



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

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ROBOT PARA LA NAVEGACIÓN EN ESTRUCTURAS DE  
CELOSÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

GABRIEL FRANCISCO GÓMEZ-LOBO CAMACHO

PROFESOR GUÍA:  
JUAN ZAGAL MONTEALEGRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA  
VIVIANA MERUANE NARANJO

SANTIAGO DE CHILE  
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: GABRIEL FRANCISCO GÓMEZ-LOBO CAMACHO  
FECHA: 2019  
PROF. GUÍA: JUAN ZAGAL MONTEALEGRE

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ROBOT PARA LA NAVEGACIÓN EN ESTRUCTURAS DE CELOSÍA

El sistema de ferrocarriles nacional es de vital importancia para el transporte de productos mineros, agrícolas e incluso para el manejo de residuos. En la actualidad, todos los países desarrollados y muchos en vía de desarrollo cuentan con redes de vías ferroviarias. Para mantener estas vías en buen estado su regular monitoreo y mantenimiento es clave. Lo que a su vez es muy importante para mantener una buena calidad del servicio, la seguridad y la optimización de costos de operación y reposición de estructura.

La prevención es clave y para eso la inspección de los puentes juega un rol vital que permite identificar el grado de deterioro y planificar el mantenimiento para la rehabilitación de puentes de forma eficiente. En Chile, las inspecciones de puentes ferroviarios es realizada en su mayoría de manera manual, utilizando principalmente métodos de inspección visual. Los drones son buenas herramientas para una inspección superficial de la estructura. Sin embargo, si se desea inspeccionar en detalle las estructuras internas como los enrejados y celosías del puente no es posible acceder a esas zonas con estos tipos de dispositivos.

De aquí surge la motivación para el desarrollo de un dispositivo robotizado capaz de movilizarse entre las estructuras metálicas presentes en los puentes ferroviarios de manera tal que este se pueda desplegar sobre una viga y navegarla superando ciertos obstáculos comunes, por ejemplo, refuerzos de la estructura metálica.

El presente trabajo de título consiste en el diseño y fabricación de un robot para la navegación en estructuras de celosía. Esto es, las geometrías de enrejados de los puentes incluyendo barras metálicas y vigas estructurales. Para esto se crea un montaje experimental que simula una situación de terreno común como son las vigas con atezadores verticales. Se crean distintos prototipos funcionales por medio de una metodología iterativa que son capaces de navegar una estructura metálica sin obstáculos para luego desarrollarlos agregándoles la capacidad de superar el obstáculo propuesto. También se implementa un sistema de control a distancia utilizando tecnología de transmisión WiFi y se realizan pruebas en terreno en el puente ferroviario Aconcagua para caracterizar el desempeño del robot.

Para el diseño se utiliza CAD y para la fabricación de las piezas se utiliza impresión 3D, incorporando una metodología iterativa con retroalimentación entre diseño y fabricación. El sistema de control se lleva al cabo por medio de una estrategia de control de lazo abierto implementada en un microcontrolador comercial.

El alcance no incorpora la implementación de un sistema de inspección, sin embargo se realizan pruebas que caracterizan la capacidad de carga en el robot manteniendo su adhesión a la estructura. Tanto las pruebas en laboratorio como las realizadas en terreno otorgan resultados prometedores comprobando el potencial de la implementación de un sistema de inspección robotizado.



*A mis padres Andrés y Gladys.*



# Agradecimientos

A los profesores de la comisión y de la facultad, gracias por formarme y darme las herramientas necesarias para ser un buen ingeniero. Gracias por sus consejos y críticas constructivas que me sirvieron para guiar y desarrollar este trabajo.

A mis padres Andrés y Gladys, gracias por los valores que me inculcaron, por todas sus enseñanzas y por haberme apoyado incondicionalmente durante toda esta travesía. Al Dani, por esa energía positiva que transmites y por ser un hermano bien chido. A Isa por ser tan amorosa, apañadora y por esa complicidad que compartimos. Y al Mailo ♥.

A mi Trini, mi leal compañera que me apaña a todas. Gracias por todas las risas y lindos momentos que hemos tenido, porque cada segundo contigo vale todo. Por ser tan amable y por ayudarme siempre que te necesito.

A los cabros de robótica, que gracias a ustedes se pasó bacán trabajando en el laboratorio. En especial a Harold por su gran disposición a ayudar, infinita paciencia y por todas las cosas que me enseñaste.

Al equipo LLUEHHHB; Diego, Tomy, y Pelao. Agradezco haberlos conocido durante la especialidad y que hayamos formado un equipo hasta el final. Los mejores trabajos salieron con ustedes ya que nunca faltaron las risas.

A los mecanicabros; Carlitos, Pancho, Yanara, Jaime, Camilo, Grace, Paski, Noe, Nico, Michele, Fredes, Seba y Chopan. Gracias por todas las experiencias que hemos compartido y hayan por venir.

A mis amigos de plan común, Cristian, Pancho, Sergio y Orpis. Gracias por todos esos ratos que nos apañamos estudiando en la biblioteca y por los épicos carretes que hemos tenido.

A los miseria; Negro, Nixo, Charly, Lito, Ramonciwi, Coloro, Seba, Ilitian, Chino. No podría desear por un mejor grupo! Son todos unos cracks! Muchas gracias por todos esos momentos que hemos vivido y por todos los que han por venir!



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	6
1.2.1. Objetivo general . . . . .	6
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	6
1.3. Alcances . . . . .	6
<b>2. Antecedentes</b>	<b>7</b>
2.1. Locomoción . . . . .	7
2.1.1. Locomoción con piernas . . . . .	7
2.1.2. Locomoción por ruedas . . . . .	8
2.1.3. Locomoción guiada . . . . .	9
2.2. Adhesión entre el robot y estructuras . . . . .	9
2.2.1. Adhesión magnética . . . . .	9
2.2.2. Adhesión por mecanismos de agarre . . . . .	11
2.3. Robots modulares . . . . .	13
2.4. Actuadores y sistema de control . . . . .	13
2.4.1. Actuadores . . . . .	13
2.4.2. Control de Sistemas . . . . .	15
2.5. Métodos de inspección en puentes . . . . .	16
2.5.1. Análisis por vibraciones . . . . .	16
2.5.2. Análisis visual . . . . .	17
<b>3. Metodología</b>	<b>18</b>
3.1. Diseño y fabricación . . . . .	18
3.1.1. Validación de la idea . . . . .	18
3.1.2. Diseño del Robot . . . . .	19
3.2. Desarrollo del sistema de control . . . . .	20
3.3. Pruebas y caracterización . . . . .	21
3.3.1. Pruebas experimentales . . . . .	22
3.3.2. Pruebas en terreno . . . . .	23
<b>4. Diseño, fabricación y caracterización</b>	<b>24</b>
4.1. Diseño . . . . .	24
4.1.1. Aproximación al problema y primeros diseños . . . . .	24
4.1.2. Diseño del prototipo final . . . . .	27

4.2.	Fabricación . . . . .	29
4.2.1.	Fabricación de un banco de pruebas . . . . .	29
4.2.2.	Fabricación del robot y sus componentes . . . . .	32
<b>5.</b>	<b>Diseño y programación de software</b>	<b>39</b>
5.1.	Estrategia de control . . . . .	39
5.2.	Diseño del circuito eléctrico . . . . .	40
5.2.1.	Comunicación entre controladores . . . . .	40
5.2.2.	Circuitos finales . . . . .	41
5.3.	Programación . . . . .	43
5.3.1.	Código del control a distancia . . . . .	43
5.3.2.	Código de control del robot. . . . .	43
<b>6.</b>	<b>Resultados de fabricación, ensayos y discusión</b>	<b>45</b>
6.1.	Resultados de fabricación . . . . .	45
6.1.1.	Validación de la idea . . . . .	45
6.1.2.	Resultado final de la fabricación del prototipo final . . . . .	46
6.2.	Análisis estático y dinámico de fuerzas de adhesión . . . . .	48
6.2.1.	Análisis estático de fuerzas . . . . .	48
6.2.2.	Análisis dinámico de fuerzas . . . . .	51
6.2.3.	Requerimientos del mecanismo de adhesión y locomoción . . . . .	51
6.3.	Pruebas experimentales . . . . .	53
6.3.1.	Pruebas de locomoción y adhesión . . . . .	53
6.3.2.	Pruebas con obstáculos . . . . .	55
6.3.3.	Carga máxima . . . . .	56
6.3.4.	Consumo eléctrico y vida de la batería . . . . .	59
6.4.	Pruebas en terreno . . . . .	62
	<b>Conclusión</b>	<b>68</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>72</b>
	<b>Anexos</b>	<b>74</b>
	<b>A. Planos de fabricación</b>	<b>75</b>
	<b>B. Diagramas esquemáticos del circuito</b>	<b>84</b>
	<b>C. Códigos del controlador</b>	<b>86</b>

# Índice de Tablas

2.1.	Lista de robots trepadores con sus aplicaciones, métodos de locomoción y de adhesión.[1]	12
4.1.	Características del servomotor MG996R seleccionado. . . . .	29
4.2.	Características relevantes del montaje experimental. . . . .	31
5.1.	Características relevantes del módulo WiFi NRF24L01.[2] . . . . .	40
5.2.	Distribución de los pins del módulo NRF24L01 al microcontrolador Arduino Nano.	41
6.1.	Dimensiones de un sistema de orugas ensamblado. . . . .	47
6.2.	Dimensiones de ambos sistemas de orugas armados. . . . .	47
6.3.	Dimensiones del control remoto fabricado. . . . .	47
6.4.	Pesos relevantes de distintos elementos incluidos para la fabricación del robot. . . .	47
6.5.	Valores de parámetros para ecuaciones planteadas. . . . .	52
6.6.	Desempeño del robot desplazándose con peso. . . . .	59
6.7.	Consumos nominales en [mA] de los actuadores del robot. . . . .	60
6.8.	Características de navegación del prototipo final fabricado. . . . .	68

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Vista general del Puente Aconcagua. Es posible apreciar distintas configuraciones en sus estructuras a lo largo del puente. . . . .	2
1.2.	Elementos importantes de la estructura del puente ferroviario. . . . .	2
1.3.	(a) Contraventaciones existentes en la configuración sur del puente. (b) Componentes de la viga del sector sur. . . . .	3
1.4.	Existen diversos tipos de cepa que dan sustento a la estructura. . . . .	4
1.5.	(a) Distancia típica del dron respecto a la estructura durante la inspección. (b) Distancia del dron mientras se emprende su vuelo bajo un vano. . . . .	4
1.6.	Vista lograda por dron volando bajo uno de los vanos. . . . .	5
2.1.	(a) Robot bípedo RAMR I[3] puesto en marcha en (b) y robot de 6 patas REST 1[4].	8
2.2.	(a) Robot Alicia 2[5] con ruedas en cada lado el cual utiliza un mecanismo de adhesión con ventosas de succión y (b) robot de tres ruedas diseñado con imanes permanentes[6] . . . . .	8
2.3.	Robots con guías de movimiento. (a) Robot Cleanbot II [7] con guía como estructura externa. (b) Robot TRIPILLAR con guía incluida en estructura del robot. (c) Transición de movimiento del robot TRIPILLAR en superficies planas horizontales y verticales. . . . .	9
2.4.	Diagrama con parámetros de un imán cilíndrico con polo norte N y polo sur S. . . . .	11
2.5.	Robot ROMA I con sistema de sujeción de agarre[8]. . . . .	11
2.6.	Robot modular reconfigurable M-TRAN III [9]. . . . .	13
2.7.	Componentes principales de un servomotor común. . . . .	14
2.8.	Diagrama de bloques de control en lazo abierto [10]. . . . .	15
2.9.	Diagrama de bloques de control en lazo cerrado [10]. . . . .	15
2.10.	(a) Detector y (b) acelerómetros de equipo para inspección por vibraciones. [11] . . . . .	16
3.1.	Diagrama de flujo de la metodología de trabajo adoptada. . . . .	19
3.2.	Diagrama de flujo de metodología implementada para el desarrollo del sistema de control. . . . .	21
3.3.	Diagrama de flujo de metodología en la validación del diseño del robot. . . . .	22
3.4.	Herramienta <i>Grip N' Grab</i> utilizada para desplegar en robot en áreas difíciles de alcanzar manualmente. . . . .	23
4.1.	Viga H con refuerzo vertical, situación común en puentes ferroviarios. . . . .	24
4.2.	Primer concepto de diseño de robot modular(a) junto con esquema de funcionamiento(b). . . . .	25
4.3.	Representación del funcionamiento para el primer prototipo. . . . .	26

4.4.	Primer prototipo funcional fabricado. . . . .	26
4.5.	Diseño conceptual del prototipo final renderizado en CAD.(a) Vista isométrica. (b) Vista posterior. . . . .	27
4.6.	Representación del robot moviéndose a través de la viga. . . . .	28
4.7.	Diseño de la estructura sobre la que se montará la viga con refuerzo, con sus medidas en [mm]. . . . .	29
4.8.	Viga con refuerzo soldado en T . . . . .	30
4.9.	Montaje experimental final fabricado. Cuenta con soportes en sus cuatro patas para asegurar su estabilidad. . . . .	31
4.10.	Impresión de cadenas del robot. Tiempo real de impresión: 26 [Hrs] . . . . .	32
4.11.	Cadena con imanes impresa en 3D y ensamblada. . . . .	33
4.12.	Bastidor del robot. Cada subsistema cuenta con un sistema interno diferente. . . . .	34
4.13.	Acople deslizante entre subsistemas. Para bloquear el deslizamiento se giran los tornillos provocando un aumento del roce en el sistema. . . . .	34
4.14.	Engranajes fabricados para la la movilización de las cadenas.(a) Engrane motor, (b) Acople metálico circular para fijar el engrane al motor y (c) Engrane con rodamiento. . . . .	35
4.15.	Ejemplo de impresiones iterativas para ajustar tolerancias. Se imprimen piezas con hoyos hexagonales de (a) 6.1 [mm], (b) 6.2 [mm], (c) 6.3 [mm] y (d) 6.4 [mm]. . . . .	36
4.16.	Cada subsistema del robot cuenta con una estructura de acople al bastidor. . . . .	37
4.17.	Resultado de fabricación del sistema de control. . . . .	37
4.18.	Control remoto fabricado con sus componentes señalizados. . . . .	38
5.1.	Diagrama de bloques para manejar por control remoto el robot. (a) Emisor y (b)Receptor. . . . .	39
5.2.	Esquema del circuito eléctrico para establecer comunicación entre módulos WiFi. . . . .	41
5.3.	Esquema del circuito eléctrico para el sistema de control a distancia. . . . .	42
5.4.	Esquema del circuito eléctrico para el sistema de control instalado en el robot. . . . .	42
6.1.	Pruebas de adhesión de los imanes para validar la idea. (a) Prototipo adherido a superficie de manera vertical y (b) Prototipo adherido de manera horizontal. . . . .	45
6.2.	Resultado de fabricación del robot y el control remoto. . . . .	46
6.3.	Diagramas de cuerpo libre mostrando las fuerzas de adhesión magnética, las fuerzas normal, gravedad y de fricción. $F_{m_i}$ , $N_i$ , $G$ , $F_f$ respectivamente. . . . .	48
6.4.	Diagramas de cuerpo libre para casos estáticos y dinámicos del robot. $M_b$ es el torque de frenado de la transmisión del motor y $M_d$ el torque para movilizar al robot otorgado por el motor. . . . .	50
6.5.	Configuraciones de las cadenas probadas. . . . .	53
6.6.	Tensor fabricado para solucionar los problemas de pérdida de adhesión. . . . .	55
6.7.	Representación de como se puso la placa bajo el montaje experimental simulando un obstáculo de refuerzo inferior . . . . .	56
6.8.	Esquema representando como se montó el peso para las pruebas del robot cargado. . . . .	56
6.9.	Robot colgando de la viga de manera crítica. Puede moverse cortas distancias antes de caer. . . . .	57
6.10.	El voltaje es medido en paralelo a la resistencia para obtener la corriente que pasa por el circuito en serie. . . . .	61
6.11.	Datos extraídos del osciloscopio. Se observan los voltajes de consumo en <i>standby</i> , al momento de gatillar el movimiento y cuando el movimiento de los actuadores es continuo. . . . .	61

6.12. Puente Aconcagua con distintas de sus geometrías señaladas. En rojo se indican los tipos de estructuras por los que se probó el funcionamiento del robot. . . . .	63
6.13. Transición de movimiento del robot a través de una viga ferroviaria de 50[mm] de espesor. . . . .	63
6.14. Transición de movimiento del robot cargando una cámara GoPro para la toma de datos. . . . .	64
6.15. Imagen tomada desde cámara GoPro. Se puede observar una gran porción del alma de la viga. . . . .	64
6.16. Transición de movimiento del robot sobre superficie horizontal de un enrejado interior del puente. Las barras metálicas tienen un grosor de 12.5[mm]. . . . .	65
6.17. Transición de movimiento del robot sobre superficie inclinada de un enrejado interior del puente. Las barras metálicas tienen un grosor de 10[mm]. . . . .	65
6.18. Transición de movimiento del robot sobre superficie vertical en cepas del puente. El grosor de las barras es de 10[mm]. . . . .	66
6.19. Operario manejando el robot a distancia. Aproximadamente a unos 35 [m] del dispositivo. . . . .	66
6.20. Metodología de despliegue y retiro del robot para estructuras difíciles de alcanzar. .	67
A.1. Dimensiones de los eslabones de las cadenas. Medidas en [mm]. . . . .	76
A.2. Dimensiones bastidor guía del motor. Medidas en [mm]. . . . .	77
A.3. Dimensiones bastidor tapa del motor. Medidas en [mm]. . . . .	78
A.4. Dimensiones engrane acoplado al servomotor. Medidas en [mm]. . . . .	79
A.5. Dimensiones engrane acoplado al servomotor. Medidas en [mm]. . . . .	80
A.6. Dimensiones para el sistema tensor de las cadenas. Medidas en [mm]. . . . .	81
A.7. Dimensiones para el sistema de acople entre bastidores macho-hembra. Medidas en [mm]. . . . .	82
A.8. Dimensiones para el control remoto fabricado. Medidas en [mm]. . . . .	83
B.1. Diagrama esquemático del circuito para el control remoto. . . . .	84
B.2. Diagrama esquemático del circuito integrado dentro del robot. . . . .	85

# Capítulo 1

## Introducción

La detección de fallas en puentes y distintas estructuras ingenieriles mediante inspecciones ya sean visuales, por vibraciones u otros métodos son principalmente llevadas a cabo de forma manual de manera costosa, poco eficiente y poniendo en riesgo la integridad de la persona que las realiza. Por estas razones surge la motivación de la invención de unidades robotizadas capaces de realizar estas tareas de manera precisa y segura.

Enmarcado en el contexto de un proyecto FONDEF para la inspección de fallas en puentes, el presente trabajo de título tiene como objetivo general el diseño y fabricación del prototipo de un robot capaz de moverse a través de estructuras metálicas como las vigas de los puentes. El trabajo realizado trata del diseño y fabricación de un robot para navegar las estructuras de celosías de puentes ferroviarios, las cuales son de acero y por lo tanto de un material ferromagnético. Con esto dicho, se tienen como objetivos específicos que el robot sea capaz de sostenerse sobre superficies metálicas y sea capaz de desplazarse a través de una estructura tipo viga pudiendo superar obstáculos como un refuerzo atezador de viga, implementar un sistema de control a distancia y realizar pruebas en el laboratorio y en terreno.

La metodología del trabajo incluye la implementación de un montaje experimental con condiciones similares a las presentes en terreno para los ensayos, el uso de software CAD para el diseño, impresión 3D para la fabricación de prototipos y microcontroladores comerciales para el control.

## 1.1. Motivación

Detectar fallas en estructuras ferroviarias es crítico para su proceso de mantención y para asegurar la seguridad de los usuarios. Por lo general las inspecciones se suelen realizar por personas capacitadas, sin embargo, esto no deja de ser una tarea riesgosa que pone en peligro la integridad de quienes la realizan.



Figura 1.1: Vista general del Puente Aconcagua. Es posible apreciar distintas configuraciones en sus estructuras a lo largo del puente.

A nivel nacional, la Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE) debe coordinar y realizar inspecciones y mantenimiento a un gran número de puentes ferroviarios. Para esto se hace uso principalmente de inspecciones visuales por medio de cámaras, mientras que el uso de drones es una herramienta que se está comenzando a utilizar.

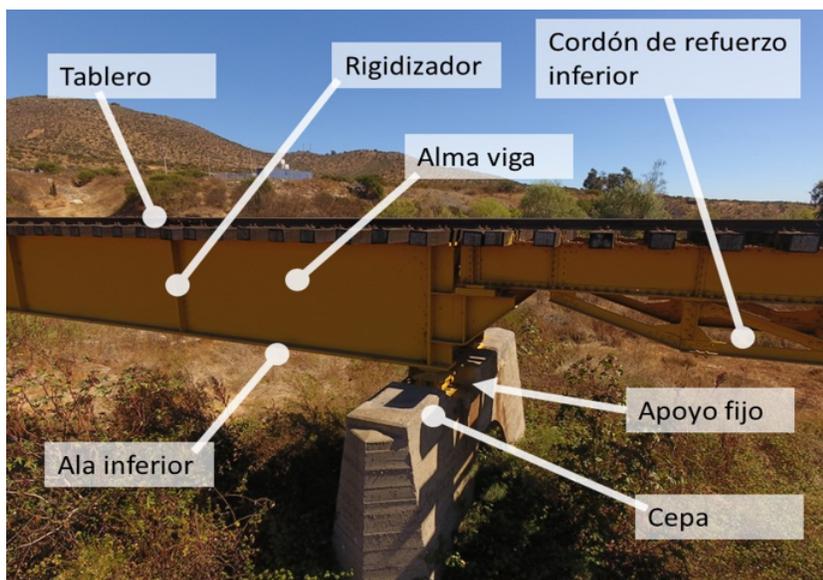


Figura 1.2: Elementos importantes de la estructura del puente ferroviario.

Para familiarizarse tanto con el proceso de inspección, como con las diferentes configuraciones de las estructuras de puentes ferroviarios, se realizó una visita al Puente Aconcagua con miembros de EFE y un equipo del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la FCFM. Tal puente cuenta con diversas configuraciones a lo largo de su estructura, tal como se observa en las Figuras 1.1, 1.2 y 1.3.

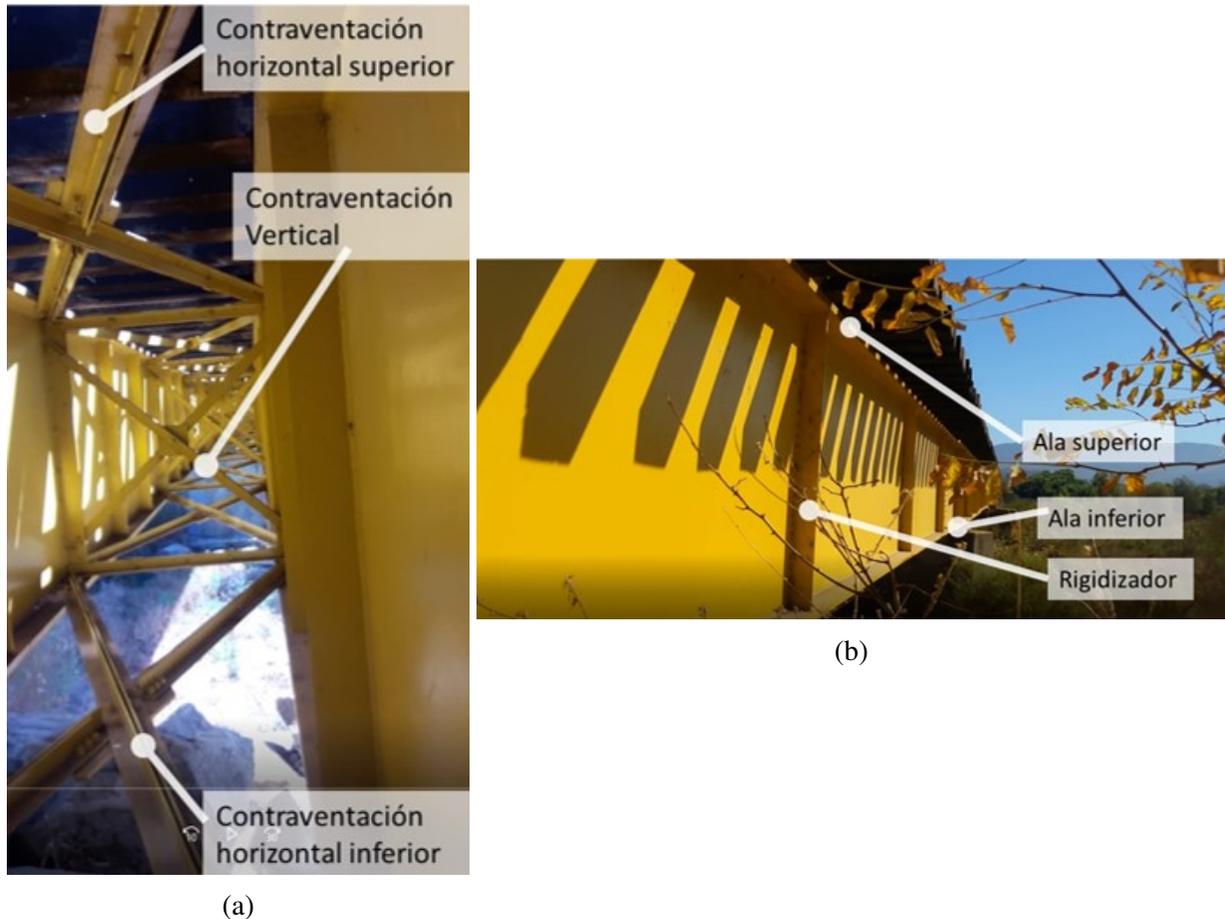


Figura 1.3: (a) Contraventaciones existentes en la configuración sur del puente. (b) Componentes de la viga del sector sur.

En particular, estructuras como las que se muestran en la Figura 1.3 no son de fácil acceso para los inspectores, ya que el alcance a estas es limitado. Tal problemática motiva la idea de la creación de un dispositivo robótico que se despliegue en este tipo de estructuras y sea capaz de navegarlas realizando algún tipo de inspección.

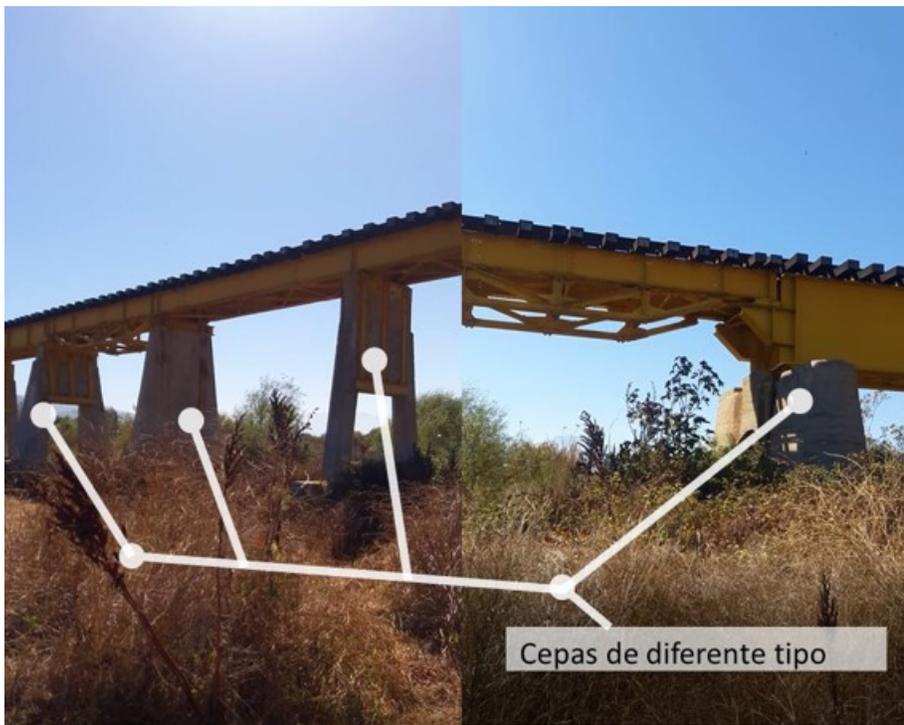


Figura 1.4: Existen diversos tipos de cepa que dan sustento a la estructura.

Las cepas del puente (ver Figura 1.4) también presentan estructuras metálicas cuyo acceso resulta también complicado. Estas estructuras comparten similitudes con las de la Figura 1.3 en los grosores de las vigas metálicas que las componen, por lo que el dispositivo también sería compatible para su inspección.

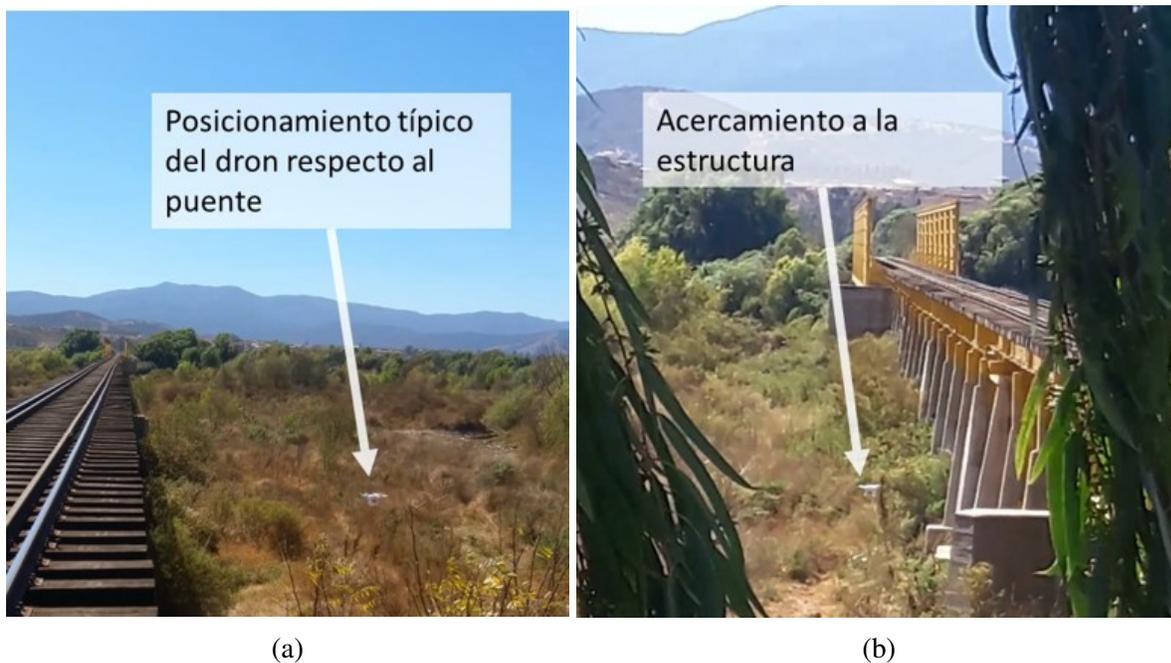


Figura 1.5: (a) Distancia típica del dron respecto a la estructura durante la inspección. (b) Distancia del dron mientras se emprende su vuelo bajo un vano.

