



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO

MASTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DOCUMENTO I: MEMORIA

ROBOT INSPECCIONADOR DE TUBERÍAS

JULIO 2017

ALUMNO: Antonio Lamas Villar

TUTOR: José Manuel Sierra Velasco

TUTOR: Juan Díaz González



Universidad de
Oviedo



CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO.

MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

ÁREA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ÁREA DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ROBOT INSPECCIONADOR DE TUBERÍAS

D. LAMAS VILLAR, Antonio

TUTOR: D. SIERRA VELASCO, José Manuel

TUTOR: D. DIÁZ GONZÁLEZ, Juan

FECHA: Julio de 2017

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto, aunque haya sido llevado a cabo principalmente por una sola persona, no habría sido posible sin el trabajo y apoyo de otras muchas.

En primer lugar, quisiera agradecer la colaboración del equipo de estudiantes que desarrollaron en equipo la parte inicial del mismo, ya que se trata de una de las partes más difíciles, que es el comienzo de proyecto, así como haber colaborado en la consecución del premio que trajo la financiación para poder desarrollarlo.

También quiero agradecer a los tutores del proyecto por haberme presentado la idea y ayudarme en el aprendizaje y desarrollo de gran parte de los pilares que sustentan este proyecto. De forma similar quiero dar mi gratitud al personal de laboratorio que me ha ayudado en la fabricación y montaje de las piezas que integran el prototipo.

Asimismo, quiero recordar al resto de docentes de la Universidad que me han ayudado con sus conocimientos a perfeccionar y desarrollar determinadas partes.

Por último, quiero reconocer el apoyo, consejo y ayuda de compañeros de máster y familiares durante el desarrollo del mismo ya que me han ayudado a perfeccionarlo.

RESUMEN

Este proyecto plasma la concepción y posterior desarrollo de un robot para la inspección de tuberías. Dicho robot habría de introducirse dentro de diferentes tipos de tubería y ser capaz de recorrerlas en cualquier dirección (horizontal, vertical o en posiciones inclinadas) y superar obstáculos que encuentre a su paso, como codos.

La concepción de este proyecto, partió de la idea y prototipo desarrollado por 3 alumnos escoceses y 2 españoles (uno de ellos, es el autor de la presente memoria). En esta etapa inicial, la idea ganó un certamen, “Tengo una Idea”, cuyo premio fue la financiación y la colaboración de la empresa Arcelor Mittal I+D, lo que condicionó los parámetros para llevar a cabo el proyecto.

La siguiente fase de desarrollo, que es la que ocupa este proyecto, se ha centrado en el rediseño mecánico, diseño electrónico y eléctrico, así como el de un control para que el robot se mueva de forma autónoma. Además, la mejora del prototipo inicial en aspectos como la electrónica y ciertos fallos detectados.

Como su antecesor tendrá un prototipo y se realizarán ensayos para ver su aplicabilidad en la vida real mediante diferentes tests.

Palabras Clave

Robot-Tubería-Inspección-Reconocimiento-Autónomo

NOMENCLATURA

A continuación, se presenta una tabla introductoria de posibles abreviaturas a utilizar en el presente proyecto y su significado, todo ello para facilitar la lectura de la siguiente memoria.

Símbolo	Definición
3D	3 dimensiones
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
CAD	"Computer Aided Design" o Diseño asistido por computador
DC	"Direct Current" o Corriente Continua
DCL	Diagrama de Cuerpo Libre
FDM	"Fused Deposition Modeling" o modelado por deposición fundida
FEA	Finite Element Analysis
Fp	Fuerza de presión total para el equilibrio del tubo
Fpi	Fuerza de presión ejercida por cada rueda del módulo
Fr	Fuerza de rozamiento total del módulo
Fri	Fuerza de rozamiento en cada rueda
g	Aceleración de la gravedad 9,81 m/s ²
GPIO	"General Purpose Input/Output" o pines de entrada/salida de propósito general
GPS	Global Positioning System
I+D	Investigación y Desarrollo
IMU	"Inertial Measurement Unit" o Unidad de medición inercial
LIDAR	"Light Detection and Ranging" o "Laser Imaging Detection and Ranging" o Detección y rango de luz/láser
m	masa del módulo
N	Fuerza normal de la rueda en el tubo
PAP	Motor Paso a Paso
PCB	"Printed Circuit Board" o Placa de circuito impreso
PWM	"Pulse Width Modulation" o Modulación por ancho de pulso
RITA	Robot Inspeccionador de Tuberías Autónomo
rpm	Revoluciones por minuto
USB	"Universal Serial Bus" o conexión por bus serie
VDC	Voltios de corriente continua
μ	Coefficiente de fricción entre dos cuerpos

ÍNDICE GENERAL

1.	Introducción	1
1.1.	Objetivo	1
1.2.	Alcance	1
1.3.	Antecedentes.....	1
1.3.1.	Desarrollos previos.....	1
1.3.2.	Estudio del estado del arte e interés del robot propuesto	2
1.4.	Especificaciones del diseño y datos de partida.....	3
1.5.	Organización del proyecto.....	4
1.6.	Desarrollo del trabajo y organización documental	6
2.	Estudio del estado del arte.....	7
2.1.	Tipologías	7
2.2.	Mecanismo de serpiente	8
2.3.	Serpiente con ruedas	9
2.4.	Robot multirueda	9
2.5.	Robot modular con 2 módulos.....	10
2.6.	Tijera adaptable	11
2.7.	Ruedas magnéticas	11
2.8.	Microrobot	12
2.9.	Robot con caterpillars	13
2.10.	Mecanismo de apertura en varilla	13
2.11.	Gusano impulsado por aire	14
2.12.	Cable impulsado por aire	14
2.13.	Robot de agarre por empuje	15
2.14.	Motor esférico	16
3.	Planteamiento Inicial del Problema.....	17
3.1.	Definición y descripción del sistema técnico	17

3.2.	Lista de Exigencias y Deseos	17
3.3.	Análisis de función	19
4.	Selección de Alternativas de Diseño	20
4.1.	Selección de mejores opciones	20
4.2.	Propuesta y elección de diseños	23
4.2.1.	Concepto 2.....	25
4.2.2.	Concepto 3.....	25
4.2.3.	Concepto 4.....	26
4.2.4.	Concepto 5.....	27
4.2.5.	Concepto 6.....	28
4.3.	Diseño final.....	29
5.	Síntesis y Análisis del primer Prototipo	30
5.1.	Diseño Mecánico	30
6.	Realización del prototipo	34
6.1.	Prototipo Virtual 1	34
6.2.	Prototipo Real 1	34
6.3.	Pruebas y rectificación.....	36
6.4.	Prototipo Virtual 2	37
6.5.	Prototipo Real 2.....	38
6.6.	Análisis del prototipo.....	40
6.6.1.	Análisis preliminar	40
6.6.2.	Análisis exhaustivo	40
7.	Optimización del Prototipo	44
8.	Diseño Mecánico.....	45
8.1.	Síntesis estructural y dimensional	45
8.1.1.	Definición del problema.....	45
8.1.2.	Planteamiento cualitativo del problema de síntesis dimensional.....	51
8.1.3.	Planteamiento formal del problema de síntesis dimensional	51

Robot Inspeccionador de Tuberías

8.1.4.	Resolución del problema de síntesis	51
8.1.5.	Conclusiones	52
8.2.	Consideraciones del diseño a partir de cálculos y simulaciones	52
8.2.1.	Cálculos analíticos.....	52
8.2.2.	Simulaciones de resistencia.....	54
8.3.	Modelado Virtual y selección de componentes comerciales.....	54
8.3.1.	Estructura	55
8.3.2.	Tijera	64
8.4.	Módulo entero.....	77
8.5.	Conjunto Total.....	78
8.6.	Rediseño	79
8.6.1.	Robot modificado.....	79
8.6.2.	Robot completo	80
9.	Diseño Electrónico	81
9.1.	Introducción.....	81
9.2.	Movimiento del sistema.....	81
9.2.1.	Movimiento Lineal	81
9.2.2.	Motor de posicionamiento.....	83
9.3.	Sensorización recorrido del tubo	85
9.3.1.	Idea original.....	86
9.3.2.	Sensor de distancia y sensor inercial.....	86
9.4.	Comunicaciones.....	90
9.4.1.	Externas.....	90
9.4.2.	Internas	90
9.5.	Almacenar valores	90
9.6.	Control del sistema	91
9.7.	Alimentación del sistema.....	92
9.8.	Diseño electrónico	93

Robot Inspeccionador de Tuberías

9.8.1.	Circuito de Sensores y control	93
9.8.2.	Circuito de propulsión	98
9.9.	Pruebas del circuito	102
9.10.	Placas de circuito impreso	103
9.10.1.	Reglas generales	103
9.10.2.	Placa de sensorización y control.....	104
9.10.3.	Placa de propulsión.....	106
10.	Diseño de Control.....	108
10.1.	Requisitos previos	108
10.2.	Equipo de control a utilizar	108
10.2.1.	Requisitos	108
10.2.2.	Elección	109
10.3.	Colocación de la inteligencia	110
10.4.	Comunicaciones	110
10.5.	Planificación del Software	111
10.6.	Implementación del código	115
10.6.1.	Estructura básica.....	115
10.6.2.	Elementos extra	115
10.7.	Rendimiento del código en el microcontrolador.....	117
11.	Implementación del Prototipo	118
11.1.	Diferencias con las especificaciones del proyecto.....	118
11.2.	Pedidos comerciales.....	118
11.3.	Procesos de fabricación.....	119
11.3.1.	Impresión 3D	119
11.3.2.	Torneado.....	121
11.3.3.	Fresado.....	121
11.3.4.	Corte con sierra.....	121
11.3.5.	Taladrado	121

Robot Inspeccionador de Tuberías

11.3.6.	Limado y lijado.....	121
11.3.7.	Creación de placas	122
12.	Prototipo Final.....	124
12.1.	Descripción	124
12.2.	Defectos encontrados	127
12.2.1.	Deformación del motor.....	127
12.2.2.	Muelles demasiado duros	127
12.2.3.	Fallos del motor	127
13.	Pruebas del Sistema.....	129
13.1.	Pruebas individuales	129
13.2.	Pruebas conjuntas.....	130
13.3.	Prueba total	132
14.	Calibración Elementos	134
14.1.	IMU genérica	134
14.2.	Detección paro-movimiento.....	134
14.3.	Láser.....	135
14.4.	Finales de carrera	135
15.	Conclusiones	136
16.	Desarrollos Futuros	137
17.	Bibliografía.....	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Foto de los participantes del certamen.[1]	2
Figura 1.2 Tubo y codo montados disponibles para las pruebas.....	4
Figura 1.3 Diagrama de Gantt empleado.	6
Figura 2.1 Tipologías de robot.[2]	7
Figura 2.2 Tipologías de robot 2.[3]	7
Figura 2.3 Movimiento de Serpiente.[4]	8
Figura 2.4 Serpiente con ruedas.[5]	9
Figura 2.5 Multirueda.[6].	9
Figura 2.6 Modular 2 módulos.[7]	10
Figura 2.7 Robot modular, tijera variable.[8].....	11
Figura 2.8 Ruedas magnéticas y tamaño pequeño comparación tubería.[9]	11
Figura 2.9 Microrobot recoge objetos.[10]	12
Figura 2.10 Módulo individual caterpillar.[11].....	13
Figura 2.11 Mecanismo con muelle.[12]	13
Figura 2.12 Neumático movimiento gusano.[13].....	14
Figura 2.13 Cable impulsado por aire.[14]	14
Figura 2.14 Agarre por empuje.[15].....	15
Figura 2.15 Motor esférico ultrasónico.[16]	16
Figura 3.1 Esquema de caja negra del sistema.	17
Figura 3.2 Análisis de función del sistema.	19
Figura 4.1 Concepto 1.	24
Figura 4.2 Concepto 2.	25
Figura 4.3 Concepto 3.	25
Figura 4.4 Concepto 4.	26
Figura 4.5 Concepto 5.	27
Figura 4.6 Concepto 6.	28
Figura 4.7 Diseño final primera fase.	29
Figura 5.1 Ruedas seleccionadas para el robot.	30
Figura 5.2 Etapa de engranajes diseñada.	30
Figura 5.3 Dimensiones principales de los brazos.	31
Figura 5.4 Distribución de fuerzas ejercidas en cada módulo.....	31
Figura 5.5 Distribución de fuerzas en conjunto global.	32

Robot Inspeccionador de Tuberías

Figura 5.6	Diseño de alojamiento para el muelle.....	32
Figura 5.7	Uniones entre soporte de la tuerca del husillo y brazos.....	33
Figura 6.1	Robot completo en CAD.....	34
Figura 6.2	Módulo ensamblado.....	35
Figura 6.3	Prototipo final construido	35
Figura 6.4	Segundo prototipo virtual.	37
Figura 6.5	Incorporación de segundo brazo de apoyo.	37
Figura 6.6	Conexión del motor con el husillo.....	38
Figura 6.7	Apoyos incorporados para la electrónica.....	38
Figura 6.8	Prototipo real implementado.....	39
Figura 6.9	Prueba del robot en la tubería.	39
Figura 6.10	Zona de choque entre los brazos.....	40
Figura 6.11	Giro excesivo de los eslabones debido al juego de las juntas.....	41
Figura 6.12	Separación axial entre los engranajes.	42
Figura 6.13	Falta de límite físico en la tuerca del husillo.	42
Figura 6.14	Deformación axial de los brazos.....	43
Figura 6.15	Deformación del muelle debido a colocación en mala posición.	43
Figura 8.1	Análisis de fuerzas del mecanismo.....	45
Figura 8.2	Representación cinemática del mecanismo.	47
Figura 8.3	Fuerzas actuantes en el mecanismo de tijera.	47
Figura 8.4	DCL eslabón 1.	48
Figura 8.5	DCL eslabón 2.	49
Figura 8.6	Variación de la fuerza a aplicar en el husillo según el diámetro que se recorra.	52
Figura 8.7	Variación del ángulo de la tijera según el diámetro.....	53
Figura 8.8	Aprovechamiento del muelle según diámetro.	53
Figura 8.9	Evolución de la fuerza de tracción máxima y aplicada.	54
Figura 8.10	Estructura del robot.....	55
Figura 8.11	Husillo de rosca trapecial elegido. [20]	56
Figura 8.12	Tuerca seleccionada para el husillo.	56
Figura 8.13	Motor PAP utilizado.[22]	57
Figura 8.14	Acoplamiento flexible seleccionado.....	57
Figura 8.15	Rebajes en husillo para realizar los apoyos.	58
Figura 8.16	Rodamiento 626-2Z seleccionado.	58
Figura 8.17	Adaptador tuerca.....	59
Figura 8.18	Contrasoporte.....	60

Robot Inspeccionador de Tuberías

Figura 8.19 Avellanados para tornillos del sensor de distancia.	60
Figura 8.20 Soporte.	61
Figura 8.21 Unión de la estructura.	62
Figura 8.22 Casquillo, varilla y tuercas para la unión.	62
Figura 8.23 Situación electrónica.	63
Figura 8.24 Tornillos elegidos.	64
Figura 8.25 Tijera.	65
Figura 8.26 Cavidad del brazo exterior para el interior.	66
Figura 8.27 Medida parte anterior.	67
Figura 8.28 Medida parte posterior.	67
Figura 8.29 Tamaño relativo entre agujero y forma de eslabón para compatibilidad.	68
Figura 8.30 Rebaje del inicio del eslabón.	68
Figura 8.31 Forma para evitar contacto y definir límites.	69
Figura 8.32 Mecanismo de amortiguación.	70
Figura 8.33 Cierre de forma de las piezas.	70
Figura 8.34 Posición de los colisos.	71
Figura 8.35 Extensión simple.	72
Figura 8.36 Extensión para el motor.	73
Figura 8.37 Separación entre ejes.	74
Figura 8.38 Transmisión del motor.	74
Figura 8.39 Núcleo de rueda con eje achaflanado.	75
Figura 8.40 Núcleo rueda conducida.	76
Figura 8.41 Rueda motriz.	76
Figura 8.42 Eje de la rueda motriz.	77
Figura 8.43 Módulo del robot.	77
Figura 8.44 Conjunto total del robot con los dos módulos.	78
Figura 8.45 Módulo del robot modificado.	79
Figura 8.46 RITA modificada.	80
Figura 9.1 Motor DC seleccionado.[23].	82
Figura 9.2 Paralelización puertos L298.[24]	83
Figura 9.3 Motor PAP con husillo incorporado.[25]	84
Figura 9.4 Motor PAP extraplano.[22].	84
Figura 9.5 Driver para motor PAP, DRV8825.[26]	85
Figura 9.6 Idea barrido con sensor de distancia.[28]	86
Figura 9.7 Posibilidades de medidas de distancia.[29]	87

Figura 9.8	Séñor de distancia LIDAR Lite v3[31].	87
Figura 9.9	IMU BNO055 de Adafruit.[32]	88
Figura 9.10	Encoder acoplado en el motor.[33]	89
Figura 9.11	Finales de carrera utilizados.	89
Figura 9.12	Módulo tarjeta SD.[34]	91
Figura 9.13	Arduino Mega.[35]	91
Figura 9.14	Circuito de sensores y control.	93
Figura 9.15	Conexiones al Arduino.	94
Figura 9.16	Detección del sentido de giro.[37]	95
Figura 9.17	Proceso de detección de pulsos.[37]	95
Figura 9.18	Sensores I2C.	96
Figura 9.19	Adaptador tarjeta microSDHC.	96
Figura 9.20	Driver motor PAP.	96
Figura 9.21	Conector JST macho y hembra.	97
Figura 9.22	Cable con terminal JST de conexión.	97
Figura 9.23	Entrad de alimentación.	98
Figura 9.24	Circuito de propulsión.	99
Figura 9.25	Conectores de los motores.	100
Figura 9.26	Driver del motor de DC.	100
Figura 9.27	Señales de activación.	101
Figura 9.28	Puente de diodos empleado.	101
Figura 9.29	Prueba del láser, IMU, y escritura en la SD simultáneamente.	102
Figura 9.30	Prueba del circuito de control del motor DC.	103
Figura 9.31	PCB sensorización y control.	105
Figura 9.32	Vista 3D preliminar de la placa de sensorización y control.	105
Figura 9.33	Variante de la placa para el segundo módulo.	106
Figura 9.34	PCB de propulsión.	107
Figura 9.35	Vista preliminar en 3D de la placa de propulsión.	107
Figura 10.1	Statechart.	114
Figura 10.2	Resultado de compilación en la interfaz de Arduino.	117
Figura 10.3	Resumen de la compilación.	117
Figura 11.1	Comprobación de número de elementos e inspección primaria de medidas.	119
Figura 11.2	Impresora 3D utilizada.	119
Figura 11.3	Geometría a imprimir (rojo), soportes (morado).	120
Figura 11.4	Misma pieza durante distintas etapas de impresión.	120

Robot Inspeccionador de Tuberías

Figura 11.5 Placa de control soldada cara TOP.	122
Figura 11.6 Placa de control soldada, cara BOTTOM.	122
Figura 11.7 Placa de propulsión soldada, cara TOP.	123
Figura 11.8 Placa de propulsión soldada, cara BOTTOM.	123
Figura 12.1 Prototipo final terminado.	124
Figura 12.2 Robot con cámara integrada.	125
Figura 12.3 Robot sujeto en el interior del tubo en posición vertical.	126
Figura 12.4 Pesaje del módulo.	126
Figura 12.5 Pesaje de las placas.	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tareas que incluye el diagrama de Gantt	5
Tabla 3.1 Lista de Exigencias y Deseos.	18
Tabla 4.1 Selección de Propulsión.	21
Tabla 4.2 Selección Posicionamiento en Diámetro.....	22
Tabla 4.3 Selección Propulsión.	23
Tabla 9.1 Interrupciones Arduino Mega.	92
Tabla 10.1 Características de memoria del ATmega 2560.	110
Tabla 10.2 Elementos que intervienen en el Statechart.	111
Tabla 10.3 Lista de estados del sistema.	112
Tabla 10.4 Activación de transiciones.	112
Tabla 13.1 Pruebas individuales Mecánicas.	129
Tabla 13.2 Pruebas individuales electrónicas.	130
Tabla 13.3 Pruebas conjuntas Mecánicas.....	131
Tabla 13.4 Pruebas conjuntas electrónicas.....	132
Tabla 13.5 Pruebas totales.....	133

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivo

El objetivo de este trabajo es el diseño de un equipo de robot que pueda inspeccionar el interior de tuberías. También, como objetivos específicos estarían: el superar codos de 45 y 90° y ascender por tuberías verticales; cubriendo de esta forma los requisitos generales que presenta cualquier instalación industrial.

De forma paralela, se plantea la posibilidad de que el prototipo sea escalable, es decir, que se pueda con pequeñas variaciones en el sistema recorrer diferentes formatos de tubería; y que el robot pueda realizar un mapa de la red de tuberías.

1.2. Alcance

El alcance del proyecto será: el diseño mecánico de un prototipo que pueda moverse en todo tipo de tubos, así como los mecanismos necesarios para ello; la electrónica que rige los actuadores y sensores; el control de todo el sistema en todas sus funciones (inspección, sensorización, actuación sobre dispositivos); Incluyendo también, el resto de sistemas que permiten a los anteriores trabajar de forma eficaz.

Están incluidos, por supuesto, los cálculos y estudios físicos que dan soporte a la teoría de funcionamiento del prototipo actual.

1.3. Antecedentes

1.3.1. Desarrollos previos

El proyecto surge a partir de la idea de usar un robot con ruedas para recorrer la periferia de un tubo.

En el trabajo inicial se pudieron detectar deficiencias tanto en el montaje final del prototipo, como en el conducto donde se testeó. Todas estas incidencias impedían el funcionamiento óptimo en casos reales, por lo que se comprobó la necesidad de desarrollar un nuevo prototipo que las subsanase.

Para ello, un equipo de trabajo formado por estudiantes escoceses y alumnos de la Universidad de Oviedo, entre los que se incluye el autor de este texto, tomaron el relevo. Esta colaboración

Robot Inspeccionador de Tuberías

culminó con la construcción de un prototipo y pruebas de funcionamiento, dando solución a algunos de los problemas previos.

Esta propuesta participó en el programa “Tengo una Idea” obteniendo uno de los premios para el desarrollo del prototipo por valor de 1500 €, financiado por la empresa Arcelor Mittal I+D.



Figura 1.1 Foto de los participantes del certamen.[1]

La última fase de desarrollo, ya llevada a cabo en solitario por el autor del presente material, y con la finalidad de perfeccionar más el prototipo ganador, se centró en la mejora de los siguientes aspectos:

- Análisis del funcionamiento mecánico elemental del prototipo.
- Electrónica más orientada a la aplicación.
- Control y programación del robot.

En definitiva, de integrar todos los aspectos del robot con el objetivo de conseguir un prototipo más funcional, partiendo de la idea y los objetivos originales, aunque el proceso de diseño haya seguido un camino diferente.

1.3.2. Estudio del estado del arte e interés del robot propuesto

Existen diversos robots que recorren tramos de tuberías, pero la posibilidad de realizar giros y ascensiones no son características que poseen la mayoría de ellos.

Es decir, que, aunque existen numerosos prototipos, por norma general son diseños específicos para la casuística concreta de cada tubería y/o industria, no existiendo ninguno que cubra todos

los obstáculos comunes. No obstante, la gran variedad de robots existentes nos permite analizar los diferentes tipos de soluciones planteados en cada caso.

1.4. Especificaciones del diseño y datos de partida

Al inicio del diseño, se ha partido de una serie de especificaciones preestablecidas que debe cumplir el robot:

- Poder moverse con soltura en redes de tuberías de 200 mm de diámetro.
- Superar obstáculos comunes, como codos a 45° grados.
- Subir por tramos verticales asegurando su movimiento en la situación más desfavorable posible.
- Ser ligero para facilitar su movimiento y traslado a los lugares a inspeccionar.
- Ser de fácil replicación, de manera que su reproducción o fabricación no sean difíciles de imitar.
- Extracción con facilidad, del dispositivo, en caso de emergencia o fallo del sistema, una vez en el interior de los conductos.
- Fácil incorporación de herramientas o accesorios necesarios en el soporte según el tipo de instalación a supervisar.

Como datos de partida se investigó el tipo de conductos a utilizar durante las pruebas:

- Tubo de 200 mm y 1 m de longitud para chimeneas según la norma UNE-EN 1856-2 2010 11 0407-CPD-603 T600 N1 D Vm L20080G. Con denominación TUBO diámetro 200x1000 INOX 304/0,8 mm.
- Codo de 45° para chimeneas equivalentes según la norma UNE-EN 1856-2 2010 11 0407-CPD-6023 00 N1 D Vin L20080 G. Con denominación Codo 2P 45° diámetro 200 INOX 304/0,8 mm.



Figura 1.2 Tubo y codo montados disponibles para las pruebas.

Cabe mencionar que las especificaciones afectan directamente al diseño global del prototipo teniendo que cumplirlas en el diseño; sin embargo, los datos de partida son orientativos y se cumplirán para realizar la pruebas y ensayos, pero no son universales pudiendo cambiar según las necesidades en cada trabajo de inspección futuro.

1.5. Organización del proyecto

Se empleó un diagrama de Gantt para la organización de tareas.

Robot Inspeccionador de Tuberías

	Tareas	Fecha inicio	Duración	Fecha fin
Estudio del problema	Tarea A.	01/10/2016	75	15/12/2016
Estudio del estado del arte	A.1.	01/10/2016	75	15/12/2016
Estudio de posibles opciones	A.2.	13/10/2016	9	22/10/2016
Test sobre prototipo previo	A.3.	01/10/2016	7	08/10/2016
Fusión ideas con prototipo anterior	A.4.	08/10/2016	14	22/10/2016
Estudio y selección de alternativas	Tarea B	07/10/2016	21	28/10/2016
Creación de análisis de función del diseño	B.1	07/10/2016	7	14/10/2016
Creación de distintas alternativas	B.2.	14/10/2016	10	24/10/2016
Tormenta de ideas (Brainstorming)	B.3.	24/10/2016	1	25/10/2016
Selección de mejores ideas VDI 225	B.4.	25/10/2016	3	28/10/2016
Diseño mecánico	Tarea C	28/10/2016	40	07/12/2016
Creación de bocetos	C.1	28/10/2016	5	02/11/2016
Desarrollo del dibujo 3D	C.2.	02/11/2016	30	02/12/2016
Cálculo de los elementos comerciales	C.3.	17/11/2016	4	21/11/2016
Cálculo de resistencia de los elementos	C.4.	25/11/2016	4	29/11/2016
Comprobaciones de cálculos y resto del sistema	C.5.	02/12/2016	5	07/12/2016
Diseño electrónico	Tarea D	10/11/2016	119	09/03/2017
Estudio de las necesidades y especificaciones	D.1	10/11/2016	25	05/12/2016
Diseño sistema de posicionamiento	D.2.	17/11/2016	45	01/01/2017
Selección de elementos	D.3.	01/01/2017	22	23/01/2017
Creación de protocolos de comunicación	D.4.	08/12/2016	32	09/01/2017
Creación de código de hardware	D.5.	15/12/2016	14	29/12/2016
Diseño de placa circuito impreso	D.6.	23/01/2017	15	07/02/2017
Creación y testeo placa circuito impreso	D.7.	07/02/2017	15	22/02/2017
Comprobación conjunto electrónico total	D.8.	22/02/2017	15	09/03/2017
Diseño control y software	Tarea E	17/11/2016	130	27/03/2017
Diseño de control del sistema	E.1	22/11/2016	45	06/01/2017
Diseño de códigos para cálculo de los sistemas	E.2.	17/11/2016	105	02/03/2017
Diseño diagrama de estados	E.3.	27/02/2017	17	16/03/2017
Diseño de sistema de comunicación	E.4.	08/12/2016	21	29/12/2016
Creación código global del sistema	E.5.	17/11/2016	130	27/03/2017
Creación de prototipo y optimización	Tarea F	27/03/2017	89	24/06/2017
Creación prototipo final	F.1	27/03/2017	30	26/04/2017
Optimización y corrección de fallos	F.2.	26/04/2017	15	11/05/2017
Definición prototipo final	F.3.	11/05/2017	9	20/05/2017
Pautas y cambios para definición de robot final	F.4.	20/05/2017	35	24/06/2017
Desarrollo de documentación asociada	Tarea G	08/12/2016	219	15/07/2017
Redacción de la memoria	G.1	08/12/2016	219	15/07/2017
Creación del presupuesto	G.2.	24/06/2017	11	05/07/2017
Realización de los planos del equipo	G.3.	27/03/2017	54	20/05/2017
Revisión del proyecto	Tarea H	02/12/2016	225	15/07/2017
Revisión de los cálculos y el diseño	H.1	02/12/2016	190	10/06/2017
Revisión de la documentación	H.2.	08/12/2016	209	05/07/2017
Organización y entrega de todos los documentos	H.3.	05/07/2017	10	15/07/2017

Tabla 1.1 Tareas que incluye el diagrama de Gantt

Robot Inspeccionador de Tuberías

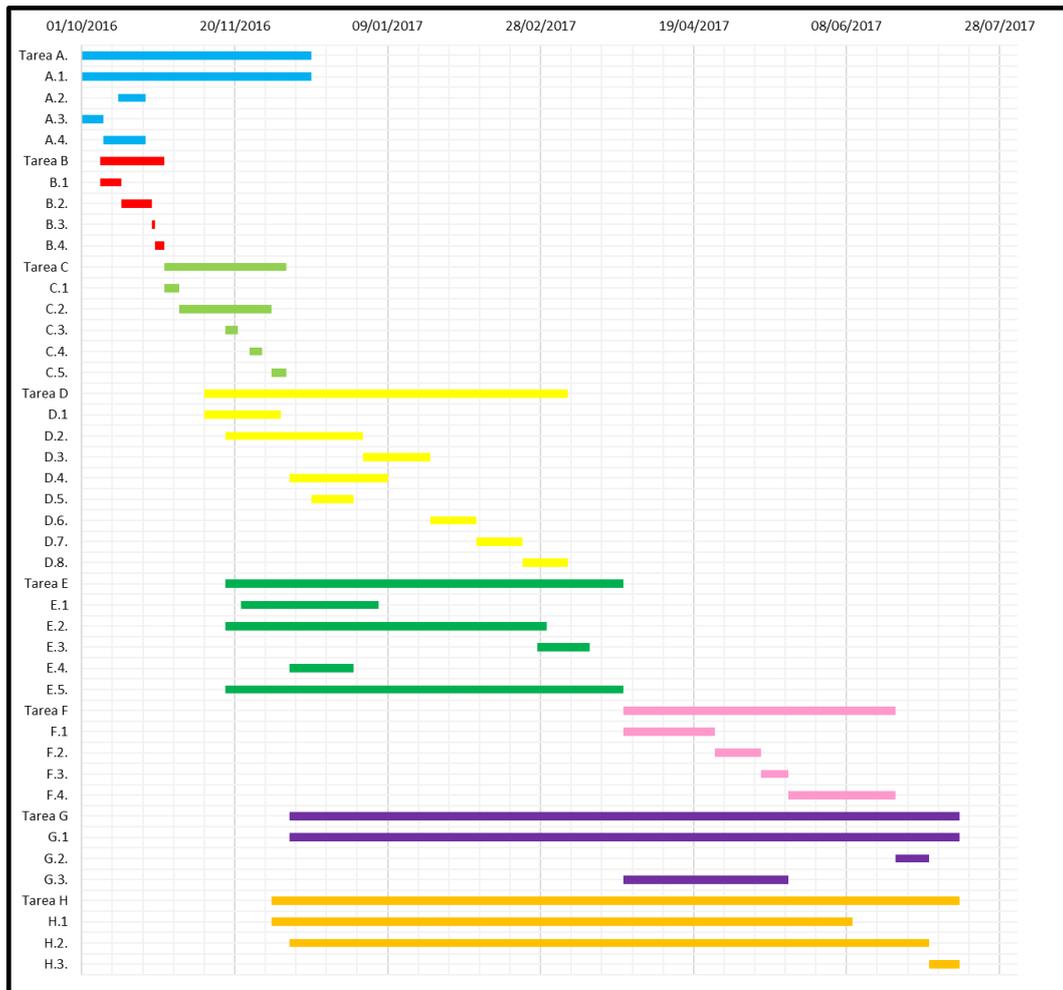


Figura 1.3 Diagrama de Gantt empleado.

1.6. Desarrollo del trabajo y organización documental

El trabajo ha sido desarrollado en dos fases diferentes en cuanto al rol y funciones asumidas por el autor del mismo. En la primera, como colaborador en el estudio de las ideas iniciales, generación de alternativas y realización del prototipo electrónico.

En la segunda fase, y ya de forma individual, se ha llevado a cabo todas las tareas de desarrollo del prototipo (diseño, fabricación, análisis, simulaciones, redacción de la documentación...), partiéndose del anterior robot e introduciendo todas las modificaciones que se han considerado necesarias.

Como estas tareas se han realizado de forma simultánea, la documentación reflejará todas las decisiones tomadas durante el proceso, que incluyen elecciones de diseño y cambios en la fabricación y gestión de pedidos. Por tanto, todos estos apartados serán abordados a lo largo del documento.

2. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE

Se realizó un estudio para ver qué soluciones podían aportar, en nuestro caso, otros robots que realizaran también tareas de inspección en el interior de tuberías. El objetivo de éste, era el conocer mejor la problemática, averiguar que partes son más sensibles ante posibles fallos y qué campos de mejora existen en cada una de las facetas que ha de solucionar nuestro robot.

Tras realizar una primera investigación sobre tipos de robots que realizan estas funciones se ha podido comprobar que no existe ningún diseño definido. Hay muchas opciones y muy diferentes en cuanto a cómo abordar el problema, existiendo, incluso, artículos cuyo único propósito es analizar las diferentes tipologías y que ventajas y desventajas tiene cada una.

2.1. Tipologías

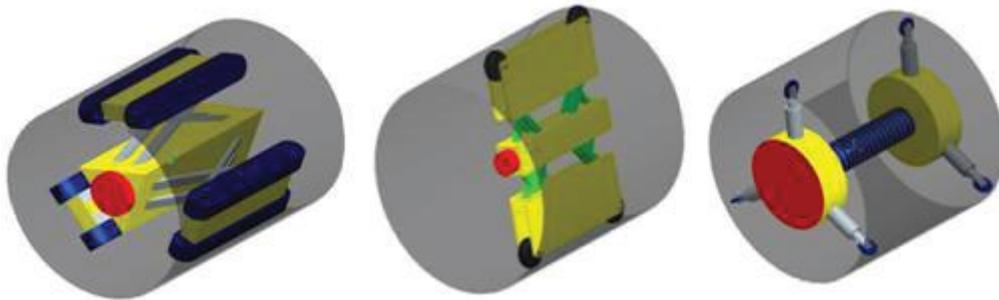


Figura 2.1 Tipologías de robot.[2]

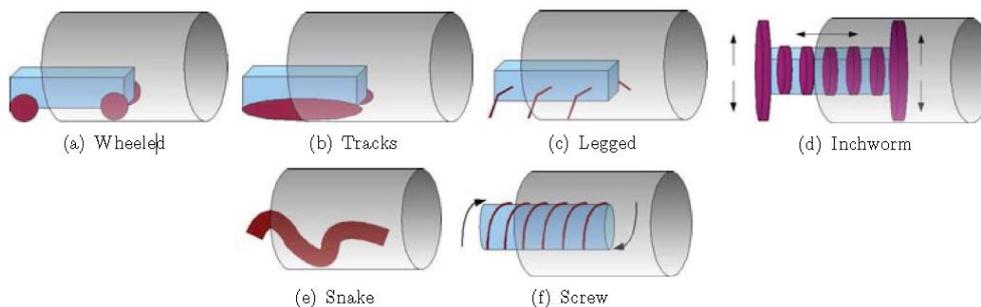


Figura 2.2 Tipologías de robot 2.[3]

Como podemos ver en ambas clasificaciones existen varias configuraciones. Éstas se caracterizan, generalmente, por el tipo de movimiento o bien por la forma en que éste se consigue. Como se puede observar en la imagen anterior, se trata de una clasificación más orientada a diseños básicos sobre formas de propulsión. Mientras que en la figura 2.1 vemos que los clasifica según la forma de agarre al tubo, o dicho de otra forma, una clasificación dentro del tipo (a) de la figura 2.2.

Estas clasificaciones son muy generalistas, existiendo cientos de soluciones distintas y variando según el tipo de test a realizar, las condiciones de prueba o incluso las circunstancias internas del tubo.

Dentro del estudio realizado se han observado muchos más artículos, pero se ha decidido presentar los más significativos o aquellos cuyo mecanismo es completamente diferente al resto.

2.2. Mecanismo de serpiente

Este mecanismo se basa en la idea del movimiento de una serpiente a lo largo de un tubo.

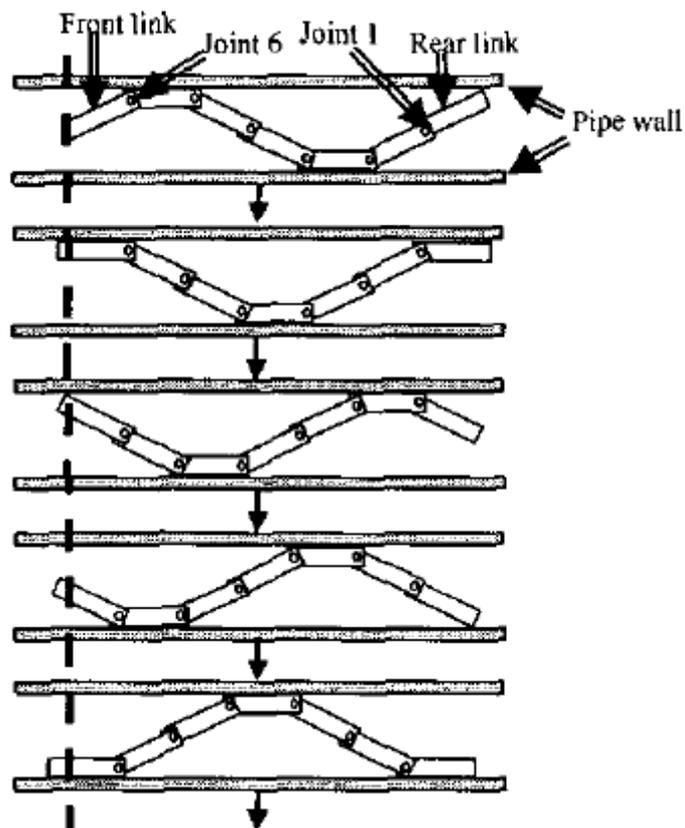


Figura 2.3 Movimiento de Serpiente.[4]

Esta idea tiene claras ventajas en cuanto a adaptabilidad de tamaños (18 mm a 100 mm)[4], formas y elementos que podemos encontrar incrustados en la tubería. Además, puede solventar bien forma de avance al entrar en una sección en forma de T.

Las limitaciones que tiene son claras, ya que no puede subir por tramos verticales lo que limita su inspección a tramos planos o con pendientes ligeras. Esto implica que este mecanismo no sería el más adecuado para aplicaciones como la que queremos conseguir.

2.3. Serpiente con ruedas

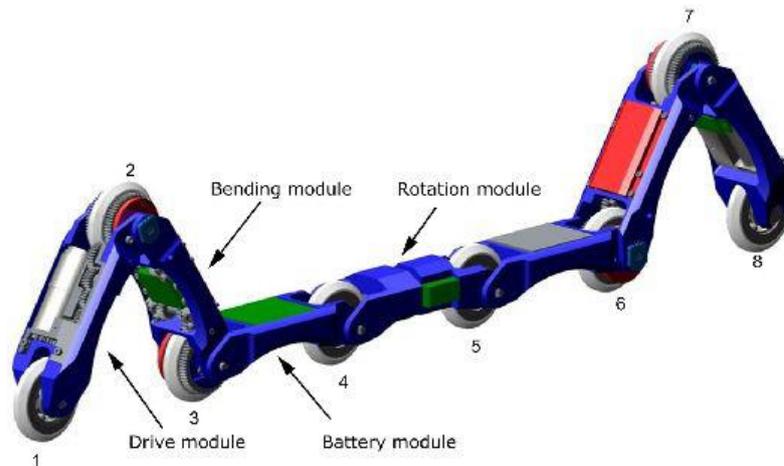


Figura 2.4 Serpiente con ruedas.[5]

Esta revisión de una serpiente, añade ruedas en el cuerpo del robot, lo que implica un mayor contacto y un movimiento más eficiente por el tubo ya que se mueve con la rodadura de las ruedas en lugar de un rozamiento por deslizamiento. Otro aspecto interesante, es el uso de ruedas en módulos, para así mantener el contacto en los puntos más necesarios en cada caso, siendo de vital importancia pues le permite superar codos tanto con bordes rectos como con redondeados.

Sus desventajas son que el rango de trabajo (57-119 mm) es pequeño en comparación a su peso total (2,1 kg) [5] y que requiere elementos de alta tecnología y hechos a medida, incrementando bastante el coste y sencillez de fabricación.

2.4. Robot multirueda

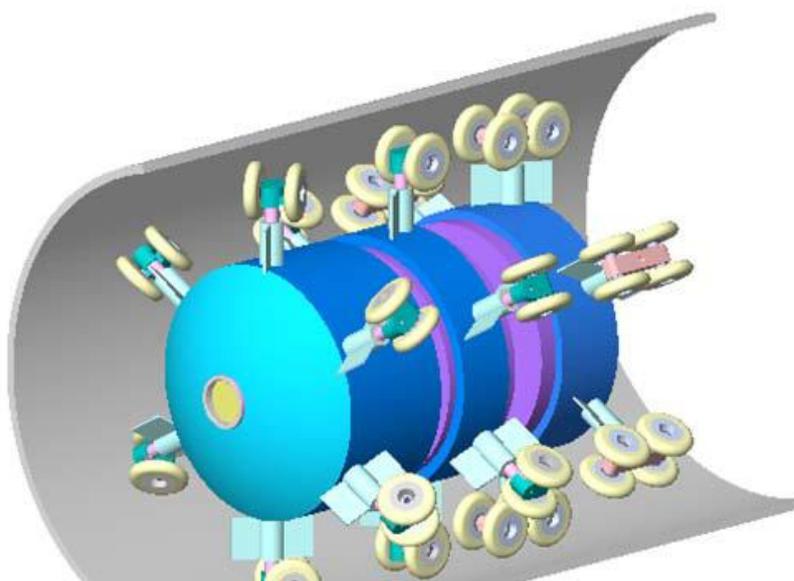


Figura 2.5 Multirueda.[6].

Robot Inspeccionador de Tuberías

Este robot se basa en la idea de motorizar todas las ruedas posibles y para ello incorpora ruedas con inclinación respecto al avance del tubo, estando colocadas en un soporte circular. Éste está accionado de manera que gira sobre su propio eje de avance y, por tanto, el robot camina como consecuencia del ángulo de estas ruedas.

Una ventaja derivada de este diseño con varias ruedas, es que puede superar cierres de sección con facilidad, incluso cuando son cambios de sección abruptos.

No se ha podido comprobar si es capaz de superar obstáculos de tipo curvo u otras geometrías similares, aunque el mecanismo de adaptación a diámetros es muy eficiente.

2.5. Robot modular con 2 módulos

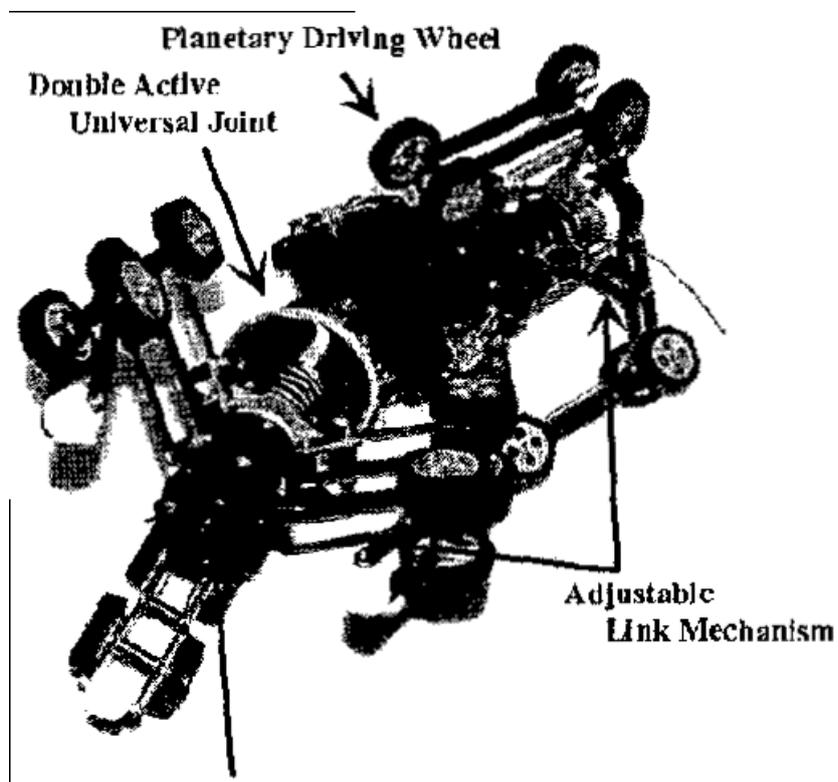


Figura 2.6 Modular 2 módulos.[7]

Este robot realiza movimientos en tramos verticales, horizontales, supera codos y perfiles en T. Además, las ruedas tienen un ajuste al diámetro. En general, estas características cubren bastante bien aspectos que nosotros consideramos necesarios en nuestro robot. Sin embargo, desconocemos el diámetro estudiado, pero parece demasiado grande, lo que complicaría su adaptación a nuestras capacidades de ensayo.

2.6. Tijera adaptable

Este prototipo se basa en un robot de un solo módulo cuyo objetivo es superar cualquier tipo de curva u obstáculo geométrico dado. Se basa en ruedas articuladas en los extremos que permiten modificar la posición activamente. De esta manera consiguiendo diferentes distribuciones de posiciones y ángulos se consigue la geometría ideal para superar el obstáculo.

Es un sistema muy eficiente y compacto.

