



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

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE BRAZO DESPLEGABLE PARA MANIPULACIÓN DE  
CARGAS LIVIANAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FRANCISCO JAVIER BAHAMONDE DENECKEN

PROFESOR GUÍA:  
JUAN ZAGAL MONTEALEGRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
VIVIANA MERUANE NARANJO  
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

SANTIAGO DE CHILE  
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: FRANCISCO JAVIER BAHAMONDE DENECKEN  
FECHA: 2019  
PROF. GUÍA: JUAN ZAGAL MONTEALEGRE

## DISEÑO Y FABRICACIÓN DE BRAZO DESPLEGABLE PARA MANIPULACIÓN DE CARGAS LIVIANAS

Las líneas de tren en buen estado son fundamentales para el desarrollo de un país. Permiten mejorar la conectividad además de ser un método de transporte seguro eficiente para cargas y pasajeros. Hoy en Chile, aproximadamente un 10% de las cargas que se transportan se hacen a través de este medio de transporte.

Los puentes ferroviarios, por sus características estructurales resultan ser el elemento crítico de las líneas. Son los más propensos a fallar y un colapso de un puente resulta catastrófico para la continuidad la línea debido a los largos tiempos y costos de reparación que estos tienen. Por lo mismo requieren de inspecciones sistemáticas y de calidad.

Estas inspecciones se realizan hoy en día con poca tecnología y muchas veces no se logra visualizar lugares críticos para la estructura debido a su ubicación de difícil acceso.

En este contexto, esta investigación busca desarrollar un nuevo dispositivo robótico de inspección visual de puentes que logre fotografiar lugares de difícil acceso, que sean relevantes para la estructura de los puentes.

El objetivo general de esta memoria consiste en diseñar, fabricar y caracterizar un nuevo brazo robótico desplegable capaz de manipular cargas livianas. Para esto, se trabajó en base a una metodología iterativa que se detalla en el capítulo 2.

En este trabajo, se exponen primero los antecedentes pertinentes para el diseño y fabricación del brazo, luego se explica en detalle los procesos de diseño y fabricación, y se finaliza presentando los resultados de las pruebas realizadas, tanto en laboratorio como en terreno.

A partir de las pruebas realizadas, se concluye que se logra cumplir tanto con el objetivo general como los objetivos específicos planteados. Se desarrolló un brazo robótico desplegable capaz de manipular una cámara con más de un grado de libertad.



*Dedicado a Alicia, Francisco y Gabriela. Para ustedes, mi eterno amor.*



# Agradecimientos

A los profesores miembros de la comisión. Gracias por los consejos, la crítica siempre constructiva, la buena disposición y el apoyo constante a lo largo de este trabajo.

A mi familia, mi hermana, mi padre y mi madre. Son lo mejor que me pudo haber pasado. Gracias por el amor y el apoyo siempre pero siempre incondicional que me han entregado. Gracias por amarme ser tal cual soy. A mi hermana por esa complicidad que tenemos. A mi mamá por su ternura y por mostrarme que el amor hace que la vida valga la pena. A mi papá por su entrega, por mostrarme que si vale la pena perseguir sus sueños y por enseñarme desde niño que el camino es trabajo y el esfuerzo honesto. Son dignos de admiración. Los amo.

A mi compañera, Pía. Gracias por tu amor. Gracias tu por apoyo y tu paciencia, sobre todo a lo largo de este proceso. Gracias por ese cariño, esa palabra o ese silencio preciso. Te amo.

A mis amigos de siempre, Patos. Son gigantes cabros, cuantas aventuras juntos y cuantas más se nos vienen. Gracias por el apoyo constante y todo el aguante. Yuekete. Dicen por ahí que sale patada de titulación.

A mis amigos de la universidad. Desde la BB14, hasta los Puyols. Especial agradecimiento a ese grupo de personas, que de a poco se convirtió en familia que armamos en mecánica, gracias por darle sabor a de estos últimos años de U. Gracias por la sinceridad, el apañe y la amistad verdadera. Estoy super seguro que nos seguiremos viendo. En especial al Pancho, al Carlitos, la Paskuix, los Sebastianes, la Grace Estrella, el Michelini, Chanel, Jaimito mi niño, el buen Fredes, al Frankiwawi, Niconalgas, la Yani y Camilo. Son la raja y los quiero caleta.

A todos mis compañeros y compañeras de laboratorio. Gracias por hacer esta memoria más fácil y entretenida. Lo pasé muy bien con ustedes. Además, me ayudaron mucho a lo largo de este trabajo, gracias por eso también.

A mis moprís, Jose y Oscar. ¡¡Como vamos a celebrar este momento, que alegría!! ¡¡Mucha alegría!!



# Tabla de Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introducción</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1. Introducción . . . . .   | 1         |
| 1.2. Motivación . . . . .   | 2         |
| 1.3. Objetivos . . . . .  | 7         |
| 1.3.1. Objetivo general . . . . .   | 7         |
| 1.3.2. Objetivos específicos . . . . .  | 7         |
| 1.4. Alcances . . . . .   | 8         |
| <b>2. Metodología</b>   | <b>9</b>  |
| <b>3. Antecedentes</b>  | <b>10</b> |
| 3.1. Tipos de estructuras desplegadas . . . . .                                       | 10        |
| 3.1.1. Tabla resumen . . . . .  | 10        |
| 3.1.2. Estructuras plegables . . . . .  | 11        |
| 3.1.3. Estructuras de tensegridad . . . . .   | 11        |
| 3.1.4. Brazos telescópicos . . . . .  | 12        |
| 3.1.5. Brazos inflables . . . . .   | 12        |
| 3.1.6. Shape material composite booms (SMC) . . . . .                                 | 13        |
| 3.1.7. Coilable booms . . . . .   | 13        |
| 3.2. Comparación entre las distintas tecnologías de estructuras desplegadas . . . . . | 15        |
| 3.2.1. Diámetro del brazo v/s Largo desplegable . . . . .                             | 15        |
| 3.2.2. Rigidez del brazo v/s Largo desplegable . . . . .                              | 16        |
| 3.2.3. Peso del brazo v/s Largo desplegable . . . . .                                 | 17        |
| 3.2.4. Factor de empaquetamiento v/s Largo desplegable . . . . .                      | 18        |
| 3.3. Continuum robots . . . . .   | 19        |
| 3.3.1. Acercamiento al modelo matemático . . . . .                                    | 20        |
| 3.4. Inspección visual del deterioro de un puente . . . . .                           | 20        |
| 3.4.1. Fotografías . . . . .  | 21        |
| <b>4. Diseño y fabricación</b>  | <b>22</b> |
| 4.1. Definición de requisitos . . . . .   | 22        |
| 4.2. Diseño del funcionamiento . . . . .  | 22        |
| 4.2.1. Diseños rígidos . . . . .  | 23        |
| 4.2.2. Diseño flexible . . . . .  | 24        |
| 4.3. Diseño y fabricación de las partes . . . . .                                     | 25        |
| 4.3.1. Descripción general de las partes . . . . .                                    | 25        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.3.2.    | Estructura principal desplegable . . . . .                | 26        |
| 4.3.3.    | Manipulador de cargas . . . . .                           | 26        |
| 4.3.4.    | Controlador del manipulador de cargas . . . . .           | 34        |
| 4.4.      | Elección de materiales . . . . .                          | 40        |
| <b>5.</b> | <b>Pruebas y caracterización</b>                          | <b>42</b> |
| 5.1.      | Dimensionamiento del dispositivo . . . . .                | 42        |
| 5.2.      | Caracterización del controlador del manipulador . . . . . | 43        |
| 5.3.      | Caracterización del manipulador . . . . .                 | 47        |
| 5.3.1.    | Metodología . . . . .                                     | 47        |
| 5.3.2.    | Resultados . . . . .                                      | 47        |
| 5.3.3.    | Análisis . . . . .  | 49        |
| 5.4.      | Prueba en terreno . . . . .                               | 56        |
| 5.4.1.    | Metodología . . . . .                                     | 56        |
| 5.4.2.    | Resultados . . . . .                                      | 57        |
| 5.4.3.    | Análisis . . . . .  | 59        |
| <b>6.</b> | <b>Conclusiones</b>                                       | <b>61</b> |
| 6.1.      | Conclusiones de las pruebas . . . . .                     | 61        |
| 6.1.1.    | Pruebas de laboratorio . . . . .                          | 61        |
| 6.1.2.    | Pruebas en terreno . . . . .                              | 62        |
| 6.2.      | Conclusiones generales . . . . .                          | 62        |
| 6.3.      | Limitaciones . . . . .                                    | 63        |
|           | <b>Bibliografía</b>                                       | <b>64</b> |

# Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Tabla resumen de las características de las distintas tecnologías de estructuras desplegadas. [1] . . . . . | 10 |
| 4.1. Características mecánicas del cable utilizado [2] . . . . .   | 33 |
| 4.2. Tabla comparativa de materiales. [3] [4] [5] [6] [7] . . . . .  | 40 |
| 5.1. Rubrica de evaluación del dispositivo. . . . .  | 57 |

# Índice de Ilustraciones

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.1.  | Colapso de puente ferroviario sobre Río Toltén [8] . . . . .  | 2  |
| 1.2.  | Vista general del Puente Aconcagua. Es posible apreciar distintas configuraciones a lo largo del puente. . . . .  | 3  |
| 1.3.  | Algunos elementos importantes de la estructura. Izquierda; se muestra el muro guarda lastre y espaldar del estribo sur. Derecha; tablero, vista de rigidizadores, alma de viga, ala inferior, cordón de refuerzo (presente en algunos vanos) apoyo fijo y cepa. . . . . | 3  |
| 1.4.  | Izquierda; contraventaciones existentes en la configuración sur. Derecha; componentes de viga del sector sur y apoyo deslizante del estribo sur . . . . .   | 4  |
| 1.5.  | El Puente presenta diferentes configuraciones. Existen diversos tipos de cepa que dan sustento a la estructura. Derecha; ejemplos de cepas. . . . .   | 4  |
| 1.6.  | Izquierda; distancia típica del dron respecto a la estructura durante la inspección. Derecha; dron mientras emprende su vuelo bajo un vano . . . . .  | 5  |
| 1.7.  | Vista lograda por dron volando bajo uno de los vanos. . . . .   | 6  |
| 1.8.  | Izquierda; ejemplo sobre la dificultad que existe para poder monitorear el estado de apoyos. Derecha; ejemplo del mejor avistamiento logrado para evaluar el estado de un apoyo donde EFE ya ha detectado pérdida de material. . . . .                                  | 7  |
| 2.1.  | Diagrama de flujo de la metodología utilizada . . . . .   | 9  |
| 3.1.  | Ejemplo de estructura plegable tipo pantografo . . . . .  | 11 |
| 3.2.  | Ejemplo de estructura de tensegridad [9] . . . . .  | 11 |
| 3.3.  | Ejemplo de brazo telescópico . . . . .  | 12 |
| 3.4.  | Ejemplo de brazo inflable . . . . .   | 12 |
| 3.5.  | Ejemplo de brazo de SMC, "The collapse Tube Mast". . . . .  | 13 |
| 3.6.  | Ejemplo de coilable boom. [1] . . . . .   | 14 |
| 3.7.  | Diámetro del brazo v/s Largo desplegable [1] . . . . .  | 15 |
| 3.8.  | Rigidez del brazo v/s Largo desplegable [1] . . . . .   | 16 |
| 3.9.  | Peso del brazo v/s Largo desplegable [1] . . . . .  | 17 |
| 3.10. | Factor de empaquetamiento v/s Largo desplegable [1] . . . . .   | 18 |
| 3.11. | Clasificación de los robots [10] . . . . .  | 19 |
| 3.12. | Ejemplos de continuum robots [11] . . . . .   | 19 |
| 3.13. | Geometría de continuum robots [12] . . . . .  | 20 |
| 3.14. | Ejemplo de fotografías de inspección de puentes.[13] . . . . .  | 21 |
| 4.1.  | Imágenes del modelo CAD del primer diseño . . . . .   | 23 |

|   |    |
|---|----|
| 4.2. Manipulador de cargas; se aprecia el manipulador de cargas en sus primeras iteraciones dónde se utiliza PLA amarillo para fabricar los módulos y cinta adhesiva verde para fijarlos al resorte. El resorte principal se mantuvo a lo largo de las iteraciones y los cables en este caso son cables de freno de bicicleta que luego fueron cambiados por cables de acero galvanizado. . . . . | 24 |
| 4.3. Diseño CAD final y partes principales del brazo . . . . .  | 25 |
| 4.4. Monopod SOLIGOR WT 1006 y ficha técnica . . . . .  | 26 |
| 4.5. Evolución en el diseño flexible del manipulador de cargas; A la izquierda se ve el manipulador en su etapa inicial, los módulos son de PLA y se fijan al resorte con cinta adhesiva. Al centro, el manipulador ya con los módulos en su versión definitiva de duraluminio. A la derecha, la versión final dónde están añadidos los resortes secundarios. . . . .                             | 27 |
| 4.6. Resorte principal; se aprecia el manipulador de cargas completo. Se destaca en línea segmentada blanca la ubicación del resorte principal, el cual corresponde a un sólo resorte de 40 [cm] de largo. . . . .  | 28 |
| 4.7. Fotografía de un módulo; posee 8 agujeros para pasar cables en la base, y 3 agujeros con hilo en la parte superior donde van prisioneros que permiten fijar el módulo al resorte principal. . . . .  | 28 |
| 4.8. Iteraciones del diseño del módulo; se aprecia de izquierda a derecha la evolución de los diseños. Al principio utilizando PLA para el prototipado y finalmente duraluminio. . . . .  | 29 |
| 4.9. Simulación del código máquina para manufactura de un módulo; A la izquierda, se simula el proceso de las ranuras con una fresa de 3 [mm]. A la derecha, se simula el proceso para las perforaciones con un broca de 3 [mm]. . . . .  | 30 |
| 4.10. Resortes secundarios; se señalan los resortes secundarios puesto en el manipulador. Son 20 en total. . . . .  | 30 |
| 4.11. Fotografía del acople; se ve como el acople logra unir la estructura principal desplegable con el manipulador de cargas. . . . .  | 31 |
| 4.12. Iteraciones en diseño del acople; se aprecia de izquierda a derecha la evolución de los diseños. El prototipado en PLA y la versión definitiva en duraluminio. . . . .  | 31 |
| 4.13. Vista isométrica del acople; se aprecian los dos diámetros internos existentes, uno para la estructura principal desplegable, el otro para el resorte principal. . . . .  | 32 |
| 4.14. Tensores . . . . .  | 33 |
| 4.15. Fotografía del controlador del manipulador en su forma final, sin las palancas acopladas. . . . .   | 34 |
| 4.16. Esquema de funcionamiento del mecanismo de bloqueo del controlador del manipulador . . . . .  | 35 |
| 4.17. Iteraciones, de izquierda a derecha, en diseño de la dentadura del elemento fijo. . . . .   | 36 |
| 4.18. Simulación del proceso de manufactura de una pieza fija . . . . .   | 36 |
| 4.19. Fotografía de la parte móvil montada en parte fija. Se aprecia la bola encajada en un valle, un agujero de entrada del cable y el otro agujero atrapa cable el cual posee un prisionero capaz de apretar el cable. . . . .  | 37 |
| 4.20. Simulación del proceso para manufactura del cuadrado extruido de la pieza móvil. . . . .  | 38 |
| 4.21. Fotografía del controlador con la palanca acoplada. . . . .   | 38 |
| 4.22. Simulación del proceso de manufactura de la palanca de mando . . . . .  | 39 |
| 4.23. Vista isométrica del soporte ensamblado. . . . .  | 39 |

