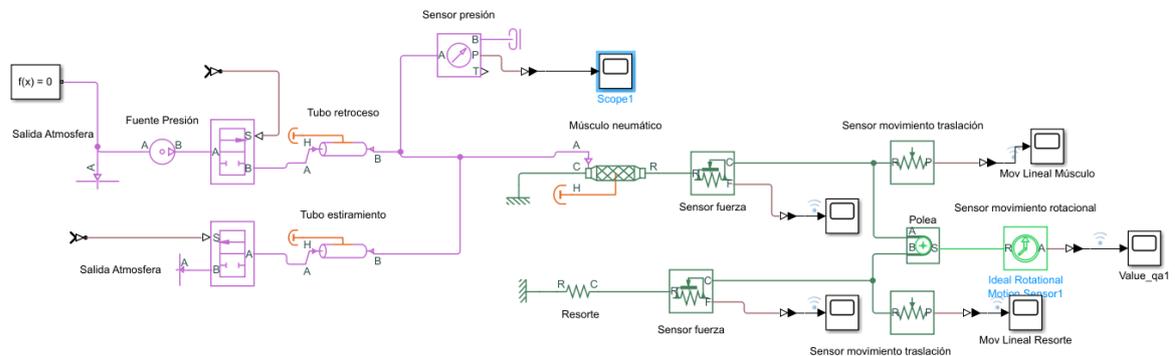


Figura 90: Sistema antagonista músculo-resorte Simscape

4.5.3.2 Modelado cadena cinemática física Simscape

Al par antagonista, se le añaden los elementos sobre los que actúa, que es una de las cadenas cinemáticas del robot, la cual está formada por dos eslabones. Tomando el bloque de “Rigid Transform” y uniendo dos elementos rígidos de igual longitud mediante juntas de rotación, se tiene el modelo de bloques mostrado en la siguiente figura:

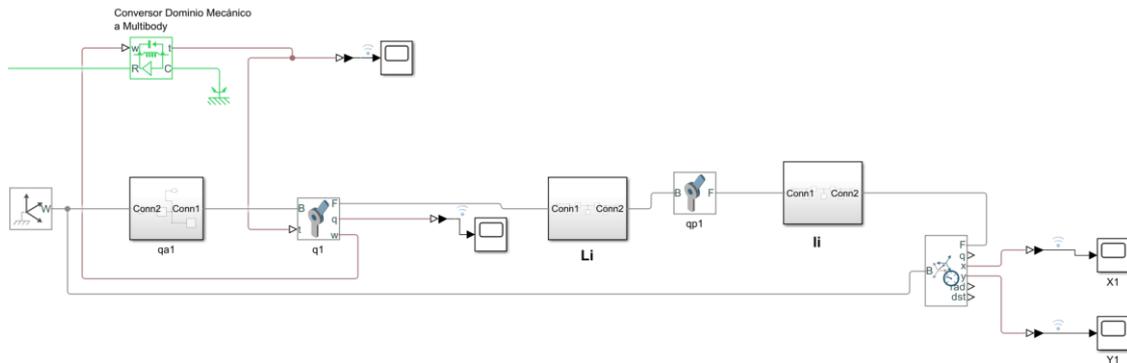


Figura 91: Cadena serie robot planar 3RRR Simscape

La primera articulación es la actuada, de ahí que esté unida al convertor de dominio. De este recibe el par generador por el par antagonista, y le envía la velocidad angular. En el interior de los bloques **Li** y **li**, se encuentra el diagrama de bloques mostrado en la figura 87. El posicionamiento de la articulación activa se lleva a cabo dentro del bloque **qa1**, indicando dentro de un bloque Rigid Transform una traslación de un determinado valor con respecto del sistema de referencia base (ejemplo en la Figura 92).

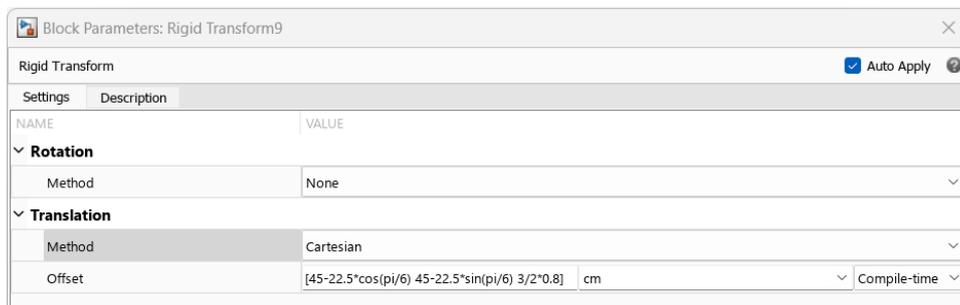


Figura 92: Posicionamiento articulación activa qai mediante bloque Rigid Transform

4.5.3.3 Control implementado en cada cadena serie

El controlador que se implementa es igual para cualquiera de las cadenas. Está basado en un control PID, el cual se muestra en la Figura 93.

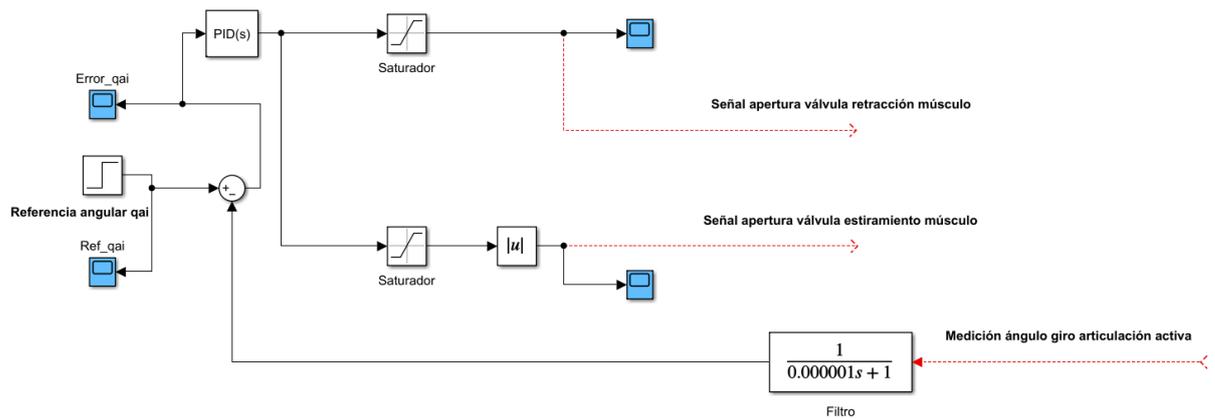


Figura 93: Control PID implementado para cada cadena cinemática

El funcionamiento es simple. La referencia que introduce el usuario es la posición angular deseada para la articulación actuada (en el apartado 4.5.5 se comentará más en detalle) la cual coincide con el valor angular de la polea. Se calcula el error con respecto a la medición del ángulo de la articulación activa y se introduce en el bloque PID de Simulink. La sintonización del PID se realiza con la función de “Tune” que incorpora, la cual propone los parámetros de control de la siguiente figura.

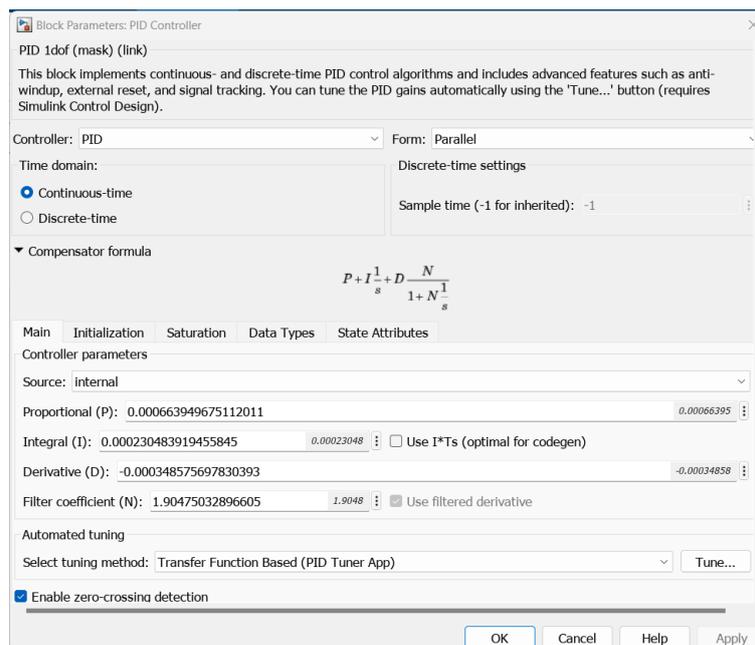


Figura 94: Parámetros controlador PID control una cadena cinemática

La salida del PID puede ser negativa o positiva dependiendo del valor del error, y el rango de señal permitida por la válvula está comprendida entre -1 y 1. Por ello, se emplean dos bloques de saturación, de manera que, si el error positivo se siga contrayendo el músculo permitiendo el paso de aire, pero si el error es negativo por haber superado el ángulo de referencia, se abre la válvula de desalajo del aire. El funcionamiento es similar al de un controlador Bang-Bang.

En cuanto al filtro empleado, se utiliza para romper el lazo. Se debe tener en cuenta que al meter un controlador que trabaja en tiempo continuo, se necesita que la señal de error esté actualizada continuamente. Para evitar que salten constantemente avisos en el programa y hacer

simulaciones que se acerquen a la realidad, se introduce una función de transferencia de primer orden con una constante de tiempo lo suficientemente baja para que no afecte al sistema.

4.5.3.4 Unión de todos los módulos y prueba funcionamiento sistema antagonista

Si se conectan los 3 módulos comentados anteriormente y se compilan, se obtiene la representación de la Figura 95.

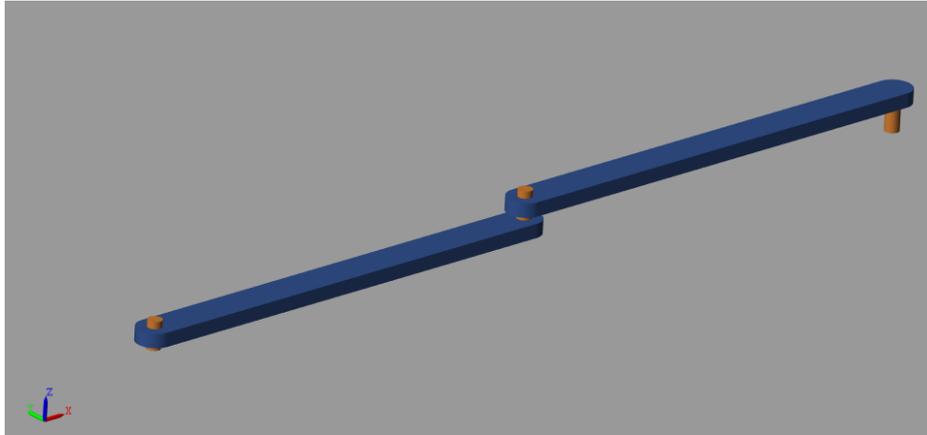


Figura 95: Representación 3D en Simscape de una cadena cinemática

Para la realización de la prueba, se considera que la consigna angular de entrada es una función escalón descendente, la cual tiene inicialmente un valor de 10° , y a los 35 segundos tiene un valor nulo. El porqué de esta prueba, es analizar que el mecanismo funciona correctamente y el muelle hace su función. Además, la presión máxima suministrada al músculo se reduce a 2 bar, al no necesitar mover una carga pesada. En la Figura 96 se puede comprobar como el movimiento es correcto, al posicionarse inicialmente la articulación en 10 grados hasta el segundo 35, instante en el cual el músculo vuelve a su posición inicial por medio del resorte.

También se puede ver la histéresis presente al tener tiempos de contracción y alargamientos diferentes. En la Figura 97 se tiene la evolución del error durante la simulación.

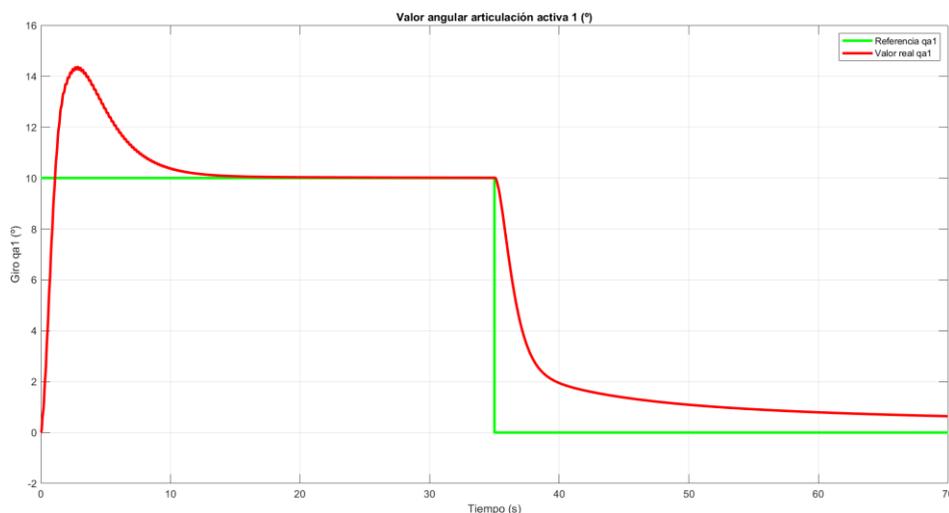


Figura 96: Gráfica comparación qqi con referencia funcionamiento par antagonista

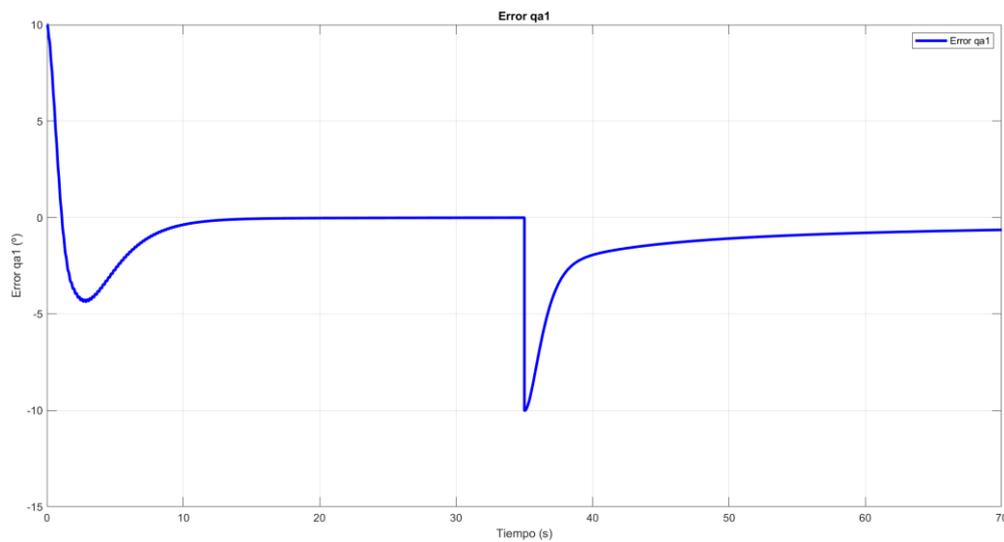


Figura 97: Error q1 prueba funcionamiento par antagonista

4.6 Modelo final robot planar 3RRR

Si se realiza el conexionado entre las 3 cadenas cinemáticas, la plataforma móvil y el bastidor, se obtiene el modelo final del robot planar 3RRR en simulación. Se debe tener en cuenta que, entre cada una de las cadenas, existen 120° de desfase en la articulación activa. En la figura 98 y en la 99 se muestran dos ejemplos de posibles configuraciones de estudio.

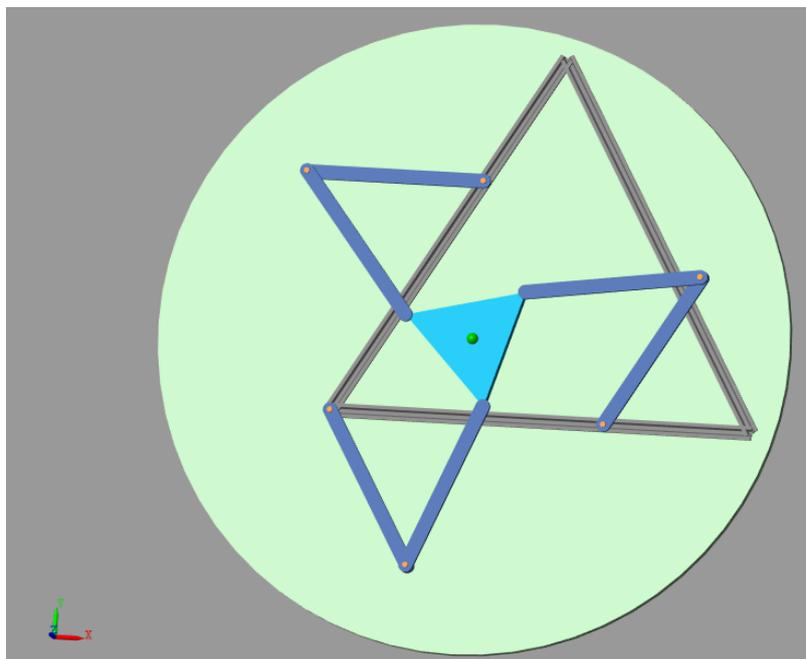


Figura 98: Modelo robot planar 3RRR con bastidor triangular

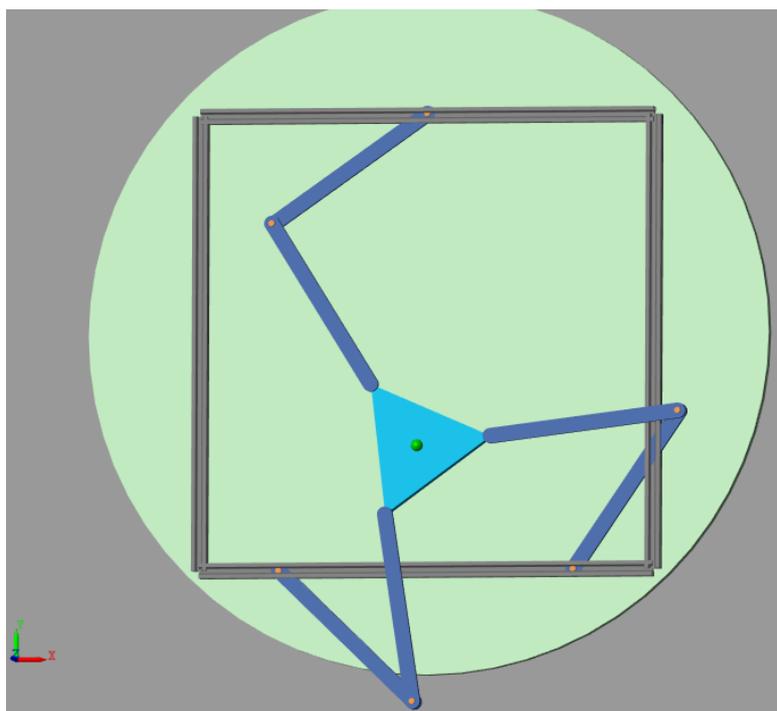


Figura 99: Modelo robot planar 3RRR con bastidor cuadrado

En el apartado 5 se realizarán algunas pruebas sobre el robot y se analizarán los resultados obtenidos.