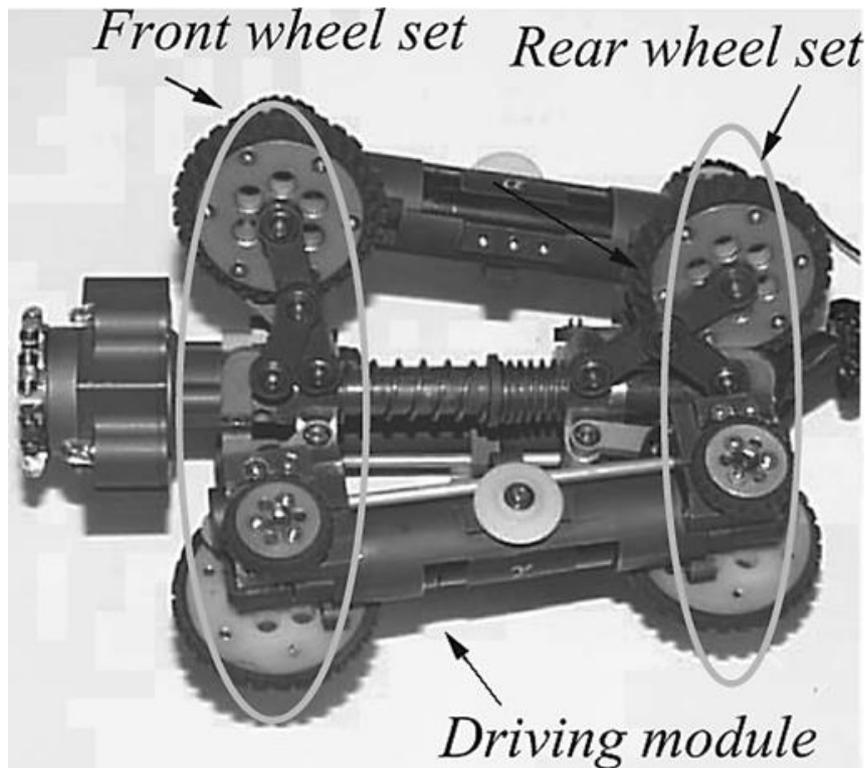


Figura 2.7 Robot modular, tijera variable.[8]

2.7. Ruedas magnéticas

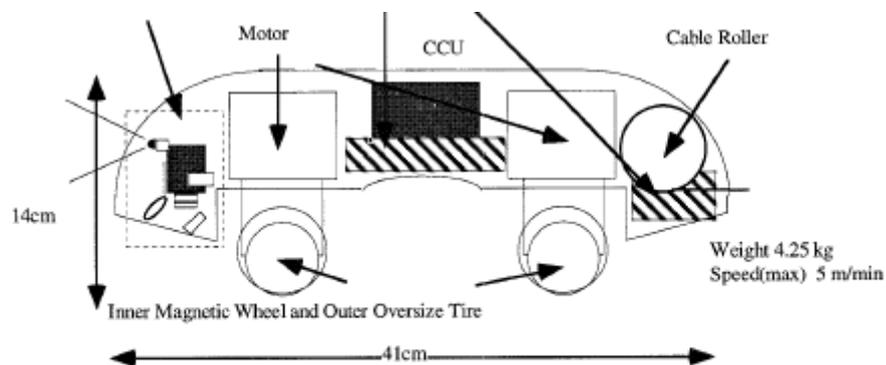


Fig. 11 Conceptual Configuration of Prototype

Figura 2.8 Ruedas magnéticas y tamaño pequeño comparación tubería.[9]

Robot Inspeccionador de Tuberías

Este prototipo es muy interesante pues renuncia al contacto en todo el perímetro del tubo y se centra en mantener el robot lo más pequeño posible, consiguiendo con esta premisa un movimiento ágil. No obstante, su peculiaridad está en el sistema de agarre mediante ruedas magnéticas, por lo que su uso se limita a trabajar en tuberías con materiales con capacidad magnética; pero asegura el movimiento y la simplicidad del diseño.

2.8. Microrobot

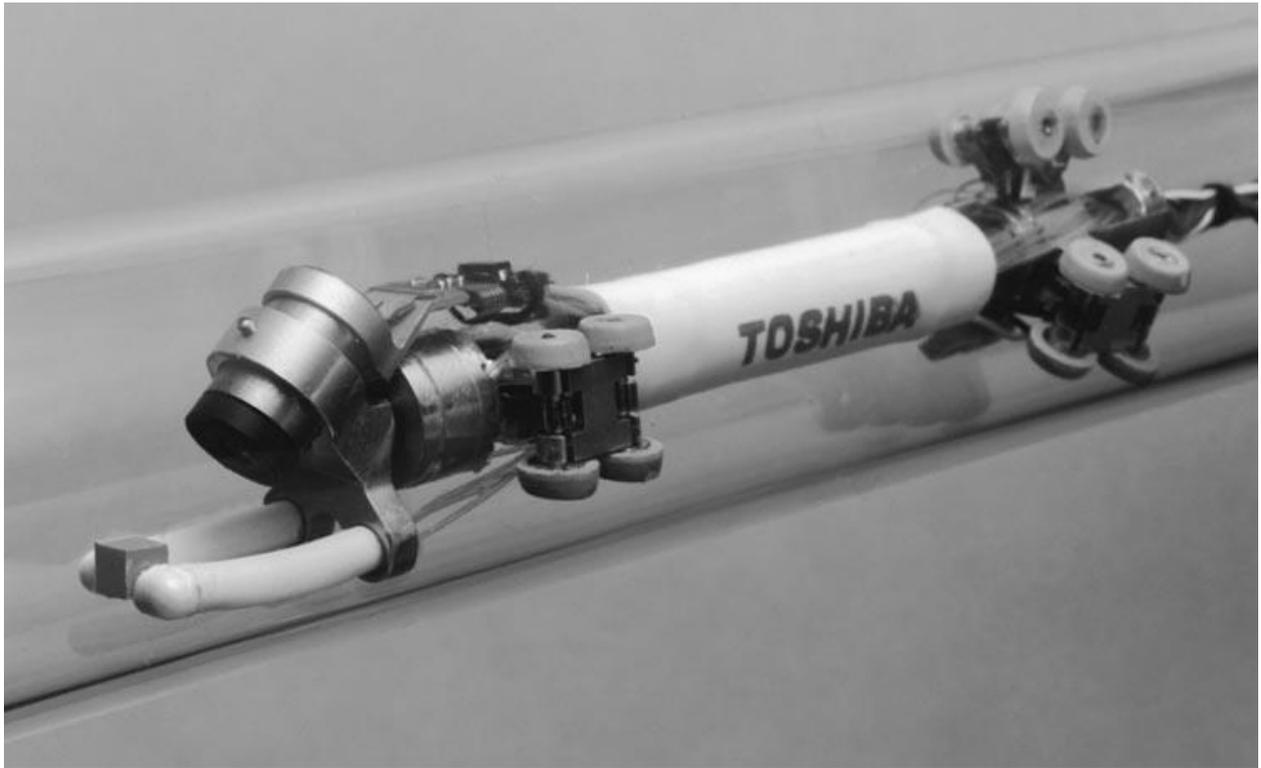


Figura 2.9 Microrobot recoge objetos.[10]

Este robot se caracteriza por su muy reducido tamaño y número de componentes, lo que le hace muy interesante para su uso en conductos de muy poco diámetro en los que componentes de tamaño pequeño habituales siguen siendo insuficientes.

Es interesante su aplicación para recoger objetos pequeños.

2.9. Robot con caterpillars

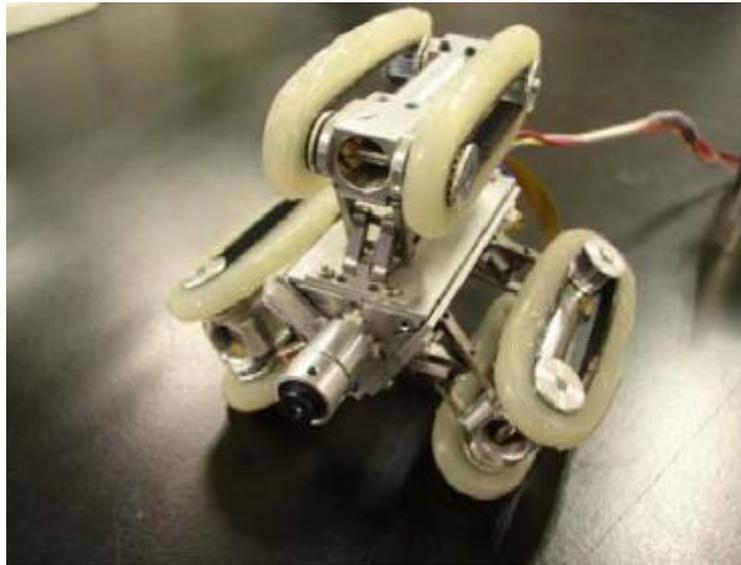


Figura 2.10 Módulo individual caterpillar.[11]

Llama la atención en este diseño su método de propulsión, ya que emplea las partes trasera y delantera de apoyo como un único elemento gracias a los caterpillars.

2.10.Mecanismo de apertura en varilla



Figura 2.11 Mecanismo con muelle.[12]

Este modelo se caracteriza por un usar un sistema de apertura con un mecanismo muy simple. Esta incorporación le permite conseguir diámetros muy superiores al mínimo sin añadir demasiado peso al conjunto. Esto lo hace gracias a una varilla central que es el soporte de todo el conjunto y tiene un diámetro muy reducido.

2.11. Gusano impulsado por aire

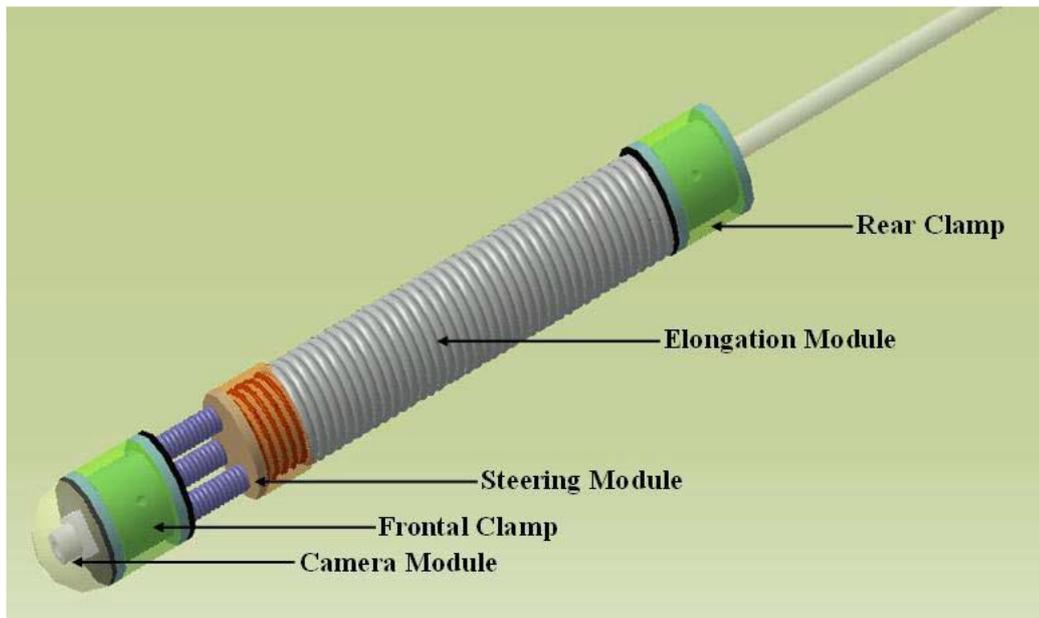


Figura 2.12 Neumático movimiento gusano.[13]

Esta propuesta utiliza el modelo de un gusano, pero el accionamiento está realizado por métodos neumáticos; lo que le diferencia de otros modelos reptantes.

2.12. Cable impulsado por aire

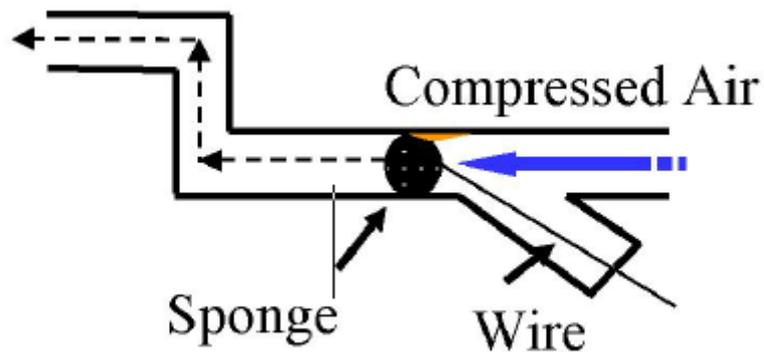


Figura 2.13 Cable impulsado por aire.[14]

Esta idea se basa en la simplicidad de incorporar un cable y una esponja. Al introducir aire comprimido, el conjunto se va moviendo y recorriendo el tubo. Si se añaden sensores y una cámara se puede realizar la inspección de una red de tubos.

2.13. Robot de agarre por empuje

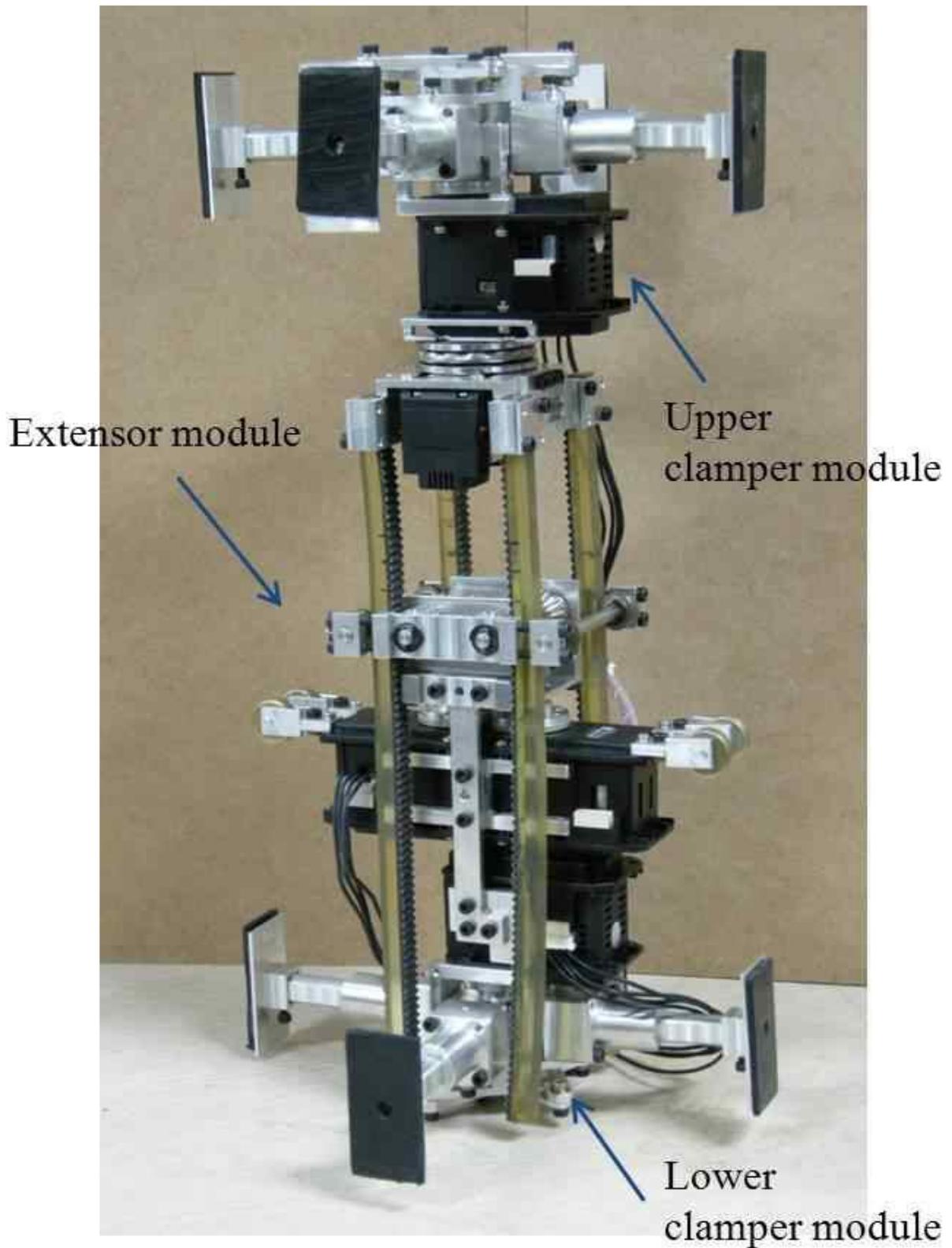


Figura 2.14 Agarre por empuje.[15]

Robot Inspeccionador de Tuberías

Esta versión utiliza unas placas que se abren y se cierran. Al cerrarse generan una fuerza de agarre extra que proporciona un agarre en el tubo, mediante el módulo extensor y otro juego de placas para el agarre en otra zona, consiguiéndose que el robot avance.

2.14.Motor esférico

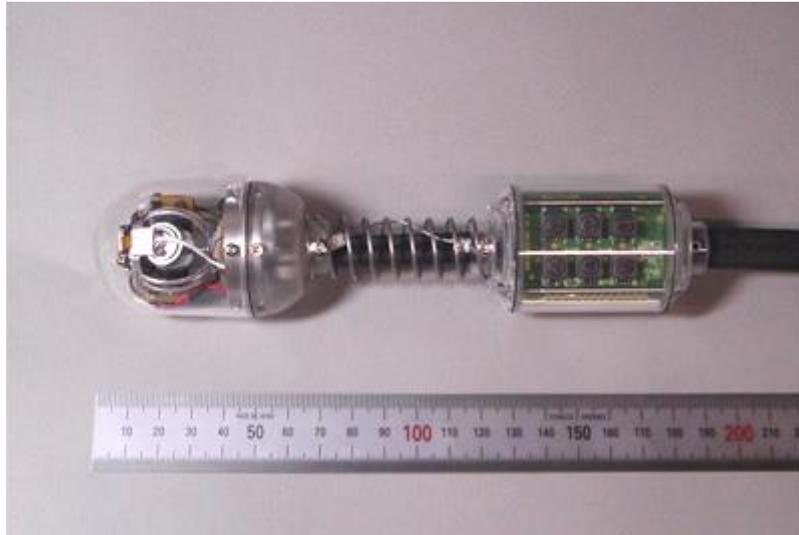


Figura 2.15 Motor esférico ultrasónico.[16]

La particularidad de esta alternativa es que usa un motor esférico movido por ultrasonidos para avanzar.

3. PLANTEAMIENTO INICIAL DEL PROBLEMA

3.1. Definición y descripción del sistema técnico

El proyecto consiste en conseguir un robot que pueda recorrer el interior de tuberías con cualquier orientación y superar obstáculos de recorrido como codos y rebajes de tamaño. Para definir con mayor precisión las actividades a desarrollar realizaremos un esquema de caja negra para identificar las entradas y salidas de nuestro sistema.



Figura 3.1 Esquema de caja negra del sistema.

Con este esquema identificamos que nuestro sistema debe introducir una energía y unas señales de control realimentadas al inicio para que ejerza unas salidas u “outputs” que permitan al robot moverse. En otras palabras, debe agarrarse al tubo y moverse para realizar su propósito. Como consecuencia de movimientos mecánicos se producirán una serie de vibraciones que estarán presentes en los órganos de movimiento del sistema.

Por último, recogeremos datos del sistema para efectuar el control y poder extraer conclusiones del movimiento de nuestro prototipo.

3.2. Lista de Exigencias y Deseos

Para comprender de manera más eficaz que características ha de incorporar el robot dejaremos constancia de las necesidades que debe cubrir, así como los deseos que podrían dar un mejor valor al proyecto. Estas demandas adicionales no son obligatorias, pero han de intentarse para obtener un mejor resultado.

Robot Inspeccionador de Tuberías

Fecha	E/D	Descripción
04/10/2016	E	Moverse con soldadura en tuberías de diámetro nominal de 200 mm.
04/10/2016	E	Superar obstáculos de codos a 45° generalmente.
04/10/2016	E	Ascender en tramos verticales, la situación más desfavorable para recorrer.
04/10/2016	D	Mayor ligereza posible.
04/10/2016	E	Fácil traslado de un punto de inspección a otro.
04/10/2016	E	Replicación sencilla.
04/10/2016	E	Extracción sencilla en caso de malfuncionamiento en el sistema.
04/10/2016	D	Modularidad para introducir distintas herramientas de inspección o trabajo en el interior del tubo.
25/11/2016	E	Alimentación principal por cable para extracción sencilla.
25/11/2016	E	Superación de cambios de sección abruptos en el recorrido.
25/11/2016	D	Fácil escalabilidad del prototipo para tuberías de diámetros grandes (Mayor 1500 y menor de 4500 mm).
25/11/2016	E	Presupuesto de fabricación por debajo de 1500 €.
31/01/2017	E	Solucionar fallo interferencia primer prototipo.
31/01/2017	E	Mejorar el movimiento de las juntas del prototipo.
31/01/2017	E	Conseguir engranajes sin deslizamiento y mayor duración.
31/01/2017	E	Mejorar zona de trabajo del muelle.
31/01/2017	E	Utilizar ruedas con mayor fricción y menor deformación.

Tabla 3.1 Lista de Exigencias y Deseos.

Esta lista de exigencias se ha ido actualizando según avanzaba el proyecto. Siendo las primeras las realizadas al inicio. Las de las fechas intermedias corresponden a ideas aportadas por la empresa colaboradora Arcelor Mittal I+D. Las últimas exigencias corresponden a la segunda etapa del proyecto en la que se desarrollará la mejora del robot desde un punto de vista mecatrónico.

3.3. Análisis de función

A partir del diseño de la caja negra, pasamos a subdividir el problema en distintas acciones y más reducidas en cuanto a complejidad. De este modo, lograremos crear tareas pequeñas que serán más fáciles de diseñar y analizar su viabilidad. Para ello, se creará un análisis de función del sistema que muestre estas divisiones y sus interacciones tanto recíprocas como con los elementos de entrada y salida.

A partir de este análisis se hará una tormenta de ideas para discutir las posibles alternativas y ver cuáles son mejores o tienen más posibilidades de éxito.

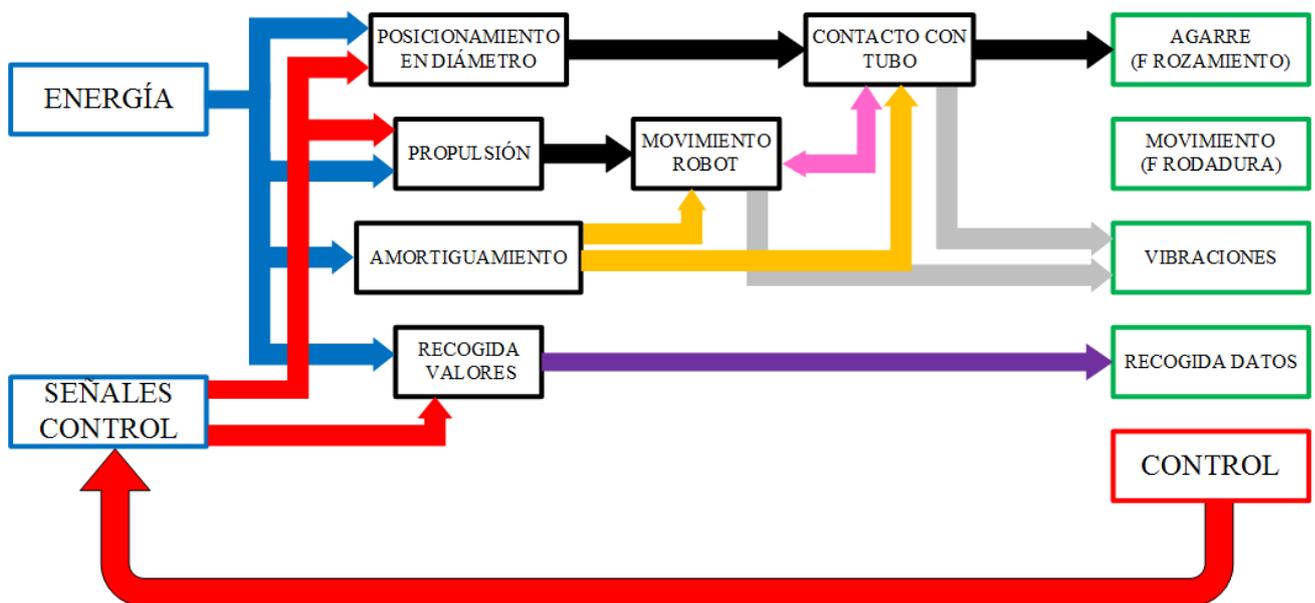


Figura 3.2 Análisis de función del sistema.

4. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO

4.1. Selección de mejores opciones

A partir del análisis de función pasaremos a realizar el análisis de las posibles alternativas para cada subparte. En principio, dejaremos de lado las siguientes partes puesto que son secundarias en un primer diseño:

- Contacto con tubo: por simplicidad en el acopio de materiales y su menor precio se utilizarán ruedas con neumáticos ya disponibles en el laboratorio.
- Amortiguamiento: se usarán muelles disponibles en una estructura de amortiguador simple con muelle.
- Recogida de valores: se realizará mediante electrónica comercial, lo que no tiene sentido estudiarlo desde cero en esta primera etapa.

Los conceptos de cada una de las partes a evaluar son propulsión, movimiento del robot, posicionamiento en diámetro.

La selección de alternativas y propuesta de ideas se realizó en equipo con los otros estudiantes en la primera fase del proyecto. Se decidió por consenso la utilización de un método de selección parecido a la VDI 2225, utilizado en su Universidad y conocido como “Selección de conceptos de Pugh”. Se basa en asignar una solución como la estándar (DATUM) y evaluar el resto en comparación a esta.

Robot Inspeccionador de Tuberías

Concepto	Orugas	Ruedas	Tipo gusano	Superficie deslizante	Serpiente	Andador
Maniobrabilidad Horizontal		+	-	-	-	-
Maniobrabilidad Vertical		S	+	-	-	-
Paso de dobleces tubo		+	-	-	+	+
Tracción	D	-	+	-	-	-
Coste fabricación	A	+	+	-	-	S
Facilidad fabricación	T	+	-	-	-	-
Facilidad ensamblaje	U	+	-	-	-	-
Complejidad en diseño	M	+	-	-	-	-
Numero de partes		+	-	-	-	-
Peso		+	-	-	-	-
$\Sigma+$		8	3	0	1	1
$\Sigma-$		1	7	10	9	8
ΣS		1	0	0	0	1

Tabla 4.1 Selección de Propulsión.

En base a esta tabla se debatió cual sería la mejor manera de lograr la propulsión del robot por el tubo. Después de analizarlo, se observó que la mejor alternativa es la de movimiento por ruedas. Las ventajas de este sistema, en principio, son muy superiores al resto mientras que apenas tiene desventajas.

Esta alternativa define un movimiento impulsado por ruedas pudiendo ser en un único módulo de robot o en varios, o desde una sola hasta múltiples ruedas.

Robot Inspeccionador de Tuberías

Concepto	Hidráulica	Muelles	Amortiguadores	Neumática	Suspensión ajustable	Husillo	Piñón-Cremallera	Pasadores en posición
Control		-	-	S	S	+	S	-
Coste de fabricación		+	-	S	-	+	+	+
Facilidad fabricación		+	+	S	+	+	+	+
Facilidad montaje	D	+	+	S	S	+	+	+
Complejidad en diseño	A	+	S	S	-	+	+	+
Numero de partes	T	+	S	S	S	+	+	+
Peso	U	+	S	S	-	+	+	+
Tamaño	M	+	S	S	S	+	-	+
Facilidad mantenimiento		+	S	S	S	+	+	+
Fuerza normal disponible		-	-	S	-	S	S	S
$\Sigma+$		8	2	0	1	9	7	8
$\Sigma-$		2	3	0	4	0	1	1
ΣS		0	5	10	5	1	2	1

Tabla 4.2 Selección Posicionamiento en Diámetro.

En cuanto a la forma de lograr contacto entre el sistema de propulsión y el tubo se consideró que la opción más ventajosa es la de un husillo con tuerca que aproxime progresivamente el robot a la pared del tubo a tocar.

Aunque otra opción posible sería la de incorporar muelles al bastidor y que después éstos empujen el mecanismo contra la tubería se descartó porque la regulación progresiva en rango de diámetros es muy compleja utilizando este sistema de muelles.

Concepto	3x3 w	1x3 w	3x3 b	1x3 b
Criterio				
Maniobrabilidad		-	S	-
Coste		+	S	+
Facilidad montaje	D	+	-	-
Coplejidad en diseño	A	+	-	-
Numero de partes	T	+	S	+
Peso	U	+	S	+
Tamaño	M	+	S	+
Facilidad mantenimiento		+	-	+
Paso por doblez y curvas		-	S	-
Uso de energía		+	S	+
$\Sigma+$		8	0	6
$\Sigma-$		2	3	4
ΣS		0	7	0

Tabla 4.3 Selección Propulsión.

Después de observar estas alternativas, la decisión consistió en decidir cuantos motores se utilizarían y si irían colocados en el cuerpo del robot o por el contrario lo harían directamente en las ruedas o en sus inmediaciones para lograr movimiento.

Se estimó que la mejor solución es la de un motor colocado directamente en una de las tres ruedas. Eso sí, buscando el desarrollar un sistema modular que permita probar diversas configuraciones del dispositivo.

4.2. Propuesta y elección de diseños

A partir de las diferentes ideas y combinaciones propuestas en el apartado anterior, se generaron alternativas diferentes de diseño para solucionar el problema.

Se generaron 6 conceptos, en los que habrá que seleccionar el más apropiado una vez analizadas las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos que pasamos a describir.

Concepto 1

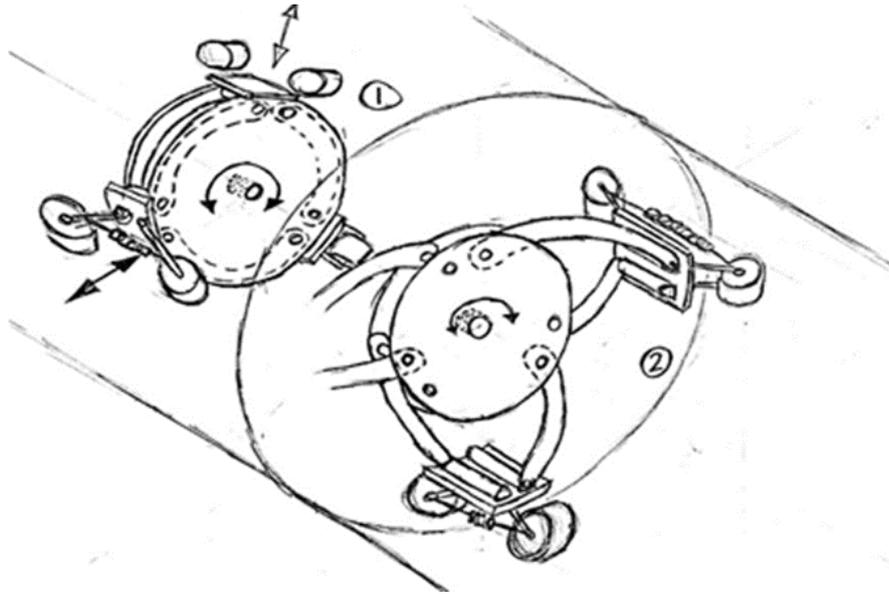


Figura 4.1 Concepto 1.

Esta propuesta consiste en dos módulos para así conseguir diferentes variaciones del diámetro abarcado.

En cuanto al movimiento de adaptación se basa en un husillo central que al girar abre o cierra los brazos externos.

Tanto la unión entre ruedas como la de éstas al soporte de los brazos irán unidas con pasadores, pudiendo complementarse con la utilización de muelles.

4.2.1. Concepto 2

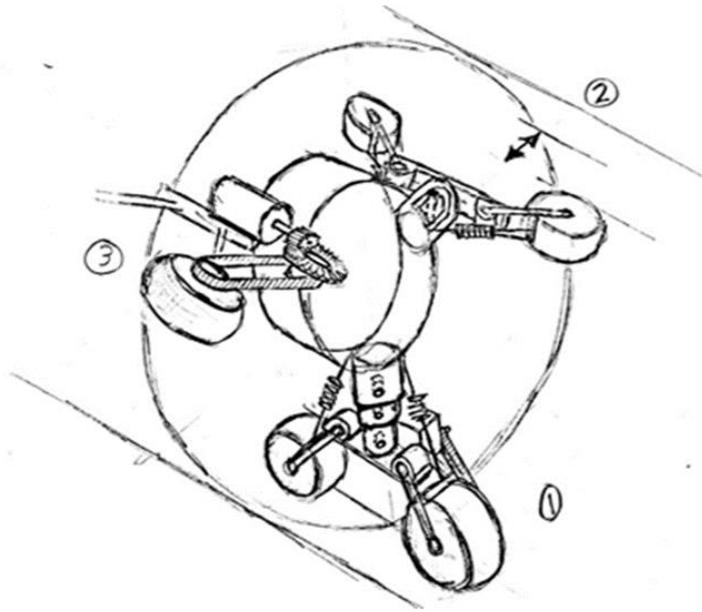


Figura 4.2 Concepto 2.

Este modelo se basa en brazos telescópicos con zonas que permiten colocar los pasadores consiguiendo varias posiciones de apertura o cierre del brazo. De este modo podemos incorporar diferencias en el diámetro según la medida del tubo a inspeccionar.

También incorporaría el motor directamente en la rueda facilitando la transmisión del movimiento.

4.2.2. Concepto 3

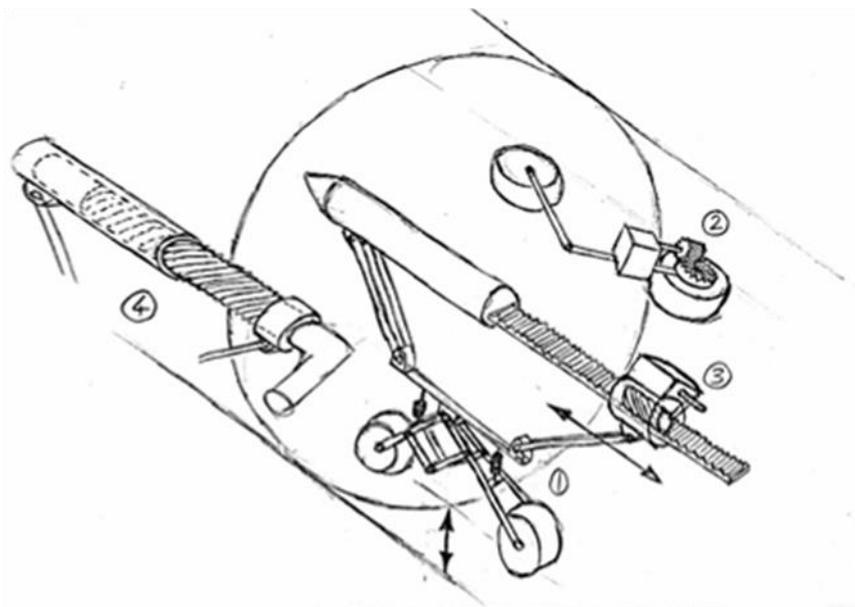


Figura 4.3 Concepto 3.

Robot Inspeccionador de Tuberías

Este diseño se basa en un mecanismo con dos partes conectadas a un mismo punto haciendo así posible el movimiento de las ruedas en torno a una zona del bastidor. El mecanismo de las ruedas tiene refuerzos con una configuración de pantógrafo entre ellos.

El conjunto total va anclado en un lado a la parte fija del mecanismo y en el otro en la tuerca del husillo de movimiento. El motor irá como en otros casos en las inmediaciones de la rueda a través de una transmisión por engranajes.

4.2.3. Concepto 4

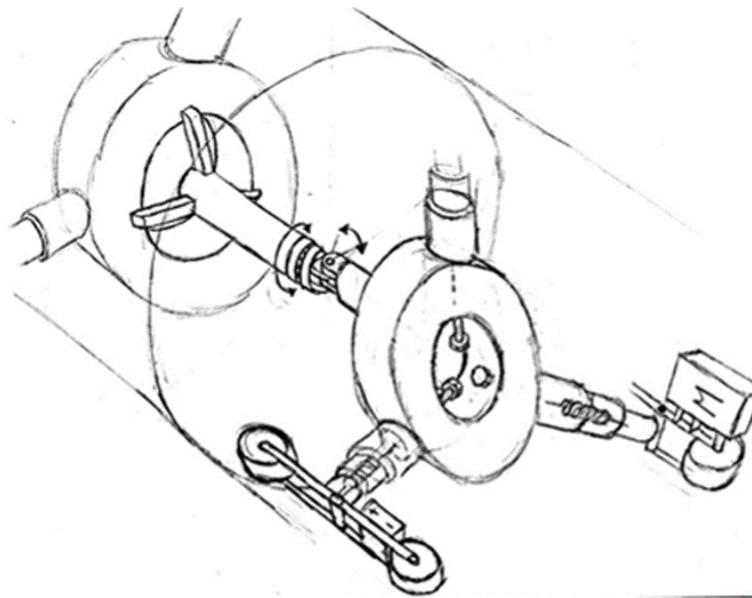


Figura 4.4 Concepto 4.

Este sistema se basa en un grupo de juegos de ruedas montadas en soportes telescópicos regulables mediante un conjunto de muelles y tornillos de apriete. Con este conjunto se puede lograr un ajuste efectivo en base a una regulación previa según el diámetro del tubo.

Este diseño tiene incorporados dos módulos conectados entre sí por una junta universal, lo que hace más fácil la navegación en obstáculos tipo curva.

4.2.4. Concepto 5

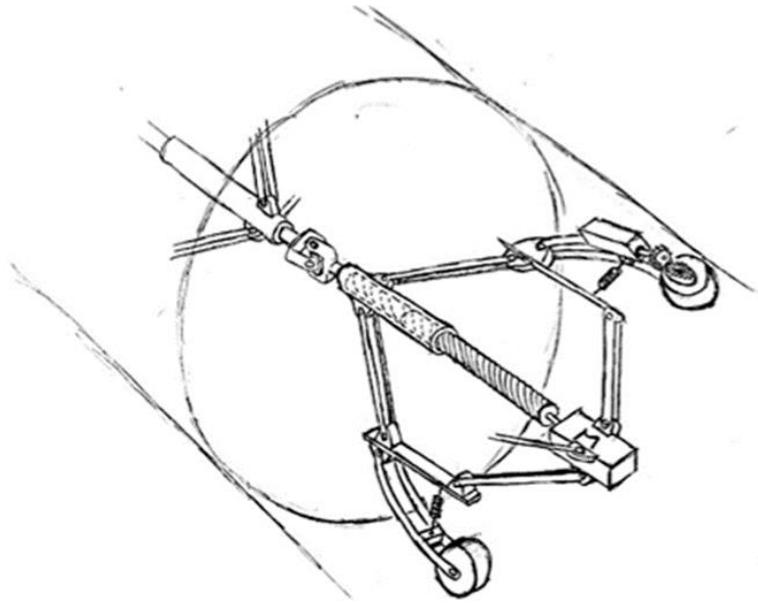


Figura 4.5 Concepto 5.

Este diseño se basa en el anterior pero reduciendo el número de componentes. Con una rueda menos por brazo e incorporando muelles de tracción para tener un mejor ajuste en la adhesión al tubo. La apertura de los brazos se consigue mediante un motor colocado en un husillo regulando así más rápidamente el diámetro del tubo.

4.2.5. Concepto 6

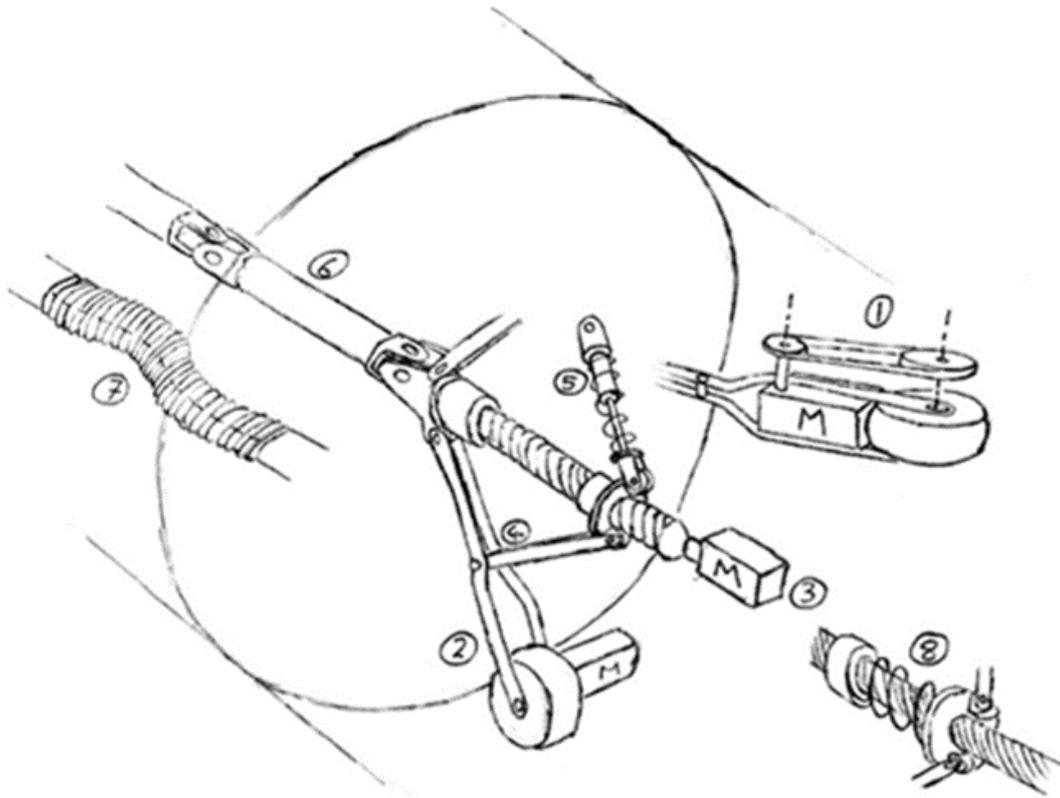


Figura 4.6 Concepto 6.

Este concepto se basa en una combinación de los puntos fuertes de los anteriores. Integra las partes como una rueda por brazo, transmisión por correa o engranajes. También usa muelles para la amortiguación, así como el husillo central conectado al brazo para lograr un ajuste eficaz.

4.3. Diseño final

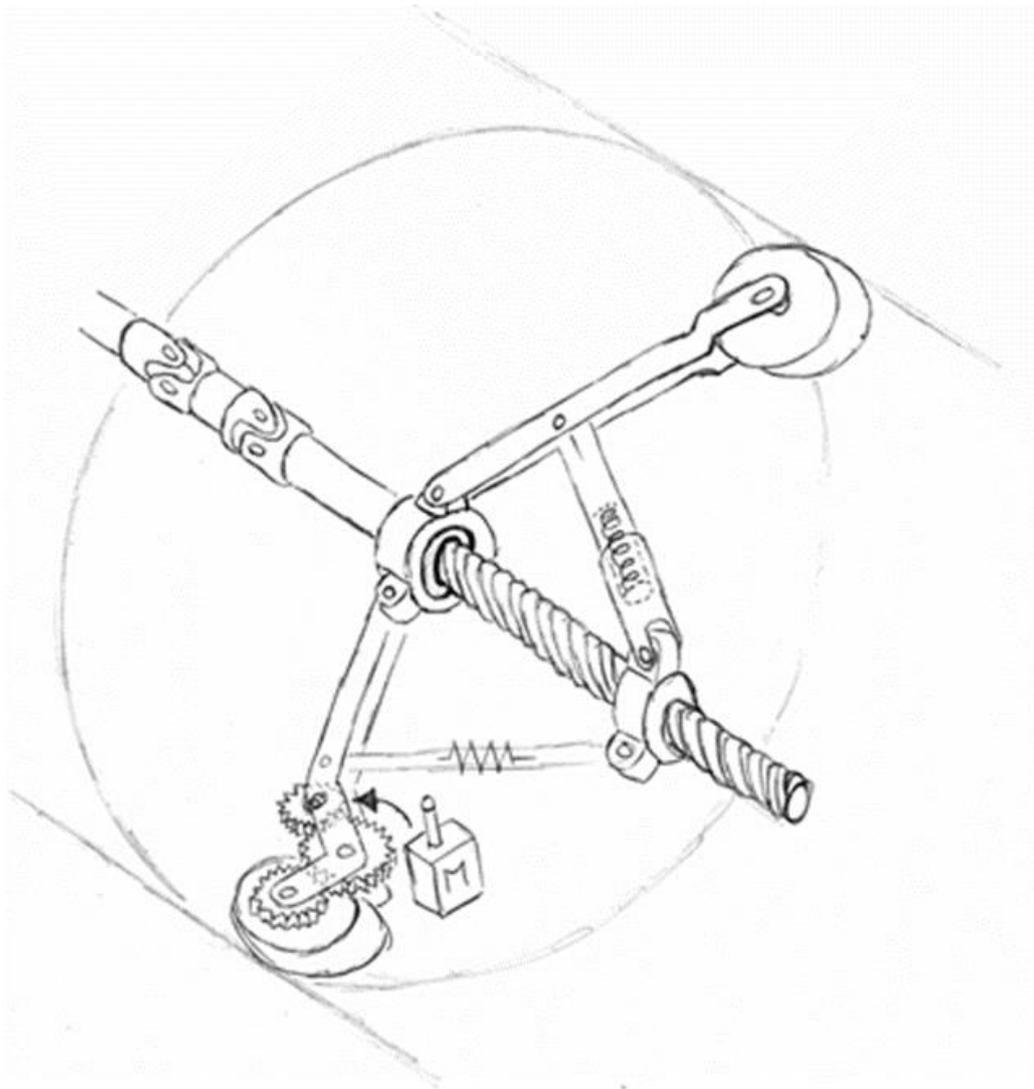


Figura 4.7 Diseño final primera fase.

El diseño final se obtiene tras el estudio de las opciones previas. En base a ello se descartaron todas las versiones que usaban pasadores, debido a que impedían un ajuste continuo en el diámetro alcanzado por el robot.

Se decidió incorporar el diseño en dos módulos con el fin de adaptarse a diferentes diámetros a lo largo del recorrido. Asimismo, se incorporaron muelles en el brazo móvil para amortiguar y recorrer el tubo.

Por último, se introduce el motor cerca de la rueda y la transmisión del movimiento hasta ella se realizará a través de un tren de engranajes que servirá también para ajustar la altura del motor en los brazos.

5. SÍNTESIS Y ANÁLISIS DEL PRIMER PROTOTIPO

5.1. Diseño Mecánico

Se procede a la materialización del modelo primario del diseño del robot a través de la realización de cálculos mecánicos:

- Rodamientos: cálculo de la fricción, dimensiones principales, vida de los rodamientos.
- Husillo: cálculo de dimensiones principales y diseño de husillo para encaje con la tuerca disponible.
- Selección de ruedas: se seleccionaron las compatibles con los micro motores disponibles para pruebas. Tienen núcleo para el encaje del motor y una cubierta externa de caucho.



Figura 5.1 Ruedas seleccionadas para el robot.

- Engranajes: se decidió, por precio y disponibilidad, dimensionarlos y diseñarlos con medios de fabricación aditiva. Se incorporó una reducción en dos etapas para poder alojar el motor cómodamente y al mismo tiempo lograr cierta ventaja de par.



Figura 5.2 Etapa de engranajes diseñada.

- Junta universal: se incorporará una para establecer una conexión entre ambos módulos.

Robot Inspeccionador de Tuberías

- Geometría de brazos: se realizó un análisis sencillo para determinar características de fuerzas y así dimensionar el muelle.