|  |    |
|--|----|
| 4.24. Simulación del proceso de cortado de las piezas necesarias para el ensamble del soporte . . . . .  | 40 |
| 4.25. Diseño final CAD del brazo completo, manipulador de cargas y controlador del manipulador . . . . .   | 40 |
| 5.1. Dimensiones del brazo en su largo máximo y mínimo. . . . .  | 42 |
| 5.2. Geometría y diagrama de cuerpo libre del mecanismo del controlador . . . . .  | 43 |
| 5.3. Distancia $r_\theta$ en función del ángulo $\theta$ . . . . .   | 44 |
| 5.4. Fuerza del resorte $F_k$ en función del ángulo $\theta$ . . . . .   | 45 |
| 5.5. Fuerza normal tangencia $F_{N,tangencial}$ en función del ángulo $\theta$ . . . . .   | 46 |
| 5.6. Caracterización del manipulador: montaje experimental . . . . .   | 47 |
| 5.7. Transición del manipulador de cargas para llegar de una posición a otra; En cada una de las posiciones se aprecia la posición del controlador para tener al manipulador en esa posición. . . . .  | 48 |
| 5.8. Posiciones límites alcanzada por el manipulador de cargas, vista lateral; En cada una de las posiciones se aprecia la posición del controlador para tener al manipulador en esa posición. . . . .   | 48 |
| 5.9. Posiciones límites alcanzada por el manipulador de cargas, vista inferior; En cada una de las posiciones se aprecia la posición del controlador para tener al manipulador en esa posición. . . . .  | 49 |
| 5.10. Superposición de fotografías de las posiciones de transición del manipulador de cargas . . . . .   | 50 |
| 5.11. Ángulo de observación de la cámara v/s Ángulo de la palanca. . . . .   | 51 |
| 5.12. Distancia en vertical v/s Ángulo de la palanca . . . . .   | 52 |
| 5.13. Distancia en horizontal v/s Ángulo de la palanca . . . . .   | 52 |
| 5.14. Trayectoria completa de la punta del manipulador de cargas . . . . .   | 53 |
| 5.15. Superposición de fotografías al tirar 1 cable. . . . .   | 54 |
| 5.16. Superposición de fotografías al tirar 2 cables. . . . .  | 55 |
| 5.17. Ubicación en mapa del puente Aconcagua y su vista general . . . . .  | 56 |
| 5.18. Uso del brazo para inspección desde arriba, abajo del puente ferroviario y su forma de transporte. . . . .   | 56 |
| 5.19. Manipulación desde arriba del puente; se aprecia en la primera fotografía el modo de uso de los operarios, uno controla el brazo y otro visualiza las imágenes en el celular. En las dos fotografías siguientes, como el brazo logra de manera exitosa alcanzar lugares de difícil acceso. . . . . | 57 |
| 5.20. Manipulación desde abajo del puente. . . . .   | 58 |
| 5.21. Fallas detectadas en apoyo de cepa n° 5: falta de contacto apoyo/estructura y posible fisura en soldadura . . . . .  | 58 |
| 5.22. Ejemplos de fotografías logradas en lugares de interés de difícil acceso sin fallas  | 59 |
| 5.23. Proceso de toma de datos de la figura 5.22 . . . . .   | 59 |
| 5.24. Distancia típica lograda respecto a la estructura durante la inspección; A la izquierda el posicionamiento del dron, a la derecha el posicionamiento del brazo desplegable. . . . .  | 60 |
| 5.25. Imágenes logradas durante la inspección; A la izquierda imagen obtenida por el dron, a la derecha imagen obtenida por el brazo desplegable. . . . .  | 60 |

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Introducción

Históricamente el ferrocarril ha sido estratégico para el desarrollo nacional. En la actualidad existen en Chile 5.622 [km] [14] de vías férreas operadas por empresas públicas y privadas, por donde se transportan anualmente 28 millones de toneladas, de los aproximadamente 300 millones de toneladas que anualmente se movilizan en Chile [15]. Por esto, entre otras razones, es importantísimo que las líneas de tren permanezcan en buenas condiciones para que los trenes circulen de manera segura y eficiente.

En la vía férrea, los puentes son el componente más crítico y vulnerable, ya que sus defectos tienen la capacidad de impactar de forma más importante y por mayor tiempo en la continuidad del servicio de transporte.

En las vías férreas de la Empresa de los Ferrocarriles del Estado (EFE), existen más de 400 puentes de más de 11 metros de largo cuyo mantenimiento es de responsabilidad de esta empresa. La mayor parte de estos puentes son metálicos y varios de ellos tienen una antigüedad que ha superado su vida útil, siendo la mantención de estos puentes un elemento central para garantizar la seguridad, capacidad y continuidad del servicio de transporte ferroviario [16].

A pesar de la importancia que los puentes ferroviarios tienen para la continuidad del servicio, en Chile se desconoce las condiciones estructurales y funcionales de estas estructuras. Este problema se evidenció y cobró mayor relevancia luego del colapso de los puentes sobre el Río Toltén el año 2016 [8] y el Río Cautín el año 2018 [17].

La caída del puente sobre el Río Toltén implicó, además de las obras de reparación del puente:

- El rescate de 50 vagones de tren que transportaban soda cáustica, petróleo y clorato de sodio, de los cuales 7 estaban sumergidos en lecho del río. [18]
- Una inversión de más de 3.500 millones de pesos en obras de confinamiento destinadas

a generar una zona segura de trabajo. [8]

- Una reducción significativa en el transporte de productos forestales y la suspensión total de transporte de alimentos para salmones. [18]



Figura 1.1: Colapso de puente ferroviario sobre Río Toltén [8]

En este contexto, la inspección de los puentes juega un rol vital que permite identificar el grado de deterioro y planificar la mantención y rehabilitación de puentes de manera eficiente.

La inspección es una actividad compleja que debe ser realizada de manera organizada y sistemática. De esta actividad dependen las recomendaciones para corregir defectos, definir las restricciones de carga y velocidad y permiten evitar pasar por alto deficiencias que pueden convertirse en daños severos si no son reparadas a tiempo.

## 1.2. Motivación

Las inspecciones que se realizan hoy en día a los distintos puentes ferroviarios en Chile son responsabilidad de la empresa EFE y son principalmente del tipo visual. Así, se busca visualizar y fotografiar para poder monitorear el estado de componentes críticos para la estructura del puente. Existen una gran variedad de componentes que resultan claves para el buen funcionamiento del puente. En las figuras 1.2, 1.3, 1.4 y 1.5, vemos fotografías de algunos ejemplos de componentes que resultan relevantes de inspeccionar. Estas imágenes son el resultado de una inspección realizada por EFE en el puente ferroviario Aconcagua, ubicado en la quinta región.



Figura 1.2: Vista general del Puente Aconcagua. Es posible apreciar distintas configuraciones a lo largo del puente.

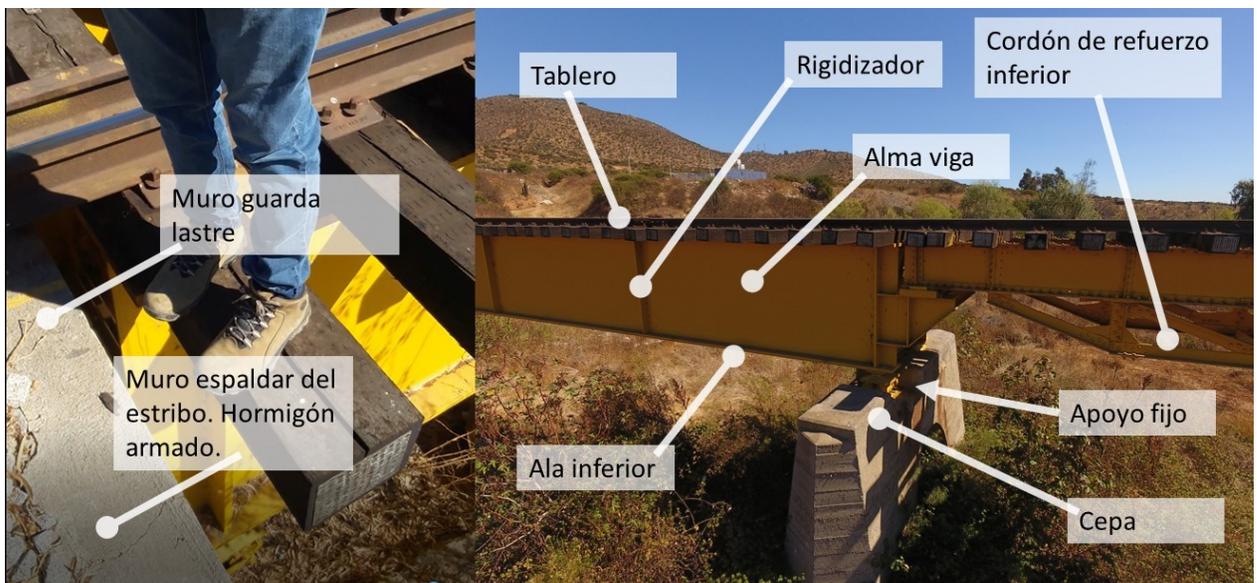


Figura 1.3: Algunos elementos importantes de la estructura. Izquierda; se muestra el muro guarda lastre y espaldar del estribo sur. Derecha; tablero, vista de rigidizadores, alma de viga, ala inferior, cordón de refuerzo (presente en algunos vanos) apoyo fijo y cepa.



Figura 1.4: Izquierda; contravenciones existentes en la configuración sur. Derecha; componentes de viga del sector sur y apoyo deslizante del estribo sur



Figura 1.5: El Puente presenta diferentes configuraciones. Existen diversos tipos de cepa que dan sustento a la estructura. Derecha; ejemplos de cepas.

En esa ocasión el equipo de inspección estaba dotado de una cámara convencional y de un dron para lograr mejores acercamientos a lugares críticos pero que resultaban de difícil acceso debido a la altura en la que se encuentran. En las figuras 1.6 y 1.7 se aprecian las imágenes logradas usando esta tecnología para la inspección así como la distancia típica a la que el dron se posiciona para la inspección visual del puente.

Una de las conclusiones de esa inspección fue la dificultad existente para alcanzar con los medios disponibles lugares críticos y de difícil acceso. Esto se aprecia en la figura 1.8, en ella se detecta una disminución de la sustentación sin embargo, la imagen lograda no es lo suficientemente cercana para poder visualizar esa falla con claridad.

Es en este contexto, que esta memoria busca proponer una solución basada en la robótica a los problemas existentes en el proceso de inspección de puentes y estructuras respecto a la dificultad que existe para poder acceder a lugares críticos para la estructura de los puentes ferroviarios desarrollando un nuevo tipo de tecnología que permita obtener fotografías que permitan una correcta inspección de la estructura.



Figura 1.6: Izquierda; distancia típica del dron respecto a la estructura durante la inspección. Derecha; dron mientras emprende su vuelo bajo un vano



Vista inferior lograda  
por dron.

Figura 1.7: Vista lograda por dron volando bajo uno de los vanos.



Figura 1.8: Izquierda; ejemplo sobre la dificultad que existe para poder monitorear el estado de apoyos. Derecha; ejemplo del mejor avistamiento logrado para evaluar el estado de un apoyo donde EFE ya ha detectado pérdida de material.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de esta memoria es diseñar, fabricar y caracterizar un nuevo brazo robótico desplegable capaz de manipular cargas livianas.

### 1.3.2. Objetivos específicos

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

- Realizar un diseño de un brazo desplegable.
- Fabricar el brazo en base al diseño.
- Caracterizar su funcionamiento en laboratorio.
- Realizar pruebas en terreno para evaluar su uso, practicidad y conveniencia.

## 1.4. Alcances

El alcance establecido para el proyecto es la la fabricación de un brazo desplegable maniobrable desde una punta que logre un movimiento de al menos un grado de libertad en en el otro extremo. Y que la carga liviana a manipular consista en una cámara que permita tomar fotografías.

# Capítulo 2

## Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó la metodología iterativa expuesta en la figura 2.1.

Primero, se define un conjunto de requisitos que debe cumplir el brazo robótico. Luego, se procede a diseñar el robot para que este cumpla con los requisitos propuestos. Hechos los diseños, se procede a fabricar y adquirir las partes necesarias. Luego, se evalúa si estos elementos cumplen con la calidad esperada. De no cumplirlos, se vuelve a la etapa de diseño. Si se cumplen, se procede al ensamble de las partes. Luego de lo cual se evalúa si los movimientos logrados son los esperados. Si la evaluación es negativa, se vuelve a la etapa de diseño. Si la evaluación es positiva, se pasa a la fase de pruebas y caracterización.