Si bien los drones son una herramienta que se utiliza cada vez más en la inspección de obras civiles [12], estos tienen ciertas limitantes respecto de la distancia a la cual se pueden acercar a estas estructuras como se observa en la Figura 1.5. Debido a que el sistema de localización del dron no le permite acercarse demasiado a la estructura ferroviaria este solo es capaz de tomar fotografías en las que se pueden apreciar los aspectos más notorios del puente, por lo que buscar grietas o pequeñas deformaciones queda fuera de sus capacidades.



Figura 1.6: Vista lograda por dron volando bajo uno de los vanos.

Así surge la motivación de diseñar y fabricar un prototipo funcional de robot para navegar las estructuras de las celosías de los puentes ferroviarios que, eventualmente, tenga el potencial de ayudar a los operarios en terreno desligándolos de cualquier riesgo y optimizando su productividad. Esto se puede llevar a cabo con la implementación de un dispositivo de inspección que una vez desplegado el operador pueda controlarlo de manera remota.

## **1.2. Objetivos**

Los objetivos propuestos para la realización del trabajo de título son los siguientes:

### **1.2.1. Objetivo general**

Diseñar y fabricar un robot capaz de desplazarse a través de estructuras metálicas de celosías manteniendo su adhesión.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Para lograr el objetivo general, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Implementar montaje experimental de viga H con refuerzo.
- Diseñar y construir un prototipo inicial que permita navegar la viga sin obstáculo para agregarle la capacidad de pasar un obstáculo de refuerzo manteniendo su adherencia a la viga.
- Incorporar un sistema de control a distancia.
- Realizar pruebas en laboratorio y caracterizar el desempeño del sistema.
- Realizar pruebas y validación de datos en terreno.

## **1.3. Alcances**

Los alcances del presente trabajo contemplan el desarrollo de un prototipo funcional que cumpla con los objetivos de trabajo. Es decir, se debe de implementar un sistema de control a distancia para hacer efectiva su operación. Más, este prototipo tendría el potencial de seguir siendo desarrollado hasta lograr un prototipo final implementable en la inspección de puentes ferroviarios.

Además, si bien el objetivo de este robot viene dado por la necesidad de inspección de puentes, no se tiene considerado dentro de los alcances la implementación de un sistema de inspección ya sea visual u por vibraciones para la fabricación del prototipo final. Aunque, a pesar de esto el robot tendrá el eventual potencial de cargar con un sistema de inspección como una cámara para la recopilación de datos.

# Capítulo 2

## Antecedentes

Los principales antecedentes que guían las fases conceptuales del diseño del robot del presente trabajo de título se basan en los mecanismos de locomoción y adhesión que se han usado durante los últimos años para los diseños y fabricación de robots en el mundo[1]. Luego de esto se presentan los antecedentes pertinentes referidos a los elementos que se tienen en consideración para la fabricación de este robot como los actuadores y sobre los métodos de inspección de puentes de manera visual y por vibraciones.

### 2.1. Locomoción

Dependiendo de la función y espacio por el cual el robot necesite movilizarse es que se diseñan e implementan las formas para su desplazamiento. Existen muchos mecanismos de locomoción que se han implementado en distintos robots pero en el presente informe se limitará a describir las más relevantes para el desarrollo de este trabajo de título. Entre ellos se encuentran:

- Locomoción con piernas
- Locomoción por ruedas
- Locomoción guiada

#### 2.1.1. Locomoción con piernas

Si se necesita que el robot sea capaz de escalar una estructura plana o con obstáculos se puede acudir a los mecanismos de locomoción de marcha a pie. Los robots escaladores que usan este mecanismo tienen hasta 8 piernas equipadas ya sea con ventosas de succión, agarres de sujeción o dispositivos magnéticos al final de cada pie[1]. Estas configuraciones pueden lograr una sujeción bastante estable a la superficie y pueden ser capaces de evitar obstáculos. Sin embargo, requieren de un sistema de control complejo ya que necesitan lograr una marcha armónica y además tienen la desventaja de ser lentos debido a su movimiento discontinuo. En la Figura 2.1 a continuación se muestran ejemplos de robots trepadores que usan este mecanismo.

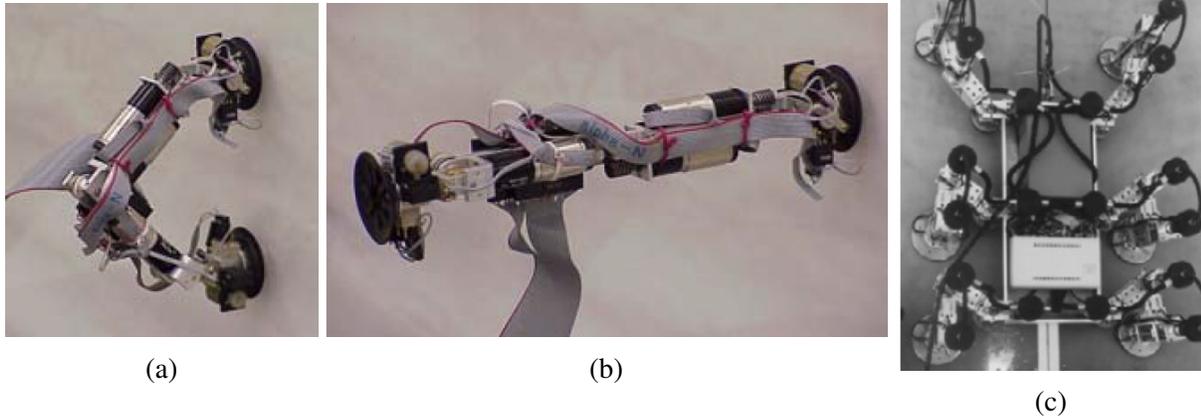


Figura 2.1: (a) Robot bípido RAMR I[3] puesto en marcha en (b) y robot de 6 patas REST 1[4].

### 2.1.2. Locomoción por ruedas

Otro mecanismo relevante a tomar en cuenta es la locomoción por ruedas. Este mecanismo se ha explorado en robots capaces de trepar planos verticales e incluso techos combinando este método de movimiento con métodos de sujeción tales como imanes o ventosas de succión. La gran ventaja de usar ruedas es que se permite que el robot se mueva de manera continua, y por lo tanto pueden lograr velocidades de movimiento considerablemente mayores que los mencionados al comienzo. En la Figura 2.2 se muestran dos robots capaces de adherirse a superficies planas y desplazarse por medio de ruedas.

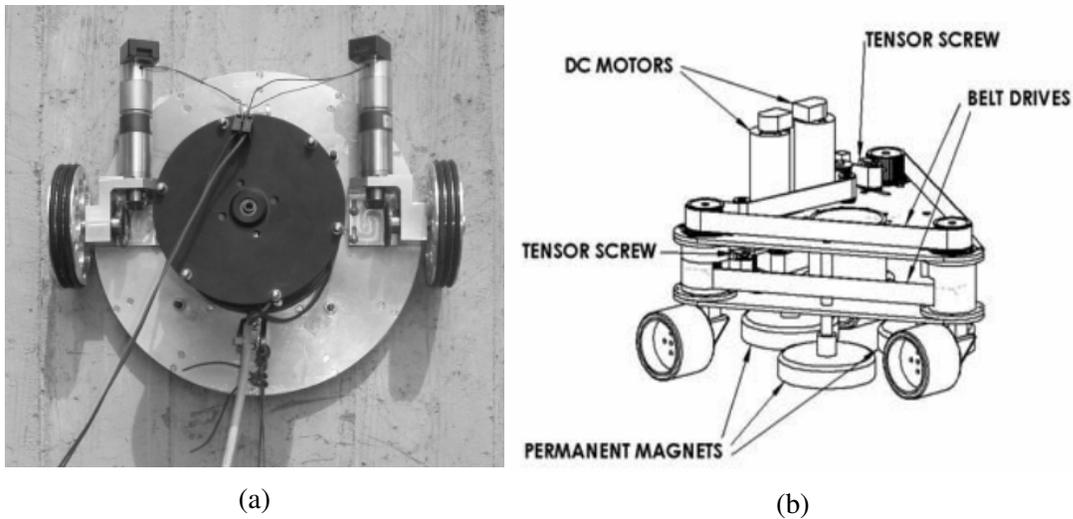


Figura 2.2: (a) Robot Alicia 2[5] con ruedas en cada lado el cual utiliza un mecanismo de adhesión con ventosas de succión y (b) robot de tres ruedas diseñado con imanes permanentes[6]

### 2.1.3. Locomoción guiada

Una tercera forma de locomoción relevante es la locomoción guiada. En la que se incluye una estructura guía en el robot para lograr una mayor estabilidad asegurando una mejor adhesión a la superficie ya que se logra una distribución de la carga del robot mejor. En la Figura 2.3 se observan dos robots que utilizan guías para definir su movimiento y además estabiliza el sistema de adherencia.

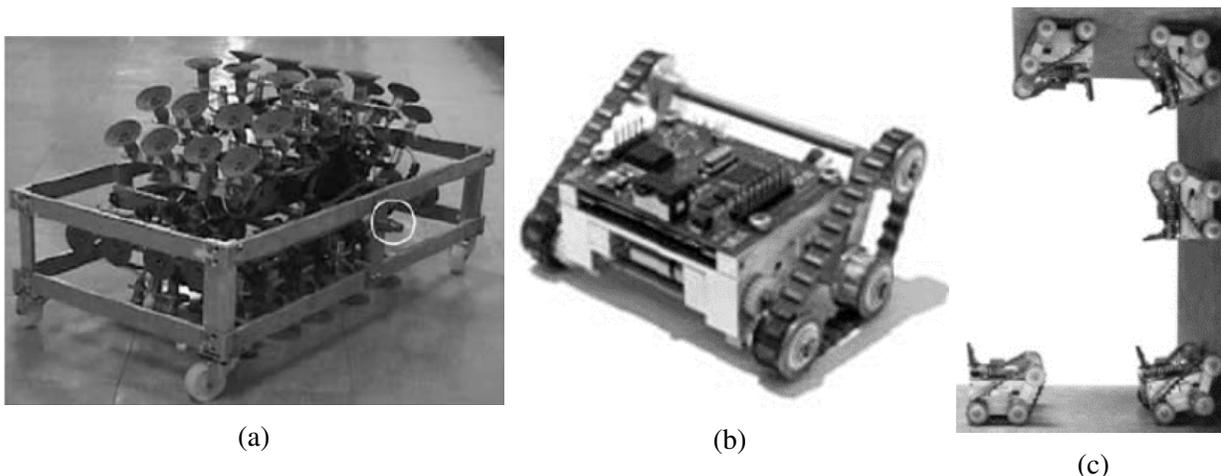


Figura 2.3: Robots con guías de movimiento. (a) Robot Cleanbot II [7] con guía como estructura externa. (b) Robot TRIPILLAR con guía incluida en estructura del robot. (c) Transición de movimiento del robot TRIPILLAR en superficies planas horizontales y verticales.

## 2.2. Adhesión entre el robot y estructuras

Tanto en los avances de robótica como los organismos de la naturaleza existen diversos métodos de adhesión a superficies u objetos. En el caso de robots trepadores el sistema de adhesión es crucial para su desempeño ya que sin este no podrían escalar a las estructuras. En la siguiente sección se presentan los dos mecanismos más relevantes considerados para el desarrollo del robot navegador de celosías.

### 2.2.1. Adhesión magnética

La adhesión magnética es el resultado de de la atracción entre un objeto polarizado (*e.g.* imán) y otro polarizado o capaz de polarizarse (*e.g.* barra de metal). Ambos objetos se sentirán atraídos mientras se encuentren dentro del rango del campo magnético del objeto imantado, el cual depende de los materiales del imán y de sus dimensiones. Además, se pueden distinguir dos tipos de fuerzas magnéticas; la que ocurre sobre un conductor (como lo es una barra de acero ferromagnético) y la que ocurre entre imanes.

Las soluciones que utilizan la adhesión magnética lo pueden hacer de dos formas: magnetización permanente o magnetización eléctrica. Ambos mecanismos permiten adosarse a una superficie ferromagnética y son deseables debido a su alta confiabilidad. Además, gracias a que la adhesión magnética no requiere de tiempo para generar una fuerza de sujeción suficiente (como en la sujeción por ventosas) esta permite una mayor velocidad de locomoción. En el caso de imanes permanentes se tiene la ventaja de no necesitar gastar energía extra en el mecanismo de sujeción. En la Figura 2.3b se puede observar un robot que utiliza varios imanes cilíndricos montados sobre correas, lo cual le permite adherirse y moverse sobre una superficie ferromagnética vertical e incluso un techo.

### Calcular la fuerza de atracción de un imán

La fuerza  $F$  entre dos superficies magnetizadas se puede calcular con la ecuación (2.1),

$$F = \frac{B^2 \cdot A}{2\mu_0} \quad (2.1)$$

donde,

- $B$ : Densidad del flujo magnético, en  $[T]$ .
- $A$ : Área de la superficie, en  $[m^2]$ .
- $\mu_0$ : Permeabilidad del espacio, equivalente a  $4\pi \times 10^{-7} [\frac{T \cdot m}{A}]$ .

mientras que la intensidad del campo magnético  $B$  se tiene la ecuación 2.2, cuyos parámetros se muestran en la Figura 2.4.

$$B = \frac{B_r}{2} \left( \frac{D+z}{\sqrt{R^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right) \quad (2.2)$$

donde,

- $B_r$ : Campo magnético remanente, independiente de la geometría del imán, en  $[T]$ .
- $z$ : Distancia a la superficie polarizada del imán, en  $[m]$ .
- $D$ : Altura o grosor del cilindro, en  $[m]$ .
- $R$ : Radio del cilindro, en  $[m]$ .

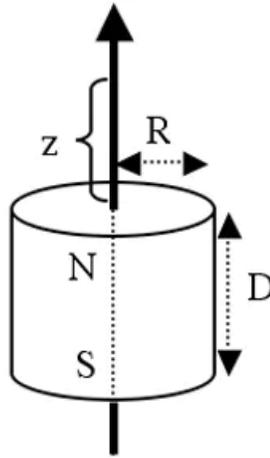


Figura 2.4: Diagrama con parámetros de un imán cilíndrico con polo norte N y polo sur S.

Fuentes: [13],[14].

### 2.2.2. Adhesión por mecanismos de agarre

Los mecanismos de adhesión por agarre son aquellos que utilizan una extremidad diseñada con características de pinza, la cual es especial para agarrarse a ciertas estructuras particulares. Estos mecanismos permiten al robot poder trasladarse a través de ambientes 3D más complejos, a diferencia de otros mecanismos como las ventosas o imanes son usualmente aplicables para superficies planas como muros o techos. Los sistemas de agarre son usualmente acoplados a partes de estructuras como vigas, columnas, tubos y otros, por medio de un cuidadoso control de las fuerzas de agarre. En la Figura 2.5 se observa un ejemplo de un robot trepador llamado ROMA I que tiene un sistema de sujeción en cada extremidad que simula el agarre de una mano para sujetarse de una estructura tipo viga.

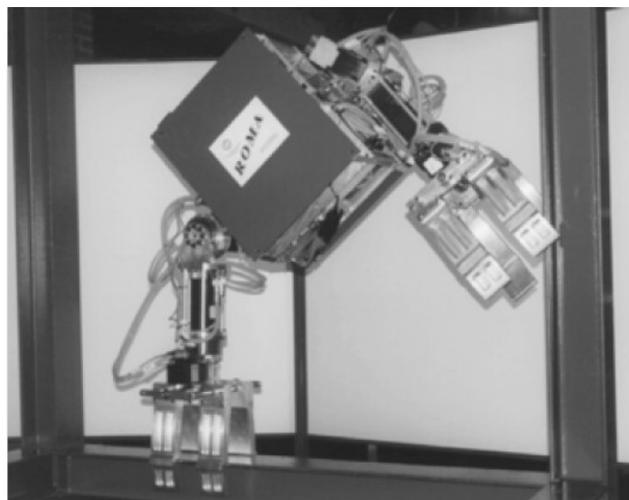


Figura 2.5: Robot ROMA I con sistema de sujeción de agarre[8].

En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de diversos robots trepadores fabricados alrededor del mundo, con sus respectivas aplicaciones, métodos de locomoción y de adhesión.

Tabla 2.1: Lista de robots trepadores con sus aplicaciones, métodos de locomoción y de adhesión.[1]

<b>Campo</b>	<b>Robot</b>	<b>País</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Locomoción</b>	<b>Adhesión</b>
<b>Construcción</b>	ROMA I, II	España	Inspección	Piernas	Agarre
	ROBIN	Estados Unidos	Inspección	Piernas	Succión
	CROMSCI	Alemania	Inspección	Ruedas	Succión
	Alicia 1, 2	Italia	Inspección	Ruedas	Succión
	WallWalker	Japón	Limpieza de Murallas	Ruedas	Succión
	SIRIUSc	Alemania	Limpieza de Murallas	Combinada	Succión
	Sky Cleaner 1, 2, 3	Alemania	Limpieza de Murallas	Traslación	Succión
	TITO	España	Limpieza de Murallas	Cables	Propulsión
	CAFÉ	España	Limpieza de Murallas	Cables	N/A
	NINJA-I, II	Japón	Inspección	Piernas	Succión
	GEKKO III	Alemania	Limpieza de Murallas	Guías	Succión
Exterior Wall Painting Robot	Japón	Pintado	Cables	Rieles	
<b>Infraestructura civil</b>	Bigfoot	Alemania	Diagnóstico	Ruedas	Succión
	SM2	Estados Unidos	Inspección	Piernas	Agarre
	RAMR 1	Estados Unidos	Reconocimiento	Piernas	Succión
	Roboclimber	Italia	Consolidación de murallas	Combinada	N/A
<b>Planta petroquímica</b>	MRWALLSPECT II	Korea	Inspección	Traslación	Succión
	MRWALLSPECT III	Korea	Inspección	Piernas	Succión
	ROBICEN I, II, III	España	Inspección	Traslación	Succión
	WCR	China	Mantenimiento	Piernas	Succión
	TRIPILLAR	Francia	Inspección	Ruedas	Magnética
<b>Planta nuclear</b>	Robug IIs	China	Mantenimiento	Piernas	Succión
<b>Construcción naval</b>	RRX	Korea	Soldadura	Traslación	Rieles
	REST 1, 2	España	Soldadura	Piernas	Magnética
	Climbing Robot for Grit Blasting	España	Limpieza	Traslación	Magnética
	NDT Robot	Reino Unido	Inspección	Ruedas	Magnética
	Modular Climbing Robot	España	Inspección	Ruedas	Magnética
<b>Aeronaves</b>	MACS	Estados Unidos	Inspección	Ruedas	Succión
<b>Industria de servicios</b>	MATS	España	Cuidado de personas	Piernas	Agarre
	Magnebot	Estados Unidos	Manejo de material	Ruedas	Magnética
	Hand-Bot	Francia	Manipulación de objetos	Piernas	Agarre

## 2.3. Robots modulares

El diseño convencional de robots se lleva a cabo de forma tal que estos cumplan cierto objetivo o labor. Si bien estos robots pueden cumplir su tarea con precisión, estos no son muy flexibles ni poseen gran adaptabilidad, por lo que aplicaciones consignadas a ellos dependen fuertemente de su estructura física del sistema controlador. Aquí es donde entra el concepto de la modularidad. [9] La modularidad en robots es una forma bastante efectiva para construir un sistema mecatrónico con flexibilidad, responsividad, con flexibilidad, tolerancia a fallas y de relativamente bajo costo. Un robot modular consiste de varias unidades con pocos grados de libertad llamadas “módulos”, que usualmente se equipan con mecanismos de conexión para unir o separarse entre ellos con el fin de crear una estructura más compleja con varios grados de libertad llevándola a ser capaz de realizar tareas más complejas. En la Figura 2.6 se muestra un robot modular llamado M-TRAN III, con el cual se pueden unir varios módulos haciendo que este sea capaz de superar obstáculos de distintas geometrías que se encuentren en su camino.

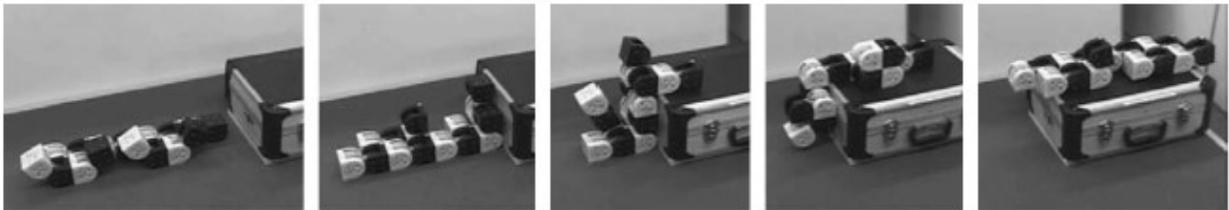


Figura 2.6: Robot modular reconfigurable M-TRAN III [9].

Una de las ventajas que se tiene al diseñar un sistema de actuadores modulares es que este es capaz de expandirse agregando más módulos. Si estos nuevos módulos cumplen funciones nuevas, entonces las capacidades del robot se verán expandidas.

## 2.4. Actuadores y sistema de control

Tanto para lograr que el robot sea capaz de moverse como para lograr controlar sus movimientos se deben de tener en cuenta los elementos actuadores como del sistema de control.

### 2.4.1. Actuadores

Los actuadores son aquellos elementos del robot que realizan cierta acción al ser energizados. Ejemplos de estos son: motores DC, pistones, servomotores, motores paso a paso, etc.

A continuación se presenta una breve descripción respecto de los principales actuadores para realizar el diseño del robot.

## Servo-Motores

Los servomotores son dispositivos actuadores similares a los de corriente continua, pero con la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, el cual es generalmente una vuelta completa. Pueden mantenerse en cualquier posición de manera estable y están compuestos por un motor de corriente continua, una caja reductora y un circuito de control. En la Figura 2.7 se muestra un servomotor señalando sus componentes internos.

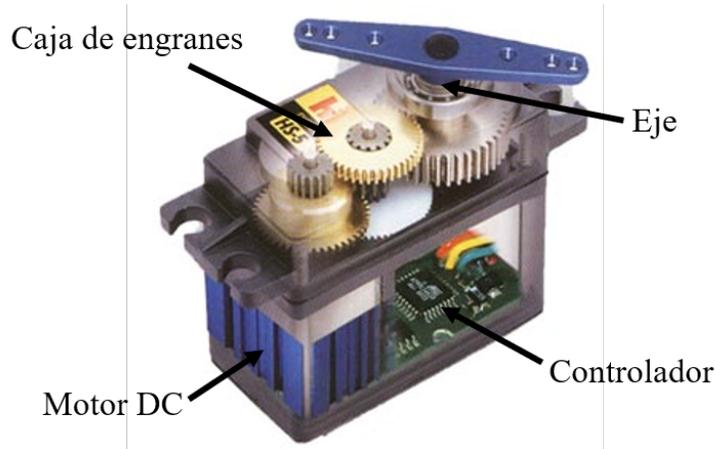


Figura 2.7: Componentes principales de un servomotor común.

Para el control de los servomotores estos poseen tres cables:  $V_{in}$ , Tierra y Señal de control. A diferencia de los motores DC que solo poseen los dos primeros. Es por medio del cable de señal de control que, a través del controlador, el servomotor recibe una señal con un valor entre (0, 180) que especifica a que posición moverse, es decir, cuantos grados girar su eje. Sin embargo, para los servomotores de giro continuo el valor 90 significará no moverse, 0; moverse a sus rpm máximas en sentido antihorario y 180; moverse a sus rpm máximas en sentido horario.

## Motores Brushless

Un motor *brushless* o “sin escobillas” es un motor eléctrico alimentado por corriente continua que no posee escobillas. Las ventajas de un motor *brushless* sobre uno con escobillas son una razón de potencia/peso mayor, mayor velocidad una mayor eficiencia energética. Otra ventaja de mayor relevancia es que al trabajar con un motor *brushless* desaparece la necesidad de implementación de un sistema de transmisión, aumentando así la eficiencia del sistema. Sin embargo, estos motores son diseñados para aplicaciones de altas velocidades y bajos requerimientos de torque (*e.g. aspas de un dron*) por lo que carecen de esta última característica.

## 2.4.2. Control de Sistemas

El control de sistemas es una disciplina de la ingeniería cuyo objetivo es el poder manejar sistemas dinámicos, ya sean máquinas procesos industriales, dispositivos automáticos o robots. Esto es logrado debido a que se estudia el comportamiento de tal sistema ante los estímulos que recibe (*input*) y la respuesta que desencadena (*output*).

Los sistemas de control son generalmente constituidos por un controlador, encargado de procesar la señal de referencia (*input*) para así enviar una respuesta a los actuadores, los que realizan una acción sobre el sistema o proceso. Este tipo de sistema es denominado sistema de lazo abierto, y junto con el sistema de lazo cerrado son los principales tipos de control en la teoría del control [15]. Un diagrama representativo del funcionamiento del control por lazo abierto se presenta en la Figura 2.8.

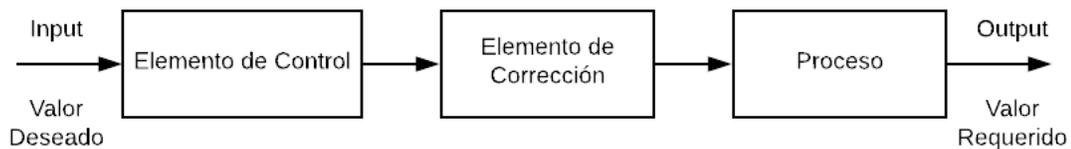


Figura 2.8: Diagrama de bloques de control en lazo abierto [10].

Por otro lado, el sistema de lazo cerrado contempla una retroalimentación dentro del ciclo de control. Esto se implementa generalmente por medio de sensores que miden distintos estados o aspectos del sistema a controlar que son enviados de vuelta al controlador para que compare y corrija alguna acción. Un diagrama de esta dinámica se puede observar en la Figura 2.9.

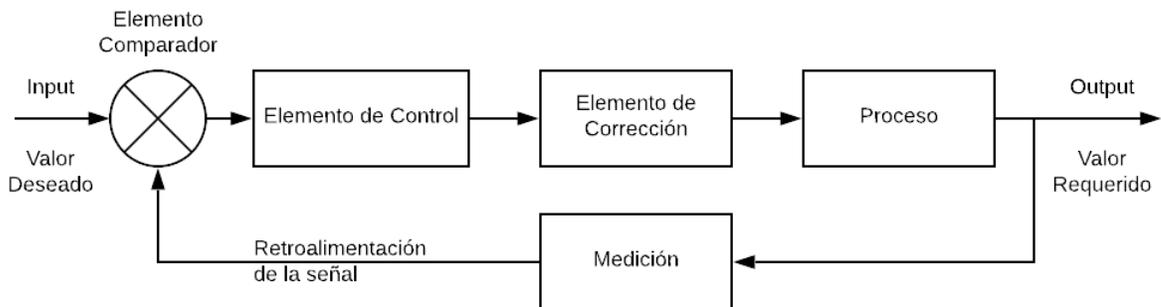


Figura 2.9: Diagrama de bloques de control en lazo cerrado [10].

## 2.5. Métodos de inspección en puentes

Los tipos de ensayos que se pueden realizar en estructuras son divididos en dos tipos: destructivos y no destructivos. Si bien los métodos destructivos son útiles y pueden otorgar bastante información, estos no son de utilidad para la inspección para determinar la integridad de las estructuras de un puente ferroviario. Es por esto que se utilizan métodos de estudio no destructivos, dentro de los cuales se destacan el análisis por vibraciones y la inspección visual.

### 2.5.1. Análisis por vibraciones

La inspección por vibraciones está basado en el análisis de las características vibracionales de la estructura a controlar, como la frecuencia natural, amortiguamiento y los modos de frecuencia natural. Con monitoreo por vibraciones se es capaz de detectar de manera inmediata cambios en la integridad de la estructura e incluso determinar el tipo y ubicación del problema. Los fundamentos de este acercamiento en puentes se basan en las características dinámicas de estas estructuras que vienen siendo derivadas de su ecuación de movimiento y pueden ser interpretadas como una marca vibracional. Conociendo el análisis de las frecuencias naturales se puede llegar a conclusiones respecto del estado de la estructura de manera rápida y confiable. Sin embargo, no existe un método universal que sea capaz de detectar cualquier tipo de daño en cualquier tipo de estructura.[16]

Para la inspección por vibraciones en estructuras metálicas como estanques y vigas se suelen utilizar equipos de medición que cuentan con un controlador, que es el equipo con el que se observan, filtran y analizan las ondas vibracionales. Y de un acelerómetro que es el equipo encargado de detección de las ondas que son enviadas al controlador. La posibilidad de reconocer cambios en la geometría de una estructura a partir de acelerómetros proviene de la filtración e integración de las señales registradas por el acelerómetro. En la Figura 2.10 se observa un ejemplo de un equipo para la medición con vibraciones con un controlador y distintos modelos utilizables de acelerómetros.



Figura 2.10: (a) Detector y (b) acelerómetros de equipo para inspección por vibraciones. [11]

En el contexto de la robótica existen un sinnúmero de diseños de equipos autómatas destinados a la inspección de estructuras como los que se muestran en [1], además, la inspección por vibraciones no es un campo que no se haya explorado anteriormente con robots[17]. Por ejemplo, en [11] se presenta un robot modular articulado capaz de trepar estructuras metálicas y realizar una inspección por vibraciones, el cual utiliza electroimanes para adherirse a la superficie de estanques de almacenamiento.

### **2.5.2. Análisis visual**

El análisis visual es una herramienta muy útil y que hoy en día se considera vital para la inspección de estructuras como los puentes, ya que permite el rápido reconocimiento de distintos tipos de falla como daños en la estructura, erosión, socavación, falta de remaches, grietas u otros. Las inspecciones visuales en puentes y otras estructuras se suelen realizar tradicionalmente de forma manual por personal capacitado. Sin embargo, en los últimos años tras series de avances en la tecnología, cada vez se vuelve más atractiva la implementación de unidades robotizadas como lo son los drones para la inspección, debido a la capacidad de reunir información crítica en menos tiempo y a costos menores comparado a los métodos tradicionales de inspección. [12]

Si bien el uso de drones resulta ser una buena alternativa en varias oportunidades, esta aún no es una técnica perfecta ya que los drones suelen tener problemas si se encuentran en lugares muy confinados o muy cerca a la estructura a analizar por lo que no siempre es posible realizar una inspección completa de la estructura. Por esta razón puede surgir la motivación de la creación de una unidad robotizada capaz de navegar entre las estructuras más confinadas, como lo son las celosías de los puentes, y realizar la inspección correspondiente.