4.6.1 Reconfigurabilidad del robot planar 3RRR

Una de las premisas que se tenía con este proyecto, era dotarlo de varios parámetros de configuración para poder obtener arquitecturas diferentes y realizar la mayor variedad de pruebas posible. En este subapartado se comentarán las principales opciones.

4.6.1.1 Reconfiguración del bastidor

El bastidor, conforma la base sobre la cual se ajustan los módulos de los pares antagonistas. Su forma, facilita que se puedan mover por las guías del perfil en V, independientemente de la posición que adquiera. En este caso, se presentan dos ejemplos de posibles formas que puede adquirir el bastidor. En la Figura 100 se muestra un diagrama de Simscape para una configuración cuadrada y una triangular, y en la Figura 101 el resultado de la compilación de estos bloques.

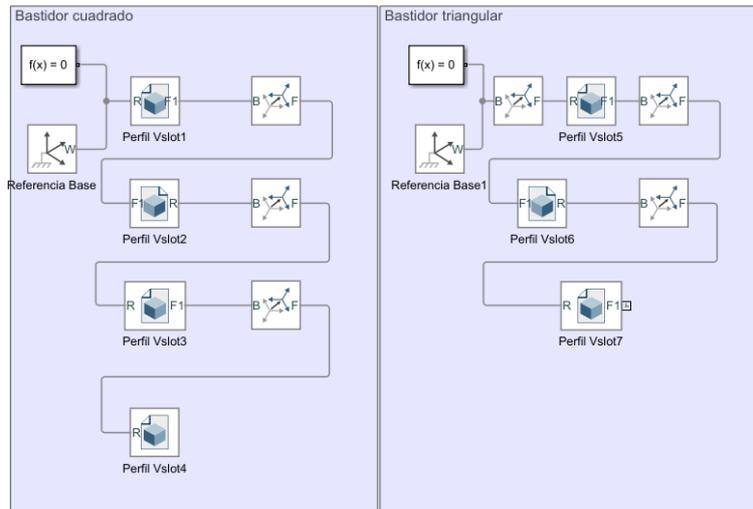


Figura 100: Diagrama bloques reconfiguración forma bastidor

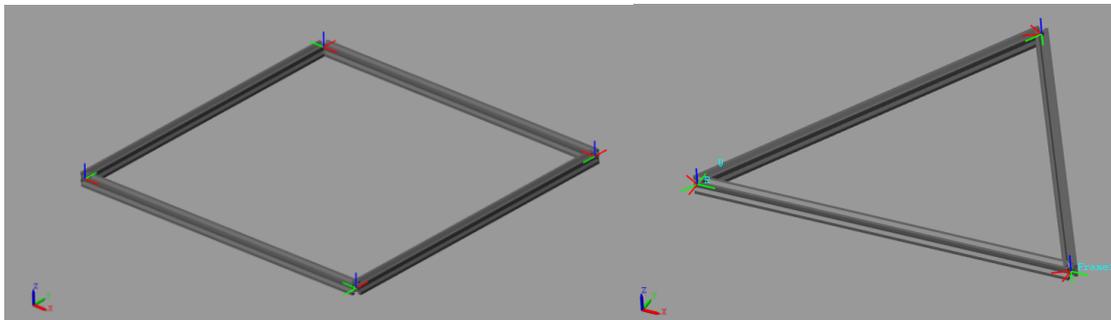


Figura 101: Configuración cuadrada(izda.) y triangular(dcha.) bastidor perfil V aluminio

4.6.1.2 Reconfiguración sistema antagonista

El par antagonista resorte-músculo presenta varias vías de reconfiguración. La primera, relacionada con el apartado anterior: se puede ajustar la posición de la articulación activa modificando el valor del bloque de rigid transform (figura 92) que se encuentra dentro de cada subsistema **qai**. Cabe recordar que de modificarse cualquier elemento en el modelo de Simscape, es necesario actualizar los valores dentro de los códigos de Matlab de cara a conseguir unos valores correctos de las consignas angulares.

La orientación inicial de las cadenas serie se puede modificar en el primer bloque de “Revolute Joint” de cada cadena, el cual se corresponde con la articulación activa. Por defecto, la orientación que se le da inicialmente a las diferentes cadenas es:

- $Q_{a10}=300^\circ$
- $Q_{a20}=60^\circ$
- $Q_{a30}=180^\circ$

La figura siguiente muestra el menú de configuración de la articulación rotativa.

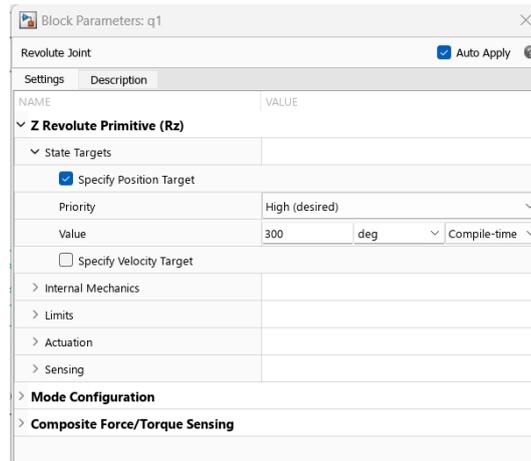


Figura 102: Menú configuración bloque articulación rotativa Simscape

Debido al uso de un resorte como el elemento antagonista del músculo, y no de otro PAM, el sistema solo puede rotar de forma activa en un sentido; en el caso de este proyecto, se ha planteado para que la rotación activa sea en sentido antihorario. Cabe recordar que el usuario obtiene a partir del problema de posición inverso 3 valores articulares absolutos. En el modelo de Simscape, las consignas son valores angulares relativos, que se obtienen restando la posición deseada de la articulación activa y la posición absoluta que tiene inicialmente. Si el valor relativo es negativo, se debe preposicionar el resorte para que el nuevo ángulo relativo que tenga que barrer la articulación sea como mínimo 0. Normalmente, lo más sencillo es comprimir el resorte provocando un pretensionado del músculo el cual no puede superar el 4% de su longitud nominal. La ecuación 43 muestra cuánto hay que acortar un resorte para poder cambiar el signo del valor relativo. La variación del ángulo que aparece se refiere al valor absoluto de la consigna angular relativa y R al radio de la puela. En el apartado de resultados, se puede ver un ejemplo práctico de esta utilidad.

$$\Delta L = \frac{2\pi\Delta\theta * R}{360} \quad (43)$$

Tratando el tema del par antagonista, también se ha desarrollado un par músculo-músculo, el cual se puede intercambiar fácilmente por el par músculo-resorte (figura 103).

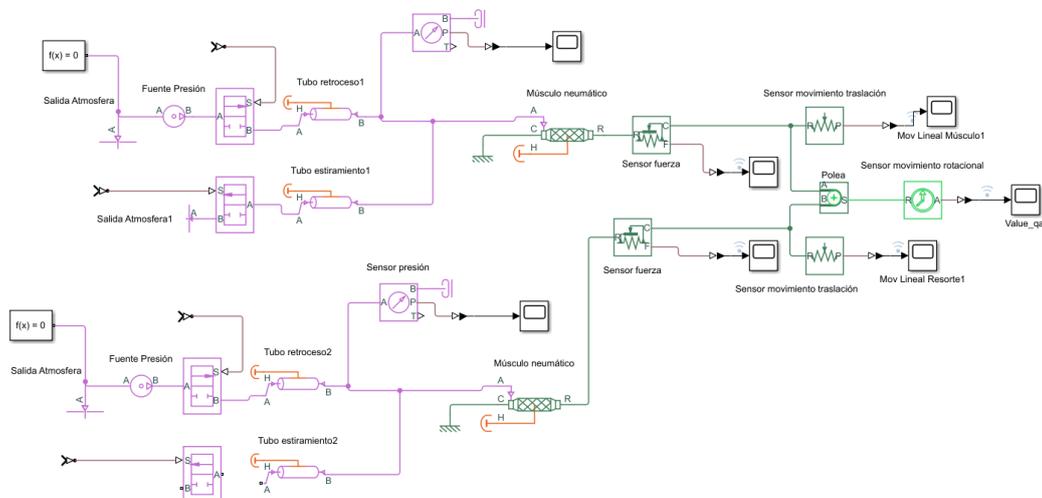


Figura 103: Modelo bloques par antagonista músculo-músculo

4.6.1.3 Reconfiguración cadenas cinemáticas

Otro de los puntos de reconfiguración se encuentra en los elementos que forman las cadenas serie. A nivel CAD de Simscape, se han creado plataformas móviles y cuerpos rígidos de diferentes tamaños y materiales, como se muestra en la figura 104:

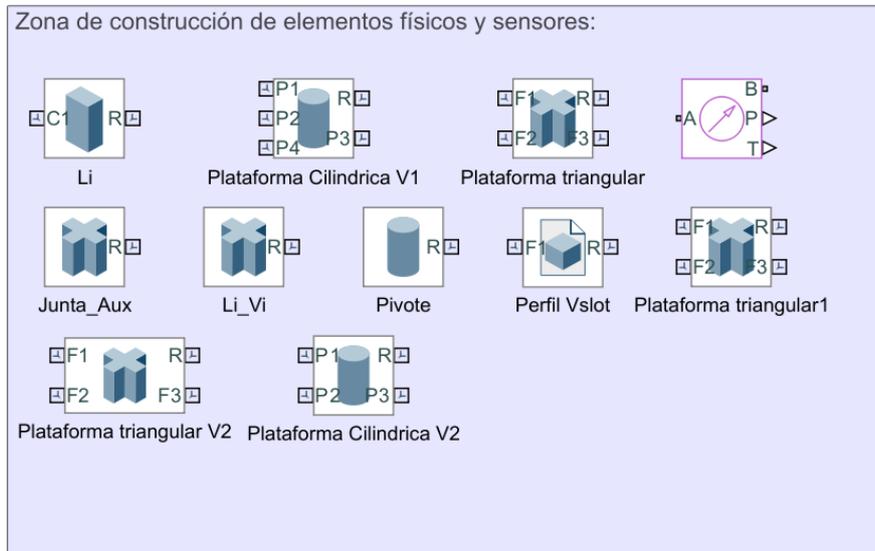


Figura 104: Diferentes modelos de cuerpos rígidos y plataformas móviles

Estos cambios en las características físicas de los cuerpos rígidos, se puede hacer de forma manual desde los bloques de Simscape, o bien desde la ventana de “Model Properties” comentando y descomentando el código del callback “InitFcn”. Además de diferentes longitudes para los elementos de unión entre articulaciones de las cadenas cinemáticas, se tienen diferentes radios de polea según se necesite y las 3 densidades de materiales comentadas en capítulos anteriores.

%% Radio polea (cm):

```
R_Polea_V1=2.86;
R_Polea_V2=1.72; %200° y 6cm máxima contracción longitudinal
R_Polea_V3=1.59; %360° y 10 cm de contracción longitudinal
R_Polea_V4=0.8; %360° y 5 cm de contracción longitudinal
R_Polea_V5=1.06; %270° y 5 cm de contracción longitudinal
R_Polea_V6=3.1831; %90° y 5 cm de contracción longitudinal
```

%% Densidades de materiales (g/cm^3):

```
Rho_Al=2.7; %Aluminio
Rho_Mad=0.6; %Madera
Rho_Plast=1; %Plástico
```

4.6.2 Control Implementado

A nivel proyecto y del robot planar en su conjunto, se podría implementar un control general para todo el proceso, pero sería algo muy complejo y costoso computacionalmente. Por

ello se opta por un control local de cada una de las cadenas cinemáticas que permita posicionar correctamente la plataforma móvil. La consigna con la que se trabaja es la posición angular que debe tomar la articulación activa para poder posicionar el elemento central en la posición correcta. Para obtenerla, se hace uso de la cinemática inversa, a la cual se le pasa la posición deseada, y se obtienen las variables articulares de cada una de articulaciones activas. El controlador, debe regular la entrada y salida del aire del músculo neumático, de forma que se consiga la posición deseada. La estructura del control en cada lazo está basada en el uso de un PID, como se explicó anteriormente en el apartado 4.5.3.3.

Al unir las 3 cadenas, hay que actualizar los parámetros de control, dado que el sistema ha cambiado. La nueva sintonización de los controladores es la mostrada en la figura 105.

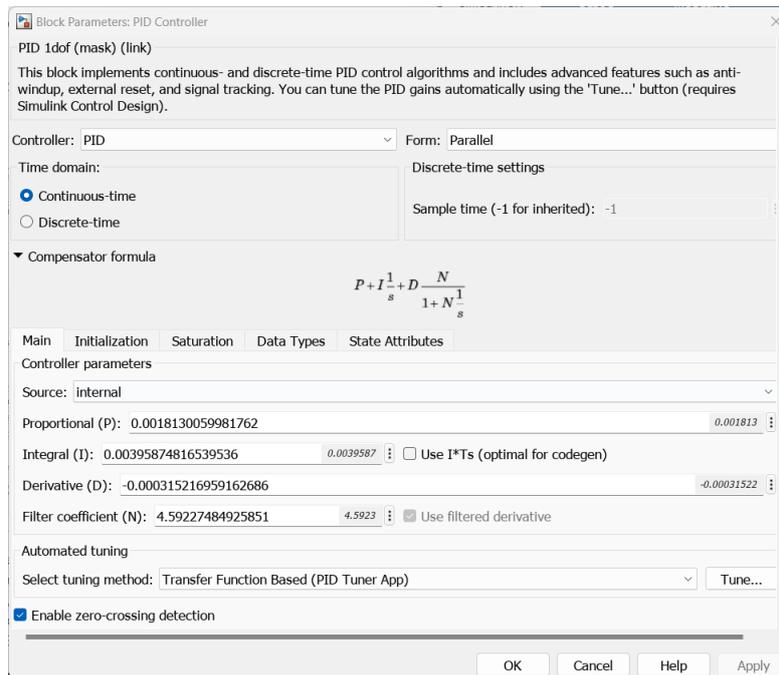


Figura 105: Sintonización controlador PID para cada cadena robot planar 3RRR

CAPITULO 5

RESULTADOS Y ANÁLISIS

5 Resultados y análisis

5.1 Introducción.

Tras explicar los pasos seguidos para el correcto desarrollo del robot, se procede a mostrar los resultados obtenidos. Para ello, se parte del modelo mostrado en la Figura 98. Las consideraciones iniciales, comunes en todas las pruebas, son:

- Longitud de los eslabones de las cadenas del robot de 250 mm.
- Radio polea: 2,86 cm.
- Composición cuerpos rígidos: aluminio.
- Posición de fijación de articulación activa:
 - $A1 = [45 - 22.5 \cdot \cos(\pi/6) \quad 45 - 22.5 \cdot \sin(\pi/6) \quad 2 \cdot 3/2 \cdot 0.8]$
 - $A2 = [45 + 22.5 \cdot \cos(\pi/6) \quad 45 - 22.5 \cdot \sin(\pi/6) \quad 3 \cdot 2/2 \cdot 0.8]$
 - $A3 = [45 \quad 45 + 22.5 \cdot 2 \cdot 3/2 \cdot 0.8]$
- Plataforma móvil con forma de triángulo equilátero insertada en una circunferencia de 10 cm de radio u 2 cm de grosor.
- Longitud músculos: 500 mm
- Presión diferencial máxima de operación: 5 bar
- Longitud tubo neumático: 5 m.
- Orientación inicial enlace articulación activa para L1, L2 y L3: 300°, 60° y 180° respectivamente.

Para estos datos, el espacio de trabajo disponible (obtenido mediante el código mostrado en el anterior apartado) es el que se muestra en la figura 106.

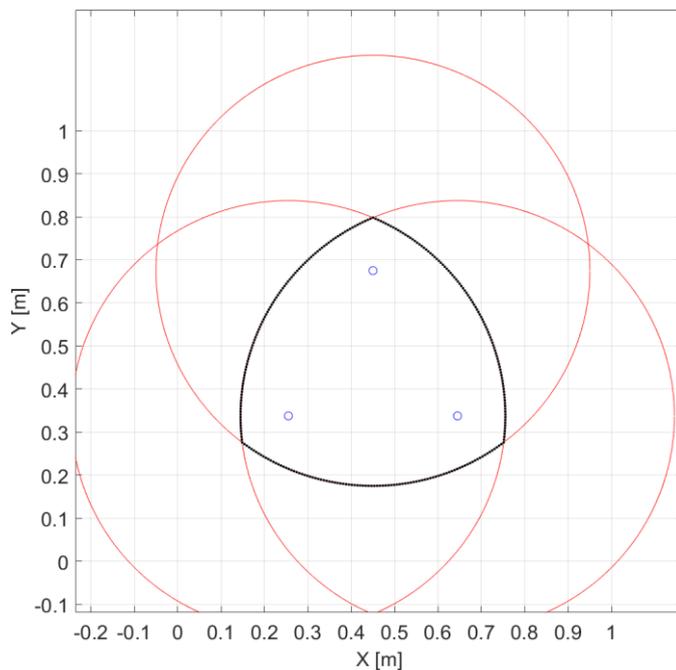


Figura 106: Espacio de trabajo pruebas experimentales

5.2 Resultados y Análisis

Para mostrar el funcionamiento del robot, se harán 2 tipos de pruebas: posicionamiento punto a punto, y un seguimiento de trayectoria.