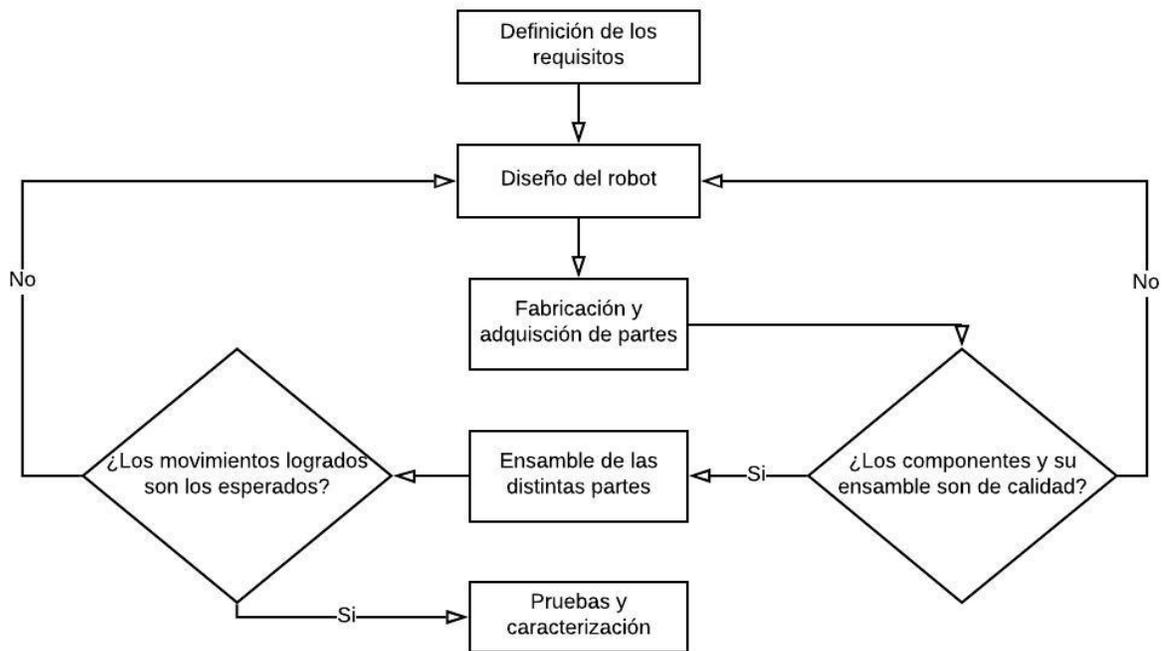


Figura 2.1: Diagrama de flujo de la metodología utilizada

# Capítulo 3

## Antecedentes

### 3.1. Tipos de estructuras desplegables

#### 3.1.1. Tabla resumen

En la tabla 3.1, se presenta a modo de resumen, las características típicas de los diferentes tipos de estructuras desplegables que se presentarán en esta sección.

| Tecnología                          | Peso [kg] | Diámetro [mm] | Fact. Empaquetamiento | Largo al despliegue [m] | Estabilidad y precisión |
|-------------------------------------|-----------|---------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Estrucutra plegable                 | 2 - 29    | 190 - 420     | 0,23 - 0,6            | 9 - 21                  | +++                     |
| Estrucutra de tensegridad           | 28 - 150  | 600 - 1400    | 0,05 - 0,15           | 8 - 70                  | ++                      |
| Brazo telescópico                   | 10 - 200  | 100 - 650     | 0,08 - 0,25           | 2 - 8                   | +++++                   |
| Brazo inflable                      | 2 - 25    | 40 - 550      | 0,015 - 0,03          | 1,5 - 29                | +                       |
| Shape composite material boom (SMC) | 0,3 - 5   | 1 - 230       | 0,02 - 0,04           | 2,5 - 18                | ++                      |
| Coilable boom                       | 1 - 20    | 110 - 720     | 0,02 - 0,04           | 1 - 100                 | ++                      |

Tabla 3.1: Tabla resumen de las características de las distintas tecnologías de estructuras desplegables. [1]

### 3.1.2. Estructuras plegables

La mayoría de las estructuras plegables utilizan articulaciones tipo rotula o pivote. Uno de los sistemas plegables más común es el del pantógrafo. Inicialmente, se utilizó el pantógrafo para realizar reducciones y agrandamientos de dibujos conservando las proporciones entre el original y su copia por sus propiedades de homotecia. Actualmente, el pantógrafo se utiliza también para referirse a sistemas plegables con varios mecanismos tipo tijeras [19].



Figura 3.1: Ejemplo de estructura plegable tipo pantografo

### 3.1.3. Estructuras de tensegridad

La tensegridad es la facultad de una estructura para estabilizarse mediante el juego de fuerzas de tensión y compresión que se reparten y equilibran. Las estructuras de tensegridad son estabilizadas entonces, no por la resistencia de cada uno de sus partes, sino por la repartición y equilibrio de las restricciones mecánicas de la estructura completa. De esta manera, un sistema mecánico compuesto por un conjunto discontinuo de componentes comprimidos en el seno de un conjunto continuo en tensión puede encontrarse en un estado de equilibrio estable. Esto significa, por ejemplo, que juntando barras con cables, sin juntar las barras directamente entre ellas, se puede lograr obtener un sistema rígido.

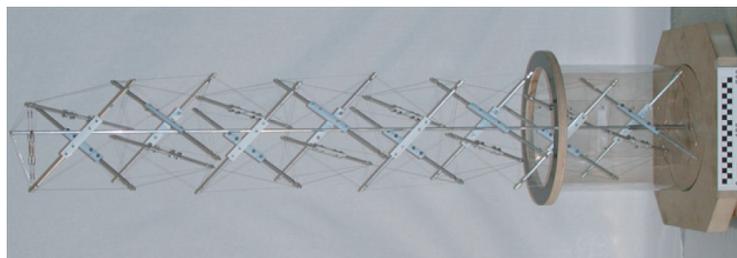


Figura 3.2: Ejemplo de estructura de tensegridad [9]

### 3.1.4. Brazos telescópicos

Los brazos telescópicos son generalmente mucho más rígidos que otras tecnologías desplegables, además mucho más precisos y estables. Sin embargo, son más pesados y poseen bajo factor de empaquetamiento.

Generalmente, el largo del brazo totalmente desplegado equivale a 10 veces el largo del brazo guardado. [1]



Figura 3.3: Ejemplo de brazo telescópico

### 3.1.5. Brazos inflables

Los brazos inflables y rigidizables han sido utilizado en diversas aplicaciones. Son estructuras livianas pero incapaces de mover cargas muy pesadas, sobre 10 [kg]. Poseen una precisión al despliegue y estabilidad post despliegue relativamente baja. Tiene la gran ventaja de ser extremadamente compactable con un muy alto factor de empaquetamiento de 1/45 [1].



Figura 3.4: Ejemplo de brazo inflable

### 3.1.6. Shape material composite booms (SMC)

Los brazos hechos de SMC poseen baja precisión y estabilidad post despliegue por lo que no pueden soportar estructuras muy pesadas. Sin embargo, son muy ligeros y necesitan de muy poca potencia para ser desplegados. Los brazos de SMC pueden ser aplanados y luego enrollados y doblados. Generalmente, se utiliza fibra de carbono reforzado con distintas combinaciones de resina.

Los brazos de SMC doblados solo han sido probados con éxito con hasta 1.3 [m] de extensión. Por otro lado, los brazos de SMC enrollados han alcanzado extensiones de hasta 15 metros. [1]

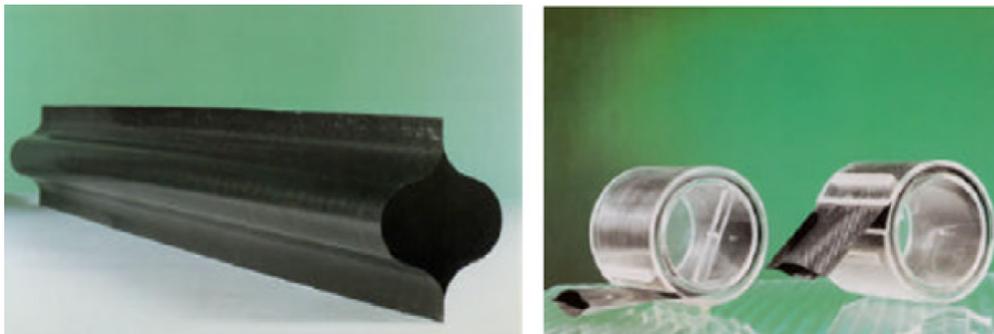


Figura 3.5: Ejemplo de brazo de SMC, "The collapside Tube Mast".

### 3.1.7. Coilable booms

Los coilable booms fueron diseñados inicialmente para aplicaciones de hasta 100 [m]. Esta tecnología se basa en alambres que se enrollan como resortes en para su forma almacenada.

Estos alambres están enrollados (deformación elástica) proporcionando la energía de deformación necesaria para su despliegue. Esto también significa que la punta del brazo gira durante el despliegue.

El almacenamiento es de menos del 2% de la longitud desplegada, y la rigidez y el peso también se pueden seleccionar modificando el diámetro del alambre para cada aplicación específica. Su precisión y estabilidad de post despliegue son menores que otras tecnologías. [1]

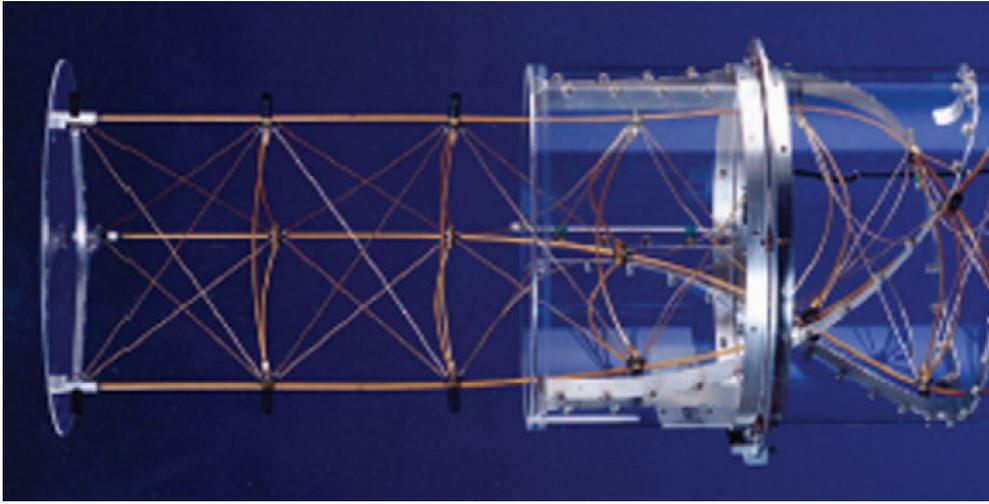


Figura 3.6: Ejemplo de coilable boom. [1]

## 3.2. Comparación entre las distintas tecnologías de estructuras desplegables

A continuación, se exponen 4 gráficos que comparan distintas tecnologías respecto a diferentes parámetros. Específicamente; diámetro del brazo, rigidez, peso del brazo y factor de empaquetamiento respecto al largo desplegable.

### 3.2.1. Diámetro del brazo v/s Largo desplegable

En la figura 3.7 se compara el diámetro del brazo respecto al largo desplegable. Se aprecia que a mayor diámetro mayor será el largo alcanzable que los brazos de SMC y los inflables son las alternativas que tienen mejor relación diámetro/largo.

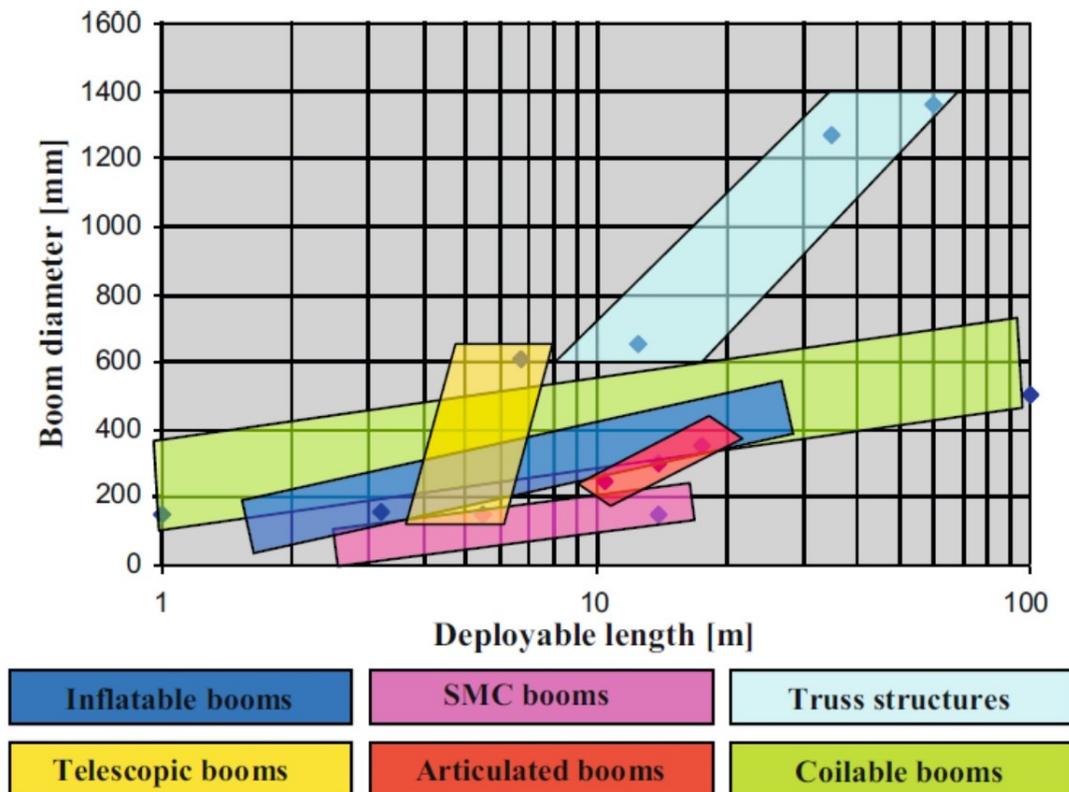


Figura 3.7: Diámetro del brazo v/s Largo desplegable [1]

### 3.2.2. Rigidez del brazo v/s Largo desplegable

La figura 3.8 muestra como la rigidez del brazo se relaciona con el largo alcanzable al despliegue. Se observa que a mayor rigidez, menor es el largo desplegable.

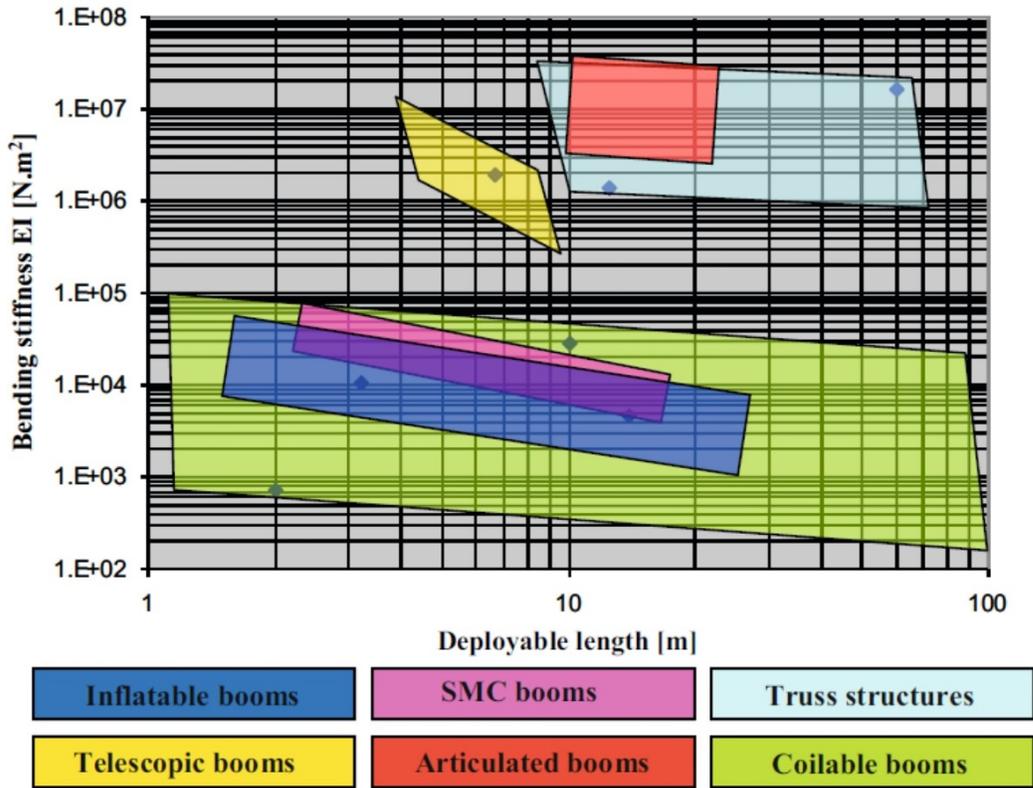


Figura 3.8: Rigidez del brazo v/s Largo desplegable [1]

### 3.2.3. Peso del brazo v/s Largo desplegable

En la figura 3.9 se relaciona la masa del brazo respecto al largo desplegable. Se ve claramente como a mayor masa, mayor largo se puede alcanzar. Una vez más los brazos de SMC aparecen con la mejor relación peso/largo.