# Capítulo 3

## Metodología

El trabajo realizado se puede categorizar en 3 etapas principales:

1. Diseño y fabricación.
2. Desarrollo e implementación del sistema de control.
3. Pruebas y caracterización de desempeño.

### 3.1. Diseño y fabricación

#### 3.1.1. Validación de la idea

Previo a tomar una decisión y comprometerse con una idea de diseño esta debe de pasar ciertos filtros, a modo de tomar la decisión que se estime más conveniente. Para esto se establece la siguiente metodología para evaluar si una idea de diseño tiene futuro o no.

1. Concebir una idea de diseño. Esta puede ser en la forma de un bosquejo, lluvia de ideas o inspiración en algún mecanismo existente.
2. Evaluar si la idea tiene algún potencial, si vale la pena elaborarla y desarrollar un prototipo funcional. Si es descartada se repite el proceso.
3. Se fabrica un primer prototipo funcional con el que se logre analizar ciertos aspectos básicos del funcionamiento de la idea.
4. Realizar pruebas del prototipo y analizar su desempeño.
5. Si el prototipo funciona como se esperaba y muestra un buen potencial se continua con esta idea y se desarrolla. En caso contrario se debe de repetir el proceso.

### 3.1.2. Diseño del Robot

Con el objetivo de obtener una primera concepción del diseño principal sobre el que se trabajará para obtener un robot para navegar celosías se debe de partir revisando los antecedentes y el estado del arte de robots que cumplen funciones similares. Se investiga sobre los tipos de actuadores que suelen usar, métodos de locomoción y sujeción a estructuras, de esta forma se adquiere una visión más clara sobre las distintas opciones que uno puede combinar para comenzar con la fase creativa.

Posteriormente, manteniendo coherencia con lo investigado en los antecedentes, se propone un primer concepto de funcionamiento para el robot. En este primer diseño se tienen en consideración los principales actuadores, su forma y métodos de locomoción y sujeción a una estructura como la viga de un puente. Este se analiza en cuanto a su funcionalidad y se discute sobre su factibilidad, de manera que nuevas ideas surgen para ir mejorando y determinando los distintos aspectos del robot, como sus dimensiones y morfología.

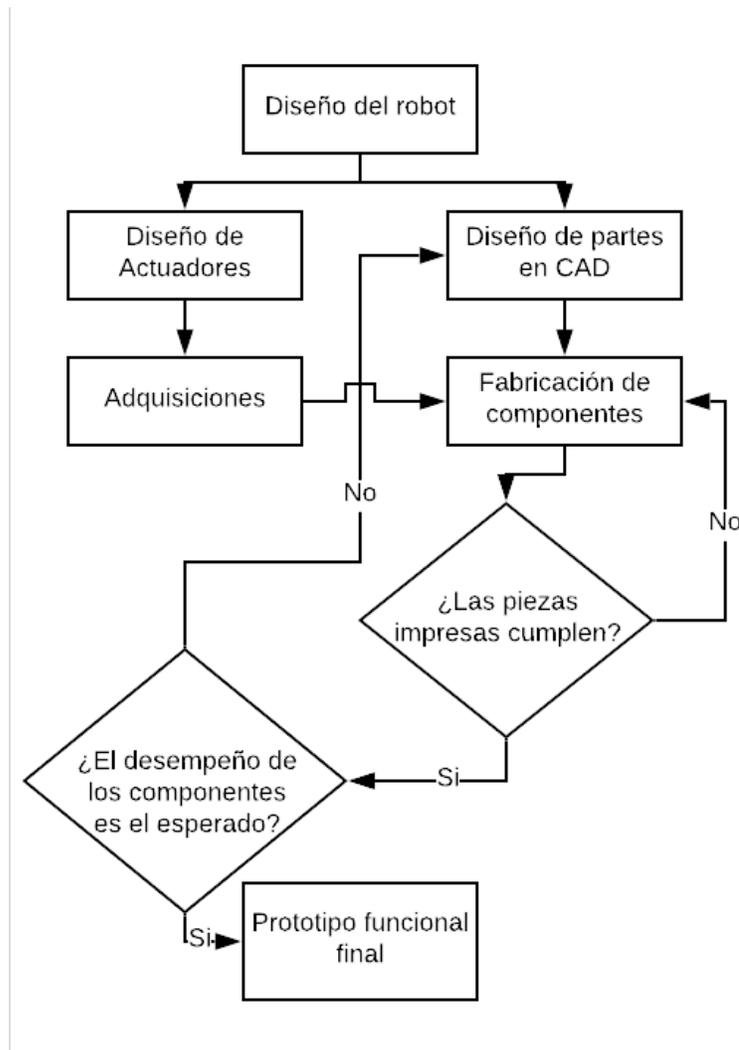


Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología de trabajo adoptada.

## **Metodología iterativa**

Para el diseño se empleó una metodología de tipo iterativa, lo cual significa que el diseño del robot va adquiriendo una retroalimentación respecto de las versiones previas de sus piezas fabricadas. De esta forma el prototipo en su "version 1" se va puliendo hasta llegar al prototipo funcional final.

Una representación de la metodología seguida para el desarrollo del robot se muestra en la Figura 3.1.

## **Organización del trabajo**

Para la realización del trabajo de título se hizo uso intensivo de las facilidades del laboratorio de robótica del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile. Dentro de este laboratorio se contaba con las facilidades de un puesto de trabajo, herramientas varias (llaves, alicates, etc.), elementos electrónicos (microcontroladores, cables, caudín, etc.), entre otros.

Además se logró hacer las gestiones necesarias con el fin de adquirir una máquina de impresión 3D modelo DaVinci Pro 1.0 de XYZPrinting . Esto con los fines de tener una mayor disponibilidad al momento de realizar impresiones para la fabricación de prototipos. Esta impresora se obtuvo durante la quinta semana del semestre.

## **3.2. Desarrollo del sistema de control**

El desarrollo del sistema de control es un proceso que se debe de realizar en las etapas finales del desarrollo del robot, ya que es necesario tener caracterizado el robot con sus componentes principales como sus piezas y actuadores. De esta forma se puede diseñar un sistema de control en los aspectos de programación, circuito eléctrico y su diseño mecánico. Tras el desarrollo de sus primeras versiones, se prueban en funcionamiento para que una vez esté validado por completo se construya el sistema completo final que formará parte de la estructura interna del robot. El diagrama de flujo en la Figura 3.2 explica la metodología seguida para diseñar y fabricar el sistema controlador.

En cuanto al aspecto sistema de control del robot se tiene contemplada la implementación de un sistema de control tal que se puedan controlar los movimientos, es decir, desplazamientos del robot. No se contempla la implementación de sistemas de sensores, por lo que se tiene que un sistema de control por lazo abierto es indicado para implementar. Esto se puede llevar a cabo simplemente con la implementación de un microcontrolador comercial, el cual es una plataforma de código abierto que cuenta con una sencilla placa con entradas y salidas analógicas y digitales. Es capaz de recibir señales de una variedad de elementos y de afectar su entorno controlando luces, motores u otros actuadores ya sea trabajando de forma autónoma o corriendo un programa de computadora. Está compuesto de un micro controlador pre-programado con una secuencia de arranque por lo que no necesita un programador externo.

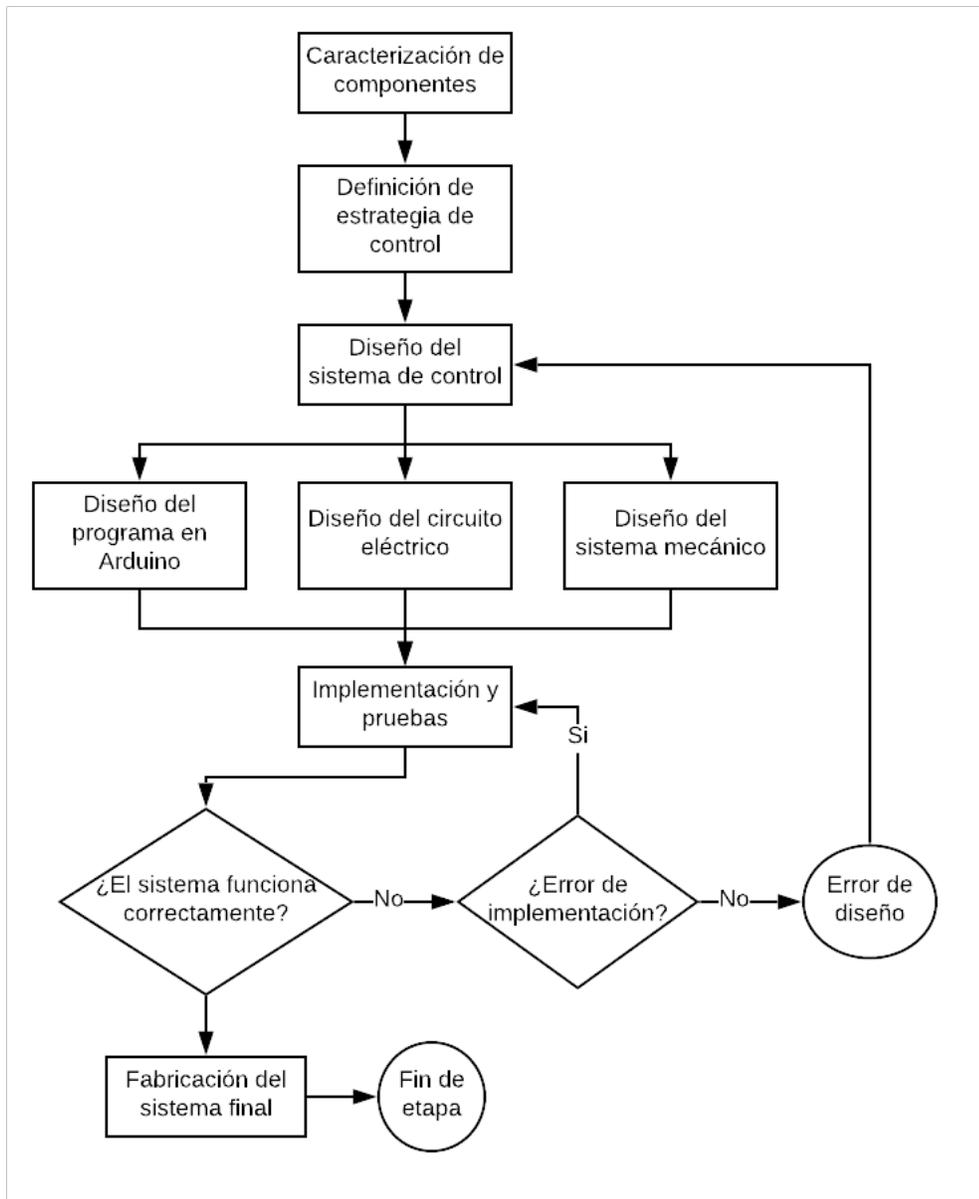


Figura 3.2: Diagrama de flujo de metodología implementada para el desarrollo del sistema de control.

### 3.3. Pruebas y caracterización

Con el prototipo funcional del robot, es necesario evaluar su desempeño con tal de caracterizar su funcionamiento. Esto con el fin de implementar mejoras y evaluar su desempeño nuevamente. De esta manera el diseño de cada prototipo se va refinando hasta alcanzar su versión final. Cuando se tiene un diseño ya pulido y mejorado se puede proceder a las siguientes etapas de pruebas experimentales.

### 3.3.1. Pruebas experimentales

Para implementar las primeras pruebas de funcionamiento se fabrica primero un montaje experimental, el cual simula el problema propuesto en los objetivos de una viga con un refuerzo atiesador. De esta manera, teniendo una prototipo funcional final se planifica realizar pruebas evaluando su desempeño, caracterizando aspectos como:

- Capacidad de trasladar una carga mayor.
- Capacidad de superar ciertos obstáculos como irregularidades en la superficie metálica.
- Alcance de control remoto.
- Consumo de energía.

Una representación esquemática sobre el flujo del proceso de pruebas y validación se presenta en la Figura 3.3.

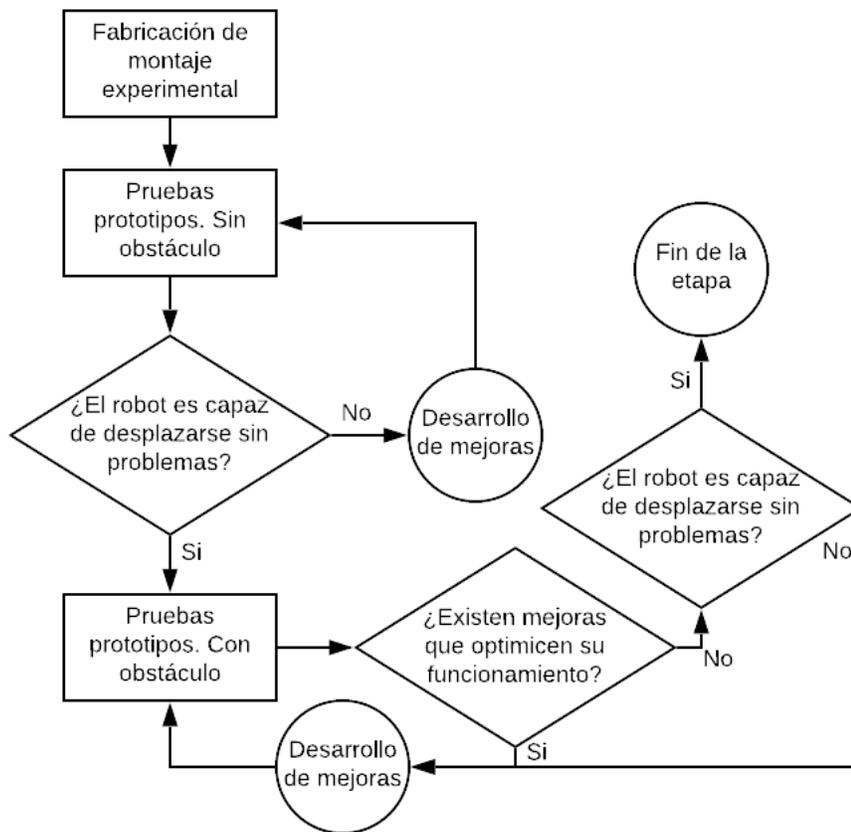


Figura 3.3: Diagrama de flujo de metodología en la validación del diseño del robot.

En esta figura se observan diferentes lazos cerrados de retroalimentación. Estos son importantes ya que durante la etapa de pruebas experimentales se detectan las distintas debilidades que hayan en el diseño para que este se pueda mejorar.

### 3.3.2. Pruebas en terreno

Tras el cumplimiento de las pruebas experimentales en laboratorio se debe proceder a la siguiente etapa de pruebas, las cuales involucran una salida a terreno a algún puente ferroviario en el que se pueda desplegar y evaluar el robot funcionando.

1. Analizar y tomar datos sobre las distintas condiciones de trabajo con las que se puede encontrar el robot. Se observan las distintas configuraciones de los enrejados, las uniones y las geometrías de las estructuras ferromagnéticas.
2. Probar el desempeño del robot sobre las distintas configuraciones disponibles.
3. Documentar el desempeño del robot. Se toman notas sobre capacidades, dificultades, limitaciones. Se toman fotos y videos.
4. Analizar los resultados de las pruebas documentadas.

Para poder desplegar el robot en zonas difíciles de alcanzar manualmente se propone el uso de una garra larga manipulable como la de la Figura 3.4.



Figura 3.4: Herramienta *Grip N' Grab* utilizada para desplegar en robot en áreas difíciles de alcanzar manualmente.

La herramienta presentada agrega un alcance de 82 [cm] más al operador para desplegar el robot.

# Capítulo 4

## Diseño, fabricación y caracterización

### 4.1. Diseño

#### 4.1.1. Aproximación al problema y primeros diseños

Con el objetivo de diseñar y fabricar un robot, se debe definir la función o trabajo que estea satisfacer. En particular, este robot debe ser capaz de movilizarse a través de la superficie metálica de una viga ferroviaria y ser capaz de superar un obstáculo sin que este pierda la sujeción. El obstáculo propuesto es un atiesador comúnmente denominado “refuerzo de viga”, tal como se muestra en la Figura 4.1. En esta se muestra una representación del objetivo del robot; desplazarse a lo largo de la viga superando este obstáculo.

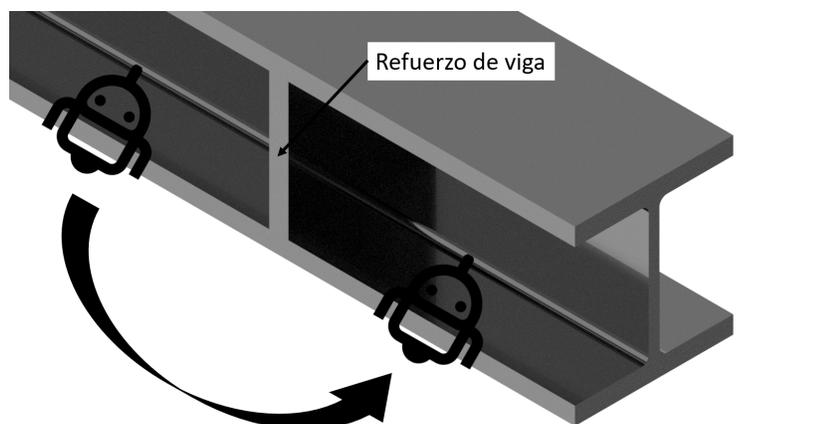


Figura 4.1: Viga H con refuerzo vertical, situación común en puentes ferroviarios.

El primer diseño propuesto y evaluado consta de numerosos actuadores y un sistema para la superación del obstáculo se muestra en la Figura 4.2b.

Este diseño está inspirado en el movimiento y la forma de los ciempiés. Este diseño consta de un sistema de patas que se ubicarían por encima del canto de la viga (como las que se observan en la

Figura 4.2) y otro que se ubicaría por debajo de estas. De esta manera el robot se sujetaría utilizando un mecanismo de agarre presionando la viga con ambos sistemas de patas. Para superar el obstáculo el robot seguiría una secuencia de acción levantando una pata a la vez que va avanzando (ver Figura 4.2b) hasta que todas sus partes hayan superado el atiesador.

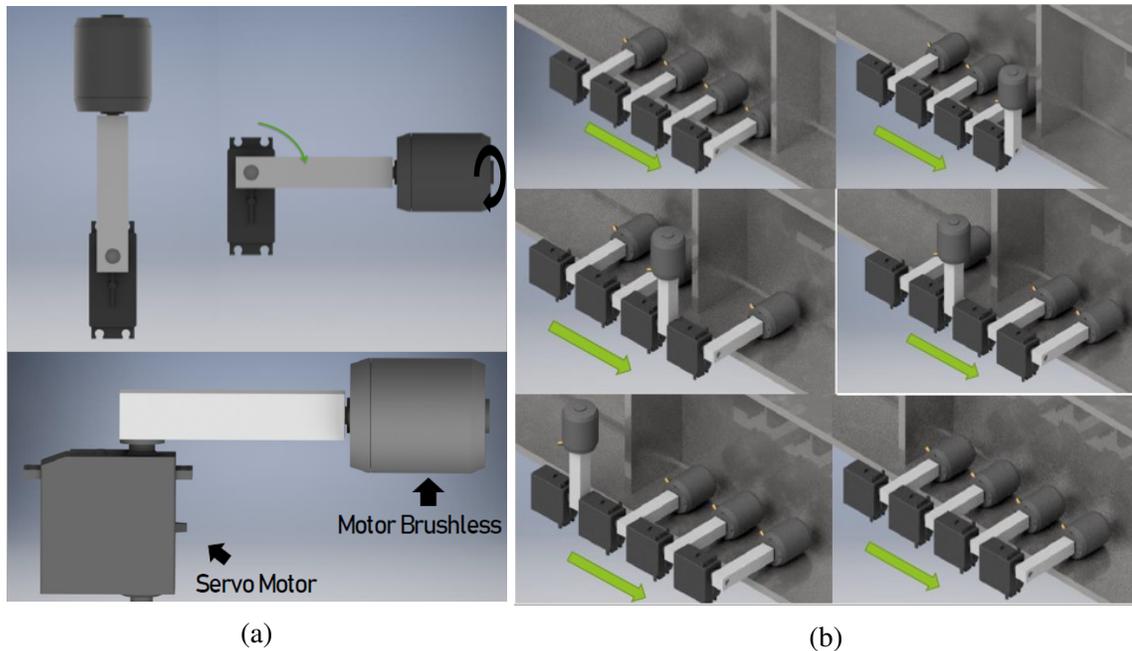


Figura 4.2: Primer concepto de diseño de robot modular(a) junto con esquema de funcionamiento(b).

Este diseño es finalmente descartado tras una evaluación mas exhaustiva sobre los requerimientos de funcionamiento:

1. Actuadores: Si bien los servomotores encargados de levantar cada pata podrían ser capaces de hacerlo (el torque necesario no es demasiado), los motores *brushless* considerados para movilizar el sistema longitudinalmente a través de la viga no serían realmente capaces de hacerlo ya que carecen de torque.
2. Peso: En robots, el peso suele ser un factor importante sobre todo cuando estos deben de ser capaces de movilizarse. La incorporación de todos los actuadores considerados aumenta significativamente el peso. Claramente, con tantos motores para el peso se eleva considerablemente, lo cual complejiza las cosas.
3. Sistema de control: Además de afectar al peso, la alta cantidad de actuadores también complejiza el sistema de control, tanto en los aspectos de programación, como en el diseño del circuito eléctrico y el del sistema mecánico. Lo cual no es ventajoso al momento de elaborar prototipos.
4. Mecanismo de Sujeción: El mecanismo de sujeción principal que se pensó para este diseño es el de sujeción por agarre (ver sección 3.2.2), utilizando actuadores superiores e inferiores a la viga, sin embargo, tras cualquier desalineación del sistema este se podría desviar fácilmente y caer. Para esto entonces se considera el uso de imanes permanentes que fijarían al robot al borde de la viga pero esto genera la complicación del “como despegar los imanes para

avanzar por la viga”.

Tras encontrarse con el problema de la adhesión se reformula un nuevo diseño capaz de adherirse a una superficie metálica por medio de imanes permanentes y además de desplazarse a través de esta con facilidad manteniendo su adhesión. Su método de funcionamiento se muestra en la Figura 4.3, donde se puede apreciar que el cuerpo es similar al de un tractor oruga, con varios eslabones con imanes permanentes en su lado externo. Parte de la estructura principal del robot se inspira en robots con orugas motorizadas [18].

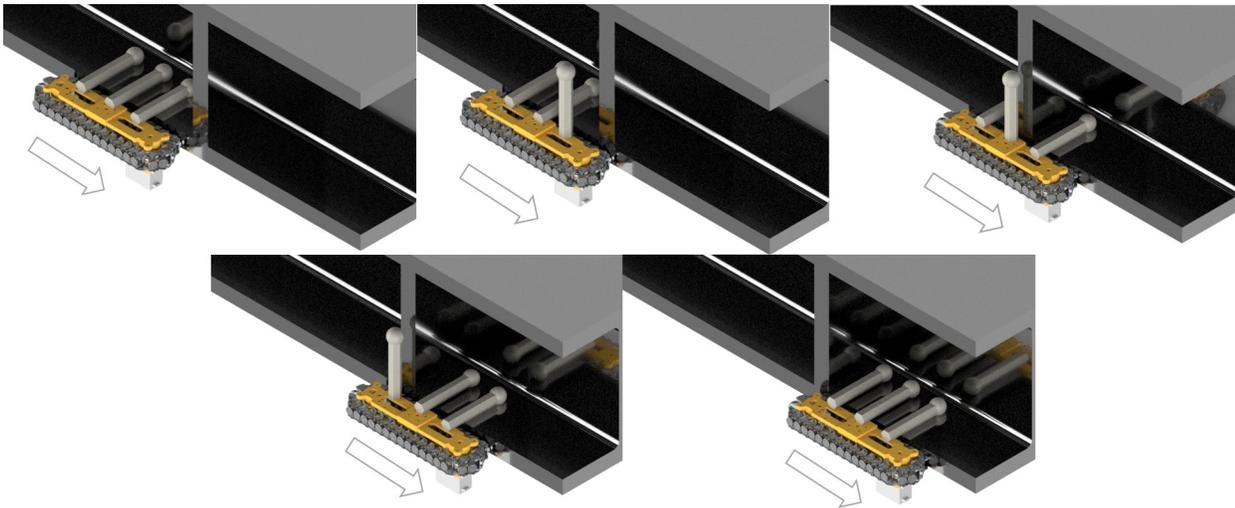
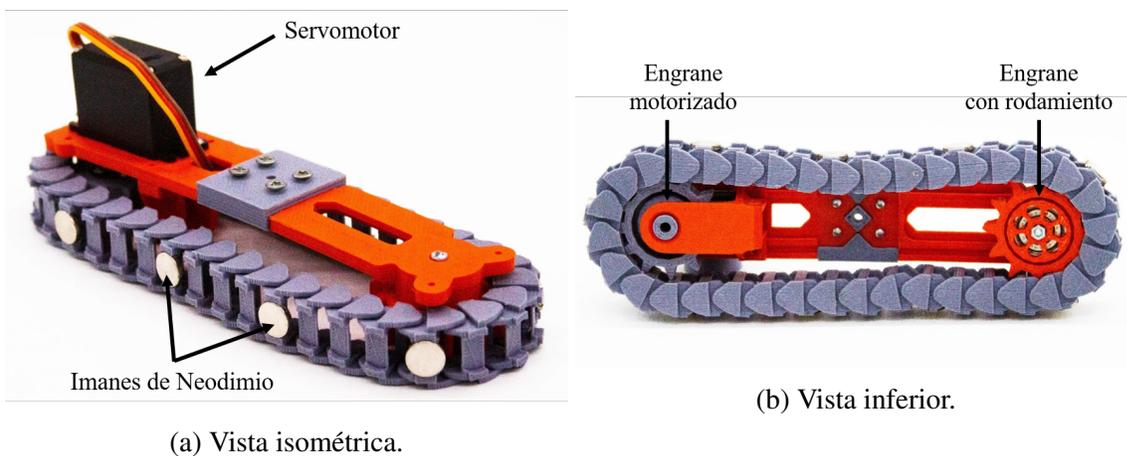


Figura 4.3: Representación del funcionamiento para el primer prototipo.

Se puede apreciar que se mantiene la idea de los brazos que se levantan para superar el obstáculo, los cuales además sirven de guía y soporte para la estructura principal.

Con esta idea se fabrica el primer prototipo de la estructura principal de la oruga con los fines de probar su funcionamiento y desempeño de manera de evaluar que elementos requieren modificaciones para continuar con el prototipado.



(a) Vista isométrica.

(b) Vista inferior.

Figura 4.4: Primer prototipo funcional fabricado.

El sistema de locomoción del robot se lleva a cabo por un servomotor en uno de sus extremos entregándole energía cinética a un engrane moviliza los eslabones del exterior.

En la Figura 4.4 se pueden observar los resultados de la fabricación de este prototipo. Las partes fueron impresas en 3D y ensambladas utilizando tornillos y pernos. Los imanes seleccionados son de 12[mm] x 3[mm] y son fijados a los eslabones por medio de pegamento.

#### 4.1.2. Diseño del prototipo final

Al obtener resultados tan prometedores respecto del poder de adherencia(ver sección se decide abordar un diseño de robot que se compone por dos sistemas de orugas con imanes de Neodimio en sus extremos.

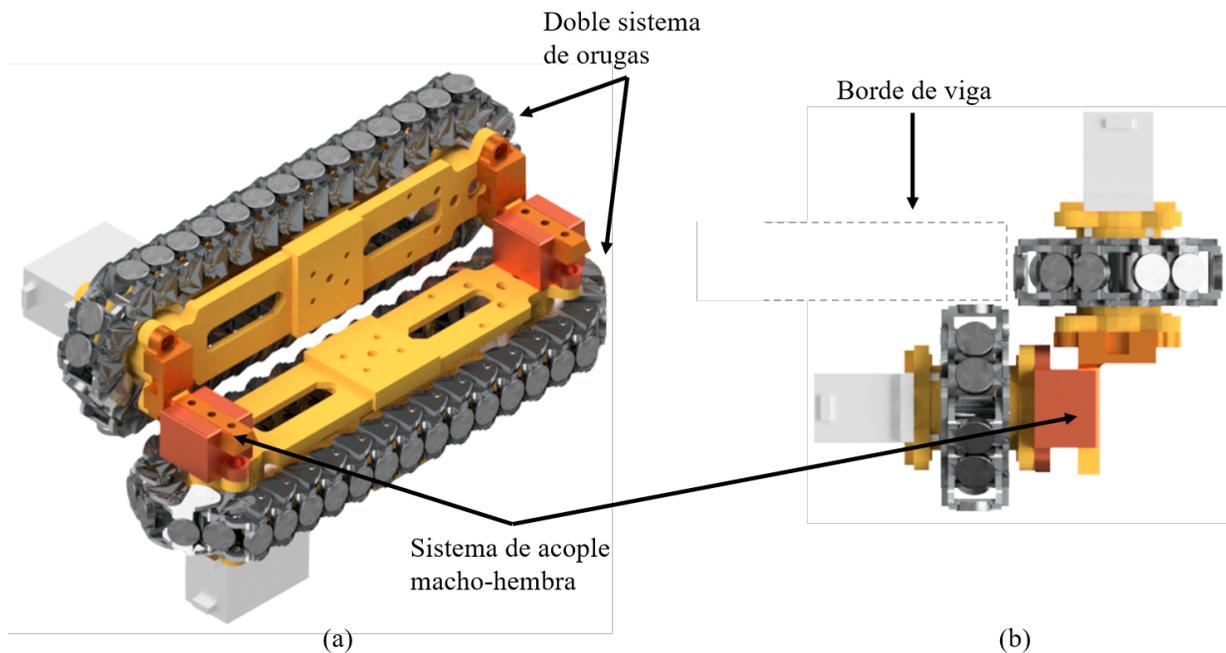


Figura 4.5: Diseño conceptual del prototipo final renderizado en CAD.(a) Vista isométrica. (b) Vista posterior.

Este nuevo concepto permitiría al robot navegar por el borde de una viga de acero y sobrellevar el obstáculo propuesto sin la necesidad de la activación de un mecanismo adicional. Esta decisión se toma según las siguientes consideraciones:

1. Al no necesitar un mecanismo adicional para la superación del obstáculo se reduce sustancialmente la necesidad de actuadores, lo que a su vez implica que el sistema de control se simplifique considerablemente.
2. Si se usara sólo un sistema de orugas el volumen en su interior resulta ser bastante reducido, por lo que existe poco espacio para sus demás componentes como la batería y sistema eléctrico para el control.