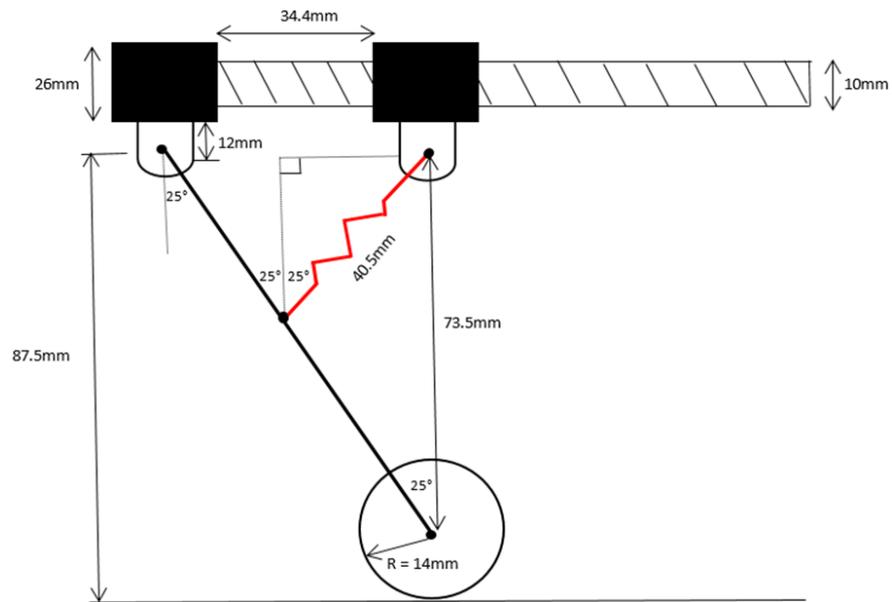


Figura 5.3 Dimensiones principales de los brazos.

- Cálculo de fuerzas del robot: se realizó un cálculo preliminar simple sobre fuerzas aplicadas en el prototipo.

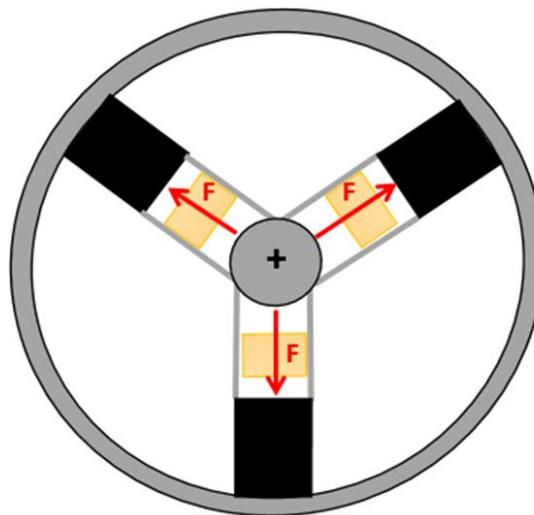


Figura 5.4 Distribución de fuerzas ejercidas en cada módulo.

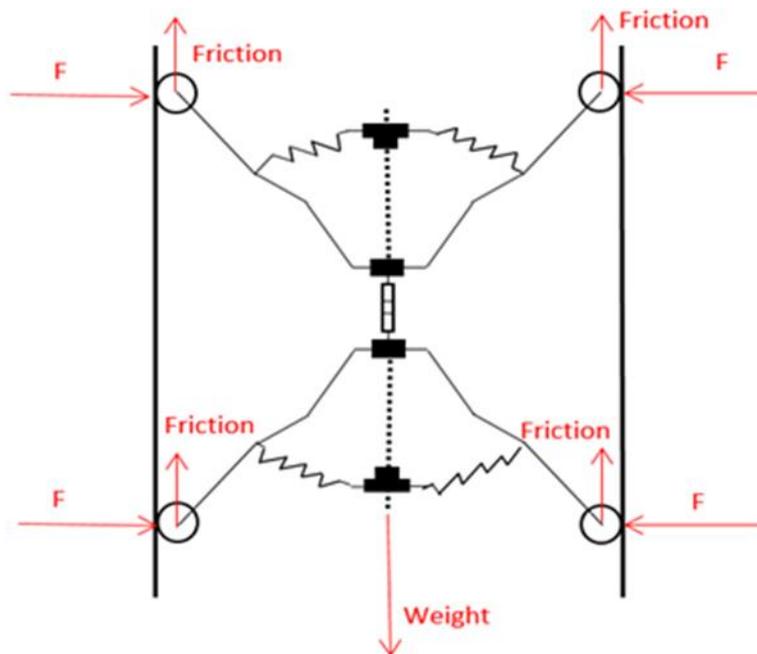


Figura 5.5 Distribución de fuerzas en conjunto global.

Con estos cálculos simples se logra un valor aproximado de fuerza normal necesaria en cada rueda.

- Cálculo del muelle: a partir de la fuerza obtenida y la geometría se obtiene un valor de fuerza que se utiliza para dimensionar los muelles de la suspensión.

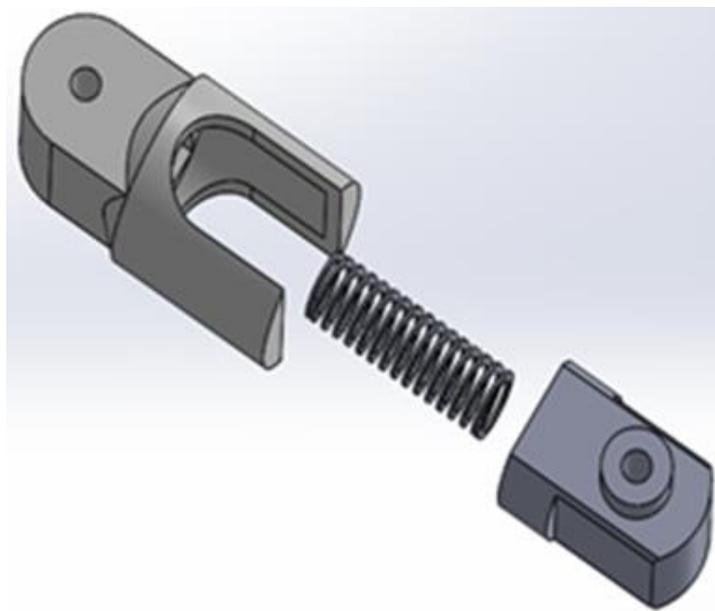


Figura 5.6 Diseño de alojamiento para el muelle.

- Conexión de tuerca: se diseñó un soporte para alojar la tuerca y al mismo tiempo alojar los brazos.

Robot Inspeccionador de Tuberías

- Soporte junto con los brazos: se establecieron conexiones entre los elementos con pasadores, en este caso tornillos y se inmovilizó el conjunto con tuercas.

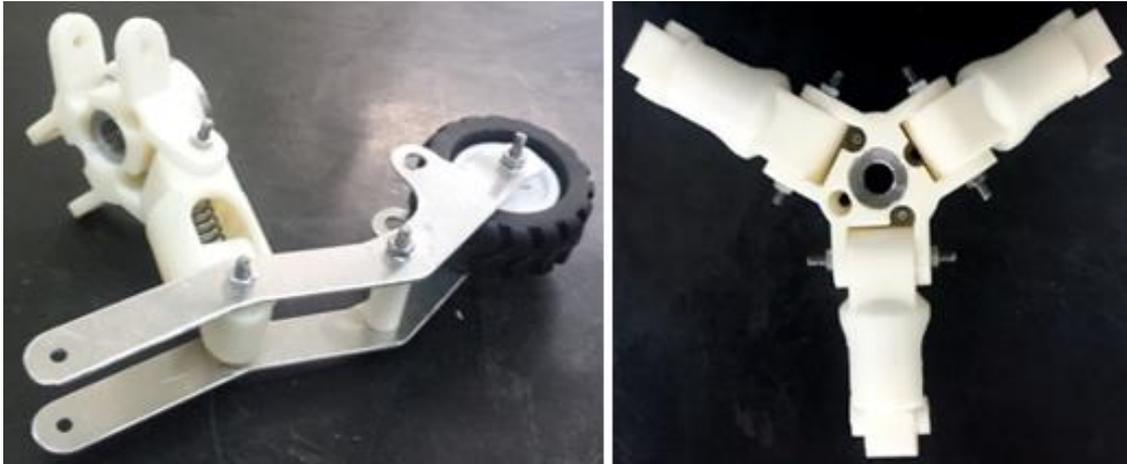


Figura 5.7 Uniones entre soporte de la tuerca del husillo y brazos.

6. REALIZACIÓN DEL PROTOTIPO

6.1. Prototipo Virtual 1

Se realizó un modelo virtual de todo el conjunto del robot con el objetivo de ver posibles fallos, diseñar de formas más eficiente las piezas y tener un control exhaustivo de todos los componentes a incluir.

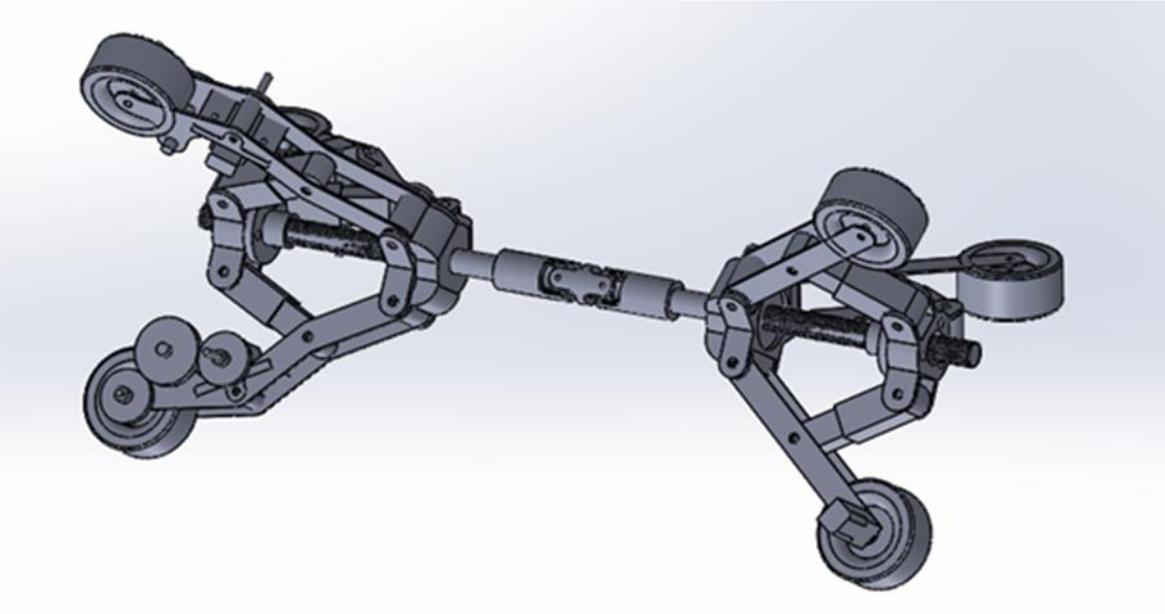


Figura 6.1 Robot completo en CAD.

6.2. Prototipo Real 1

Se realiza el montaje de las diferentes partes del proyecto una vez fabricadas las piezas incluidas en el mismo.

Robot Inspeccionador de Tuberías



Figura 6.2 Módulo ensamblado.

Diseño electrónico

Se realiza un pequeño montaje electrónico basado en la incorporación de dos motores en el conjunto total del robot. Mediante un microcontrolador Arduino comunicado por un módulo Bluetooth se realiza el control de los motores. Sin embargo, para realizar pruebas más sencillas de realizar, se decidió realizarlas con el motor conectado directamente a la fuente de alimentación.



Figura 6.3 Prototipo final construido

6.3. Pruebas y rectificación.

Se detectaron una serie de fallos en este prototipo que obligaron a una revisión del mismo para mejorar su funcionamiento

Los fallos detectados fueron los siguientes:

- Junta universal: la junta universal de tres tramos se dobla al sufrir fuerzas de compresión mínimas haciendo que el robot se flecte al avanzar.
- Flexión central del robot: el uso de solo dos apoyos con la combinación con la junta universal doble hace que el robot no trabaje apropiadamente en posiciones estándar.
- Incapacidad de cambiar el diámetro de ajuste durante la operación.

Las soluciones implementadas fueron:

- Cambio de la junta universal doble por una simple y así evitar una de las causas del doblado entre los módulos.
- Incorporación de soportes extra en los módulos para mejorar el apoyo de todo el prototipo.
- Introducción de un motor en el husillo para lograr el ajuste exacto del diámetro del robot.
- Incorporar muelles más duros para mejorar la conexión de las ruedas al tubo.

Estas medidas se incorporaron en el diseño del segundo prototipo.

6.4. Prototipo Virtual 2

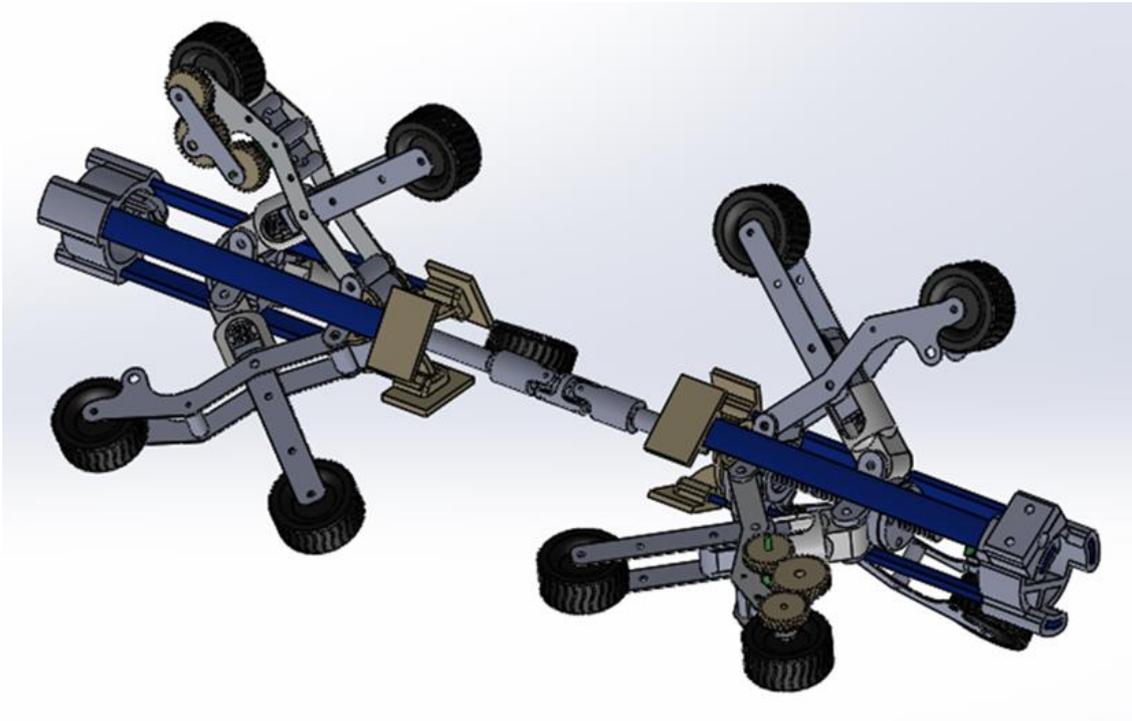


Figura 6.4 Segundo prototipo virtual.

Se implementaron todas las mejoras necesarias e incluso se añadieron más apoyos para incorporar elementos electrónicos necesarios para el control de todo el robot.

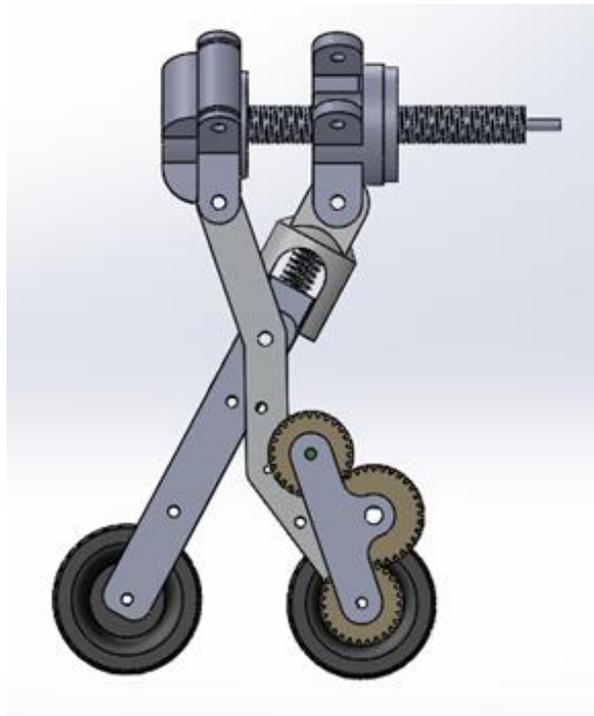


Figura 6.5 Incorporación de segundo brazo de apoyo.

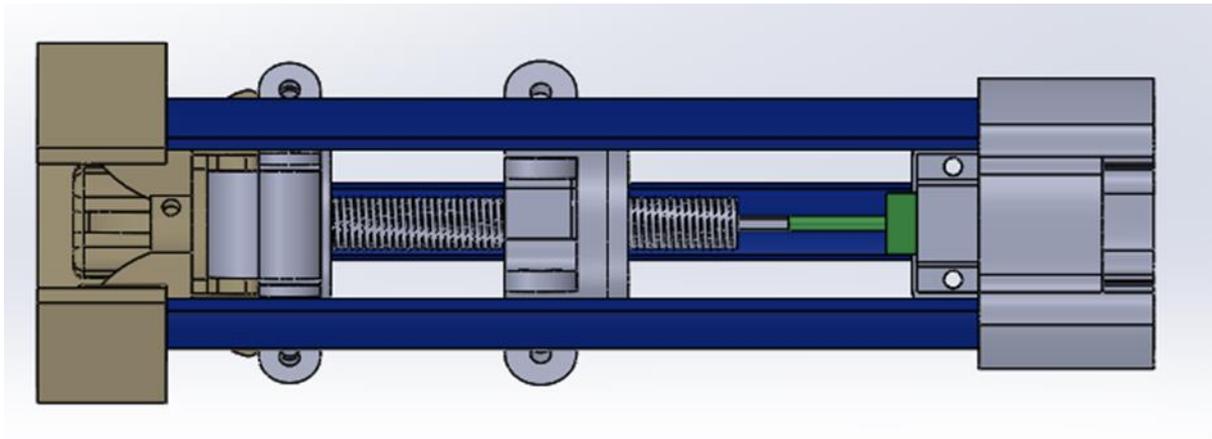


Figura 6.6 Conexión del motor con el husillo.

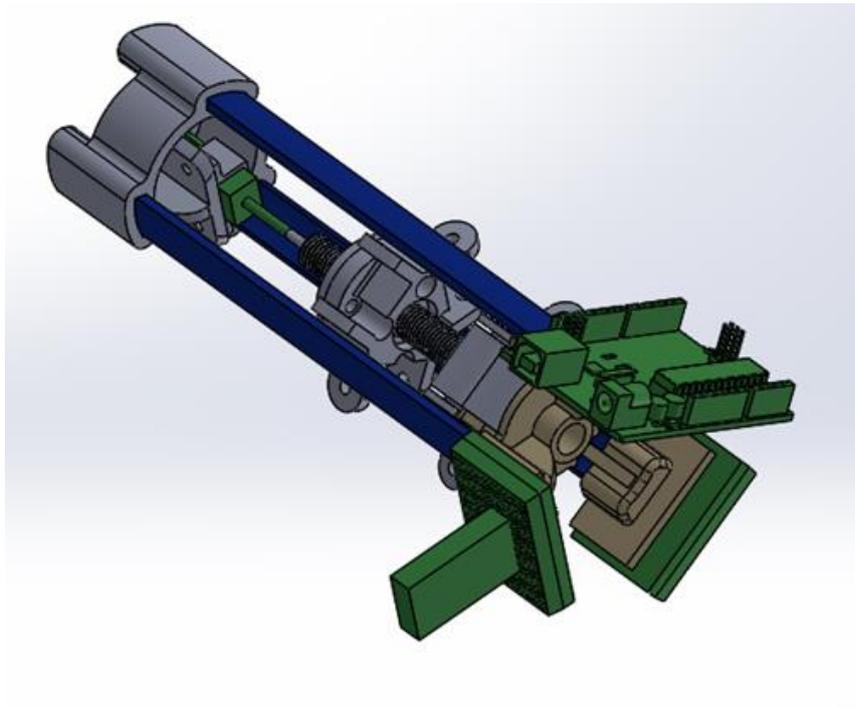


Figura 6.7 Apoyos incorporados para la electrónica.

6.5. Prototipo Real 2

Se realizó la implementación de las mejoras en todo el prototipo. En general estas modificaciones solo requerían la impresión de unas pocas piezas y el corte de los nuevos brazos para añadir los nuevos apoyos.

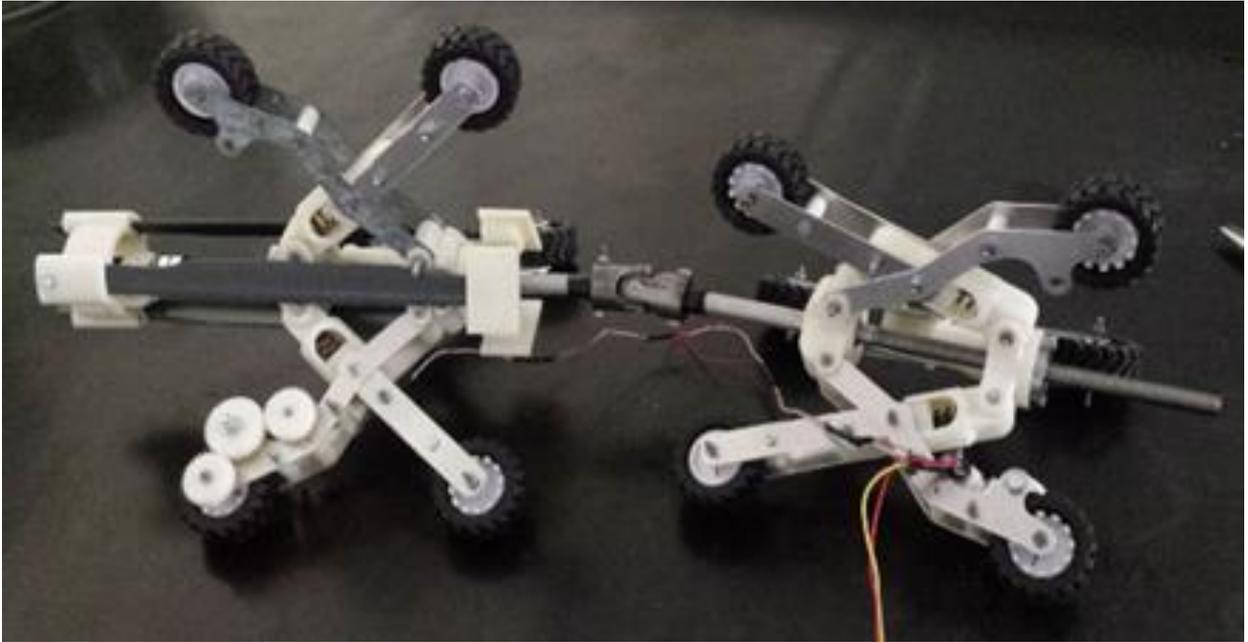


Figura 6.8 Prototipo real implementado.

Por último, se realizaron las pruebas finales del prototipo con el objetivo de ver cómo funcionaban las nuevas mejoras y que problemas surgían ahora.

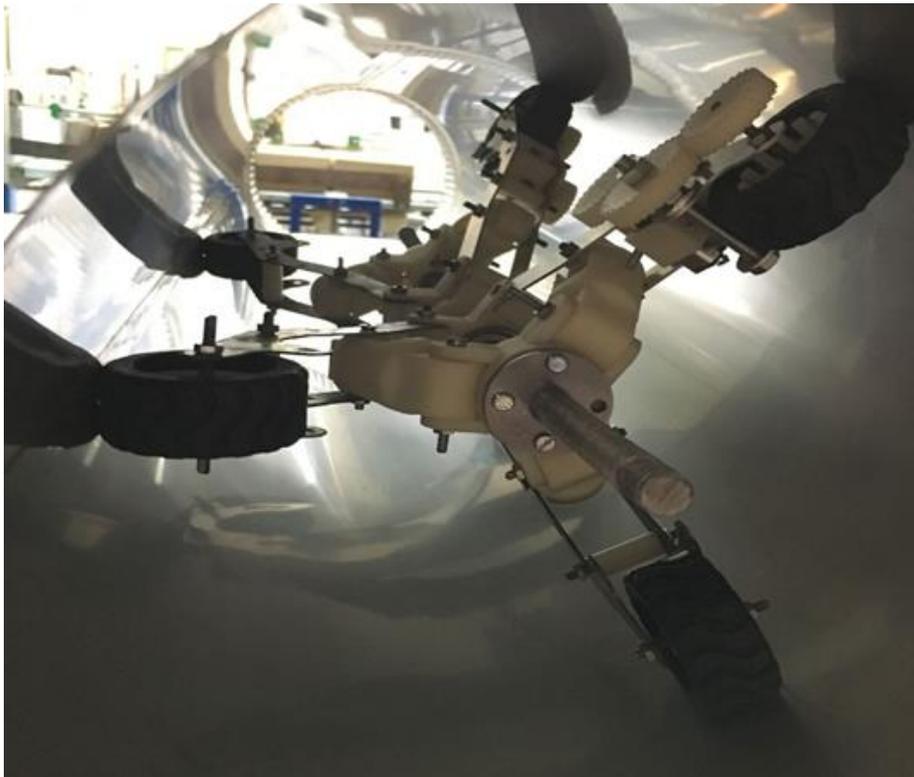


Figura 6.9 Prueba del robot en la tubería.

6.6. Análisis del prototipo

6.6.1. Análisis preliminar

El prototipo funcionaba correctamente hasta 45° de inclinación, pero debido a la mala calidad de los engranajes empleados, cuando se probaba en un ángulo de inclinación elevado, el prototipo se paraba siempre por fallos de contacto en los engranajes.

Asimismo, los motores se calentaban rápidamente y en exceso por lo que no se consideraron adecuados para una carga tan elevada.

6.6.2. Análisis exhaustivo

Una vez analizados los fallos en su conjunto, se realizaron otros estudios de cada una de las partes dentro del diseño con objetivo es el de poder evitar y atajar otros fallos potenciales en el funcionamiento del prototipo.

Uno de los fallos futuros más problemáticos es la posible colisión entre los soportes de los brazos. Estos chocarían en una apertura excesiva. Por tanto, es mejor tratar de incorporarlos antes de la tijera.

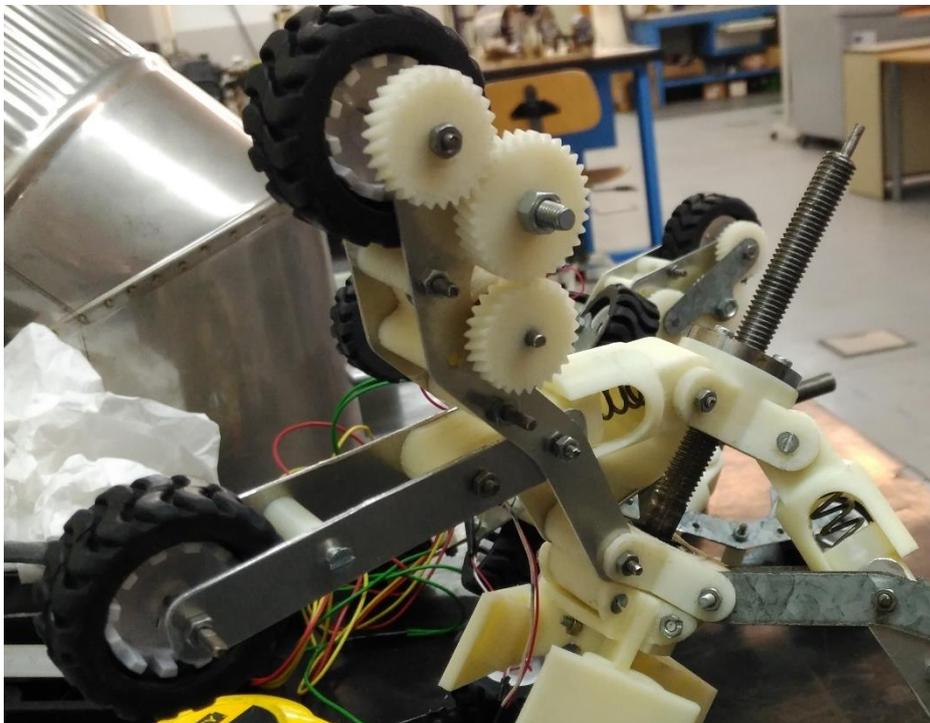


Figura 6.10 Zona de choque entre los brazos.

Robot Inspeccionador de Tuberías

Hay también un juego axial excesivo en los pares de rotación de los eslabones. Esto hace que existencia de movimientos indeseados durante el trabajo y puede influir en crear un juego radial en la rueda al variar la posición del eje de la misma.

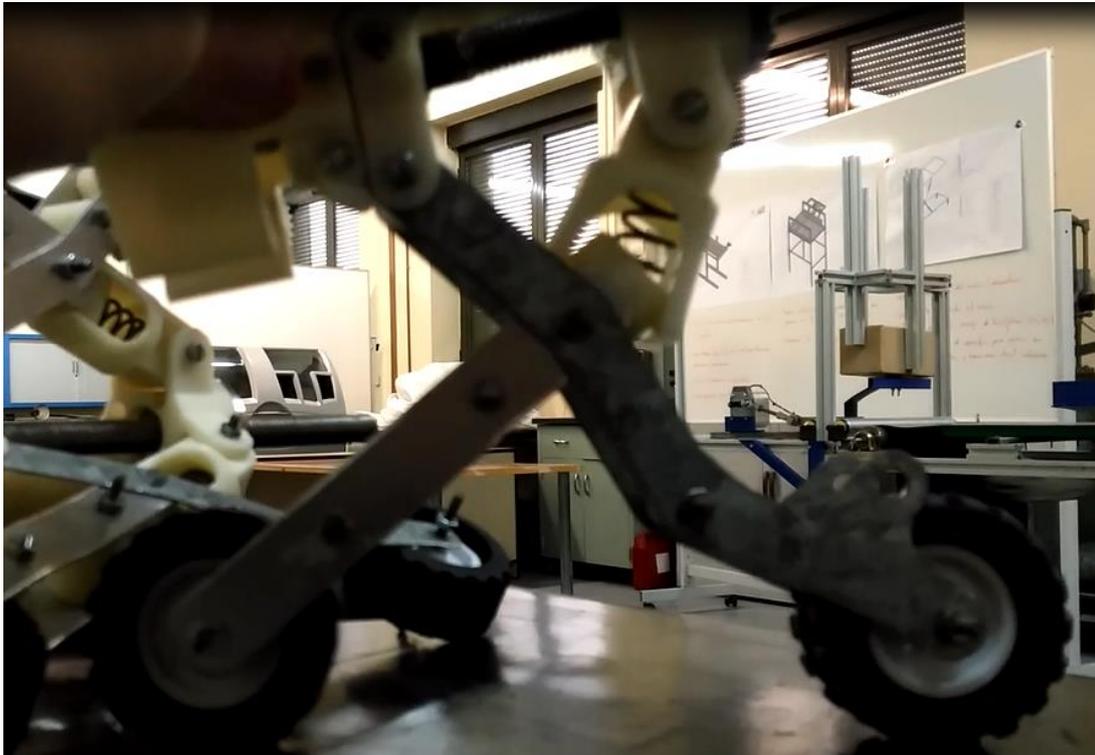


Figura 6.11 Giro excesivo de los eslabones debido al juego de las juntas.

También existe un juego excesivo entre el eje de la rueda y la rueda axialmente, lo que hace que la rueda no esté en una zona definida pudiendo variar su posición.

Los engranajes se traban en el sentido de movimiento a medida que se iba generando un mal contacto entre las ruedas dentadas. Además de eso, existe una desalineación axial de los mismos que provoca un peor contacto y entorpece aún más el movimiento.

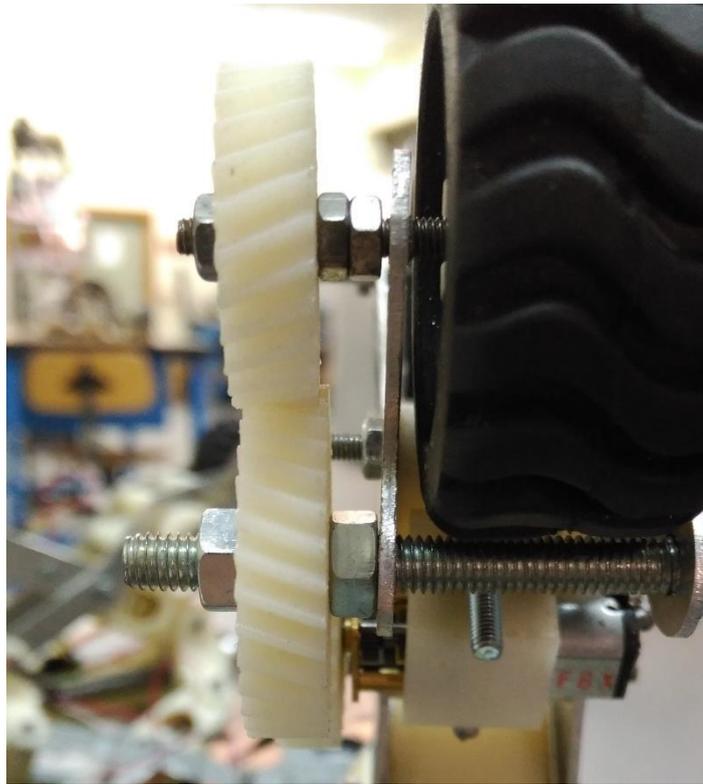


Figura 6.12 Separación axial entre los engranajes.

Un problema de cara a la automatización del prototipo, es que no existe un final que evita la salida de la tuerca y los brazos. Esto podría solucionarse fácilmente con un límite físico, un final de carrera, o ambas soluciones.



Figura 6.13 Falta de límite físico en la tuerca del husillo.

Otra problemática es la deformación de los brazos, estos al estar hechos en chapa y con separadores poco rígidos implica que su rigidez global disminuya consiguiendo que se deformen en exceso los brazos.



Figura 6.14 Deformación axial de los brazos.

Por último, el diseño del muelle tiene varios fallos:

- Está en la zona anterior a la tijera, de modo que su trabajo es difícil de conseguir ya que le llega solo una parte de la deformación del brazo.
- El diseño abierto del soporte posibilita una flexión inadecuada del muelle.
- No existe ningún órgano mecánico como un coliso o similar que permita moverse al brazo en su conjunto



Figura 6.15 Deformación del muelle debido a colocación en mala posición.

7. OPTIMIZACIÓN DEL PROTOTIPO

En esta fase se procederá a la realización mecatrónica del proyecto anteriormente iniciado por el equipo de estudiantes. De este modo ahora el proyecto pasaría a estar complet. Si bien, tiene partes diferenciadas todo el proyecto se estudiará en conjunto y las decisiones de cada parte serán analizadas también desde la perspectiva de las otras disciplinas que integran el conjunto del robot.

Ahora, el objetivo no es crear un robot nuevo desde cero, sino optimizarlo usando las ideas anteriormente desarrolladas. En otras palabras, hacer un estudio completo de un modelo que mejore nuestro sistema mecánico y de esta manera poder dimensionar adecuadamente los actuadores eléctricos, definiendo mucho mejor la electrónica de control y el flujo de operaciones que debemos realizar.

Esta optimización, no es por tanto solo una mejora del trabajo anterior, sino una mejora del mismo desde el punto de vista de perfeccionar su diseño y añadir todos los sistemas necesarios para lograr un robot autónomo y capaz de superar nuestros objetivos iniciales.

Por último, indicar que a partir de este apartado comenzará el estudio minucioso de las partes que integran nuestro robot.

8. DISEÑO MECÁNICO

Nuestro objetivo inicial es poder crear un modelo mecánico para identificar que valores son más significativos en el desarrollo y conocer mejor nuestro problema para así mejorar el diseño mecánico.

8.1. Síntesis estructural y dimensional

El siguiente paso se basa en generar un proceso para obtener unos parámetros básicos óptimos sobre los que desarrollar todo el problema de nuestro robot. Para realizar esta extracción de valores primero debemos formular analíticamente nuestro problema.

8.1.1. Definición del problema

Comenzaremos por analizar el equilibrio de las fuerzas que sustentan a la tijera para obtener, a continuación, unos valores iniciales óptimos con los que empezar a trabajar.

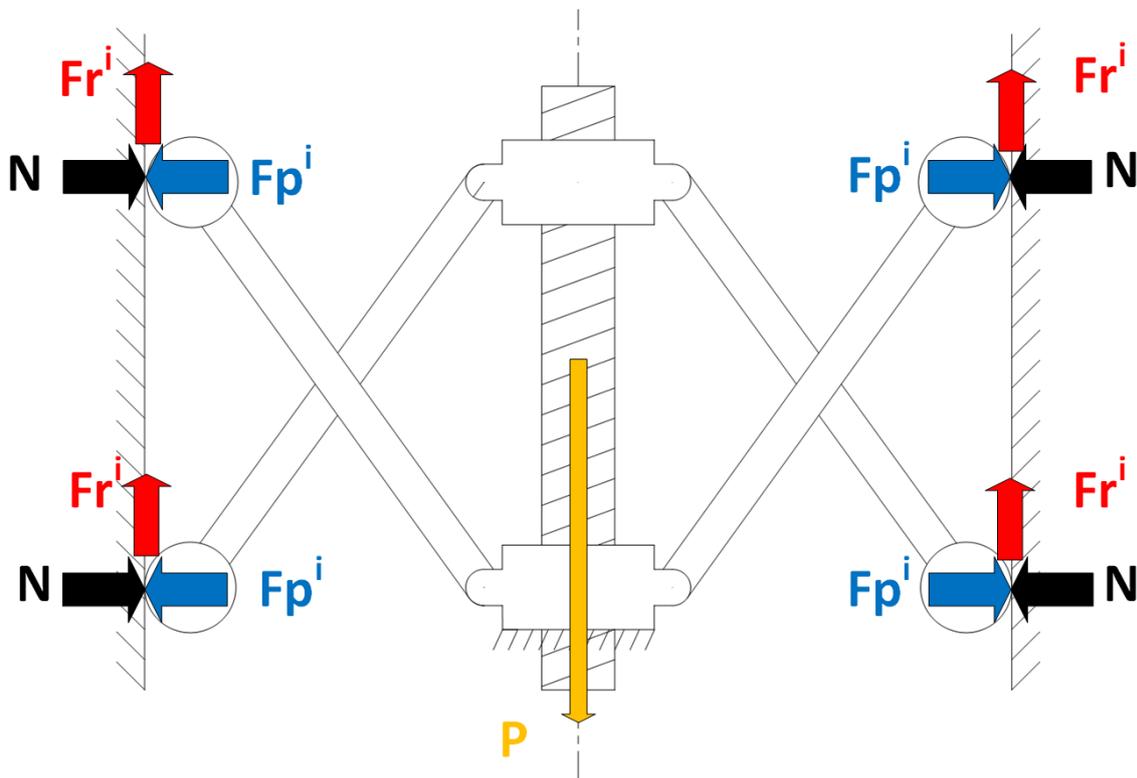


Figura 8.1 Análisis de fuerzas del mecanismo.

En la anterior imagen vemos las fuerzas que actúan en el funcionamiento básico del mecanismo. Aunque el conjunto sean dos módulos calcularemos y dimensionaremos ambos con el objetivo de que sean independientes en cuanto a movimiento y apertura. También eliminaremos la variable del muelle de este análisis para facilitar la optimización de dimensiones, ya que, en

cuanto el muelle llegue a su posición de equilibrio y el brazo también, ambos se comportaran como un brazo rígido.

Con todas las condiciones anteriores el sistema se explica del siguiente modo:

Queremos generar un mecanismo que venza la gravedad del tubo para poder ascender. La fuerza a vencer es simplemente la fuerza P, o peso del módulo a elevar, que es la de la gravedad de su peso. La compensación de esta fuerza se realiza a través del rozamiento entre las ruedas y el tubo que se manifiesta en forma de la fuerza F_r^i . Siendo el sumatorio de todas igual a la fuerza de rozamiento total F_r . La fuerza de rozamiento se basa en la siguiente ecuación:

$$F_r = \mu \cdot N \quad \text{Ec. 8.1}$$

Siendo N la fuerza normal sobre el tubo de cada fuerza F_p^i .

El equilibrio entre F_r y F_p junto al coeficiente de rozamiento deben igualarse para que el módulo permanezca estático en su posición de equilibrio. De manera que

$$F_r = \mu \cdot N = m \cdot g \quad \text{Ec. 8.2}$$

Como F_p es igual a N:

$$F_p = \frac{m \cdot g}{\mu} \quad \text{Ec. 8.3}$$

La fuerza de presión de cada rueda es proporcional a la anterior según el número de ruedas. Nuestro módulo lleva 6 brazos con 1 rueda cada uno, o lo que es lo mismo 3 tijeras con dos ruedas cada una. En consecuencia, la fuerza de presión individual es:

$$F_p^i = \frac{m \cdot g}{6 \cdot \mu} \quad \text{Ec. 8.4}$$

En cuanto a las constantes hemos supuesto valores estándar para la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$) y para el coeficiente de rozamiento hemos supuesto 0,4 basándonos en experiencias previas con ruedas de caucho y tubo de acero de otros proyectos[17]. Como valor de masa se ha optado por ser conservadores en la primera iteración y suponer un peso de módulo de 1,5 kg.

Para realizar los cálculos nos hemos basado en la mínima unidad de la tijera puesto que el resto serán iguales y así la optimización será más ligera. También hemos reducido su representación a forma de mecanismo que es práctica para realizar los cálculos.

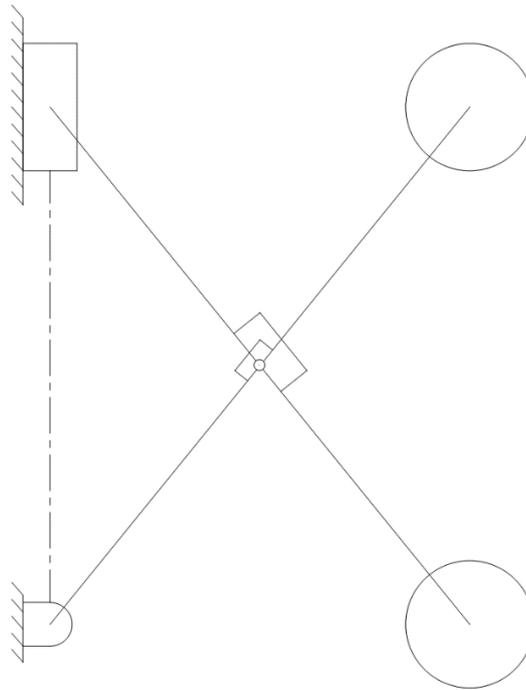


Figura 8.2 Representación cinemática del mecanismo.

A continuación, tras pasamos las fuerzas a este modelo, para a continuación separarlas según su diagrama de cuerpo libre o DCL. También estableceremos parámetros geométricos como referencia para la realización de los cálculos (b , a , α). Así como los puntos de las articulaciones para el análisis cinemático (O , V , X , Y , Z).

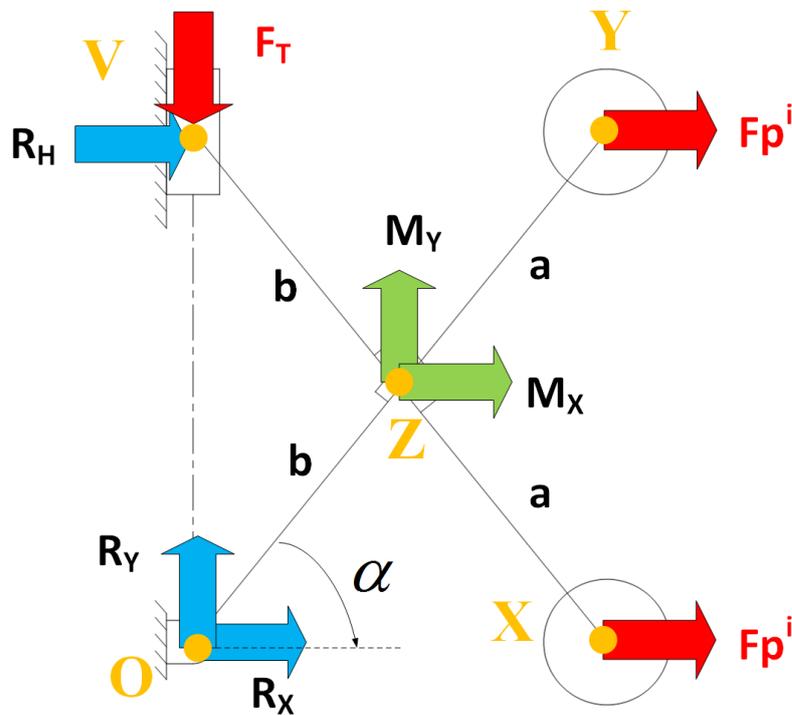


Figura 8.3 Fuerzas actuantes en el mecanismo de tijera.

La situación geométrica de los puntos:

El punto de origen depende la situación de la articulación respecto al centro del husillo. Basándonos en una situación deseada de 20 mm situaremos ahí el origen tanto vertical como horizontalmente.

$$\gamma = 90^\circ - \alpha \quad \text{Ec. 8.5}$$

$$x_0 = 20 \quad \text{Ec. 8.6}$$

$$y_0 = 20 \quad \text{Ec. 8.7}$$

$$x_V = x_0 \quad \text{Ec. 8.8}$$

$$y_V = 2 \cdot b \cdot \cos(\gamma) \quad \text{Ec. 8.9}$$

$$x_Z = b \cdot \cos(\alpha) + x_0 \quad \text{Ec. 8.10}$$

$$y_Z = b \cdot \sin(\alpha) + y_0 \quad \text{Ec. 8.11}$$

$$x_X = x_Z + a \cdot \cos(\alpha) \quad \text{Ec. 8.12}$$

$$y_X = y_Z - a \cdot \sin(\alpha) \quad \text{Ec. 8.13}$$

$$x_Y = x_X \quad \text{Ec. 8.14}$$

$$y_Y = y_X + 2 \cdot a \cdot \cos(\gamma) \quad \text{Ec. 8.15}$$

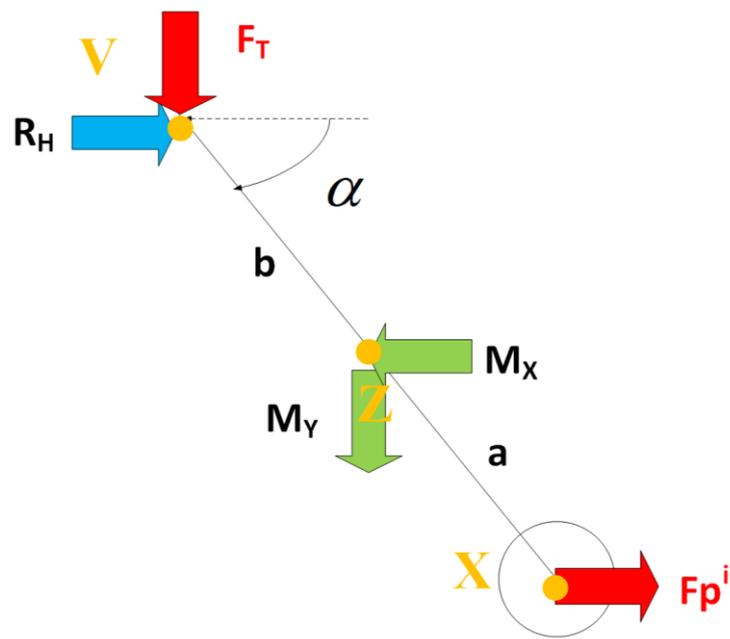


Figura 8.4 DCL eslabón 1.