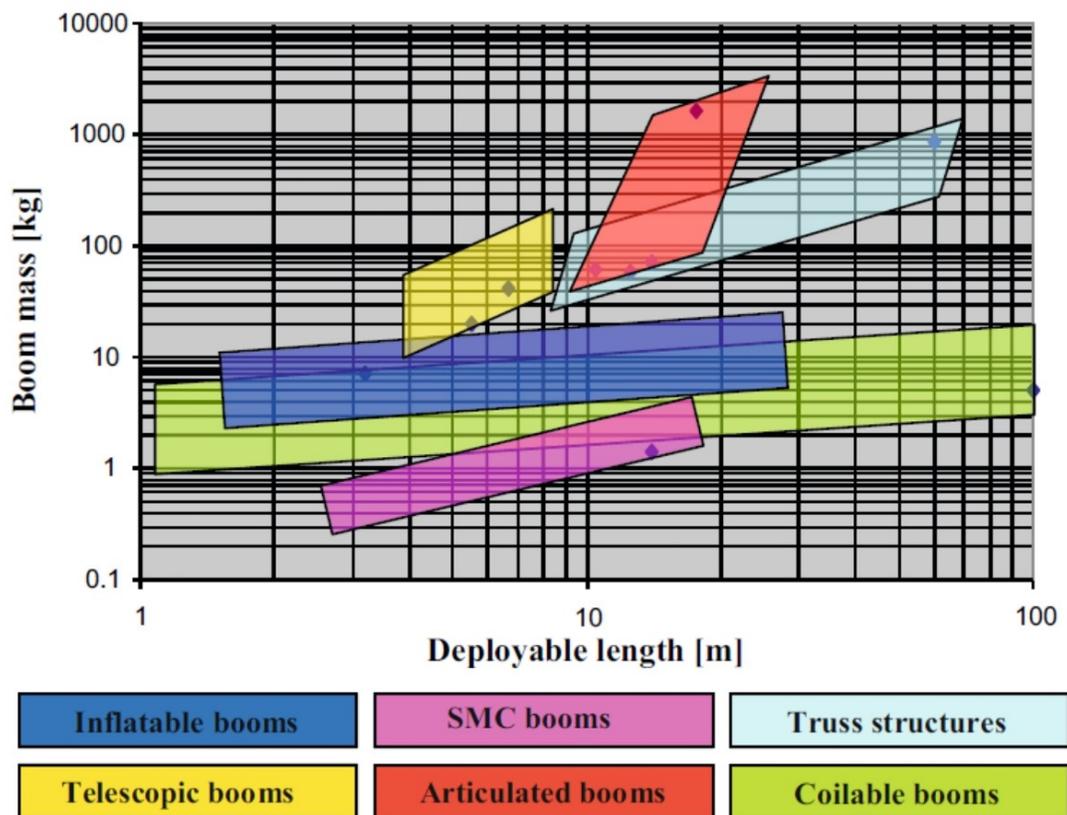


Figura 3.9: Peso del brazo v/s Largo desplegable [1]

### 3.2.4. Factor de empaquetamiento v/s Largo desplegable

En la figura 3.10, se gráfica el factor de empaquetamiento v/s largo desplegable. En este caso existen distintas tendencias dependiendo del tipo de tecnología empleada. Se ve que los brazos inflables son la tecnología que posee la mejor relación factor de empaquetamiento respecto al alcance del brazo.

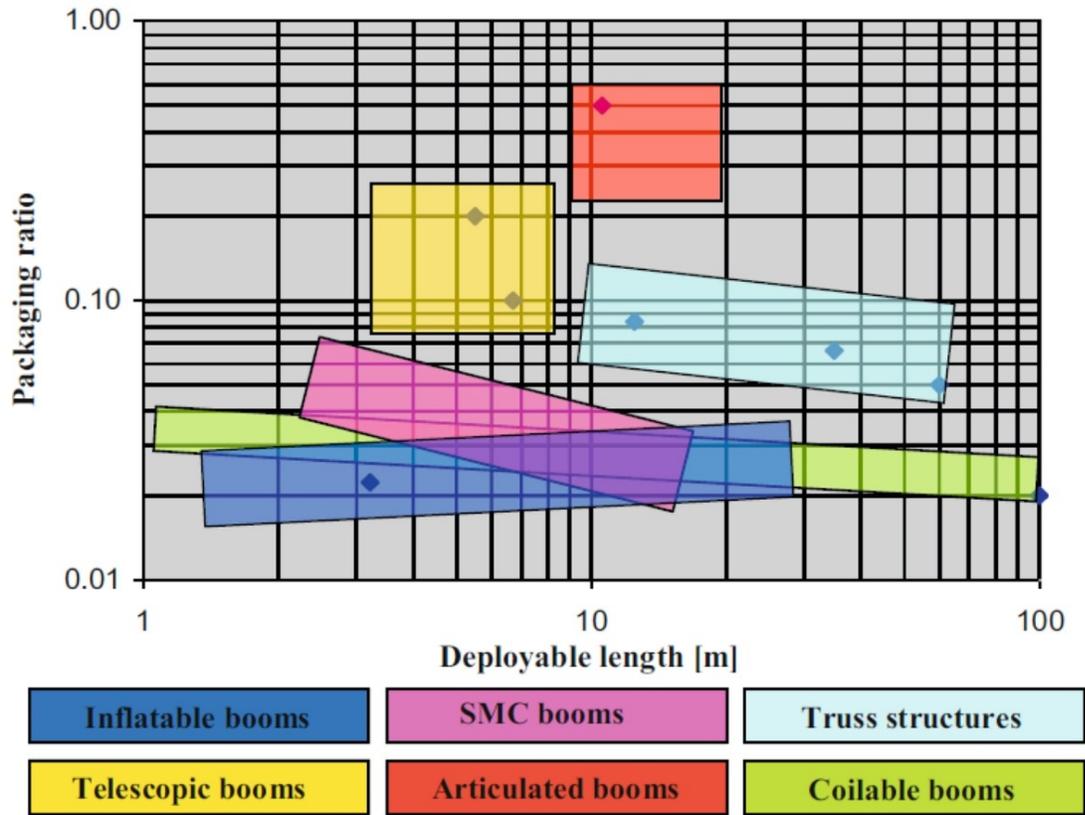


Figura 3.10: Factor de empaquetamiento v/s Largo desplegable [1]

### 3.3. Continuum robots

Existe en la actualidad una gran de variedad de robots que se pueden clasificar en función de sus grados de libertad como en la figura 3.11.

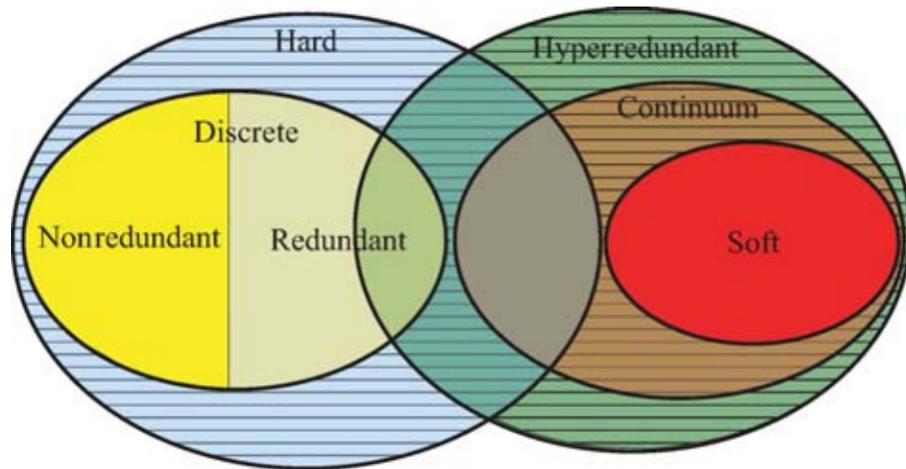


Figura 3.11: Clasificación de los robots [10]

Los continuum robots son hiper redundantes, es decir tienen más grados de libertad de los estrictamente necesarios para alcanzar un punto en el espacio.

Los continuum robots poseen virtualmente infinitos grados de libertad, estos se manifiestan mediante una deformación distribuida. Son difícilmente controlables debido a que su control se basa en modelos no lineales. Estos robots pueden ser blandos o rígidos.

Han sido utilizados la industria nuclear [20], automovilística [21], aeroespacial [21], en defensa [22] y en el área de la salud [23], particularmente para cirugías.

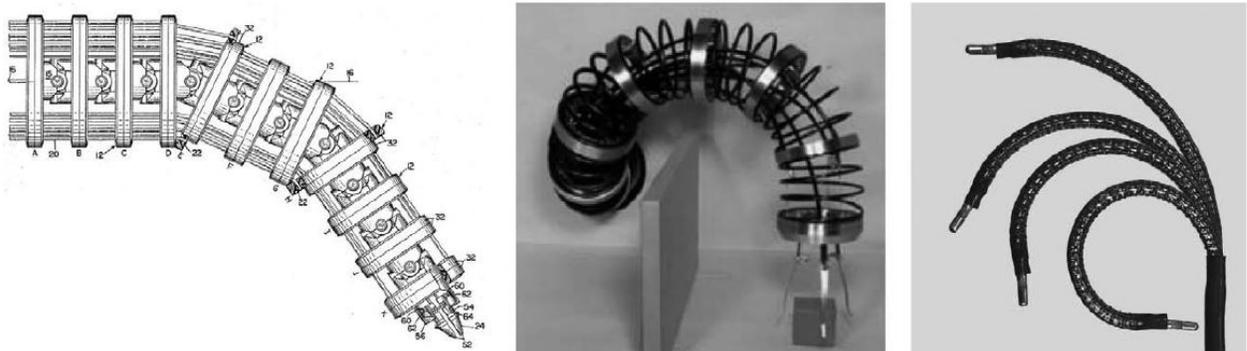


Figura 3.12: Ejemplos de continuum robots [11]

### 3.3.1. Acercamiento al modelo matemático

Existen modelos cinemáticos que logran describir los movimientos del robot que relacionan variables de configuración del robot y el tipo de actuador utilizado.

Estos modelos forman la base para la planificación de los movimientos, algoritmos de control y constituyen un paso crítico entre el desarrollo de prototipos e implementaciones prácticas de un continuum robot.

Dado que los continuum robots pueden cambiar su forma en cualquier punto a lo largo de su estructura, los modelos que los caracterizan son evidentemente diferentes a los robots convencionales de enlaces rígidos. El hecho de que la forma local varía continuamente a lo largo de la columna vertebral debe reflejarse en modelos cinemáticos.

En los modelos cinemáticos existentes, se asume la que la curvatura de la columna principal del robot es constante. En la figura 3.13 se aprecia la geometría adoptada por este tipo de robot, en un caso se tiene la geometría en una sección del robot que está en un plano y en el otro se tiene varias secciones y se aprecia la geometría que se obtiene en el espacio.

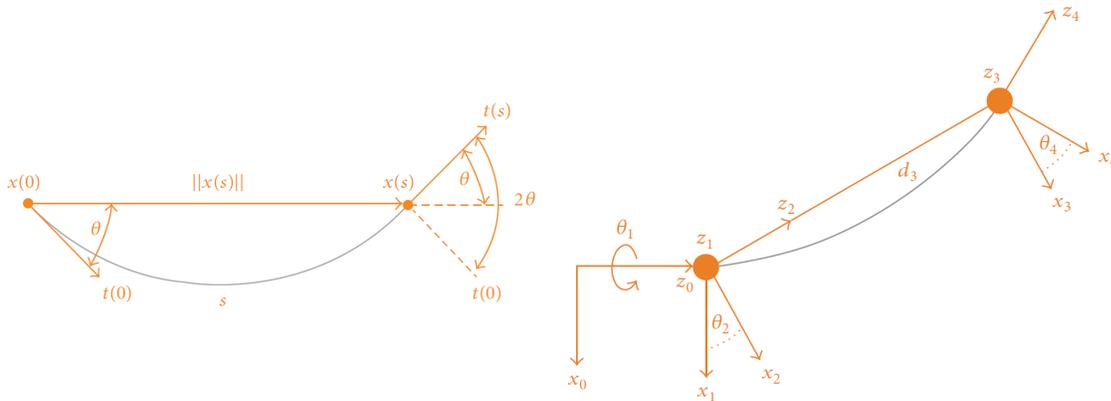


Figura 3.13: Geometría de continuum robots [12]

## 3.4. Inspección visual del deterioro de un puente

La inspección visual que se realiza para la evaluación del deterioro de un puente es parte fundamental de la inspección periódica que estos deben recibir.

Los datos obtenidos son utilizados para estimar los costos de reparación, priorizar reparaciones y clasificar el grado de deterioro que poseen.

Como en todo proceso analítico, la fiabilidad y utilidad de las conclusiones está directamente relacionado con la calidad de los datos utilizados. En el caso de la inspección visual de los puentes ferroviarios, la información de base para el análisis se registra en fotografías tomadas por los inspectores. Lo anterior tiene limitaciones dadas por el campo visual y la dificultad de acceso a los puntos de interés de estas estructuras.

### 3.4.1. Fotografías

Las fotografías son los datos requeridos para la inspección visual de los puentes. En la medida de lo posible los inspectores deben fotografiar las partes estructurales críticas del puente. Generalmente, se fotografía una perspectiva de todo el puente, una vista lateral, una vista inferior, una vista de la subestructura, entre otros elementos. Así se debe llegar a conocer los estados de la losa, la viga principal, bastiones, pilas, apoyos, juntas de expansión, superficie de rodamientos y barandas.

En la figura 3.14, se presentan ejemplos de fotografías útiles para una inspección de puentes.