3. Esta nueva solución también permite una nueva forma de resolver la necesidad de que el robot sea ajustable al tamaño del grosor de la viga. Esto ya que se propone un mecanismo para acoplar ambas estructuras por medio de un sistema macho-hembra, tal como se observa en la Figura 4.5. Dicho diseño permite a uno de los sistemas de orugas deslizarse longitudinalmente en la dirección del acople para ser ajustado a la distancia que se estime conveniente.

Este nuevo diseño tiene la capacidad de superar el obstáculo del atiesador de la viga moviéndose longitudinalmente por el borde de esta. Esto significa que el sistema de control se reduce a principalmente manejar el sistema de locomoción de este, el que vendría a ser compuesto por dos servomotores. La forma de navegación y posicionamiento sobre la viga se muestra en la Figura 4.6.

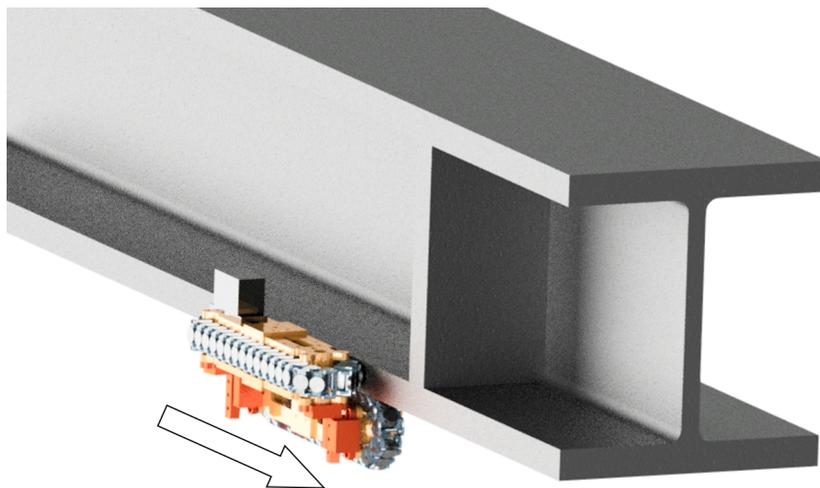


Figura 4.6: Representación del robot moviéndose a través de la viga.

El proceso de diseño, fabricación y pruebas es un proceso iterativo, a través del que se van notando distintas cosas en el camino como mejoras de diseño, fallas, detalles u otros aspectos que ameriten rediseñar ciertos elementos del robot.

### Selección de actuadores

Otro aspecto importante es la selección de los actuadores principales, en este caso a los servomotores. Debido a que estos motores serán los encargados de movilizar toda la estructura del robot, es necesario que estos tengan el torque suficiente para hacerlo. De esta manera se seleccionan servomotores de eje metálico, lo que le otorga mayor durabilidad y fuerza de rotación. Además, es necesario que el servomotor sea capaz de girar indefinidamente en una dirección, lo que descarta inmediatamente los servomotores con giro de  $180^\circ$  y reduce la búsqueda a los de giro continuo. Tras un análisis de las opciones disponibles en el mercado se logra seleccionar el servomotor modelo MG996R [19] el cual cuenta con las siguientes características:

Tabla 4.1: Características del servomotor MG996R seleccionado.

<b>Peso [gr]</b>	62.41
<b>Dimensiones [mm]</b>	40.7 x 19.7 x 42.9
<b>Consumo [V]</b>	5
<b>Consumo [mA]</b>	500 - 900
<b>Torque [Kg-cm]</b>	12.5

## 4.2. Fabricación

### 4.2.1. Fabricación de un banco de pruebas

Para la fabricación del banco de pruebas es necesario seguir la siguiente lista de pasos:

1. Elaboración de un diseño.
2. Gestión de adquisiciones
3. Fabricación: Soldadura de planchas y ensamblaje.
4. Pruebas/caracterización.

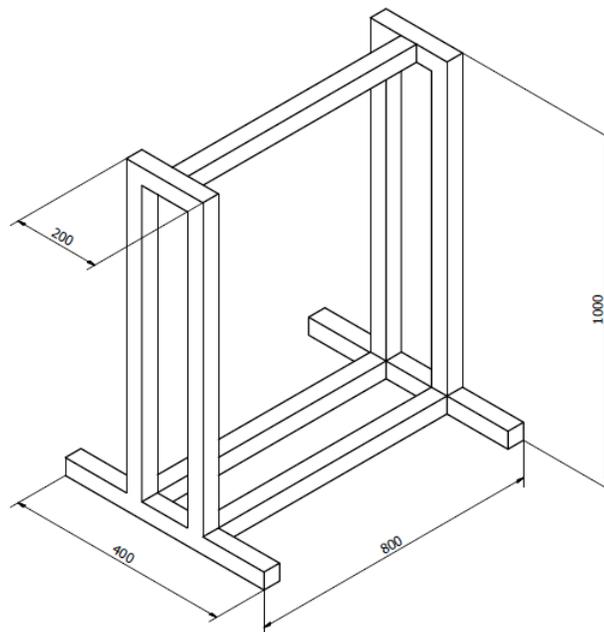


Figura 4.7: Diseño de la estructura sobre la que se montará la viga con refuerzo, con sus medidas en [mm].

## 1. Diseño a construir.

Teniendo claro el robot se diseñará con el objetivo particular de navegar una viga ferroviaria con un refuerzo como la que se muestra en la Figura 4.1 se realiza un diseño a mano simple de un estante o mesa que soporte una plancha de acero a la que se le soldaría en T una plancha más corta simulando la viga con refuerzo. En la Figura 4.7 se muestra el bosquejo utilizado para la siguiente etapa de adquisiciones.

Se decidió que la viga estaría a una altura de 1 [m], lo cual se estimó como una altura razonable para la observación del prototipo en funcionamiento. Además, se dimensionó de 0.8[m] de largo y 20 [mm] de grosor.

Un detalle importante con el que cuenta el montaje es el travesaño superior. Este es sólo uno y pasa por el medio ya que se desea que los bordes de la viga estén libres a modo de poder realizar las pruebas del robot de manera apropiada.

## 2. Adquisiciones

Las adquisiciones principales que se deben de gestionar son las planchas de acero que simularán la viga y las barras de madera que forman parte de la estructura que sostiene la viga. Junto con esto se deben de comprar los materiales que forman parte del ensamble como tornillos y escuadras. Las barras de madera son de pino cepillado de 2x2 pulgadas y se adquieren dimensionadas en Sodimac. Mientras que las planchas de acero son de acero A36, gestionadas a través de Aceros Otero[20]. Las dimensiones de la plancha son de 800x200x20 milímetros. Se selecciona acero A36 debido a su precio y alta soldabilidad, ya que además se adquiere una plancha más delgada de 16 milímetros de espesor para que sea soldada a la principal a modo de simular un refuerzo de viga.



Figura 4.8: Viga con refuerzo soldado en T

## 3. Fabricación

Para la fabricación del montaje de madera se utilizaron las facilidades del taller de madera del FabLab, donde se cuenta con diversas máquinas para cortar, lijar y trabajar la madera. Se utilizan

presas para sujetar las piezas y un destornillador eléctrico para fijarlas con tornillos de 8x3.

Por su parte, la viga es fabricada en el Taller de Máquinas Herramientas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile ubicado en Union Americana 660. La plancha más delgada es cortada por una sierra de banda y es fresada para refrentar sus cantos. Tras esto se aplica una soldadura en doble filete para fijarla a la plancha más gruesa utilizando la máquina Invermig 200 marca Indura disponible en el taller. Los resultados de esta soldadura se observan en la Figura 4.8. El montaje final se observa en la Figura 4.9.

#### 4. Características

Las pruebas mostraron ser adecuadas para una homologación entre la situación en terreno y en el laboratorio. La viga de acero seleccionada cumple con la propiedad ferromagnética que se espera de las vigas ferroviarias, sin embargo, la situación en el banco de pruebas es limpia, libre de corrosión y de pintura, a diferencia de lo que se podría esperar del ambiente para pruebas en terreno.

Las características de dimensiones y peso para el montaje experimental fabricado se presentan en la tabla 4.2:

Tabla 4.2: Características relevantes del montaje experimental.

<b>Peso viga[Kg]</b>	30
<b>Alto[m]</b>	1.22
<b>Largo [m]</b>	0.8
<b>Ancho[m]</b>	0.8



Figura 4.9: Montaje experimental final fabricado. Cuenta con soportes en sus cuatro patas para asegurar su estabilidad.

## 4.2.2. Fabricación del robot y sus componentes

Como se ha mencionado anteriormente, el proceso de manufactura utilizado para la fabricación de prototipos es principalmente el de impresión 3D. Esto ya que permite realizar prototipos de piezas de manera barata, fácil y rápido. En general el procedimiento a seguir para la fabricación de piezas se puede resumir en los siguientes puntos:

- Diseñar las piezas en CAD, con ayuda del software Autodesk Inventor Profesional 2017.
- Adquisiciones: Comprar filamento PLA. Se escoje la marca ESUN debido a su alta calidad y buena experiencia de trabajo.
- Seleccionar los parámetros de impresión. Estos dependen principalmente del nivel de resolución que se desee y la rapidez con la que se requiera la pieza.
  - Temperatura de extrusor: 215° C
  - Resolución(altura de capas): 0.2 - 0.3 [mm]
  - Velocidad de extrusión: 20 - 30 [mm/s]
- Corroborar la correcta manufactura de las piezas. De no ser así se debe de volver a repetir el proceso.

### Cadenas

Una ventaja del proceso de manufactura seleccionado es que se pueden imprimir piezas ensambladas directamente siendo la mayor limitante el tamaño de la pieza. Por esta razón, los eslabones son ensamblados en cadenas de hasta 12 partes para su fabricación. Como cada cadena del robot cuenta con 36 eslabones se deben de imprimir 6 de estas, las cuales pueden ser impresas sobre la superficie de 200 x 200 [mm] de la cama de la impresora 3D (ver Figura 4.10). Estas cadenas han sido diseñadas para que en su superficie superior calcen de manera precisa los imanes de 12 x 3 [mm] y se aseguren con pegamento. Esta modificación optimiza la superficie de adhesión para el pegamento.

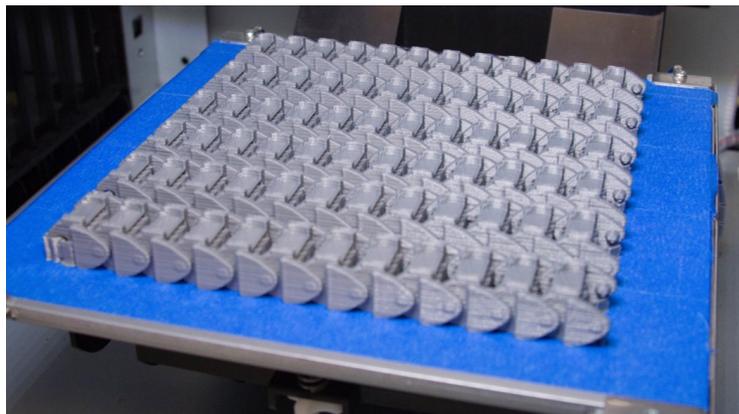


Figura 4.10: Impresión de cadenas del robot. Tiempo real de impresión: 26 [Hrs]

Tras ser impresas, las cadenas son desmontadas de la cama de impresión y se les remueven los soportes que permiten la impresión de partes en voladizo. Debido a que tras la impresión las

cadenas son rígidas, es necesario movilizar los calces articulados que las unen aplicándoles un fuerza apropiada. Esto se debe hacer con cuidado ya que las piezas son delicadas. Esto sucede porque en la zona de unión de los eslabones se fusiona el material de uno con otro. Si este efecto es muy notorio, más de algún eslabón se quebrará durante el proceso de movilización, por lo que tal impresión debe de ser descartada. Durante el proceso se aprende que para minimizar estos defectos se debe de imprimir con alturas de capa lo mas gruesas posible (0.25 - 0.3 [mm]) ya que esto ayuda a que los límites entre piezas sean más definidos. Además, una velocidad de impresión menor reduce la posibilidad de defectos en los detalles de la impresión.

En la Figura 4.11 se observa el producto de ensamblar los eslabones de las cadenas y montarles los imanes de Neodimio. Los planos para la fabricación de los eslabones se presentan en la Figura A.1 de la sección de anexos.



Figura 4.11: Cadena con imanes impresa en 3D y ensamblada.

## **Bastidor**

A diferencia del primer prototipo fabricado, en el cual la estructura que sujeta los engranes y el motor está compuesta de tres piezas que se deben de ensamblar se decide imprimir el bastidor en una sola pieza. Esto reduce el espacio para juego entre piezas y rigidiza el sistema. Esta pieza cuenta con varios agujeros de 3 [mm] para fijar otras piezas por medio de tornillos y otros espacios que permiten el paso de conexiones, como los cables de los servomotores o del circuito eléctrico. El bastidor cuenta con dos piezas, la primera que es el soporte del servomotor que lleva consigo un engrane; y la segunda es la tapa que mantiene la estructura cerrada y protegida. Estas son sujetas por medio de tornillos M3 de 45 [mm].

En la Figura 4.12 se observan ambos subsistemas de orugas unidos por su bastidor y los cables que conectan los distintos elementos del robot. Los planos para la fabricación de las piezas del bastidor se presentan en las Figuras A.2 y A.3 de los anexos.

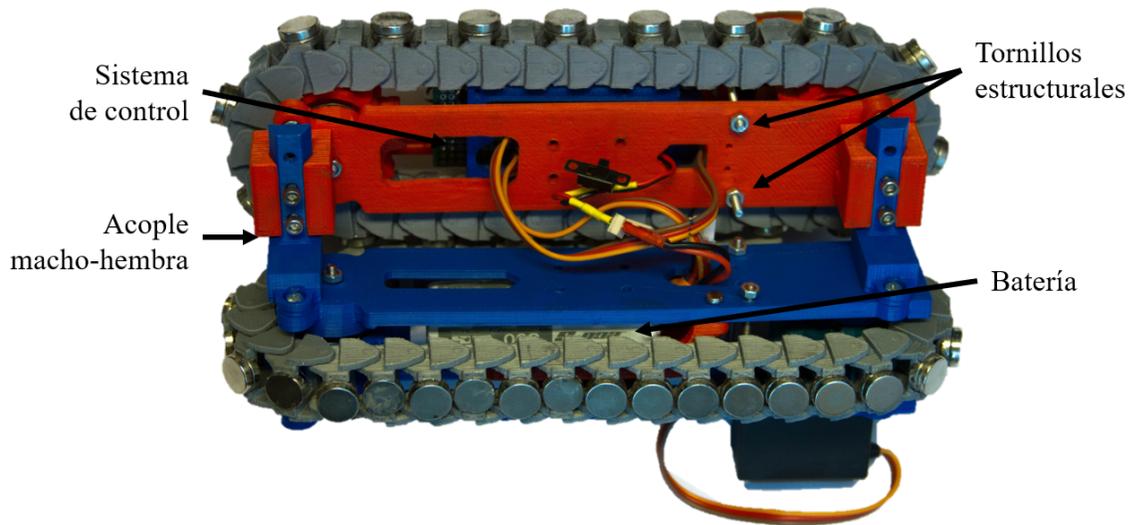


Figura 4.12: Bastidor del robot. Cada subsistema cuenta con un sistema interno diferente.

Los acoples macho-hembra para unir cada subsistema del robot son piezas impresas de forma separada. Estas se unen a cada parte del bastidor por medio de tornillos. Este sistema se puede apreciar en detalle en la Figura 4.13.

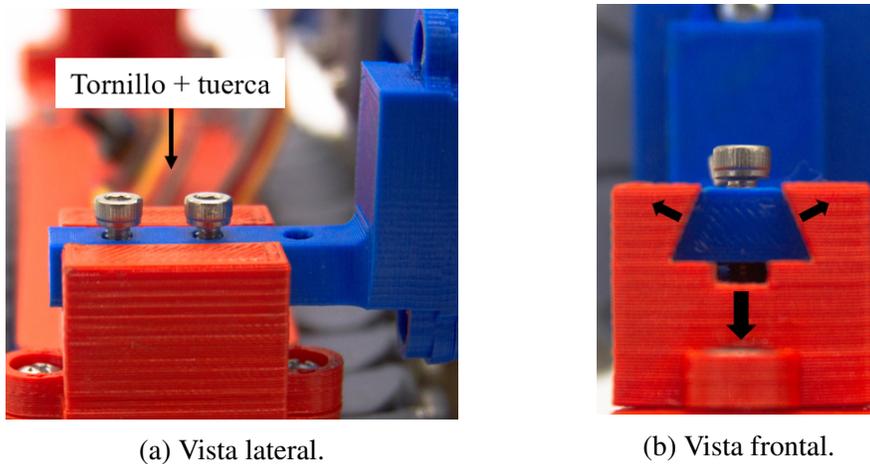


Figura 4.13: Acople deslizante entre subsistemas. Para bloquear el deslizamiento se giran los tornillos provocando un aumento del roce en el sistema.

Los planos para la fabricación del sistema macho-hembra se presentan en la Figura A.7 de los anexos.

## Engranajes

Cada subsistema de orugas cuenta con un engrane conectado al servomotor(Figura 4.14.a) y otro que lleva montado un rodamiento(Figura 4.14.c). Para fijar el eje metálico del servomotor al engrane se utiliza un acople metálico circular (Figura 4.14.b), el cual cuenta con agujeros M3 para asegurar la correcta transmisión de fuerza del servomotor. Este acople es montado en el engrane por medio de tornillos y tuercas que calzan con precisión dentro del engrane para de mantenerlas fijas. De esta forma el acople puede ser ajustado fuertemente al engrane para que la estructura esté alineada.

Respecto del otro engranaje, este usa un rodamiento de 22 [mm] de diámetro exterior y 8 [mm] de diámetro interior el cual entra a presión dentro del engrane.

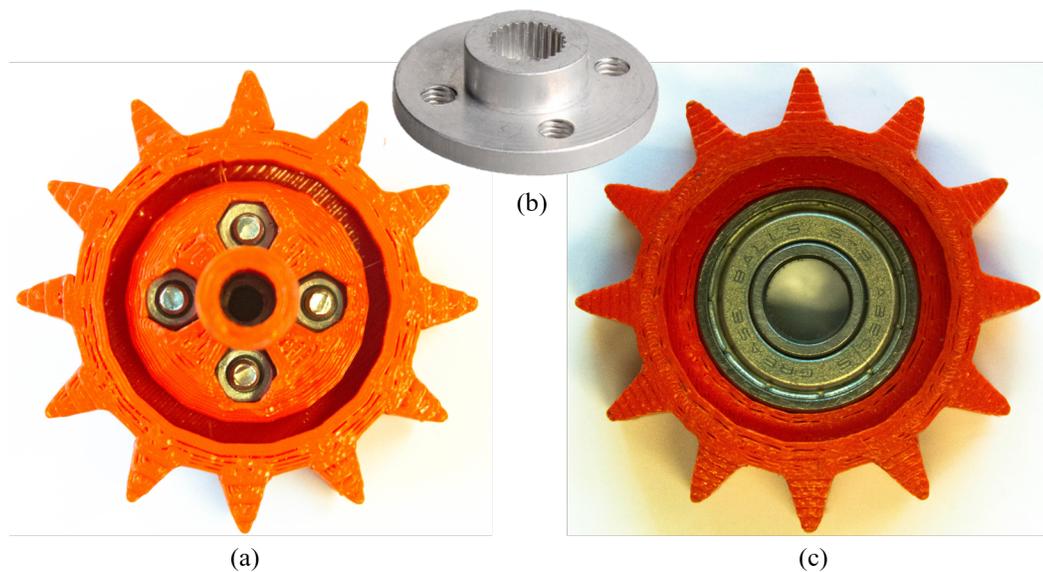


Figura 4.14: Engranajes fabricados para la la movilización de las cadenas.(a) Engrane motor, (b) Acople metálico circular para fijar el engrane al motor y (c) Engrane con rodamiento.

Los planos de fabricación de ambos engranes se presentan en las Figuras A.4 y A.5 de la sección de anexos.

## Sobre el proceso iterativo

Siempre que se realiza un trabajo repetitivo se puede optar por realizarlo de la manera más eficiente posible. Reducir los factores costosos como el tiempo en horas de impresión y el desperdicio de material ayuda a optimizar estos procesos.

Por ejemplo, si se observa la Figura 4.14.a se puede apreciar como el engranaje está diseñado de forma tal que tiene hoyos hexagonales en los que se pueden fijar tuercas de 6 [mm] que sirvan para montar firmemente el acople del servomotor. El calce de las tuercas en los huecos hexagonales es

uno que se debe de imprimir con las dimensiones justas. Si el hoyo es muy pequeño la tuerca no cabe y si este es muy grande la tuerca gira y no se puede fijar firmemente.

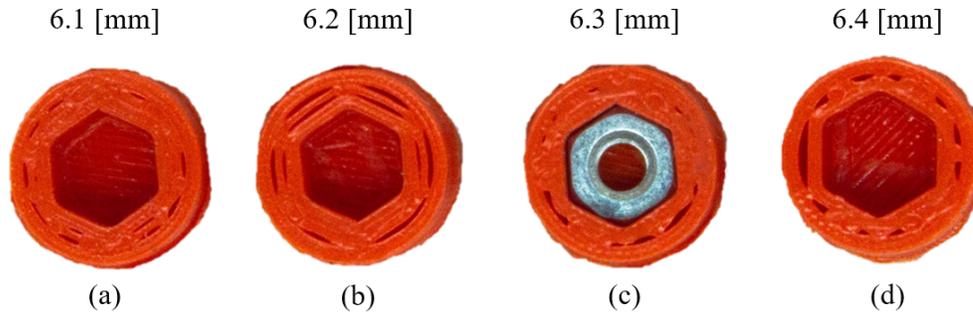


Figura 4.15: Ejemplo de impresiones iterativas para ajustar tolerancias. Se imprimen piezas con hoyos hexagonales de (a) 6.1 [mm], (b) 6.2 [mm], (c) 6.3 [mm] y (d) 6.4 [mm].

Para poder encontrar las tolerancias de que hagan calzar la tuerca de manera precisa se imprimen pequeños cilindros con huecos hexagonales variando en 0.1[mm] las dimensiones de este. Así, se encuentra que por lo general un agujero se debe de sobredimensionar en al menos 0.3[mm] para que quepa la estructura deseada.

Este tipo de acercamientos a los problemas ayuda a ahorrar considerablemente en tiempo de impresión y en desperdicio de material. Imprimir cada engrane nuevamente con con dimensiones ligeramente distintas habría costado cerca de 2.5 [hr] por engrane, mientras que imprimir cada uno de estos cilindros tarda al rededor de 15 minutos.

### Sistema interno del robot

Tanto el sistema de control como la batería del robot deben de ser montables y desmontables a la estructura de este. De esta manera es posible retirar cada elemento para realizar acciones como recargar la batería o hacer modificaciones en el programa del controlador.

Se cuenta con un espacio limitado dentro de cada estructura interna de los sistemas de orugas como para centralizar todo la estructura interna en sólo uno, además es conveniente distribuir los pesos de manera equilibrada dentro del robot. Por estas razones se distribuyen ambos sistemas entre cada uno de los subsistemas de orugas. En la Figura 4.16 se pueden observar las estructuras impresas en 3D las cuales usan pernos M3 para acoplarse por dentro al bastidor del robot.

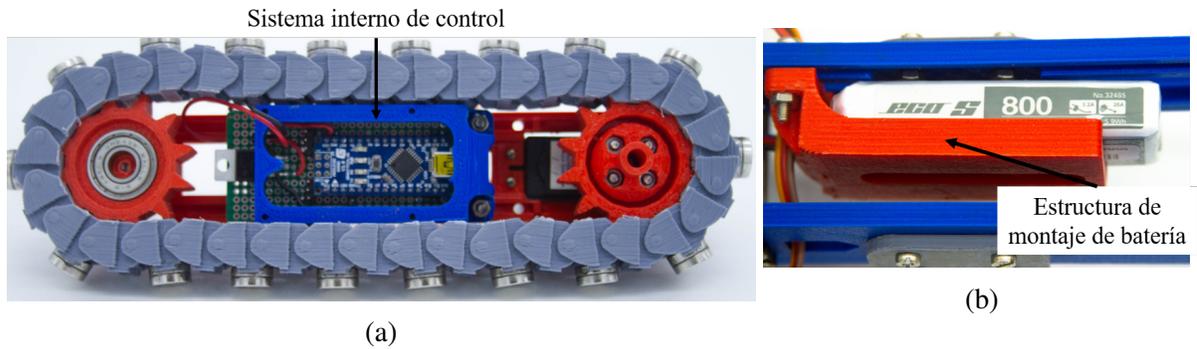


Figura 4.16: Cada subsistema del robot cuenta con una estructura de acople al bastidor.

### Sistema de control

El sistema de control se montó sobre una placa pcb (una placa con una lámina de cobre perforada que soporta los componentes electrónicos y circuitos integrados) dimensionada de manera tal que se ubique dentro de uno de los sistemas del robot. Para unir los circuitos eléctricos se hace uso del puesto de soldadura con cautín del laboratorio de robótica del DIMEC.

Con la electrónica lista y probada se diseña e imprime la estructura que la mantenga fija dentro del robot. El resultado de esto se puede observar en la Figura 4.17 donde se indican los distintos componentes electrónicos y la estructura de acople al bastidor.

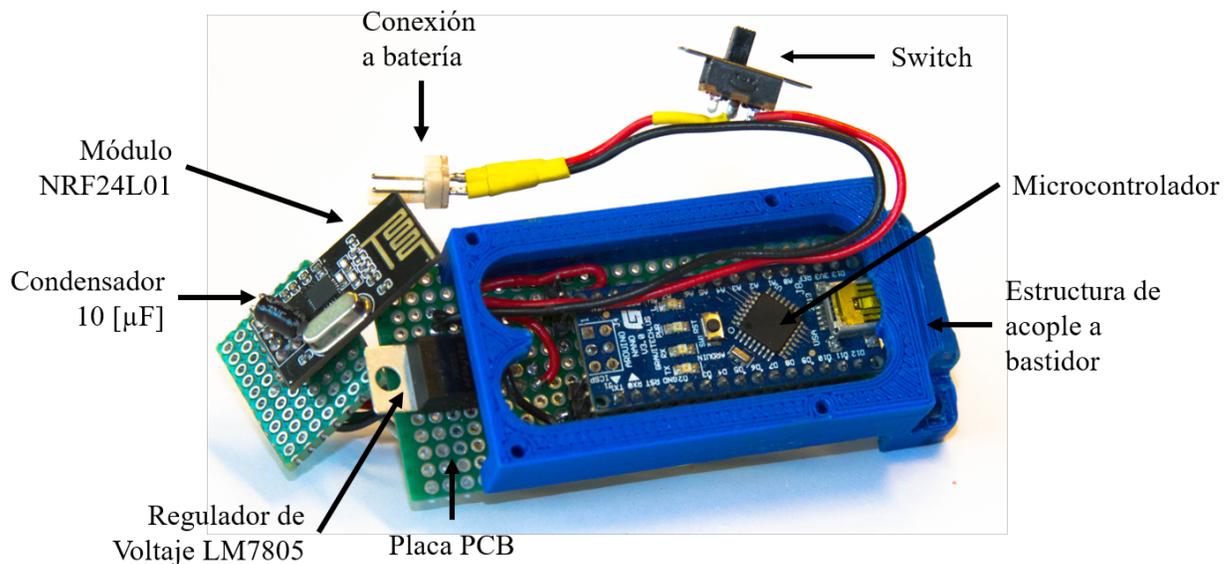


Figura 4.17: Resultado de fabricación del sistema de control.

El sistema está diseñado de manera tal que se pueda desmontar fácilmente del bastidor y se pueda acceder sin problemas al puerto USB del microcontrolador para realizar actualizaciones en el programa controlador.

De manera similar, se fabrica el sistema controlador del control remoto. Tras probar y corroborar su correcto funcionamiento se diseña una estructura que lo contenga sin problemas y sea cómodo al momento de operarlo.

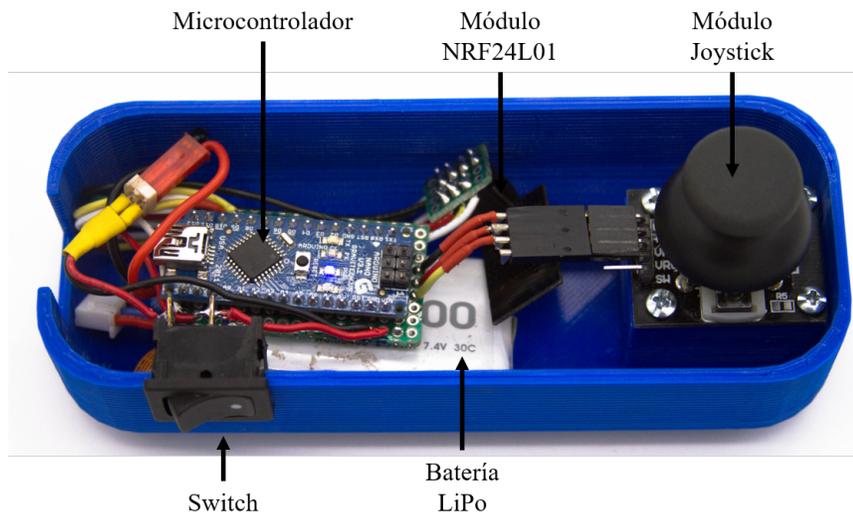


Figura 4.18: Control remoto fabricado con sus componentes señalizados.

La estructura está diseñada de manera tal que el módulo joystick se pueda atornillar a esta y el switch calce de manera justa en uno de sus costados. Además el resto de los componentes se puede remover simplemente desconectándolos entre sí, ya que se fabricaron con conexiones tipo macho-hembra. También, si se desea cargar la batería, la estructura cuenta con un espacio en su extremo donde se pueden sacar los cables de esta y cargarla sin necesidad de desmontar el resto de los componentes. En la Figura 4.18 se puede apreciar el control remoto sin tapa con sus componentes electrónicos visibles.

Los planos para la fabricación del control remoto se presentan en la Figura A.8 de la sección de anexos.

# Capítulo 5

## Diseño y programación de software

### 5.1. Estrategia de control

Teniendo como objetivo la implementación de un sistema de control a distancia del robot y tomando en cuenta que lo que se necesita controlar es el movimiento de dos servomotores, se propone un sistema de control similar al que utilizan los autos a control remoto o *RC Cars*, donde se tiene un dispositivo controlador emisor que envía señales al dispositivo controlador receptor para realizar una acción (e.g.:mover las ruedas).