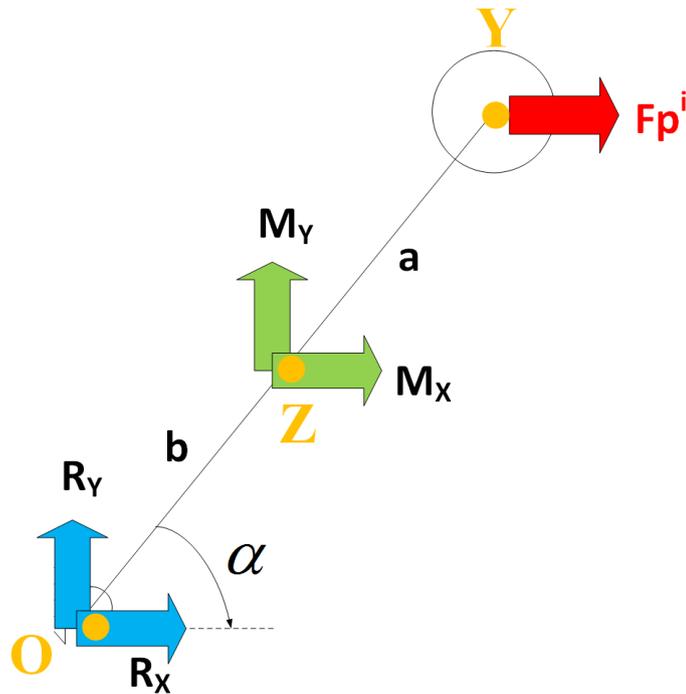


Figura 8.5 DCL eslabón 2.

En la tuerca o par P en el esquema no se efectuaron las ecuaciones pues obtenemos que las reacciones son iguales las fuerzas horizontales y que la fuerza vertical aplicada y la fuerza de reacción en este punto son iguales en módulo. De forma similar operaríamos en el punto “O” solo que en este caso solo hay reacciones.

Aplicando el equilibrio estático a cada cuerpo obtendremos 6 ecuaciones y tenemos como incógnitas las fuerzas de la tijera y la fuerza a aplicar en el husillo o Fuerza aplicada en V que es la que nos interesa conocer.

Comenzaremos por realizar un análisis pormenorizado de las fuerzas que actúan en ellas

$$\sum F_x = 0 \quad \text{Ec. 8.16}$$

$$\sum F_y = 0 \quad \text{Ec. 8.17}$$

$$\sum M_0 = 0 \quad \text{Ec. 8.18}$$

$$R_x + M_x - F_p^i = 0 \quad \text{Ec. 8.19}$$

$$R_y + M_y = 0 \quad \text{Ec. 8.20}$$

$$M_x \cdot a \cdot \text{sen}(\alpha) + R_x \cdot (a + b) \cdot \text{sen}(\alpha) - M_y \cdot a \cdot \text{cos}(\alpha) - R_y \cdot (a + b) \cdot \text{cos}(\alpha) = 0 \quad \text{Ec. 8.21}$$

$$R_H - M_x - F_p^i = 0 \quad \text{Ec. 8.22}$$

$$-F_T - M_y = 0 \quad \text{Ec. 8.23}$$

$$M_x \cdot a \cdot \text{sen}(\alpha) + R_H \cdot (a + b) \cdot \text{sen}(\alpha) + M_y \cdot a \cdot \text{cos}(\alpha) + F_T \cdot (a + b) \cdot \text{cos}(\alpha) = 0 \quad \text{Ec. 8.24}$$

Para simplificar la implementación en computar sustuiremos los siguientes términos por las siguientes letras:

$$N = a \cdot \text{sen}(\alpha) \quad \text{Ec. 8.25}$$

$$O = a \cdot \text{cos}(\alpha) \quad \text{Ec. 8.26}$$

$$P = (a + b) \cdot \text{sen}(\alpha) \quad \text{Ec. 8.27}$$

$$Q = (a + b) \cdot \text{cos}(\alpha) \quad \text{Ec. 8.28}$$

La representación de todas las ecuaciones en formato matricial es la siguiente:

$$A \cdot X = B \quad \text{Ec. 8.29}$$

Siendo A, X y B:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ P & -Q & N & -O & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & N & O & -P & Q \end{pmatrix}$$

$$X = \begin{pmatrix} R_x \\ R_y \\ M_x \\ M_y \\ R_H \\ F_T \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} F_p^i \\ 0 \\ 0 \\ F_p^i \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Una vez obtenidos estos valores tenemos expresados los valores de las dimensiones y las fuerzas en todo el mecanismo de forma paramétrica. El siguiente paso será definir nuestro problema de optimización.

8.1.2. Planteamiento cualitativo del problema de síntesis dimensional

Se desea obtener un robot que cubra unos diámetros mínimos y máximo denominados d_{min_obj} y d_{max_obj} . De manera que se minimice la fuerza ejercida por un husillo, y las longitudes de los brazos del robot, así como el radio de la rueda. En nuestro caso como la tubería es de 200 mm estos límites serán de 175 y 225 mm.

8.1.3. Planteamiento formal del problema de síntesis dimensional

$$\min f(\overrightarrow{vector}) = \min(L_a + L_b + r_{rueda}) \quad \text{Ec. 8.30}$$

$$\overrightarrow{vector} = [L_a \ L_b \ r_{rueda}] \quad \text{Ec. 8.31}$$

8.1.4. Resolución del problema de síntesis

El problema tiene las siguientes características:

- Tiene 3 variables de tipo continuo.
- El coste computacional es reducido.
- Se desconoce si existe un óptimo.

Se trabajará con la estrategia evolutiva DDM-ES. Esta trabaja con variables continuas. Para poder utilizarlo es necesario convertirlo en un problema de optimización sin restricciones.[18]

$$\min(w_1 \cdot (L_a + L_b + r_{rueda}) - w_2 \cdot F_{max} + w_3 \cdot d_{c1} + w_4 \cdot d_{c2} +)$$

Siendo:

$$\overrightarrow{vector} = [L_a \ L_b \ r_{rueda}]$$

Las restricciones dimensionales serán barras de longitudes entre 40 y 65 mm y un valor de radio de rueda entre 18 y 45 mm.

Todas estas condiciones se implementarán en un código de Matlab. Para tener más valores y buscar un óptimo en todo el recorrido de trabajo se ha supuesto que la tijera abarcará desde su ángulo α un recorrido desde 85 a 15°.

8.1.5. Conclusiones

Tras incorporar este valor y realizar la simulación se han obtenido de valores óptimos:

$$\mathbf{a = 65mm;}$$

$$\mathbf{b = 40 mm;}$$

$$\mathbf{\underline{radio rueda = 18 mm.}}$$

Como se puede observar, estos valores se corresponden con los límites impuestos, esto nos indica que para nuestras restricciones el máximo encontrado tiene estas características.

Estos valores nos dan unos valores aproximados para establecer un marco de origen en nuestro diseño mecánico. No obstante, son solo un punto de origen al que aspirar nuestro diseño siempre y cuando las restricciones físicas del mismo nos apoyen.

8.2. Consideraciones del diseño a partir de cálculos y simulaciones

8.2.1. Cálculos analíticos

A partir de los cálculos mecánicos de la síntesis se han realizado los cálculos de los elementos usados, así como su dimensionamiento. Estos debido a su longitud se encuentran en el anexo “Cálculos mecánicos”. Ahora se procederá a describir los resultados más interesantes.

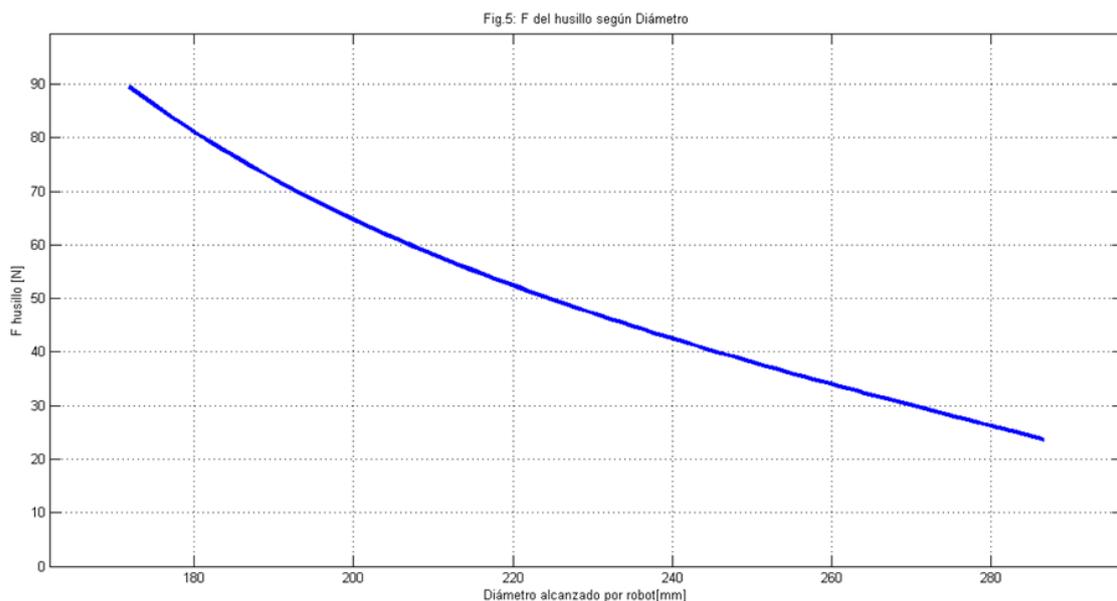


Figura 8.6 Variación de la fuerza a aplicar en el husillo según el diámetro que se recorra.

Robot Inspeccionador de Tuberías

Como se ven la imagen previa la fuerza que ha de aplicar el tubo no es constante según varía el diámetro. Este esfuerzo varía según el ángulo al que la tijera llega a esa distancia, pero como sigue una evolución senoidal está fuerza está mejor aprovechada cuanto mayor es el tubo. Esto nos indica que este mecanismo siempre es más eficiente en sus máximos diámetros de trabajo.

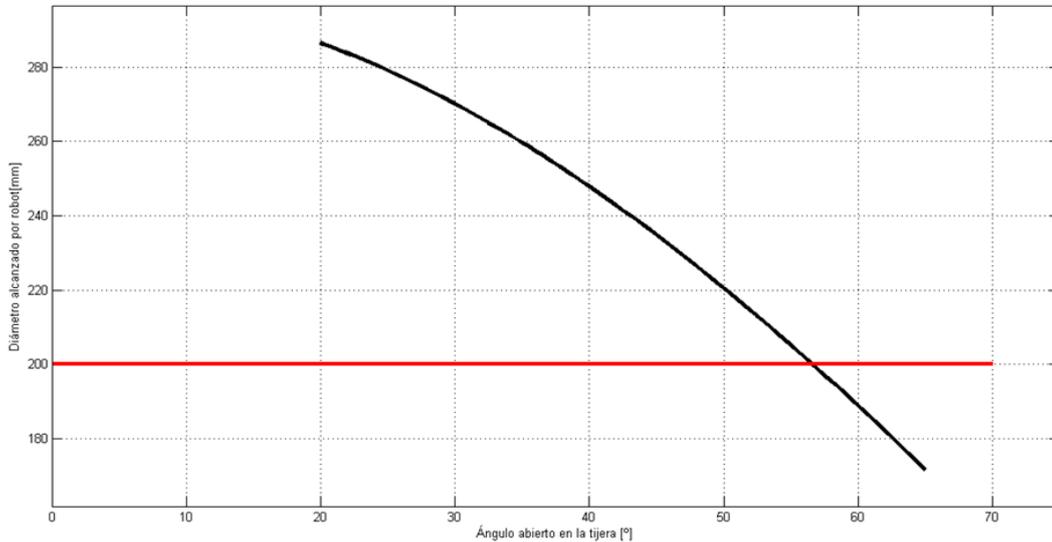


Figura 8.7 Variación del ángulo de la tijera según el diámetro.

El gráfico anterior nos describe esa variación descrita anteriormente y se puede apreciar cómo la evolución no es lineal.

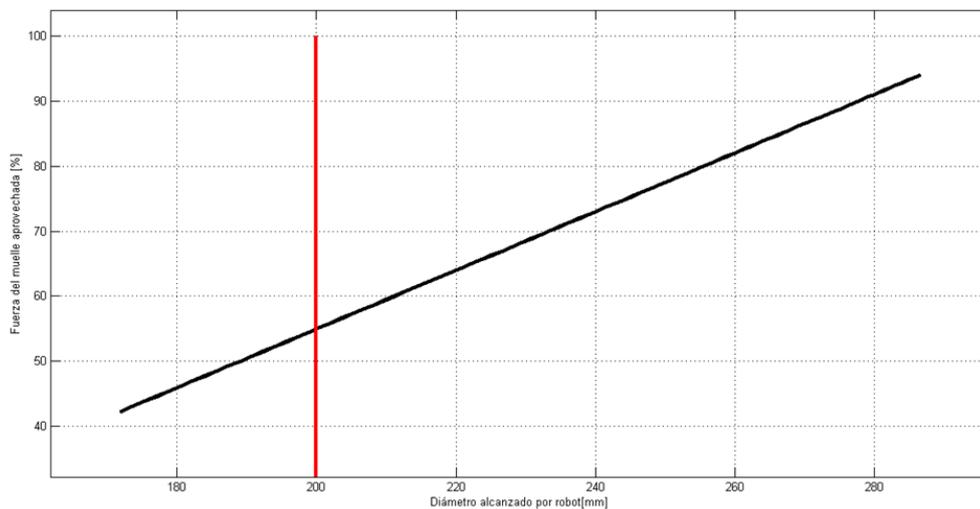


Figura 8.8 Aprovechamiento del muelle según diámetro.

Por el mismo efecto de aplicar una fuerza con un ángulo, el muelle sufre un efecto parecido pudiendo aprovechar más sus características a diámetros más grandes.

Robot Inspeccionador de Tuberías

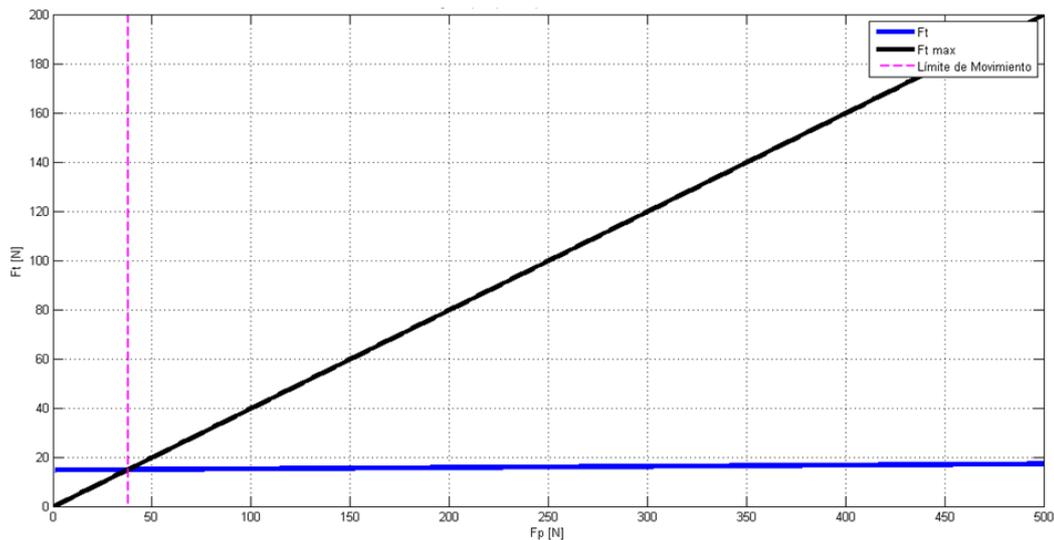


Figura 8.9 Evolución de la fuerza de tracción máxima y aplicada.

Tras realizar un estudio de la tracción del robot pudimos comprobar que por sí solo sin un muelle que lo ayude, la fuerza normal que genera no es suficiente para permitir la rodadura del robot. Es por este motivo entonces que representamos ambos valores para saber cuál es el valor límite en el que se genera la tracción y así conocer mejor que fuerza normal hay que buscar.

Es importante tener en cuenta que la fuerza de presión favorece el aprovechamiento de la tracción máxima admisible entre rueda y superficie. Sin embargo, aplicar esfuerzo normal de más puede entorpecer el movimiento del robot.

8.2.2. Simulaciones de resistencia

Se procedió a realizar simulaciones de FEA para poder comprobar la duración de las piezas y así mejorar el diseño de todo el sistema. Los resultados nos ayudarán a modificar piezas durante su diseño y comprobar que las piezas finales son capaces de soportar ese esfuerzo. Los resultados podrán verse en el anexo “FEA”.

8.3. Modelado Virtual y selección de componentes comerciales

Una vez conocidos los parámetros de la síntesis ya tenemos unos valores de partida para poder generar una referencia geométrica de los elementos a implementar.

Para el diseño se ha dividido el conjunto en dos partes correspondientes a los dos módulos, pero como las funciones que desarrollan son casi idénticas exceptuando el módulo de láser para medir la distancia casi todo el trabajo de diseño es idéntico. Por estas razones, vamos a explicar en

detalle el diseño del módulo 1 que incluye el láser y es más complejo, y después la unión de ambos módulos.

A la hora de estudiar el conjunto del módulo se divide en dos partes que corresponden a la estructura básica del sistema, y las tijeras que realizan los movimientos.

8.3.1. Estructura

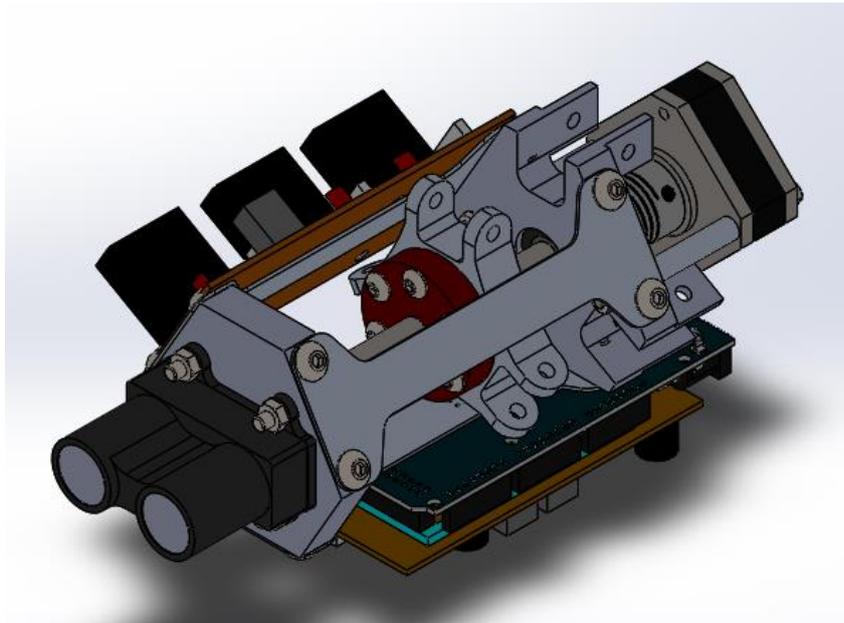


Figura 8.10 Estructura del robot.

La estructura expuesta en la imagen anterior integra todos los dispositivos que deben ir directamente anclados a la parte inmóvil del mecanismo. Esta zona es la que anteriormente se describía como el bastidor del mecanismo de tijera, que unía la zona rígida y la corredera de movimiento. Además de esta parte de generación de movimiento irán colocados allí también los elementos de electrónica principales.

Husillo

Nuestra forma de realizar el movimiento lineal es a través de la conversión de un movimiento rotativo (un motor) a un movimiento lineal. Este efecto se logra gracias al movimiento de una tuerca a lo largo del husillo. Elegiremos rosca trapecial por su mayor capacidad para mover cargas además de su capacidad de autorretención [19] para evitar movimientos de la tuerca ante cargas elevadas.

Robot Inspeccionador de Tuberías

Para economizar el espacio, clave en nuestra aplicación, nos iremos a los más pequeños en diámetro con el objetivo de reducir la tuerca y por tanto tratar de mantener el punto de inicio de la tijera lo más cercano posible al centro de revolución del tornillo de potencia.



Figura 8.11 Husillo de rosca trapecial elegido. [20]

Tuerca del husillo

Se ha optado por una tuerca del mismo fabricante para asegurar el uso del tipo de rosca. Hemos elegido la incorporación de una brida para poder sujetarlo a otra pieza con facilidad. En cuanto al material, se escogió el material de Igus Iglidur por varios motivos:

- Menor densidad que el latón o el acero.
- Mismo tamaño que tuercas de otros materiales.
- Bajo coeficiente de fricción, pero suficientemente elevado como para tener problemas de falta de autorretención.
- Fecha de datos y test completa del fabricante.



Figura 8.12 Tuerca seleccionada para el husillo.

Generación de movimiento lineal

El movimiento lineal en los husillos procede de un movimiento rotatorio generalmente producido por un motor. En nuestro caso queremos que se llegue a una posición y se mantenga ahí salvo excepciones. Esto se traduce en que necesitamos posicionamiento y movimiento con velocidad por lo que que la opción más apropiada es un motor PAP.

Sus ventajas son claras, ángulos definidos con alta precisión y un par de retención que impide que el motor se mueva a no ser que el par aplicado sea superior.

Con el objetivo de ahorrar espacio y peso se ha elegido un motor PAP estrecho de tamaño estándar NEMA 17[21]. Con una sección más estrecha logramos menos peso y facilitamos su anclaje, consiguiendo el par requerido para soportar las fuerzas.



Figura 8.13 Motor PAP utilizado.[22]

Acoplamiento del motor

Es necesario transmitir el par del eje del motor al eje del husillo, para ello hay que incorporar un acoplamiento. Debido a posibles errores de fabricación y por tanto posibles desalineaciones escogeremos uno de tipo flexible que tolera cierta diferencia radial entre los ejes.



Figura 8.14 Acoplamiento flexible seleccionado.

Soportes del husillo

Para mejorar el rendimiento del husillo y al mismo tiempo reducir cargas en el elemento se realizará un apoyo doble del husillo en ambos extremos. Esto implica que son necesarios unos rebajes en los extremos para acoplar los rodamientos de apoyo.

También se incorporarán ranuras para colocar unos circlips y así inmovilizar axialmente los rodamientos. Los circlips o arandelas elásticas serán del tamaño definido para el diámetro de eje según la norma DIN 471.



Figura 8.15 Rebajes en husillo para realizar los apoyos.

Rodamientos del husillo

El husillo trabaja principalmente con cargas axiales a su eje, aunque también sufre ciertas cargas radiales debido a la presión ejercida contra las paredes. Como hay una combinación de cargas, pero no son muy elevadas se utilizarán rodamientos rígidos de bolas. Su trabajo principal es radial, pero su capacidad de carga es muy elevada por lo que podrá soportar ambos componentes de fuerza sin ningún tipo de problema.



Figura 8.16 Rodamiento 626-2Z seleccionado.

Adaptador tuerca

La tuerca es la que llevará el movimiento lineal que debe transmitirse a la tijera. Es por ello que debemos aplicar estos movimientos al eslabón de la tijera. Para implementar esto incorporaremos sobre la tijera una pieza que encaje en ella y posea unos salientes con un agujero sobre el que incorporar el pasador que va al eslabón. Tendrá también unos agujeros con los que unir axial y radialmente ambas piezas.

Por último, mencionar que la distancia a la que esté el agujero de unión del eslabón será la nueva “ x_0 ” y su tamaño mínimo dependerá del mínimo del diámetro de la tuerca más la distancia que permita al eslabón girar sin interferir con otra pieza en su camino.

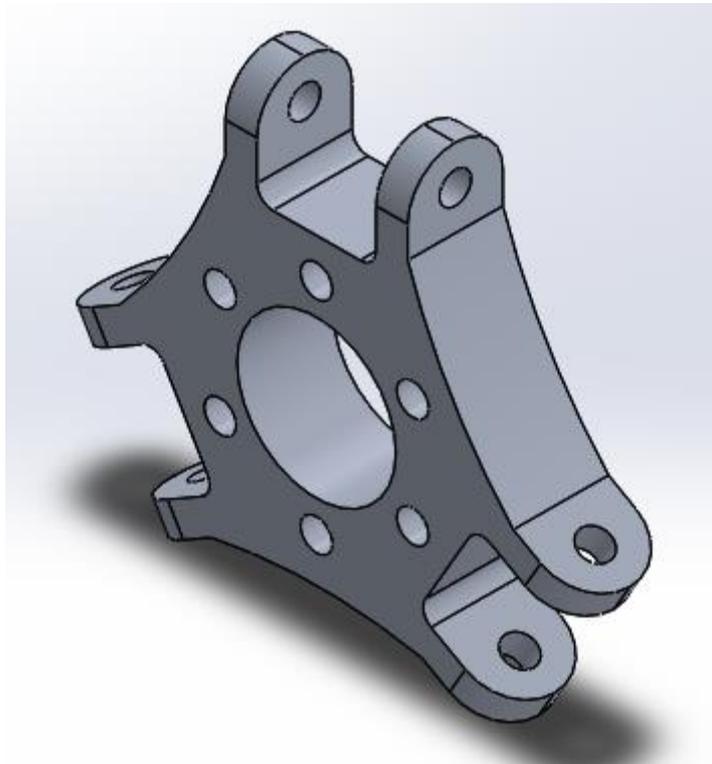


Figura 8.17 Adaptador tuerca.

Soporte y contrasporte

Serán necesarios dos elementos uno a cada extremo del husillo que soporten los rodamientos del eje. Además, el que esté en la posición delantera debe incorporar el sensor láser de distancia y por tanto debe tener algún método de unión para él. Mientras el otro debe soportar tanto el otro eslabón de la tijera y el motor paso a paso.

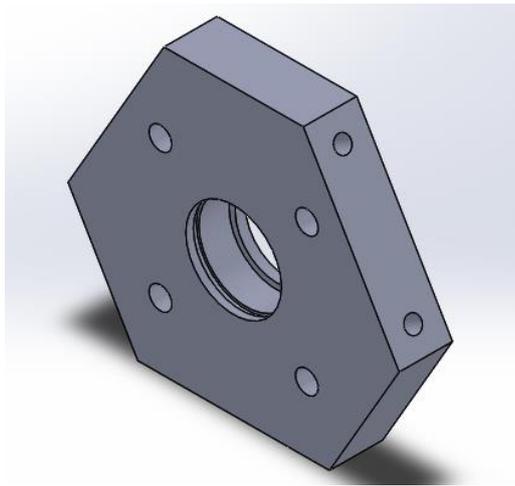


Figura 8.18 Contrasoporte.

Como se ve en la imagen anterior el Contrasoporte posee la entrada para el rodamiento con un resalte por un lado y una ranura para un circlip en el otro. Además, tiene los agujeros para sujetar el sensor láser. Cabe destacar como se aprecia en la siguiente figura que para evitar que los tornillos salgan hacia fuera y puedan reducir la longitud de recorrido de la tuerca se les ha incorporado un avellando para prevenir esa situación.

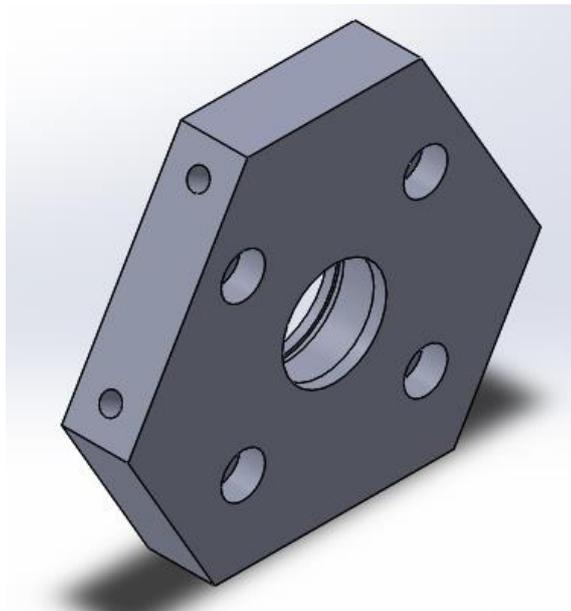


Figura 8.19 Avellanados para tornillos del sensor de distancia.

Finalmente hay unos agujeros roscados en 3 de las caras planas del hexágono. Su finalidad es la de incorporar una pieza que una el soporte y contrasoporte y así rigidizar e inmovilizar la estructura.

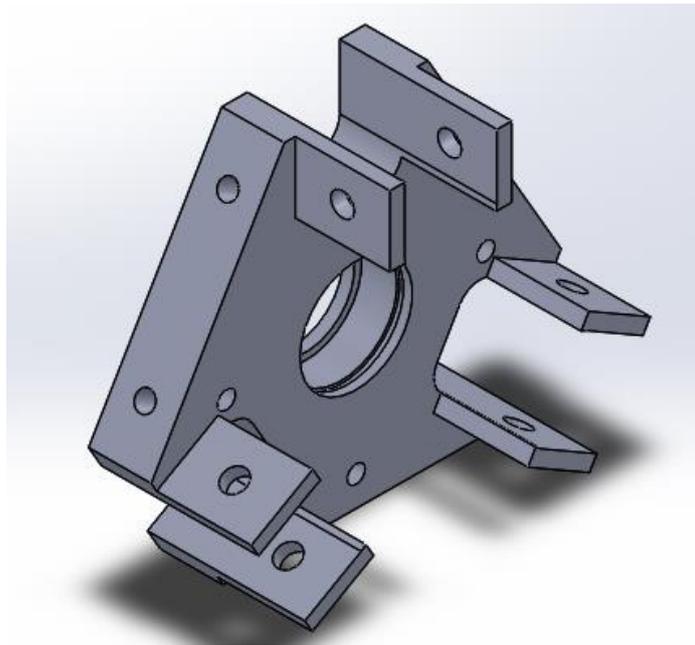


Figura 8.20 Soporte.

El soporte que se observa en el dibujo anterior, tiene como su pieza complementaria la misma estructura para incorporar y sujetar el rodamiento para el husillo. Además, tiene 3 agujeros para el soporte del motor PAP. No se han podido introducir 4 debido a la no compatibilidad geométrica con los 3 añadidos para soportar la tijera. Esto provocaba que uno interfiriese con el movimiento de un eslabón y por tanto se prescindió de él.

Aquí como en el soporte de la tuerca hay que introducir zonas para poder colocar el eslabón en este caso se produjo la salida de este punto del núcleo de la pieza por 3 causas:

- Extensión de longitud del recorrido radial dentro del tubo de la tijera dentro del tubo.
- Facilitar la unión entre soporte y contras soporte sin interferir demasiado.
- Reducir la “ x_0 ” del punto de partida de la tijera igualándola con la del soporte de la tuerca.

Unión estructura

Como se comentó en las piezas anteriores, existían unos agujeros para unir la estructura. Es importante unir ambos extremos. Esto confiere rigidez a la estructura y así mejora el movimiento de la tuerca. También tiene funcionalidad como soporte para las placas de la electrónica, así como para otros elementos, por ejemplo, los finales de carrera..

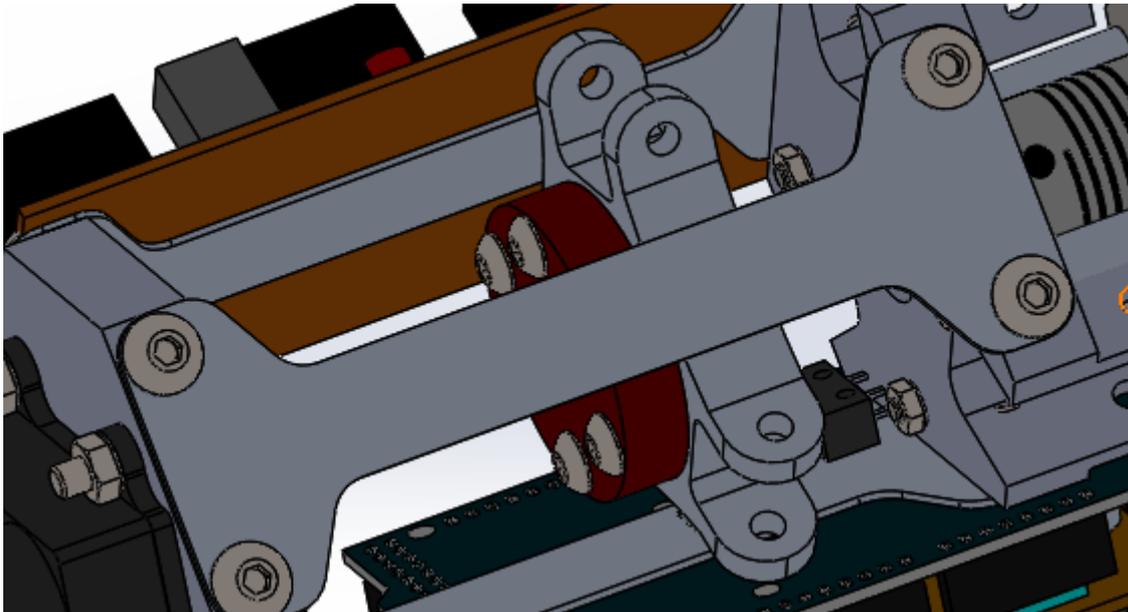


Figura 8.21 Unión de la estructura.

Soporte del motor PAP

El motor PAP viene preparado para la unión mediante 4 tornillos colocados en sus esquinas de la periferia. Sin embargo, los tornillos son de M3 muy pequeña y no existen tornillos tan largos. Como alternativa se usarán varillas roscadas con casquillos entre el motor y el soporte para rigidizar y hacer más sólida la unión. Para evitar movimientos no deseados se pondrán tuercas con arandelas en el lado plano del soporte, mientras que tras el motor como tiene rosca en el agujero se pondrá tan solo una tuerca para realizar una fijación de tuerca-contratuerca.

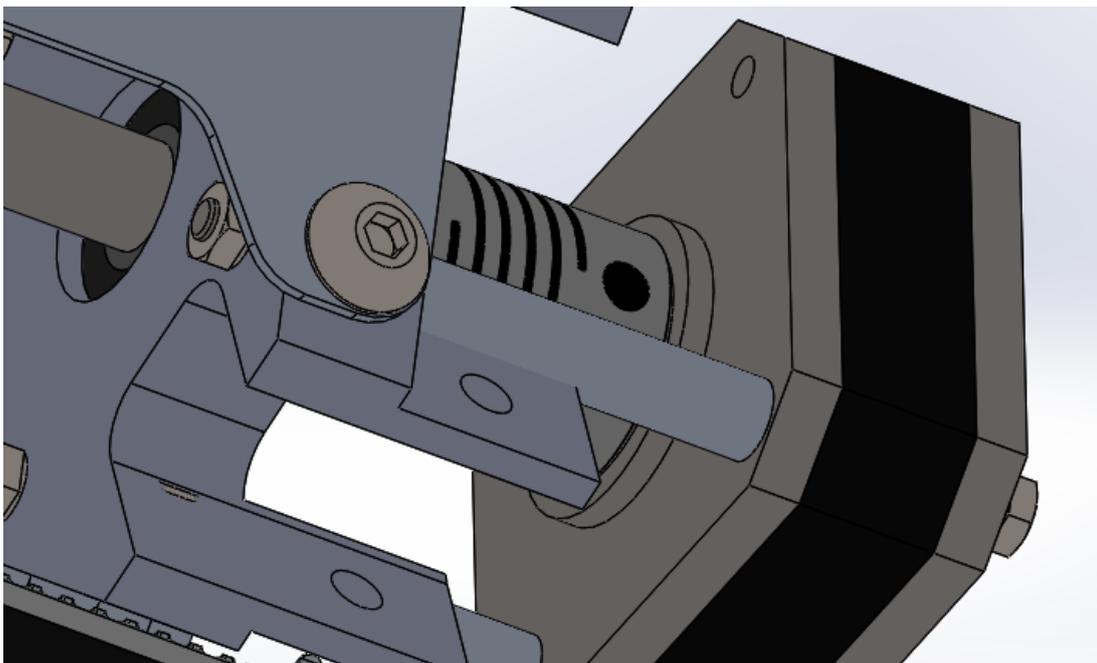


Figura 8.22 Casquillo, varilla y tuercas para la unión.

Electrónica

El lugar perfecto para la electrónica es un lugar que no tenga movimiento y que le pueda ofrecer una zona con relativamente “pocas vibraciones” y así evitar excesivos ruidos en el circuito.

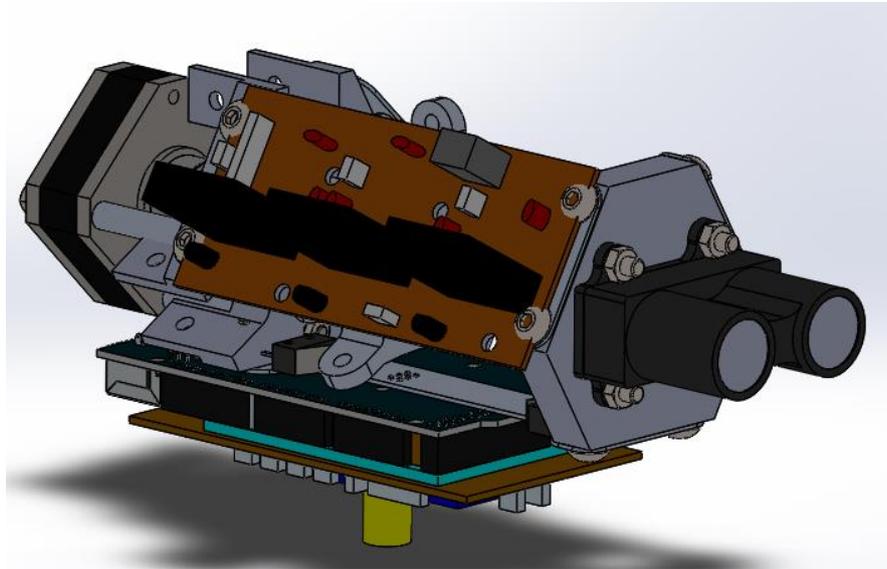


Figura 8.23 Situación electrónica.

En el caso de la parte que contiene la sensorización de la IMU necesitamos que esté lo más alineado posible con el centro del tubo. Por ese motivo, la situaremos en la placa inferior (la que en inicio irá paralela al plano medio del tubo) y así tener valores de ángulo lo más cercanos a 0 posible. Mientras la placa de controla la propulsión de los motores irá en cualquiera de los otros dos tirantes de la estructura.

Será necesario incluir arandelas extra en los agujeros para tener mejor contacto con la chapa y que no se apoye la placa en los finales de las soldaduras. También irán directamente a las placas los finales de carrera. Su colocación no será fija pues habrá que regularla in situ. Esto debe hacerse así para asegurar el contacto y la generación de señal en el punto justo.

Por último, el láser irá colocado en su zona con los tornillos y los agujeros preparados para ello, también incorporaremos unas muescas en el contorno del láser. Esta inclusión es para poder colocar el láser con la mayor exactitud posible y lograr un buen ajuste inicial.

Tornillería

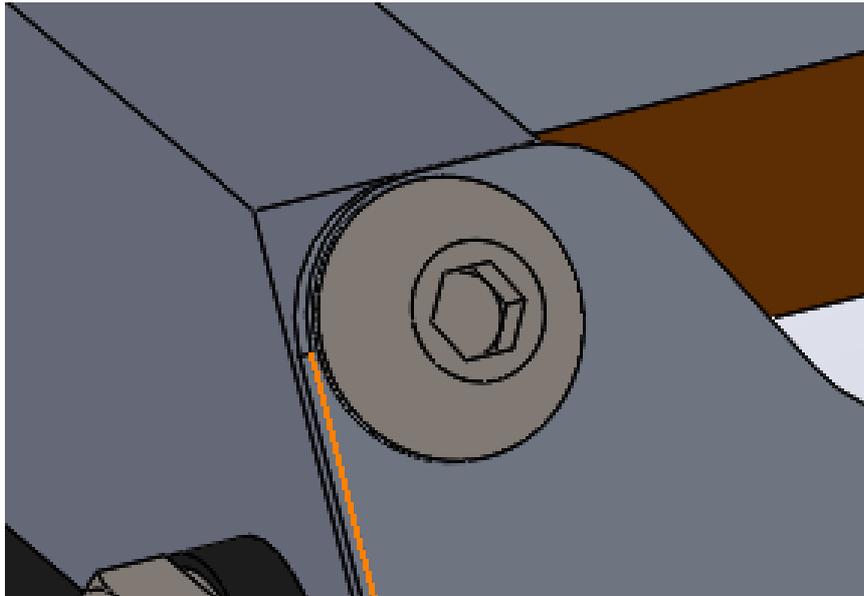


Figura 8.24 Tornillos elegidos.

Los tornillos elegidos son los ISO 7380 en todos los casos posibles. Se ha elegido este tipo de tornillo porque tienen una cabeza muy plana lo que es muy útil a la hora de ganar espacio útil en las piezas y poner el mayor número de impedimentos a posibles interferencias entre piezas. Además, tienen cabeza Allen lo que es ideal para el montaje pues su forma en “L” facilita el atornillamiento en zonas estrechas y pequeñas.

8.3.2. Tijera

La tijera es el mecanismo que nos facilita la posibilidad del agarre con el tubo. Además, es la que contiene los motores DC que consiguen el movimiento del robot.

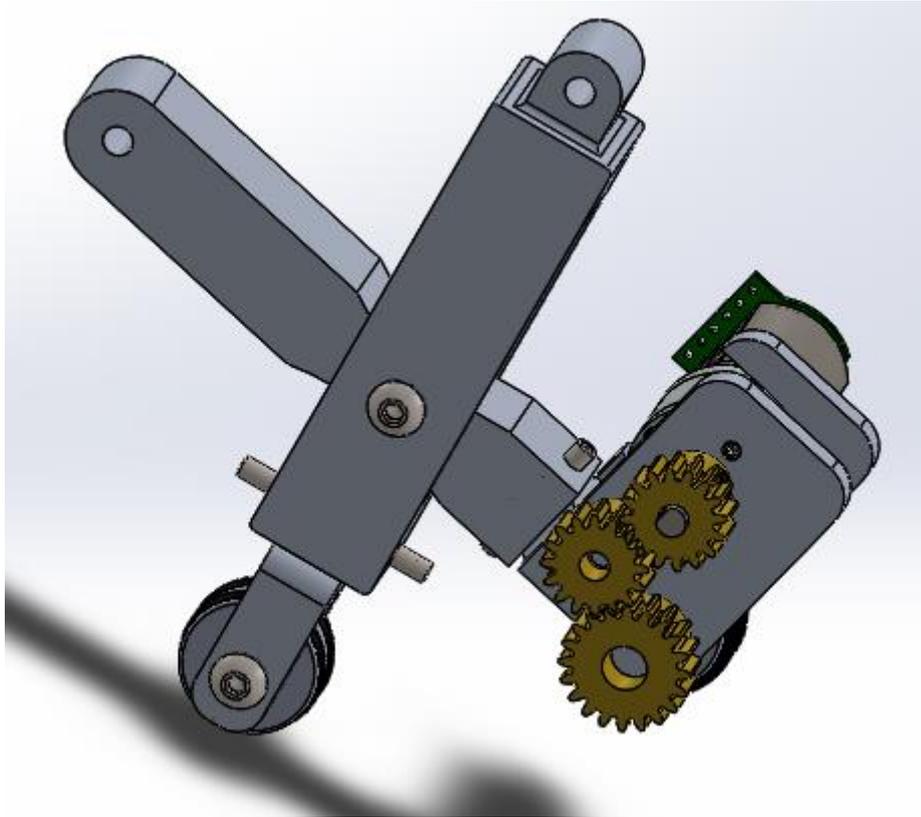


Figura 8.25 Tijera.

La tijera consta de dos partes principales un brazo exterior que tiene una cavidad en su interior para alojar la segunda parte, el brazo interior. Ambos conforman los dos eslabones de la tijera.

Estructura tijera

La tijera tiene una estructura cinemática determinada en la que se unen ambos eslabones en un punto central. En nuestro caso se ha logrado con la cavidad mencionada anteriormente. Gracias a esta abertura en un eslabón podemos colocar ambos y unirlos fácilmente con tan solo dos piezas principales. Se consigue así una buena planitud entre los brazos y conseguir que el movimiento de la tijera y que los planos medios de las piezas se encuentren lo más próximos posibles.

Para reducir la fricción entre los eslabones colocaremos una arandela a cada lado del eslabón interior de este modo la fricción disminuye mucho en la apertura o cierre de nuestro accionamiento. Se muestra a continuación la cavidad de la tijera.

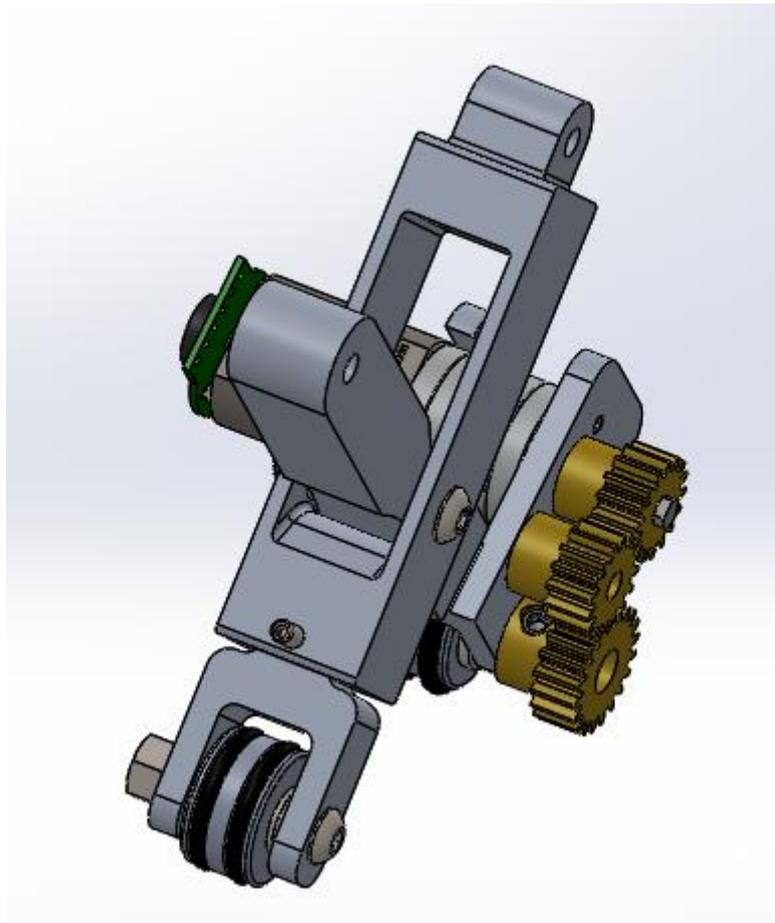


Figura 8.26 Cavity del brazo exterior para el interior.

Otro aspecto importante es la generación dimensional de las medidas de los eslabones. En este caso por condiciones del diseño no se ha podido garantizar la consecución de esas medidas. Al colocar muelles para el amortiguamiento en las ruedas estamos obligados a colocarlos en la parte más cercana a estas lo que hace que el lado más largo sea el exterior. Nuestras medidas eran de 65 y 40 mm, con el objetivo de lograr hacerlo lo más compacto posible se intentará conseguir una medida media entre ambas en las dos zonas de unos 50 mm. Para esto lo compararemos con el muelle trabajando con la mitad de su desplazamiento.