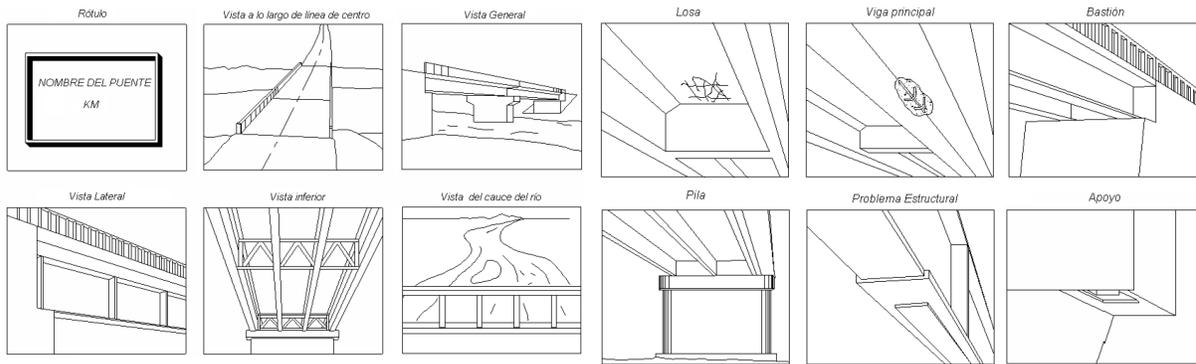


Figura 3.14: Ejemplo de fotografías de inspección de puentes.[13]

# Capítulo 4

## Diseño y fabricación

### 4.1. Definición de requisitos

Antes de comenzar con el diseño del robot a fabricar, se determinó una serie de requisitos que debía cumplir el prototipo para ser realmente útil en la inspección de puentes.

El brazo debe ser fácilmente manipulable, transportable, debe estar a funcional siempre cuando se requiera de su uso, debe lograr mirar hacia arriba y hacia abajo con la cámara y llegar a lugares de difícil acceso.

Para lograr cumplir con las características enunciadas, se determinó que la lista de requisitos a cumplir es la siguiente:

- Para ser fácilmente manipulable, el brazo debe contar con un mando manual que sea suave, ergonómico y que pueda mantener la posición cada vez que este se utilice.
- Para ser fácilmente transportable, el brazo en su forma plegada no puede exceder los 110 [cm] de extensión. Además no puede exceder los 3 [kg] de peso.
- Para estar siempre operativo y funcional cada vez que se requiera, el sistema no debe depender de baterías externas, por lo que el sistema debe ser totalmente mecánico.
- Para lograr llegar a lugar de difícil acceso, el brazo debe tener una extensión mínima al despliegue de 200 [cm].
- Para lograr mirar hacia arriba y hacia abajo con la cámara, el brazo debe tener los componentes y materiales necesarios para lograr ese tipo de movimientos.

### 4.2. Diseño del funcionamiento

Teniendo presente los requisitos que se determinaron que debe cumplir el brazo y que el objetivo principal es poder manipular una carga pequeña para acceder a lugares de difícil acceso en puentes ferroviarios, se comenzó a trabajar sobre distintas formas posibles de acceder

a esos lugares, con precisión en los movimientos y suficiente maniobrabilidad.

En este caso, consecuentemente al objetivo principal, la carga pequeña consistió en la cámara endoscópica para celular Android de la empresa NJoytech.

Tiene las siguientes características:

- Largo del cable: 5 Metros.
- Iluminación: 6 luces LED.
- Resistente al agua (Norma IP67)
- Cámara de 5.5[mm], 7[mm] de ancho.
- Compatible para dispositivos Android con entrada Micro USB y Windows

En base a lo anterior, se plantea el funcionamiento general del prototipo a fabricar: una persona manipulando un controlador adosado a una estructura desplegable es capaz de mover en el otro extremo de la estructura desplegable un manipulador de cargas livianas. La carga liviana consiste en una cámara para inspección.

De acuerdo a esto, se empezó el proceso de diseño el cual consideró varias opciones posibles que se detallarán a continuación.

#### 4.2.1. Diseños rígidos

Primero, se consideró la utilización de elementos rígidos que permitieran manipular las cargas livianas. En la figura 4.1, se aprecia el primer diseño que se realizó.

En este primer diseño, se plantea utilizar tres secciones rígidas controladas por motores en una base y transmisión de potencia a través de cables y poleas. Sin embargo, este diseño fue descartado por su difícil maniobrabilidad y bajo factor de empaquetamiento.

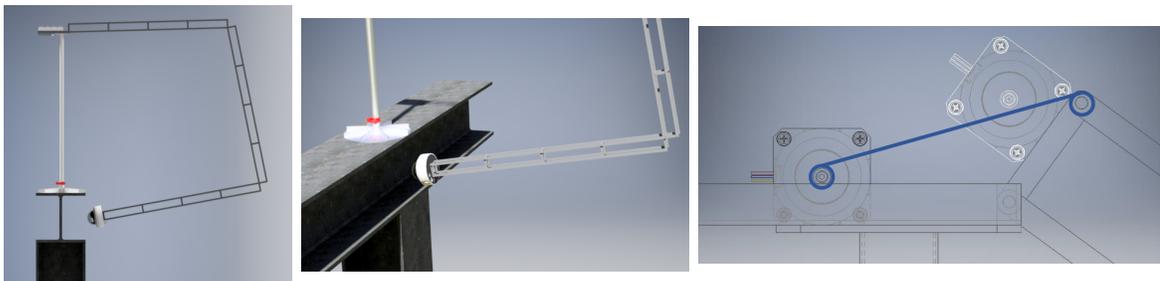


Figura 4.1: Imágenes del modelo CAD del primer diseño

Posteriormente, se evaluaron varios diseños compuestos por elementos rígidos y desplega-  
bles, sin embargo estos no cumplieron con los requisitos planteados.

Finalmente, se decidió realizar un diseño que incluyera tanto elementos rígidos como flexibles, utilizando un elemento rígido como estructura principal y un elemento flexible como manipulador de las cargas livianas.

#### 4.2.2. Diseño flexible

De acuerdo a los antecedentes recopilados y los requisitos que este brazo debe cumplir, se decidió idear un brazo que en su extremo tuviese un material flexible capaz de mover la carga a distintos puntos. Para llegar al diseño final, se utilizó como referencia conceptual las trompas de elefantes y los tentáculos de pulpo.

Para independizar el uso del brazo de fuentes de energías externas, no se consideraron componentes electrónicos en el diseño. Así quienes ocupen este equipo, no deberán preocuparse antes de cargar baterías eliminando la imposibilidad de uso por falta de energía. Esto permite tener un dispositivo que esté permanentemente disponible para uso.

Basado en esto, se decidió utilizar como medio flexible para lograr estos movimientos un resorte controlado por cables de acero, como se ve en la figura 4.2.

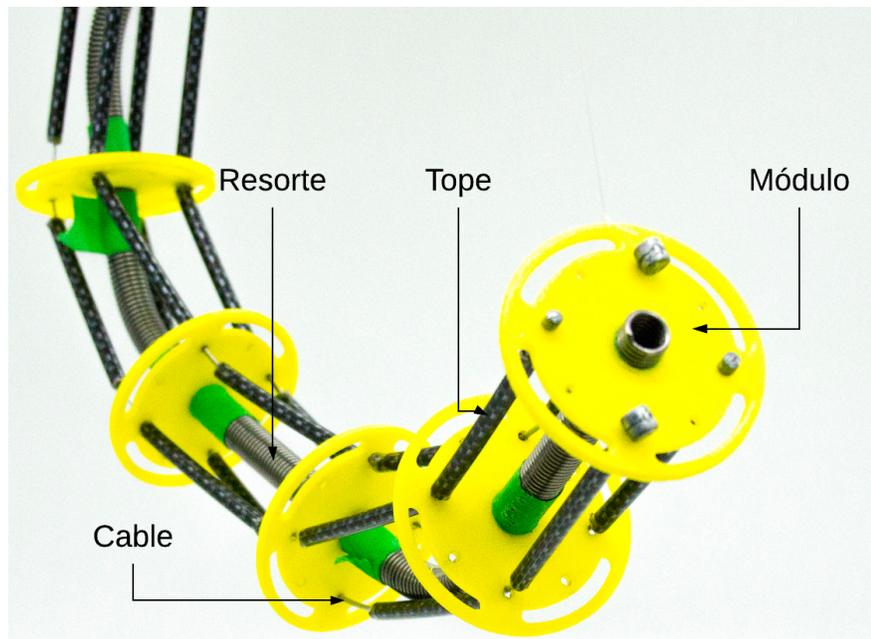


Figura 4.2: Manipulador de cargas; se aprecia el manipulador de cargas en sus primeras iteraciones dónde se utiliza PLA amarillo para fabricar los módulos y cinta adhesiva verde para fijarlos al resorte. El resorte principal se mantuvo a lo largo de las iteraciones y los cables en este caso son cables de freno de bicicleta que luego fueron cambiados por cables de acero galvanizado.

## 4.3. Diseño y fabricación de las partes

### 4.3.1. Descripción general de las partes

Se determinó que para cumplir con los requisitos y el objetivo principal, el brazo debía tener las siguientes partes:

- Estructura principal desplegable.
- Manipulador de cargas livianas.
- Controlador del manipulador.

Las distintas partes del brazo deben cumplir las siguientes funciones:

- La estructura principal desplegable debe ser el puente físico entre el controlador del manipulador y el manipulador de cargas livianas.
- El controlador del manipulador de cargas livianas, debe ser operado por una persona y lograr transmitir de manera controlada el movimiento al manipulador de cargas.
- El manipulador de cargas, debe moverse en la dirección deseada por el operador mediante el uso del controlador.

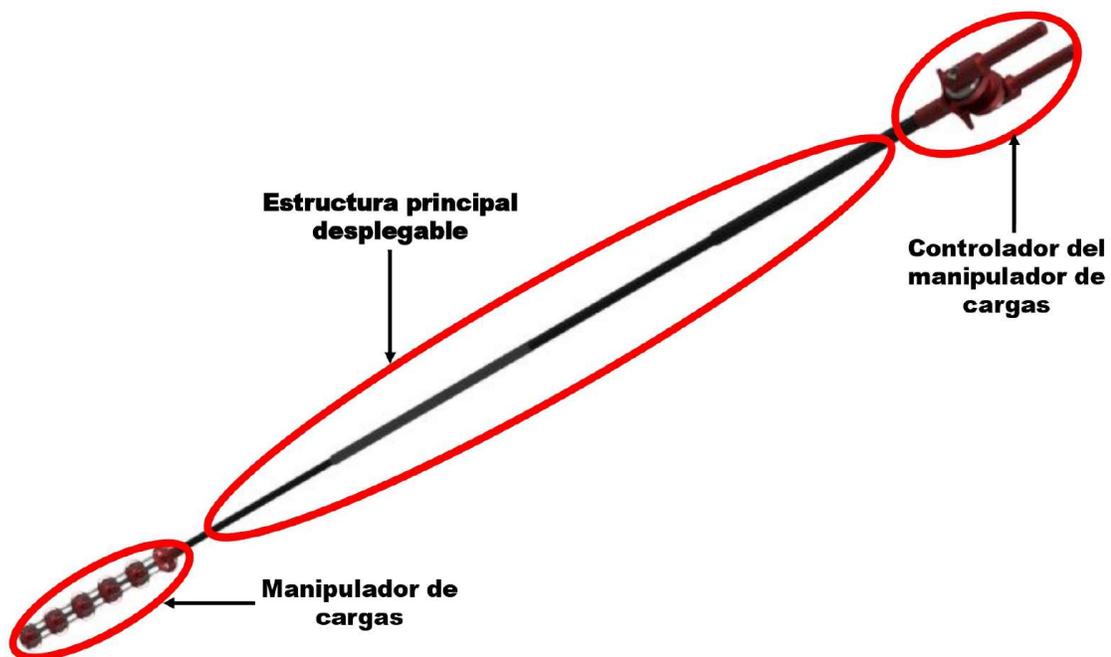


Figura 4.3: Diseño CAD final y partes principales del brazo

A continuación, se expone el proceso de diseño de cada una de las partes del brazo.

### 4.3.2. Estructura principal desplegable

Para la estructura principal desplegable se evaluaron diversas alternativas siendo la primera de ellas fabricar una estructura desplegable de tipo telescópica. Pero luego de evaluar las distintas opciones disponibles en el mercado, por su capacidad de carga, bajo peso debido a su aleación de aluminio, su factor de empaquetamiento y su estructura telescópica, se optó por el soporte de cámaras fotográficas Monopod SOLIGOR WT1006.

Su geometría simple permite fácilmente acoplar en ambos extremos tanto el manipulador de la carga, como el controlador del manipulador.



Figura 4.4: Monopod SOLIGOR WT 1006 y ficha técnica

Al removerle las piezas que posee para su función inicial y dejar únicamente la estructura desplegable, quedó un brazo telescópico con las siguientes características:

- Altura plegada: 50 [cm]
- Altura desplegada: 170 [cm]
- Masa: 400 [g]

### 4.3.3. Manipulador de cargas

Para el elemento manipulador de cargas, luego de varias iteraciones y para obtener mayor rango de movimientos, se descartó el uso de elementos rígidos.

De esta manera, los principales componentes del elemento manipulador consisten en un resorte principal accionado por cables.



Figura 4.5: Evolución en el diseño flexible del manipulador de cargas; A la izquierda se ve el manipulador en su etapa inicial, los módulos son de PLA y se fijan al resorte con cinta adhesiva. Al centro, el manipulador ya con los módulos en su versión definitiva de duraluminio. A la derecha, la versión final dónde están añadidos los resortes secundarios.

Se utilizan 4 cables de acero galvanizado para controlar el movimiento del resorte. 5 módulos, separados a 8 [cm] de distancia cada uno permiten seccionar el resorte permitiendo el movimiento requerido.

A continuación, se detallará la función, diseño y proceso de fabricación de cada una de las partes del manipulador de cargas las cuales son:

- Resorte principal
- Módulos
- Resortes secundarios
- Topes
- Cables
- Tensores
- Acople

## Resorte principal

Es el alma o columna vertebral del manipulador de carga. Otorga la flexibilidad requerida y por consiguiente los múltiples grados de libertad buscados. Se une a la estructura rígida mediante el acople.

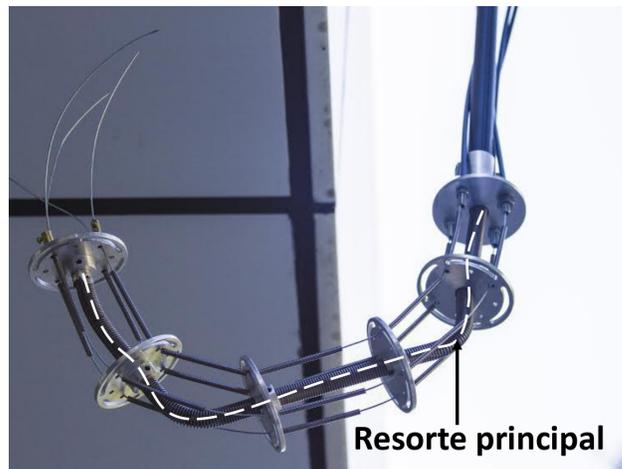


Figura 4.6: Resorte principal; se aprecia el manipulador de cargas completo. Se destaca en línea segmentada blanca la ubicación del resorte principal, el cual corresponde a un sólo resorte de 40 [cm] de largo.