5.2.1 Posicionamiento en $x=0,45$; $y=0,45$

Para unas coordenadas del TCP dadas, se necesita obtener el valor de referencia de las articulaciones activas que permita al robot adquirir esa configuración. Para ello, se introduce en el código “Main_Script” las coordenadas deseadas del elemento terminal, y se ejecuta, llamando así a la función de la cinemática inversa del robot, la cual devuelve las consignas angulares absolutas en grados y se guardan en el Workspace de Matlab. En este caso, los valores devueltos son:

$$\mathbf{qa1_ang}=-54,4612^\circ \quad \mathbf{qa2_ang}=65,5388^\circ \quad \mathbf{qa3_ang}=-174,4612^\circ$$

Dichas variables, son usadas directamente por el modelo de Simscape para calcular el ángulo que debe girar cada articulación para alcanzar esos valores. Entonces, las ecuaciones para el cálculo de la consigna real, y los valores obtenidos para este caso son:

$$qa1_{ref} = (360^\circ - |qa1_{ang}|) - 300^\circ = 5.5388^\circ \quad (44)$$

$$qa2_{ref} = qa2_{ang} - 60^\circ = 5.5388^\circ \quad (45)$$

$$qa3_{ref} = (360^\circ - |qa3_{ang}|) - 180^\circ = 5.5388^\circ \quad (46)$$

Tras lograr las consignas, se puede ya compilar y ejecutar el modelo de Simscape, obteniendo el siguiente posicionamiento desde un punto de vista gráfico:

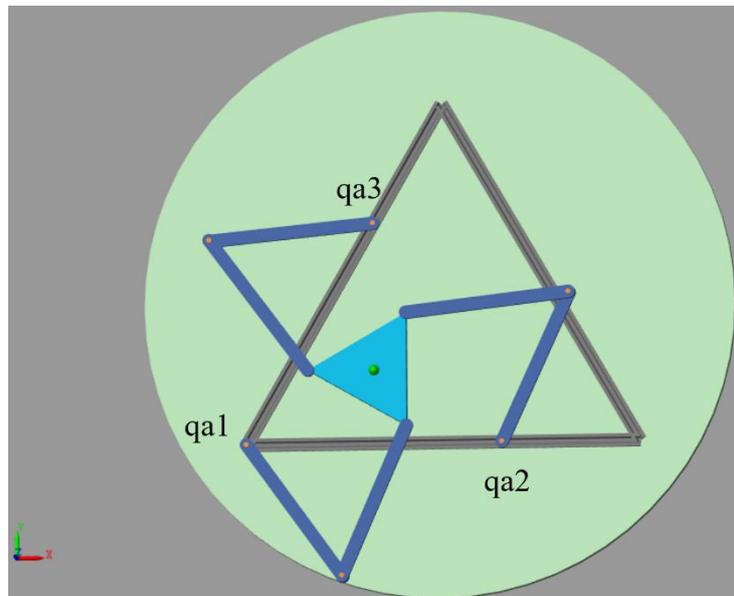


Figura 107: Resultado gráfico posicionamiento robot $x=0,45$ $y=0,45$

El modelo de bloques presenta varios sensores que se encargan de recoger la mayor información posible para ser analizada y poder establecer relaciones entre las distintas variables. En las Figuras 108, 109 y 110 se tiene el valor angular relativo de cada articulación, el cual se ve que es $5,5388^\circ$ en el estacionario, coincidiendo con el valor de referencia dado.

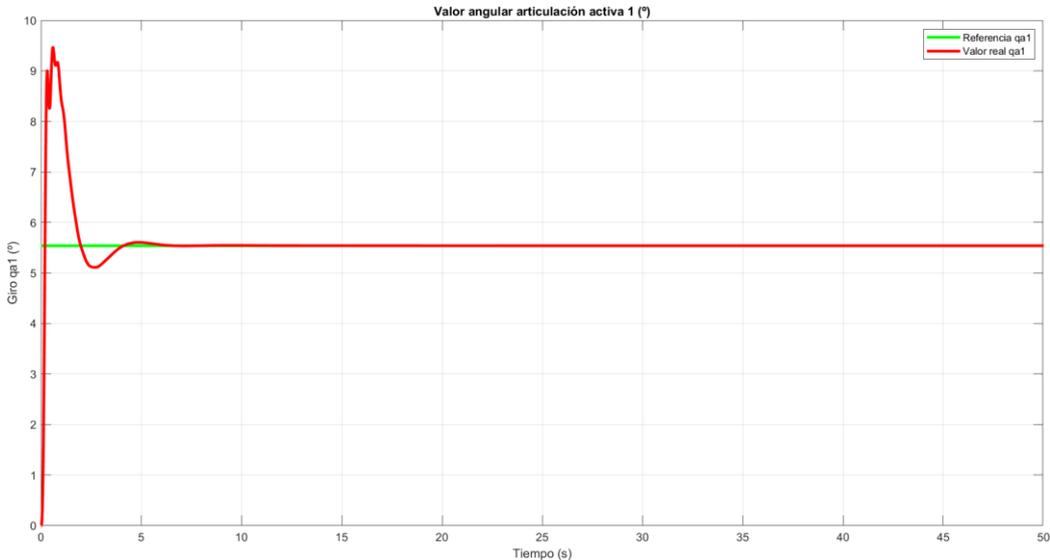


Figura 108: Gráfica qa1 vs qa1_ref: $x=0,45$ y $=0,45$

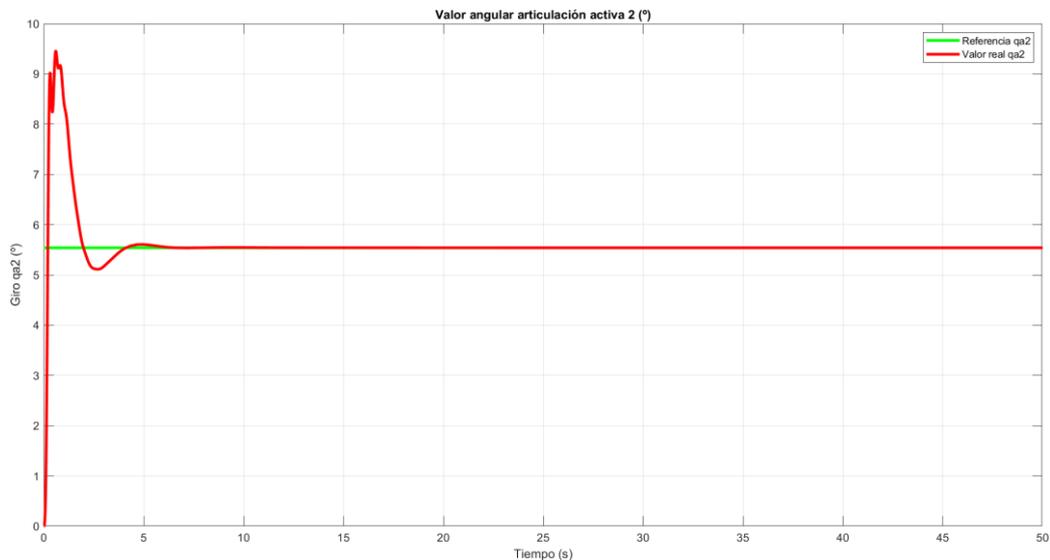


Figura 109: Gráfica qa2 vs qa2_ref: $x=0,45$ y $=0,45$

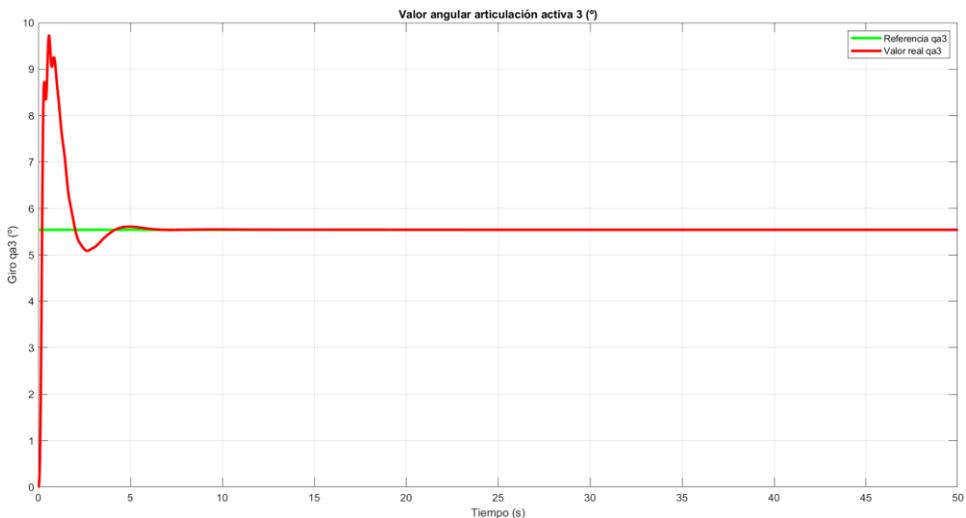


Figura 110: Gráfica $qa3$ vs $qa3_{ref}$: $x=0,45$ y $y=0,45$

Siendo el error nulo en el plano articular, se debería posicionar correctamente el TCP en el espacio, hecho que se comprueba en las Figuras 111 y 112. Tanto el valor en X como el valor en Y, es 45 cm, por lo que se concluye que la prueba ha sido satisfactoria.

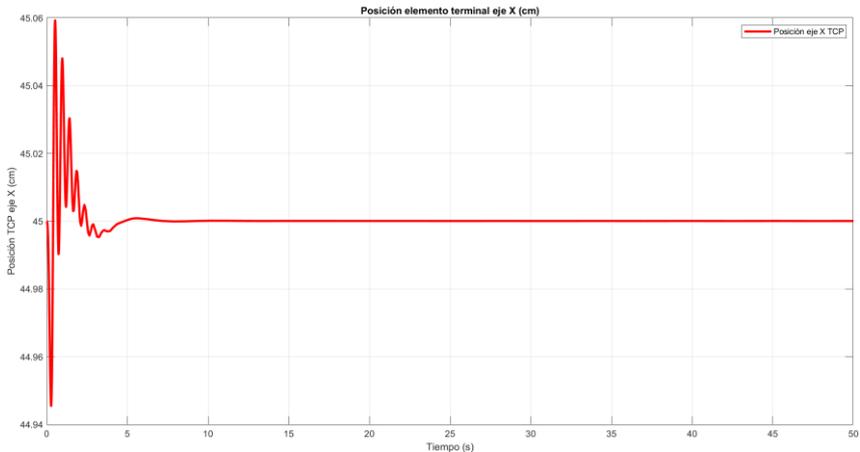


Figura 111: Gráfica $X(t)$: $x=0,45$ y $y=0,45$

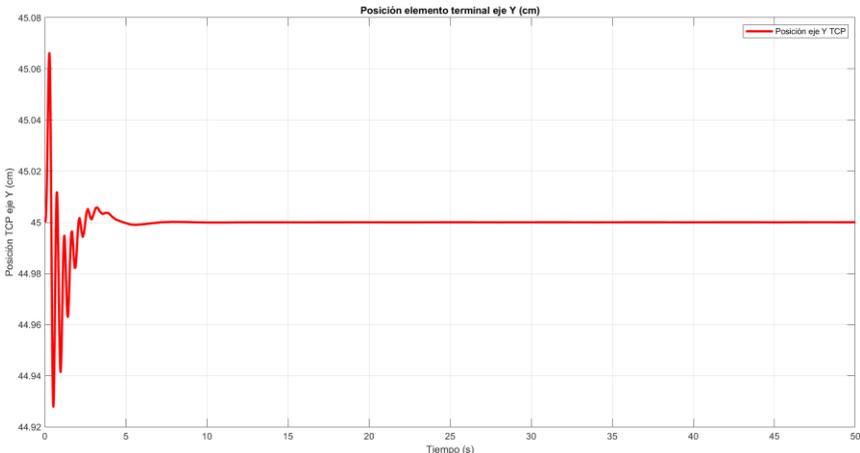


Figura 112: Gráfica $Y(t)$: $x=0,45$ y $y=0,45$

5.2.2 Posicionamiento en $x=0,48$; $y=0,48$: Caso de preposicionamiento del resorte

Igual que en el caso anterior, en primer lugar, se introduce la posición de la plataforma móvil deseada en el “Main_Script”, obteniendo las siguientes consignas articulares:

$$qa1_{ang}=-44,382^\circ \quad qa2_{ang}=57,4605^\circ \quad qa3_{ang}=-175,2674^\circ$$

Si se pasan estas variables angulares absolutas a relativas en cuanto a las posiciones iniciales de las articulaciones activas, se tiene la consigna que hay que introducir en el modelo del robot planar.

$$qa1_{ref} = (360^\circ - |qa1_{ang}|) - 300^\circ = 15.618^\circ \quad (47)$$

$$qa2_{ref} = qa2_{ang} - 60^\circ = -2.5395^\circ \quad (48)$$

$$qa3_{ref} = (360^\circ - |qa3_{ang}|) - 180^\circ = 4.7326^\circ \quad (49)$$

Se puede ver como en la ecuación 48, la cual está referida a la segunda articulación, tiene un valor negativo. Si se compila y ejecuta el modelo con estos valores de referencia, aparece un error en el posicionamiento del elemento terminal (como se puede ver en la figura 113).

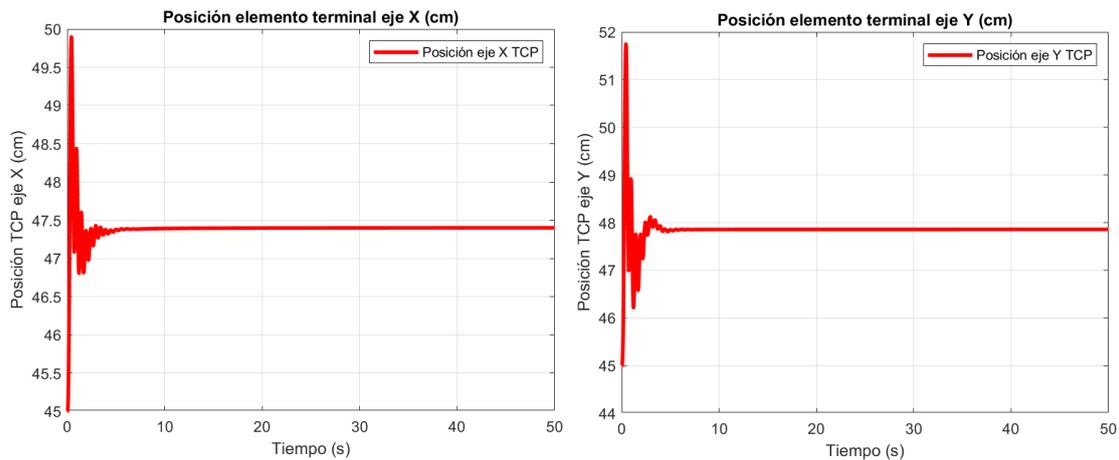


Figura 113: Gráficas posición TCP. Prueba $x=0,48$ $y=0,48$ (Sin ajuste de resorte)

La causa de esto es que el músculo solo permite el movimiento activo en un sentido y el resorte por sí mismo no puede pretensar el músculo para avanzar hacia el lado contrario, provocando un error en la articulación 2 como se muestra en la Figura 114. El resto de las articulaciones, se orientan de manera precisa y sin error.

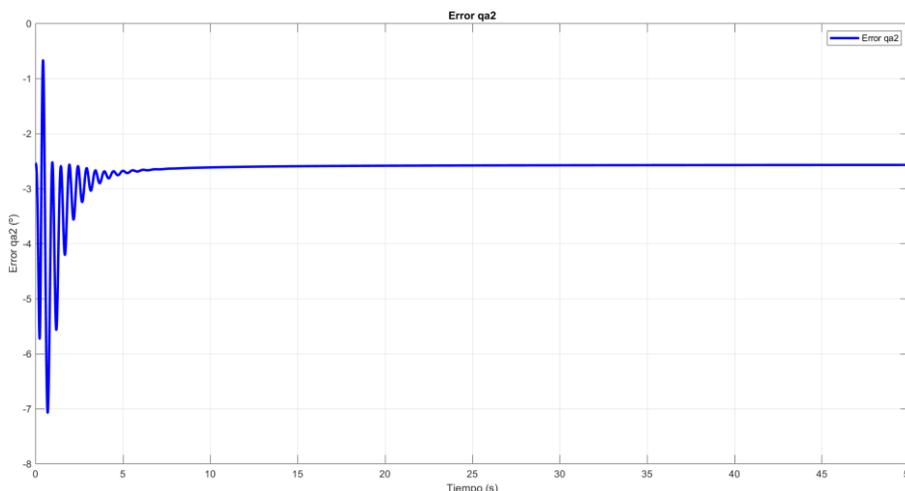


Figura 114: Error qa2 prueba $x=0,48$ $y=0,48$ (Sin ajuste de resorte)

Como se comentó en el apartado 4.6.1.2, en estos casos en los cuales se presenta una referencia angular negativa, se debe adaptar el resorte, de forma que la articulación activa, esté desviada con respecto a su posición de reposo. En el caso de la articulación 2, su valor absoluto angular en reposo es 60° , y se desea alcanzar como mínimo los $57,46^\circ$. Por lo tanto, por medio de la ecuación 43, se obtiene el valor longitudinal que el resorte debe comprimirse manualmente para que el sistema funcione correctamente.

$$\Delta L = \frac{2\pi\Delta\theta * R}{360} = \frac{2\pi * 2.5395 * 0,0286}{360} = -0.0012808 \text{ m} \quad (50)$$

Este valor se introduce dentro del bloque de resorte de la segunda cadena cinemática como se muestra en la Figura 115:



Figura 115: Modificación deformación inicial del resorte ($X=0,48$ $Y=0,48$)

Se compila y se ejecuta el modelo, y ahora se aprecia como el TCP se posiciona correctamente en el punto buscado (Figura 116).