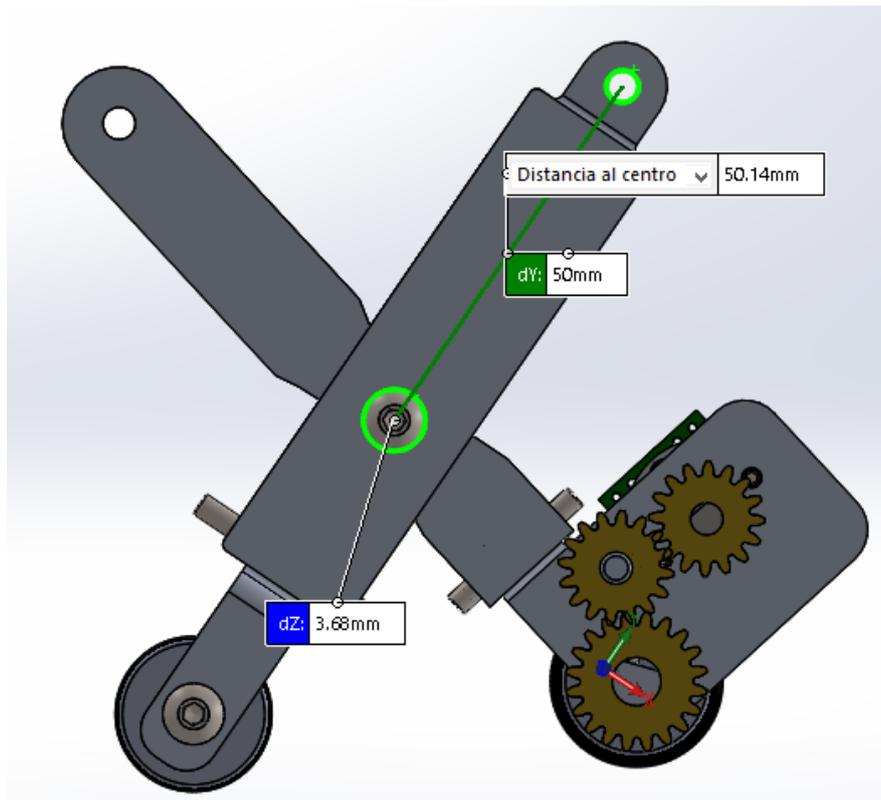


Figura 8.27 Medida parte anterior.

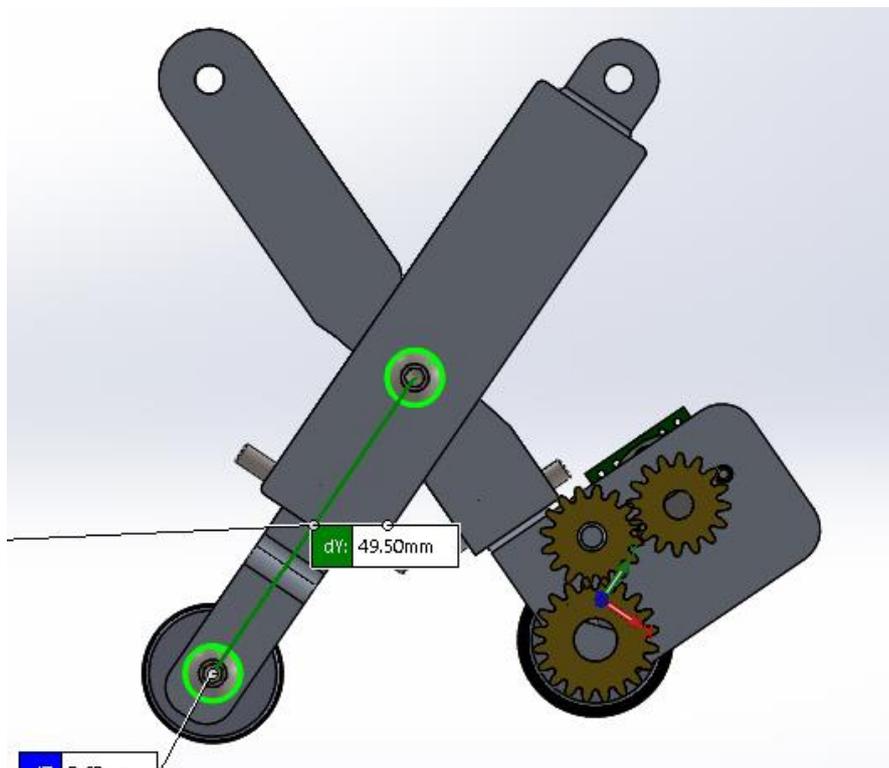


Figura 8.28 Medida parte posterior.

Como se puede ver en las dos figuras anteriores, ambas medidas son bastante próximas al valor medio de los valores dato por la síntesis. La solución obviamente no es la óptima, pero sabemos que trabajamos cerca de unos de los óptimos del sistema. Por otro lado, en la fotografía anterior

el recorrido de los muelles es fácilmente apreciable y conseguimos un amortiguamiento con un recorrido posible grande.

Geometría de eslabones

Ambos eslabones no parten del diseño básico de un rectángulo con redondeos en los extremos. Se han tenido que modificar partes con el objetivo de lograr mejores ajustes en sus zonas de contacto.

Para empezar ambos tubos no tienen el mismo ancho debido a que uno debe contener al otro. Evidentemente eso dificulta la creación de los añadidos de las ruedas y que deben ser distintos. Por ese motivo la medida de la entrada de las extensiones para las ruedas se ha hecho acorde a un tamaño común y no a medidas relativas a cada parte de la tijera.

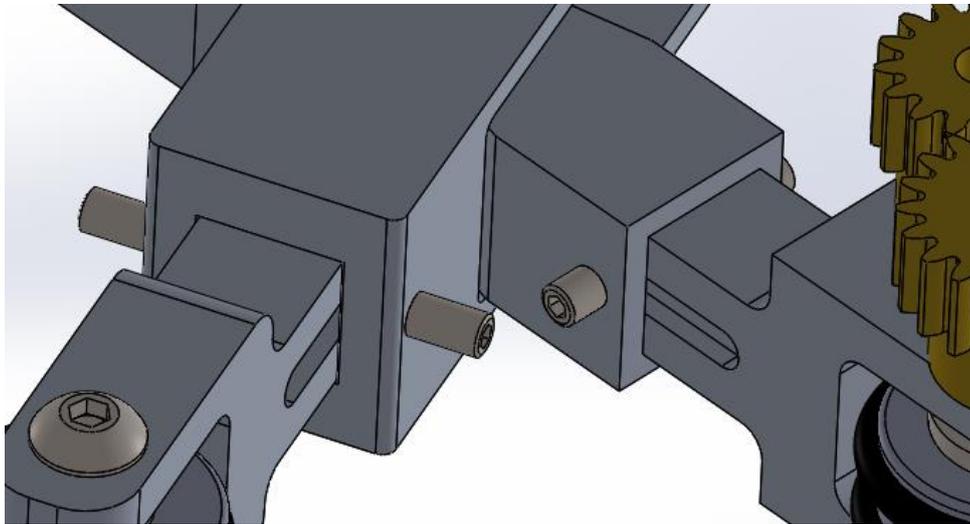


Figura 8.29 Tamaño relativo entre agujero y forma de eslabón para compatibilidad.

También fue necesario rebajar la entrada del brazo exterior en su origen y reducirla según el ancho total como se ve en la siguiente fotografía.

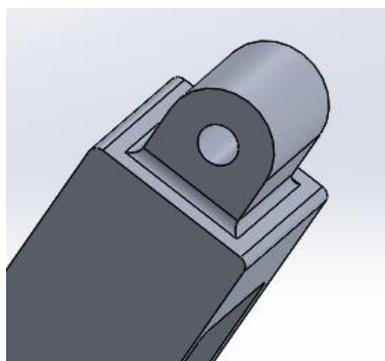


Figura 8.30 Rebaje del inicio del eslabón.

Robot Inspeccionador de Tuberías

Esto se ha implementado para poder reducir el tamaño del ancho a integra en el soporte de la estructura. Simplemente quitando material en la zona más ancha del brazo logramos reducir el tamaño y el peso de la otra pieza de la estructura.

Otra dificultad encontrada, fue el cruce entre eslabones, teniendo la longitud limitada y siendo necesario un encaje para el muelle la zona del cruce tiene material susceptible de chocar con el movimiento. Por eso fue necesario generar una curva en esa zona de conflicto en ambas piezas. Esta curva se hizo pensando en evitar choques innecesarios y al mismo tiempo marcar un límite de apertura y cierre mecánico que complemente a los finales de carrera en caso de fallo de estos últimos. A continuación, se muestra el resultado logrado.

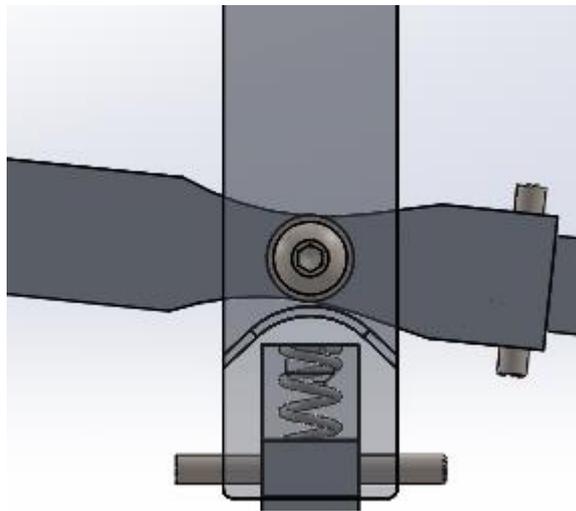


Figura 8.31 Forma para evitar contacto y definir límites.

Mecanismo de amortiguación

Para facilitar la fuerza de agarre en el tubo y al mismo tiempo tener cierto recorrido de los brazos en caso de obstáculos en el camino del robot se añadió un sistema de brazos extensibles.

Debemos garantizar entonces que la parte de la extensión de la rueda pueda desplazarse linealmente al brazo, pero al mismo tiempo no podemos permitir que pueda salirse. El mecanismo se muestra en la siguiente imagen.

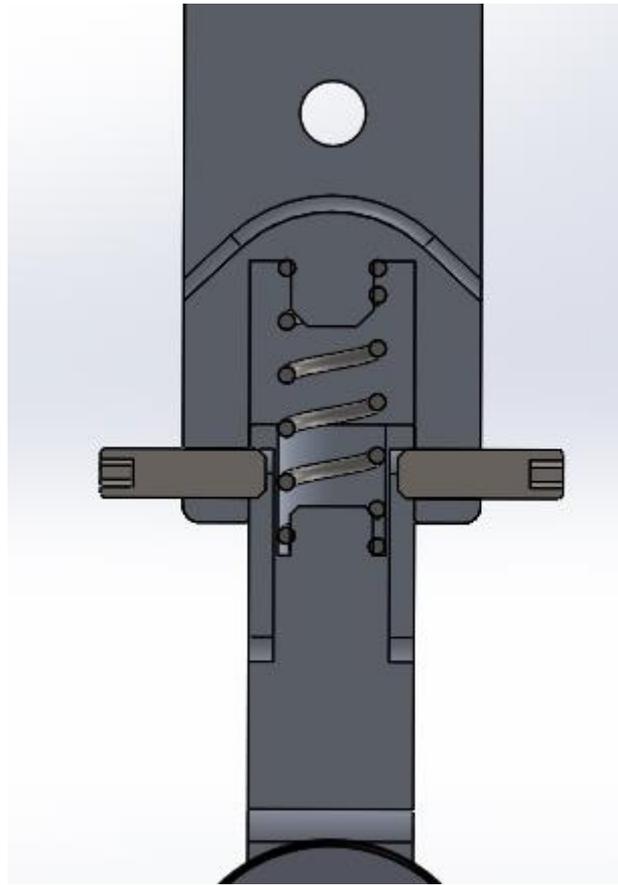


Figura 8.32 Mecanismo de amortiguación.

El sistema es un rebaje interno en el brazo anterior con un agujero de forma cuadrada idéntica al perfil exterior de la extensión para las ruedas. Se puede ver mejor en la siguiente ilustración.

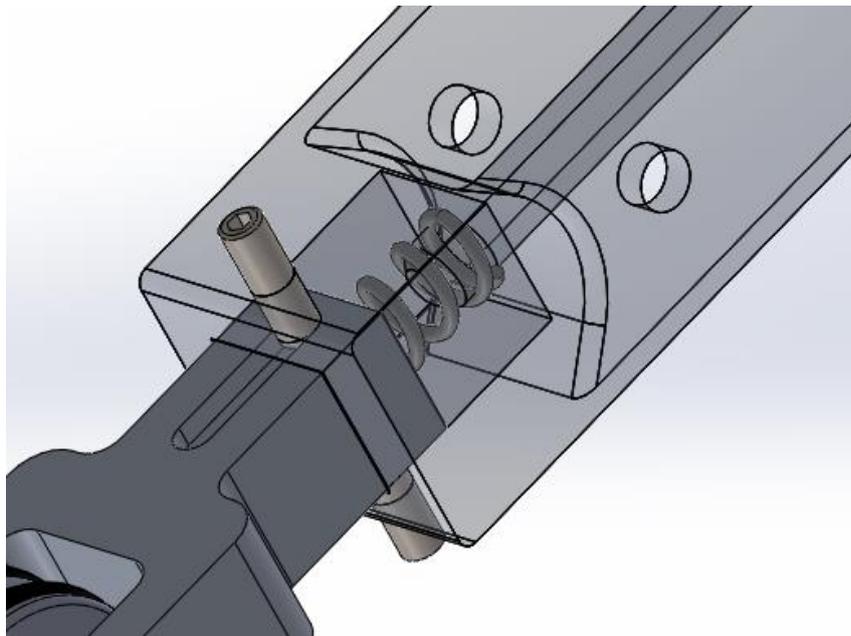


Figura 8.33 Cierre de forma de las piezas.

Robot Inspeccionador de Tuberías

Esta forma tiene dos propósitos: por un lado, asegurar un perfecto contacto durante la apertura y cierre del mecanismo y por otro, su forma rectangular impide giros del cabezal sobre el eje común de piezas del movimiento.

Para garantizar el buen cierre del muelle y asegurar su asiento en las piezas se introdujeron unos rebajes interiores menores a su diámetro interior para poder soportar el muelle sin dejar que se mueva demasiado.

Por último, queda describir cómo evitar la separación entre ambas piezas. Esto se logra mediante un cierre en dos partes. La primera, consta del eslabón exterior que contiene al otro. Tiene un agujero simple roscado en dos de sus lados opuestos.

La segunda, se encuentra en la extensión del motor. Esta tendrá un coliso ciego en dos de sus lados. Se pondrá en los dos que no abrazan la rueda y así poder lograr un agarre más eficiente.

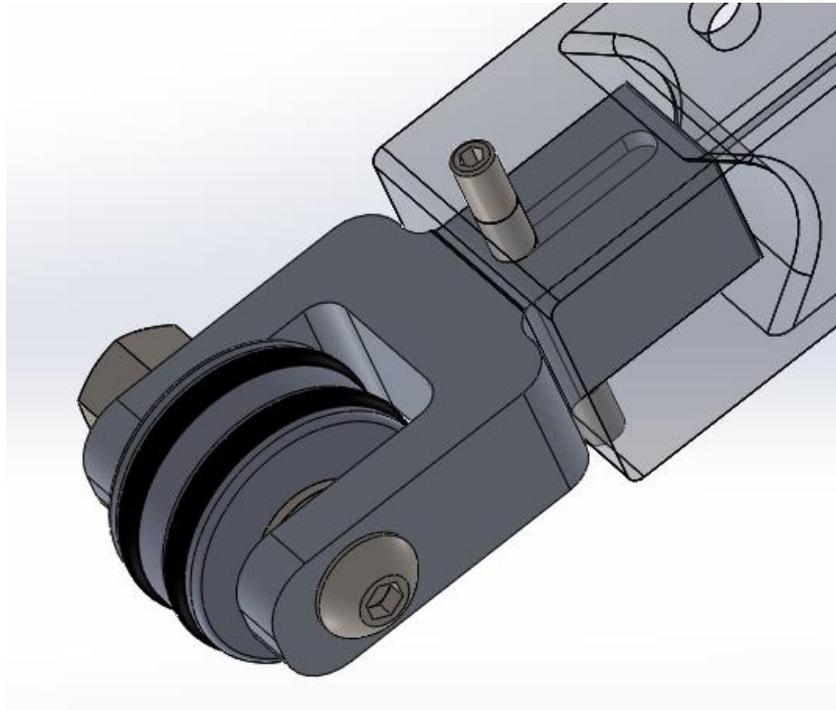


Figura 8.34 Posición de los colisos.

Como se puede ver en la imagen anterior colocando los colisos en esa parte de la extensión para las ruedas se puede aprovechar mejor el espacio y es mucho más sencillo de cara al montaje.

En conjunto tenemos un agujero en la línea del coliso de manera que si sube y baja la segunda parte del brazo el agujero siempre verá una zona mecanizada del coliso. Colocando un tornillo tipo prisionero en ese agujero logramos que el soporte de las ruedas no pueda salirse ni entrar más de lo debido en su movimiento de subida y bajada.

Extensión o soporte de las ruedas

Al ir el brazo separado en dos piezas para poder incorporar amortiguación la parte del final que va separada debe incorporarlas ruedas. Aunque esto sea suficiente para las ruedas conducidas, las ruedas motrices necesitan un añadido a esta pieza para soportar el motor y la transmisión. Tenemos dos piezas con una función común y una diferencia. Sin embargo, trataremos de mantener una parte común. El porqué de esto es muy simple, si mantenemos la parte de unión a los brazos igual tendremos grandes posibilidades de ensayo sobre cuantos motores incorporar y donde colocar las extensiones para el motor

Extensión simple

Ésta solo necesita cubrir a la rueda conducida e incorporar un coliso. Puede apreciarse su diseño en el siguiente dibujo.

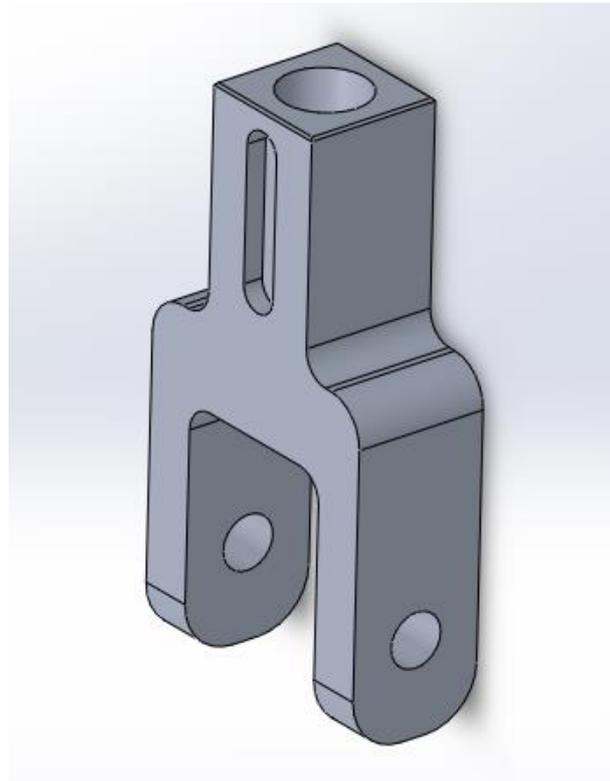


Figura 8.35 Extensión simple.

Esta será la forma original que incorporará la extensión para el motor. Sus diferencias serán las forma y colocación del orificio de las ruedas debido a la diferencia entre rueda motriz y conducida. También cambiaría la parte que sujeta al motor que agranda el tamaño de la pieza.

Extensión para el motor

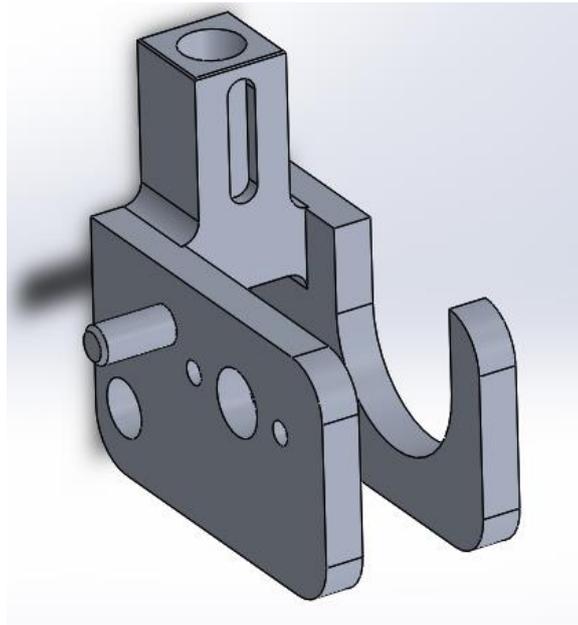


Figura 8.36 Extensión para el motor.

Como se puede apreciar en la imagen anterior. La base de la pieza es la misma, solo se modifica el agujero en el que va la rueda en tamaño y posición y toda la parte para el anclaje de motor y engranajes.

Esta parte extra de soporte consta de un rebaje trasero que sirve para colocar el motor. Es concéntrico al agujero delantero que es donde va la parte anterior al eje y al lado los dos orificios donde se ancla el motor con unos tornillos.

Por último, existe un saliente intermedio que corresponde al orificio para soportar el engranaje conducido.

Transmisión

Debido a la separación entre el eje de la rueda y el eje del motor es necesario incorporar una transmisión que traslade el movimiento de una a la otra. En nuestra aplicación la velocidad no es un requerimiento limitante, pero el par sí. Necesitamos el par para poder vencer obstáculos y subir con facilidad por tramos verticales.

La transmisión tiene una distancia relativamente corta y además tendrá cargas altas para su tamaño. Es por este motivo que los mejores elementos para esta tarea son los engranajes. Aunque debido a la distancia entre ambos tenemos dos opciones:

- Colocar una sola etapa de reducción que implicaría engranajes muy grandes.

Robot Inspeccionador de Tuberías

- Colocar dos etapas con 3 o más engranajes.

La segunda opción es más costosa y un engranaje intermedio (en el caso de 3) no tendría efecto en la ganancia de par. Sin embargo debemos utilizar esta opción debido a que una sola etapa con dos engranajes implicaría diámetros más grandes que la rueda lo que provocaría interferencia en el tubo y por tanto no se podría mover el robot.

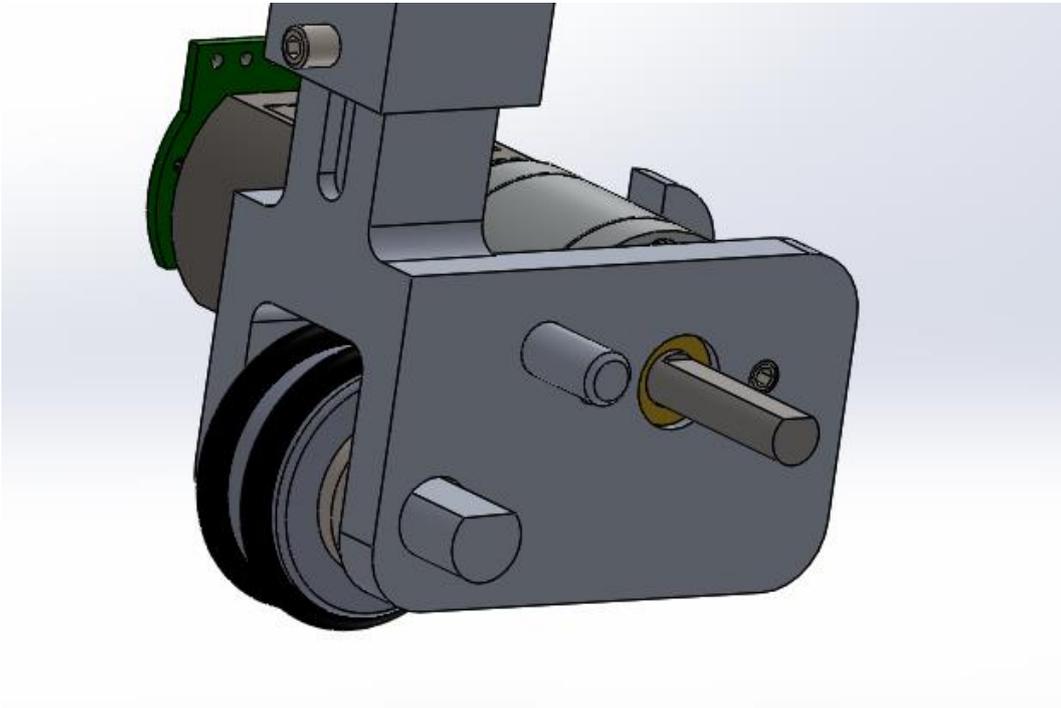


Figura 8.37 Separación entre ejes.

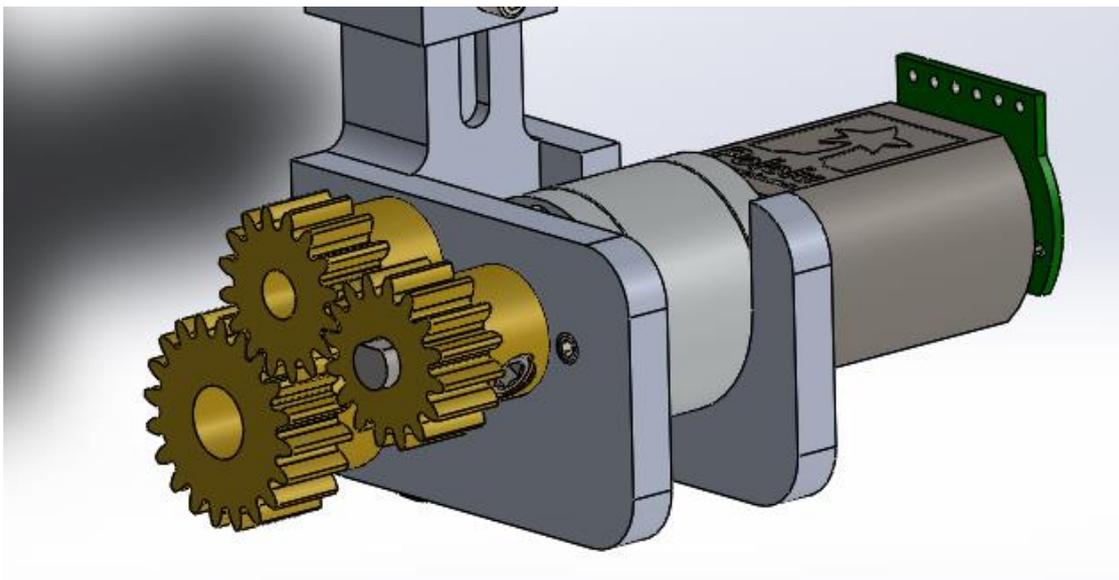


Figura 8.38 Transmisión del motor.

Ruedas

Robot Inspeccionador de Tuberías

Las ruedas serán las que generen por una parte el agarre que impida la caída del tubo mediante la fuerza de rozamiento, por lo que interesa que tenga un alto coeficiente de fricción con el tubo del metal. Por otra parte, la rueda motriz o ruedas motrices serán las que aplicando un par generen un movimiento. En otras palabras, tienen que tener un bajo coeficiente a rodadura, lo que implica que tengan baja deformabilidad. En resumen, necesitamos una goma que se deforme poco pero que al mismo tiempo tenga una buena adherencia con el tubo.

Tras buscar ruedas comerciales se llegó a la conclusión de que existe muy poca variedad de ruedas tan pequeñas, y o bien no están preparadas para el acople de ejes diferentes al de un motor de la misma compañía, o bien son para aplicaciones que no requieren mucha fricción entre cubierta y superficie.

La solución fue diseñar una rueda cuya cubierta son ruedas tóricas colocadas unos canales de un núcleo que ejerce de llanta. Generaremos dos tipos de núcleo: uno más grande para las ruedas motrices que requieren más par, mientras las ruedas conducidas serán más pequeñas y su eje será solo simple.

El otro núcleo tendrá que tener un eje del mismo diámetro que el hueco del engranaje exterior. El eje será fabricado en aluminio que incorporará un plano que casará con la forma del núcleo motriz. El propósito es que no exista deslizamiento y minimizar el juego entre el eje y el núcleo de la rueda para que la propulsión sea más eficaz.

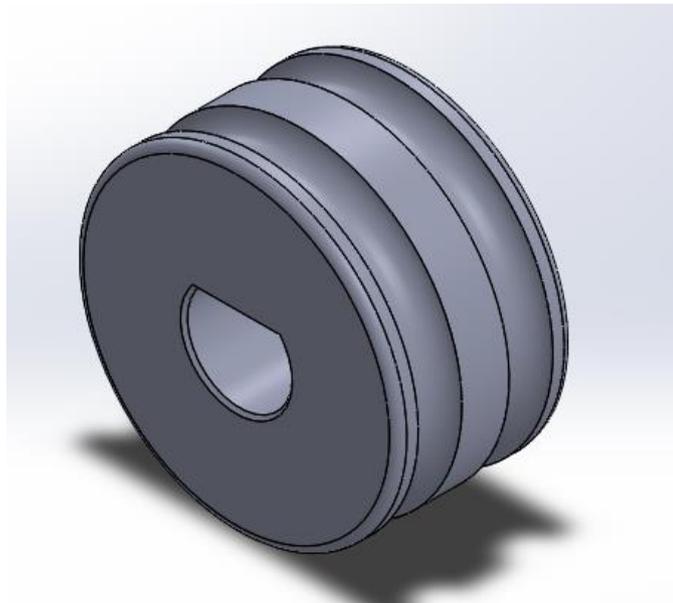


Figura 8.39 Núcleo de rueda con eje achaflanado.

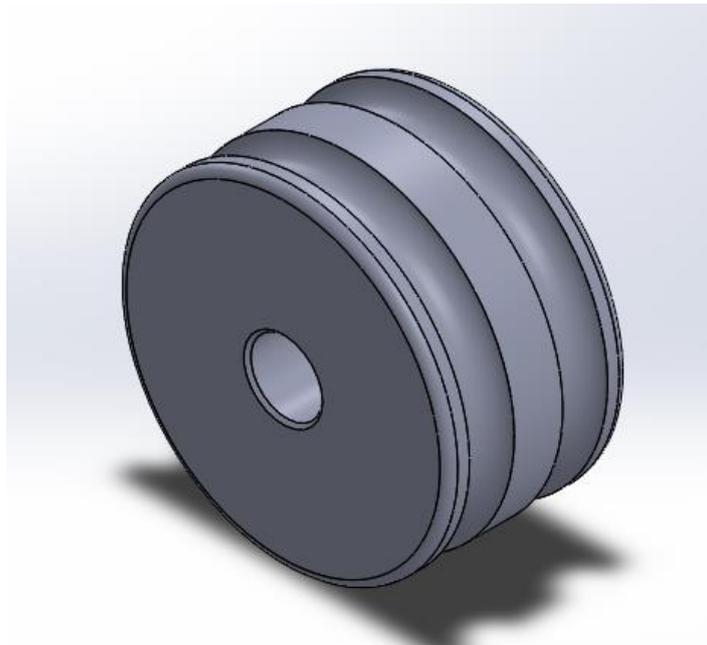


Figura 8.40 Núcleo rueda conducida.

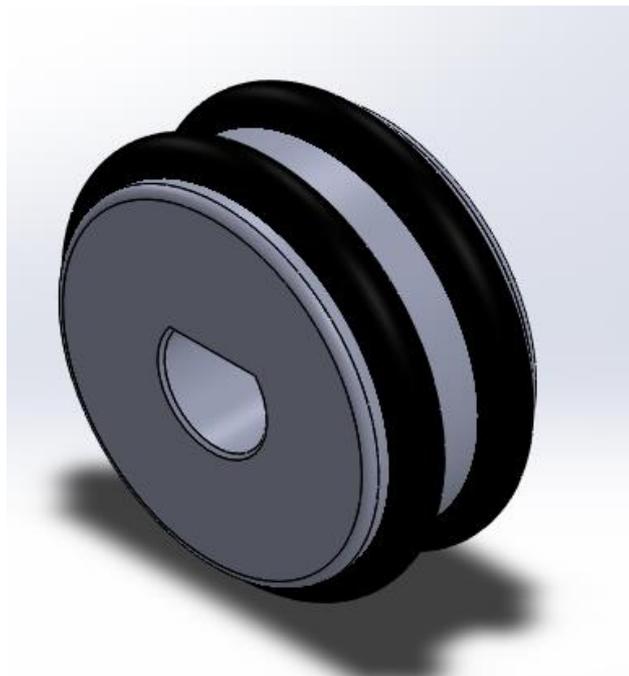


Figura 8.41 Rueda motriz

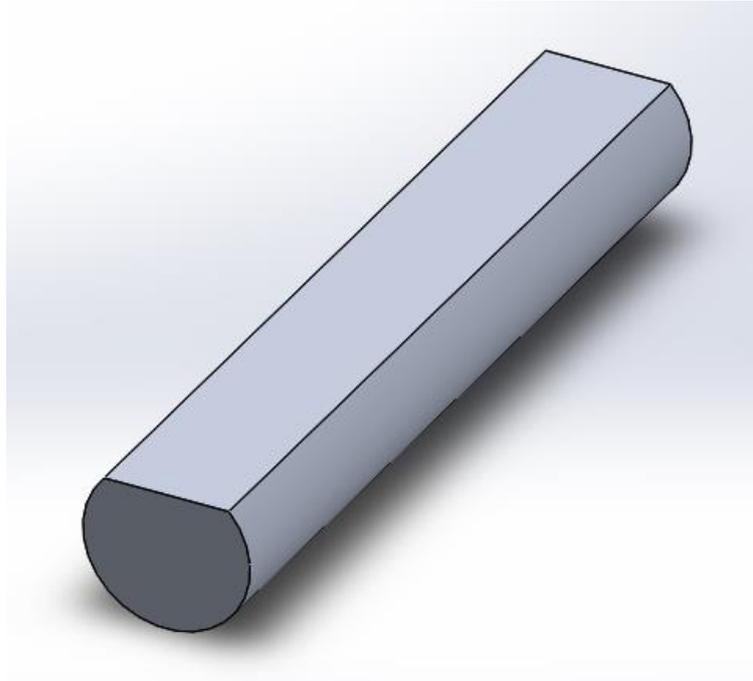


Figura 8.42 Eje de la rueda motriz.

8.4. Módulo entero

El conjunto entero de un módulo finalizado es tal y como se muestra en la siguiente imagen:

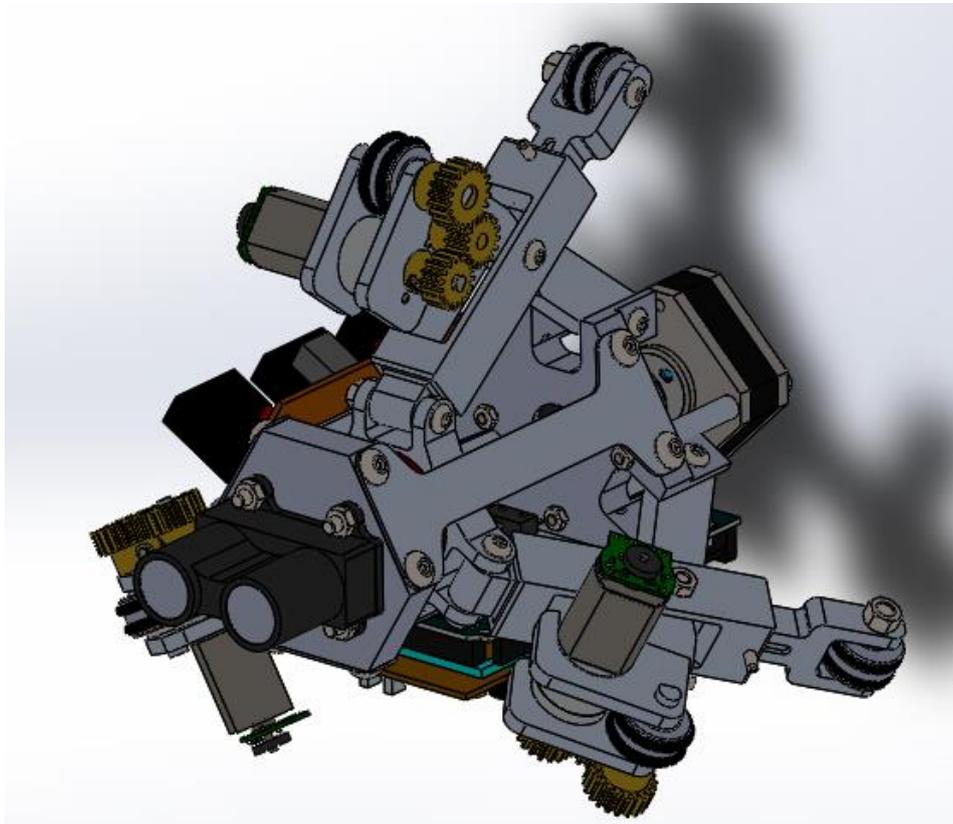


Figura 8.43 Módulo del robot.

8.5. Conjunto Total

Para tener un mayor control, que nos permita cierta variación y más posibilidades de movimiento en los codos se incorporará otro módulo en la parte trasera. Éste sería idéntico al primero, aunque no llevaría el láser incorporado ya que no podría realizar ninguna medición por encontrarse otro módulo delante.

Aunque ambos se moverán de forma independiente, si supondrán un apoyo el uno para el otro. Lo óptimo, en este caso, sería el uso de una unión rígida, pero dificultaría el giro en los codos; por lo que la unión debería ser rígida en algunos momentos y flexible al llegar a los codos. Como esto complicaría mucho el diseño mecánico se ha planteado el uso de otro método de apoyo.

La alternativa propuesta consistiría es que ambos módulos puedan desplazarse de forma independiente, de tal manera que si uno quedase atascado el otro pudiese tirar en dirección contraria para poder realizar un nuevo intento.

Esto lo implementaremos con la utilización de un cable que permita tirar en un determinado sentido para poder ayudar al otro módulo en caso de atasco, pero que no sea rígido para permitir cierta independencia entre ambos. La unión del cable irá desde los separadores del motor PAP del módulo delantero a los agujeros de unión del láser del segundo, y asegurado mediante tornillos.

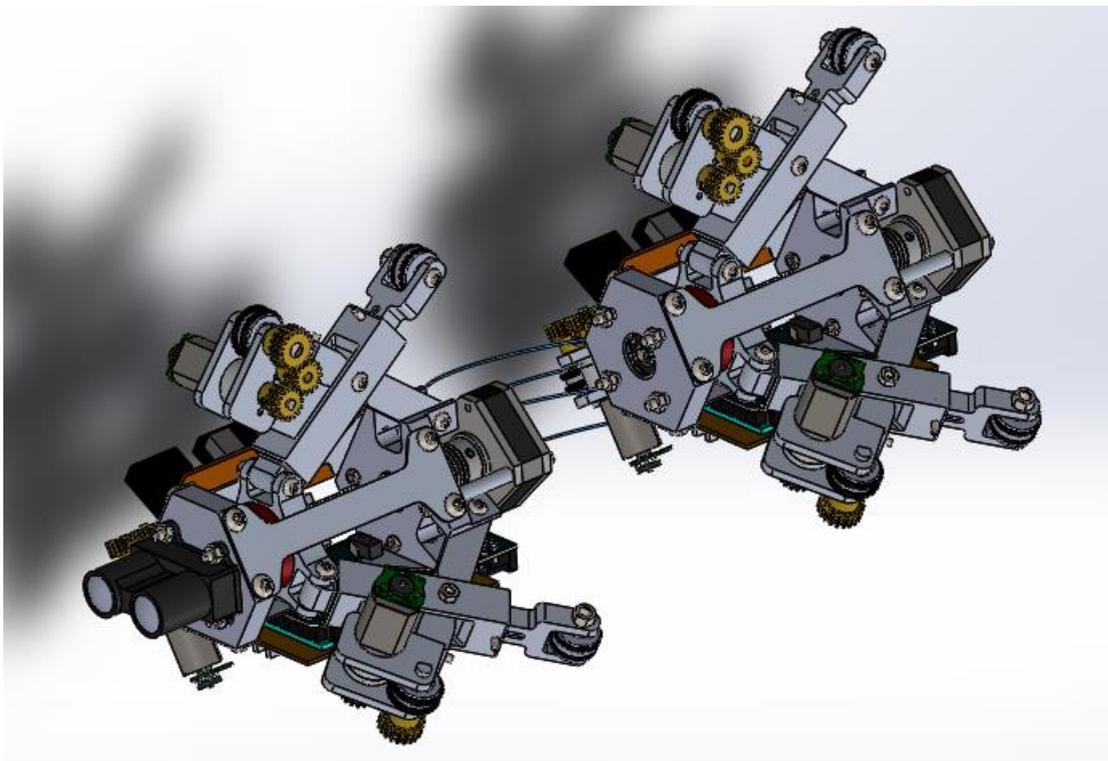


Figura 8.44 Conjunto total del robot con los dos módulos.

8.6. Rediseño

Tras finalización del prototipo se han detectado unas incidencias en algunos elementos del sistema que hacen necesario su modificación. Además debido a necesidades económicas se han cambiado los materiales del robot realizando las piezas en impresión 3D.

Todos estos motivos nos llevan a otro diseño de robot.

8.6.1. Robot modificado

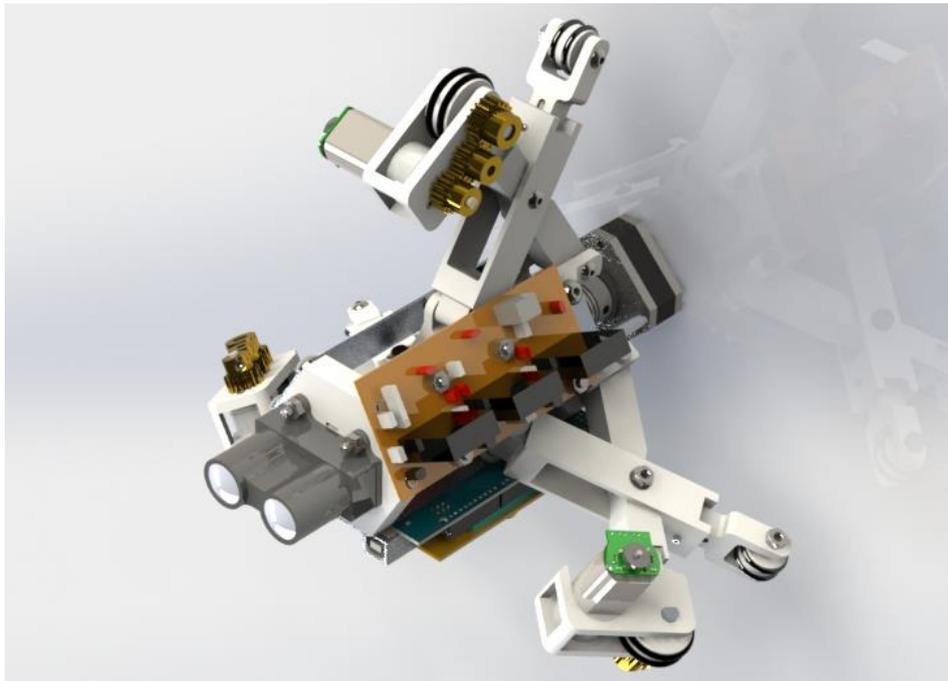


Figura 8.45 Módulo del robot modificado.

Como vemos han sido cambiadas todas las piezas a material impreso en 3D esto nos obliga a modificar ligeramente el diseño para lograr mejores precisiones y acoples entre piezas.

Otra modificación fue el cambiar el sentido de los engranajes en su colocación. Esto permite que exista menos riesgo de interferencia entre los engranajes y el tubo durante el movimiento del robot.

También se incorporaron refuerzos a la extensión para el motor con el objetivo de rigidizar más la parte de apoyo del motor al utilizar ABS.

Por último, se modificó el tamaño de la rueda motriz con el propósito de ganar más par durante el movimiento y mejorar el contacto entre el robot y el tubo.

8.6.2. Robot completo

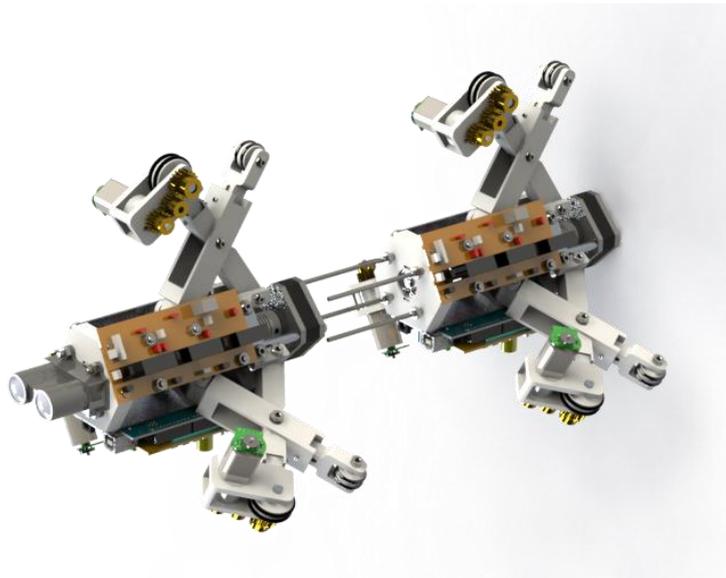


Figura 8.46 RITA modificada.

El conjunto consta de las modificaciones individuales de los dos módulos y como diferenciación se empleará cuerda para la unión entre módulos debido a su resistencia suficiente para el peso de dos robots pequeños y su menor peso.

9. DISEÑO ELECTRÓNICO

En esta parte se explicará todo el diseño de creación selección y de elementos necesarios para llevar a cabo la realización de la electrónica del robot. Esto incluye también los actuadores y sensores que usa el sistema.

9.1. Introducción

La electrónica del robot tiene los siguientes objetivos:

- **Movimiento del sistema:** alimentación de los motores para permitir el desplazamiento y agarre del sistema.
- **Sensorización recorrido del tubo:** obtención de la geometría del tubo mediante sensores. Estos deben darnos la distancia e inclinación del tubo.
- **Conexión de comunicación:** conexiones extra de comunicación con otros módulos o añadidos del robot.
- **Almacenar valores:** guardado de valores de registro a lo largo de la recolección de los sensores.
- **Control del sistema:** establecer las señales, valores de velocidad y movimiento del sistema, así como las interacciones con el resto del sistema.
- **Abastecer de energía al sistema:** alimentar la energía necesaria para realizar las opciones, recoger datos y guardar valores.

9.2. Movimiento del sistema

El movimiento requerido en nuestro robot será de dos tipos: el primero, para mover las ruedas del robot a lo largo del trayecto y, el segundo, será para abrir el mecanismo de tijera que da soporte al robot en el tubo y lo adapta al recorrido.

9.2.1. Movimiento Lineal

Motor

Para este propósito se usarán motores DC ya que el principal objetivo es generar un movimiento continuo. Debido a las condiciones extra de par para esta aplicación sería necesario utilizar según nuestros cálculos, motores de 0,2 N·m sin reducción con lo que para esta aplicación nos

Robot Inspeccionador de Tuberías

centraremos en buscar motores DC con reductora incorporada con el objeto de obtener mayor par.