## Módulos



Figura 4.7: Fotografía de un módulo; posee 8 agujeros para pasar cables en la base, y 3 agujeros con hilo en la parte superior donde van prisioneros que permiten fijar el módulo al resorte principal.

Los módulos, en su diseño final, corresponden a platillos de duraluminio como se aprecia en la figura 4.7. Estos seccionan el resorte principal en 5 tramos permitiendo la flexión del resorte al momento de tirar de los cables. Constan de 8 perforaciones destinadas para pasar cables que controlan el movimiento del resorte y 4 ranuras que permiten reducir el peso de estos elementos.

En la versión actual solo se utilizan 4 perforaciones, pudiendo utilizarse 8 si se requieren mayores grados de libertad.

Para fijarlo al resorte, se maquinaron bujes de bronce que calzaran perfectamente entre el resorte y el módulo, eliminando el juego existente entre los módulos y el resorte. Los bujes son

apretados por 3 prisioneros distribuidos en la circunferencia de la parte alta del platillo. Los bujes tienen por función apretar el resorte de forma pareja y que los prisioneros no separen el resorte. De esta manera, el módulo queda firme y perpendicular al resorte.

Los diseños del módulo fueron evolucionando hasta llegar al diseño actual, según la metodología iterativa expuesta en el capítulo "Metodología".

En la figura 4.8 se aprecian de izquierda a derecha en forma secuencial las distintas iteraciones del diseño hasta llegar al diseño actual.



Figura 4.8: Iteraciones del diseño del módulo; se aprecia de izquierda a derecha la evolución de los diseños. Al principio utilizando PLA para el prototipado y finalmente duraluminio.

Para fabricar los módulos, primero se compró una barra de duraluminio de 63 [mm] de diámetro. Las características de este material se pueden apreciar en la tabla 4.2 en la columna duraluminio.

Este cilindro fue posteriormente maquinado en el torno convencional para dejarlo del diámetro requerido, esto es 60 [mm].

A partir de ese cilindro, se hicieron los módulos. Para ello, se tronzó el cilindro, rebajó el diámetro en la zona de los prisioneros y finalmente se taladró por donde pasaría el resorte. Las perforaciones de los prisioneros se realizaron con el taladro de pie y el hilo con el macho correspondiente.

Una vez realizado el maquinado en el torno, se realizaron las 8 perforaciones por donde pasan los cables y las ranuras. Estas se hicieron con una máquina CNC.

Se gestó el código máquina necesario para que la máquina pasará por tramos específicos del módulo con fresa de 3 [mm] para las ranuras y broca de 3 [mm] para perforaciones como se aprecia en la figura 4.9.

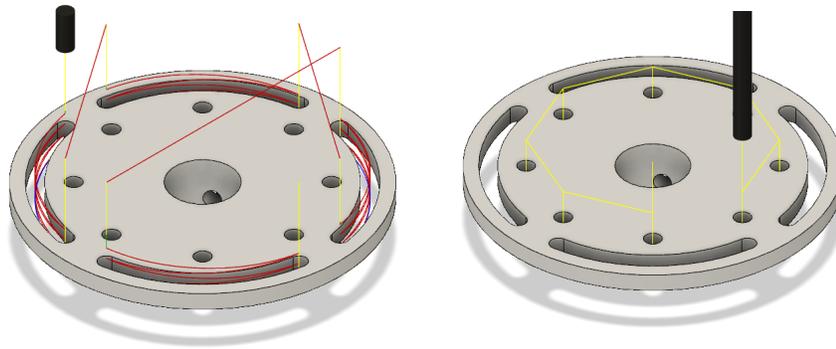


Figura 4.9: Simulación del código máquina para manufactura de un módulo; A la izquierda, se simula el proceso de las ranuras con una fresa de 3 [mm]. A la derecha, se simula el proceso para las perforaciones con un broca de 3 [mm].

## Resortes secundarios

Estas piezas fueron las últimas en implementarse. Tras varias iteraciones, subsistía un problema importante: la torsión inherente al resorte principal no permitía que el manipulador de carga se mantuviera estable su posición, ya que si bien el manipulador lograba tomar la posición deseada, este no se podía mantener ya que al mover el brazo desde la estructura principal desplegable, el manipulador se caía.

Aumentar la rigidez del manipulador era necesario para lograr manipular la carga sin que se cayera.

Por esta razón, se incorporaron a cada sección de cables, resortes en compresión, tal cual se ve en la figura 4.10. Esta incorporación logró de manera muy eficiente aumentar la estabilidad del manipulador de cargas.

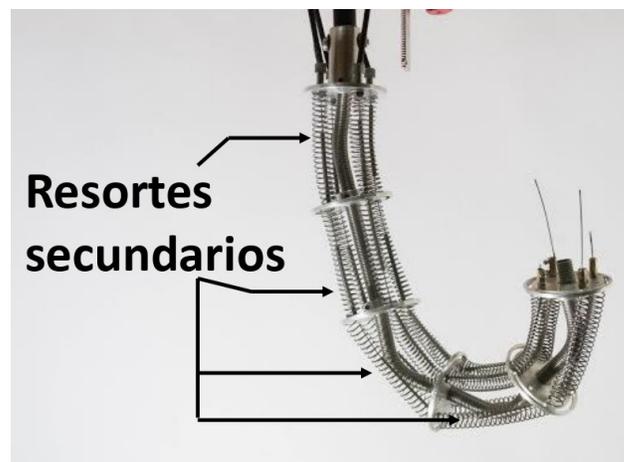


Figura 4.10: Resortes secundarios; se señalan los resortes secundarios puesto en el manipulador. Son 20 en total.

## Acople



Figura 4.11: Fotografía del acople; se ve como el acople logra unir la estructura principal desplegable con el manipulador de cargas.

El acople, como se aprecia en la figura 4.11, es la pieza encargada de unir el manipulador de las cargas a la estructura principal desplegable. Este se manufacturó a partir de la misma barra de duraluminio utilizada para los módulos.

Para llegar a su diseño final, se utilizó la misma metodología iterativa utilizada para el diseño de los módulos, como se aprecia en la figura 4.12.

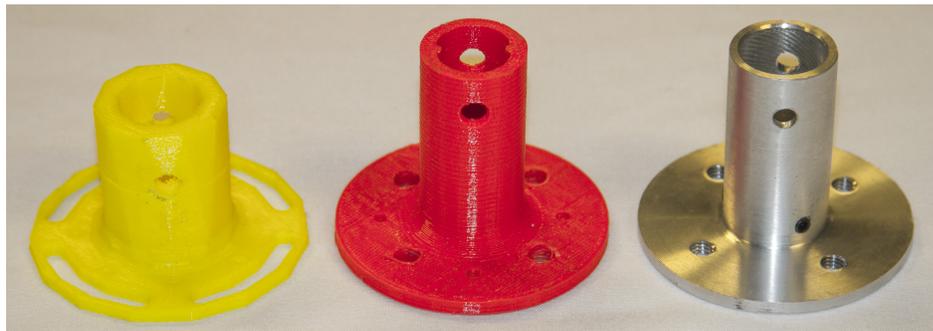


Figura 4.12: Iteraciones en diseño del acople; se aprecia de izquierda a derecha la evolución de los diseños. El prototipado en PLA y la versión definitiva en duraluminio.

Su geometría emula la de los módulos para que se vea estéticamente bien. Fue totalmente manufacturado en el torno convencional a partir de una barra de aluminio de 63 [mm] de diámetro. En su interior, como se aprecia en la figura 4.13, posee dos diámetros distintos: uno calza con el extremo al cual se acopla la estructura rígida y otro que calza con el diámetro del resorte utilizado. Para afirmar el resorte, al igual que en los módulos se utilizan tres prisioneros y un buje de bronce. Para afirmar el acople a la estructura rígida, se utiliza un perno con una tuerca pasante.

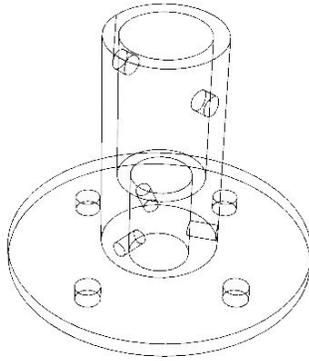


Figura 4.13: Vista isométrica del acople; se aprecian los dos diámetros internos existentes, uno para la estructura principal desplegable, el otro para el resorte principal.

## Topes

Durante las distintas iteraciones que se realizaron a lo largo de este trabajo, se encontraron varios inconvenientes que tuvieron que ser resueltos. Uno de ellos, fue que al tensar las cuerdas que mueven el resorte, este se enrollaba sobre sí mismo, no logrando el movimiento que se buscaba.

La solución que se encontró y utilizó fue agregar topes, como el que se ve en la figura 4.2. Estos topes permiten lograr el radio de curvatura deseado para el objetivo que tiene este brazo.

Los topes tienen un largo de 50 [mm] y fueron hechos a partir de cable funda para piolas de bicicletas que se cortaron con discos de cortes para asegurar precisión.

## Cables

Para mover el resorte, se pasaron 4 cables de acero galvanizado de 1.5 [mm] de diámetro por las perforaciones de los módulos.

En las primeras iteraciones se utilizaron piolas de freno de bicicleta, pero fueron descartadas luego por su alto costo y formato de venta. Las piolas de freno tienen un valor que bordea los 500 CL\$ por metro además que sólo se encuentra en un largo de 2 metros. El cable de acero galvanizado se vende a 80 CL\$ el metro y se puede pedir una tira de los metros que se estimen convenientes.

Las especificaciones técnicas del cable utilizado se pueden ver en la tabla 4.1.

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <b>Producto</b>                  | Cable de acero galvanizado de 19 hebras |
| <b>Grado</b>                     | 2070 [ $\frac{N}{mm^2}$ ]               |
| <b>Diámetro nominal</b>          | 1.5 [mm]                                |
| <b>Peso</b>                      | 0.015 [ $\frac{kg}{m}$ ]                |
| <b>Resistencia a la tracción</b> | 502 [kgf] o 4.9 [kN]                    |

Tabla 4.1: Características mecánicas del cable utilizado [2]

## Tensores

Para el correcto funcionamiento del brazo, es necesario tensar de manera adecuada los cables.

Para eso, se decidió utilizar dos piezas claves. Una corresponde a un tensor de freno de bicicleta que corresponde básicamente a un perno con un orificio a lo largo. Estos, se colocan en el acople. Al moverlos, empujan el cable funda para piola de bicicleta tensando el cable.

Otra pieza clave que se utilizó para tensar fue la parte metálica de las regletas para conexión de cables eléctricos. Primero, se tensa de manera manual tirando el cable con un alicate, luego se aprieta el cable con la regleta a la altura del módulo. De esta manera el cable mantiene la tensión que se le otorgó manualmente. Esto se observa en la figura 4.14.

Así, para tensar el cable primero se tensa con la regleta y finalmente se ajusta la tensión con los tensores de frenos de bicicletas.



Figura 4.14: Tensores

#### 4.3.4. Controlador del manipulador de cargas

##### Requisitos del diseño

Para controlar el movimiento de la parte flexible móvil, se decidió diseñar una palanca que fuese capaz de tirar de los cables con el fin mover el manipulador de cargas a voluntad del usuario, dentro de los rangos que especificados.

Los 4 cables forman dos pares de cables que actúan solidariamente, esto es; al traccionar uno, el otro se estira. Así, para mover los 4 cables, se necesitan 2 palancas.

Otro requisito que se propuso como necesario fue que el controlador debía tener un movimiento suave y que pueda mantenerse en la posición elegida por el usuario sin necesidad de sostener la palanca.

##### Diseño y funcionamiento general

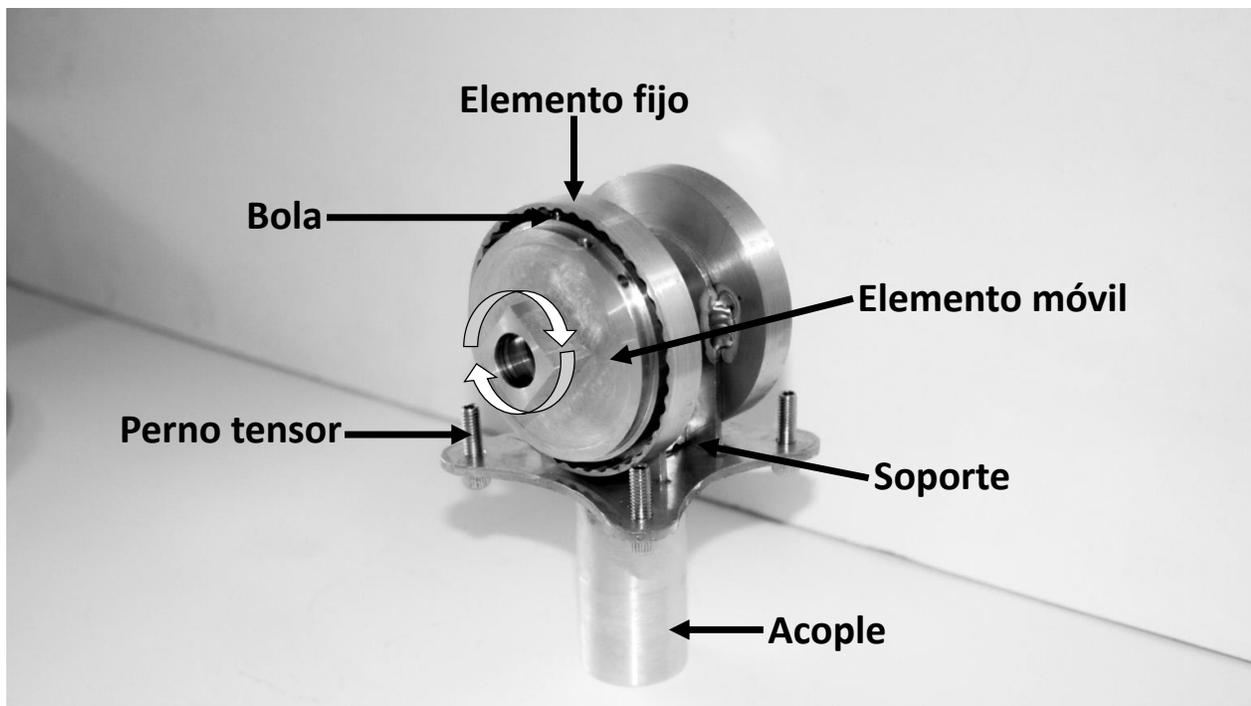


Figura 4.15: Fotografía del controlador del manipulador en su forma final, sin las palancas acopladas.