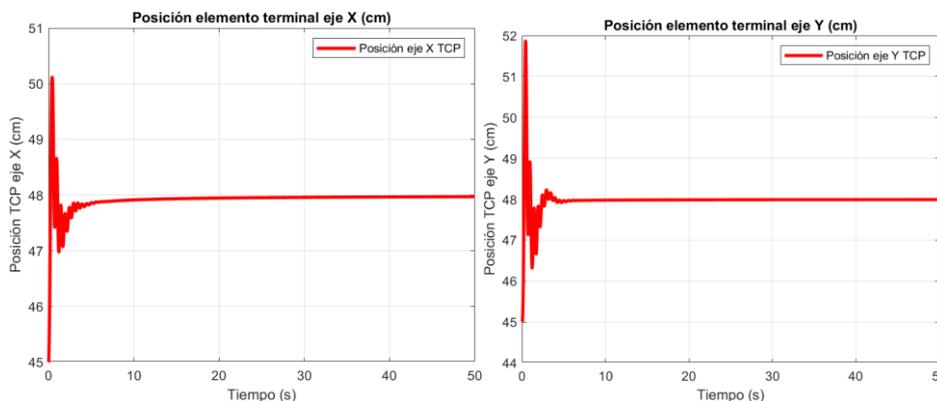


Figura 116: Gráficas posición TCP. Prueba $x=0,48$ $y=0,48$ (Con ajuste de resorte)

A diferencia de antes, el error tiende a hacerse nulo en el posicionamiento angular de la segunda articulación activa (Figura 117).

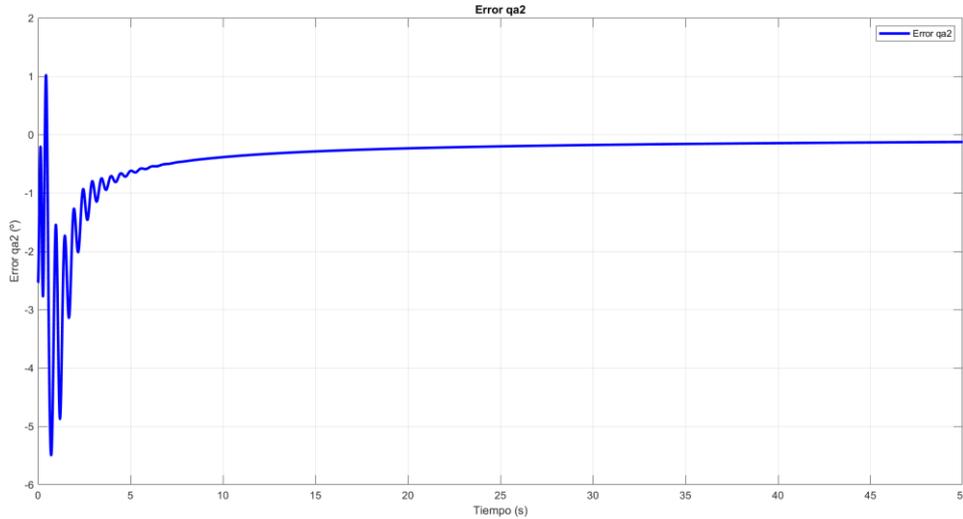


Figura 117: Error qa2 prueba $x=0,48$ $y=0,48$ (Con ajuste de resorte)

Como se puede ver, la manipulación previa del resorte permite alcanzar posiciones nuevas que de otra forma no se podrían y permite abarcar zonas del espacio de trabajo de forma más precisa.

5.2.3 Posicionamiento en $x=0,5$; $y=0,5$

Se introduce la posición de la plataforma móvil deseada en el “Main_Script”, obteniendo las siguientes consignas articulares:

$$\mathbf{qa1_ang=-38,0526^\circ \quad qa2_ang=53,0617^\circ \quad qa3_ang=-174,599^\circ}$$

Si se pasan estas variables angulares absolutas a relativas en cuanto a las posiciones iniciales de las articulaciones activas, se tiene la consigna que hay que introducir en el modelo del robot planar.

$$qa1_{ref} = (360^\circ - |qa1_{ang}|) - 300^\circ = 21,947^\circ \quad (51)$$

$$qa2_{ref} = qa2_{ang} - 60^\circ = -6,9383^\circ \quad (52)$$

$$qa3_{ref} = (360^\circ - |qa3_{ang}|) - 180^\circ = 5,401^\circ \quad (53)$$

De nuevo, la consigna de qa2 es negativa, por lo que se necesita ajustar el par antagonista.

$$\Delta L = \frac{2\pi\Delta\theta * R}{360} = \frac{2\pi * 6,9383 * 0,0286}{360} = -0.004974 \text{ m} \quad (54)$$

En la figura 118, se muestra como el posicionamiento en X e Y del centro de la plataforma móvil, se produce de manera correcta en el eje X, pero aparece un pequeño error en Y. Sin

embargo, durante la simulación debido a la compresión del resorte, se producen varias oscilaciones en el inicio que podrían causar problemas en posiciones más alejadas.

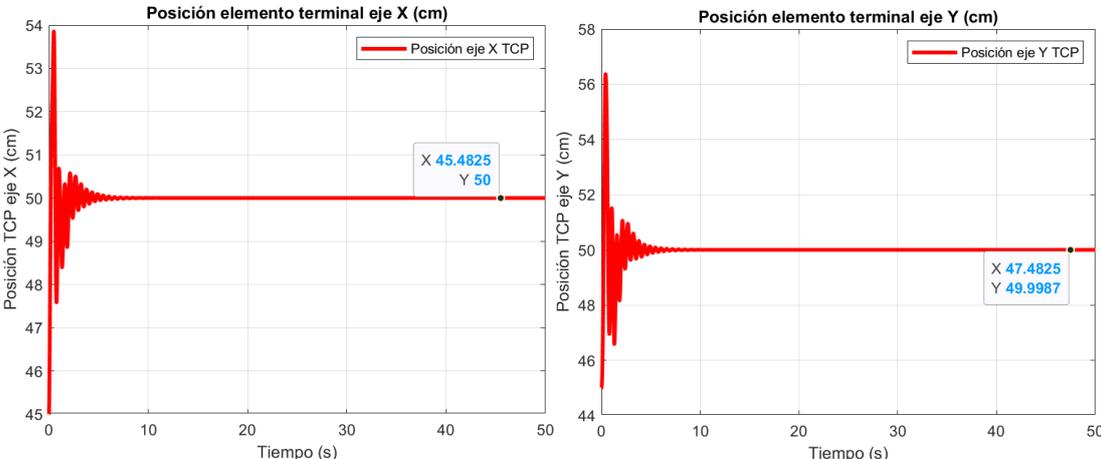


Figura 118: Gráficas posición TCP. Prueba $x=0,5$ $y=0,5$

En la siguiente figura se puede ver el posicionamiento tras la simulación desde el punto de vista gráfico:

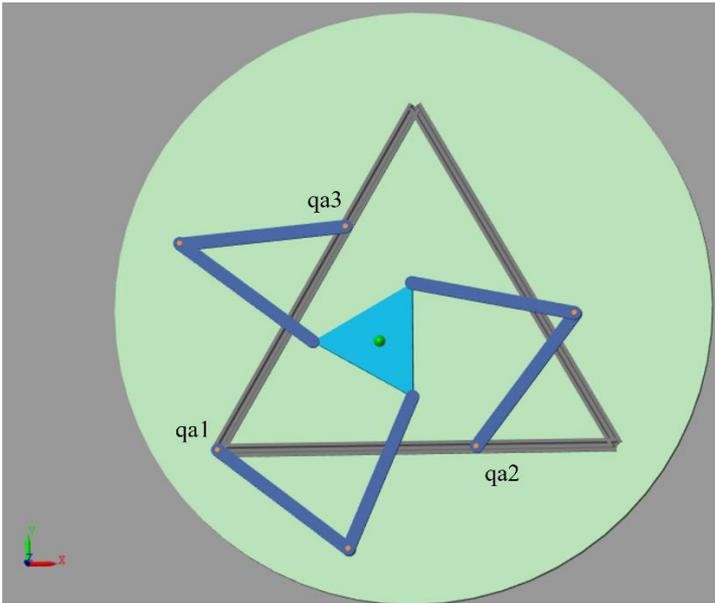


Figura 119: Resultado gráfico posicionamiento robot $x=0,5$ $y=0,5$

En las Figuras 120, 121 y 122 se muestra el error de posicionamiento de las articulaciones activas el cual es prácticamente nulo en todas.

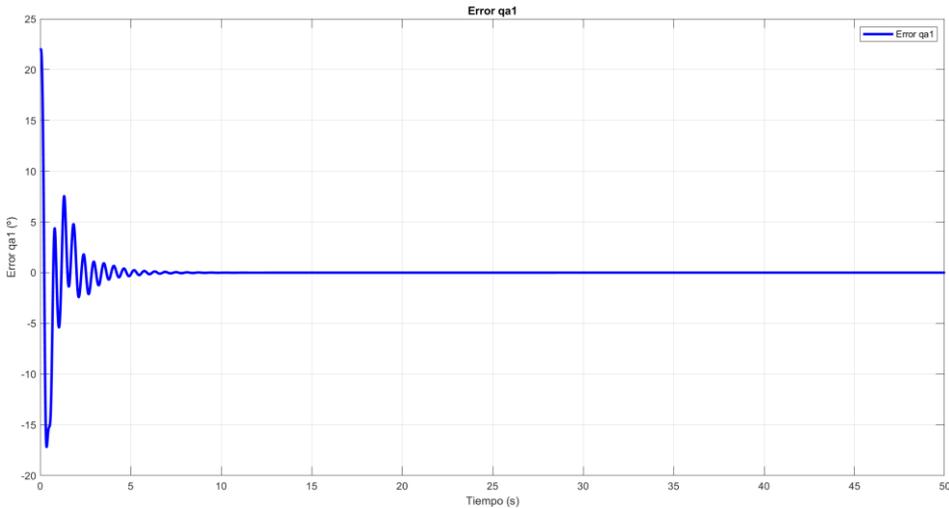


Figura 120: Error qa1 prueba $x=0,5$ $y=0,5$

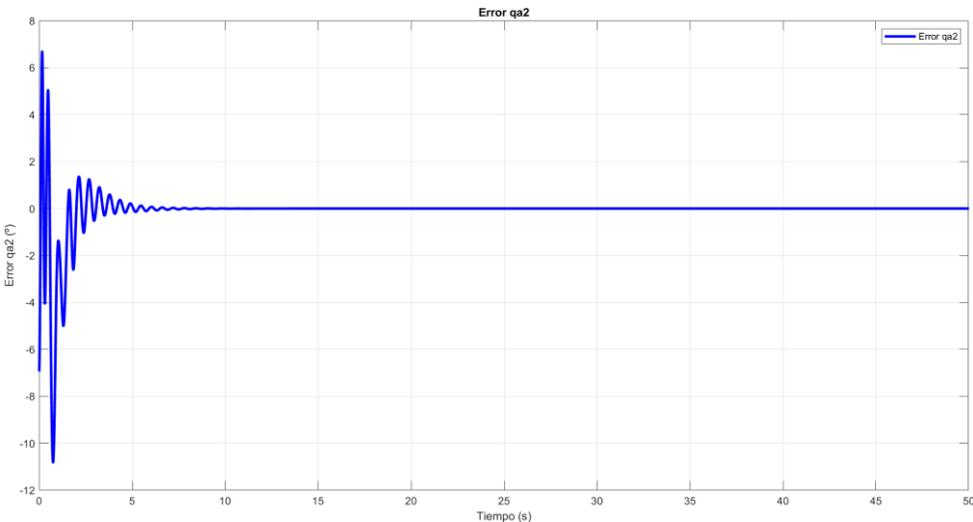


Figura 121: Error qa2 prueba $x=0,5$ $y=0,5$ (Articulación ajustada inicialmente)

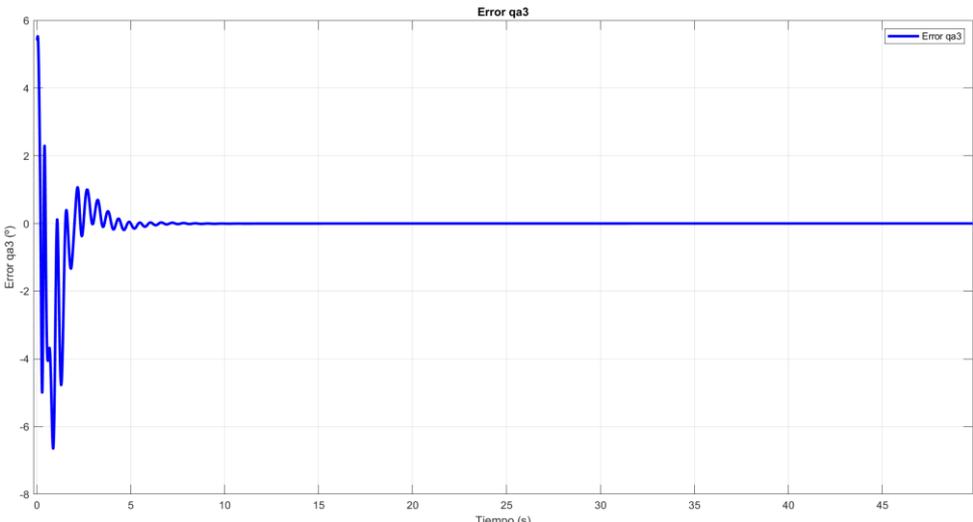


Figura 122: Error qa3 prueba $x=0,5$ $y=0,5$

5.2.4 Otros puntos del espacio de trabajo

Se prueban más puntos del espacio de trabajo, y se observa que el posicionamiento en torno a puntos cercanos al punto medio del workspace se realiza de forma sencilla, sin apenas error y con pocas oscilaciones en el tramo inicial. Conforme se avanza hacia afuera, comienza a aparecer más error y más oscilaciones al inicio del movimiento. Esto se debe a varios factores como podrían ser el resorte, la cercanía de posiciones singulares y, como se ha visto en el análisis del espacio de trabajo del punto 3.3.5, al índice de destreza.

Como se vio en la Figura 10, para el caso de una estructura con forma de triángulo equilátero, cuanto más es la distancia respecto del centro del Workspace, mayor es el error al amplificarse y trasladarse desde las desviaciones de las articulaciones actuadas hasta la posición del TCP. Un ejemplo podría ser posicionar el robot en el punto $X=0,55$ $Y=0,55$. Las juntas activas 1 y 3, registran errores casi nulos respecto a la consecución de la referencia angular. Sin embargo, $qa2$ tiene un pequeño error que se mantiene en el tiempo (ver Figura 123).

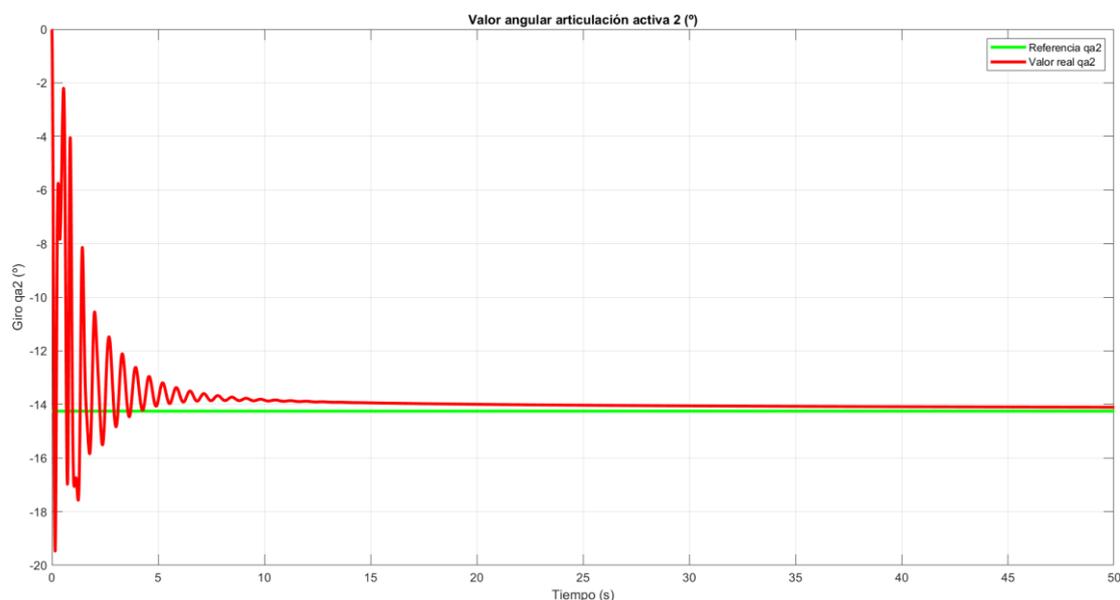


Figura 123: Valor articular $qa2$ vs $qa2_Ref$ (Prueba $X=0,55$ $Y=0,55$)

El error se expande, y aunque inicialmente parece que no va a afectar en el posicionamiento del TCP, acaba por tener una desviación a tener en cuenta, como se muestra en la figura 124. Se podría reducir el error introduciendo como entrada una función rampa en vez de un escalón, de forma que la entrada de aire y la actuación del músculo fuera más lenta y de esta forma, se redujeran las oscilaciones iniciales. Otra posibilidad sería introducir un muelle que tuviera más capacidad de deformación para permitir su ajuste inicial.