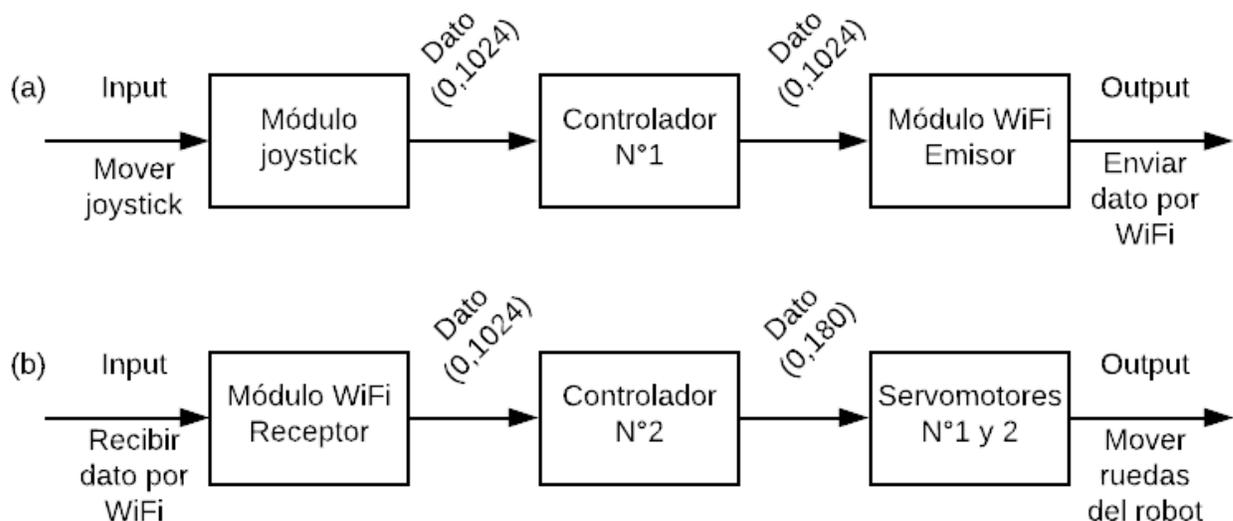


Figura 5.1: Diagrama de bloques para manejar por control remoto el robot. (a) Emisor y (b)Receptor.

De esta manera se propone una estrategia de control de lazo abierto con el uso de módulos transceptores WiFi modelo NRFL24101 para comunicar ambos controladores y el uso de un joystick

para determinar si los motores avanzan o retroceden. Un diagrama de bloques representa de manera simplificada en la Figura 5.1, la cual se puede relacionar con la Figura 2.8 ya que ambas representan sistemas de control de lazo abierto, es decir, sin retroalimentación. En esta Figura se puede notar que para el manejo del robot a distancia se necesitan dos sistemas controladores, uno que decodifica la señal del control remoto para enviarla al robot y otro que recibe la señal del control remoto y ordena al robot a moverse. Esto se logra de la siguiente manera:

1. En el sistema controlador instalado en el control remoto se mueve la palanca del joystick en su eje X, lo que genera un valor de 10 bits (*i.e.* entre 0 y 1024). De no moverse, el valor es el de la mitad (512).
2. Este valor es leído por el controlador N°1 y ordena al módulo transceptor WiFi N°1 a enviar una señal por WiFi con el valor entre 0 a 180. Esto ocurre repetidamente cada intervalo de tiempo que se desee, el cual se designó como 0,1 [s].
3. En el sistema controlador instalado en el robot se recibe el valor por medio de otro módulo transceptor WiFi (N°2).
4. El controlador N°2 escala el dato de 0 a 1024 a un valor entre 0 a 180, ya que estos son los valores con los que se manejan los niveles de rotación de los servomotores.
5. El controlador N°2 ordena a ambos servomotores moverse en sentido horario (si este se encuentra entre 0 y 89) o en sentido antihorario (si el valor está entre 91 y 180).
6. Los servomotores hacen girar los engranes de cada parte del robot de manera que las cadenas con los imanes comienzan a moverse desplazándolo.

## 5.2. Diseño del circuito eléctrico

### 5.2.1. Comunicación entre controladores

Con el objetivo de incorporar un sistema de control a distancia se tienen en consideración, principalmente, dos alternativas: WiFi y Bluetooth. De estas dos se selecciona la comunicación por medio de WiFi con ayuda de dos módulos NRF24L01. Esto principalmente debido a que los dispositivos WiFi tienen un rango de distancia de operación (hasta unos 300 metros) considerablemente mayor a los dispositivos Bluetooth (hasta unos 30 metros). Poniendo este aspecto sobre una balanza es claro que la mejor alternativa es el módulo WiFi ya que el objetivo final del trabajo es el de la fabricación de un robot para la inspección en puentes, por lo que la distancia de operación es un aspecto de gran relevancia. Algunas de las características de mayor relevancia en el módulo NRF24L01 se presentan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Características relevantes del módulo WiFi NRF24L01.[2]

<b>Voltaje de alimentación [V]</b>	1.9-3.6
<b>Consumo nominal [nA]</b>	900
<b>Frecuencia de operación [GHz]</b>	2.4
<b>Dimensiones [mm]</b>	15.2 x 28.8

Una vez con el dispositivo de comunicación seleccionado se procede a elaborar un circuito para probar la correcta comunicación entre un dispositivo emisor y uno receptor. En la Figura 5.2 se muestra un esquema del circuito diseñado, donde se puede observar se incorporó un condensador entre los pines de GND y 3.3V del módulo WiFi ya que esto ayuda a regular la señal ya que suaviza los pics de corriente en este.

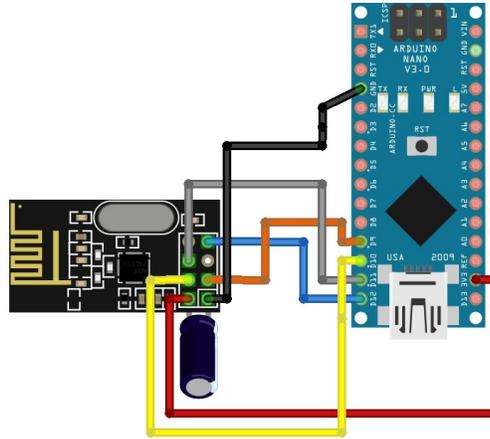


Figura 5.2: Esquema del circuito eléctrico para establecer comunicación entre módulos WiFi.

Para estas pruebas no se requirió uso de una fuente de poder externa como una batería, ya que el controlador se alimentó directamente por medio del cable USB y el módulo WiFi a través del pin 3.3[V]. Se utilizan los pins 9 al 13 para la comunicación entre dispositivos, de la manera:

Tabla 5.2: Distribución de los pins del módulo NRF24L01 al microcontrolador Arduino Nano.

<i>V</i>	<i>3V3</i>
<i>GND</i>	<i>GND</i>
<i>CE</i>	<i>D9</i>
<i>CSN</i>	<i>D10</i>
<i>MOSI</i>	<i>D11</i>
<i>MISO</i>	<i>D12</i>
<i>SCK</i>	<i>D13</i>

### 5.2.2. Circuitos finales

Los circuitos finales son los que se construyeron como se observa en la sección 4.2 y fueron instalados en su estructura correspondiente (control remoto y robot). Aquí ya se vuelve necesario el uso de baterías para lograr que cada uno de los circuitos sea totalmente independiente. De esta manera las baterías seleccionadas son de Polímero de Litio o LIPO de 7.4[V] y 400 [mAh] para el control remoto y 800 [mAh] para el robot. La razón de este voltaje de 7.4 [V] es ya que el controlador trabaja dentro de un rango de alimentación 7-12[V]. En la Figura 5.3 se observa el diagrama representativo del circuito para el control remoto y en la Figura 5.4 se observa el diagrama para el circuito del sistema de control del robot.

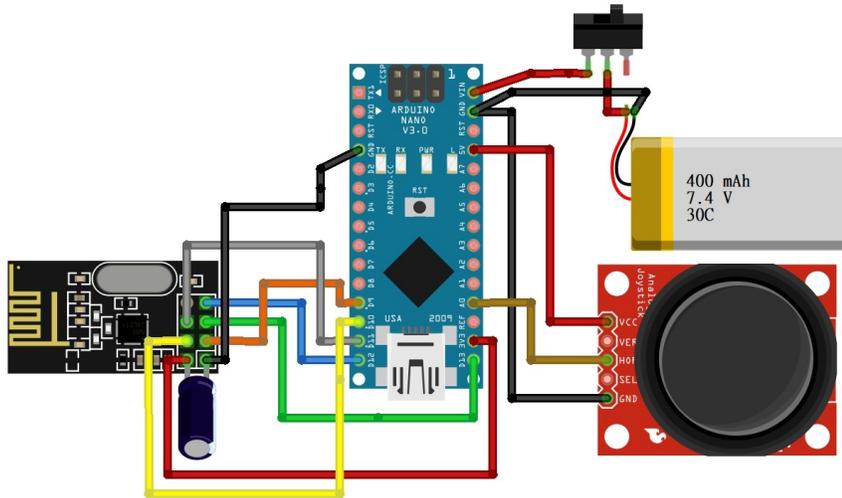


Figura 5.3: Esquema del circuito eléctrico para el sistema de control a distancia.

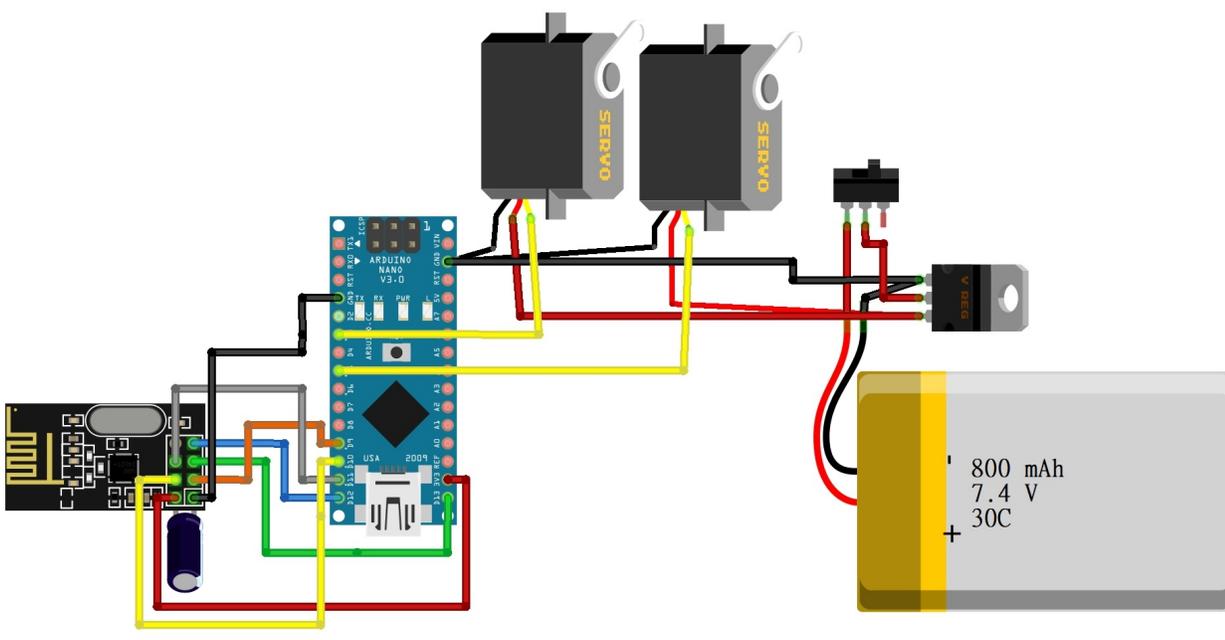


Figura 5.4: Esquema del circuito eléctrico para el sistema de control instalado en el robot.

En la Figura 5.4 se observa que se utilizó un regulador de voltaje modelo LM7805[21] el cual se utiliza para reducir los 7.4 [V] de la batería a los 5[V] que son el voltaje de operación de los servomotores. Además se puede apreciar que ambos servomotores son alimentados directamente del regulador de voltaje. Esto es debido a que si se hubiesen alimentado desde el pin de 5V del controlador no se habrían podido operar ya que si bien el voltaje es correcto, la demanda de corriente de ambos actuadores supera al *output* de corriente máximo de 40 [mA] del controlador [22].

Es importante notar también que para que el circuito funcione correctamente es necesario que todas las tierras (*GND*) deben de estar conectadas, tal como se ve en las Figuras 5.3 y 5.4 con los cables negros.

Además, en ambas Figuras es posible notar la incorporación de un switch de bypass en el positivo de la batería. Esto es agregado con el objetivo de poder encender y apagar el circuito sin la necesidad de tener que conectar y desconectar la batería cada vez.

En las Figuras B.2 y B.2 de los anexos se presentan los esquemáticos del circuito eléctrico presentado en las figuras 5.3 y 5.3.

## **5.3. Programación**

Previo a escribir el código de control final es necesario asegurarse del correcto funcionamiento de los módulos transceptores NRF24L01. Esto se hizo con ayuda de un ejemplo de la librería NRF24.[23] A partir de este ejemplo se pueden rescatar las líneas de código más relevantes para establecer la comunicación deseada entre ambos módulos e incluirlas en el código final.

### **5.3.1. Código del control a distancia**

Una vez se tienen claros los elementos a utilizar se procede a escribir el código encargado del control a distancia. El funcionamiento del código se explica a continuación:

- Incluir librería RF24 instalada para controlar el módulo transceptor.
- Se define el pin utilizado en el controlador Nano, en este caso el pin análogo A0.
- Se definen los parámetros del transceptor como el canal a usar, la velocidad de baudios (9600), poder y velocidad de transmisión.
- Se define el módulo NRF24L01 como un módulo transmisor.
- Se genera una lectura del valor que genera el Joystick en su eje X por medio de la función `analogRead(x_key)`. Este valor es guardado en la variable `x_pos` creada previamente.
- Se envía la variable `x_pos` por medio de WiFi para que el módulo receptor la reciba.
- El proceso de envío de datos es repetido periódicamente, en este caso se trabajó con 100 milisegundos.

El código utilizado se presenta en el Listing C.1 de la sección de anexos.

### **5.3.2. Código de control del robot.**

De manera similar el código controlador del robot es confeccionado como se muestra en el Listing B.2 de los anexos. Su método de funcionamiento es similar al mostrado previamente, pero se deben de modificar y añadir ciertos elementos como:

- Se incluye la librería Servo a modo de poder controlar ambos servomotores.
- Se declaran ambos servomotores a controlar como “myServo1” y “myServo2”.

- Se crean las variables “x\_pos\_1” y “x\_pos\_r”, las cuales tendrán el valor que el servomotor deba de moverse.
- Se define el módulo NRF24L01 como un módulo receptor.
- La variable “x\_pos” enviada por el transmisor es recibida, escalada a un valor entre 0 a 180 y almacenada en las variables variables “x\_pos\_1” y “x\_pos\_r”. Se puede notar que una de las variables es la inversa de la otra, esto se hace así ya que para que el robot pueda avanzar es necesario que las ruedas giren en dirección opuesta una de la otra. En caso contrario estas se contrarrestarían entre ellas.
- Se envía la orden a los servomotores de moverse en función del valor leído.
- Al igual que en el código anterior, el proceso se repite cada 100 milisegundos.

El código utilizado se presenta en el Listing C.2 de la sección de anexos.

# Capítulo 6

## Resultados de fabricación, ensayos y discusión

### 6.1. Resultados de fabricación

Para decidir si cierto diseño del robot tiene potencial, es necesario evaluarla de cierta manera para que esta pase ciertos filtros. Por esta razón, previa a la fabricación del prototipo final se fabrica un prototipo más básico para validar aspectos del funcionamiento del diseño escogido.

#### 6.1.1. Validación de la idea

Teniendo a mano un equipo de impresión 3D resulta fácil construir un prototipo funcional y realizar pruebas de adhesión, como se observa en la Figura 6.1, y de locomoción.

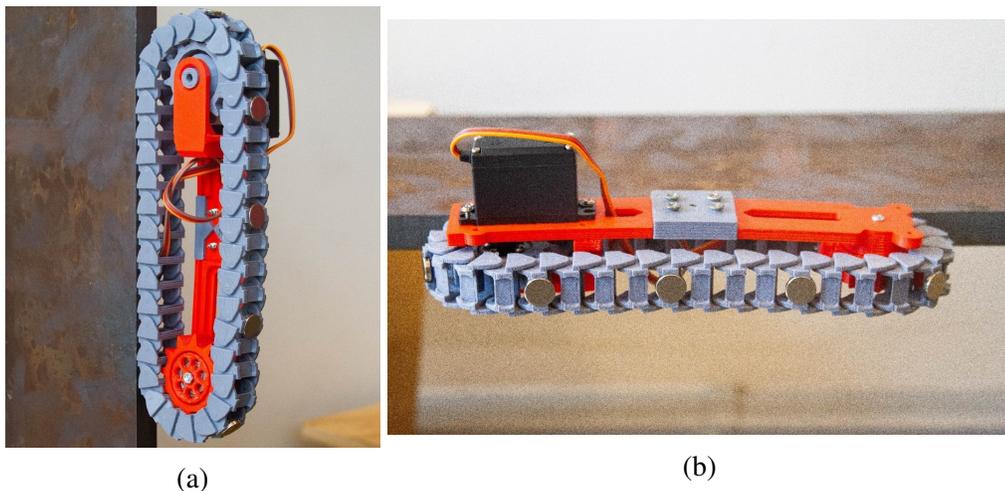


Figura 6.1: Pruebas de adhesión de los imanes para validar la idea. (a) Prototipo adherido a superficie de manera vertical y (b) Prototipo adherido de manera horizontal.

Las primeras pruebas experimentales que se realizaron son las del primer prototipo, esto con los fines de evaluar la factibilidad de esta primera idea de diseño. A este prototipo se le adhirieron tan sólo 9 imanes. Estas pruebas resultaron prometedoras respecto de la fuerza de los imanes de Neodimio y el mecanismo de locomoción utilizado, ya que con tan sólo 3 imanes actuando a la vez el robot es capaz de sujetarse sin caerse de la superficie metálica, además de que el prototipo resultó ser capaz de desplazarse sobre la viga sin ningún obstáculo. Tras esta primera validación de la idea se decide seguir con ella y elaborarla hasta lograr los objetivos planteados.

Habiendo mejorado el robot hasta llegar a las primeras versiones del prototipo final, se procedió a realizar distintas pruebas caracterizando su desempeño y realizando las modificaciones que se estimen convenientes para mejorarlo.

### 6.1.2. Resultado final de la fabricación del prototipo final

El resultado final del robot fabricado se muestra en la Figura 6.2 donde se muestra acompañado del control remoto. Este cuenta ya con tensores de cadenas en ambos sistemas de orugas mejorando sustancialmente su desempeño ya que asegura la correcta adhesión de cada imán cuando el robot se está moviendo. El resultado de la electrónica interna tanto del robot como del control remoto se pueden apreciar en las Figuras 4.17 y 4.18 de la sección anterior. Se utiliza una batería LiPo de 800 [mAh] para motorizar el robot y una de 400 [mAh] para el control remoto.

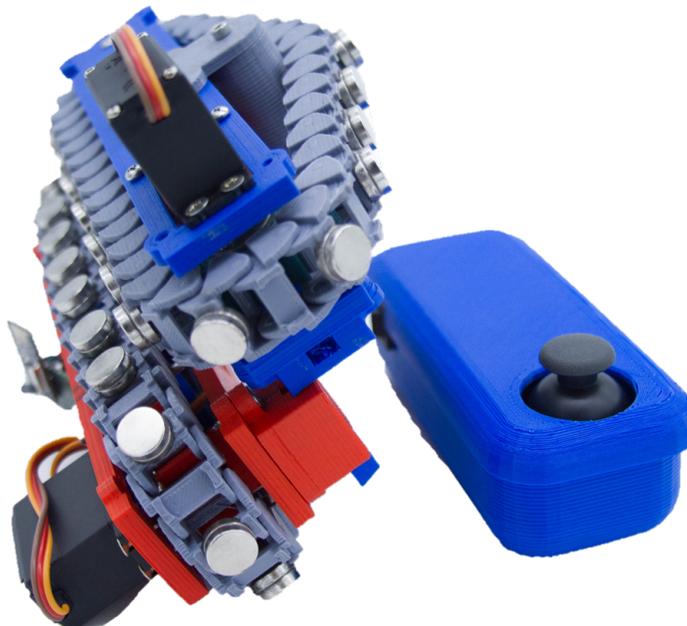


Figura 6.2: Resultado de fabricación del robot y el control remoto.

Se cuenta con las siguientes características:

## Dimensiones

Para un sistema de orugas se tienen los siguientes parámetros señalados en la tabla 6.1:

Tabla 6.1: Dimensiones de un sistema de orugas ensamblado.

<b>Largo [mm]</b>	210
<b>Alto [mm]</b>	100
<b>Ancho [mm]</b>	40 (sin servomotor)
	70 (con servomotor)

Mientras que para el robot completo, es decir, para los dos sistemas de orugas se tienen las dimensiones de la Tabla 6.2

Tabla 6.2: Dimensiones de ambos sistemas de orugas armados.

<b>Largo [mm]</b>	210
<b>Alto [mm]</b>	150
<b>Ancho [mm]</b>	150

Finalmente, para el control remoto fabricado se tienen las medidas indicadas en la tabla 6.3:

Tabla 6.3: Dimensiones del control remoto fabricado.

<b>Largo [mm]</b>	120
<b>Alto [mm]</b>	60
<b>Ancho [mm]</b>	60

## Peso

Los pesos de distintos elementos se presentan a continuación:

Tabla 6.4: Pesos relevantes de distintos elementos incluidos para la fabricación del robot.

<b>Robot [gr]</b>	860
<b>Cadena [gr]</b>	130 (con 36 imanes)
<b>Batería 800mAh [gr]</b>	40
<b>Control remoto [gr]</b>	150

De estos datos se puede comentar que el sistema completo de ambas orugas pesan menos de 1[Kg], lo cual no lo hace particularmente pesado. Sin embargo es notable que con 260 [gr] entre ambas cadenas constituyen un 30 % del peso total del robot, más que cualquier otro elemento por sí solo.

## 6.2. Análisis estático y dinámico de fuerzas de adhesión

El análisis estático y dinámico de las fuerzas involucradas en el robot es importante para derivar los requerimientos del mecanismo de adhesión magnética.

Aquí se presentan diferentes DCL's con el robot adhiriéndose a una superficie vertical y se analizan distintas condiciones. Para esto se hace la simplificación en 2D tomando un subsistema de orugas.

### 6.2.1. Análisis estático de fuerzas

Para que el robot escalador de superficies magnéticas se pueda mover sobre una superficie plana de manera segura necesita cumplir con ciertas restricciones. Cuando el robot se mantiene sobre una superficie vertical, este se encuentra sometido a fuerzas como la gravedad, la fuerza de adhesión magnética de los imanes, la fuerza de reacción de la superficie y la fricción entre el robot y la superficie, las cuales se denotan como  $F_{m_i}, N_i, G, F_f$  respectivamente. (Nota: se toma  $G = m \cdot g$ , donde  $m$  es la masa del robot y  $g$  la aceleración de gravedad.)

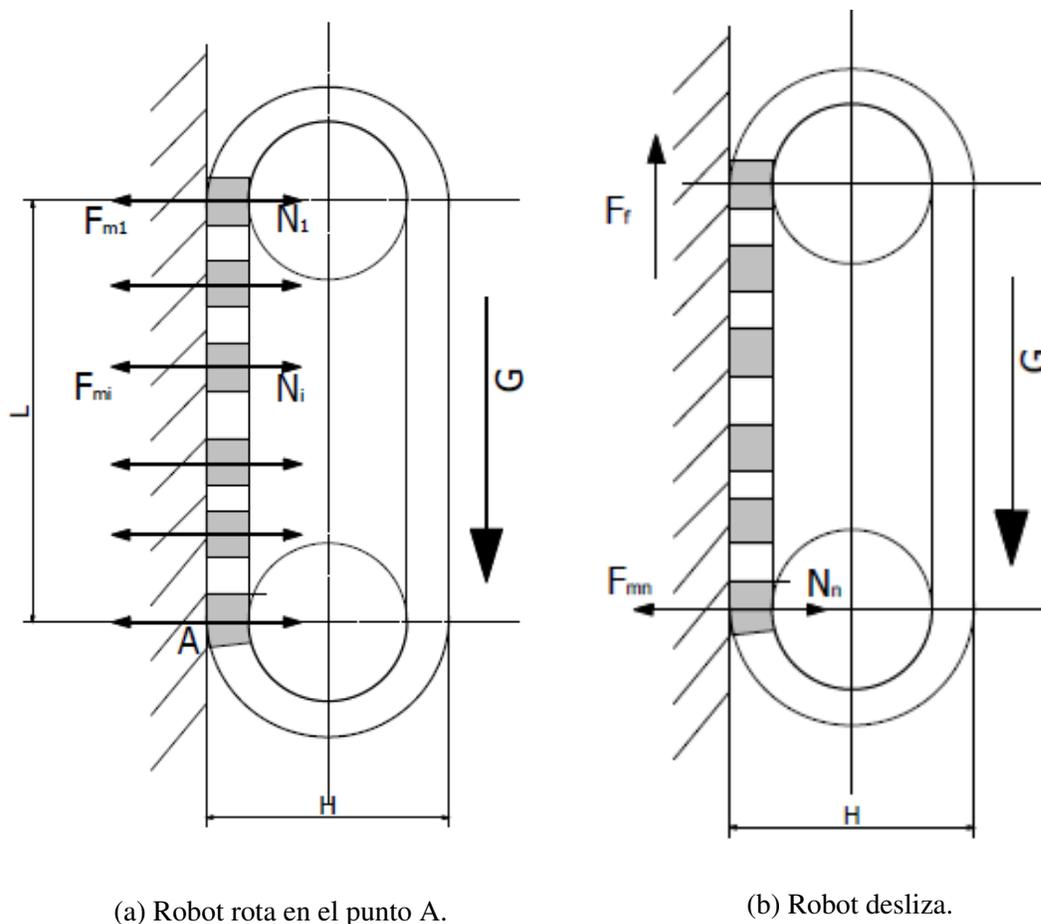


Figura 6.3: Diagramas de cuerpo libre mostrando las fuerzas de adhesión magnética, las fuerzas normal, gravedad y de fricción.  $F_{m_i}, N_i, G, F_f$  respectivamente.

Son tres los casos para el análisis de fuerzas cuando el robot se mantiene estático sobre la superficie metálica vertical.

### 1. Robot rota respecto de punto A.

En un comienzo se mantiene un estado de equilibrio donde se cumple,

$$\sum_{i=1}^n F_{m_i} = \sum_{i=1}^n N_i \quad (6.1)$$

Si el robot rota respecto del punto A, como se muestra en la Figura 6.3a, la primera unidad magnética se despegará. En el punto A se tiene entonces el siguiente balance de momentum,

$$\sum M_A = (F_{m_1} - N_1)L - GH/2 = 0 \quad (6.2)$$

Donde  $L$  es la distancia entre el primer imán y el punto A,  $H/2$  es la distancia de la superficie metálica y el centro de masa del robot. De (6.2) se obtiene,

$$F_{m_1} = \frac{GH}{2L} + N_1 \quad (6.3)$$

Si la primera unidad magnética está en contacto con la superficie se tiene,

$$N_1 \geq 0 \quad (6.4)$$

Por lo que (6.3) se puede reescribir como,

$$F_{m_1} \geq \frac{GH}{2L} \quad (6.5)$$

Por lo tanto, cada unidad magnética deberá de cumplir con (6.5).

### 2. Robot desliza sobre la superficie

Cuando el robot se mantiene adherido a la superficie como se muestra en la Figura 6.3b y la fuerza de adhesión de los imanes es pequeña, el robot deslizará hacia abajo. Para superar tal problema, se tiene la restricción,

$$F_f \geq G \quad (6.6)$$

Tomando el coeficiente de fricción como  $\mu$ , se tiene,

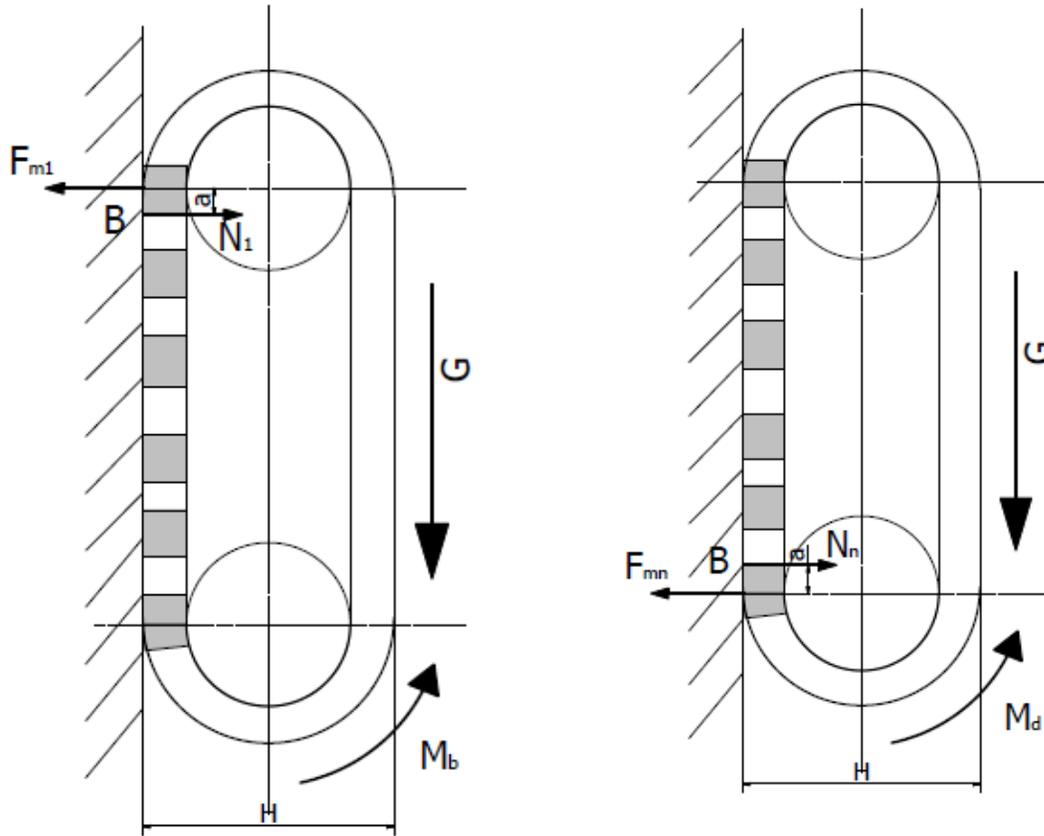
$$F_f = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \mu = \sum_{i=1}^n F_{m_i} \cdot \mu = nF_m \cdot \mu \quad (6.7)$$

Con (6.6) y (6.7) se obtiene,

$$F_m \geq \frac{G}{n \cdot \mu} \quad (6.8)$$

Con (6.5) y (6.8) se obtiene entonces,

$$F_m \geq \max \left\{ \frac{GH}{2L}, \frac{G}{n \cdot \mu} \right\} \quad (6.9)$$



(a) Robot descende por su propio peso.