El uso de un carrete que tirara de los cables fue una alternativa que se evaluó, sin embargo se descartó tempranamente porque no permitía una manipulación cómoda para el usuario.

Luego, por las características que debía tener el controlador, se evaluó el uso de un controlador tipo "joystick" que permitiera manejar los 4 cables con una sola palanca. Si bien,

se lograron algunos diseños de joystick que lograban controlar los cables, no se conseguía mantener una posición sin soltar la palanca. Por esta razón, se decidió buscar otro tipo de funcionamiento que permitiera mantener una posición sin hacer fuerza.

Finalmente, se llegó al diseño expuesto en la figura 4.16 que consta de un elemento fijo dentado y un elemento móvil que posee una bola que encaja en los valles de la dentadura del elemento fijo. La bola es empujada por un resorte, por lo que fuerza del resorte permite mantener la posición requerida. Cada conjunto de elemento fijo y elemento móvil controla un par de cables, por lo que se necesitan dos conjuntos de elemento fijo y elemento móvil como se aprecia en la figura 4.15 donde se ve el mecanismo montado al soporte y se detallan las principales partes del controlador del manipulador.

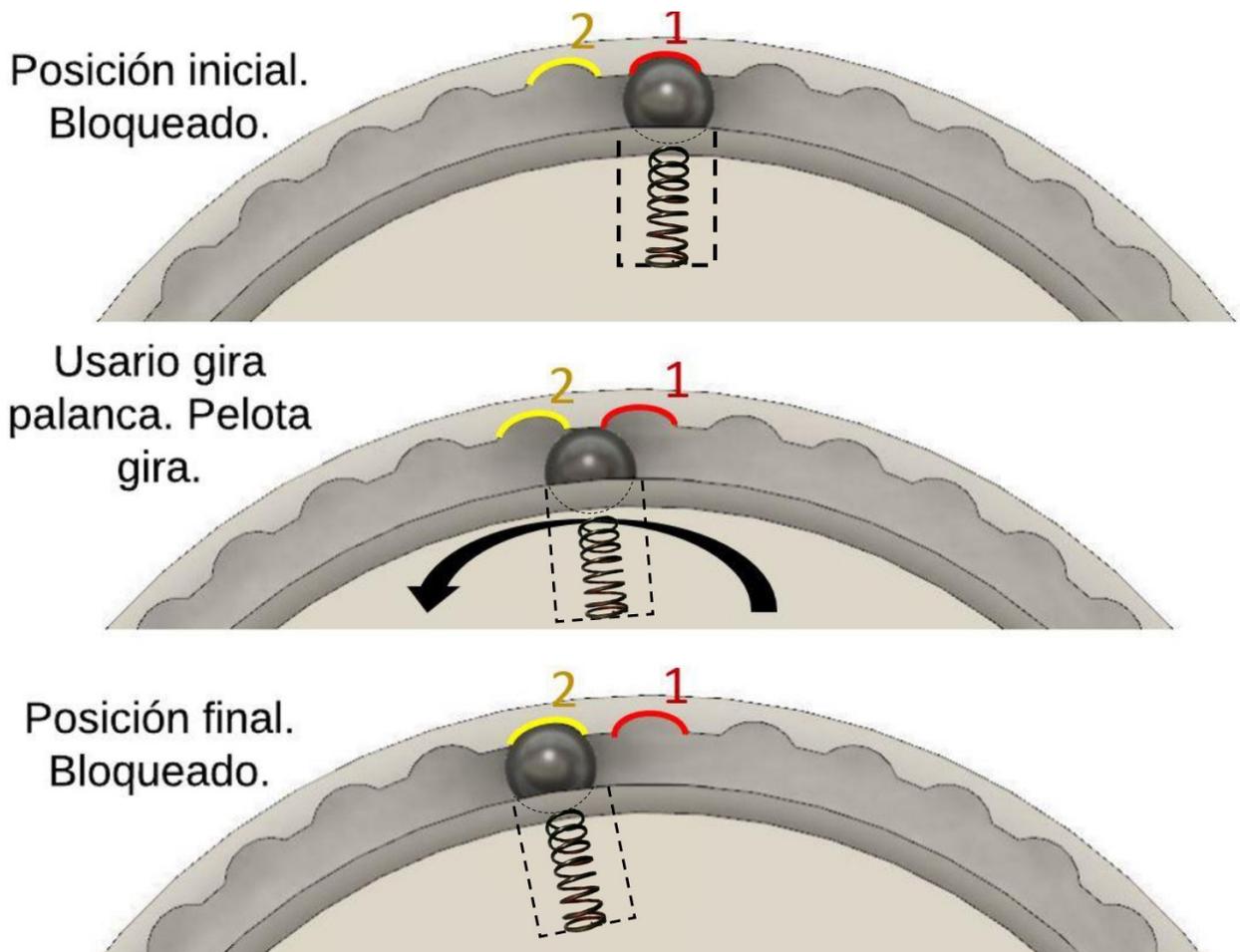


Figura 4.16: Esquema de funcionamiento del mecanismo de bloqueo del controlador del manipulador

## Partes del elemento controlador manipulador de cargas

### Parte fija

Para la realización de la parte fija también se utilizó la metodología iterativa. Se probaron distintas geometrías de dentadura hasta encontrar una que permitiera que la bola se deslizara fácilmente además de quedarse fija al dejar de girar. Esto se aprecia en la figura 4.17.

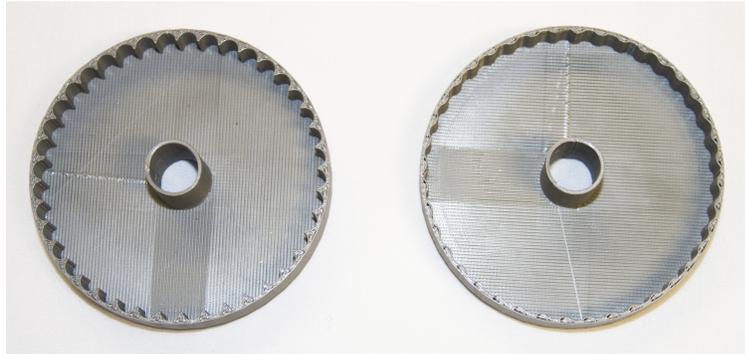


Figura 4.17: Iteraciones, de izquierda a derecha, en diseño de la dentadura del elemento fijo.

Una vez que se llegó a una geometría que cumplió con los requisitos, se manufacturó la pieza en su versión definitiva.

Esta se hizo a partir de una barra de duraluminio de 83 [mm] de diámetro. Este fue reducido al diámetro externo final de 77 [mm] mediante el torno tradicional y luego maquinado mediante máquina CNC, como lo muestra la figura 4.18.

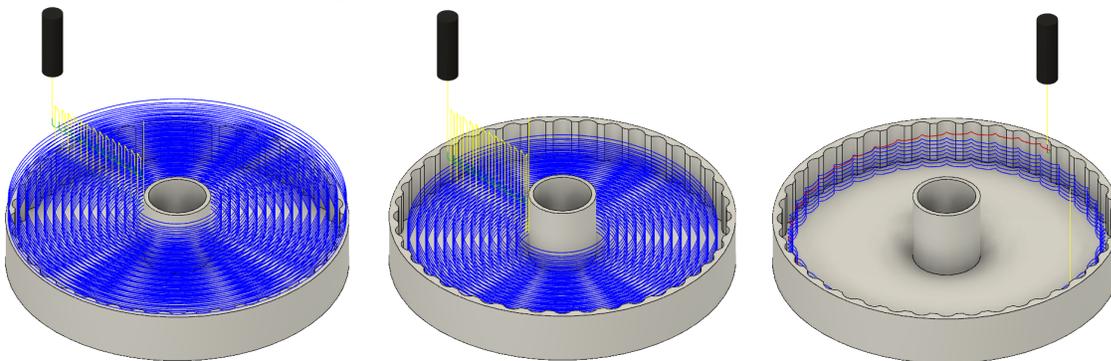


Figura 4.18: Simulación del proceso de manufactura de una pieza fija

## Parte móvil

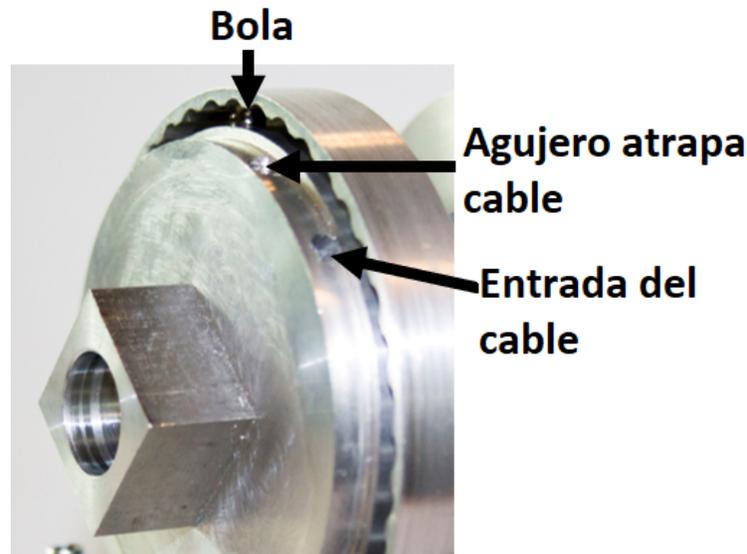


Figura 4.19: Fotografía de la parte móvil montada en parte fija. Se aprecia la bola encajada en un valle, un agujero de entrada del cable y el otro agujero atrapa cable el cual posee un prisionero capaz de apretar el cable.

La parte móvil gira alrededor del eje de la parte fija. Posee un rodamiento que se acopla a la pieza fija. En su contorno, se le realizó una perforación en la que se encuentra un resorte y una bola de acero. Esta bola es empujada por el resorte contra la dentadura de la parte fija, como se aprecia en la figura 4.16.

La parte móvil posee en su cara exterior, la extrusión de un cuadrado que sirve para acoplarse a la palanca que lo mueve.

Esta pieza es la encargada de tirar de los cables. Como se aprecia en la figura 4.19, por cada cable que llega a esta pieza (llegan 2) existen dos agujeros. En un agujero entra el cable. En el otro, el cual posee un hilo, se encuentra un prisionero capaz de apretar el cable para que este pueda ser tirado al girar la pieza móvil.

Para su manufactura, se utilizó duraluminio. Se adquirió una barra de 83 [mm]. Está fue torneado dando por resultado una pieza con varios diámetros distintos. El más grande externo, donde se encuentra la bola, de 68 [mm] y 10 [mm] de espesor. Luego otro de 65 [mm] de diámetro, con un espesor de 5 [mm], donde se encuentran los agujeros de la entrada del cable y atrapa-cables. A continuación, en la parte posterior, un diámetro donde calzara perfectamente el rodamiento utilizado. Finalmente, se utilizó una máquina CNC para generar el cuadrado extruido, como se ve en la figura 4.20.

Los agujeros donde entran los cables, los atrapa cables y donde se encuentra la bola, se realizaron con un taladro de pie, utilizando distintas brocas según la necesidad.

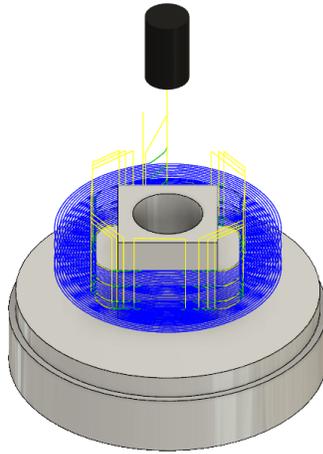


Figura 4.20: Simulación del proceso para manufactura del cuadrado extruido de la pieza móvil.

### Palanca de mando

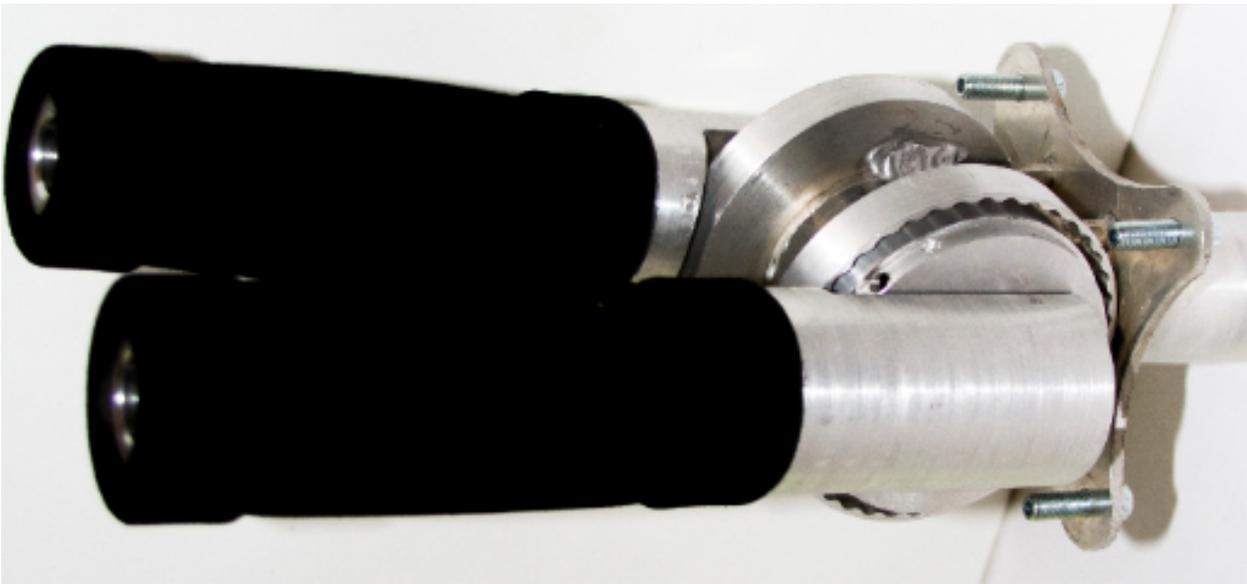


Figura 4.21: Fotografía del controlador con la palanca acoplada.

La palanca de mando es la pieza que el usuario utiliza para controlar el manipulador de cargas. Este se acopla con la pieza móvil.

Se manufacturó a partir de una barra de duraluminio de 45 [mm] de diámetro. Esta fue torneada dejando dos secciones, una de 40 [mm] de diámetro y la otra de 25 [mm] donde se acopla una goma que es posible apreciar en la figura 4.21 y luego fue maquinada en una máquina CNC según indica la figura 4.22.