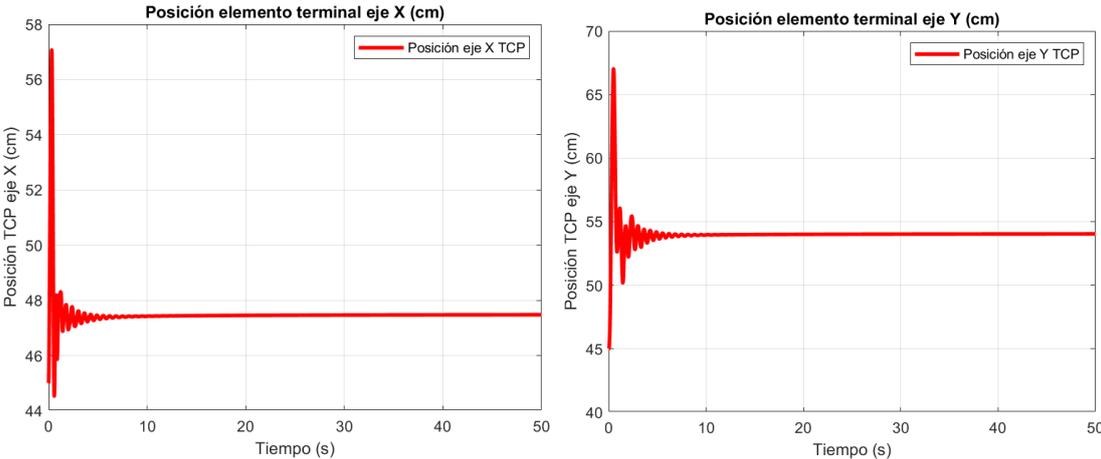


Figura 124: Gráficas posición TCP. Prueba x=0,55 y=0,55

5.2.5 Generación de trayectorias

Una vez visto que podía posicionarse correctamente el robot, al menos en zonas cercanas al centro del espacio de trabajo, se procede a crear alguna trayectoria, con el objetivo de estudiar si puede seguirlas de forma dinámica. Con lo visto en los anteriores apartados, se concluye que generar una trayectoria rectilínea introduciendo como consigna la variación relativa del ángulo de la articulación activa entre puntos, no es un problema. Por ello, se procede a implementar una trayectoria circular.

Teniendo en cuenta que se tienen 3 actuadores, se busca la forma de generar el movimiento curvo. La solución a la que se llega es introducir como consigna, una función senoidal por cada músculo, desfasada 120° por cada cadena cinemática. Se toma una amplitud de 10 cm y una frecuencia de 0,05 rad/s, quedando la función tal que:

$$Y = 0,1 * sen(0.05 * t + 0.45) \tag{55}$$

La implementación en Simscape se presenta en la Figura 125; no hace falta crear ningún modelo nuevo, simplemente modificar la entrada de cada una de las cadenas cinemáticas con la función senoidal y su desfase correspondiente.

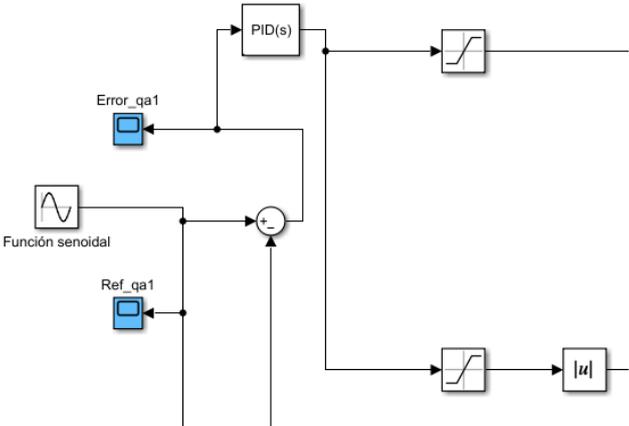


Figura 125: Entrada senoidal para crear trayectoria circular

Se compila el modelo y se ejecuta, obteniendo trayectoria mostrada en la Figura 126. No es un círculo perfecto, pero se asemeja a lo que se desea conseguir. Los mayores errores, se deben al movimiento inicial desde el reposo hasta el punto de inicio de la curva.

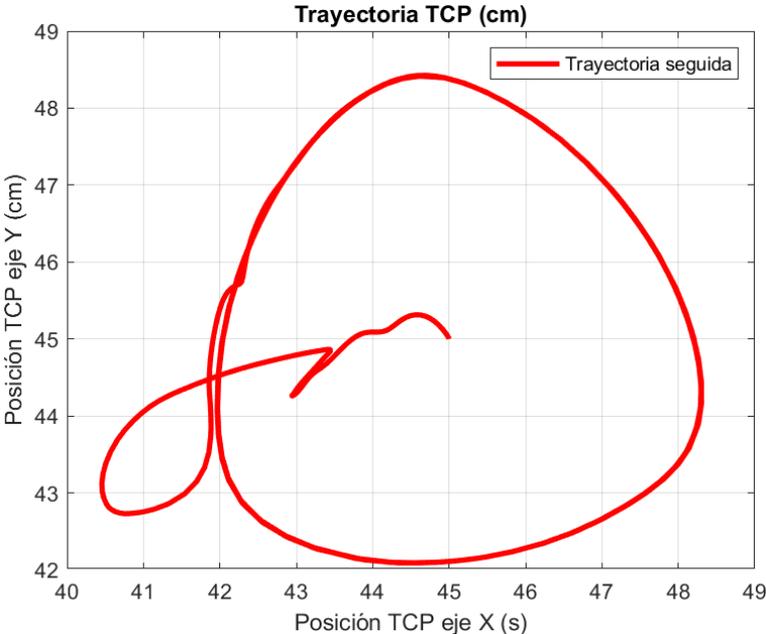


Figura 126: Trayectoria circular para una amplitud de función seno de 10 cm

Si se observan las gráficas de las variables articulares, se comprueba que se ajusta bien a la función senoidal correspondiente, produciendo muy poco error como se ve en las figuras 127, 128 y 129.

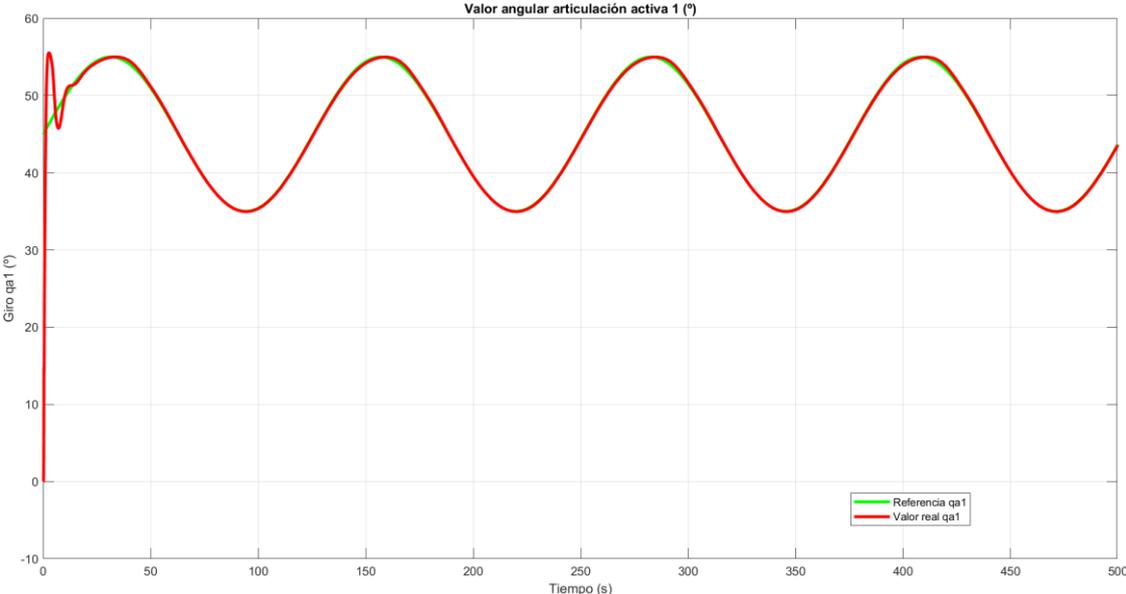


Figura 127: Valor qa1(t) trayectoria circular

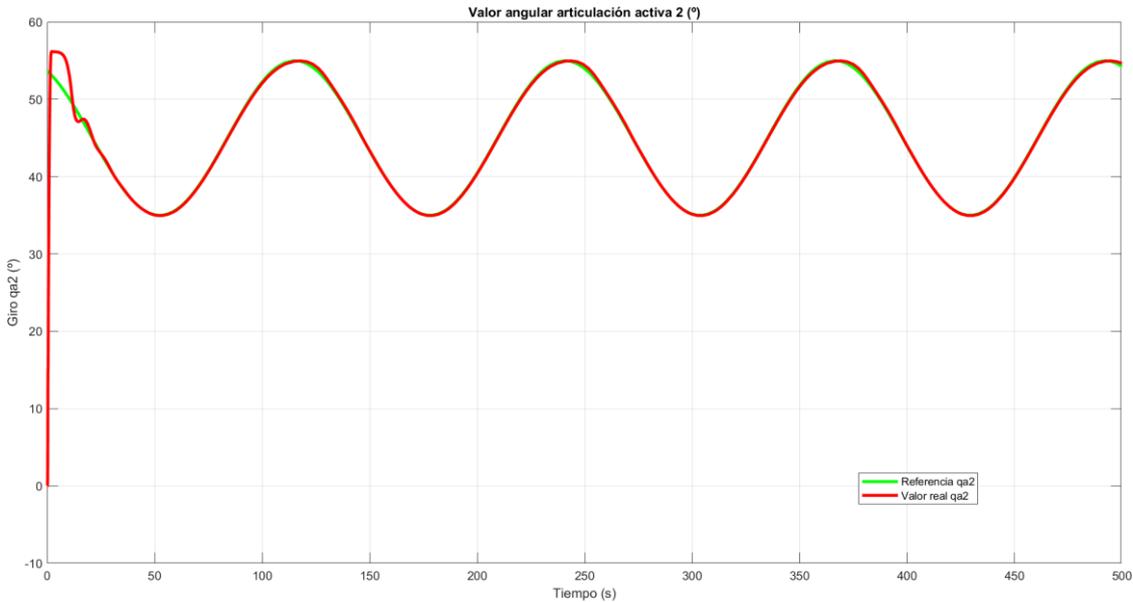


Figura 128: Valor $qa_2(t)$ trayectoria circular

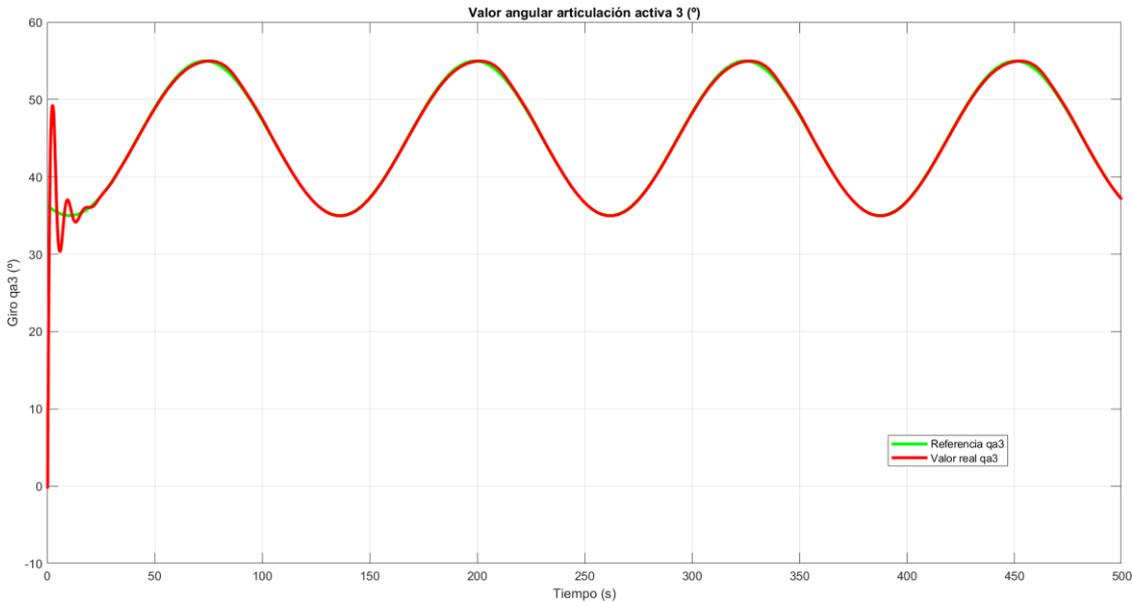


Figura 129: Valor $qa_3(t)$ trayectoria circular

Si se aplica la teoría de que el error se hace más pequeño cuanto más cerca del punto medio del espacio de trabajo y de que la precisión mejora, si se reduce la amplitud de la función senoidal de referencia de 10 a 5 cm, se observa que se consiguen mejores resultados (ver Figura 130).

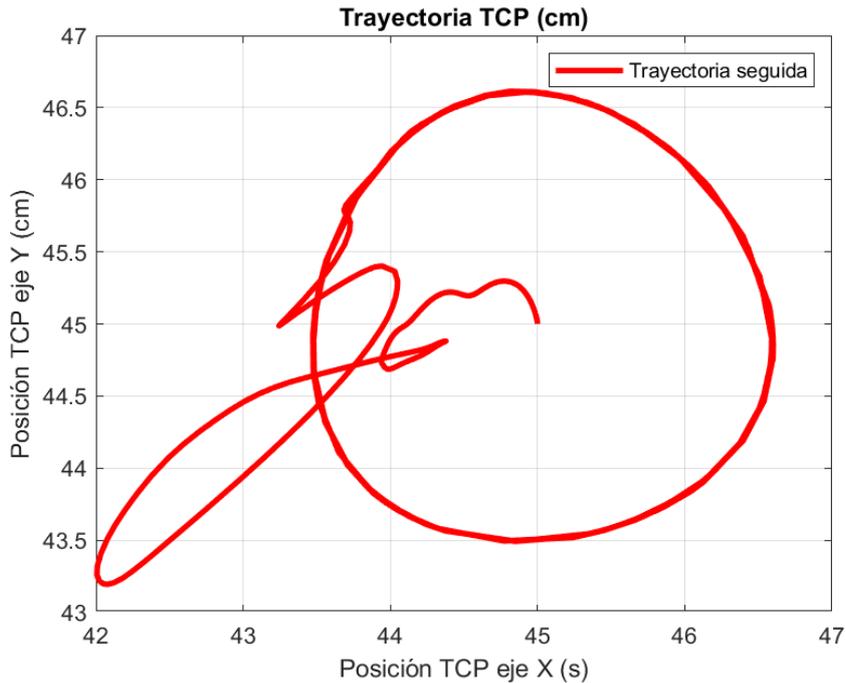


Figura 130: Trayectoria circular para una amplitud de función seno de amplitud 5 cm

Por lo tanto, este modelo de robot planar 3RRR, permite tanto posicionar punto a punto, como seguir una trayectoria que se le ponga.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

6 Conclusiones

6.1 Conclusiones

El trabajo realizado en este proyecto Fin de Máster ha contribuido al diseño y modelado de un robot paralelo planar 3RRR con actuación neumática, para ser utilizado como banco de ensayos para el estudio de algoritmos de control y técnicas de aprendizaje autónomo. Las principales aportaciones y/o conclusiones que se extraen, parten en primer lugar de la selección de la arquitectura del banco de pruebas, para el cual se ha realizado un estudio exhaustivo de las opciones existentes.

De entre todas las posibles arquitecturas que se podrían utilizar para realizar este banco de pruebas, se ha elegido la de un Robot Paralelo Planar 3RRR, por ser más compacta que la de otros mecanismos, pero, sobre todo, por tener una forma sencilla de introducir los músculos neumáticos como elemento de actuación. Al operar en el plano, no hay riesgo de que se vean sometidos a esfuerzos de torsión o flexión. A mayores, se generan los códigos en Matlab que resuelven los problemas de posición, velocidad y aceleración del robot planar 3RRR.

El empleo de músculos neumáticos era uno de los requisitos pedidos por Ikerlan, por lo que hubo que pensar cómo integrar los músculos en el mecanismo planar. Normalmente, los robots planares 3RRR tienen actuación eléctrica por lo que, para poder introducir los músculos neumáticos, se debe realizar un estudio del funcionamiento de estos y de las opciones existentes (selección de la opción de Festo). Para permitir que el músculo recupere su forma, es necesario crear un mecanismo que lo lleve de nuevo a su forma original, por lo que se ha realizado un sistema antagonista que tiene por elemento recuperador un resorte. Es una opción sencilla y barata, pero se pierde algo de control sobre las articulaciones activas, por lo que, de tener más presupuesto, sería preferible integrar un sistema antagonista de 2 músculos (a pesar de aumentar la complejidad del control).

Se ha logrado modelar en Simscape-Simulink el robot planar 3RRR con varias opciones de reconfiguración, de forma que se puedan realizar ensayos con una amplia variedad de relaciones cinemáticas y dinámicas. El objetivo de reconfigurabilidad, queda satisfactoriamente cubierto al introducir mecanismos que permiten cambiar rápidamente la configuración del robot como: posiciones de las articulaciones, dimensiones de los cuerpos rígidos, selección de materiales, selección de diferentes tipos de bastidor, reconfiguración del músculo y del resorte, cambios en la plataforma móvil... Las simulaciones muestran un buen comportamiento del robot, el cual puede posicionarse correctamente dentro del espacio de trabajo (siempre que se trabaje en zonas con un índice de destreza alto) y puede seguir trayectorias dinámicas o generadas por funciones.