(b) Robot se desplaza hacia arriba.

Figura 6.4: Diagramas de cuerpo libre para casos estáticos y dinámicos del robot.  $M_b$  es el torque de frenado de la transmisión del motor y  $M_d$  el torque para movilizar al robot otorgado por el motor.

### 3. Los eslabones rotan sobre la pared

Cuando el robot se mantiene de manera estática sobre la superficie vertical, de no haber torque por parte del motor para frenar la rotación de uno de sus ejes el riel de eslabones empezaría a moverse haciendo que el robot comience a descender por su propio peso.

Como se muestra en la Figura 6.4a, escogiendo el punto B como punto de apoyo para la rotación del riel de eslabones, se toma como supuesto un  $M_b$  como el torque de freno de la transmisión del motor. De esta manera se tiene:

$$M_B = M_b + F_{m1} \cdot a - GH/2 = 0 \quad (6.10)$$

Entonces,

$$M_b = GH/2 - F_{m1} \cdot a \quad (6.11)$$

Donde  $a$  es la distancia entre  $N_1$  y  $F_{m1}$ .

## 6.2.2. Análisis dinámico de fuerzas

Para el análisis dinámico se tienen dos casos para el movimiento del robot, cuando este asciende la estructura metálica y cuando la desciende.

### 1. Robot asciende la estructura metálica

Para que el robot sea capaz de escalar verticalmente, el servomotor debe de ser capaz de otorgar un torque  $M_d$  suficiente para movilizarlo, como se observa en la Figura 6.4b se tiene el balance de momentum en el punto B,

$$M_d - F_{m_n} \cdot a + GH/2 = 0 \quad (6.12)$$

depejando  $M_d$ ,

$$M_d = F_{m_n} \cdot a + GH/2 \quad (6.13)$$

donde  $a$  es la distancia entre  $N_n$  y  $F_{m_n}$ .

### 2. Robot desciende la estructura metálica

Cuando el robot desciende a velocidad constante, se tiene el siguiente balance de momentum en el punto B de la Figura 6.4a,

$$M_B = M_b + F_{m1} \cdot a - M_d - GH/2 = 0 \quad (6.14)$$

obteniéndose,

$$M_d = M_b + F_{m1} \cdot a - GH/2 \quad (6.15)$$

Con estas ecuaciones planteadas se pueden calcular los parámetros del motor para su selección.

## 6.2.3. Requerimientos del mecanismo de adhesión y locomoción

Se procede a calcular los valores mínimos para  $F_m$  y  $M_d$  para que el robot mantenga su adhesión y sea capaz de movilizarse a través de la estructura metálica. Se utilizan los valores presentados en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5: Valores de parámetros para ecuaciones planteadas.

Parámetro	Valor	Unidad
<b>m</b>	0.43	[kg]
<b>G</b>	4.21	[N]
<b>H</b>	0.05	[m]
<b>L</b>	0.15	[m]
<b>a</b>	0.006	[m]
$\mu$	0.6	-
<b>n</b>	6	-

$$F_m \geq \max \left\{ \frac{4.21 \cdot 0.05}{2 \cdot 0.15}, \frac{4.21}{6 \cdot 0.6} \right\} \quad (6.16)$$

obteniéndose,

$$F_m \geq \max \{7.01, 1.17\} [N] \quad (6.17)$$

Se tiene entonces que para cumplir con las condiciones de no despegarse, ni deslizar de la superficie, cada imán debe de tener una fuerza de atracción de al menos  $7.01[N]$ .

Utilizando las ecuaciones (2.1) y (2.2) se calcula el valor del campo magnético un imán de NdFeB cilíndrico de  $12 \times 6$  [mm] (equivalente a dos imanes de  $12 \times 3$  [mm] unidos). Estos imanes son de grado N38, por lo que el valor de  $B_r$  es de  $1.24 [T]$ . [24]

con  $z = 0$ ,

$$B = \frac{1.24}{2} \left( \frac{0.006}{\sqrt{0.006^2 + 0.006^2}} \right) = 0.438 [T] \quad (6.18)$$

$$F_m = \frac{0.438^2 \cdot \pi \cdot 0.006^2}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 17.3 [N] \quad (6.19)$$

lo cual es mayor a  $7.01[N]$ , por lo que los imanes tienen una fuerza apropiada.

Luego, con la ecuación (6.13) se calcula el torque mínimo  $M_d$  para que el robot sea capaz de trepar verticalmente,

$$M_d = 17.3 \cdot 0.006 + 4.21 \cdot 0.05 / 2 = 0.209 [N \cdot m] = 2.13 [kg \cdot cm] \quad (6.20)$$

lo cual es menor al torque máximo del servomotor seleccionado MG996R [19] para la locomoción del robot, cuya capacidad llega hasta los  $12.5 [Kg \cdot cm]$ .

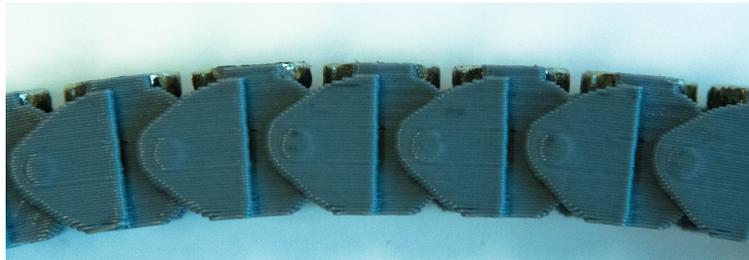
Tras el análisis estático y dinámico se obtiene finalmente que tanto los imanes como los servomotores seleccionados cumplen con los requerimientos de fuerza de adhesión y torque mínimos para que el robot sea capaz de adherirse a una superficie metálica sin deslizar y pueda también movilizarse a través de esta.

## 6.3. Pruebas experimentales

### 6.3.1. Pruebas de locomoción y adhesión

Ya con el robot construido y funcional, se procede a realizar las primeras pruebas de locomoción sobre el montaje experimental fabricado. Inicialmente las cadenas del robot cuentan con un imán en cada eslabón ya que se tiene la hipótesis de que esa configuración de imanes debería de ser suficiente para funcionar, sin embargo tras avanzar unos 40 centímetros sobre la viga el robot comienza a desviarse y eventualmente caer. Haciendo observaciones se nota que tanto la tensión de la cadena como la fuerza de los imanes no eran suficientes para que el sistema de orugas que va por debajo de la viga pueda adherirse a la superficie metálica cuando se encuentra en movimiento. Esto es debido a que la gravedad afecta considerablemente a este subsistema de orugas, que al tener una cadena con holgura suficiente empieza a colgar de esta y sutilmente los imanes dejan de adherirse a la superficie metálica hasta el punto en que la adhesión completa del robot se ve sacrificada.

Por estas razones se debieron buscar soluciones a la falta de fuerza de los imanes y al problema de la falta de tensión en la cadena. Se probaron distintas configuraciones de los imanes en los eslabones como se muestra en la Figura 6.5, añadiendo, sustrayendo y reconfigurando su disposición sobre la cadena.



(a) Un imán en cada eslabón.



(b) Doble imán en cada eslabón.



(c) Doble imán en eslabón por medio.

Figura 6.5: Configuraciones de las cadenas probadas.

De todas estas configuraciones, se lograron los siguientes resultados:

- Con un imán en cada eslabón el robot es capaz de desplazarse no más de 40-50[cm] antes de desvirarse hacia abajo y caer. Esto debido en parte a su menor potencia de su campo magnético, lo que cuando se combina con una falta de tensión en las correas resulta en que el sistema de orugas inferior comience a colgar a medida que avanza. Lo que resulta en un desvío del robot completo.
- Con doble imán en la oruga que va por debajo de la viga el robot es capaz de desplazarse a través de la viga sin caer. El efecto de la tensión es aún notable ya que se observa como la oruga inferior tiende a colgar, sin embargo este efecto es compensado por la mayor fuerza de atracción de los imanes hacia la superficie ferromagnética de la viga.  
A pesar de poder movilizarse, este resultado no se considera satisfactorio ya que es bastante inestable, soporta poco peso y cualquier perturbación vertical puede desviar al robot haciendo que pierda su adhesión inferior haciendo que caiga. Además, tener una cantidad tan elevada de imanes aumenta sustancialmente el peso del robot.
- Con doble imán intercalado se logra un equilibrio entre ambas configuraciones anteriores. Se tiene el mismo peso de la primera y la fuerza de adhesión de la segunda. El robot puede movilizarse a través de la viga sin problemas y soporta más peso que la configuración anterior. Sin embargo se puede aún notar que la falta de tensión produce un efecto perjudicial en el desempeño del robot, haciéndolo más inestable y disminuyendo su fuerza de adhesión.

Evaluando estas tres configuraciones es claro que la más óptima es la tercera. Esto ya que se obtiene la misma fuerza de adhesión que la segunda opción, mientras que el peso se reduce a la mitad de esta.

## **Tensión de las cadenas**

Normalmente, los sistemas de cadenas que se utilizan no suelen incluir un sistema de tensión, ya que se consideran inextensibles. Esto se puede ver por ejemplo en las cadenas de bicicletas de piñón fijo. Sin embargo, estas son de metal y no de plástico, por lo que es bastante más directo llegar a considerarlas inextensibles.

En un comienzo cuando se diseña la estructura del robot, se hace de forma tal que una cadena de 36 eslabones se puede montar de manera bastante justa y con poca holgura, aplicándole con cierta tensión inicial. Por esta razón el diseño se trabajó con la hipótesis de que la tensión inicial de la cadena sería suficiente para asegurar un desempeño satisfactorio del robot. Sin embargo, a medida que se va probando el robot, las cadenas empiezan a someterse a ciclos de esfuerzos que van haciendo que esta vaya cediendo, estirándose y provocando una holgura que se ve reflejada en la pérdida de tensión.

Notando durante las pruebas que la falta de tensión en las correas produce un efecto negativo en el desempeño del robot se crea un diseño lo más simple y rápido de implementar posible para solucionar este problema. Se diseñan y fabrica un tensor cilíndrico que se monta con un pasador a una subestructura apernada al bastidor, tal como se observa en la Figura 6.6. El cilindro tensor es de 23 [mm] de diámetro y con este se logra volver a tensar la correa de manera tal que al probarla en funcionamiento el robot se adhiere y moviliza por la estructura a la de manera mucho más refinada.

La oruga inferior ya no cuelga y el mecanismo de locomoción se vuelve más eficiente y estable.

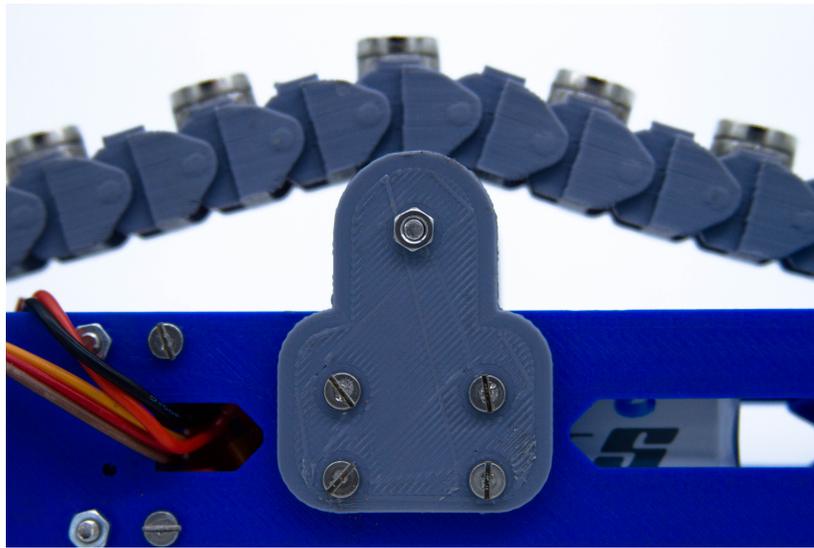


Figura 6.6: Tensor fabricado para solucionar los problemas de pérdida de adhesión.

Una mejora que se propone para la mejora hacia una siguiente versión del robot considera la incorporación de un sistema de resortes que ajusten el nivel del tambor tensor. El largo de los resortes se podría modificar por medio de tornillos de contención. De esta manera el nivel de tensión de la cadena se puede ajustar según se requiera. Además, este diseño le permitiría al robot una mayor suavidad al momento de enfrentarse a superficies más irregulares. Similar a como actúa la suspensión de un automóvil.

### 6.3.2. Pruebas con obstáculos

Con el sistema de locomoción pulido se propone caracterizar el desempeño del robot cuando existen ciertos obstáculos en la superficie sobre la que se adhiere. Esto ya que en condiciones de operación en terreno pueden existir obstáculos imprevistos con los que el robot se podría encontrar como suciedad, corrosión, grietas, deformaciones y cambios en el nivel de la superficie. De estos, se decide estudiar el desempeño del robot cuando se encuentra con un cambio del relieve inferior, en particular simulando un refuerzo de la viga inferior.

Para probar el desempeño del robot en esta situación se adhiere una placa plana de acero bajo la superficie de la viga de manera que esta llegue hasta el canto de esta y el robot deba de encontrarse con tal obstáculo como se muestra en la Figura 6.7. Se utilizan placas de 1, 2, 3 y 4 [mm] de un largo de 80[mm] a lo largo de la viga, obteniéndose como resultado que el robot es capaz de sobrellevar este obstáculo hasta la placa de 3 [mm]. Al pasar por la placa de 4[mm] el robot comienza a desviarse hacia abajo hasta caer.

Analizando estos resultados se observa que una de las razones principales de que el robot no sea capaz de superar tal obstáculo es debido a que la cadena no posee suficiente juego debido al

tensor implementado. Esto hace que el robot sea excepcional en superficies planas, pero no puede adaptarse bien a estos tipos de superficies.

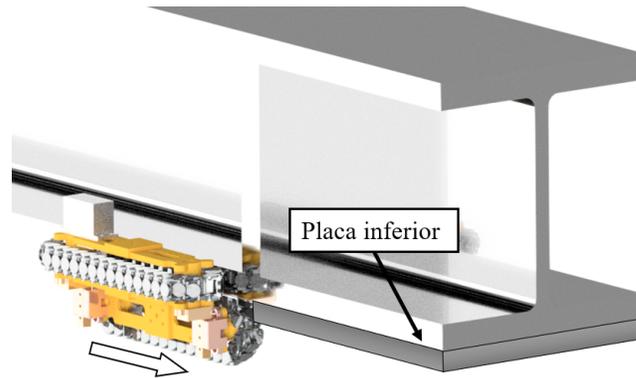


Figura 6.7: Representación de como se puso la placa bajo el montaje experimental simulando un obstáculo de refuerzo inferior

Se formula la hipótesis de que si el sistema tensor tuviese una mayor versatilidad en cuanto a la tensión que aplica, el robot sería capaz de sobrellevar obstáculos de este tipo de aún mayor altura. Esto se podría lograr implementando un sistema tensor que utilice un elemento elástico como un resorte o una goma deformable. De esta forma, se podría ajustar automáticamente la fuerza con la que el tensor empuja las cadenas.

### 6.3.3. Carga máxima

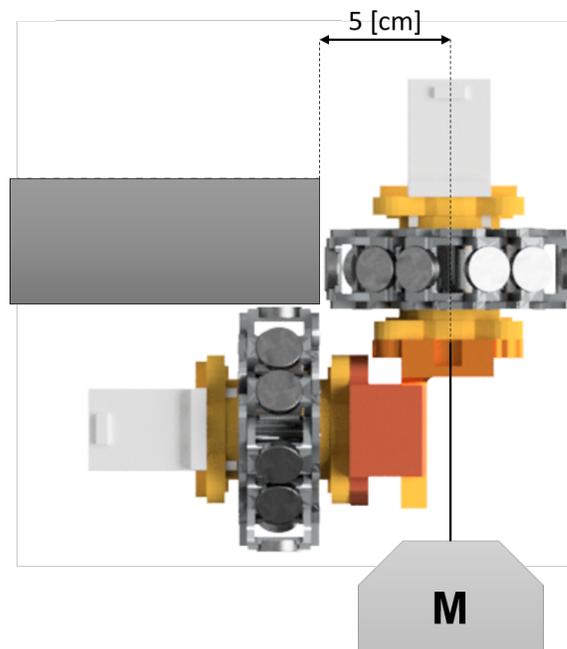


Figura 6.8: Esquema representando como se montó el peso para las pruebas del robot cargado.

Tras lograr que el diseño final del robot sea capaz de movilizarse a través de la viga sin presentar ningún tipo de inconveniente, es relevante estudiar el comportamiento de este una vez se le agrega más peso. Esto ya que el objetivo a futuro del robot es que tenga integrado un sistema de inspección a su estructura con el fin de que se pueda implementar en las inspecciones de los puentes ferroviarios.

Para caracterizar su desempeño cargando peso se formuló la siguiente metodología de trabajo:

1. Se ata un cordel al la parte del bastidor que se adhiere por el borde de la viga. Este se ata de manera tal que el peso cuelga bien centrado desde la mitad de la estructura generando torque con un brazo de 5 [cm]. Tal como se muestra en la Figura 6.8 el cordel sujeta un peso de masa “M” que se va variando.
2. Se comienza por con una carga inicial de 100 [gr] y se hace que el robot se desplace a través de la viga, la que está a su vez marcada cada 12 [cm], que corresponden a un 20% de la carrera máxima que puede dar el robot sobre el montaje.

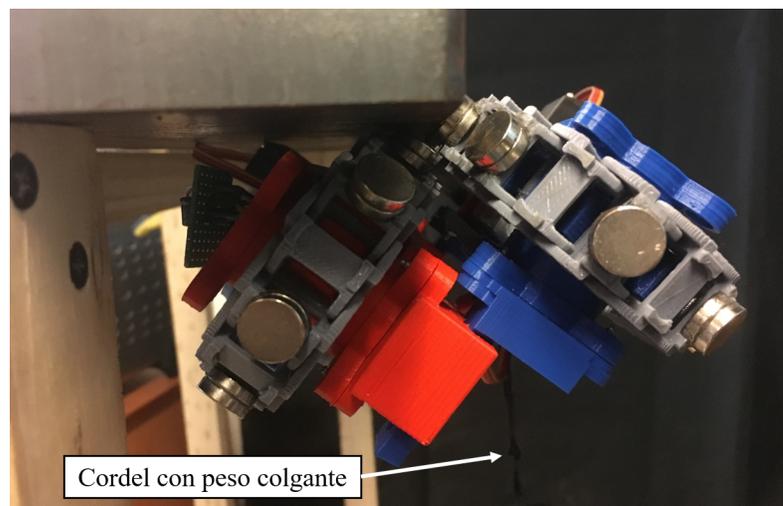


Figura 6.9: Robot colgando de la viga de manera crítica. Puede moverse cortas distancias antes de caer.

3. Se anota y describe el desempeño del robot en la tabla 6.6. Se crean cuatro marcadores que describen el desempeño del robot. Estos son:
  - ✓: El robot es capaz de superar la etapa desplazándose por la viga sin ningún problema o anomalía. También lo logra sin problemas yendo en reversa.
  - ○: El robot es capaz de superar la etapa desplazándose por la viga pero se notan ciertas inestabilidades como:
    - Se observa que los imanes del borde no están pegados en un 100% sino que se encuentran pegados entre un 80% - 50% según se le añade más peso.
    - El robot tiende a desviarse cuando va en reversa.
    - Se empieza a notar el efecto de la falta de tensión haciendo que el robot se movilece con cierta inclinación hacia abajo.
  - ●: Desequilibrio crítico. El robot pierde adhesión de los imanes y se va hacia abajo adhiriéndose a la viga con una superficie de imanes mucho menor como se muestra en

la Figura 6.9. Puede seguir avanzando cortas distancias antes de caer.

– **X**: El robot pierde su adherencia totalmente y se cae.

4. Se adhieren 100 [gr] más y se repite el proceso. Para poder agregar el peso de manera precisa se hace uso de una báscula digital.

Durante todo momento en que el robot se encuentra montado sobre la estructura de la viga se tienen al menos 6 (pares de) imanes en constante contacto con la superficie metálica por cada subsistema de orugas.

En la tabla 6.6 se puede observar como el robot es capaz de trasladar pesos sin ningún problema hasta los 900 [gr]. Con cargas de 1 - 1.2 [Kg] también puede trasladarse sin caer pero se puede observar que los imanes de la estructura lateral pierden superficie de adhesión, lo que provoca una menor fuerza de sujeción y se considera más inestable. Superando los 1.4 [Kg] el robot deja de ser capaz de trasladarse sin la eventualidad de una caída. Sin embargo se puede notar que de manera estática la estructura puede soportar hasta un máximo de casi 3 [Kg] sin despegarse, lo que muestra la gran fuerza de adhesión de los imanes de Neodimio.

Tabla 6.6: Desempeño del robot desplazándose con peso.

Peso [Kg]	Porcentaje de la viga superado					
	0	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
0.1	✓	✓	✓	✓	✓	✓
0.2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
0.3	✓	✓	✓	✓	✓	✓
0.4	✓	✓	✓	✓	✓	✓
0.5	✓	✓	✓	✓	✓	✓
0.6	✓	✓	✓	✓	✓	✓
0.7	✓	✓	✓	✓	✓	✓
0.8	✓	✓	✓	✓	✓	✓
0.9	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1	✓	✓	✓	✓	○	○
1.1	✓	✓	✓	✓	○	○
1.2	✓	✓	✓	○	○	○
1.3	✓	✓	○	○	○	●
1.4	✓	○	○	●	●	✗
1.5	✓	○	●	✗		
1.6	✓	○	●	✗		
1.7	✓	●	✗			
1.8	✓	●	✗			
1.9	✓	✗				
2	✓	✗				
2.1	✓	✗				
2.2	○	✗				
2.3	○	✗				
2.4	○	✗				
2.5	○	✗				
2.6	○	✗				
2.7	●	✗				
2.8	●	✗				
2.9	●	✗				
3	●	✗				

### 6.3.4. Consumo eléctrico y vida de la batería

La vida de la batería es un aspecto relevante que se debe de conocer respecto de los dispositivos inalámbricos, ya que esta debe de ser la suficiente como para asegurar un desempeño apropiado al realizar la tarea para la que esté diseñado. Por esta razón se realizan dos métodos para estimar la duración de la batería LiPo implementada de 800 [mAh].

## Consumo nominal

Realizar un cálculo teórico respecto del consumo eléctrico es simple, para esto se necesitan nada más los valores del consumo eléctrico de cada componente activo en el circuito en [mA] y los [mAh] de capacidad de la batería. Estos valores se presentan en la tabla 6.7.

Tabla 6.7: Consumos nominales en [mA] de los actuadores del robot.

Elemento	Consumo nominal [mA]	Cantidad	Total consumo [mA]
Servo MG996R	500 - 900	2	~1400
Módulo NRF24L01	12	1	12
Arduino Nano	19	1	19

Sumando los totales de consumo se tiene un total de 1431 [mA], de esta manera si se dividen los 800 [mAh] en los 1431[mA] de la manera:

$$\frac{800[mAh]}{1431[mA]} = 0.56[hr]$$

lo que equivale a 33 minutos de duración de la batería. Lo cual se puede considerar razonable, tomando en cuenta que dispositivos como los drones tienen una duración por batería cercana a los 20 minutos.

## Consumo medido

Para poder medir el amperaje que el robot consume en operación se debe de realizar un pequeño montaje experimental, el cual requiere de una resistencia y una herramienta de medición de voltaje como un multímetro o un osciloscopio. En este caso se opta por usar un osciloscopio ya que con esta herramienta se es capaz de analizar de manera más precisa el comportamiento de la corriente en el circuito. El montaje consta de conectar una resistencia (lo más baja posible) en serie entre la conexión de la batería y el resto del circuito. De esta forma se puede medir con el osciloscopio el voltaje sobre la resistencia y por medio de la relación  $V = I * R$  se es posible calcular la corriente que pasa por el circuito. Una representación del método de medición utilizado se muestra en la Figura 6.10. La resistencia utilizada durante las pruebas tiene un valor nominal de 1 [ $\Omega$ ].

En simples pasos el procedimiento a seguir para obtener el consumo es el siguiente:

1. Regular el osciloscopio. Es necesario calibrarlo con ayuda del output de 5 [V] con el que cuenta.
2. Conectar el osciloscopio en paralelo a la resistencia.
3. Medir el voltaje a través de la resistencia. Se hace uso de los reguladores de escala del osciloscopio para observar apropiadamente la señal de la corriente.
  - Para medir el voltaje de consumo promedio se comienzan a mover los servomotores durante unos 5 segundos de forma que el promedio obtenido corresponde solo a este intervalo estacionario que se muestra en la Figura 6.11.

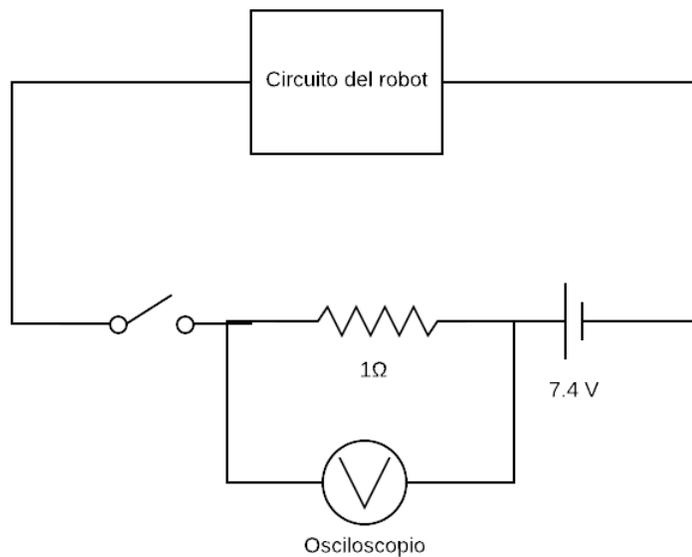


Figura 6.10: El voltaje es medido en paralelo a la resistencia para obtener la corriente que pasa por el circuito en serie.

Con este simple procedimiento se pueden obtener de manera precisa el voltaje que el circuito consume cuando está en *standby*, el *peak* cuando se comienza a mover el robot y cuando se encuentra moviéndose de manera continua. Estos valores se pueden observar en la Figura 6.11, donde los valores de voltaje más bajos del principio y final corresponden a cuando el circuito se encuentra en *standby*, es decir, con el circuito cerrado pero sin activar los servomotores.

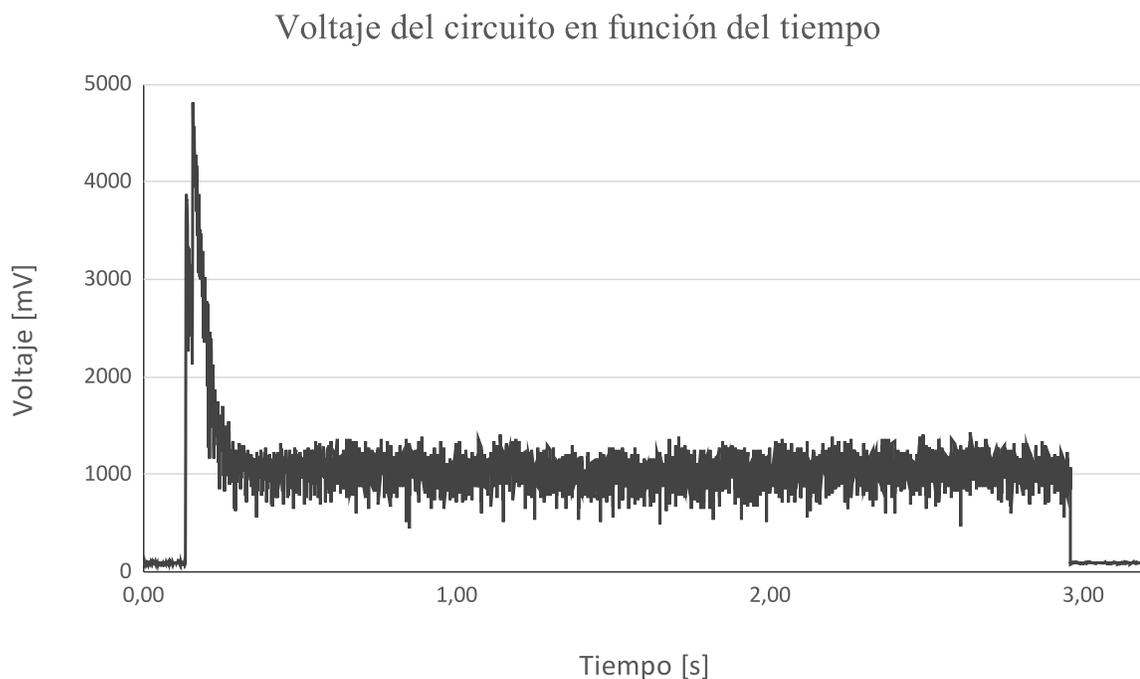


Figura 6.11: Datos extraídos del osciloscopio. Se observan los voltajes de consumo en *standby*, al momento de gatillar el movimiento y cuando el movimiento de los actuadores es continuo.

Los valores promedio de voltaje que se midieron son:

- Standby: 92 [mV]
- En movimiento: 1019 [mV]

Utilizando la ley de Ohm se puede calcular el amperaje utilizado en movimiento continuo, lo cual con una resistencia de 1 [ $\Omega$ ] resulta trivial como:

$$\frac{1019[mV]}{1[\Omega]} = 1019[mA]$$

Realizando el mismo cálculo que en la sección anterior se obtiene una duración de la batería de 0.79 [hr] o 47 minutos. Lo cual resulta mayor a lo que se había calculado desde un principio. De todas formas, se debe de mencionar que esta prueba se realizó en ausencia de resistencia hacia los servomotores, salvo por la tensión de la cadena que aumenta el roce en esta. Esto muestra que para mover las cadenas del robot los servomotores aplican un valor de fuerza cercano al mínimo de estos.

Luego, se estima que si se le aplica más peso al robot y/o se le exige movilizarse a través de superficies inclinadas o verticales, la vida de la batería disminuya ya que los servomotores consumirían más corriente. De esta manera el valor real debiera de acercarse más al calculado nominalmente.