Se debe elegir uno con mayor par por la incertidumbre de la fricción, ya que en el supuesto de tener menos fricción de la estimada deberemos aumentar el par para compensar dicha pérdida.

Dentro de los fabricantes encontrados los motores seleccionados fueron los de la marca Pololu en concreto los de la serie 20D con reducción 63:1 y eje dual extendido.



Figura 9.1 Motor DC seleccionado.[23]

Los motivos de esta selección son los siguientes:

- Par y velocidad: 0,42 N·m con una velocidad en vacío de 225 rpm. Estas características son más que suficientes para nuestro propósito.
- Compacidad: son motores de 20 mm de diámetro, de manera que el tamaño es bastante reducido para nuestra aplicación.
- Eje extendido: esta opción es muy interesante pues viene preparado para incorporar un encoder de cuadratura que nos permitirá medir la velocidad y posición de nuestro motor en todo momento.
- Tensión alimentación: tiene una tensión baja fácil de suministrar con cualquier fuente de tensión o batería haciendo más sencilla la alimentación del sistema.

Driver motor

Para poder gobernar el motor desde un microcontrolador es necesario incorporar un driver que pueda suministrar suficiente corriente y permitirnos girar en ambos sentidos con un puente en h integrado. En este caso nuestro motor DC es de 6 V y puede llegar a demandar una corriente de hasta 3,2 A. La solución se basará en el circuito integrado L298N. Éste contiene dos puentes que pueden dar hasta 2 A de suministro en DC.

Además, tenemos la opción de paralelizar las salidas de modo que podemos controlar un único motor de hasta 4 A, con un único driver. Solo es necesario establecer con una señal lógica doble si activamos o no el sentido deseado y por otro lado introducimos la señal del motor en este caso controlado con una señal PWM por otra entrada del circuito integrado.

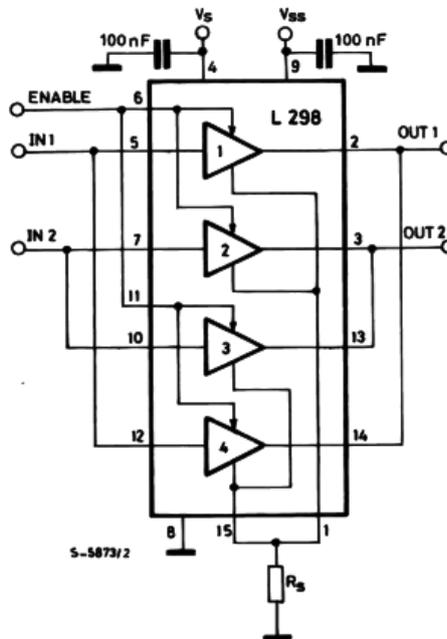


Figura 9.2 Paralelización puertos L298.[24]

La salida también se paraleliza y se recomienda incorporar un puente de diodos a la salida al motor.

9.2.2. Motor de posicionamiento

A la hora de buscar un motor de posicionamiento necesitamos un motor que pueda darnos posiciones precisas y que además pueda mantenerlas. Es por ello, que las opciones son por un lado un servomotor y por el otro un motor PAP. En nuestro caso nos decantaremos por un motor PAP por los siguientes motivos:

- Mayor precisión de giro: usualmente 1.8° por paso pero debido a la incorporación de un driver pueden lograrse hasta 1/32 la precisión real. De este modo podrían conseguirse hasta pasos de 0,056°.
- Par de retención: un motor PAP alimentado tiene par de retención, así es imposible mover el eje o su extensión sin aplicar un par mayor que ese determinado.

Robot Inspeccionador de Tuberías

Como única desventaja está el peso y el tamaño superior del PAP. Aunque como nuestro prototipo se enfoca en un tamaño pequeño las diferencias no son tan notables como a mayor escala.

Para conseguir el movimiento lineal nos fijamos en dos motores PAP:

PAP con husillo incorporado:



Figura 9.3 Motor PAP con husillo incorporado.[25]

Es un motor PAP normal con un husillo incorporado en el eje lo que permite conseguir un movimiento lineal fácilmente.

PAP corto



Figura 9.4 Motor PAP extraplano.[22]

Este motor es una variedad más plana de lo habitual haciendo más sencillo el aprovechamiento del espacio.

Se seleccionó el segundo por los siguientes motivos:

Robot Inspeccionador de Tuberías

- Posibilidad de incorporar cualquier tipo de husillo mediante acoplamiento.
- Menor peso y tamaño del motor (100 g menos contando con husillo de 100 g y menor espesor) pero con un par de retención solo dos veces menor (1,9 kg·cm).
- Voltaje y tensión asumibles: 5,4 V y 1 A máximo por bobina.

Driver

Para facilitar el control del motor paso a paso usaremos un driver. En este caso es el DRV8825 que ya viene integrado en una placa con pines desarrollado por Pololu. Esto nos permite manejar el driver a través de los pines digitales STEP, para dar un paso y DIR (0 un sentido, 1 el otro). También dispone de 3 pines para combinar modos de microstepping y así elegir la precisión deseada en el giro y de un pin por si queremos activar o desactivar el motor.

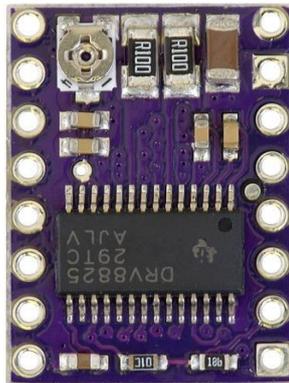


Figura 9.5 Driver para motor PAP, DRV8825.[26]

Es el complemento ideal pues nos permite trabajar con la tensión de alimentación del rango amplio (8,2-45 V) haciendo que podamos tener variedad a la hora de acoplarlo a un microcontrolador. Además, nos permite llegar sin excesiva refrigeración a corrientes de 1,5 A de manera constante. En otras palabras, cubrimos el rango posible de nuestro motor PAP.

9.3. Sensorización recorrido del tubo

Si queremos reconocer la forma del tubo y su geometría es necesario mapear el sistema. Esto implica llevar a cabo un proceso de asimilación de variables como la distancia y la inclinación y asimilar eso hasta obtener un recorrido.

9.3.1. Idea original

La idea inicial era el uso de un sensor de distancia y con un mecanismo de Pan and Tilt, que permite girar una cámara u objetivo en dos ejes distintos[27]. De esta forma, realizando dos barridos en el eje vertical y horizontal del robot con el sensor láser podríamos obtener valores de distancia del perfil del tubo. Haciendo esto podemos saber qué forma tiene el tubo a una determinada distancia y así suponer que tipo de obstáculo tiene. Una idea gráfica del proceso se muestra en la imagen siguiente:

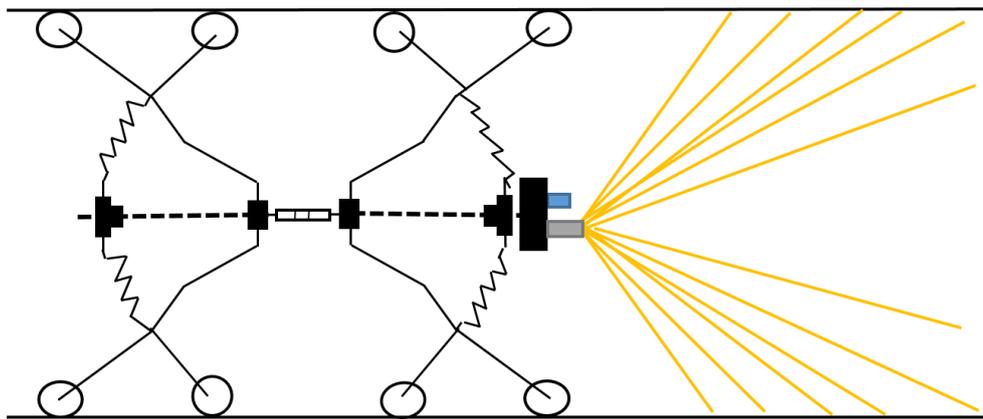


Figura 9.6 Idea barrido con sensor de distancia.[28]

Sin embargo, debido a nuestro reducido espacio de tubo de pruebas (200 mm) la incorporación de un sistema de pan and tilt pequeño no es viable por su dificultad por lo que este método no es posible en nuestras condiciones de test.

9.3.2. Sensor de distancia y sensor inercial

La alternativa a nuestra idea original es utilizar el sensor para obtener distancias rectas al tubo más cercano. De este modo conoceremos la distancia al elemento obstaculizante más cercano y emplear una IMU para obtener los ángulos de inclinación en cada eje y así poder recomponer el sentido del tubo y su dirección.

Esta idea tiene la ventaja de que podemos realizar medidas de distancia y velocidad de la IMU. Aunque estas medidas no son fiables debido al error de integración aplicado, si nos dan un valor de comparación para el trabajo.

Además, al incorporar un encoder al motor podemos recomponer la distancia girada por las ruedas teniendo así, otra medida de comparación de distancia recorrida por el robot.

Sensor de Distancia

Para medir la distancia existen diferentes tipos de sensores, una clasificación puede verse en la siguiente imagen:

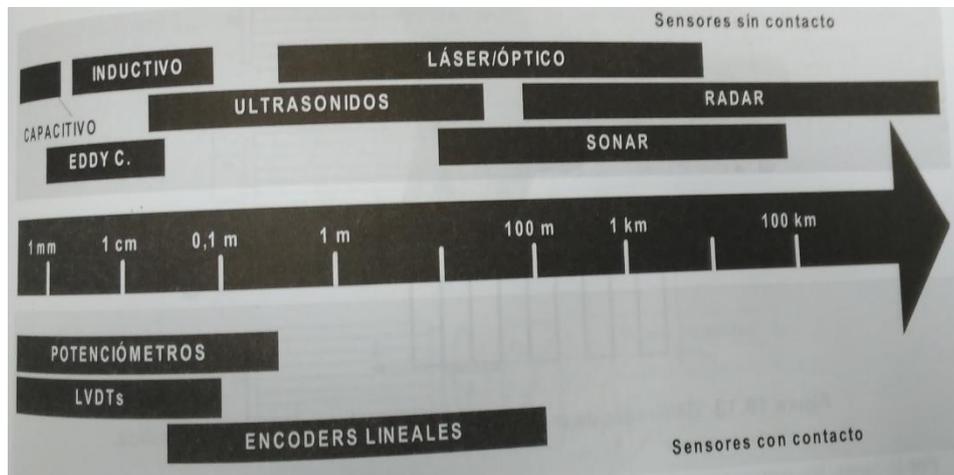


Figura 9.7 Posibilidades de medidas de distancia.[29]

En nuestro caso debemos emplear sensores sin contacto y como las redes de tubos pueden tener tramos largos podríamos estar en situaciones que oscilan entre 1 y 100 m con relativa facilidad. Además, la situación de la red de tubos en interiores restringe los métodos de medición externos, como puede ser el GPS. Estas características nos dejan con métodos Láser para la medición de nuestro sensor.

Nuestra elección ha sido un sensor láser de tipo LIDAR[30], que se caracteriza por la emisión y recepción de pulsos de luz y obtiene la distancia a través del tiempo empleado entre la emisión y la recepción.



Figura 9.8 Sensor de distancia LIDAR Lite v3[31].

Robot Inspeccionador de Tuberías

Es un sensor láser de un rango elevado (0-40 m), una repetición de muestras de hasta 500 kHz, bajo consumo (5VDC) y puede emitir sus datos tanto en I2C como en PWM lo que da variedad en la comunicación de resultados. Su dirección por defecto en 7 bit es 0x62 y en 8 bit es 0xC4.

Además, es un láser de clase 1 con lo que no es dañino al ojo humano sin protección y tiene una librería en Arduino para facilitar la lectura de valores.

Por último, mencionar que debido a la configuración de los valores de la librería este sensor reconoce distancias en cm lo que lo convierte en el único elemento de nuestro prototipo que no mide la distancia en mm o m, sino algo intermedio.

IMU

Usaremos una unidad inercial de 9 grados de libertad (acelerómetro, giróscopo y magnetómetro triaxial). De este modo podremos utilizar el giróscopo para medir los ángulos de inclinación del robot durante su operación, mientras que el acelerómetro lo usaremos para estimar distancias y ver cuando el robot está parado o no mediante comparación entre ambos sensores.

El sensor elegido ha sido la BNO055 de Bosch pero integrada en una placa desarrollada por Adafruit que realiza todo el procesamiento de señal así como la integración funciones básicas para trabajar con el sensor.[32]

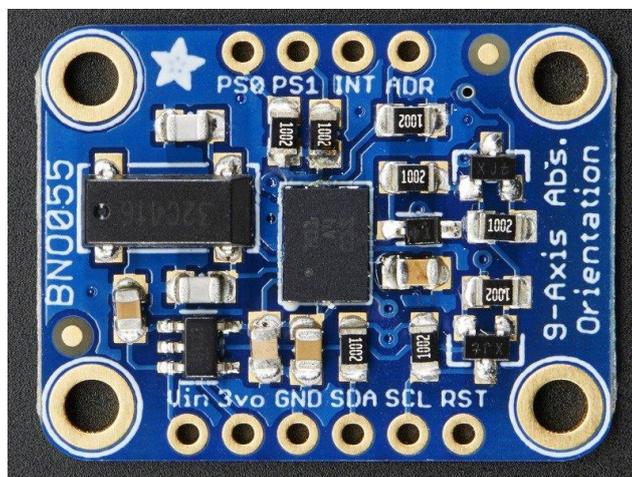


Figura 9.9 IMU BNO055 de Adafruit.[32]

Este sensor tiene una frecuencia de muestreo de 100 Hz para sus funciones elementales, que es más que suficiente para nuestro uso. Además, incorpora un sensor de temperatura que trabaja a 1 Hz. Las comunicaciones son del tipo I2C y utiliza una dirección 0x28.

Encoder

Para medir la velocidad del motor la opción más sencilla es un encoder. El propio fabricante tiene disponible uno para el motor de dos canales y efecto Hall. Los canales generan 20 pulsos por revolución en el eje trasera. No obstante, debido a la reducción el eje principal gira a menos revoluciones es por ello que una vuelta del eje principal son 1260 (20·63) rpm.

Tiene una alimentación posible entre 2,7-18 VDC lo que nos permite alimentarlo con cualquier tensión de la placa.



Figura 9.10 Encoder acoplado en el motor.[33]

Finales de carrera

Serán los que nos indiquen cuando el husillo ha alcanzado el final o el inicio de su recorrido. Su conexionado puede ser normalmente abierto o cerrado, en nuestro caso es indiferente. Se han elegido unos los más pequeños posibles que soporten al menos 5 V.



Figura 9.11 Finales de carrera utilizados.

9.4. Comunicaciones

9.4.1. Externas

El robot debe ejecutar sus funciones y registrar valores de las mediciones o interactuar para comprender que órdenes ha recibido.

Lo más sencillo suele ser la utilización de una interfaz de usuario o un mando para dar órdenes, sin embargo, en nuestro caso, esto no es posible, ya que al ir el robot en un espacio confinado las comunicaciones inalámbricas se ven dificultadas por los obstáculos de materiales o los ruidos excesivos. Una alternativa es utilizar un cable para la comunicación, pero el recorrido es menor a 15 m.

Por todo ello restringiremos las comunicaciones con el microcontrolador desde el computador. De este modo la programación de la inteligencia del aparato será autónoma, es decir, el robot se moverá solo y variará sus condiciones de forma autónoma según sea preciso. Esto implica que los datos registrados deben ser almacenados en una memoria externa con el objetivo de poder obtener los datos del tubo por el que se ha pasado.

9.4.2. Internas

Dentro del sistema habrá comunicaciones entre los elementos y el microcontrolador, los tipos y sus elementos son los siguientes:

- I2C: sensor láser, IMU.
- SPI: módulo tarjeta microSDHC.
- UART: comunicación entre módulos del robot.

9.5. Almacenar valores

Los datos deben ser almacenados y como la memoria de los microcontroladores es limitada se emplearán módulos para tarjetas micro SD, SDHC. El motivo es que estas tarjetas son sencillas, tienen gran capacidad y la comunicación con un microcontrolador es sencilla. Soporta tarjetas microSD hasta 2 GB, y microSDHC hasta 32 GB.

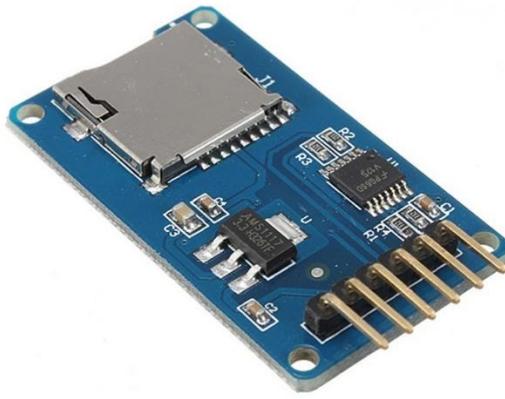


Figura 9.12 Módulo tarjeta SD.[34]

9.6. Control del sistema

Para realizar el control del sistema debemos incorporar un microcontrolador que permita generar las señales lógicas, PWM, administrar las comunicaciones de los sensores (I2C, SPI, UART...). Necesitamos, además, que tenga suficiente velocidad como para procesar datos y leer los sensores con fluidez, por lo que debe tener un procesador con capacidad suficiente. Asimismo, muchos elementos tienen librerías integradas para el sistema Arduino, lo que sumándolo a su facilidad de uso será el elegido para trabajar.

Dentro de los distintos modelos el que mejor cubre nuestras especificaciones, es Arduino Mega 2560,[35] al mismo tiempo no tiene funciones que nos sean totalmente inútiles.

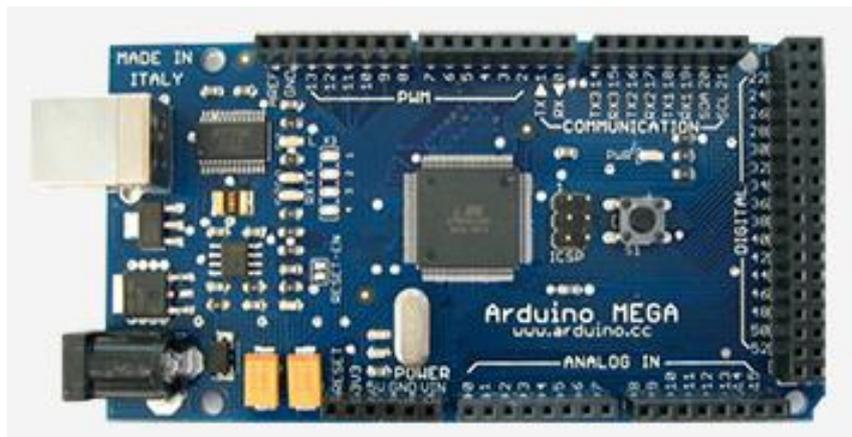


Figura 9.13 Arduino Mega.[35]

Dispone de 54 entradas/salidas digitales (14 como PWM), 16 entradas analógicas, 4 puertos UART (RX-TX: 0-1,19-18, 17-16, 15-14), reloj 16 MHz. Trabajo a 5 V y alimentación óptima entre 7 y 12 V.

Capacidad de interrupciones:

PIN	INTERRUPCIÓN
2	0
3	1
18	5
19	4
20	3
21	2

Tabla 9.1 Interrupciones Arduino Mega.

PWM: pines 2-13 y 44-46.

SPI: 50-MISO, 51-MOSI, 52-SCK,53-SS.

I2C: 20-SDA, 21 SCL.

9.7. Alimentación del sistema

El sistema tiene varios niveles de alimentación.

Tensión lógica de 5V generada por los pines de Arduino:

- Sensor de distancia.
- IMU.
- Adaptador Tarjeta SD.
- Finales de carrera.
- Lógica del driver L298N.
- Transistores para lógica.

Tensión de 6 V aplicada con una fuente de tensión:

- Motores con reductora DC.
- PCB del encoder.

Tensión de 12 V aplicada con una fuente de tensión/batería:

- Arduino.
- DRV 8825.

A parte de la tensión de 12 V aplicada por la fuente por un cable incorporaremos una batería de 3S (11,1 V). Esta batería no tiene que ser de gran capacidad ya que su único objetivo es el de

cerrar la tijera para poder extraer el robot de la tubería con mayor facilidad. Así pues una batería de 500 mAh es más que suficiente para nuestra aplicación.

9.8. Diseño electrónico

A la hora de crear un circuito usando un Arduino como microcontrolador, el espacio disponible es el que queda entre sus pines. Al ser este lugar, demasiado reducido para alojar todos los componentes necesarios para nuestro circuito general, se ha decidido separar todo el circuito en dos partes:

- Circuito de Sensores y control: en el que se realizan todas las tareas de control principales, lectura de sensores principales control del motor PAP.
- Circuito propulsión: en él se encuentran todas las señales necesarias para controlar los motores. Como se mencionó en la parte del diseño mecánico se podrán probar varios motores a la vez, así que este circuito tendrá todos los elementos para interactuar con hasta 3 motores simultáneamente.

La separación del circuito en dos implica que hay señales que deban cruzar de una parte a otra. Esto se hará a través de cables flexibles que llevarán señales de un lugar a otro.

9.8.1. Circuito de Sensores y control

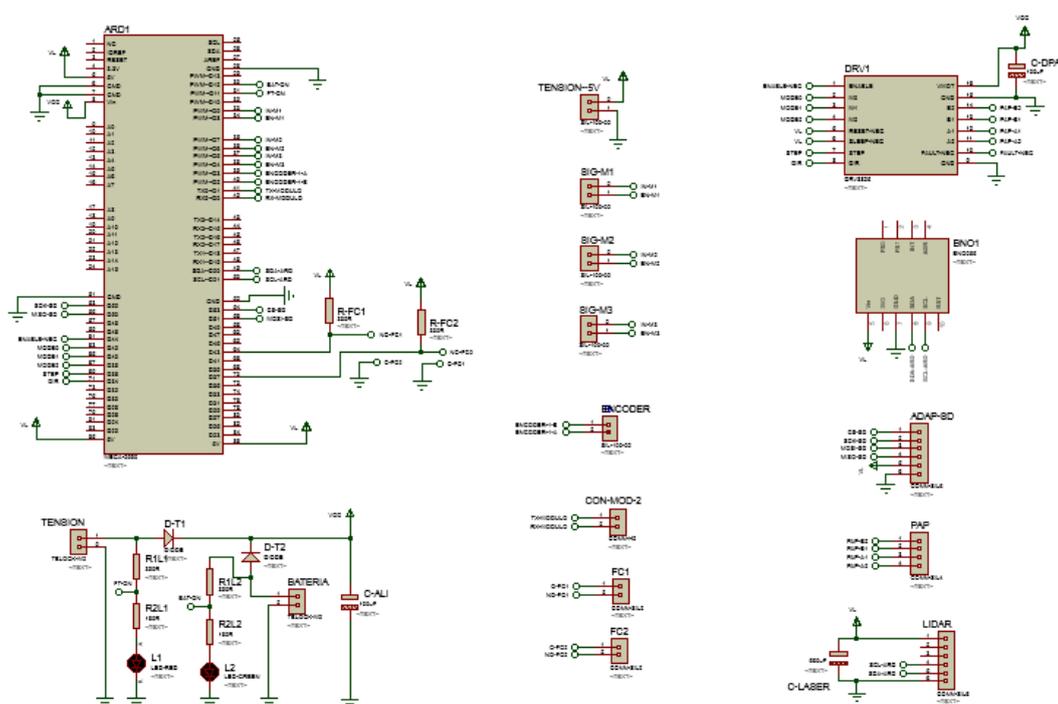


Figura 9.14 Circuito de sensores y control.

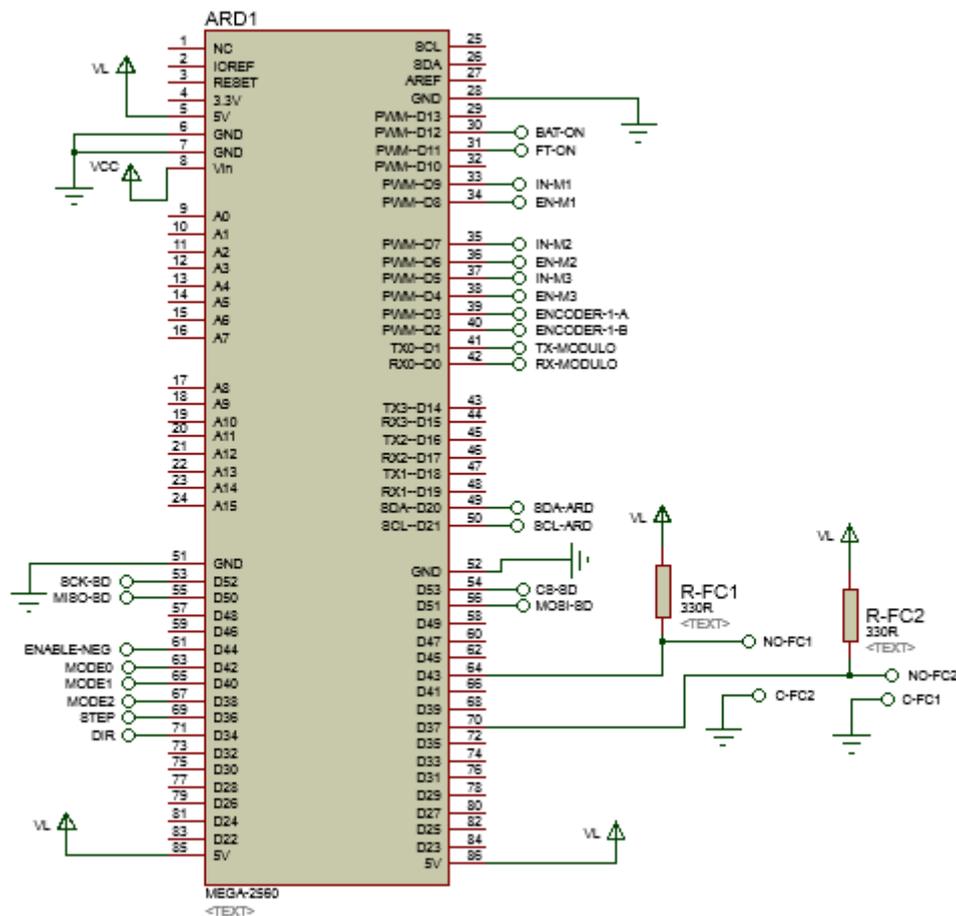


Figura 9.15 Conexiones al Arduino.

En el microcontrolador solo irán, en este caso, variables digitales. Su conexión será, en general, en los pines que más faciliten la realización de la PCB, es decir, intentando acortar los trazos y evitando realizar cruces entre líneas.

Hay otros pines que deben situarse en unos pines concretos como son los de las comunicaciones (SPI, I2C, UART). Estos pines son fijos y son los que mencionamos anteriormente. En cuanto a los valores de salida del motor irán en pines con capacidad de generar PWM para poder variar el valor de la velocidad de los motores. En el caso de Arduino esta señal es de 8 bit (valores entre 0 y 255) y tiene una frecuencia de 500 Hz suficiente para interactuar con nuestros motores.[36]

Los finales de carrera irán conectados a pines digitales y a una resistencia de pull-up de 330 ohmios para asegurar la lectura correcta de la señal. En cuanto a su conexión, será normalmente abierta, aunque es indiferente en cuanto a funcionamiento se refiere.

Por otra parte, los pines del encoder irán a los pines 2 y 3 por dos motivos. El primero, porque están situados en una zona de colocación sencilla y el segundo, porque ambos pines tienen capacidad de realizar la interrupción por separado. Esto es muy importante por la estructura del propio encoder.

Nuestro encoder tiene dos canales, esto nos permite conocer con facilidad cuando gira en un sentido gracias a que están desfasadas ambas señales. Esto nos dice que si miramos las transiciones y siguen un orden especificado de secuencias 0,1... es en sentido horario. En caso contrario sería sentido anti horario.

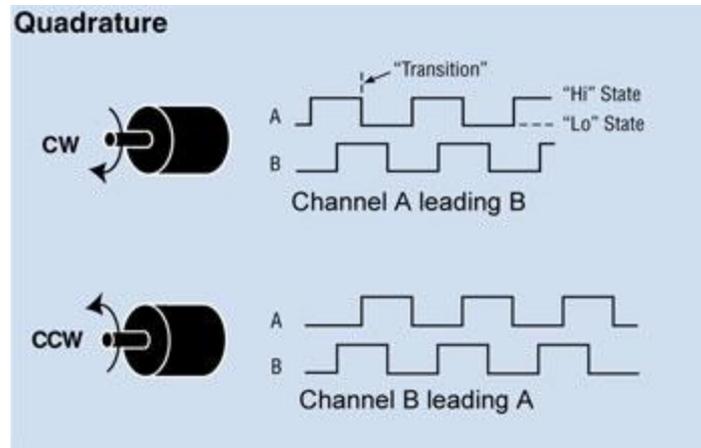


Figura 9.16 Detección del sentido de giro.[37]

Para medir los pulsos puede haber varias posibilidades. La primera es contar cuando una onda está a 1 lo que nos da una precisión simple. Podría mejorarse midiendo también su flanco de bajada lo que nos daría una precisión doble a la hora de contabilizarlos. Si hacemos el mismo proceso con el otro canal tendríamos una precisión cuádruple a la hora de contar pulsos y por tanto a la hora de estimar nuestra posición.

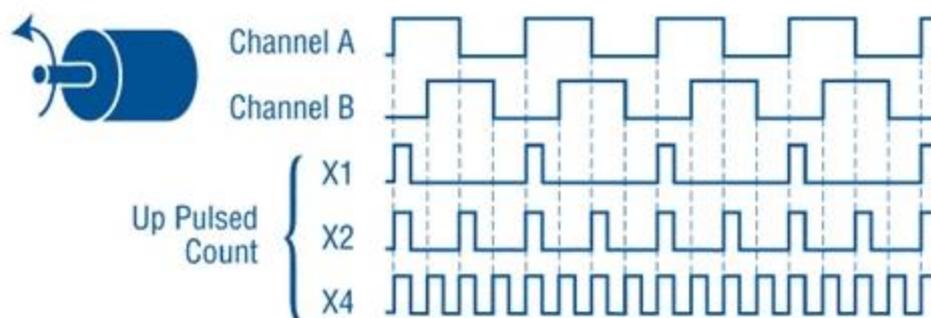


Figura 9.17 Proceso de detección de pulsos.[37]

Es por esto que para tener una precisión eficaz en el motor es necesario usar interrupciones para detectar con altas velocidades los flancos de subida y bajada de las ondas.

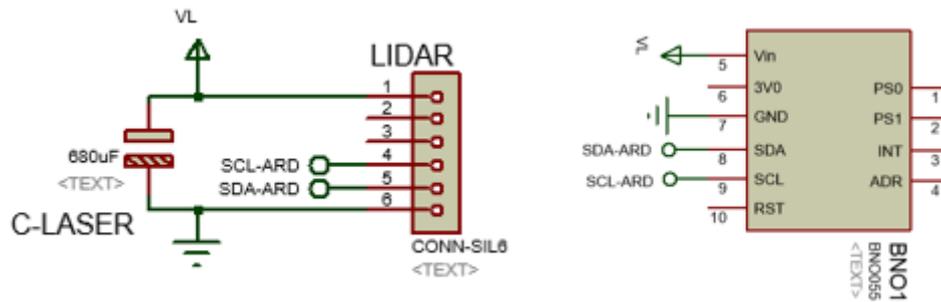


Figura 9.18 Sensores I2C.

En el caso de los sensores con comunicación I2C se realizaron las conexiones recomendadas por los fabricantes que consisten en introducir las salidas de la comunicación (pines SDA y SCL) y la alimentación. Cabe señalar que por recomendación del fabricante a la entrada de tensión de 5 V al láser hay que colocar un condensador electrolítico de 680 μ F.

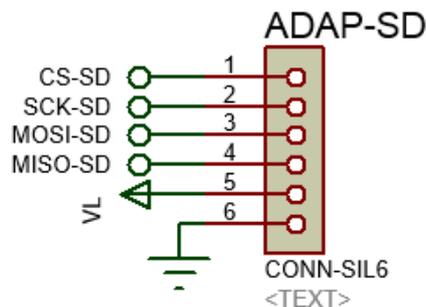


Figura 9.19 Adaptador tarjeta microSDHC.

El adaptador irá colocado sobre un zócalo y sus conexiones son simplemente las de la comunicación SPI y alimentación del microcontrolador.

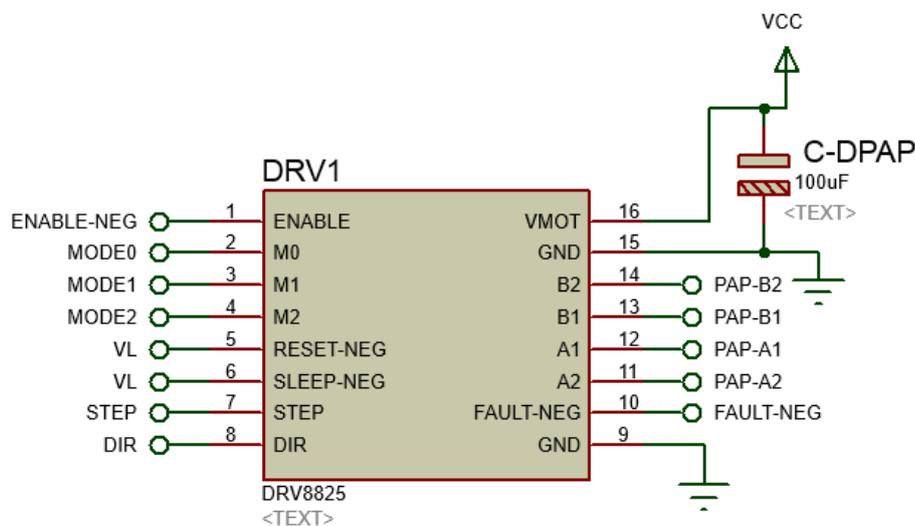


Figura 9.20 Driver motor PAP.

Robot Inspeccionador de Tuberías

El driver necesita la conexión de alimentación, con un condensador electrolítico de 100 μ F en paralelo. Debe llevar conectadas tanto la masa de la fuente como la del microcontrolador.

En cuanto a pines de conexión los mínimos son los de STEP y DIR conectados a pines GPIO y los pines RESET-NEG y SLEEP-NEG que por funcionamiento deben estar a 1 (VL de 5V del Arduino). Luego están los pines de la salida al motor PAP que al ser bipolar son 4 cables y van consecutivamente las bobinas, es decir, AABB o BBAA a la hora de conectar.

Como pines opcionales están el pin de ENABLE-NEG que nos permite habilitar o no el funcionamiento del motor. También son alternativos al uso los pines de MODE que nos permiten elegir la precisión de giro del motor. Si no están seleccionados es microstepping 1:1 o lo que es lo mismo 1,8°/pulso.

Las señales que van a transmitirse por cables bien a otro módulo, a los motores o al sensor tendrán unos conectores de los que se conectará el cable a su elemento respectivo. Se han elegido los conectores tipo JST pues tienen capacidad para no soltarse tras ser crimpados y colocados.

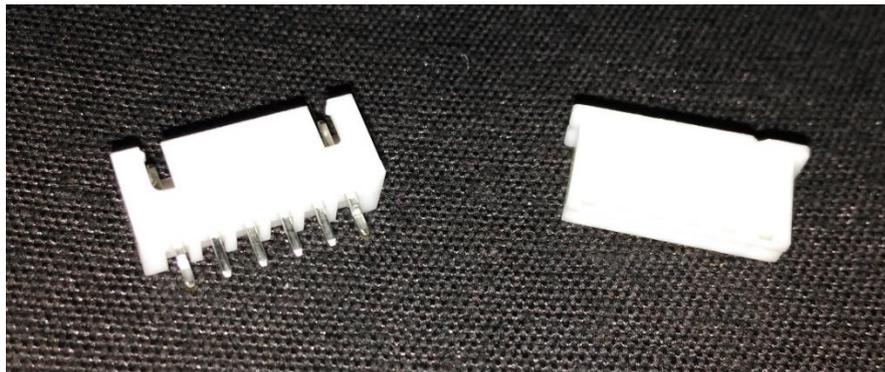


Figura 9.21 Conector JST macho y hembra.



Figura 9.22 Cable con terminal JST de conexión.

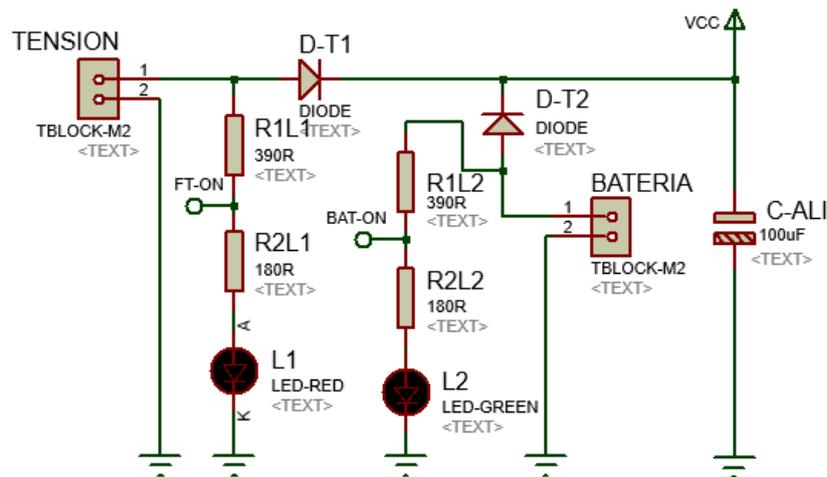


Figura 9.23 Entrad de alimentación.

Por último, está la alimentación del circuito de 12 V. Como antes comentábamos tendremos una batería de emergencia. Así para que sea la tensión principal la que abastezca al circuito y no se cortocircuiten entre ambas colocamos la salida de las fuentes a un diodo 1N4007 que soporta el voltaje y soporta corrientes de hasta 1 A. Estos diodos servirán de protección contra fallos de la alimentación. A su vez la salida de la tensión irá conectada en paralelo a un condensador electrolítico de 100 μF como filtro.

Para tener una referencia digital de cuando está activa cada fuente se colocó un divisor resistivo en paralelo a cada fuente de manera que así tengamos un 1 lógico cuando la fuente esté activa y un 0 cuando esté apagada. Adicionalmente se colocaron unos LED rojo y verde para conocer visualmente cuando está activa cada una y detectar errores más fácilmente.

9.8.2. Circuito de propulsión

Este circuito es el encargado de transmitir las señales de control: sentido de giro y valor del PWM del microcontrolador a los drivers de los motores DC y así producir el giro. Tiene un único valor de retorno que son las señales de los dos canales del encoder.

Robot Inspeccionador de Tuberías

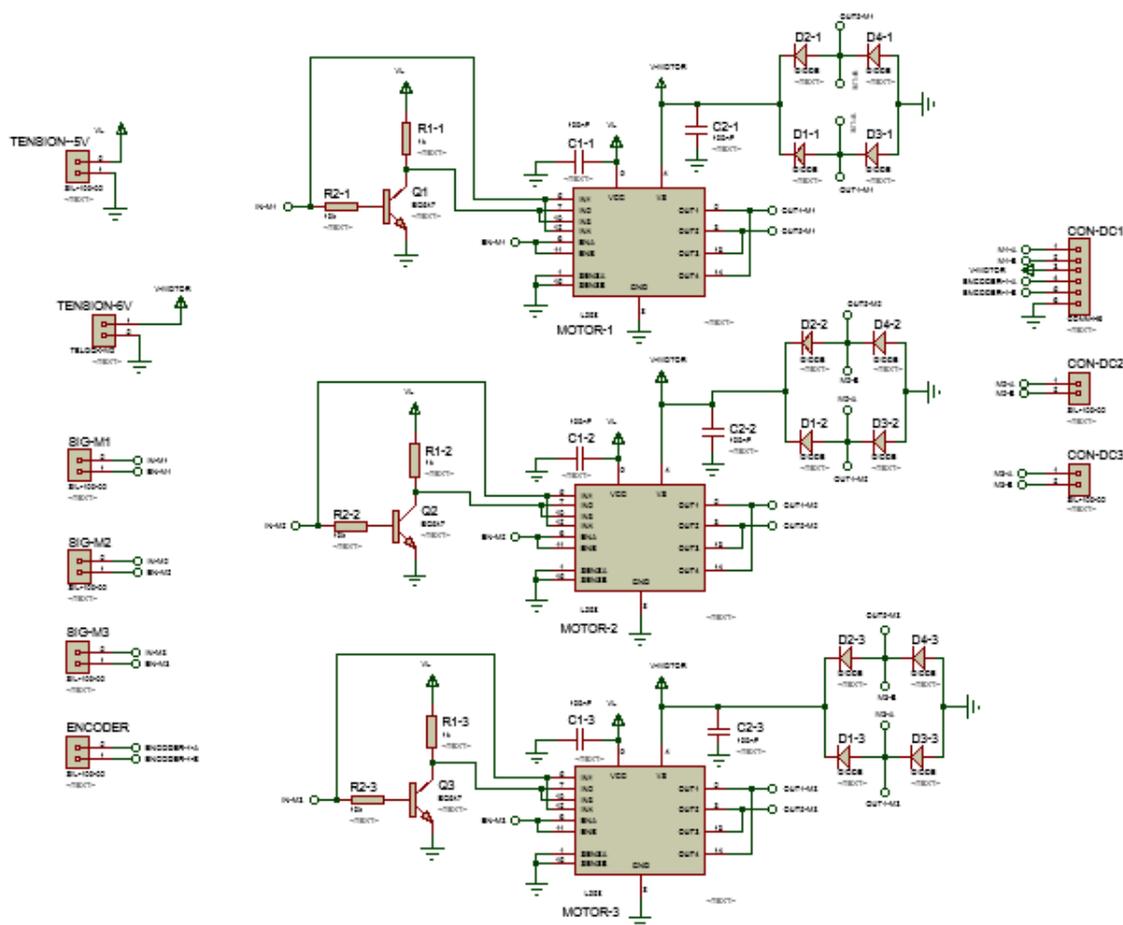


Figura 9.24 Circuito de propulsión.

Como antes las señales de ida y retorno irán hasta los conectores de los que saldrán los cables para ir en este caso conectados a la placa de control y a los motores.

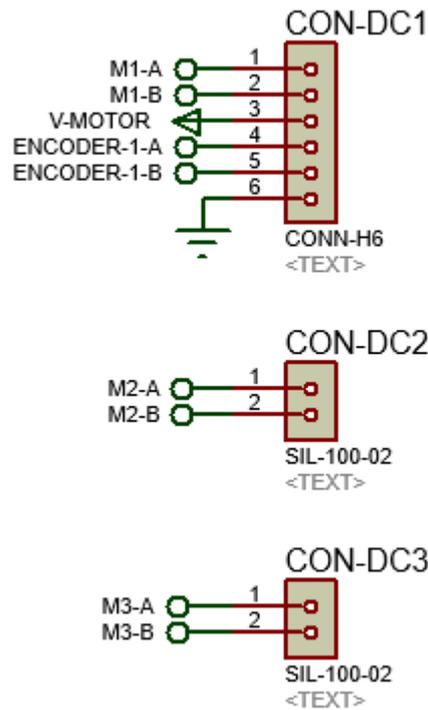


Figura 9.25 Conectores de los motores.

Los motores irán conectados desde sus dos contactos a los conectores de la placa. Sin embargo, el motor con encoder irá conectado a través de la placa de este que contiene los dos pines del motor más la alimentación del encoder y sus señales.

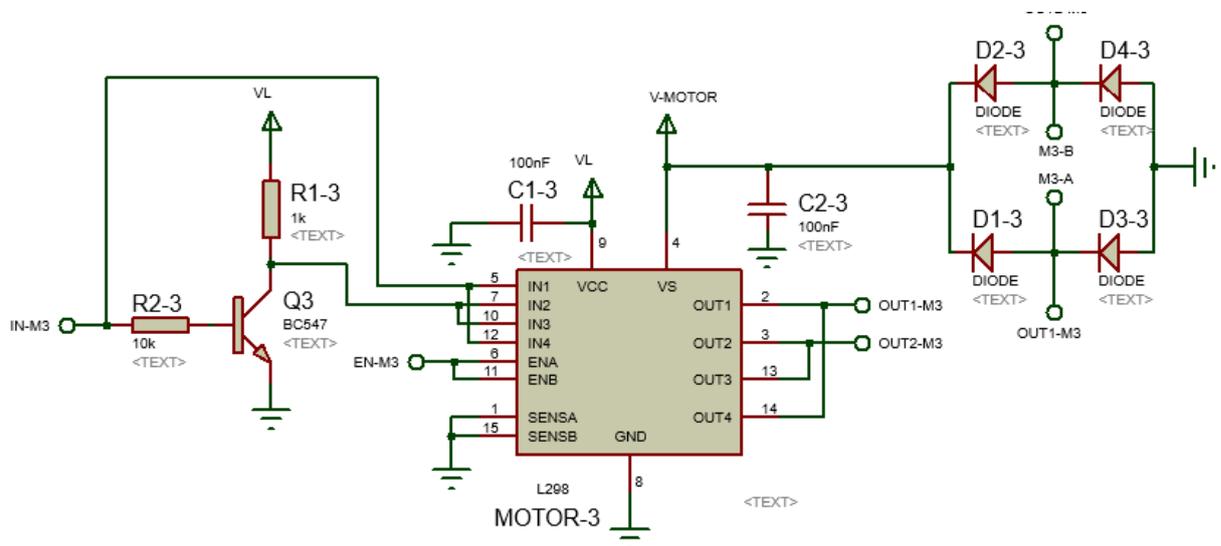


Figura 9.26 Driver del motor de DC.

El driver requiere alimentación para el motor y alimentación de las señales lógicas en los pines 9 y 4. Ambas deberán llevar un condensador de desacoplo de 100 nF. Los pines 1 y 15 irán a masa pues son los que se utilizan para medir la corriente que circula por el driver al no ser utilizados irán referenciados a masa.

El driver como comentamos anteriormente está paralelizado lo que quiere decir que prescindimos de 4 salidas y pasamos a tener solo dos salidas para un solo motor, aumentando la corriente máxima a 4 A. Esta práctica requiere que las salidas de salida del driver para el motor se unan dos a dos, que los pines de ENA y ENB que reciben la señal PWM se unan también y que los pines de IN que activan los puentes en un sentido u otro se unan dos a dos.

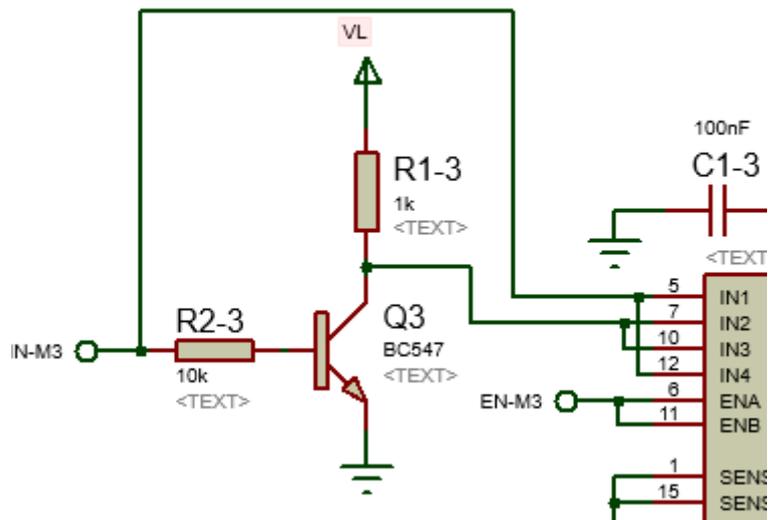


Figura 9.27 Señales de activación.