A mayores, se ha creado una lista de componentes para poder trasladar el diseño de Simscape al laboratorio de Ikerlan, con las justificaciones necesarias de la elección. El problema que se encuentra es la falta de información de los fabricantes para poder acometer su modelado.

Como conclusión general, se podría decir que se han cubierto todos los requisitos y objetivos planteados al inicio del proyecto y se ha conseguido diseñar, modelar y simular un banco de pruebas reconfigurable que acepta diversas configuraciones y es operativo. La complejidad principal del proyecto radica en el control y el funcionamiento de los músculos neumáticos junto al robot planar 3RRR, y se debe seguir investigando en la línea de generación de trayectorias válidas dentro del espacio de trabajo y en posibles mejoras de la solución aportada para aumentar la precisión.

6.2 Acciones futuras

Como acciones futuras o líneas de investigación abiertas e identificadas se proponen las siguientes:

- **Revisión de los modelos y de los componentes elegidos:** Este proyecto, es el inicio de varias líneas de investigación como la ingeniería de control, el Deep Learning o la robótica, por lo que se debe hacer una revisión de lo realizado hasta ahora para ver si es necesario introducir algún cambio.
- **Construcción física del banco de pruebas e identificación de los componentes:** La mejor forma de realizar una identificación de los elementos, es teniéndolos físicamente y realizando una identificación empírica, ante la falta de información que proporcionan los fabricantes. Importancia de la creación de un modelo propio del músculo.
- **Implementación del controlador:** En este proyecto, el control implementado es un PID simple, dado que no ha habido tiempo de estudiar e implementar algo más preciso. Tanto el control de los robots paralelos como de los músculos neumáticos es complejo, por lo que, al juntarlos, esta complejidad se incrementa. Como línea futura, se propone investigar en el desarrollo de nuevas técnicas que se puedan aplicar a los modelos existentes.
- **Generador de trayectorias:** uno de los grandes problemas de la robótica paralela planar, son las singularidades que hay en el espacio de trabajo y la pérdida de precisión según la zona donde se mueva el manipulador. Por lo tanto, se propone realizar un estudio que junte singularidades, espacio de trabajo y trayectorias posibles del robot.

CAPITULO 7

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7 Referencias bibliográficas

- [1] “La tecnología, nuestra actitud | IKERLAN.” <https://www.ikerlan.es/> (accessed Aug. 29, 2023).
- [2] Inteco, “Study control algorithms using INTECO systems.” [Online]. Available: www.inteco.com.pl
- [3] “Inicio - GUNT Gerätebau.” <https://www.gunt.de/es/> (accessed Aug. 10, 2023).
- [4] S. Bamzad and S. John, “ONLINE RISK ASSESSMENT USING A BANK OF KALMAN FILTERS AND EVENT TREE,” 2019.
- [5] P. Falcón, M. Cerdeira, E. Delgado, M. Díaz-Cacho, and A. Barreiro, “Modelado y control reset de una planta ABS experimental,” Universidade da Coruna, Mar. 2020, pp. 680–687. doi: 10.17979/spudc.9788497497565.0680.
- [6] “X-Delta 3+1 | OMRON, España.” <https://industrial.omron.es/es/products/x-delta-3+1> (accessed Aug. 24, 2023).
- [7] J-P. Merlet, “Parallel Robots,” vol. 128, 2006, doi: 10.1007/1-4020-4133-0.
- [8] A.-L. Cauchy, “Sur les polygones et les polyèdres (Second Mémoire),” *Oeuvres complètes*, pp. 26–38, Oct. 2009, doi: 10.1017/CBO9780511702501.003.
- [9] R. Bricard, “Mémoire sur la théorie de l’octaèdre articulé,” *J Math Pures Appl*, vol. 3, pp. 113–148, 1897, Accessed: Sep. 04, 2023. [Online]. Available: http://www.numdam.org/item?id=JMPA_1897_5_3__113_0
- [10] J. E. Gwinnett, “Amusement device,” Oct. 1928.
- [11] V. E. Gough, “Contribution to discussion of papers on research in Automobile Stability,” *Proceedings of Control and Tyre Performance, Auto Div. Inst. Mech. Eng.*, pp. 392–394, Sep. 1956.
- [12] D. Zhang, “Introduction,” *Parallel Robotic Machine Tools*, pp. 1–18, 2010, doi: 10.1007/978-1-4419-1117-9_1.
- [13] D. Stewart, “A Platform with Six Degrees of Freedom,” http://dx.doi.org/10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02, vol. 180, no. 1, pp. 371–386, Jun. 1965, doi: 10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02.
- [14] A. Rafael. Barrientos Antonio, Peñin Luis Felipe, Balaguer Carlos, “Fundamentos de robótica,” *News.Ge*, p. 608, 2007, Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.elsolucionario.org/fundamentos-de-robotica-barrientos-l-penin-c-balaguer-r-aracil-2ed/>
- [15] I. A. Boney, “Geometric analysis of parallel mechanisms,” 2002. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:118098217>

- [16] P. Timisoara, Z. Pandilov, V. Dukovski, and S. I. Kiriil Metodij, “COMPARISON OF THE CHARACTERISTICS BETWEEN SERIAL AND PARALLEL ROBOTS.”
- [17] K. J. Waldron and K. H. Hunt, “Series-Parallel Dualities in Actively Coordinated Mechanisms,” <http://dx.doi.org/10.1177/027836499101000503>, vol. 10, no. 5, pp. 473–480, Oct. 1991, doi: 10.1177/027836499101000503.
- [18] “The What, Why and How of Delta Robots | Engineering.com.” <https://www.engineering.com/story/the-what-why-and-how-of-delta-robots> (accessed Aug. 28, 2023).
- [19] J. Hirano, D. Tanaka, T. Watanabe, and T. Nakamura, “Development of delta robot driven by pneumatic artificial muscles,” in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014, pp. 1400–1405. doi: 10.1109/AIM.2014.6878278.
- [20] M. Rodelo, J. L. Villa, and E. Yime, “Higher-order kinematic analyses of a planar parallel robot based on screw theory,” in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Nov. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1671/1/012002.
- [21] J. Gallardo-Alvarado, J. H. Tinajero-Campos, and A. Sánchez-Rodríguez, “Kinematic of a configurable manipulador using screw theory,” *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, vol. 18, no. 1, pp. 58–67, 2021, doi: 10.4995/RIAI.2020.12793.
- [22] M. Rodelo, J. L. Villa, J. Duque, and E. Yime, “Kinematic Analysis and Performance of a Planar 3RRR Parallel Robot with Kinematic Redundancy using Screw Theory,” in *2018 IEEE 2nd Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA)*, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/CCRA.2018.8588123.
- [23] J. Gallardo-Alvarado and J. Gallardo-Razo, “Chapter 18 - Fundamentals of screw theory,” in *Mechanisms*, J. Gallardo-Alvarado and J. Gallardo-Razo, Eds., in *Emerging Methodologies and Applications in Modelling, Identification and Control*. Academic Press, 2022, pp. 381–420. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-395348-1.00033-8>.
- [24] J. Enrique and V. Cantero, “Método de Newton Raphson,” 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/328571353>
- [25] “(PDF) Influencia de los parámetros de diseño en el espacio de trabajo de un mecanismo paralelo planar 3RRR.” https://www.researchgate.net/publication/270580743_Influencia_de_los_parametros_de_diseño_en_el_espacio_de_trabajo_de_un_mecanismo_paralelo_planar_3RRR (accessed Aug. 24, 2023).
- [26] R. Di Gregorio, “A novel method for the singularity analysis of planar mechanisms with more than one degree of freedom,” *Mech Mach Theory*, vol. 44, no. 1, pp. 83–102, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2008.02.010.

- [27] M. N. Cardona Gutierrez, “Dimensional Synthesis of 3RRR Planar Parallel Robots for Well-Conditioned Workspace,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 2, pp. 409–415, 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7055557.
- [28] A. A. Salem, T. Y. Khedr, G. El Ghazaly, and M. I. Mahmoud, “Modeling and performance analysis of planar parallel manipulators,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer Verlag, 2018, pp. 13–23. doi: 10.1007/978-3-319-64861-3_2.
- [29] D. R. Higuera-Ruiz, K. Nishikawa, H. Feigenbaum, and M. Shafer, “What is an artificial muscle? A comparison of soft actuators to biological muscles,” *Bioinspir. Biomim*, vol. 17, p. 11001, 2022, doi: 10.1088/1748-3190/ac3adf.
- [30] J. Zhang *et al.*, “Robotic Artificial Muscles: Current Progress and Future Perspectives,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 35, no. 3, pp. 761–781, Jun. 2019, doi: 10.1109/TRO.2019.2894371.
- [31] F. Schmitt, O. Piccin, L. Barbé, and B. Bayle, “Soft robots manufacturing: A review,” *Frontiers Robotics AI*, vol. 5, no. JUN, p. 84, 2018, doi: 10.3389/FROBT.2018.00084/BIBTEX.
- [32] D. B. Reynolds, D. W. Repperger, C. A. Phillips, and G. Bandry, “Modeling the Dynamic Characteristics of Pneumatic Muscle,” *Ann Biomed Eng*, vol. 31, pp. 310–317, 2003, doi: 10.1114/1.1554921.
- [33] H. Al-Fahaam, S. Davis, and S. Nefti-Meziani, “The design and mathematical modelling of novel extensor bending pneumatic artificial muscles (EBPAMs) for soft exoskeletons,” *Rob Auton Syst*, vol. 99, pp. 63–74, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.ROBOT.2017.10.010.
- [34] D. Sangian, S. Naficy, G. M. Spinks, and B. Tondu, “The effect of geometry and material properties on the performance of a small hydraulic McKibben muscle system,” *SENSORS AND ACTUATORS A-PHYSICAL*, vol. 234, pp. 150–157, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.sna.2015.08.025.
- [35] “1957 - ‘Artificial Muscle’ - Joseph Laws McKibben (American) - cyberneticzoo.com.” <https://cyberneticzoo.com/bionics/1957-artificial-muscle-joseph-laws-mckibben-american/> (accessed Sep. 07, 2023).
- [36] G. Antonelli, P. Beomonte Zobel, W. D’Ambrogio, F. Durante, and T. Raparelli, “An analytical formula for designing McKibben pneumatic muscles,” *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 9, pp. 320–337, Sep. 2018.
- [37] M. S. Xavier, A. J. Fleming, and Y. K. Yong, “Design and Control of Pneumatic Systems for Soft Robotics: A Simulation Approach,” *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 6, no. 3, pp. 5800–5807, Jul. 2021, doi: 10.1109/LRA.2021.3086425.
- [38] D. Pršić, N. Nedić, and V. Stojanović, “A nature inspired optimal control of pneumatic-driven parallel robot platform,” *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*, vol. 231, no. 1, pp. 59–71, Jan. 2017, doi:

- 10.1177/0954406216662367/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0954406216662367-FIG2.JPEG.
- [39] F. Daerden and D. Lefeber, “Pneumatic Artificial Muscles: actuators for robotics and automation.”
- [40] “Shadow Robot | Dexterous Robotic Hands & Teleoperated Robots.” <https://www.shadowrobot.com/> (accessed Sep. 08, 2023).
- [41] “Shadow Robot Company: Air Muscles.” http://lars.mec.ua.pt/public/LAR%20Projects/RobotActuation/2002_MarcoMelo_VascoQuinteiro/Projecto/Artigos_net/net/air%20muscles/Shadow%20Robot%20Company%20Air%20Muscles.htm (accessed Sep. 08, 2023).
- [42] T. Tagami, T. Miyazaki, T. Kawase, T. Kanno, and K. Kawashima, “Pressure Control of a Pneumatic Artificial Muscle including Pneumatic Circuit Model,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 60526–60538, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2983602.
- [43] M. Trojanová, A. Hošovský, and T. Čakurda, “Modeling of Creep Effect in DMSP-5 Fluidic Muscle,” *TEM Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 24–29, Feb. 2022, doi: 10.18421/TEM111-03.
- [44] “Fluidic Muscle DMSP/MAS.” Accessed: Sep. 08, 2023. [Online]. Available: https://www.festo.com/gb/en/p/fluidic-muscle-id_DMSP/?q=pneumatic+muscle%7E%3AfestoSortOrderScored
- [45] W. Zhao, A. Song, and Y. Cao, “An extended proxy-based sliding mode control of pneumatic muscle actuators,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 8, Apr. 2019, doi: 10.3390/app9081571.
- [46] G. Antonelli, P. Beomonte Zobel, F. Durante, M. Gabrio Antonelli, and T. Raparelli, “Article ID: IJMET_09_12_037, An Analytical Formula For Designing McKibben Pneumatic Muscles,” *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJM)*, vol. 9, no. 12, pp. 320–337, 2018.
- [47] A. Donskoj *et al.*, “Modelling the static and dynamic characteristics of pneumatic muscle,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Nov. 2019. doi: 10.1088/1755-1315/337/1/012042.
- [48] T. Kerscher, J. Albiez, J. M. Zöllner, and R. Dillmann, “Evaluation of the dynamic model of fluidic muscles using quick-release,” in *Proceedings of the First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006, BioRob 2006*, 2006, pp. 637–642. doi: 10.1109/BIOROB.2006.1639161.
- [49] I. Boblan, “Modellbildung und Regelung eines fluidischen Muskelpaares,” Sep. 2009.
- [50] “Design | Soft Robotics Toolkit.” <https://softroboticstoolkit.com/book/pam-design> (accessed Sep. 09, 2023).

- [51] L. Kotkas, N. Zhurkin, A. Donskoy, and A. Zharkovskij, “Design and Mathematical Modeling of a Pneumatic Artificial Muscle-Actuated System for Industrial Manipulators,” *Machines*, vol. 10, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.3390/machines10100885.
- [52] H. F. Schulte, “The characteristics of the McKibben artificial muscle,” 1961. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56578299>
- [53] C.-P. Chou and B. Hannaford, “Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles,” 1996.
- [54] G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos, and S. Manesis, “Novel Considerations on Static Force Modeling of Pneumatic Muscle Actuators,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 21, Sep. 2016, doi: 10.1109/TMECH.2016.2585503.
- [55] A. Hildebrandt, O. Sawodny, R. Neumann, and A. Hartmann, “Cascaded control concept of a robot with two degrees of freedom driven by four artificial pneumatic muscle actuators,” in *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005.*, 2005, pp. 680–685 vol. 1. doi: 10.1109/ACC.2005.1470036.
- [56] K. C. Wickramatunge and T. Leephakpreeda, “Study on mechanical behaviors of pneumatic artificial muscle,” *Int J Eng Sci*, vol. 48, pp. 188–198, 2010, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:36297976>
- [57] N. Tsagarakis and D. G. Caldwell, “Improved modelling and assessment of pneumatic muscle actuators,” in *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, 2000, pp. 3641–3646 vol.4. doi: 10.1109/ROBOT.2000.845299.
- [58] J. Sárosi, I. Biro, J. Nemeth, and L. Cveticanin, “Dynamic modeling of a pneumatic muscle actuator with two-direction motion,” *Mech Mach Theory*, vol. 85, pp. 25–34, 2015, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.11.006.
- [59] A. Hošovský, J. Pitel, K. Židek, M. Tóthová, J. Sárosi, and L. Cveticanin, “Dynamic characterization and simulation of two-link soft robot arm with pneumatic muscles,” *Mech Mach Theory*, vol. 103, pp. 98–116, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.04.013.
- [60] J. Sárosi, G. Szabó, and J. Gyeveiki, “Investigation and application of pneumatic artificial muscles,” *Biomechanica Hungarica*, Apr. 2010, doi: 10.17489/biohun/2010/1/25.
- [61] M. Martens and I. Boblan, “Modeling the static force of a Festo pneumatic muscle actuator: A new approach and a comparison to existing models,” *Actuators*, vol. 6, no. 4, Dec. 2017, doi: 10.3390/act6040033.
- [62] R. M. Robinson, C. S. Kothera, R. M. Sanner, and N. M. Wereley, “Nonlinear Control of Robotic Manipulators Driven by Pneumatic Artificial Muscles,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 21, no. 1, pp. 55–68, Feb. 2016, doi: 10.1109/TMECH.2015.2483520.

- [63] S. Csikós, J. Sárosi, and S. Balassa, “Fuzzy Control of Antagonistic Pneumatic Artificial Muscle Special Issue,” 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/316889478>
- [64] J. Pitel, M. Balara, J. Mižáková, M. Balara, and J. Boržiková, “Control of the pneumatic actuator with McKibben artificial muscles Statistical approach to optimize the process parameters of HAZ of tool steel,” 2007. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/285769627>
- [65] “High School Outreach.” <http://nri-csa.vuse.vanderbilt.edu/joomla/index.php/harpethhall-winterim> (accessed Sep. 11, 2023).
- [66] M. Rodelo, J. L. Villa, and E. Yime, “Trajectory-tracking control of a planar parallel robot using generalized predictive control with constraints,” *J Phys Conf Ser*, vol. 1702, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1702/1/012003.
- [67] “(22) RRR Planar Parallel Manipulator Robotics Project - YouTube.” https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=0pd5GFRM_B0 (accessed Sep. 11, 2023).
- [68] R. L. Williams and B. H. Shelley, “Inverse Kinematics for Planar Parallel Manipulators,” *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, vol. 2, Feb. 2021, doi: 10.1115/DETC97/DAC-3851.
- [69] “(22) Painting Using a 3-RRR Planar Parallel Robot - YouTube.” <https://www.youtube.com/watch?v=DLiO6x4sQfg> (accessed Sep. 11, 2023).
- [70] B. P. Huynh and Y. L. Kuo, “Dynamic filtered path tracking control for a 3RRR robot using optimal recursive path planning and vision-based pose estimation,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 174736–174750, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3025952.
- [71] L. D. Khoa, D. Q. Truong, and K. K. Ahn, “Synchronization controller for a 3-R planar parallel pneumatic artificial muscle (PAM) robot using modified ANFIS algorithm,” *Mechatronics*, vol. 23, no. 4, pp. 462–479, 2013, doi: 10.1016/j.mechatronics.2013.03.011.
- [72] “Válvulas distribuidoras proporcionales VPWS.” [Online]. Available: www.festo.com/catalogue/...
- [73] “Series PVQ Compact Proportional Solenoid Valve.”
- [74] B. Automation GmbH, “Documentation 2 Channel Pulse Width Current Terminal 1A, 24 VDC.”
- [75] “Sensores de presión SDE5.” [Online]. Available: www.festo.com/catalogue/...
- [76] “Tubos de plástico, con calibración exterior.” [Online]. Available: www.festo.com/catalogue/...