Cabe mencionar que la corriente que se consume en *standby* se despreció de igual forma que los *peaks* que ocurren cuando se comienzan a movilizar los motores.

## Control remoto

Teniendo resultados relativamente cercanos se puede tomar la suposición de que para el cálculo de la vida del control remoto no haya tanta diferencia con lo que se pueda medir. Además, teniendo tan sólo un Arduino Nano y un módulo NRF24L01 el consumo nominal es tan bajo (31 [mAh]) que no vale la pena hacer el mismo procedimiento para medir el consumo real.

Utilizando entonces los consumos nominales de este sistema controlador se obtiene un total de vida de batería de 12.9 [hr] para el control remoto. Resultado esperable ya que sus componentes gastan muy poco y la batería está sobredimensionada para su función.

## 6.4. Pruebas en terreno

Para realizar las pruebas en terreno se hizo una visita al puente ferroviario Aconcagua localizado a 138 [Km] al norte del centro de la región metropolitana, tomando un aproximado de 1:30 [hr] para llegar. Este resulta ideal para probar el desempeño del robot ya que presenta varios tipos de configuraciones en sus estructuras metálicas como se observa en la Figura 6.12. En esta Figura también se señalan las distintas geometrías en las que se desplegó y probó el robot.

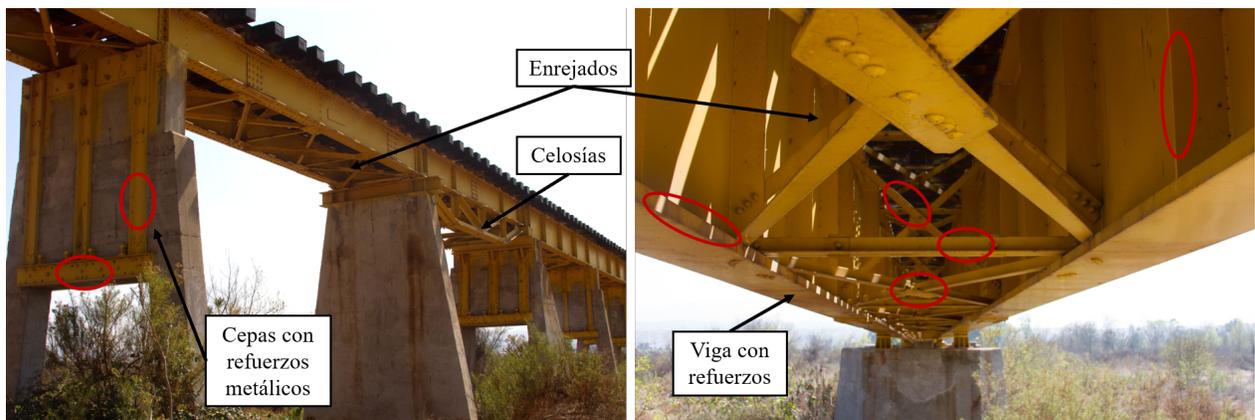


Figura 6.12: Puente Aconcagua con distintas de sus geometrías señaladas. En rojo se indican los tipos de estructuras por los que se probó el funcionamiento del robot.

La primera prueba que se realizó es la que se muestra en la Figura 6.13, donde el robot se monta sin ninguna carga agregada en el borde de una de las vigas laterales del puente. Esta cuenta con un refuerzo de atiesador vertical tal como en el montaje experimental fabricado y tiene un grosor de 50[mm].

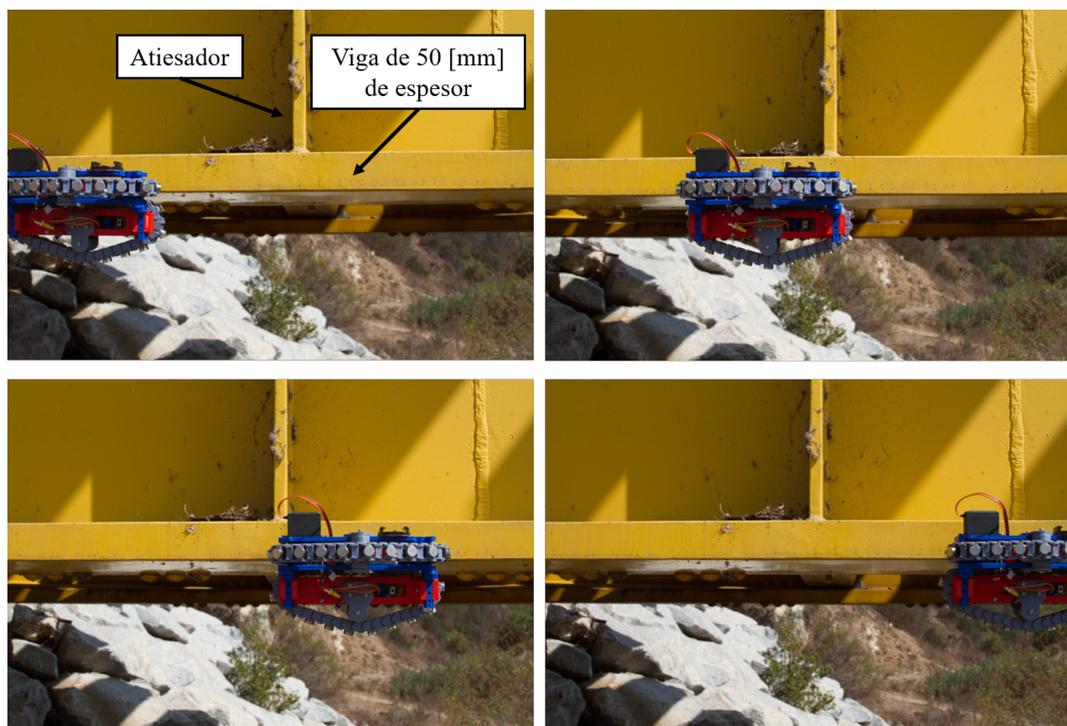


Figura 6.13: Transición de movimiento del robot a través de una viga ferroviaria de 50[mm] de espesor.

Como se puede apreciar en la Figura 6.13, el robot es capaz de desplazarse sin problemas por el borde de la viga superando el obstáculo del atiesador y manteniendo en todo momento su adhesión a la viga.

Tras este resultado exitoso se procede a hacer la misma prueba con el robot cargando una cámara GoPro con la que se pueden obtener videos y fotografías de alta definición del alma de la viga.



Figura 6.14: Transición de movimiento del robot cargando una cámara GoPro para la toma de datos.



Figura 6.15: Imagen tomada desde cámara GoPro. Se puede observar una gran porción del alma de la viga.

Los resultados de esta prueba con peso resultaron bastante satisfactorios ya que el robot fue capaz de movilizarse de igual manera que en la prueba anterior, como se muestra en la Figura 6.14. Lo cual es de esperar ya que el peso de la cámara implementada es de 220 [gr], aproximadamente un cuarto de la capacidad máxima de carga testeada en el robot (ver Tabla 6.6).

En la Figura 6.15 se observa una captura de imagen tomada durante la prueba con la cámara. en esta se logra distinguir un cordón de soldadura en el alma de la viga. Obteniendo resultados prometedores en tras las pruebas descritas anteriormente se procede a investigar el desempeño del robot en configuraciones estructurales distintas como lo son las barras de los enrejados del puente. Estas son considerablemente más delgadas que las probadas anteriormente, ya que tienen

espesores de entre 10 - 12[mm], menor incluso que los 20 [mm] de la viga utilizada en el montaje experimental para las pruebas en laboratorio.



Figura 6.16: Transición de movimiento del robot sobre superficie horizontal de un enrejado interior del puente. Las barras metálicas tienen un grosor de 12.5[mm].

Primero el robot monta sobre una estructura de enrejado horizontal y se procede a movilizarlo, resultando en un movimiento fluido y sin desviaciones de la estructura. Este logra desplazarse sin mayor inconveniente en ambos sentidos de la estructura como se observa en la Figura 6.16.



Figura 6.17: Transición de movimiento del robot sobre superficie inclinada de un enrejado interior del puente. Las barras metálicas tienen un grosor de 10[mm].

Luego se procede a probar la funcionalidad del robot haciéndolo que se desplace a través de los enrejados inclinados de la estructura, prueba que el robot logra superar de igual manera que la anterior, manteniendo su adhesión a la superficie firmemente en todo momento. Este es capaz de trepar como de descender la estructura inclinada como se aprecia en la Figura 6.17.

Finalmente, la última prueba que se realiza es la que se muestra en la Figura 6.18, donde se evalúa la capacidad del robot en un plano vertical. De la misma manera, el resultado de la prueba es exitoso, ya que el robot es capaz de subir y bajar la por la estructura manteniendo en todo momento su adhesión y disposición inicial sobre la el refuerzo metálico de las cepas.



Figura 6.18: Transición de movimiento del robot sobre superficie vertical en cepas del puente. El grosor de las barras es de 10[mm].

### Sobre la operación en terreno



Figura 6.19: Operario manejando el robot a distancia. Aproximadamente a unos 35 [m] del dispositivo.

Además de caracterizar el desempeño en las distintas configuraciones estructurales del puente Aconcagua, se pueden validar ciertas características de la operación en terreno como lo son el alcance del control remoto y los métodos de despliegue del robot.

En cuanto al alcance de la señal de los módulos transceptores se obtiene que estos logran funcionar sin problemas hasta una distancia de 50 - 60 [m] aproximadamente. A partir de este punto

el robot logra captar órdenes del control remoto pero no en un 100%, lo que no se consideraría satisfactorio. De todas formas, se estima que con el rango que se tiene debiese de ser suficiente para operar el robot en terreno ya que como se observa en la Figura 6.19, el operario debe de estar a cierta distancia no muy grande para observar donde se encuentra y hacia donde va el robot.

Aún así, si se deseara solucionar este inconveniente menor, se podría implementar un módulo transceptor NRF24L01 con antena [25], con el cual se aumentaría a un rango de señal de al menos 500 [m] en campo abierto.

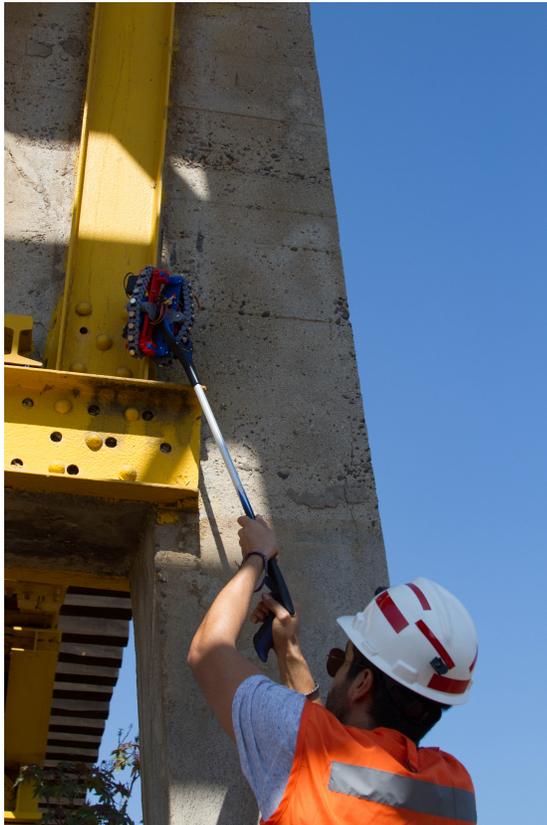


Figura 6.20: Metodología de despliegue y retiro del robot para estructuras difíciles de alcanzar.

Por su parte, desplegar el robot en las superficies metálicas con los fines de realizar pruebas se hace en su totalidad de manera manual en zonas de acceso fácil y ambiente controlado. De esta manera se puede rescatar el robot en caso de una eventualidad de caída. Sin embargo, para poder realizar inspecciones satisfactorias de las estructuras ferroviarias es necesario desplegar el robot en zonas de difícil acceso, a las que no se podría llegar sin involucrar cierto riesgo en el operador.

En la Figura 6.20 se observa como el operador utiliza la herramienta *Grip N' Grab*, descrita en la sección de Metodología, para extender su alcance y poder desplegar el robot en una zona de difícil acceso. Esto muestra que la implementación de un sistema de despliegue que extienda el alcance del operador es de suma relevancia al momento de hacer este proyecto uno factible. Tal sistema, debiese de ser suficientemente largo para alcanzar estructuras más alejadas aún y necesitaría contar con un sistema de agarre al robot más adecuado que le permita posicionarlo a su medida. Se estima que con 1.5 a 2 [m] de alcance podrían ser los adecuados para dicho sistema de despliegue propuesto.

Finalmente, en la Tabla 6.8 se presenta un resumen con los distintos resultados obtenidos tras las pruebas en laboratorio y en terreno.

Tabla 6.8: Características de navegación del prototipo final fabricado.

<b>Grosor de la estructura</b>	Desde 10 [mm] en adelante
<b>Orientación de la estructura</b>	Horizontal, vertical e inclinada
<b>Tipos de superficies</b>	Planas ferromagnéticas
<b>Obstáculos inferiores</b>	Hasta 3[mm]
<b>Carga máxima</b>	Hasta 1.2 [kg]
<b>Duración de batería</b>	30 [min]

# Conclusión

## Cumplimiento de objetivos

Respecto a los objetivos específicos planteados para la realización del presente trabajo de título se concluye lo siguiente:

Se diseña, fabrica y se implementa un montaje experimental para la realización de pruebas en laboratorio utilizando como principales materiales barras de madera y planchas de acero dimensionadas. El montaje muestra ser una del tipo y dimensiones adecuadas para realizar distintos tipos de ensayos en el robot simulando apropiadamente una condición en terreno con vigas y obstáculos en forma de refuerzos estructurales de estas.

Se diseña, fabrica e implementa un prototipo funcional de robot que es capaz de navegar la viga ferromagnética tanto con como sin obstáculos siguiendo la metodología propuesta en la sección 2.2.1. Se diseñó y fabricó un primer prototipo capaz de navegar la viga sin ningún obstáculo el cual sirvió para validar la idea de diseño para continuar elaborándola hasta añadirle la capacidad de superar los obstáculos de refuerzo de las vigas.

Se diseña una estrategia de control de lazo abierto con la función de comunicar un sistema controlador a distancia del robot de forma inalámbrica utilizando módulos transceptores WiFi. Tal sistema es fabricado montando los componentes a una placa pcb de dimensiones tales que es sea lo suficientemente compacta para caber dentro del robot (sistema controlador receptor) y dentro de un control remoto (sistema controlador emisor). Se utilizan baterías LiPo las cuales proporcionan una vida de aproximadamente 30 minutos para el robot y de casi 13 horas para el control remoto.

Se realizaron diversos tipos de pruebas experimentales que permiten caracterizar distintos aspectos del desempeño del robot a modo de prepararlo para una futura implementación en terreno. Con las pruebas que se realizaron en el laboratorio se logra caracterizar el funcionamiento de los sistemas de adhesión y locomoción del robot, su capacidad de cargar un peso cercano a 1 [Kg] sin problemas, la vida de la batería e incluso el desempeño de este frente a a otros tipos de obstáculos bajo la superficie sobre la que navega.

Se logra realizar una salida a terreno a un puente ferroviario que presenta distintos tipos de geometrías en sus estructuras metálicas, en las cuales se despliega el robot. El desempeño del robot logra ser bastante satisfactorio ya que se prueba sobre estructuras metálicas desde 1[cm] a 5 [cm] de espesor pudiendo navegar a través de estas manteniendo completamente su adhesión. Las pruebas se realizaron en planos horizontales, inclinados y verticales, en las que el robot mostró gran

potencial desplazándose a través de estas sin caerse ninguna vez.

Además, si bien se encontraba fuera de los alcances, se montó una cámara *GoPro* sobre la estructura del robot para realizar pruebas de este desplazándose cargando un sistema de inspección visual tanto en laboratorio como en terreno. Se tomaron videos y fotografías de lo que se puede observar con esta cámara.

Por lo que se cumplen satisfactoriamente los cinco objetivos específicos planteados para el trabajo.

Finalmente, se demuestra que el robot implementado cumple con el objetivo general del trabajo siendo capaz de desplazarse a través de estructuras metálicas de celosías manteniendo su adhesión. Además, se describen técnicamente las características principales del sistema implementado y se generan videos de las distintas pruebas en laboratorio y en terreno.

## Conclusiones generales

El robot tiene un alto potencial para ser aplicado en la inspección de estructuras ferroviarias como las celosías. Las características del sistema de locomoción y de adhesión lo hacen desempeñarse de manera ideal para estructuras longitudinales metálicas con un espesor mínimo de 1[cm] en adelante. Además, este es capaz de desplazarse en ambientes realistas con presencia de suciedad, corrosión e irregularidades menores en la superficie del terreno.

El sistema de control a distancia presenta un alto rango de operación, de al menos 50 metros (nominalmente son 100). Este se puede aumentar aún más reemplazando los módulos transceptores por su versión que tiene antena, aumentando el rango de la señal hasta más de 500 metros. Sin embargo, esto no se considera realmente necesario ya que la posibilidad de llegar a necesitar un rango de señal tan elevado es bastante baja.

El bajo costo en materiales para la fabricación del robot y la simpleza que otorga la manufactura por impresión 3D elevan el potencial que tiene el robot para seguir siendo investigado y mejorado hasta obtener todo lo necesario para ser implementable en rutinas de inspección en terreno por operarios capacitados.

El tema de las alineaciones es de suma importancia en este tipo de robot, ya que esto asegura el correcto funcionamiento del sistema de locomoción guiada que presenta. El espacio de tolerancia que deja para alguna desalineación de un componente es bastante bajo, cercano a 1[mm]. Por esta razón es importante que el proceso de fabricación produzca piezas con las tolerancias lo más precisas posibles.

Para el despliegue del robot en estructuras complicadas de acceder se hace uso de una herramienta *Grip N' Grab* extendiendo el alcance del operador en más de 80 [cm]. Sin embargo, para lograr alcanzar todas las distintas estructuras de un puente se requiere de un alcance aún mayor.

El robot diseñado y fabricado no presenta un sistema de inspección incorporado, sin embargo, este demuestra ser bastante capaz de cargar con uno sin mayor inconveniente debido a su fuerza de

adhesión.

## Limitaciones

Con ayuda de las pruebas de caracterización y evaluación de las capacidades del robot se pueden encontrar las siguientes limitaciones en su diseño:

- Los desniveles en la superficie inferior por la que se desplaza el robot mayores a 3 [mm] resultan altamente difíciles para este de superar debido a que la tensión de las cadenas les quita capacidad de adaptarse a superficies más irregulares.
- El movimiento del robot es unidireccional, es decir solo se puede mover de frente y en reversa longitudinalmente a través de las vigas. Esto provoca que para inspeccionar un puente se deba desplegar manualmente en cada una de las estructuras metálicas por inspeccionar.

## Trabajo futuro

Tras los análisis de las distintas pruebas realizadas surgen las siguientes posibilidades para continuar desarrollando y mejorando el robot:

- Incorporar al trabajo el desarrollo de un sistema de despliegue del robot para posicionarlo en lugares más difíciles de acceder. Este podría ser similar al mecanismo utilizado en la figura 3.4, agregándole un mayor largo y una extremidad de agarre que se adapte mejor a las dimensiones del robot.
- Incorporar un sistema de inspección por vibraciones y/o visual al robot.
- Modificar el sistema de tensión de las cadenas por uno que utilice resortes para ajustar el nivel de tensión aplicada.
- Reemplazar las cadenas impresas en PLA por otras manufacturadas en un plástico inextensible. Esto eliminaría la necesidad de un sistema tensor, pero elevaría los costos de manufactura ya que probablemente se necesiten de diseñar y fabricar moldes para el proceso de manufactura.
- Incorporar otro sistema de manufactura automatizado para fabricar piezas con tolerancias más exactas y más rígidas. Las piezas de la estructura del bastidor se podrían fabricar en duraluminio con ayuda de una máquina CNC como la Tormach que se encuentra en el FabLab.
- Optimizar el espacio que se tiene disponible dentro del robot. Los servomotores se podrían incluir a este espacio utilizando un sistema de transmisión de torque hacia el engrane de locomoción y la pcb se podría compactar más aún para que utilice menos espacio.
- Añadir actuadores que le den la capacidad al robot de reconfigurar su disposición sobre la superficie metálica, de forma que sería capaz de evitar otros tipos de obstáculos como los desniveles verticales bajo la superficie de las vigas.

# Bibliografía

- [1] B. Chu, K. Jung, C.-S. Han, and D. Hong, “A survey of climbing robots: Locomotion and adhesion,” *International journal of precision engineering and manufacturing*, vol. 11, no. 4, pp. 633–647, 2010.
- [2] Nordic Semiconductor ASA, “NRF24L01 Product Specification.” [https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss\\_Preliminary\\_Product\\_Specification\\_v1\\_0.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf), 2019. En línea, visitado por última vez el 07/04/2019.
- [3] M. Minor, H. Dulimarta, G. Danghi, R. Mukherjee, R. L. Tummala, and D. Aslam, “Design, implementation, and evaluation of an under-actuated miniature biped climbing robot,” in *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000)(Cat. No. 00CH37113)*, vol. 3, pp. 1999–2005, IEEE, 2000.
- [4] M. Armada, M. Prieto, T. Akinfiev, R. Fernández, P. G. de Santos, E. Garcia, H. Montes, S. Nabulsi, R. Ponticelli, J. Sarria, *et al.*, “On the design and development of climbing and walking robots for the maritime industries,” *Journal of Maritime Research*, vol. 2, no. 1, pp. 9–32, 2005.
- [5] D. Longo and G. Muscato, “A modular approach for the design of the alicia3 climbing robot for industrial inspection,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 31, no. 2, pp. 148–158, 2004.
- [6] J. Sánchez, F. Vázquez, and E. Paz, “Machine vision guidance system for a modular climbing robot used in shipbuilding,” in *Climbing and Walking Robots*, pp. 893–900, Springer, 2006.
- [7] J. Zhu, D. Sun, and S.-K. Tso, “Development of a tracked climbing robot,” *Journal of Intelligent and robotic Systems*, vol. 35, no. 4, pp. 427–443, 2002.
- [8] C. Balaguer, A. Gimenez, and C. Abderrahim, “Roma robots for inspection of steel based infrastructures,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 29, no. 3, pp. 246–251, 2002.
- [9] H. Ahmadzadeh and E. Masehian, “Modular robotic systems: Methods and algorithms for abstraction, planning, control, and synchronization,” *Artificial Intelligence*, vol. 223, pp. 27–64, 2015.
- [10] T. Dunn, “Basics of control systems,” in *Flexible Packaging*, pp. 103–110, Elsevier, 2015.

- [11] Z. Bi, Y. Guan, S. Chen, H. Zhu, and H. Zhang, “A miniature biped wall-climbing robot for inspection of magnetic metal surfaces,” in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 324–329, IEEE, 2012.
- [12] J. Seo, L. Duque, and J. Wacker, “Drone-enabled bridge inspection methodology and application,” *Automation in Construction*, vol. 94, pp. 112–126, 2018.
- [13] R. A. Serway and J. W. Jewett, *Physics for scientists and engineers with modern physics*. Cengage learning, 2018.
- [14] A. Cordero Simunovic, “Electromagnetismo,” 2012.
- [15] W. Bolton, *Instrumentation and control systems*. Newnes, 2015.
- [16] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, *et al.*, “A summary review of vibration-based damage identification methods,” *Shock and vibration digest*, vol. 30, no. 2, pp. 91–105, 1998.
- [17] F. Neitzel, B. Resnik, S. Weisbrich, and A. Friedrich, “Vibration monitoring of bridges,” *Reports on Geodesy*, 2011.
- [18] Instructables, “Chasis de robot con orugas.” <https://www.instructables.com/id/Chasis-De-Robot-Con-Orugas-Impresas-En-3D/>, 2019. En línea, visitado por última vez el 07/04/2019.
- [19] Rambal Ltda., “Servomotor MG996R.” [http://rambal.com/servomotor/639-servo-motor-13-kg-cm-metalico-giro-continuo.html?search\\_query=servo+360&results=3](http://rambal.com/servomotor/639-servo-motor-13-kg-cm-metalico-giro-continuo.html?search_query=servo+360&results=3), 2019. En línea, visitado por última vez el 07/04/2019.
- [20] Aceros Otero, “Catálogo 2018.” [http://www.acerosotero.cl/pdf/catalogo\\_aceros\\_otero\\_2018.pdf](http://www.acerosotero.cl/pdf/catalogo_aceros_otero_2018.pdf), 2019. En línea, visitado por última vez el 07/04/2019.
- [21] MCIelectronics, “LM7805 Datasheet.” [https://www.mcielectronics.cl/website\\_MCI/static/documents/2307057.pdf](https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/2307057.pdf), 2019. En línea, visitado por última vez el 07/04/2019.
- [22] Arduino, “Arduino Nano.” <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>, 2019. En línea, visitado por última vez el 07/04/2019.
- [23] RalphBacon, “NRF24L01 Transceiver.” <https://github.com/RalphBacon/nRF24L01-transceiver/tree/master/RF24>, 2019. En línea, visitado por última vez el 07/04/2019.
- [24] Supermagnete, “Physical Magnet Data. Neodymium Magnets.” [https://www.supermagnete.de/eng/data\\_table.php](https://www.supermagnete.de/eng/data_table.php), 2019. En línea, visitado por última vez el 27/05/2019.
- [25] Nordic Semiconductor ASA, “NRF24L01 + Antena en Mechatronistore.” <https://www.mechatronicstore.cl/tienda-de-electronica/comunicaciones-inalambricas/modulo-de-comunicacion-inalambrica-nrf24l01-2-4ghz-antena>, 2019.

# **Anexos**



# Anexo A

## Planos de fabricación

### Eslabón Cadenas

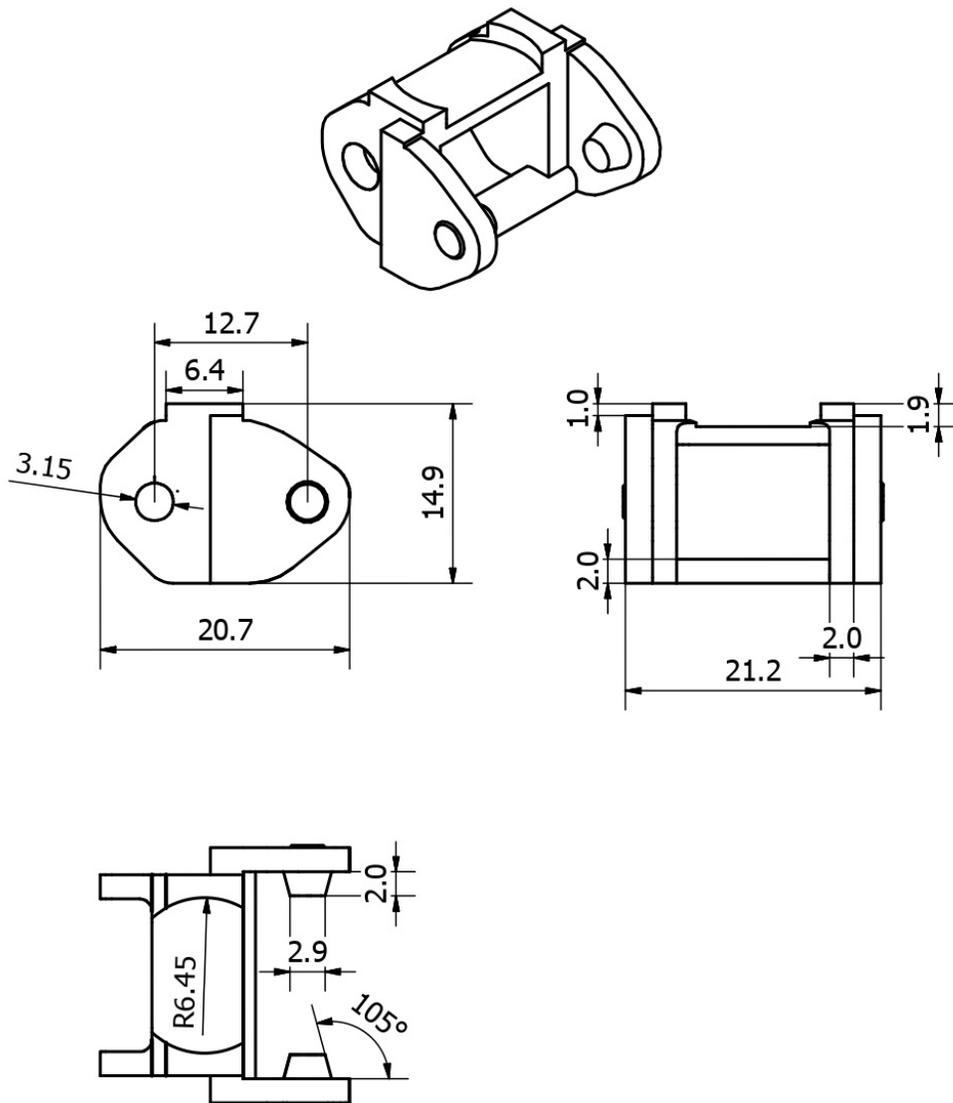


Figura A.1: Dimensiones de los eslabones de las cadenas. Medidas en [mm].