Estas señales de activación regulan el sentido de giro, en otras palabras, si una está a 0 y la otra a 1 gira en un sentido y si es 1 y 0 en el sentido contrario. Se encontraría parado en el caso de ambos pines a 0.

Se introdujo una medida para ahorrar el uso de pines del controlador y así cambiar el sentido con un solo cambio de pin [17]. Esto es ventajoso, pues en nuestro caso el robot irá casi siempre en un único sentido, y los casos en los que vaya hacia atrás son pocos y aislados. La única desventaja es que para apagar el motor deberemos situar el PWM a 0 en lugar de cambiar un pin digital, pero es más beneficioso que perjudicial.

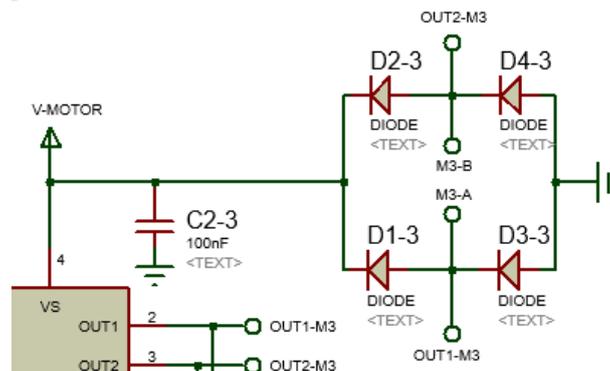


Figura 9.28 Puente de diodos empleado.

A la salida de corriente para los motores y alimentados por la tensión del motor irá conectado un puente de diodos rectificadores de recuperación rápida (30 ns). Esta medida es una recomendación del fabricante del driver.

Este circuito estará presente 3 veces en total para así posibilitar la incorporación de hasta 3 motores en la propulsión del robot.

9.9. Pruebas del circuito

Se realizaron pruebas del circuito en todos sus aspectos, tanto locales como globales, con la finalidad de detectar fallos o posibles dificultades en el montaje.

En primer lugar, se realizaron pruebas individuales de cada elemento con el objetivo de verificar si funcionaban apropiadamente. Luego se pasó a una fase de prueba de elementos de las mismas PCB en conjunto para ver el funcionamiento global de los sistemas.

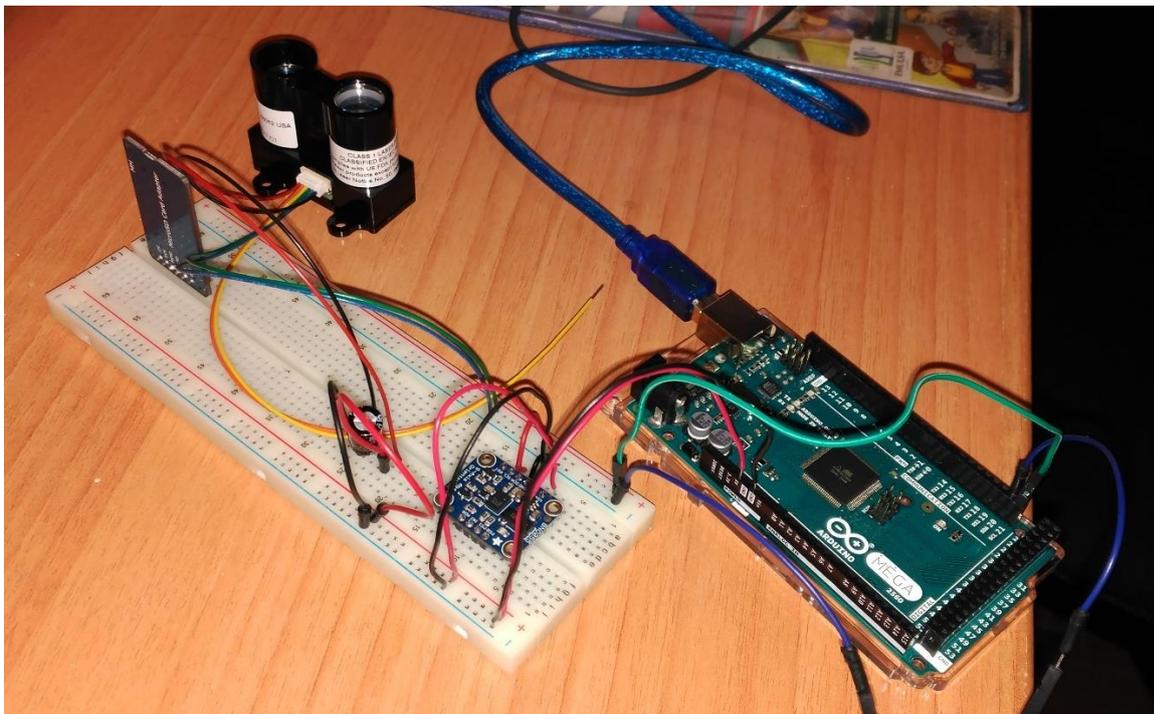


Figura 9.29 Prueba del láser, IMU, y escritura en la SD simultáneamente.

Se procedió a llevar a cabo pruebas de los elementos de sensorización y control por separado, con el propósito de comprobar si aislando los dos elementos, éstos funcionaban por separado, asegurando de esta forma que el conjunto haría su trabajo a la perfección una vez establecidas las conexiones intermedias entre las placas.

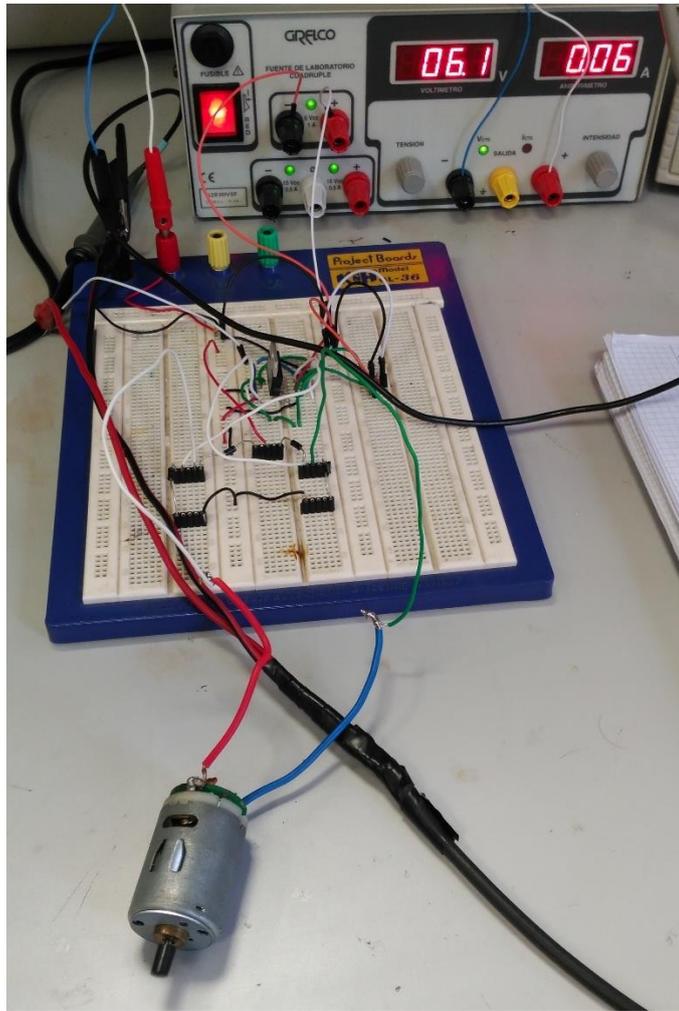


Figura 9.30 Prueba del circuito de control del motor DC.

9.10. Placas de circuito impreso

Una vez corroborado el funcionamiento de los circuitos en placas de desarrollo para prototipos se procede a realizar el diseño de la PCB. Para ello se usará el mismo software que para los esquemáticos, pero usando un módulo para el diseño de este tipo de placas.

9.10.1. Reglas generales

La colocación de los componentes se hará según su prioridad de pines. Antes se pudo observar que algunos elementos debían ir fijos en unos pines determinados, estos elementos serán los que se coloquen en primer lugar y en zonas muy cercanas a dichos pines.

Posteriormente, se colocarán el resto de elementos situándolos lo más cerca posible de otros con conexiones próximas a ellos con el objetivo de evitar líneas de conexión excesivamente largas.

En cuanto a las separaciones y anchos de pista se ha calculado la de nuestra máxima corriente (3 A apóximadamente), y suponiendo una longitud de unos 75 mm con temperatura ambiente y 60°C como límite máximo de temperatura obtenemos para estas condiciones un ancho de pista de 18 mils y una resistencia aproximada de 98 mΩ [38]. Nosotros usaremos este ancho mínimo como referencia para las señales más bajas y lo aumentaremos hasta 25 mils. Mientras tanto las pistas de tensión por seguridad se sobredimensionarán hasta los 60 mils.

Generaremos un plano de masa en la cara inferior o BOTTOM con una separación de 18 mils entre los trazos y las pista. Mientras en el plano TOP generaremos un plano de masa sin conexión con el objetivo de reducir ruidos.

9.10.2. Placa de sensorización y control

Esta placa requiere acoplarse en el Arduino por lo que el tamaño está limitado a esta área. Además, es necesario que ambas tengan las tiras de pines compatibles ya que deben encajar. Por lo que nuestra placa deberá poseer pines macho soldados desde arriba, lo que nos obligará a usar varios puentes con el objeto de pasar las conexiones a la placa de abajo que es en la que se sueldan casi todos los componentes con mayor facilidad. Solo incorporaremos soldaduras en la placa superior o TOP en elementos simples de soldar como resistencias, diodos o elementos aislados de las tiras de pines.

Para ganar más precisión en las mediciones colocaremos la IMU lo más centrada posible en la placa para tener las medidas lo más referidas posibles a la línea del centro de gravedad del dispositivo.

En cuanto a la colocación de circuitos integrados, éstos irán sobre zócalos hembra para facilitar su cambio en caso de defecto y evitar posibles calentamientos excesivos durante las soldaduras.

Generaremos por último anotaciones en la capa TOP para tener referencias de la polaridad de los condensadores, sentido de colocación de los cables en los conectores y así evitar fallos durante su fabricación y montaje.

No existirán agujeros de unión porque la placa se sujetará por los pines inferiores del Arduino a la estructura del robot y la placa irá unida por los pines a los de la placa del microcontrolador asegurando la unión entre ambos.

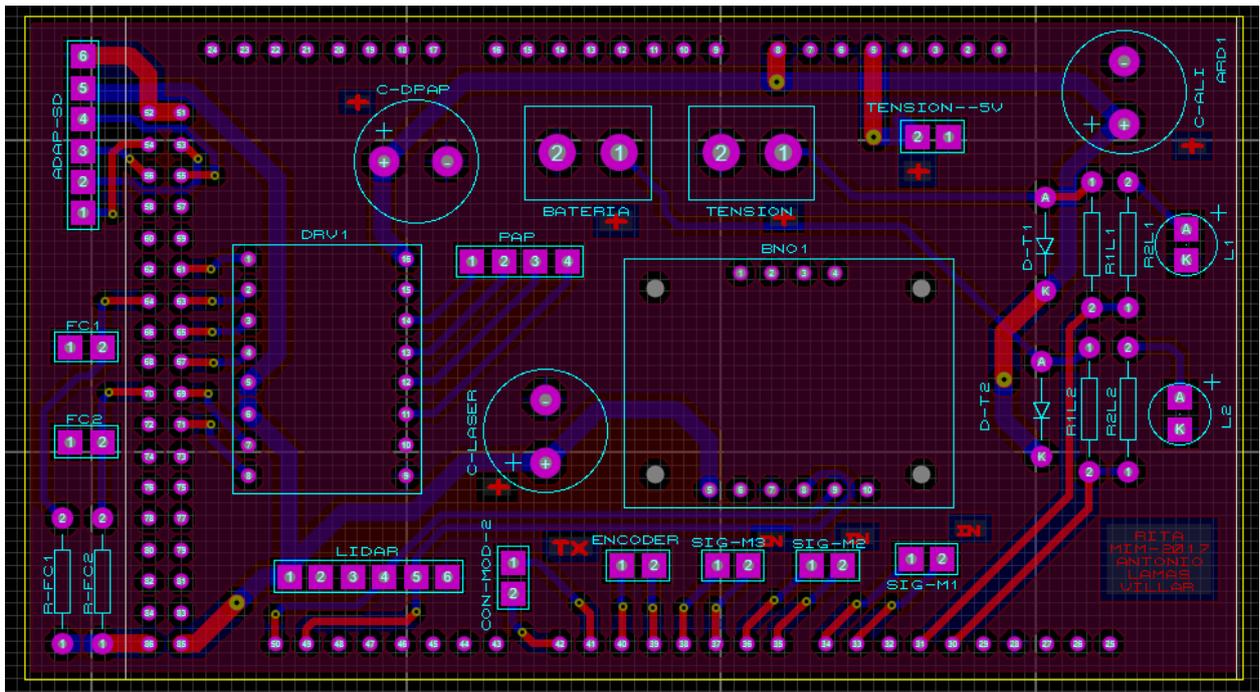


Figura 9.31 PCB sensorización y control.

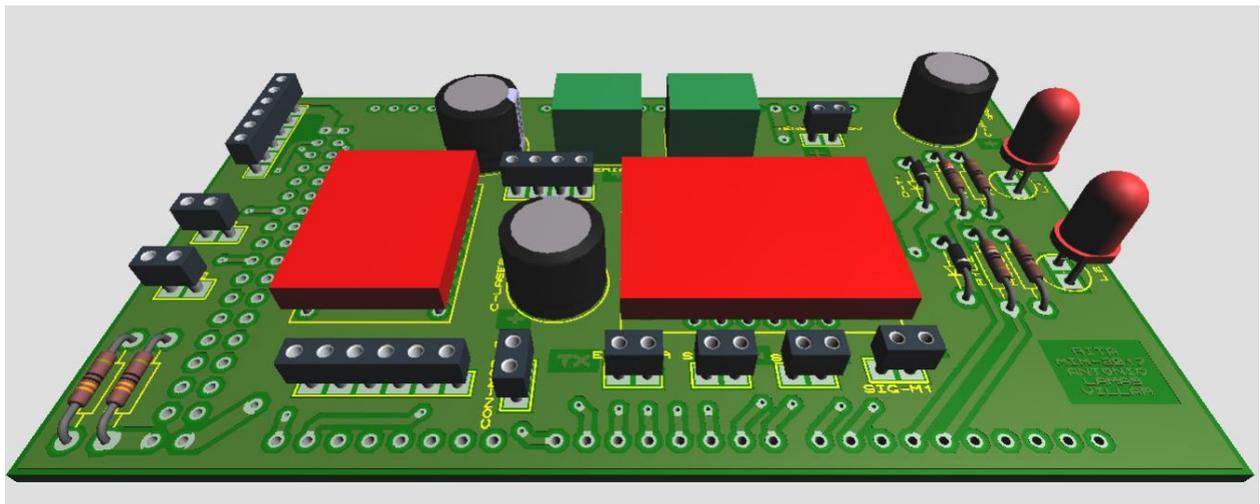


Figura 9.32 Vista 3D preliminar de la placa de sensorización y control.

La placa equivalente del otro módulo es igual salvo que no tiene el conductor para el sensor láser.

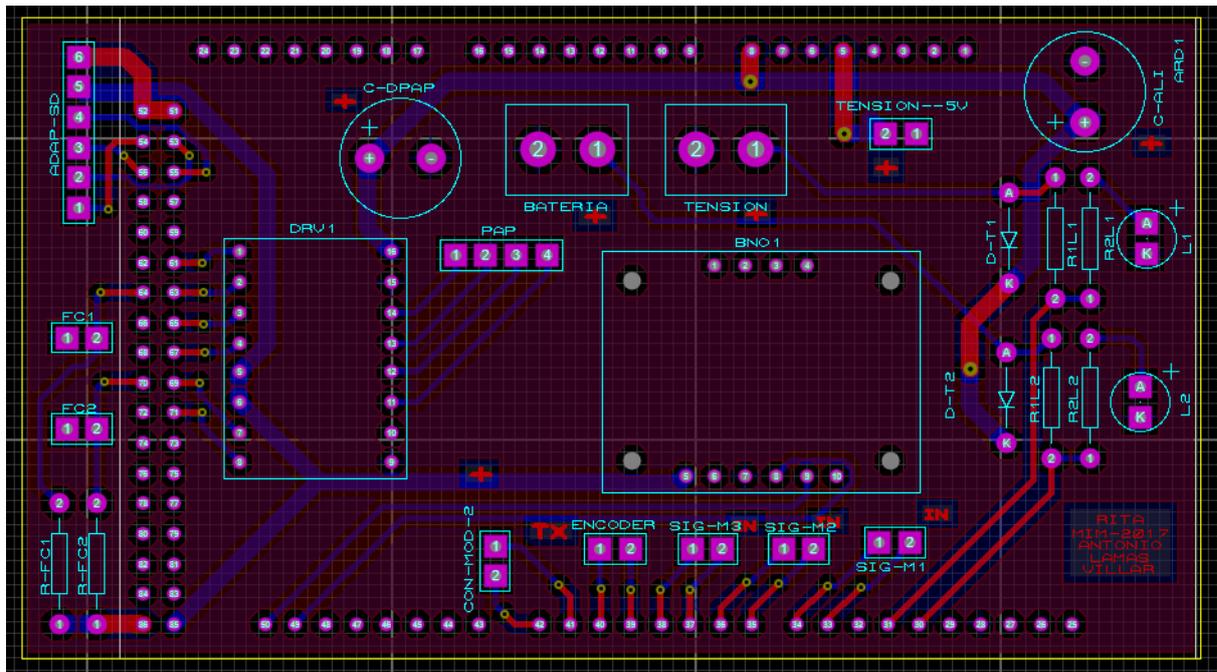


Figura 9.33 Variante de la placa para el segundo módulo.

9.10.3. Placa de propulsión

En este caso no existen limitaciones por lo que la colocación de elementos se optimizará a la reducción de longitudes de línea, separación de los elementos de los 3 motores entre sí, la fácil unión de los conectores. Por último, se priorizó conectar las conexiones de alimentación a los lados para facilitar la colocación del cable hasta ahí.

En este caso ha sido incorporar la unión de elementos en la capa TOP para los elementos de unión del L298. Esto se debe a que su patillaje que es alternativo de un lado a otro de manera que existen demasiadas líneas para esquivarlas, por lo que se conectará superficialmente uniendo los pines del zócalo.

Para finalizar se introdujeron agujeros de unión en los huecos libres de la placa intentando repartirlos equidistantemente y así que la unión sea firme.

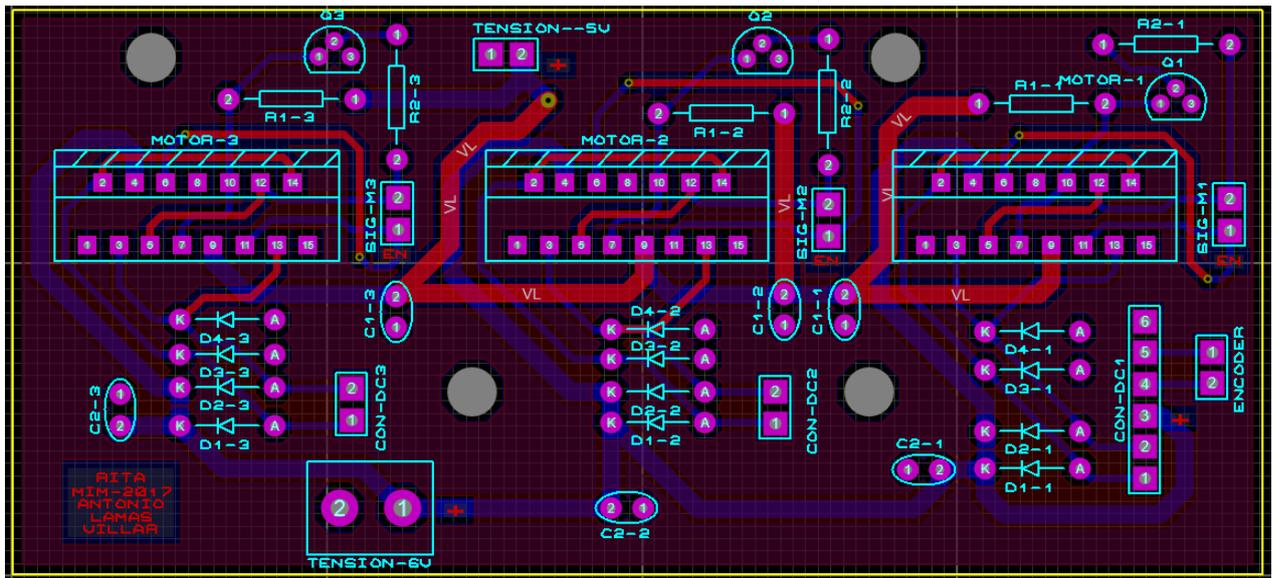


Figura 9.34 PCB de propulsión.

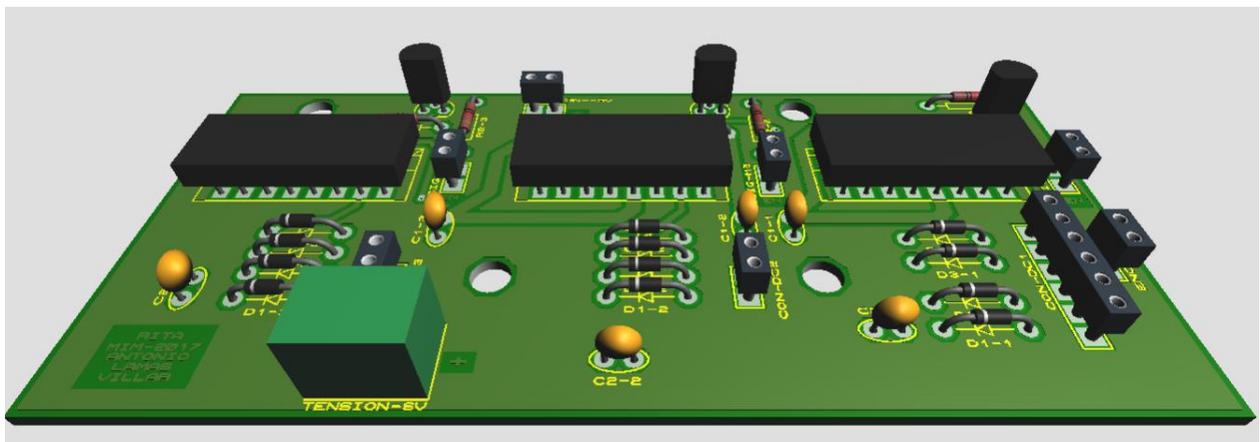


Figura 9.35 Vista preliminar en 3D de la placa de propulsión.

Esta placa es completamente idéntica para el segundo módulo.

10. DISEÑO DE CONTROL

El robot debe tener un control que le permita adaptarse a las diferentes situaciones a enfrentar y regular mejor el funcionamiento del dispositivo.

10.1.Requisitos previos

Hay ciertos aspectos del diseño general del dispositivo que restringen la manera de realizar el control sobre el dispositivo.

En primer lugar, debido a la dificultad de comunicación con el robot es inviable realizar una comunicación entre usuario y robot. Esto implica que nunca podremos cambiar a modo manual la forma de actuar y deberá ser RITA sola la que cambie de modo de trabajo.

La no posibilidad de comunicación con un computador o usuario, limita la elección restringiéndola a equipos propios para el robot.

Por último, al ser un sistema autónomo no será necesario realizar ningún tipo de interfaz gráfica de control, pero sí un sistema de guardado de datos.

10.2.Equipo de control a utilizar

10.2.1. Requisitos

Las necesidades del robot son básicas, los actuadores y los sensores no son complejos y sus señales pueden tratarse de forma numérica fácilmente. De este modo la potencia del sistema de cálculo es bastante reducida.

Los datos son los siguientes:

- Valor de pulsos del encóder.
- Quaternion y aceleración lineal de la IMU.
- Distancias obtenidas del sensor láser.
- Finales de carrera.

La cantidad depende de cada sensor. En el caso del encóder dependiendo de a qué velocidad vaya podremos tener bastante frecuencia de datos:

El encóder consta de 20 pulsos por revolución en el eje trasero que es donde efectúa la medida. Sin embargo, las revoluciones que queremos medir son las del eje delantero que gira a distinto régimen debido a la reducción interna (63:1) de este modo serían 1260 pulsos por revolución.

Teniendo en cuenta que la velocidad máxima en vacío del motor son 225 rpm. Podemos obtener:

$$\frac{1260 \text{ pulsos}}{\text{rev}} \cdot \frac{225 \text{ rev}}{1 \text{ min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = \frac{4725 \text{ pulsos}}{\text{s}} \quad \text{Ec. 10.1}$$

Según la ecuación anterior el flujo máximo de datos recibido por encoder es de unos 4,7 kHz. Es un régimen de datos elevado, no obstante, no es preocupante debido a que para optimizar el par del motor usaremos velocidades mucho más bajas que la máxima en vacío (50 rpm). De esta forma la frecuencia de este sensor no es excesiva para nuestro elemento de control a elegir.

En cuanto a los otros sensores el sensor láser mide internamente a gran velocidad de medida, pero la frecuencia de muestreo se hará coincidir con la de la IMU, pues queremos registrar todos estos valores en el mismo instante de tiempo con el objetivo de establecer medidas correctas.

Por último, los finales de carrera son una medida de seguridad y control interno para detectar posiciones límite por tanto su señal no es para nada conflictiva a la hora de trabajar.

En definitiva, las variables a recoger no son excesivamente exigentes a la hora de registrarlas con nuestra inteligencia y no requiere mucha velocidad de cálculo. Por otra parte, la capacidad de trabajo no será muy rápida por lo que el elemento que realiza el control puede ser perfectamente un microcontrolador.

10.2.2. Elección

Dentro de las familias de microcontroladores existen numerosos tipos y números gamas de capacidades para trabajar. En nuestro caso, para utilizar un elemento estándar y de código abierto seleccionaremos la plataforma Arduino. Los motivos generales que respaldan esta elección son:

- Fácil implementación en código, con lenguaje similar a C.
- Gran cantidad de funciones y librerías desarrolladas para sensores (IMU y láser tienen librerías específicas para Arduino).
- Facilidad de conversión de código entre modelos. El código es el mismo en todas las gamas, solo cambian la ubicación de los pines, el número de tipos de cada y en algunos modelos existen varias funcionalidades.
- Misma capacidad de lógica de tensión: usa el mismo nivel de voltaje que muchos de nuestros elementos haciéndolo fácilmente compatible.

- Gran soporte de ayuda en la comunidad online.

Dentro de los tipos de Arduino utilizaremos el Arduino Mega 2560, que incorpora el microcontrolador ATMEGA2560. Se ha elegido debido a que incorpora todas las funcionalidades que necesitamos de manera amplia y al mismo tiempo tiene una gran capacidad de cálculo en comparación con otros Arduinos. Unos pequeños resúmenes de las capacidades de trabajo del microcontrolador se muestran en la siguiente tabla:

Microcontrolador	ATmega2560
Memoria flash	256 kB de los cuáles 8 son usados en el bootloder
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
Velocidad de reloj	16 MHz

Tabla 10.1 Características de memoria del ATmega 2560.

10.3.Colocación de la inteligencia

En nuestro caso las tareas a realizar no son muy costosas por lo que en principio una inteligencia centralizada sería factible. Sin embargo, tenemos dos módulos que realizan tareas similares, pero no idénticas. Además, puede que haya momentos en los que una de las dos partes este inoperativa y la otra trabajando.

Teniendo en cuenta todos estos detalles la decisión ha sido crear una inteligencia distribuida. Una en cada módulo y que sea ese elemento el que controle su parte. No obstante, como el módulo trasero no incorpora un sensor láser será necesario hacerle llegar esa información para que disponga de un dato que es necesario para su funcionamiento.

10.4.Comunicaciones

Como comentamos anteriormente las comunicaciones son entre el microcontrolador y los diferentes sensores y vienen regidas por éstos:

- Láser: I2C.
- IMU: I2C.
- Módulo SD: SPI.

La única comunicación que unirá a ambas inteligencias será una comunicación serie tipo UART entre los dos módulos que intercambiará el valor de la distancia leída en el sensor cada vez que esta tenga un cierto valor.

10.5. Planificación del Software

Para planificar el flujo de programación que rija el funcionamiento del robot nos basaremos en la creación de un diagrama de estados o “Statechart”. Empleando esta metodología podremos identificar como cambia el flujo de datos, que condiciones han de cumplirse y como es la interacción entre los datos. El objetivo no será convertir todo el código del Statechart directamente a código de microcontrolador, sino tener clara que partes principales tiene el código y como hay que realizar los cambios entre ellas.

Nombre Evento	Producido cuando
e_FUENTE_ON()	Fallo de alimentación de la fuente
e_BATERIA_ON()	Fallo de alimentación de la batería de emergencia
e_DISTANCIA_OBSTACULO	Distancia medida < Distancia de seguridad (Movimiento rápido)
e_MOVIMIENDO()	Robot moviéndose encoder e IMU sin registrar paro
e_QUIETO()	Robot sin avanzar encoder moviéndose o no e IMU sin registrar arranque
e_DESLIZAMIENTO()	Robot con ruedas deslizándose
e_FC1_ON()	Contacto en el límite inferior
e_FC2_ON()	Contacto en el límite superior

Nombre Acción	Produce en el sistema
a_LED1_ON()	Enciende el LED 1
a_LED2_ON()	Enciende el LED 2
a_TIJERA()	Acción de abrir o cerrar la tijera
a_ABRIR_TIJERA_EXTRA()	Abrir un poco más la tijera en caso de deslizamiento
a_SENTIDO_DC()	Elegir avance o retroceso del robot
a_LEER_SENSOR()	Inicio de lectura de los sensores
a_ESCRIBIR_SD()	Inicio de escritura de datos en la tarjeta SD

Nombre Variable	Representa
v_PWM	Valor del PWM (8 bit [0,255])
v_SENTIDO_DC	Sentido del motor DC
v_PASOS_TIJERA	Número de pasos que debe moverse el motor PAP

Tabla 10.2 Elementos que intervienen en el Statechart.

Los estados se representarán precedidos con la letra x:

Robot Inspeccionador de Tuberías

Nombre Acción
x_RITA
x_ROBOT_OFF
x_ROBOT_ON
x_TENSION_PRINCIPAL
x_INICIO
x_CALIBRACION
x_AGARRE
x_AGARRE_OPTIMO
x_OPERACIÓN
x_PARADO
x_AVANCE_RECTO
x_AVANCE_CURVO
x_ATASCO
x_RETROCESO
x_FIN_INSPECCION
x_TENSION_EMERGENCIA
x_MOVIMIENTO_NORMAL
x_ATASCO_O_DESLIZAMIENTO
x_LIMITE_OFF
x_LIMITE_ON

Tabla 10.3 Lista de estados del sistema.

Transiciones	Equivalencia
TR0:=	Conexión eléctrica Máquina
TR1:=	e_FUENTE_ON()
TR2:=	NOT e_FUENTE_ON()
TR3:=	TIMEOUT x_CALIBRACIÓN
TR4:=	EXIT x_AGARRE
TR5:=	EXIT x_AGARRE_OPTIMO
TR6:=	e_DISTANCIA_OBSTACULO > 40
TR7:=	e_DISTANCIA_OBSTACULO <= 40
TR8:=	e_QUIETO()
TR9:=	TIMEOUT x_RETROCESO
TR10:=	NOT e_FUENTE_ON()
TR11:=	NOT e_BATERIA_ON()
TR12:=	e_QUIETO()
TR13:=	e_MOVIMIENDO()
TR14:=	e_FC1_ON() e_FC1_ON()
TR15:=	NOT e_FC1_ON() NOT e_FC2_ON
TR16:=	e_DISTANCIA_OBSTACULO <= 40
TR17:=	e_DISTANCIA_OBSTACULO > 40

Tabla 10.4 Activación de transiciones.

Robot Inspeccionador de Tuberías

El funcionamiento del robot será el siguiente.

Si se enciende el robot pasarán a encenderse los LED de tensión como mínimo y batería si esta operativa. A continuación, entramos en un período de 45 segundos en los que se calibrará el robot, para a continuación empezar a abrirse hasta el punto de agarre óptimo. Tras el agarre entra en funcionamiento escribe los datos de los sensores en la SD y enciende el motor en el sentido de avance del tubo.

Durante el recorrido medirá continuamente la distancia. Si esta es mayor de 40 cm estaremos en un tramo recto y podremos seguir circulando al mismo régimen de velocidad. En caso contrario estaremos encarando hacia un obstáculo y bajaremos el PWM por precaución y mejor salida del obstáculo.

Si durante el movimiento encontramos que el robot no avance reduciremos el par para aumentar el par de avance, recorreremos 10 segundos hacia atrás y volveremos al funcionamiento normal.

Por último, están las medidas de seguridad tanto por llegar al límite del movimiento o por caída de la tensión principal.

En el caso de perder la tensión principal accionaremos la tijera y la cerraremos para facilitar la extracción manual del robot.

En el caso de tocar un final de carrera cambiaremos el sentido de giro y moveremos una vuelta o dos la tuerca para alejarlo del límite.

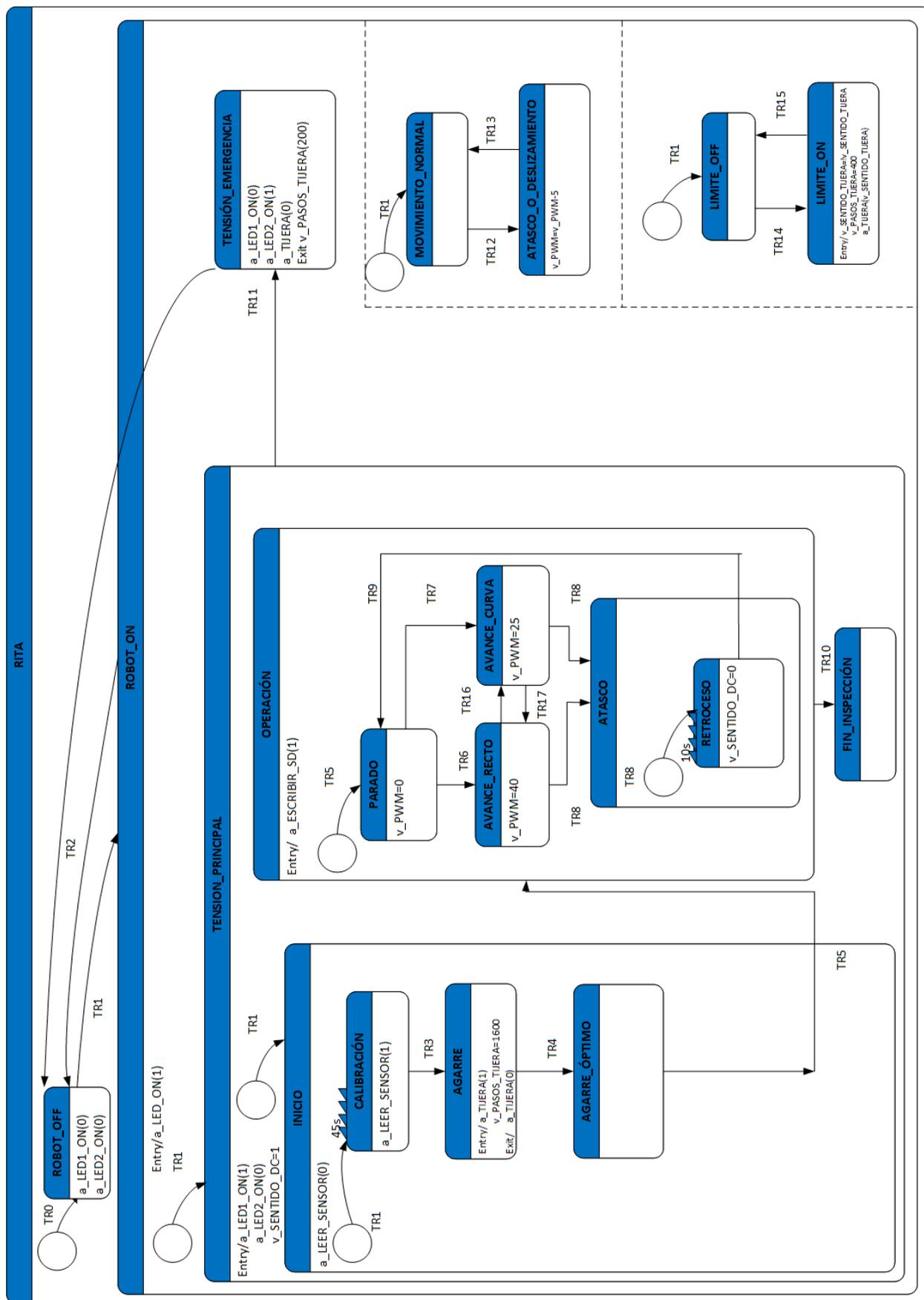


Figura 10.1 Statechart.

10.6. Implementación del código

Una vez generado el Statechart ya tenemos una idea cuál es la estructura del programa que vamos a ejecutar. Sin embargo, muchas de las instrucciones o transiciones no pueden ser implementadas de esa forma o bien están ya integradas en algunos procesos del sistema.

10.6.1. Estructura básica

En Arduino existe una peculiaridad a la hora de introducir el código pues tiene por defecto dos funciones sin retorno que son “void setup()” y “void_loop”.

La primera sirve para ejecutar una vez el código que en ella contiene y suele emplearse para declarar variables, inicializar sensores, comenzar la comunicación, etc.

La segunda es un bucle continuo y ahí se encontrarán todos los elementos, funciones o lecturas que haya que realizar una y otra vez.

Fuera de esos dos grandes bloques es donde se encuentran la importación de librerías, definición de variables globales, declaración de funciones y otras tareas que no vayamos a incluir en las otras dos secciones.

10.6.2. Elementos extra

Librerías

Como antes mencionamos Arduino tiene muchas librerías propias que facilitan la incorporación de funciones y tareas a utilizar. Por ejemplo, en nuestro caso para nuestras comunicaciones emplearemos las siguientes librerías de Arduino:

- Wire.h: que permite la comunicación I2C.
- SPI.h: que permite la comunicación SPI.
- SD.h: que incorpora funciones para lectura, escritura, creación, eliminación y edición de elementos en una tarjeta SD.

También incorporamos librerías de fabricantes de los sensores:

- Adafruit_Sensor.h: librería genérica de sensores de Adafruit que permite realizar tareas de inicialización de sensores.

Robot Inspeccionador de Tuberías

- Adafruit_BNO055.h: librería para realizar las funciones de los elementos de la IMU de manera directa.
- LIDARLite.h: librería para realizar las lecturas y configuración del láser de medición de distancia.

Por último, para realizar la lectura del encoder se ha optado por incluir una librería específica para ellos por varios motivos:

- La librería permite leer e inicializar el encoder de manera rápida con tan solo indicar los pines digitales a emplear.
- Incluye el proceso de lectura de flancos por interrupción. La gestión principal de Arduino lee valores digitales con una función con un tiempo ejecución muy lento. Por este motivo es necesario utilizar interrupciones.
- El protocolo de realización de interrupciones está optimizado para leer incluso a valores de 100 kHz [39]. Esto nos garantiza de manera holgada, que nuestro encoder va a ser leído a una velocidad muy superior a la que genera pulsos.

Esta librería es de gran utilidad, pero aunque se trata de un fabricante de placas y utiliza estas librerías en ellas, se llevó a cabo una prueba con el motor para asegurarnos que las mediciones se realizaban de manera apropiada.

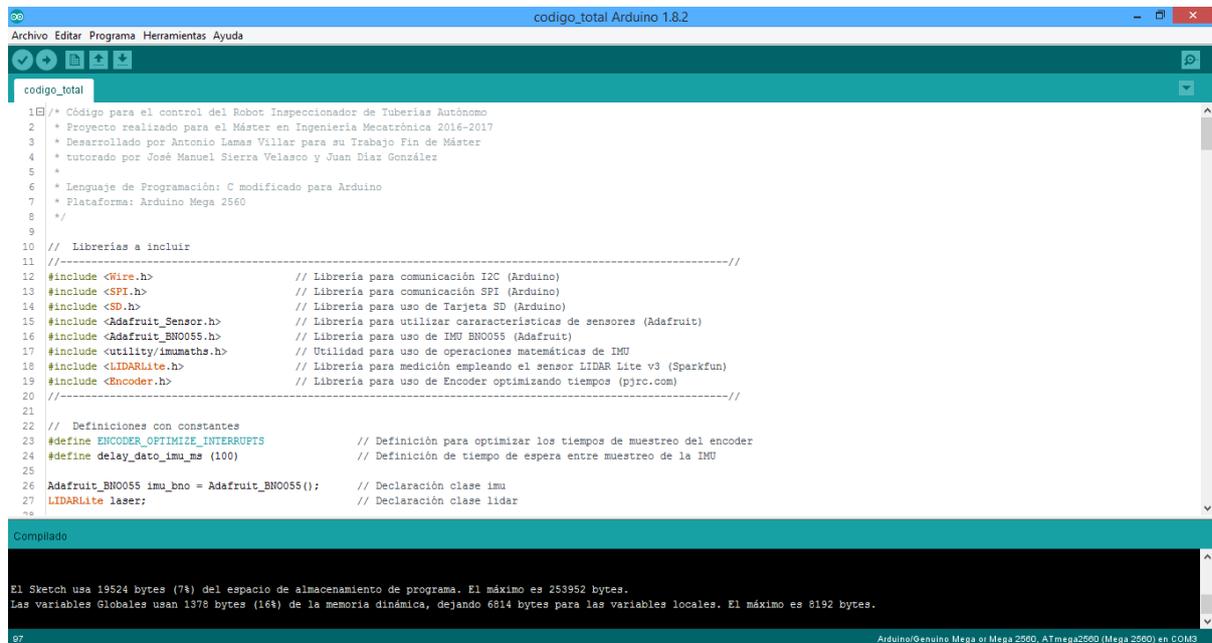
Funciones

Se crearon funciones para agilizar procesos del código repetitivos y frecuentes a lo largo del mismo:

- movimiento: se encarga de poner en movimiento el motor. Con un valor booleano para el sentido de giro y el valor entero del PWM asigna los valores a los pines para que el motor de DC se ponga en movimiento.
- tijera: se encarga de abrir o cerrar las tijeras con el motor PAP. Recibe como entrada el sentido de apertura o de cierre que pareamos con el sentido de giro del motor, y el número de pasos que ha de moverse el paso a paso para conseguir ese valor lineal de movimiento.
- Calculo_distancia: calcula la distancia total movida por el encoder. Recibe el número de pulsos, vueltas y vueltas 1000 que nos almacena el número de vueltas. Nos devuelve un float con el valor de la distancia. Incorporamos las vueltas y 1000 veces vueltas para evitar el desbordamiento del valor del float en caso de distancias muy elevadas.

10.7. Rendimiento del código en el microcontrolador

Algo que debemos comprobar es el tamaño que ocupa el código en el microcontrolador al compilar. Como antes se mencionó el Arduino Mega tiene capacidad más que suficiente para las tareas, pero hemos de comprobarlo para ver si es necesario reducir y compactar más el tamaño del código.



```

1 1 /* Código para el control del Robot Inspeccionador de Tuberías Autónomo
2 2  * Proyecto realizado para el Máster en Ingeniería Mecatrónica 2016-2017
3 3  * Desarrollado por Antonio Lamas Villar para su Trabajo Fin de Máster
4 4  * tutorado por José Manuel Sierra Velasco y Juan Díaz González
5 5  *
6 6  * Lenguaje de Programación: C modificado para Arduino
7 7  * Plataforma: Arduino Mega 2560
8 8  */
9 9
10 10 // Librerías a incluir
11 11 //-----//
12 12 #include <Wire.h>           // Librería para comunicación I2C (Arduino)
13 13 #include <SPI.h>           // Librería para comunicación SPI (Arduino)
14 14 #include <SD.h>            // Librería para uso de Tarjeta SD (Arduino)
15 15 #include <Adafruit_Sensor.h> // Librería para utilizar características de sensores (Adafruit)
16 16 #include <Adafruit_BNO055.h> // Librería para uso de IMU BNO055 (Adafruit)
17 17 #include <utility/ImuMaths.h> // Utilidad para uso de operaciones matemáticas de IMU
18 18 #include <LIDARLite.h>     // Librería para medición empleando el sensor LIDAR Lite v3 (Sparkfun)
19 19 #include <Encoder.h>       // Librería para uso de Encoder optimizando tiempos (pjrc.com)
20 20 //-----//
21 21
22 22 // Definiciones con constantes
23 23 #define ENCODER_OPTIMIZE_INTERRUPTS // Definición para optimizar los tiempos de muestreo del encoder
24 24 #define delay_dato_imu_ms (100) // Definición de tiempo de espera entre muestreo de la IMU
25 25
26 26 Adafruit_BNO055 imu_bno = Adafruit_BNO055(); // Declaración clase imu
27 27 LIDARLite laser; // Declaración clase lidar
28 28
29 29
30 30
31 31
32 32
33 33
34 34
35 35
36 36
37 37
38 38
39 39
40 40
41 41
42 42
43 43
44 44
45 45
46 46
47 47
48 48
49 49
50 50
51 51
52 52
53 53
54 54
55 55
56 56
57 57
58 58
59 59
60 60
61 61
62 62
63 63
64 64
65 65
66 66
67 67
68 68
69 69
70 70
71 71
72 72
73 73
74 74
75 75
76 76
77 77
78 78
79 79
80 80
81 81
82 82
83 83
84 84
85 85
86 86
87 87
88 88
89 89
90 90
91 91
92 92
93 93
94 94
95 95
96 96
97 97

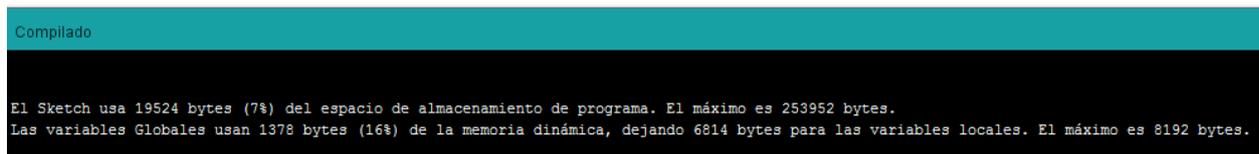
```

Compilado

El Sketch usa 19524 bytes (7%) del espacio de almacenamiento de programa. El máximo es 253952 bytes.
Las variables Globales usan 1378 bytes (16%) de la memoria dinámica, dejando 6814 bytes para las variables locales. El máximo es 8192 bytes.

Arduino/Genuino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) en COM3

Figura 10.2 Resultado de compilación en la interfaz de Arduino.



Compilado

El Sketch usa 19524 bytes (7%) del espacio de almacenamiento de programa. El máximo es 253952 bytes.
Las variables Globales usan 1378 bytes (16%) de la memoria dinámica, dejando 6814 bytes para las variables locales. El máximo es 8192 bytes.

Figura 10.3 Resumen de la compilación.

Como se puede apreciar en la captura de pantalla anterior usamos un 7% del almacenamiento del programa, mientras las variables globales usan un 16% de la memoria dinámica. Con estos datos podemos asegurar que la carga de trabajo de nuestro microcomputador es holgada para él.

11. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

Una vez realizados los diseños de las diferentes partes del diseño del robot es el momento de llevar a cabo los procesos con el objetivo de determinar el funcionamiento real.

11.1. Diferencias con las especificaciones del proyecto

Debido a ajustes del presupuesto y capacidad productivas del proyecto se han realizado algunos cambios respecto al plan original de diseño:

- Se utilizará en casi la totalidad de las piezas impresión 3D debido a su fácil fabricación en la Universidad.
- Se usarán los cables disponibles en el laboratorio con lo cual no se respetará las especificaciones incluidas en los planos.
- Los tornillos se unificarán en longitud para facilitar el pedido y posteriormente se cortarán.
- Se usarán dos fuentes de tensión para evitar comprar una batería.

11.2. Pedidos comerciales

Se generó una lista de todos los componentes necesarios para la realización del proyecto, cantidades y posibles proveedores.

Debido a que muchos componentes seleccionados no están disponibles a través de proveedores locales o en las instalaciones, habrá que realizar pedidos a proveedores no locales. Se procurará unificar al máximo los pedidos con el fin de reducir costes de envío y más importante aún reducir los tiempos de espera.

Con el objetivo de prevenir retrasos y llevar un mayor supervisión del gasto se generó una hoja de control con las cantidades de pedidos, elementos, fecha de pedido, fecha de llegada estimada y precio.

Una vez recibidos los pedidos se realizaron mediciones de los elementos para comprobar si eran los correctos y si el número de elementos encargados era el requerido.

En cuanto a los elementos electrónicos y eléctricos se realizaron pruebas individuales de cada uno para comprobar su correcto funcionamiento. Estos tests incluían medición de continuidad, pruebas básicas de registro de datos en sensores, pruebas de accionamiento en actuadores o drivers.



Figura 11.1 Comprobación de número de elementos e inspección primaria de medidas.

11.3. Procesos de fabricación

En general las piezas se fabricaron con pocos tipos de procesos:

11.3.1. Impresión 3D

Se realizó en la máquina del departamento de Ingeniería Mecánica. Es una HP Designjet 3D Printer, una impresora 3D de tecnología FDM que realiza piezas en ABS.



Figura 11.2 Impresora 3D utilizada.

Las ventajas de la impreso 3D es que puede imprimir casi cualquier geometría creada de manera que la convierte en un método muy versátil y rápido de probar. El problema es que tiene varias limitaciones que la hacen un poco compleja a la hora de trabajar:

Robot Inspeccionador de Tuberías

- La precisión no es controlable: su precisión teórica es una centésima de mm, pero debido a la geometría de impresión, los cambios de temperatura y humedad tiene mucha variabilidad, con lo que es muy probable que haya que reparar las piezas o lijarlas para conseguir el acabado deseado.
- Construcción mediante aportes: muchas geometrías necesitan de aportes de material para poder realizarse lo que implica que será necesario limpiar las piezas de este material. Se puede ver en las siguientes imágenes el proceso a realizar.

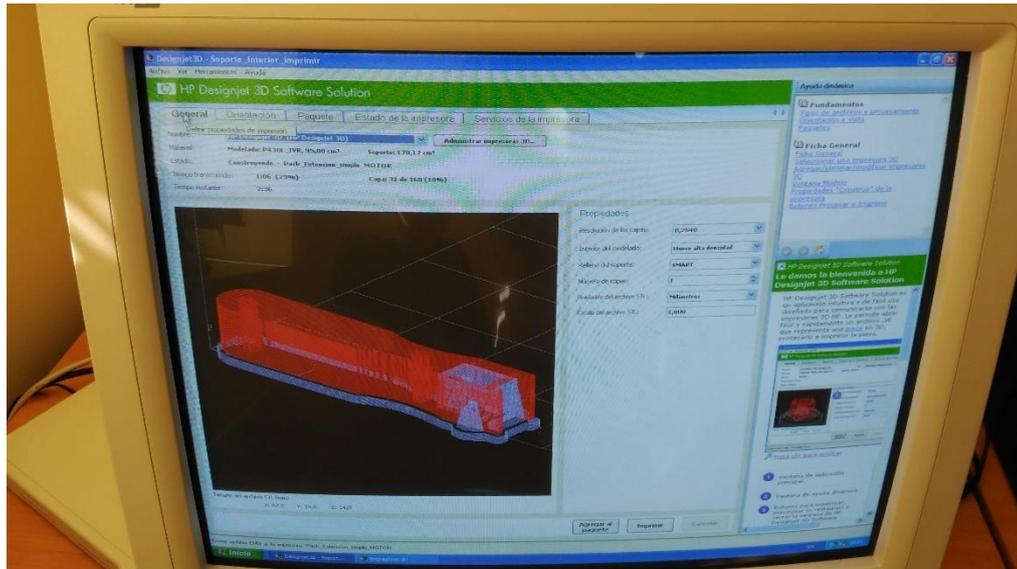


Figura 11.3 Geometría a imprimir (rojo), soportes (morado).

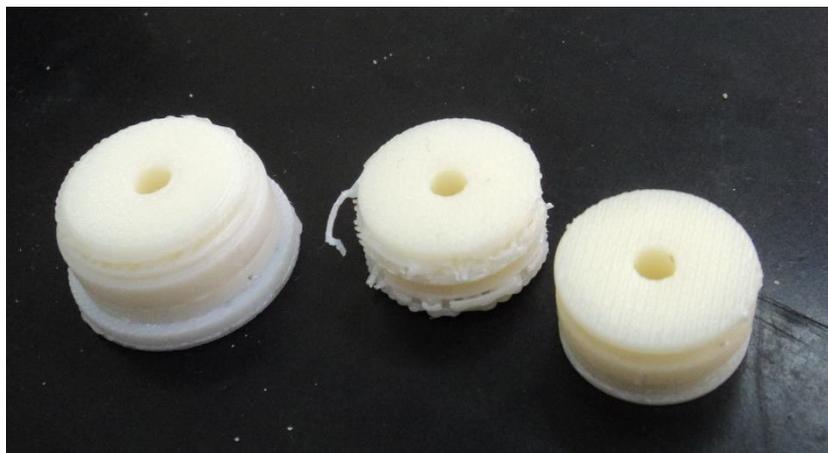


Figura 11.4 Misma pieza durante distintas etapas de impresión.

- Anisotropía de la pieza: debido al método de fabricación colocando diversas capas en dirección distintas entre sí el material no es homogéneo en todas sus direcciones. Esto implica que sea mucho más difícil calcular con FEA las piezas realizadas con este método de fabricación.

Finalmente, es necesario mencionar que en caso de fabricar dos piezas que deban encajar entre sí, es necesario que ambas tengan una tolerancia de 0,5 mm mayor para que el encaje sea bueno. Deben repartirse ese valor entre agujero y eje, agrandando uno o reduciendo el otro o las dos a la vez, sino será necesario lijar las superficies a mano.

11.3.2. Torneado

Los rebajes en el husillo debido a la necesidad de su precisión se realizaron con torno manual que asegura una precisión muy buena y tolerancias dimensionales suficientes para la aplicación a realizar. Además, es necesario un torno, puesto que el material es acero aleado necesitamos potencia de corte.

11.3.3. Fresado

Los ejes de la rueda motriz se realizaron con la fresadora manual. Esta operación es muy simple y solo requiere realizar un planeado de la medida en el eje.

11.3.4. Corte con sierra

Los casquillos serán cortados a la medida con sierra manual a las distancias necesarias.

Lo mismo se hará con las chapas para unir la estructura.

11.3.5. Taladrado

El taladro se usará para hacer los agujeros interiores de los casquillos y los agujeros de unión de las chapas de unión.

También se utilizarán para repasar agujeros de las piezas de impresión 3D con agujeros con medias un poco diferentes.

11.3.6. Limado y lijado

Muchas piezas de impresión 3D como las ruedas necesitan ser lijadas o limadas para reducir medidas excesivas. Además, en piezas con requerimientos de poca rugosidad es necesario pasar la lija con el objeto de reducir al máximo todos los rozamientos.

11.3.7. Creación de placas

Se crearon una PCBs para la implementación del circuito real. Fue necesario eliminar con ácido las pistas no necesarias del circuito, limpiar la placa, taladrarla y por último soldarla para generar nuestras placas.

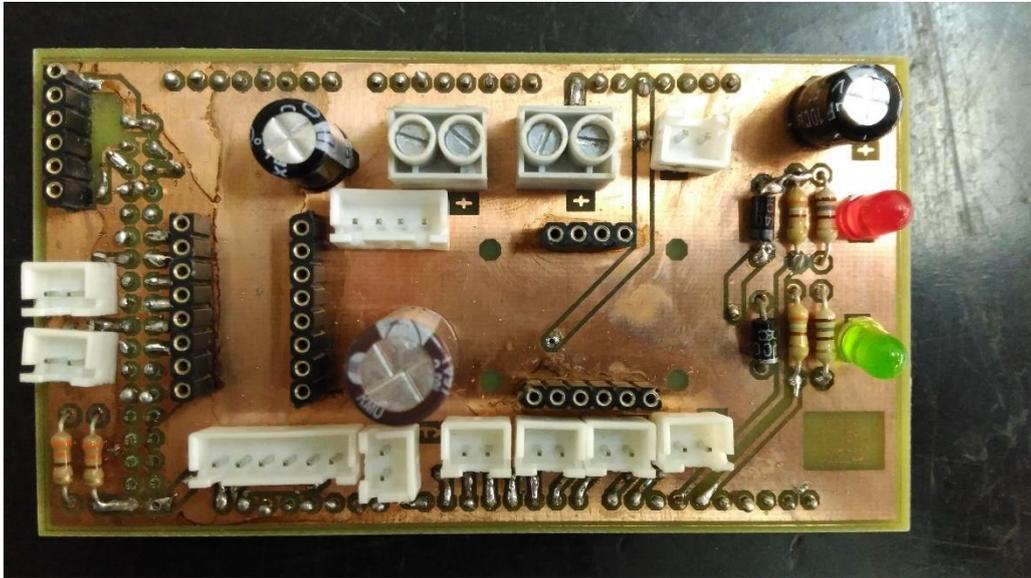


Figura 11.5 Placa de control soldada cara TOP.

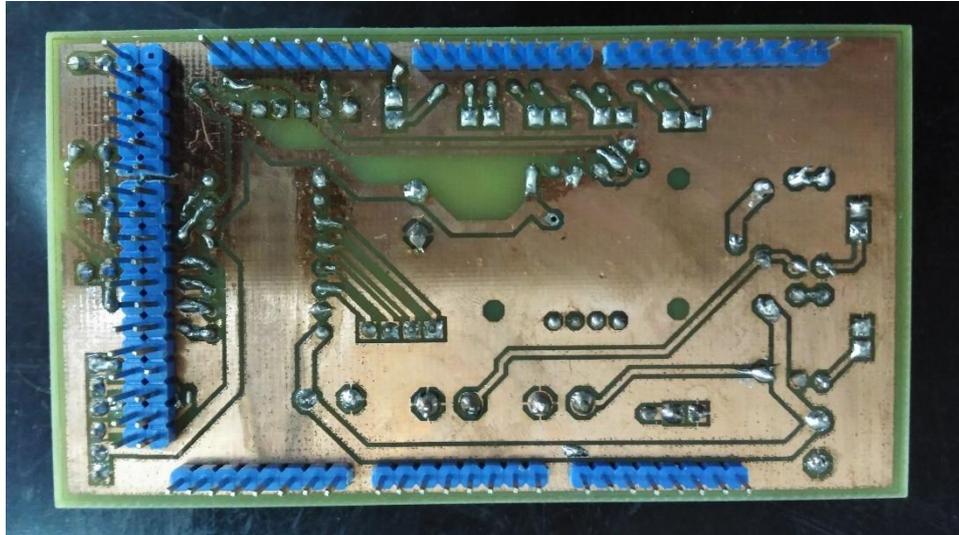


Figura 11.6 Placa de control soldada, cara BOTTOM.

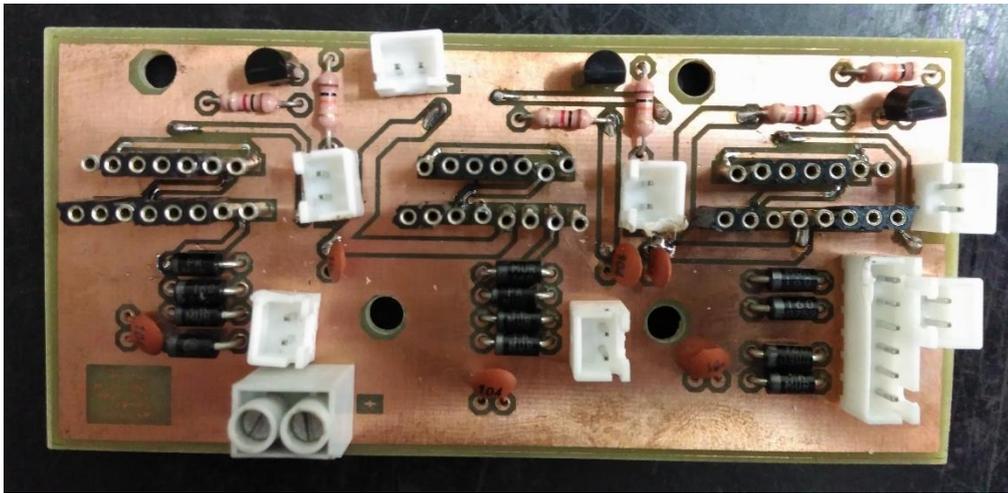


Figura 11.7 Placa de propulsión soldada, cara TOP.

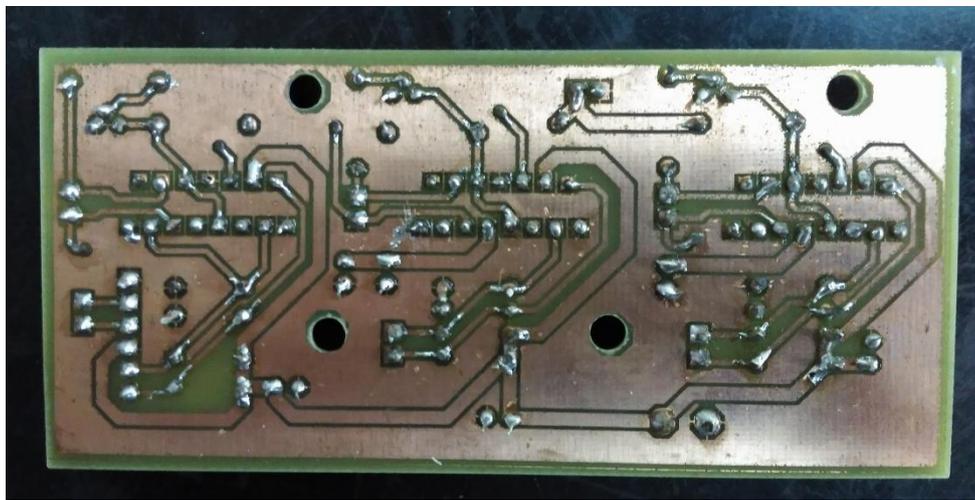


Figura 11.8 Placa de propulsión soldada, cara BOTTOM.

12. PROTOTIPO FINAL

12.1.Descripción

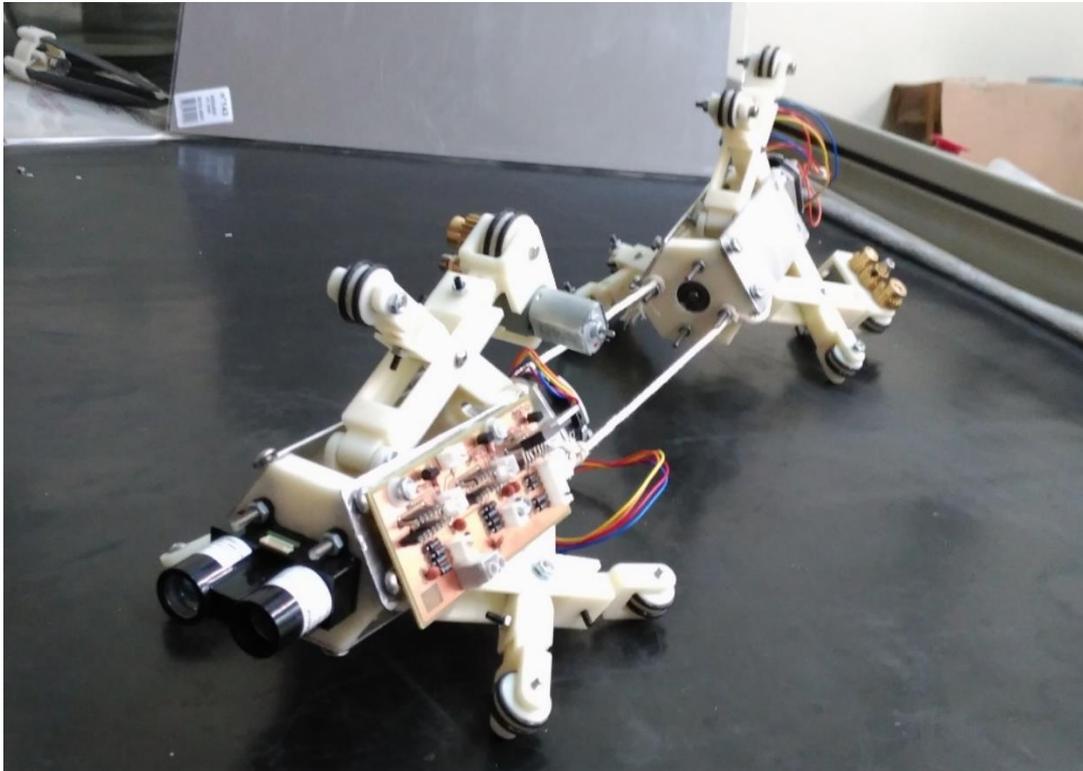


Figura 12.1 Prototipo final terminado.

El prototipo final es como el que se puede ver en la imagen anterior. Consta de los dos módulos y se puede ver perfectamente la unión por cuerdas que mantiene a ambos solidarios entre sí.

En la imagen solo tenemos un motor por módulo debido a que los ensayos de funcionamiento se harán con distintas configuraciones y número de motores.

Tiene un rango de trabajo para tubos entre 171 y 286 mm de diámetro pesa 1,5 kg y tiene un largo de módulo de unos 200 mm posibilitando el recorrido sencillo por las cruvas.

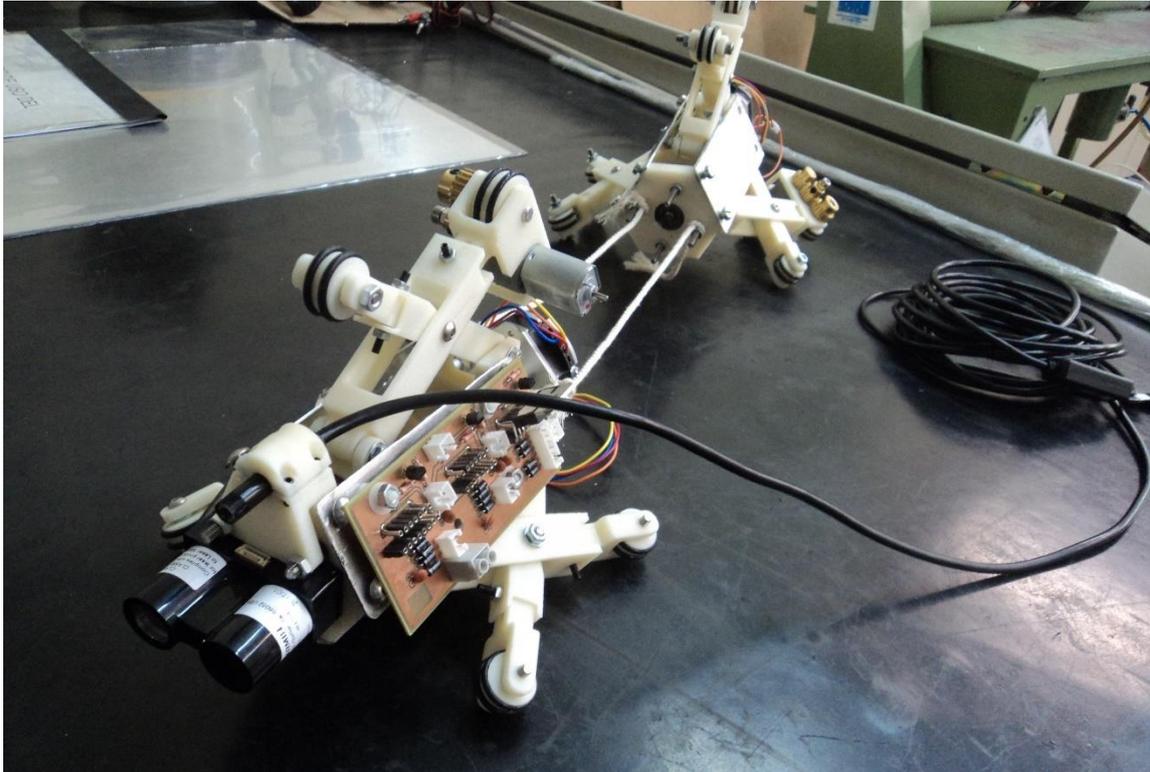


Figura 12.2 Robot con cámara integrada.

Esta una posibilidad genial de nuestro diseño. Ésta es la de incorporar diferentes sensores o elementos dependiendo de las necesidades de cada inspección, pudiendo acoplar en cada momento unos u otros con tan solo cambiar las dos piezas frontales.

Esta es una muestra de las posibles opciones de adaptabilidad, pero realmente podrían en incorporarse en varios lugares del robot según nos convenga.

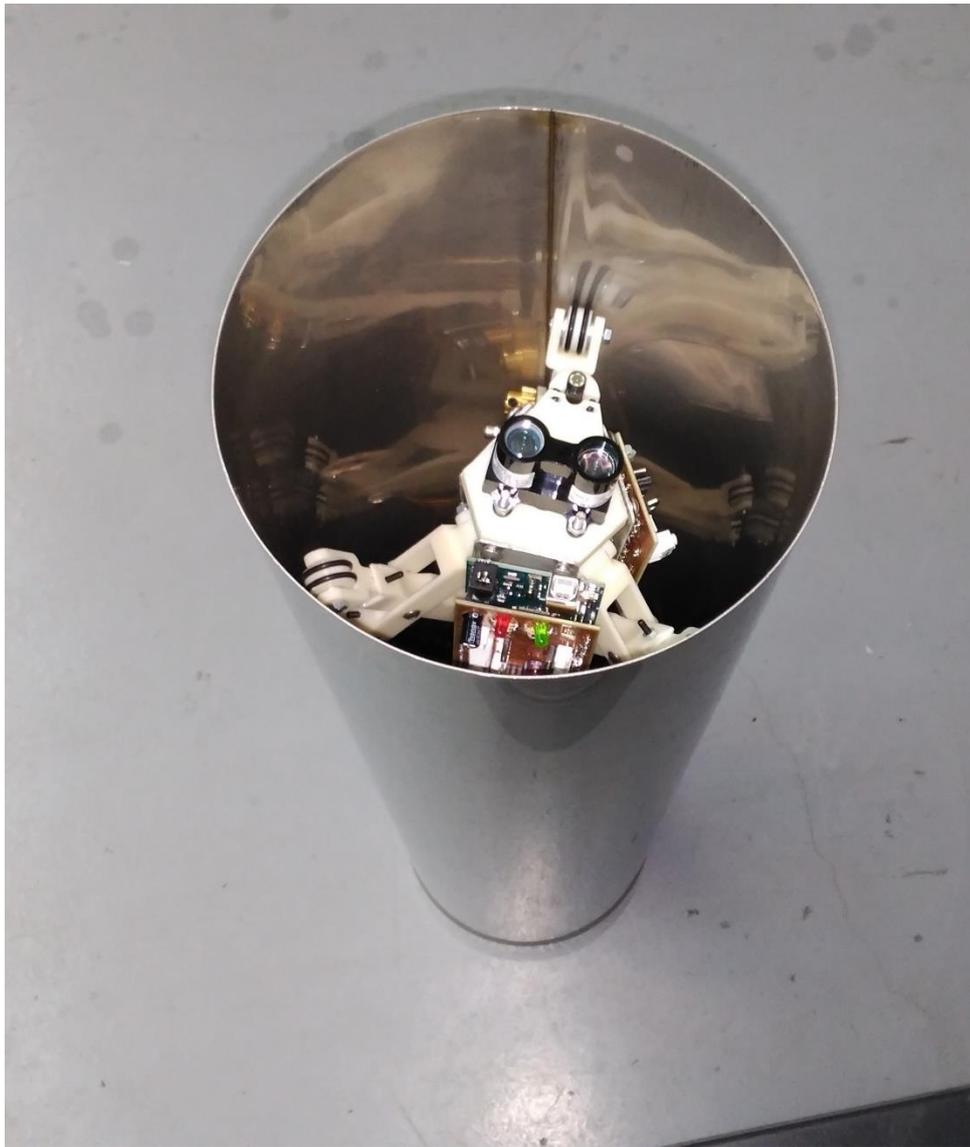


Figura 12.3 Robot sujeto en el interior del tubo en posición vertical.

Se procedió a pesar el conjunto en una báscula para conocer mejor el peso total:



Figura 12.4 Pesaje del módulo.



Figura 12.5 Pesaje de las placas.

En conjunto el módulo láser pesa 770 g. El otro módulo pesa unos 20 g menos que es lo que pesa el láser de manera que el robot entero pesa 1520 g de manera que la suposición de peso de cálculo resultó ser bastante acertada.

12.2. Defectos encontrados

12.2.1. Deformación del motor

El excesivo peso del motor en relación a su soporte implica que durante el funcionamiento existe una deformación excesiva que hace que a veces pierda un poco en contacto con el tubo. Este fue el motivo por el que se decidió aumentar el tamaño de la rueda motriz.

12.2.2. Muelles demasiado duros

Los cálculos realizados para seleccionar los muelles en origen eran para un robot hecho en aluminio y por tanto más pesado de manera que los muelles tenían que ser más rígidos. Desafortunadamente cuando el robot se probó en el conjunto hecho en impresión 3D, éstos apenas se deformaban haciendo imposible su trabajo adecuado.

12.2.3. Fallos del motor

El proyecto se ha finalizado sin poder probar adecuadamente todo el robot en conjunto. Esto es debido a fallos graves del motor DC. Éste se para a menudo en su funcionamiento, en un primer

Robot Inspeccionador de Tuberías

momento se pensó que debido a que se quemó debido a un esfuerzo excesivo. Sin embargo, esto ocurrió en todos los motores comprados y tras desmontarlos para identificar el fallo se comprobó que la reductora pierde el contacto durante el giro y esto provoca el bloqueo del motor.

Tras encontrar la solución se probó de nuevo, pero continuamente se produce los mismos fallos tras dos o tres pruebas del motor. Este hecho ha impedido la finalización de las pruebas de funcionamiento restringiéndolo a pruebas básicas con solo un módulo.

13. PRUEBAS DEL SISTEMA

A lo largo de la recepción, fabricación, y montaje de las piezas, y montaje de las mismas es necesario llevar a cabo una serie de pruebas para corroborar el buen funcionamiento del sistema. Las pruebas se ejecutarán en niveles de complejidad y grupos.

13.1. Pruebas individuales

Serán las que comprueben la funcionalidad de los elementos individuales del sistema.

Mecánicas

Prueba	Desarrollo	Objetivo
Medición medidas piezas	Medir con calibre las medidas con tolerancias de las piezas de fabricantes	Verificar la medida correcta de las piezas e identificar piezas a retocar.
Estado del material en base a acero	Verificar visualmente si existe corrosión o picaduras excesivas y protegerlas del ambiente tapándolas	Reconocer posibles fallos graves y evitar que se extiendan.
Agarre de las cubiertas	Comprobar su rozamiento en tubo arrastrando una cubierta contra el tubo	Chequear si es necesario cambiar las cubiertas
Compresibilidad del muelle	Comprimir el muelle para ver si el funcionamiento es correcto	Tantear si la constante de rigidez trabaja de manera adecuada.
Módulo engranajes	Posicionar el dentado de un engranaje contra el otro	Comprobar que el módulo es el adecuado
Giro motor	Comprobar giro del eje menor del motor	Asegurarnos que la reductora no está atascada

Tabla 13.1 Pruebas individuales Mecánicas.

Electrónica y eléctricas

Prueba	Desarrollo	Objetivo
Continuidad	Medir continuidad entre pines comunes	Ver posibles defectos en los integrados
Funcionamiento simple driver	Montar circuito de prueba de datasheet y comprobar valores lógicos y de tensiones	Verificar funcionamiento driver
Funcionamiento simple actuadores	Enchufar motores a una tensión nominal o menor	Comprobar funcionamiento actuadores
Funcionamiento elemental sensores	Utilizar un código simple del microcontrolador y revisar entradas y salidas	Verificar funcionamiento sensores
Pasos del encoder	Utilizar código contar vueltas encoder y contar las vueltas en un minuto. Comparar con valor teórico	Chequear funcionamiento efectivo de encoder y librería de encoder
Registro datos SD	Comprobar con Arduino registro de datos	Verificar los datos se escriben correctamente

Tabla 13.2 Pruebas individuales electrónicas.

13.2.Pruebas conjuntas

Comprobarán el correcto funcionamiento de las partes del conjunto que trabajen entre sí.

Mecánicas

Prueba	Desarrollo	Objetivo
Giro relativo tijera	Mover los brazos de la tijera sobre articulación común	Comprobar nivel de rozamiento relativo
Giro relativo eslabones sobre soportes	Mover los brazos sobre la articulación	Comprobar el nivel de rozamiento
Comprobar presión muelle	Mover la extensión con y contra el brazo	Verificar trabajo del resorte
Comprobar límites extensión	Mover la extensión hacia	Determinar que no se sale de

Robot Inspeccionador de Tuberías

	fuera y hacia dentro	la otra pieza
Movimiento extensión-brazo	Mover uno sobre el otro sin muelle	Comprobar el rozamiento relativo
Giro rueda conducida	Girar la rueda con el tornillo y arandelas colocadas	Verificar giro apropiado y ver rozamientos
Transmisión engranajes	Mover engranajes unos contra otros en vacío.	Ver que el movimiento se transmite del modo correcto (vueltas inicio y vueltas fin cumplen relación de reducción)
Deslizamiento eje-rueda motriz	Mover el eje dentro de la rueda	Comprobar si existe o no transmisión rígida entre ambos
Alineación agujeros y motores	Tratar de hacer coincidir agujeros de pieza y motores y que encajen los tornillos	Verificar alineación piezas
Comprobar juego husillo	Girar tuerca sobre husillo o viceversa	Comprobar que el movimiento es válido
Giro motor husillo	Comprobar que acoplamiento y el husillo giran a la vez (todo debe estar montado antes)	Comprobar colocación correcta del acoplamiento

Tabla 13.3 Pruebas conjuntas Mecánicas.

Electrónica y eléctricas

Prueba	Desarrollo	Objetivo
Giro rueda desde motor	Aplicar tensión nominal a motor y ver que gira todos los engranajes y la rueda	Comprobar que el motor es capaz de mover todo en vacío
Girar una vuelta PAP	Girar una vuelta del PAP con microstepping y comprobar que ejecuta solo una vuelta	Verificar giro adecuado PAP
Medida lineal husillo	Girar PAP para una distancia lineal y medirla	Comprobar que hay buena calibración entre movimiento angular y lineal

Robot Inspeccionador de Tuberías

Movimiento motor placa propulsión	Girar motor DC con la placa de propulsión	Verificar funcionamiento placa
Funcionamiento sensores en placa	Hacer pruebas individuales y conjuntas sensores con PCB	Verificar funcionamiento conjunto en la placa
Comprobación tiempo calibración	Realizar protocolo de calibración en tiempo requerido	Ver si es posible
Escritura correcta datos	Enviar datos todos sensores a SD. Introducir valores “conocidos” en sensores	Comprobar que los datos están guardados correctamente
Final de carrera en placa	Medir voltaje con polímetro ante cambio de pulsación	Comprobar que el final de carrera funciona en la placa

Tabla 13.4 Pruebas conjuntas electrónicas.

13.3.Prueba total

Comprobará el funcionamiento del robot como un conjunto

Prueba	Desarrollo	Objetivo
Agarre robot	Comprobar que el robot no cae con la apertura necesaria	Verificar el agarre es bueno
Movimiento del robot	Conectar motores de propulsión	Ver que el contacto rueda motriz es bueno y el motor avanza
Calibración agarre y movimiento horizontal	Realizar el código total y ver si con ese agarre el motor es capaz de moverse con ese agarre en horizontal	Comprobar buena calibración de pasos y PWM, para agarre y movimiento respectivamente en este estado
Calibración agarrey movimiento vertical	Realizar el código total y ver si con ese agarre el motor es capaz de moverse con ese agarre en vertical	Comprobar buena calibración de pasos y PWM, para agarre y movimiento respectivamente en este estado
Calibración agarre y movimiento vertical	Realizar el código total y ver si con ese agarre el motor es	Comprobar buena calibración de pasos y PWM, para agarre

Robot Inspeccionador de Tuberías

	capaz de moverse con ese agarre en vertical	y movimiento respectivamente en este estado
Prueba funcionamiento	Dejar al robot trabajar en un tubo	Comprobar que hace bien las funciones y registra la información

Tabla 13.5 Pruebas totales.

14. CALIBRACIÓN ELEMENTOS

Hay ciertos elementos y procesos que son necesarios calibrar antes, durante y tras los procesos de pruebas.

14.1.IMU genérica

Antes de cada proceso existe un tiempo determinado previo a que el robot inicie el movimiento. En este proceso se calibraron los elementos de la IMU salvo el acelerómetro. Esta excepción se debe a los siguientes motivos:

- Su calibración es un proceso muy delicado y complejo que no siempre da garantías.
- Su calibración implicaría calibrar el chip de la IMU directamente lo cual en su posición en su integrado actual es muy difícil.
- Los datos de los acelerómetros al contrario que los del giróscopo y magnetómetro contienen mucho margen de error por lo que generalmente su funcionamiento y detección se hace en base a eventos de cambio de valor brusco, no comparando los valores numéricos exactos.

Por todos estos motivos se ha decidido que es más efectivo trabajar con el acelerómetro sin calibrar.

El proceso de calibración de ambos sensores es el siguiente:

Giróscopo: es necesario dejar en posición estática la IMU durante unos segundos sin movimiento tras eso el giróscopo estará completamente calibrado.

Magnetómetro: hay que girar bruscamente el sensor en varias direcciones para que el magnetómetro se calibre de forma correcta.

El resto del tiempo de este proceso de calibración será invertido en colocar el robot en el tubo para que una vez finalizado el tiempo entre en funcionamiento directo.

14.2.Detección paro-movimiento

Para comprobar si el robot desliza habrá que comparar si el motor está girando con el encoder y a la vez si el robot está parado usando la IMU. Para hacer esto debemos detectar el cambio brusco de aceleración desde posición parada a movimiento y viceversa.

Hacer este proceso con la IMU por separado es completamente inútil pues los valores no son escalables al movimiento de un robot específico con sus inercias en acción. Es por estas razones que hay que hacerlo durante el movimiento del robot en funcionamiento.

14.3.Láser

El láser mide datos a partir de la reflexión de un haz láser en una superficie. Sin embargo, ciertas superficies reflexivas causan problemas. Por este motivo habrá que realizar medidas del láser funcionando en la superficie del tubo y ver si mide bien. En caso contrario se probará si variando el modo de trabajo del láser funciona mejor.

14.4.Finales de carrera

Como se comentó previamente, los finales de carrera han de colocarse justo antes de los límites mecánicos de la tijera para garantizar la seguridad del dispositivo. Por este motivo es necesario anclarlos a la estructura durante el funcionamiento de la tijera. De esta manera podemos asegurar que el robot detectará el choque en esas posiciones y el funcionamiento será el correcto.

15. CONCLUSIONES

Una vez finalizado y probado el robot se han obtenido las siguientes conclusiones:

El mecanismo principal de tijera permite una forma sencilla y eficiente de lograr el contacto y agarre entre el robot y el tubo.

Se ha logrado un diseño más compacto y con menor número de piezas que su predecesor.

El mecanismo de tijera es bastante compacto para el movimiento del tubo, además simplemente con aumentar la longitud de los brazos se consigue aumentar los diámetros de tubo a alcanzar.

El principal problema del mecanismo es mantener el contacto permanente de todas las ruedas en especial la rueda motriz, debido a su escasa longitud de brazos, y por tanto poca longitud de recorrido del muelle.

La incorporación de ruedas motrices permite mayores posibilidades de movimiento, quedaría pendiente estudiar con mayor detalle que posiciones y número de motores es el más óptimo para conseguir el mejor movimiento posible.

La medición de ángulos con el método inercial es eficiente, pero sería recomendable usarla solo para eso y optimizar el método de medición láser para incorporar un pan and tilt y así poder extender la capacidad de medida y el número de datos.

Los motorreductores fallan a menudo de manera que es aconsejable encontrar unos que puedan garantizar un mejor uso. Y puedan permitir realizar pruebas con mayor facilidad y sin interrupciones continuas.

Sería necesario estudiar mejor la forma de programar los dos módulos con el objetivo de complementar mucho mejor el trabajo entre ambos.

El funcionamiento de este robot es bueno sin embargo si se quiere estudiar mejor el sistema habrá que observarlo en tubos más grandes para facilitar la incorporación de variedad de materiales y de sistemas de medición.

16. DESARROLLOS FUTUROS

Para la mejora del prototipo existen muchas alternativas:

En primer lugar, la incorporación de un pan and tilt permitiría registrar muchos puntos del tubo, generando así un mapa completo de todo el tubo al paso del robot por el trayecto. Esto permitiría mapear el tubo por completo, obstáculos, distancias...

Otro gran reto sería mejorar la sensorización. Para empezar, incorporar un sensor de distancia sencillo ayudaría a distinguir que diámetro tiene el tubo durante el funcionamiento del robot permitiendo la prevención de los valores a ajustar del diámetro en el funcionamiento. Mejorar la compresión del sistema de suspensión sería interesante, por ello incorporar un sensor de presión ejercida o fuerza aplicada para detectar en qué estado de trabajo está el muelle sería muy útil para calibrar y mejorar el funcionamiento. Otra alternativa sería incorporar un sistema de medición de distancia extendida en el interior del brazo (LVDT o similar). Dado que los muelles empleados son lineales esta medida nos daría la misma información que el sensor de presión para los muelles.

Sería muy interesante optimizar el sistema de control, el Arduino funciona, pero sustituir todo por un microcontrolador básico para las funciones a realizar sería mucho más eficiente. Permitiría el uso de unas placas de control mucho más pequeñas, se podría optimizar el código programando el sistema a bajo nivel. Esto lo haría mucho más eficiente y algo más cercano a un sistema mucho más robusto.

Un aspecto importante de cara a la mejora de la vida de los motores DC implicaría el uso inteligente del motor. Significaría usar menor o mayor par dependiendo de las condiciones del tubo. Un ejemplo claro sería un tramo de tubo en descenso, en esta situación el robot necesita menos fuerza para moverse con lo cual podemos incrementar la velocidad. Esto se conseguiría usando los ángulos de inclinación y ensayando valores de PWM que garanticen par suficiente a máxima velocidad.

Otra opción interesante sería lograr una unión mucho más eficiente entre los dos módulos, o lo que sería mejor integrar los dos módulos de manera que se lograsen todas las ventajas consiguiendo un sistema mucho más compacto.

17. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. U. (Fotografía) Óscar Pandiello, “Siete ideas con futuro prometedor,” *El comercio*, 2016. [Online]. Available: <http://www.elcomercio.es/gijon/201610/11/siete-ideas-futuro-prometedor-20161011002054-v.html>. [Accessed: 12-Jul-2017].
- [2] N. S. Roslin, A. Anuar, M. F. A. Jalal, and K. S. M. Sahari, “A review: Hybrid locomotion of in-pipe inspection robot,” in *Procedia Engineering*, 2012, vol. 41, pp. 1456–1462.
- [3] J. M. M. Tur and W. Garthwaite, “Robotic devices for water main in-pipe inspection: A survey,” *J. F. Robot.*, vol. 27, no. 4, pp. 491–508, 2010.
- [4] S. Wakimoto, J. Nakajima, M. Takata, T. Kanda, and K. Suzumori, “A micro snake-like robot for small pipe inspection,” in *MHS 2003 - Proceedings of 2003 International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, 2003, pp. 303–308.
- [5] E. Dertien, S. Stramigioli, and K. Pulles, “Development of an inspection robot for small diameter gas distribution mains,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, pp. 5044–5049.
- [6] P. Li, S. Ma, B. Li, and Y. Wang, “Development of an adaptive mobile robot for in-pipe inspection task,” in *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2007*, 2007, pp. 3622–3627.
- [7] S. G. Roh, S. M. Ryew, J. H. Yang, and H. R. Choi, “Actively Steerable Inpipe Inspection Robots for Underground Urban Gas Pipelines,” in *ICRA*, 2001, pp. 761–766.
- [8] S. G. Roh and H. R. Choi, “Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 21, no. 1, pp. 1–17, 2005.
- [9] Y. Y. Y. Kawaguchi, I. Yoshida, H. Kurumatani, T. Kikuta, “Internal Pipe Inspection Robot.”
- [10] K. Suzumori, T. Miyagawa, M. Kimura, and Y. Hasegawa, “Micro inspection robot for 1-in pipes,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 4, no. 3, pp. 286–292, 1999.
- [11] Y. S. Kwon, E. J. Jung, H. Lim, and B. J. Yi, “Design of a reconfigurable indoor pipeline inspection robot,” in *ICCAS 2007 - International Conference on Control, Automation and Systems*, 2007, pp. 712–716.

- [12] O. Tătar, D. Mândru, and I. Ardelean, “Development of mobile minirobots for in pipe inspection tasks,” *Mechanika*, vol. 68, no. 6, pp. 60–64, 2007.
- [13] J. Lim, H. Park, S. Moon, and B. Kim, “Pneumatic robot based on inchworm motion for small diameter pipe inspection,” in *2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO*, 2008, pp. 330–335.
- [14] J. Y. Choi, H. Lim, and B. J. Yi, “Semi-automatic pipeline inspection robot systems,” in *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, 2006, pp. 2266–2269.
- [15] H. Y. Woongsun Jeon, Jungwan Park, Inho Kim, Yoon-Koo Kang, “Development of high mobility in-pipe inspection robot,” *IEEE*, pp. 479–484, 2011.
- [16] M. Hoshina, T. Mashimo, and S. Toyama, “Development of spherical ultrasonic motor as a camera actuator for pipe inspection robot,” in *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009*, 2009, pp. 2379–2384.
- [17] J. D. G. Alexandra Borja Gonzalo, José Manuel Sierra Velasco, “DESARROLLO DE KOALABOT MINI PARA TRABAJO COLABORATIVO CON CAPACIDAD DE COMUNICACIÓN VÍA BLUETOOTH,” University of Oviedo, 2015.
- [18] Á. N. González, “Síntesis dimensional de manipulador RRRRR,” *Apunt. Ing. Mecatrónica*, 2015.
- [19] J. E. Shigley, C. R. Mischke, and R. G. Budynas, *Mechanical Engineering Design*, vol. New York,. 2002.
- [20] “Husillo de rosca trapezoidal Motedis.es.” [Online]. Available: <http://www.motedis.es/shop/Dinamica-Unidad-lineal/Husillo-trapezoidal-accesorios/Husillo-Trapezoidal/Acero-Husillo-de-rosca-trapezoidal/Husillo-de-rosca-trapezoidal-RPTS-derecha-TR-8x15-L%3D500mm::999993952.html>. [Accessed: 04-Jul-2017].
- [21] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, “Understanding the NEMA motor-generator standards of section,” in *Petroleum and Chemical Industry Conference.*, 1997, pp. 225–238.
- [22] Pololu, “Pololu - Sanyo Pancake Stepper Motor: Bipolar, 200 Steps/Rev, 42×18.6mm, 5.4V, 1 A/Phase.” [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/2296>. [Accessed: 01-Jul-2017].
- [23] Pololu, “Pololu - 63:1 Metal Gearmotor 20Dx43L mm 6V with Extended Motor Shaft.”

- [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/3464/pictures>. [Accessed: 01-Jul-2017].
- [24] STMicroelectronics, “L298 DUAL FULL-BRIDGE DRIVER,” 2000.
- [25] Pololu, “Pololu - Stepper Motor with 18cm Lead Screw: Bipolar, 200 Steps/Rev, 42×38mm, 2.8V, 1.7 A/Phase.” [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/2689/pictures>. [Accessed: 01-Jul-2017].
- [26] Pololu, “Pololu - DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier, High Current.” [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/2133/specs>. [Accessed: 01-Jul-2017].
- [27] Wikipedia, “Cámara PTZ - Wikipedia, la enciclopedia libre.” [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Cámara_PTZ. [Accessed: 01-Jul-2017].
- [28] C. S. Antonio Lamas, Carla Martínez, Grant McConnachie, Michael Neilson, “REVISING AND IMPROVING A PROTOTYPE ROBOT FOR INTERNAL PIPELINE NAVIGATION,” University of Strathclyde, University of Oviedo, 2017.
- [29] M. a Pérez, J. C. Álvarez, J. C. Campo, F. J. Ferrero, and G. Grillo, “Instrumentación electrónica,” *Instrumentación Electron.*, pp. 387–430, 2004.
- [30] Wikipedia, “LIDAR.” [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/LIDAR>. [Accessed: 01-Jul-2017].
- [31] Sparkfun., “LIDAR-Lite v3 - SEN-14032 - SparkFun Electronics.” [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/14032>. [Accessed: 01-Jul-2017].
- [32] Adafruit, “Overview | Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor | Adafruit Learning System.” [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor?view=all>. [Accessed: 01-Jul-2017].
- [33] Pololu, “Pololu - Magnetic Encoder Pair Kit for 20D mm Metal Gearmotors, 20 CPR, 2.7-18V.” [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/3499>. [Accessed: 01-Jul-2017].
- [34] AliExpress, “Aliexpress.com: Comprar Memoria TF tarjeta Micro SD protector del módulo SPI Micro SD adaptador para Arduino de sd card memory stick adapter fiable proveedores en Fashionable Dress Up.” [Online]. Available: <https://es.aliexpress.com/store/product/Micro-SD-TF-Card-Memory-Shield-Module-SPI-Micro-SD-Adapter-For->

Arduino/1831209_32430016094.html?ws_ab_test=201407_4,201444_5,201409_1.

[Accessed: 01-Jul-2017].

- [35] Arduino, “Arduino Mega.” [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>. [Accessed: 01-Jul-2017].
- [36] Arduino, “PWM.” [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>. [Accessed: 02-Jul-2017].
- [37] Dynapar, “Quadrature Encoder - Dynapar.” [Online]. Available: http://www.dynapar.com/Technology/Encoder_Basics/Quadrature_Encoder/. [Accessed: 02-Jul-2017].
- [38] IPC, “IPC-2221 Generic Standard on Printed Board Design,” *Packag. Bost. Mass*, pp. 1–123, 1998.
- [39] PRJC, “Encoder Library, for Measuring Quadrature Encoded Position or Rotation Signals.” [Online]. Available: https://www.pjrc.com/teensy/td_libs_Encoder.html. [Accessed: 05-Jul-2017].