- [77] “Unidades de mantenimiento combinadas MSB4/MSB6, serie MS.” [Online]. Available: www.festo.com/engineering/
- [78] “Multiple Section Potentiometer Series P2500.” [Online]. Available: www.novotechnik.de
- [79] “Vert_X_13_e_SensorAngulo”.
- [80] “Pivot Joint 180° 45.” <https://www.motedis.es/es/Junta-pivotante-180G-45> (accessed Sep. 13, 2023).
- [81] A. Zubizarreta, I. Cabanes, M. Marcos, C. Pinto, and E. Portillo, “Redundant dynamic modelling of the 3RRR parallel robot for control error reduction,” in *2009 European Control Conference (ECC)*, 2009, pp. 2205–2210. doi: 10.23919/ECC.2009.7074732.
- [82] F. Serrano, B. Rodriguez, and M. Cardona, “Obtención de un Modelo Dinámico Para un Robot 3RRR Basado en Teoría de Screws,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 15, Sep. 2018, doi: 10.4995/riai.2018.8725.

ANEXO I

CÓDIGOS SCRIPTS MATLAB

ANEXO I: CÓDIGOS SCRIPTS MATLAB

A: Estructura Parámetros

```
function Param=EstructuraParametros

%Parámetros de la maqueta. Rellenar según la configuración física que se
%disponga.

%Nota: Las variables de masa e inercia no se introducen, dado que ya son
%consideradas en Simscape, y aquí no se realiza un estudio de la dinámica
%del sistema.

%% Longitudes de los brazos articulados:
%Dichos brazos están compuestos por dos elementos cada uno que unen la
%articulación actuada por cada uno con la plataforma o carga. Se denomina
%como Li la acoplada directamente a la articulación actuada y li a la unión
%con la carga.

%Dimensiones Li e li (m):
L1=0.25; l1=0.25;
L2=0.25; l2=0.25;
L3=0.25; l3=0.25;

%% Datos de la plataforma móvil de carga:
%Se dispone de una plataforma que en un principio será de aluminio, pero
%que podría cambiar de material y forma dotando a la maqueta de más
%posibilidades de reconfiguración.

%Densidades de materiales (g/cm^3):
Rho_Al=2.7; %Aluminio
Rho_Mad=0.6; %Madera
Rho_Plast=1; %Plástico

%Forma triángulo equilátero plataforma:
% h_tri=0.075; %Valor del lado (m)

grosor_tri=0.02; %Grosor del triángulo.
h_tri=0.1732;

%La altura es 14.9996.

%Para acceder al punto central de la plataforma:
%Radio de la circunferencia que contiene a la plataforma circunscrita

% R_tri=h_tri/sqrt(3);
% R_tri=0.10/sqrt(3);
R_tri=0.1;
%Ángulos desde el vértice al centro (30°):
fi1=pi/6; fi2=5*pi/6; fi3=9*pi/6;

%Comienza por lado ancho l
```

```

thetaB=[pi/6 5*pi/6 9*pi/6]+pi; %Se le suma 180° para poder hacer coincidir
los vértices solidarios a la plataforma
Center=[0;0];
B=zeros(2,3); %3 puntos con 2 coordenadas cada uno

for i=1:length(thetaB)
    B(:,i)=Center+R_tri*[cos(thetaB(i));sin(thetaB(i))];
end

%Circunferencia aluminio (En Simscape se parte de un cilindro con un grosor
%pequeño):
% R_circ=0.075;
% grosor_circ=0.02;

%% Puntos de base (m)
%Puntos de anclaje de la polea del sistema antagonista. Estos anclajes
pueden
%movearse de forma que se creen nuevas configuraciones de la maqueta.

%Bastidor cuadrado:
% OA1=[0; 0.3];
% OA2=[0.4; 0.60];
% OA3=[0.5 ;0];

%Mesa circular:

R=22.5; %Radio de la mesa (cm)
%Puntos de anclaje formando triángulo equilátero:
OA1=[(45-R*cos(pi/6))*10^-2; (45-R*sin(pi/6))*10^-2];
OA2=[(45+R*cos(pi/6))*10^-2; (45-R*sin(pi/6))*10^-2];
OA3=[0.45; 0.45+R*0.01];

%Constante Gravedad (m/s^2)
g=9.8;

%% Matriz que contiene todos los parámetros (Param):

Param.Longitudes=[];
Param.Longitudes.a1=[OA1];
Param.Longitudes.a2=[OA2];
Param.Longitudes.a3=[OA3];

Param.Longitudes.L1=L1;
Param.Longitudes.L2=L2;
Param.Longitudes.L3=L3;

Param.Longitudes.l1=l1;
Param.Longitudes.l2=l2;
Param.Longitudes.l3=l3;

%Vectores que unen los vértices de plataforma con su centro:
Param.Longitudes.d1=B(:,1);
Param.Longitudes.d2=B(:,2);
Param.Longitudes.d3=B(:,3);

```

```
%Centros de masa supuestos en la mitad del elemento:
```

```
Param.Longitudes.LcL1=L1/2;
```

```
Param.Longitudes.LcL2=L2/2;
```

```
Param.Longitudes.LcL3=L3/2;
```

```
Param.Longitudes.Lc11=l1/2;
```

```
Param.Longitudes.Lc12=l2/2;
```

```
Param.Longitudes.Lc13=l3/2;
```

```
Param.g=g;
```

B: Código Problema Posición Inverso

```
function [OK,q]=CinematicaInversa(Param,X)
```

```
%% Cálculo de la cinemática inversa de la maqueta neumática
```

```
%Partiendo del conocimiento de la posición que se desea alcanzar con el  
%punto medio de la plataforma de carga, se necesita obtener cuáles serán  
%las variables articulares necesarias para obtener dicha configuración.
```

```
%Una vez obtenidas las variables articulares activas, se conocerá cuáles  
%son las consignas de movimiento que se deben mandar al músculo (actuador).
```

```
%Los parámetros con los que trabaja la función son:
```

```
%-Entradas:
```

```
    %-Param: estructura de parámetros de la maqueta.
```

```
    %-P: posición que se desea alcanzar con la maqueta. La cantidad de  
    %datos que aporta esta variable depende principalmente del número de  
    %grados de libertad del sistema. Se considerará que hay 3 GDL:
```

```
    %posicionamiento en x/y y orientación mediante giro alrededor del eje  
    %z. (En este proyecto el control se centra en el posicionamiento en x e  
    %y.
```

```
%Se debe estudiar si hay que tener en cuenta el modo de trabajo de la  
%maqueta (recordar que el modo de trabajo separa los distintos rangos de  
%trabajo antes de alcanzar una configuración singular; es decir, puedes  
% alcanzar un mismo punto con configuraciones articulares diferentes.
```

```
%-Salidas:
```

```
%Se indica si la obtención de las variables articulares se ha realizado  
%correctamente (1 sí, 0 no).
```

```
%Se obtienen todas las variables articulares; tanto las actuadas como las  
%no actuadas.
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%% Inicialización de variables de salida
```

```
q=[];
```

```
OK=0;
```

```
mt=[1 1 1]; %Modo de Trabajo
```

```
%% Extracción de parámetros de la estructura "Param":
```

```
%-Puntos Ai (anclaje de articulaciones activas)
```

```
a1=Param.Longitudes.a1;
```

```
a2=Param.Longitudes.a2;
```

```

a3=Param.Longitudes.a3;

%Longitudes cadenas serie
L1=Param.Longitudes.L1;
L2=Param.Longitudes.L2;
L3=Param.Longitudes.L3;

l1=Param.Longitudes.l1;
l2=Param.Longitudes.l2;
l3=Param.Longitudes.l3;

%Vectores plataforma
d1=Param.Longitudes.d1;
d2=Param.Longitudes.d2;
d3=Param.Longitudes.d3;

%% Variables de entrada
x=X(1); y=X(2); tz=X(3);

P=[X(1);X(2)];

%% Matriz de rotación para el cálculo de di:
%Necesario debido al tercer grado de libertad, el cual afecta a la relación
%entre el punto P y Bi (vértice de la plataforma)
Rot_z=[cos(tz) -sin(tz); sin(tz) cos(tz)];

%% Cálculo posiciones Bi (Vértices plataforma) a partir de di:
B1=[];
B2=[];
B3=[];

%Posición del punto P:
X=[x,y];

B1=Rot_z*d1+X;
B2=Rot_z*d2+X;
B3=Rot_z*d3+X;

%% Cálculo de punto pi (Punto coincidente con la articulación no activada y
donde se calcula qnai)
%Para obtenerlo se emplea una técnica de intersección de circunferencias con
%inicio en Ai y Bi. Se tiene una función para su cálculo.
%(Si se considera que solo hay un modo de trabajo, es más sencillo; en caso
contrario
%habría que estudiar las diferentes opciones).

%Matlab dispone de su propia función para la localización del punto de corte
% de circunferencias "circirc":

[xout1,yout1]=circcirc(a1(1),a1(2),L1,B1(1),B1(2),l1);
[xout2,yout2]=circcirc(a2(1),a2(2),L2,B2(1),B2(2),l2);
[xout3,yout3]=circcirc(a3(1),a3(2),L3,B3(1),B3(2),l3);

%Circirc devuelve separados los valores de X y de Y:
xp11_c=[xout1(1), yout1(1)];
xp12_c=[xout1(2), yout1(2)];

```

```

xp21_c=[xout2(1), yout2(1)];
xp22_c=[xout2(2), yout2(2)];

xp31_c=[xout3(1), yout3(1)];
xp32_c=[xout3(2), yout3(2)];

% Cadena 1:
Vta=cross([xp11_c';0]-[a1;0],[P;0]-[xp11_c';0]); % Se calcula el
producto vectorial de los 2 vectores
Vtb=cross([xp12_c';0]-[a1;0],[P;0]-[xp12_c';0]); % y se ve su sentido
para seleccionar el modo.
% Es decir, el signo de
la coordenada z.

if(Vta(3)<=0 && mt(1)==0 || Vta(3)>=0 && mt(1)==1) % Si es mt=0 tiene
que ser negativo y si es mt=1 positivo.
    p1=xp11_c; % Y con este if
sabemos Ba y Bb equivale al modo 0 o 1
elseif(Vtb(3)<=0 && mt(1)==0 || Vtb(3)>=0 && mt(1)==1)
    p1=xp12_c;
else
    OK=0;
    ErrorMsg='Compruebe mt 0 o 1.';
    return;
end

% Cadena 2:
% Se selecciona el modo deseado:
% Con cross haces producto vectorial: hay que añadir la coordemada z como un
0.

Vta=cross([xp21_c';0]-[a2;0],[P;0]-[xp21_c';0]); % Se calcula el
producto vectorial de los 2 vectores
Vtb=cross([xp22_c';0]-[a2;0],[P;0]-[xp22_c';0]); % y se ve su sentido
para seleccionar el modo.
% Es decir, el signo de
la coordenada z.

if(Vta(3)<=0 && mt(2)==0 || Vta(3)>=0 && mt(2)==1) % Si es mt=0 tiene
que ser negativo y si es mt=1 positivo.
    p2=xp21_c; % Y con este if
sabemos Ba y Bb equivale al modo 0 o 1
elseif(Vtb(3)<=0 && mt(2)==0 || Vtb(3)>=0 && mt(2)==1)
    p2=xp22_c;
else
    OK=0;
    ErrorMsg='Compruebe mt 0 o 1.';
    return;
end

% Cadena 3:
% Se selecciona el modo deseado:
% Con cross haces producto vectorial: hay que añadir la coordemada z como un
0.

```

```

Vta=cross([xp31_c';0]-[a3;0],[P;0]-[xp31_c';0]); % Se calcula el producto
vectorial de los 2 vectores
Vtb=cross([xp32_c';0]-[a3;0],[P;0]-[xp32_c';0]); % y se ve su sentido
para seleccionar el modo.
% Es decir, el signo de
la coordenada z.

if(Vta(3)<=0 && mt(3)==0 || Vta(3)>=0 && mt(3)==1) % Si es mt=0 tiene
que ser negativo y si es mt=1 positivo.
    p3=xp31_c; % Y con este if
sabemos Ba y Bb equivale al modo 0 o 1
elseif(Vtb(3)<=0 && mt(3)==0 || Vtb(3)>=0 && mt(3)==1)
    p3=xp32_c;
else
    OK=0;
    ErrorMsg='Compruebe mt 0 o 1.';
    return;
end

%% Cálculo de articulaciones activas
qa1=[];
qa2=[];
qa3=[];

qa1=atan2(p1(2)-a1(2),p1(1)-a1(1));
qa2=atan2(p2(2)-a2(2),p2(1)-a2(1));
qa3=atan2(p3(2)-a3(2),p3(1)-a3(1));

qa=[qa1;qa2;qa3];

%% Cálculo de articulaciones pasivas
qp1=[];
qp2=[];
qp3=[];

qp1=atan2(B1(2)-p1(2),B1(1)-p1(1))-qa1;
qp2=atan2(B2(2)-p2(2),B2(1)-p2(1))-qa2;
qp3=atan2(B3(2)-p3(2),B3(1)-p3(1))-qa3;

qp=[qp1;qp2;qp3];

%% Matriz articular
q=[qa;qp];

OK=1;

```

C: Código Matriz Jacobiana (J) y matriz ecuaciones de cierre (f)

```

function [J,f]=Jacobiana_X_f()
%Función para el cálculo de la Jacobiana respecto de la posición del
%elemento final. Uno de los ejemplos de utilización de esta Jacobiana es en
%el método de Newton-Raphson de la cinemática directa.

%% Declaración de variables simbólicas

syms qa1 qa2 qa3 real;

syms x y tz real;

syms l1 l2 l3 real;
syms L1 L2 L3 real;

syms a1x a1y real;
syms a2x a2y real;
syms a3x a3y real;

syms d1x d1y real;
syms d2x d2y real;
syms d3x d3y real;

%% Vectores
%Puntos anclaje articulación activa:
a1=[a1x ;a1y];
a2=[a2x ;a2y];
a3=[a3x ;a3y];

%Vector posicionamiento Bi respecto centro plataforma móvil:
d1=[d1x ;d1y];
d2=[d2x ;d2y];
d3=[d3x ;d3y];

%Posición punto pi (articulación pasiva):
vL1=[L1*cos(qa1); L1*sin(qa1)];
vL2=[L2*cos(qa2); L2*sin(qa2)];
vL3=[L3*cos(qa3); L3*sin(qa3)];

%Posición TCP x,y:
P=[x;y];

%Las 3 variables sobre las que se derivan las ecuaciones de cierre del
%robot:
X=[x;y;tz];

%% Cálculo de la Ecuacion fi(x,qai)=0 (Ecuaciones de cierre)
%Matriz de rotación para el cálculo de di:
Rot_z=[cos(tz) -sin(tz); sin(tz) cos(tz)];

%Ecuaciones de cierre
f1=(-a1-vL1+P+Rot_z*d1)'*(-a1-vL1+P+Rot_z*d1)-l1^2;
f2=(-a2-vL2+P+Rot_z*d2)'*(-a2-vL2+P+Rot_z*d2)-l2^2;

```

```

f3=(-a3-vL3+P+Rot_z*d3)'*(-a3-vL3+P+Rot_z*d3)-l3^2;

f=[f1;f2;f3];

%% Cálculo Jacobiana

J=jacobian(f,X);

J=simplify(J)

```

D: Código Problema Posición Directo

```

function [X,q]=CinematicaDirecta(Param,qa,X0)
% Cálculo de la cinemática directa de la maqueta neumática
%
% Se desea obtener la posición del elemento final de carga y de la
% plataforma conocidas las variables articulares.
%
% Los parámetros con los que trabaja la función son:
%
% -Entradas:
%   -Param: estructura de parámetros de la maqueta.
%   -qa: valor de las articulaciones activas. Siguiendo las ecuaciones
%   de cierre y aplicando trigonometría, se puede llegar a alcanzar el
%   valor de la posición final.
%   -X0: Vector que contiene el valor inicial de los 3 estados sobre el
%   que iterar.
%
% -Salidas:
% Se indica si la obtención de las variables articulares se ha realizado
% correctamente (1 sí, 0 no).
% Se obtienen las coordenadas cartesianas y el estado final del sistema.
% q: Vector con todas las variables articulares (tanto actuadas como
% pasivas).

%Inicialización de variables
X=[];
q=[];
OK=0;

% Obtención de datos de la estructura "Param"

%Posiciones enclavamiento de los músculos:
a1=Param.Longitudes.a1;
a2=Param.Longitudes.a2;
a3=Param.Longitudes.a3;

a1x=a1(1); a1y=a1(2);
a2x=a2(1); a2y=a2(2);
a3x=a3(1); a3y=a3(2);

%Longitudes cadenas serie:
L1=Param.Longitudes.L1;
L2=Param.Longitudes.L2;
L3=Param.Longitudes.L3;