# Bastidor Guía-Motor

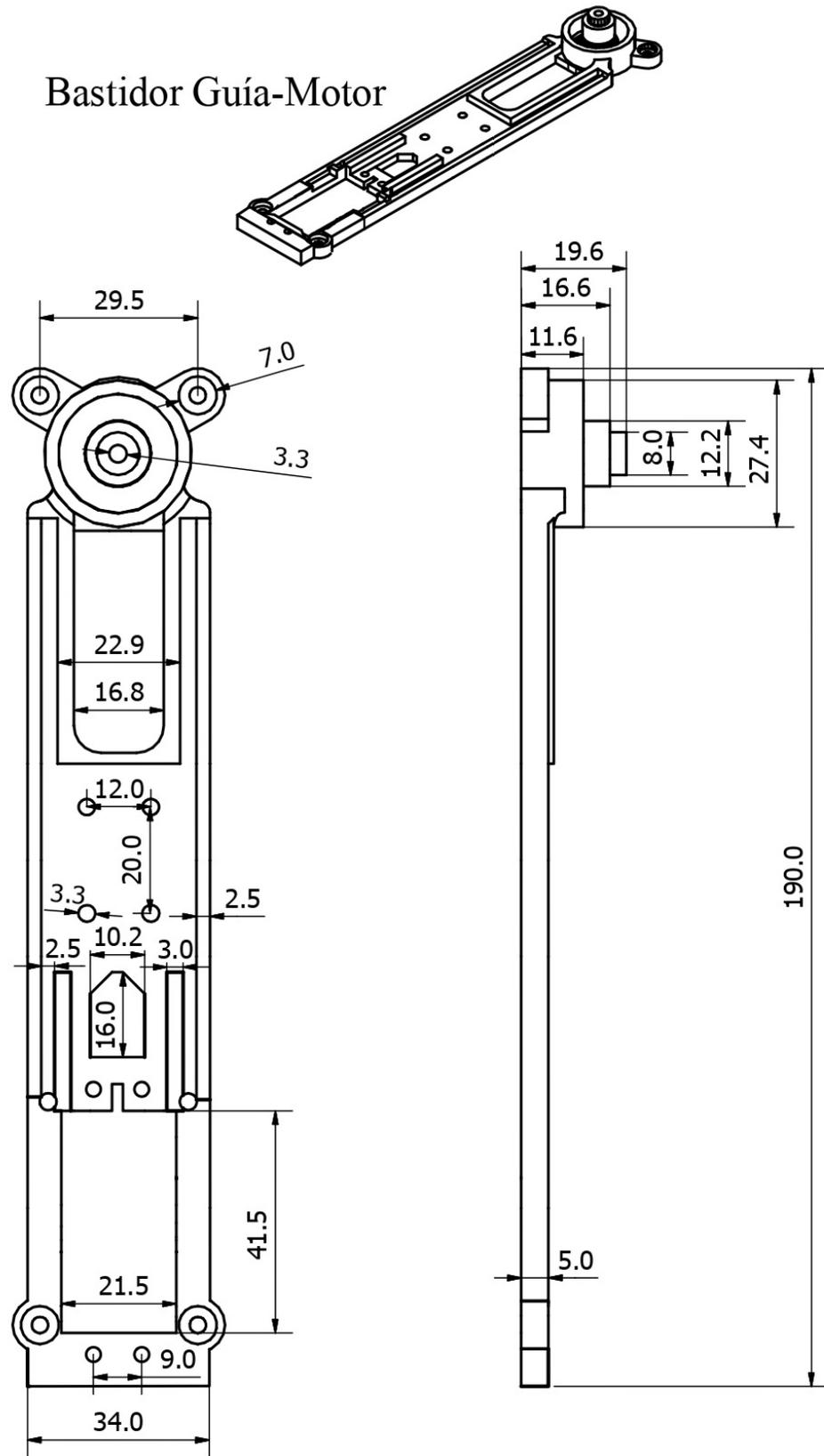


Figura A.2: Dimensiones bastidor guía del motor. Medidas en [mm].

# Bastidor Tapa

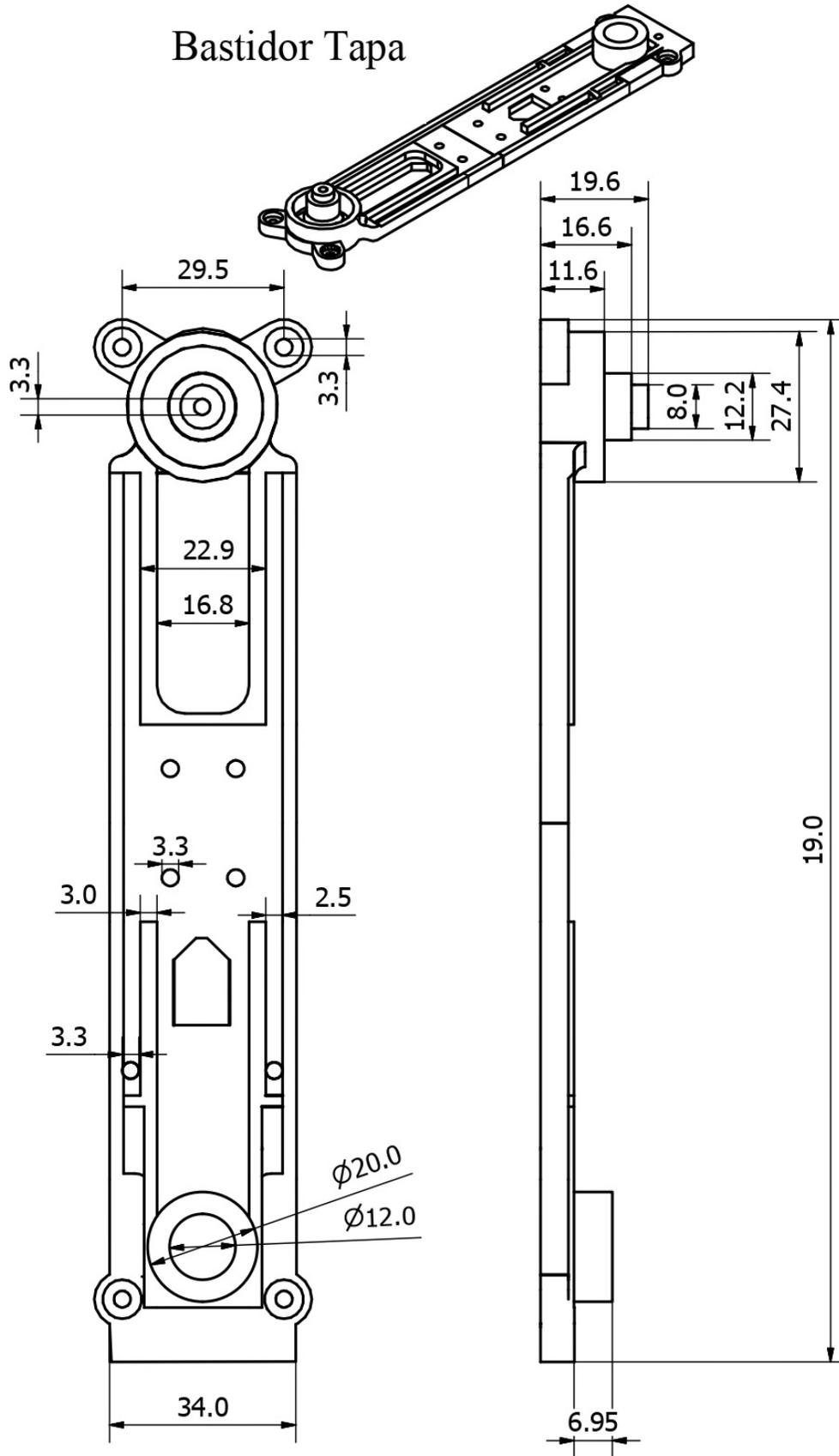
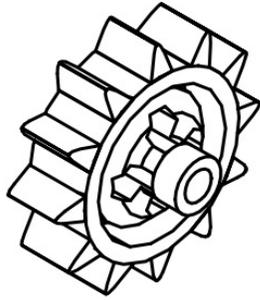
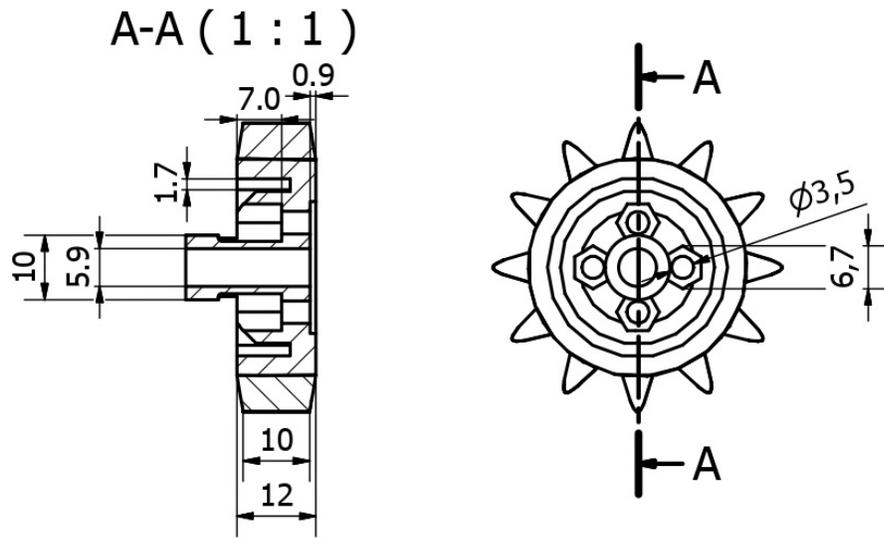


Figura A.3: Dimensiones bastidor tapa del motor. Medidas en [mm].



Engrane Motor



Vista Posterior

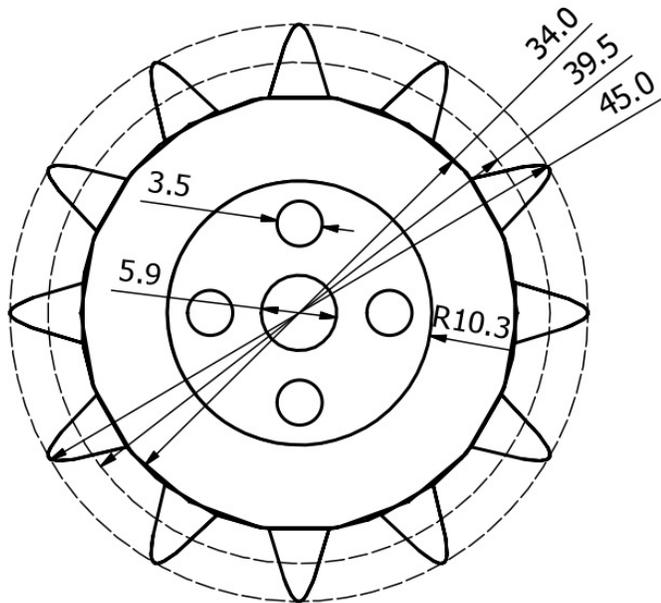


Figura A.4: Dimensiones engrane acoplado al servomotor. Medidas en [mm].

## Engrane Rodamiento

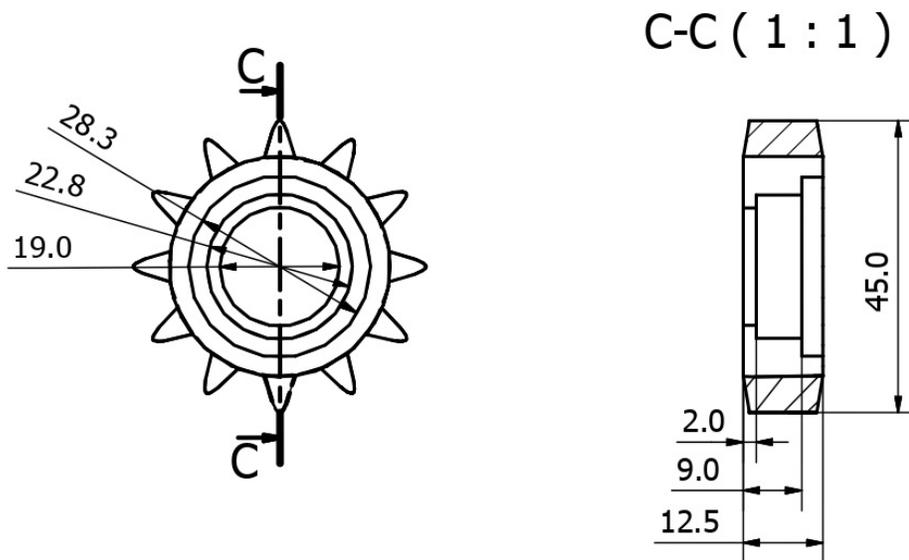
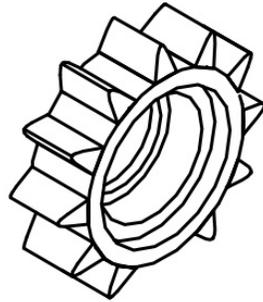
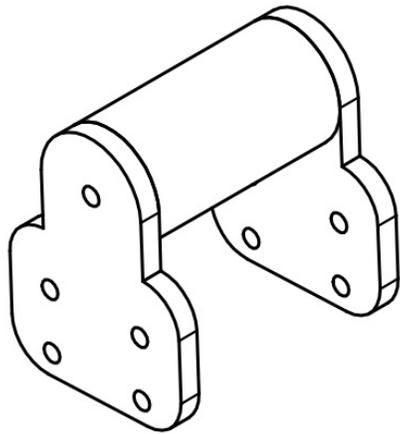
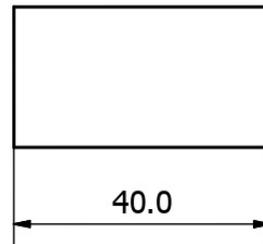
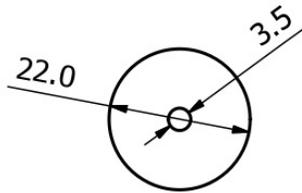


Figura A.5: Dimensiones engrane acoplado al servomotor. Medidas en [mm].



Sistema Tensor

Cilindro Tensor



Soporte Tensor

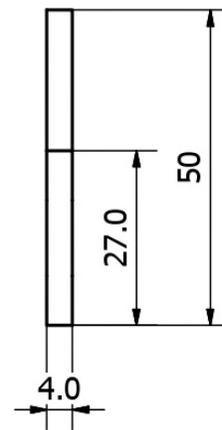
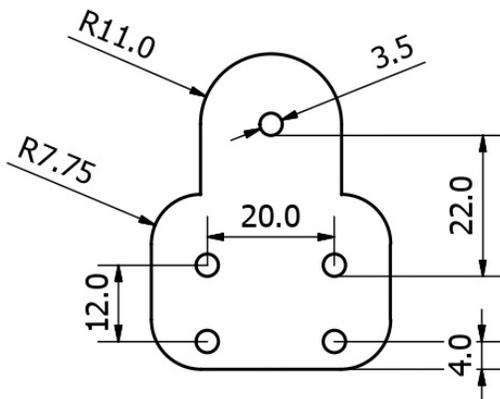


Figura A.6: Dimensiones para el sistema tensor de las cadenas. Medidas en [mm].

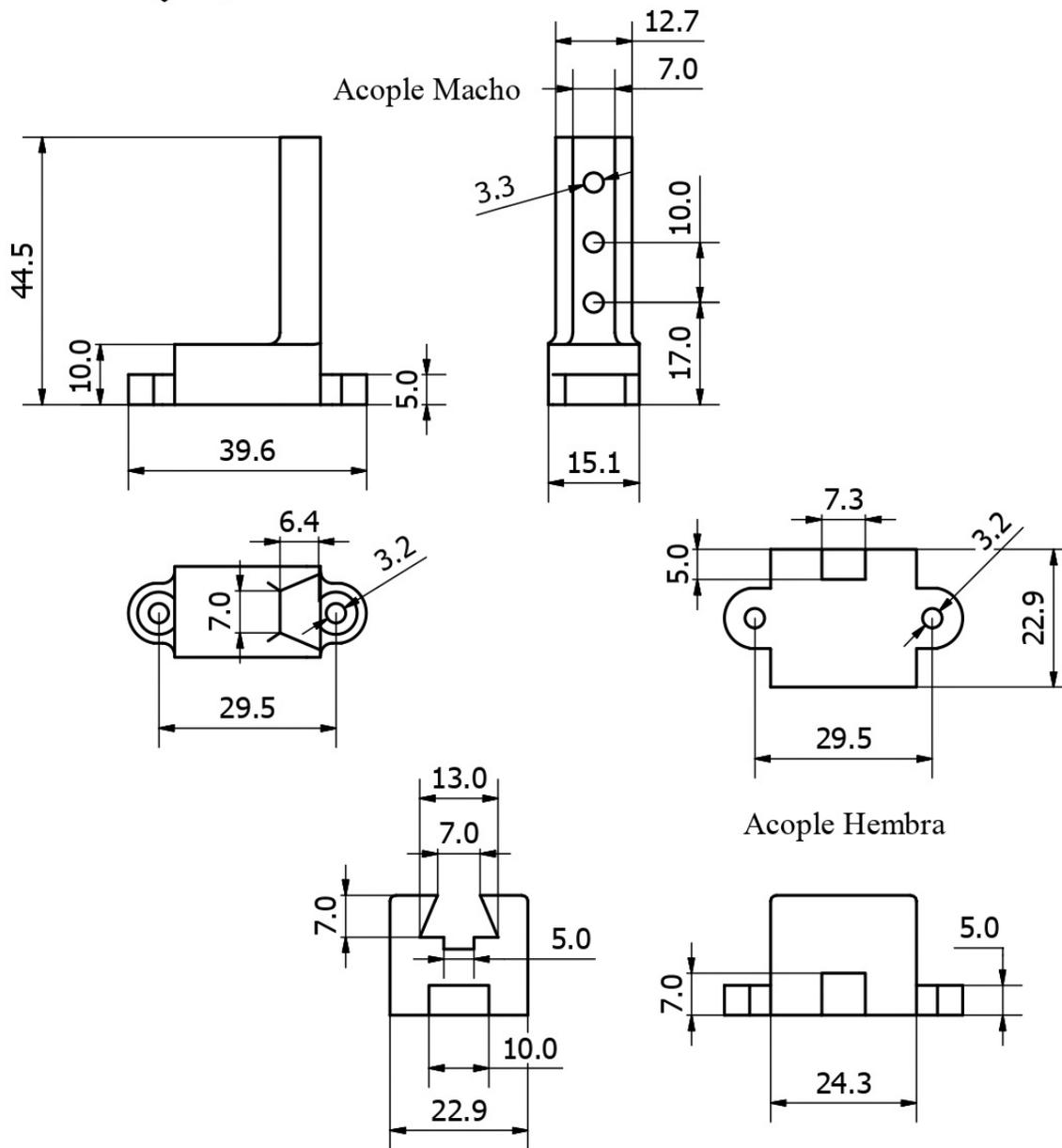
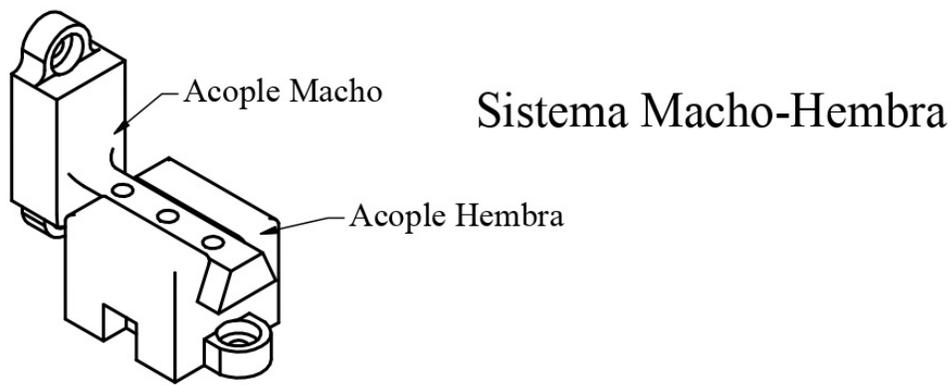


Figura A.7: Dimensiones para el sistema de acople entre bastidores macho-hembra. Medidas en [mm].

# Control Remoto

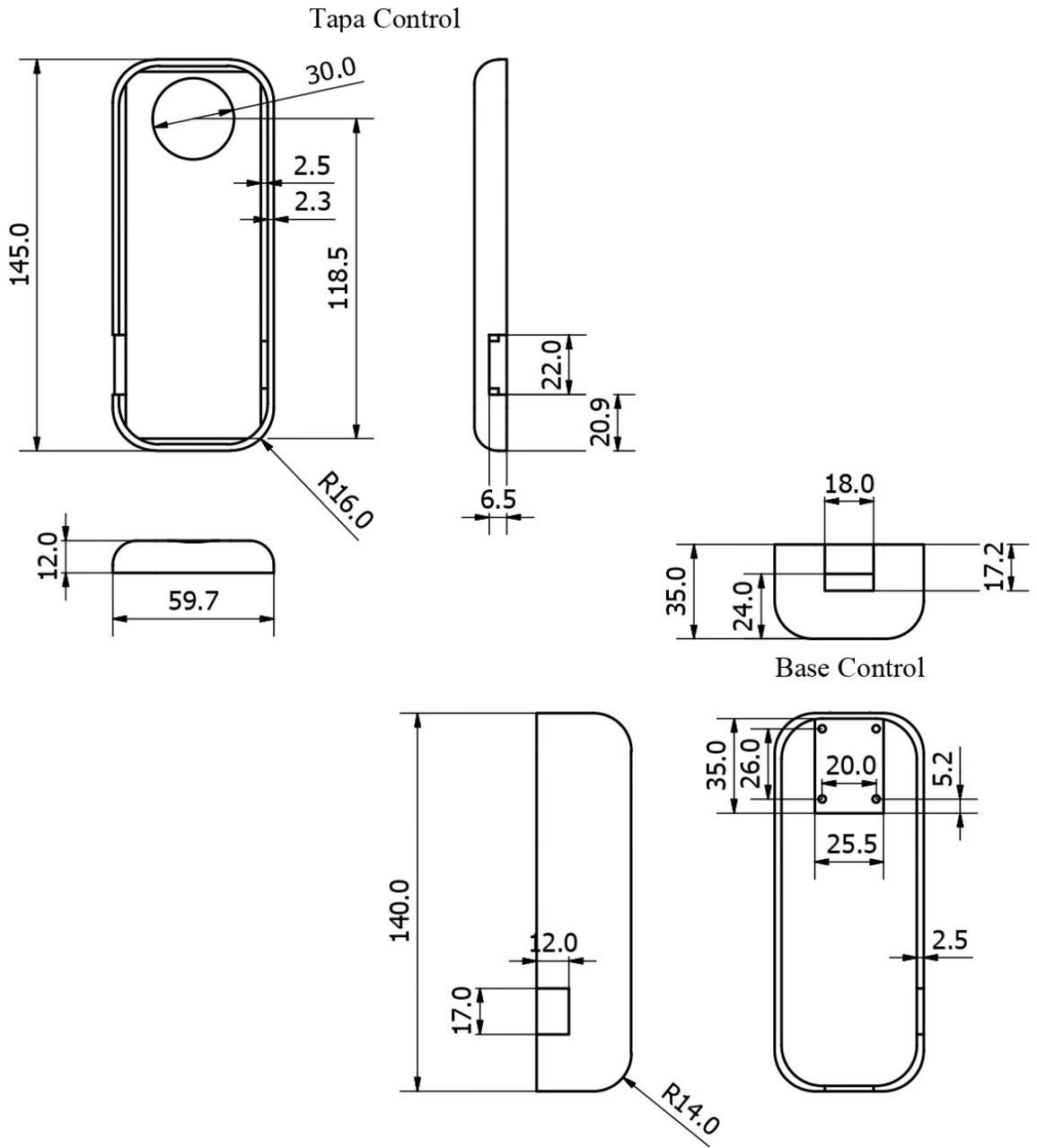
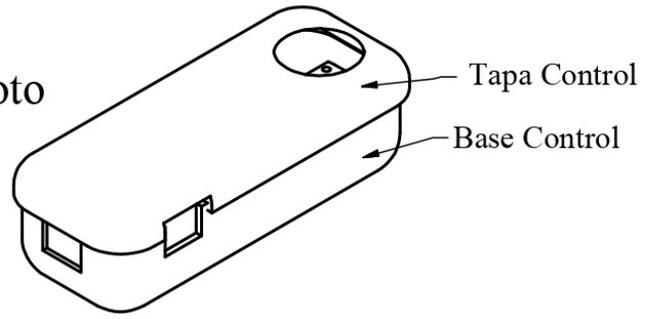


Figura A.8: Dimensiones para el control remoto fabricado. Medidas en [mm].

# Anexo B

## Diagramas esquemáticos del circuito

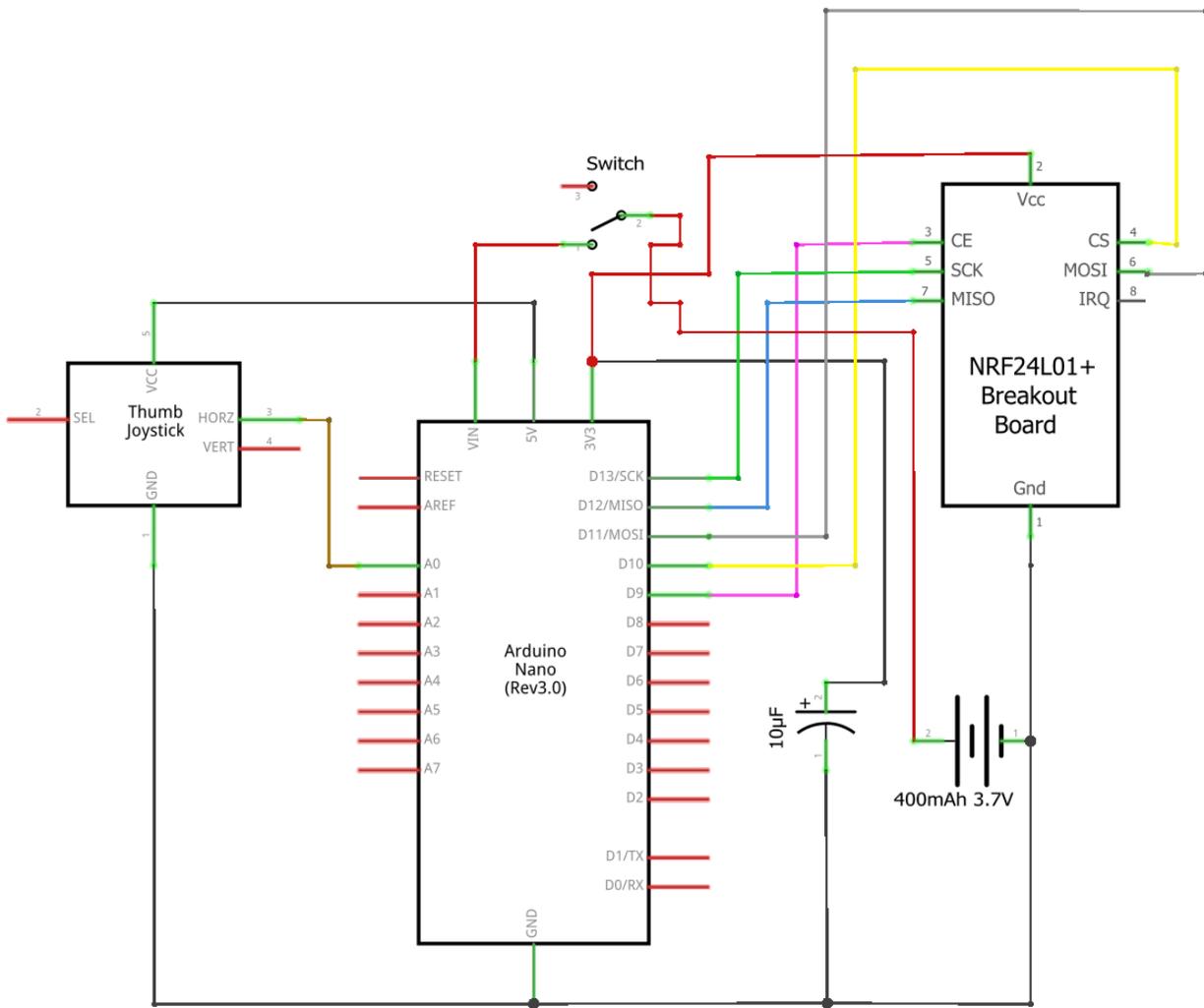


Figura B.1: Diagrama esquemático del circuito para el control remoto.



# Anexo C

## Códigos del controlador

```
1 // Se incluyen las librerias
2 #include "Arduino.h"
3 #include <SPI.h>
4 #include <RF24.h>
5
6 // Configuracion del Hardware: La radio NRF24L01 utiliza los pins (10,
7 // 11, 12, 13) y pins 7 & 8
8 RF24 radio(9,10);
9 byte addresses[][6] = {"1Node", "2Node"};
10
11 int x_key= A0;
12 int x_pos;
13
14 void setup() {
15     Serial.begin(9600);
16     Serial.println("Este es el codigo del modulo transmisor");
17     // Iniciar la radio
18     radio.begin();
19
20     // Se configura el poder de transmision al minimo para prevenir
21     // problemas relacionados con la fuente de alimentacion
22     radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
23
24     // Se configura la velocidad de transmision a la mas rapida disponible
25     radio.setDataRate(RF24_2MBPS);
26
27     // Se utiliza un canal que no sea usado por WiFi, hornos de microondas
28     // u otros dispositivos
29     radio.setChannel(124);
30
31     // Se abre un canal de escritura en la radio
32     radio.openWritingPipe(addresses[1]);
33     //
34     pinMode(x_key, INPUT);
35 }
36
37 void loop() {
38     // Se deja de escuchar para poder transmitir
```

```

37  radio.stopListening();
38  // Se lee el valor que entrega el modulo Joystick
39  x_pos = analogRead(x_key);
40  // Se envia este valor y se muestra
41  radio.write(&x_pos, sizeof(x_pos));
42  Serial.println(x_pos);
43  // Se repite cada 100 milisegundos
44  delay(100);
45 }

```

Listing C.1: Código del control remoto.

```

1 // Se incluyen las librerias
2 #include "Arduino.h"
3 #include <SPI.h>
4 #include <RF24.h>
5 #include <Servo.h>
6
7 // Configuracion del Hardware: La radio NRF24L01 utiliza los pins (10,
8   11, 12, 13) y pins 7 & 8
9 RF24 radio(9,10);
10 byte addresses[][6] = {"1Node","2Node"};
11 // Creacion de variables a utilizar
12 int x_pos;
13 int x_pos_1;
14 int x_pos_r;
15 // Declarar ambos servomotores a controlar
16 Servo myServo1;
17 Servo myServo2;
18
19 void setup() {
20   myServo1.attach(5);
21   myServo2.attach(3);
22   Serial.begin(9600);
23   Serial.println("Este es el codigo del modulo receptor");
24
25   // Iniciar la radio
26   radio.begin();
27
28   // Se configura el poder de transmision al minimo para prevenir
29   // problemas relacionados con la fuente de alimentacion
30   radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
31
32   // Se configura la velocidad de transmision a la mas rapida disponible
33   radio.setDataRate(RF24_2MBPS);
34
35   // Se utiliza un canal que no sea usado por WiFi, hornos de microondas
36   // u otros dispositivos
37   radio.setChannel(124);
38
39   // Se abre un canal de lectura de datos en la radio
40   radio.openReadingPipe(1, addresses[1]);
41
42   // Comenzar a recibir datos
43   radio.startListening();

```

```

42 }
43
44 void loop() {
45 // Se lee la variable x_pos
46 if (radio.available()) {
47     radio.read(&x_pos, sizeof(x_pos));
48     // Se escala a un valor entre 0 y 180
49     x_pos_1 = map(x_pos, 0, 1023, 0, 180);
50     x_pos_r = map(x_pos, 0, 1023, 180, 0);
51     // Se imprime y ordena a los servos moverse
52     Serial.println(x_pos_1);
53     myServo1.write(x_pos_1);
54     Serial.println(x_pos_r);
55     myServo2.write(x_pos_r);
56     // Se repite cada 100 milisegundos
57     delay(100);
58
59 }
60 }

```

Listing C.2: Código de control del robot.