```

```

l1=Param.Longitudes.l1;
l2=Param.Longitudes.l2;
l3=Param.Longitudes.l3;

%Parámetros plataforma
d1=Param.Longitudes.d1;
d2=Param.Longitudes.d2;
d3=Param.Longitudes.d3;

d1x=d1(1); d1y=d1(2);
d2x=d2(1); d2y=d2(2);
d3x=d3(1); d3y=d3(2);

%Articulaciones activas:
qa1=qa(1); qa2=qa(2); qa3=qa(3);

%% Algoritmo de Newton Raphson
%Declaración parámetros del algoritmo:
MaxIter=1000000; %Máximo iteraciones
epsilon=1e-3; %Factor de convergencia
detLimit=1e-6; %Consideración de singularidades

Xant=X0; %Valor anterior

%Loop

for i=1:MaxIter

    %Guardado de estados anteriores:
    x=Xant(1);
    y=Xant(2);
    tz=Xant(3);

    %Llamada a la función Jacobiana:
    [J,f]=Jacobiana_X_f();

    %Verificación de invertibilidad:
    if(abs(det(J))<detLimit)
        break; %Si encuentra una posición singular se sale
    end

    %Cálculo del siguiente punto basado en N-R:
    X=Xant-inv(J)*f;

    %Condición de parada por convergencia:
    if(norm(X-Xant)<=epsilon)
        OK=1;
        break;
    else
        Xant=X; %Actualización de estado anterior
    end
end
end

```

```

%% Cálculo Parámetros Pasivos
%Si converge, entonces:
if(OK==1)

    x=X(1);
    y=X(2);
    tz=X(3);

    vL1=[L1*cos(qa1); L1*sin(qa1)];
    vL2=[L2*cos(qa2); L2*sin(qa2)];
    vL3=[L3*cos(qa3); L3*sin(qa3)];

%Punto articulación rotacional intermedia en cada cadena serie:
    P1=a1+vL1;
    P2=a2+vL2;
    P3=a3+vL3;

% Cálculo de las articulaciones pasivas
    qp1=atan2(y+(sin(tz)*d1x+cos(tz)*d1y)-P1(2),x+(cos(tz)*d1x+sin(tz)*d1y)-
P1(1))-qa1;
    qp2=atan2(y+(sin(tz)*d2x+cos(tz)*d2y)-P2(2),x+(cos(tz)*d2x+sin(tz)*d2y)-
P2(1))-qa2;
    qp3=atan2(y+(sin(tz)*d3x+cos(tz)*d3y)-P3(2),x+(cos(tz)*d3x+sin(tz)*d3y)-
P3(1))-qa3;

    qa=[qa1; qa2; qa3] %Articulaciones activas
    qp=[qp1; qp2; qp3] %Articulaciones pasivas

    q=[qa;qp]
end

```

E: Código Main Script

```

%% Cálculo Cinemática Inversa: Introducción del usuario de las coordenadas
del TCP deseadas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% Carga de parámetros de la maqueta neumática
Param=EstructuraParametros;

%Punto a probar: coordenadas x, e y (en m) del TCP y orientación tz de la
plataforma:

x=0.48;
y=0.48;
tz=pi/2;

X=[x; y ;tz];

%% Llamada a la función de Cinemática Inversa
% Esta función calcula el valor de las consignas articulares necesarias
% para posicionar al elemento terminal en la posición buscada.

[OK,qu]=CinematicaInversa(Param,X);

```

```
%Articulaciones Activas:
qa1=qu(1)
qa2=qu(2)
qa3=qu(3)

%Paso de radianes a grados:
qa1_ang=qa1*180/pi
qa2_ang=qa2*180/pi
qa3_ang=qa3*180/pi

%Articulaciones Pasivas:

qp1=qu(4)
qp2=qu(5)
qp3=qu(6)

%Paso de radianes a grados:
qp1_ang=qp1*180/pi
qp2_ang=qp2*180/pi
qp3_ang=qp3*180/pi

%Preposicionamiento del muelle:
% R_polea=2.86*10^-2;
% ang_correccion=0; %Corrección de ángulo
% dif_x1=(2*pi*R_polea*ang_correccion)/360;
```

F: Código Workspace

```
%% Representación del espacio de trabajo de un robot 3RRR

%El espacio de trabajo será el área situada entre las intersecciones de los
%círculos formados por cada una de las cadenas cinemáticas.

%% Inicialización de los datos de la maqueta:

% Posiciones de los anclajes de las articulaciones activas:

% Posición "Qa1":
a1x=(45-22.5*cos(pi/6))*10^-2;
a1y=(45-22.5*sin(pi/6))*10^-2;
plot(a1x,a1y,'bo')
hold on

% Posición "Qa2":
a2x=(45+22.5*cos(pi/6))*10^-2;
a2y=(45-22.5*sin(pi/6))*10^-2;
plot(a2x,a2y,'bo')
hold on

% Posición "Qa3":
a3x=0.45;
a3y=0.45+0.225;
plot(a3x,a3y,'bo')
hold on
```

```

% Longitudes de los brazos articulados (m):
%Dichos brazos están compuestos por dos elementos cada uno que unen la
%articulación actuada por cada uno con la plataforma o carga. Se denomina
%como Li la acoplada directamente a la articulación actuada y li a la unión
%con la carga.
Li=0.25;
li=0.25;

%% Representación de los círculos:
% Se toma una posición que esté al límite de una singularidad, por lo que
% una posibilidad podría ser que tanto el eslabón más grande como el corto,
% estén alineados.

%Como la longitud de las cadenas son idénticas, el radio a utilizar será:
R=(Li+li);
th=0:0.01:2*pi; %Ángulo que se barre 0°-360°

% Rango cadena cinemática 1:
x1=R*cos(th)+a1x;
y1=R*sin(th)+a1y;
CC1=plot(x1,y1, 'r');

% Rango cadena cinemática 2:
x2=R*cos(th)+a2x;
y2=R*sin(th)+a2y;
CC2=plot(x2,y2, 'r');

% Rango cadena cinemática 3:
x3=R*cos(th)+a3x;
y3=R*sin(th)+a3y;
CC3=plot(x3,y3, 'r');
%% Puntos de intersección (se utiliza la función "circcirc" proporcionada
por Matlab):

%Intersección cadenas 1 y 2:
[x12,y12] = circcirc(a1x,a1y,R,a2x,a2y,R);

%Intersección cadenas 2 y 3:
[x23,y23] = circcirc(a3x,a3y,R,a2x,a2y,R);

%Intersección cadenas 1 y 3:
[x13,y13] = circcirc(a1x,a1y,R,a3x,a3y,R);

%% Representación de la curva
%Representar la curva del área de intersección entre a1, a2 y a3 la cual
%devuelve el workspace.

d = sqrt((x13(2)-x12(1))^2+(y13(2)-y12(1))^2); % Distancia entre puntos
a = atan2(x13(2)-x12(1),-(y13(2)-y12(1))); % Ángulo bisector perpendicular
b = asin(d/2/R); % Ángulo de medio arco
c = linspace(a-b,a+b); % Rango del ángulo de medio arco
e = sqrt(R^2-d^2/4); % Distancia del centro al punto medio.

% Coordenadas cartesianas del arco:
xarco = (x12(1)+x13(2))/2-e*cos(a)+R*cos(c);
yarco = (y12(1)+y13(2))/2-e*sin(a)+R*sin(c);

```

```

plot(xarco,yarco,'k.', 'MarkerSize',5)
hold on;

d = sqrt((x23(2)-x12(1))^2+(y23(2)-y12(1))^2);
a = atan2(-(x23(2)-x12(1)),y23(2)-y12(1));
b = asin(d/2/R);
c = linspace(a-b,a+b);
e = sqrt(R^2-d^2/4);
xarco = (x12(1)+x23(2))/2-e*cos(a)+R*cos(c);
yarco = (y12(1)+y23(2))/2-e*sin(a)+R*sin(c);
plot(xarco,yarco,'k.', 'MarkerSize',5)
hold on

d = sqrt((x13(2)-x23(2))^2+(y13(2)-y23(2))^2);
a = atan2(-(x13(2)-x23(2)),y13(2)-y23(2));
b = asin(d/2/R);
c = linspace(a-b,a+b);
e = sqrt(R^2-d^2/4);
xarco = (x23(2)+x13(2))/2-e*cos(a)+R*cos(c);
yarco = (y23(2)+y13(2))/2-e*sin(a)+R*sin(c);
plot(xarco,yarco,'k.', 'MarkerSize',5)
hold on
xlabel('X [m]')
ylabel('Y [m]')
xlim([-1.5 1.5])
set(gca,'xtick',-0.5:0.1:1)
ylim([-1.5 1.5])
set(gca,'ytick',-0.5:0.01:1)
set(gca,'FontSize',15)
set(findall(gca, 'Type','text'),'FontSize', 15)
axis square
grid

```

G: Código Problema Velocidad directo

```

function [OK,vX,vq]=VelocidadDirecta(Param,vqa,X,q)

% A partir de las velocidades articulares consigue obtener las velocidades
% de la plataforma.

%-Entradas:
% - Param: estructura que contiene los parámetros cinemáticos y dinámicos
% de la maqueta.
% -vqa: contiene la velocidad de las variables articulares.
% - X: Posición y orientación del elemento final.
% - q: Variables articulares.
%
%-Salidas:
% -Comprobante de que todo funciona correctamente.
% -vX: velocidades del elemento terminal.
% -vq: velocidad de las variables articulares.
%-----

%Inicialización de variables:
OK=0;

```

```

vq=[];
vX=[];

%(En caso de que algún día tenga 2 modos de trabajo, meter el estudio de
%singularidades).

%% Obtención de parámetros de la estructura:
%Posiciones de enclavamiento de los músculos:
a1=Param.Longitudes.a1;
a2=Param.Longitudes.a2;
a3=Param.Longitudes.a3;

a1x=a1(1); a1y=a1(2);
a2x=a2(1); a2y=a2(2);
a3x=a3(1); a3y=a3(2);

%Longitudes de los elementos de cadenas serie:
L1=Param.Longitudes.L1;
L2=Param.Longitudes.L2;
L3=Param.Longitudes.L3;

l1=Param.Longitudes.l1;
l2=Param.Longitudes.l2;
l3=Param.Longitudes.l3;

%Parámetros de la plataforma:
d1=Param.Longitudes.d1;
d2=Param.Longitudes.d2;
d3=Param.Longitudes.d3;

d1x=d1(1); d1y=d1(2);
d2x=d2(1); d2y=d2(2);
d3x=d3(1); d3y=d3(2);

%Variables de entrada:
qa1=q(1); qa2=q(2); qa3=q(3);
qna1=q(4); qna2=q(5); qna3=q(6);
x=X(1); y=X(2); tz=X(3);

%% Matrices Jacobianas cartesianas y articulares (Jxqi y Jxi) de las cadenas
cinemáticas

Jx1 =[-1, 0, d1y*cos(tz) + d1x*sin(tz);
      0, -1, d1y*sin(tz) - d1x*cos(tz)];

Jx2 =[-1, 0, d2y*cos(tz) + d2x*sin(tz);
      0, -1, d2y*sin(tz) - d2x*cos(tz) ];

Jx3 =[-1, 0, d3y*cos(tz) + d3x*sin(tz);
      0, -1, d3y*sin(tz) - d3x*cos(tz)];

Jq1 =[- l1*sin(qa1 + qna1) - L1*sin(qa1), -l1*sin(qa1 + qna1);
      l1*cos(qa1 + qna1) + L1*cos(qa1), l1*cos(qa1 + qna1)];

Jq2 =[- l2*sin(qa2 + qna2) - L2*sin(qa2), -l2*sin(qa2 + qna2);
      l2*cos(qa2 + qna2) + L2*cos(qa2), l2*cos(qa2 + qna2)];

```

```

Jq3 =[- l3*sin(qa3 + qna3) - L3*sin(qa3), -l3*sin(qa3 + qna3);
      l3*cos(qa3 + qna3) + L3*cos(qa3),  l3*cos(qa3 + qna3)  ];

%% Cálculo de la Jacobiana del lazo cinemático (Ji)
% Establecer la relación entre la velocidad articular y de posicionamiento
vqi=Ji*vX

J1=-inv(Jq1)*Jx1;
J2=-inv(Jq2)*Jx2;
J3=-inv(Jq3)*Jx3;

%Cálculo jacobianas de articulaciones activas y pasivas

Jqa=[J1(1,:); J2(1,:); J3(1,:)];
Jqp=[J1(2,:); J2(2,:); J3(2,:)];

%% Resolviendo el problema, queda que:
vX=inv(Jqa)*vqa;

%Relación articulaciones pasivas y vX:
%vqp=Jqp*vX y vX=inv(Jqa)*vqa

%Cálculo velocidad articulaciones pasivas:
vqp=Jqp*inv(Jqa)*vqa;
vq=[vqa;vqp];

OK=1;

```

H: Código Problema Velocidad inverso

```

function [OK,vq]=VelocidadInversa(Param,vX,X,q)

%A partir de las velocidades de la plataforma, consigue obtener las
velocidades
%articulares

%-Entradas:
% - Param: estructura que contiene los parámetros cinemáticos y dinámicos
% de la maqueta.
% -vX: velocidades del elemento terminal.
% - X: Posición y orientación del elemento final.
% - q: Variables articulares.
%
%-Salidas:
% -Comprobante de que todo funciona correctamente.
% -vq: velocidad de las variables articulares.
%-----

OK=0;
vq=[];

%% Obtención de parámetros de la estructura

```

```

%Posiciones de enclavamiento de los músculos:

a1=Param.Longitudes.a1;
a2=Param.Longitudes.a2;
a3=Param.Longitudes.a3;

a1x=a1(1); a1y=a1(2);
a2x=a2(1); a2y=a2(2);
a3x=a3(1); a3y=a3(2);

%Longitudes elementos cadenas cinemáticas serie
L1=Param.Longitudes.L1;
L2=Param.Longitudes.L2;
L3=Param.Longitudes.L3;

l1=Param.Longitudes.l1;
l2=Param.Longitudes.l2;
l3=Param.Longitudes.l3;

%Parámetros plataforma
d1=Param.Longitudes.d1;
d2=Param.Longitudes.d2;
d3=Param.Longitudes.d3;

d1x=d1(1); d1y=d1(2);
d2x=d2(1); d2y=d2(2);
d3x=d3(1); d3y=d3(2);

%Variables de entrada
qa1=q(1); qa2=q(2); qa3=q(3);
qna1=q(4); qna2=q(5); qna3=q(6);
x=X(1); y=X(2); tz=X(3);

%% Matrices Jacobianas cartesianas y articulares (Jxqi y Jxi) de las cadenas
cinemáticas

Jx1 =[-1, 0, d1y*cos(tz) + d1x*sin(tz);
      0, -1, d1y*sin(tz) - d1x*cos(tz)];

Jx2 =[-1, 0, d2y*cos(tz) + d2x*sin(tz);
      0, -1, d2y*sin(tz) - d2x*cos(tz) ];

Jx3 =[-1, 0, d3y*cos(tz) + d3x*sin(tz);
      0, -1, d3y*sin(tz) - d3x*cos(tz)];

Jq1 =[- l1*sin(qa1 + qna1) - L1*sin(qa1), -l1*sin(qa1 + qna1);
      l1*cos(qa1 + qna1) + L1*cos(qa1), l1*cos(qa1 + qna1)];

Jq2 =[- l2*sin(qa2 + qna2) - L2*sin(qa2), -l2*sin(qa2 + qna2);
      l2*cos(qa2 + qna2) + L2*cos(qa2), l2*cos(qa2 + qna2)];

Jq3 =[- l3*sin(qa3 + qna3) - L3*sin(qa3), -l3*sin(qa3 + qna3);
      l3*cos(qa3 + qna3) + L3*cos(qa3), l3*cos(qa3 + qna3) ];

%% Cálculo de la jacobiana de las variables articulares

```

```
% Establecer la relación entre la velocidad articular y de posicionamiento
vqi=Ji*vx

J1=-inv(Jq1)*Jx1;
J2=-inv(Jq2)*Jx2;
J3=-inv(Jq3)*Jx3;

%Jacobiana de velocidad del problema inverso
Jq=[J1(1,:); J2(1,:); J3(1,:); J1(2,:); J2(2,:); J3(2,:)];

%Resolución:
vq=Jq*vX;

OK=1;
```

I: Código jacobianas resolución problema de velocidad

```
%% Script para cálculo de las jacobianas de velocidad.

%% Declaración de variables simbólicas

syms qa1 qa2 qa3 real;
syms qna1 qna2 qna3 real;

syms x y tz real;

syms l1 l2 l3 real;
syms L1 L2 L3 real;

syms a1x a1y real;
syms a2x a2y real;
syms a3x a3y real;

syms d1x d1y real;
syms d2x d2y real;
syms d3x d3y real;

%% Vectores
%%Posiciones de anclajes
a1=[a1x ;a1y];
a2=[a2x ;a2y];
a3=[a3x ;a3y];

%%Vectores distancias plataforma
d1=[d1x ;d1y];
d2=[d2x ;d2y];
d3=[d3x ;d3y];

%%Posición final
P=[x;y];

%% Elemento final y variables articulares

X=[x;y;tz];
```

```
qa= [ qa1 ; qa2 ; qa3 ];
qna=[qna1 ; qna2 ; qna3];

%% Variables articulares de cada cadena cinemática

q1=[qa1; qna1];
q2=[qa2; qna2];
q3=[qa3; qna3];

%% Cálculo de las ecuaciones de cierre vectoriales
Rot_z=[cos(tz) -sin(tz); sin(tz) cos(tz)]; %Matriz de rotación

EC1=a1+[L1*cos(qa1); L1*sin(qa1)]+[l1*cos(qa1+qna1); l1*sin(qa1+qna1)]-
Rot_z*d1-P
EC2=a2+[L2*cos(qa2); L2*sin(qa2)]+[l2*cos(qa2+qna2); l2*sin(qa2+qna2)]-
Rot_z*d2-P
EC3=a1+[L3*cos(qa3); L3*sin(qa3)]+[l3*cos(qa3+qna3); l3*sin(qa3+qna3)]-
Rot_z*d3-P

f=[EC1;EC2;EC3];

%% Cálculo de las Jacobianas
% Con respecto de los estados del elemento terminal
Jx1=jacobian(EC1, X)
Jx2=jacobian(EC2, X)
Jx3=jacobian(EC3, X)

%Con respecto de las articulaciones de cada cadena cinemática
Jq1=jacobian(EC1, q1)
Jq2=jacobian(EC2, q2)
Jq3=jacobian(EC3, q3)
```