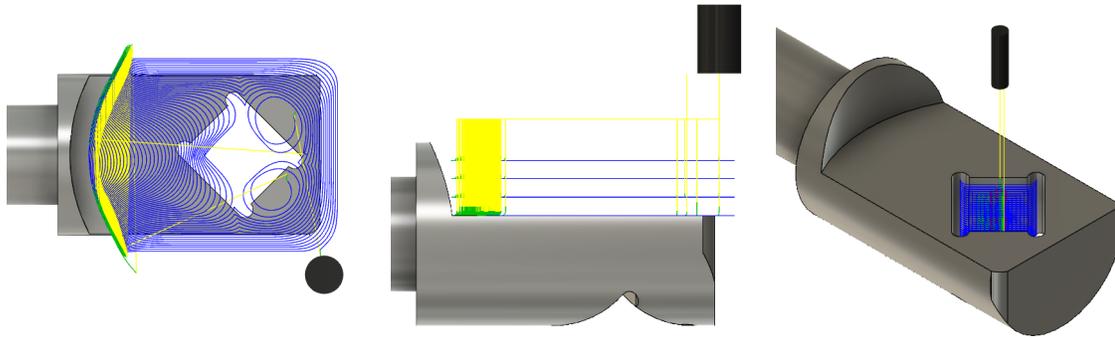


Figura 4.22: Simulación del proceso de manufactura de la palanca de mando

## Soporte

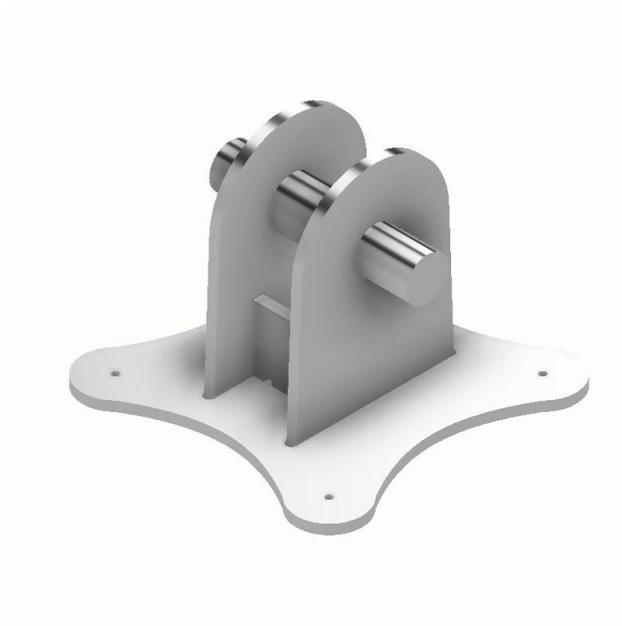


Figura 4.23: Vista isométrica del soporte ensamblado.

Para sostener los dos conjuntos elemento fijo/móvil, se diseñó un soporte que consiste en piezas cortadas de una plancha de aluminio de tal manera que se puedan ensamblar para generar la estructura requerida. Además, para soportar los esfuerzos requeridos, se añadió un eje para reforzar la estructura.

Las piezas fueron manufacturadas a partir de una plancha de 3 [mm] de espesor en una máquina CNC según se indica en la figura 4.24. Se unieron mediante soldadura. Al ser de aluminio, se tuvo que contratar una empresa externa para realizar el trabajo de soldadura. Para realizarlo en la universidad, se tendría que haber utilizado acero, pero fue descartado por su alta densidad.

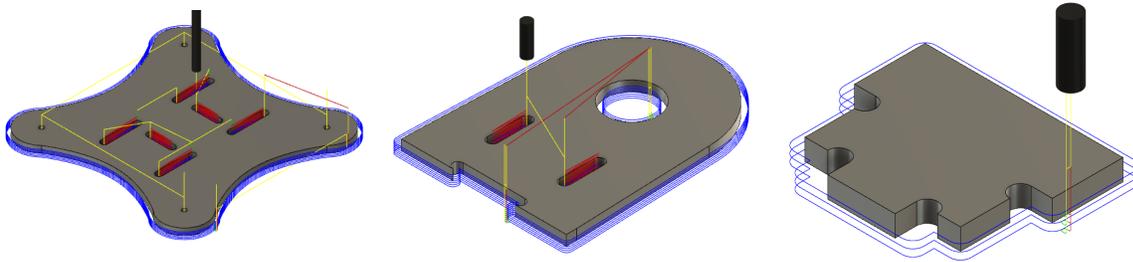


Figura 4.24: Simulación del proceso de cortado de las piezas necesarias para el ensamble del soporte

Finalmente, en la figura 4.25, se observa el diseño en CAD del brazo en su totalidad así como los diseños del manipulador de cargas y del controlador del manipulador.



Figura 4.25: Diseño final CAD del brazo completo, manipulador de cargas y controlador del manipulador

#### 4.4. Elección de materiales

|                                 | PLA            | Fibra de carbono | Aluminio     | Duraluminio   | Acero             |
|---------------------------------|----------------|------------------|--------------|---------------|-------------------|
| Resistencia a la tracción [MPa] | 46,8           | 1100             | 124          | 427           | 450 - 1970        |
| Densidad [ $\frac{g}{cm^3}$ ]   | 1,29           | 1,25             | 2,7          | 2,79          | 7,8               |
| Maquinabilidad [%]              | -              | -                | 30           | 70            | 50 - 70           |
| Dureza                          | 65,8 (Shore D) | -                | 30 (Brinell) | 105 (Brinell) | 121-578 (Brinell) |
| Modulo de Young [GPa]           | 2,8            | 77               | 68,9         | 72,4          | 152-170           |
| Precio [CLP/kg]                 | 15.000         | 58.000           | 3.844        | 8.740         | 1.260             |

Tabla 4.2: Tabla comparativa de materiales. [3] [4] [5] [6] [7]

A lo largo del proceso de diseño y fabricación se utilizaron diversos materiales. Principalmente duraluminio y PLA.

El PLA se utilizó para manufacturar mediante impresoras 3D de forma rápida y económica modelos para ser evaluados y perfeccionados. El PLA es un material muy liviano y que durante las pruebas resistía los esfuerzos a los cuales estaba siendo sometido. Sin embargo, probablemente este material terminaría fallando por fatiga tempranamente. Así, se decidió utilizar piezas de PLA únicamente para la etapa de diseño. Para el modelo definitivo, se debió buscar otro material.

Se evaluó el uso de diversos materiales. Las piezas deben tener buena terminación y ser livianas para cumplir con los requisitos de peso definidos en primera instancia. Además el brazo está sujeto a condiciones de operaciones donde es probable que esté frecuentemente sometido a golpes.

El aluminio quedó entonces descartado por su baja maquinabilidad y dureza. Al ser poco duro, los golpes a los cuales el brazo está expuesto provocarían salpicaduras en piezas de aluminio. Además, esta baja dureza provocaría problemas al momento del maquinado generando excesivas rebarbas que pueden dañar las herramientas.

Si bien acero posee buena resistencia a la tracción y dureza, fue descartado por su muy alta densidad. Esto no permite cumplir con el requisito de peso total del dispositivo en caso de utilizar este material.

La fibra de carbono posee muy buena resistencia a la tracción y densidad. Sin embargo, por su excesivo alto costo queda descartado. Existen más materiales que pueden cumplir con los requisitos impuestos a costos muy inferiores.

Finalmente, se decidió utilizar duraluminio para la piezas definitivas. A pesar de ser casi el doble de pesado que el PLA y que la fibra de carbono, sigue siendo lo suficientemente liviano para cumplir con los requisitos establecidos de peso y casi seis veces más económico que la fibra de carbono. Además su formato de venta (barras cilíndricas) permite que las piezas sean fácilmente manufacturadas.

# Capítulo 5

## Pruebas y caracterización

### 5.1. Dimensionamiento del dispositivo

- Peso: 2200 [g]
- Largo mínimo: 103 [cm]
- Largo máximo: 220 [cm]

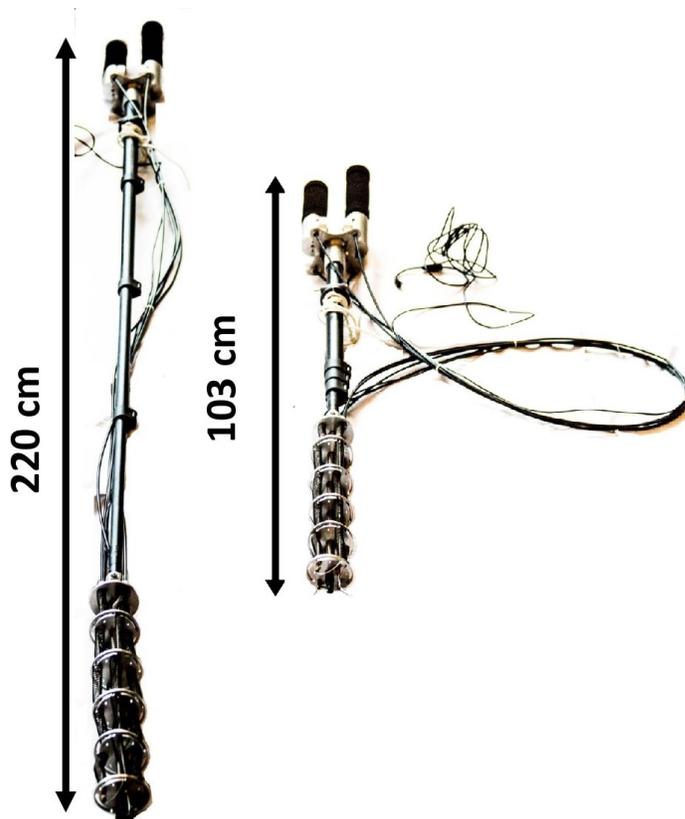


Figura 5.1: Dimensiones del brazo en su largo máximo y mínimo.

## 5.2. Caracterización del controlador del manipulador

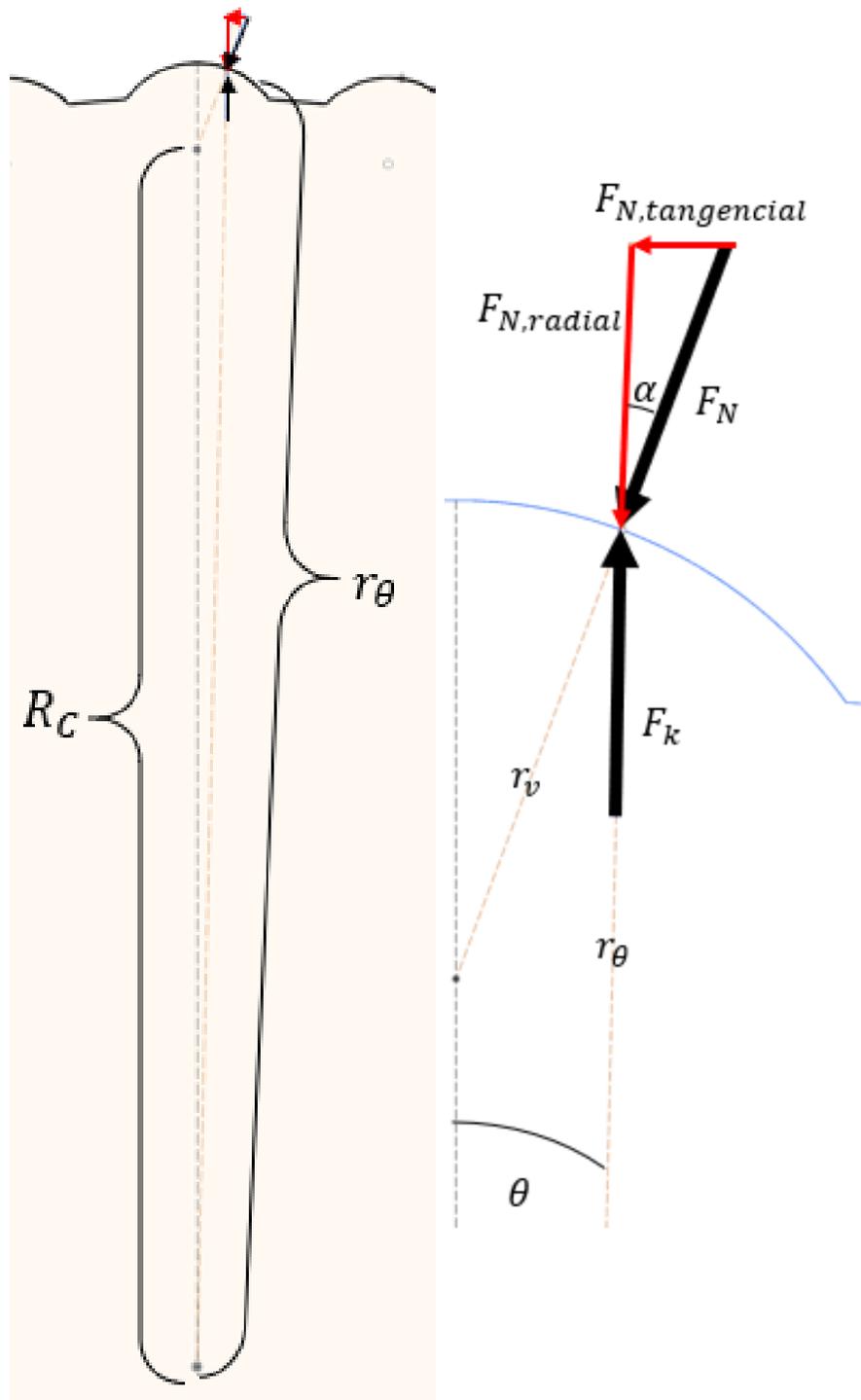


Figura 5.2: Geometría y diagrama de cuerpo libre del mecanismo del controlador

Se requiere caracterizar el controlador del manipulador. Para esto, se calcula la fuerza máxima que este puede aguantar antes de cambiar de valle. Para efecto de simplificar los cálculos, se desprecia del roce entre los componentes.

La fuerza del resorte ( $F_k$ ) empuja la bola hacia el borde de la parte fija del controlador. Una fuerza normal a la superficie ( $F_N$ ) hace la reacción permitiendo que la bola esté en reposo, quieta. Esta fuerza normal, puede descomponerse en una fuerza radial ( $F_{N,radial}$ ) y una fuerza tangencial ( $F_{N,tangencial}$ ) que resulta ser la fuerza a vencer para cambiar de valle.

Primero, se calcula la fuerza del resorte en función del ángulo  $\theta$ . Para eso se requiere conocer el valor de  $r_\theta$  en función del ángulo  $\theta$ . Teniendo que  $r_v=2.5[\text{mm}]$  y  $R_C=35[\text{mm}]$ , se utiliza la ecuación de un círculo en coordenadas cilíndricas, obteniendo así que:

$$r_\theta = R_C \cdot \cos(\theta) + \sqrt{R_C^2 \cdot \cos^2(\theta) - (R_C^2 - r_v^2)} \quad (5.1)$$

Al graficar  $r_\theta$ , se obtiene la figura 5.3.

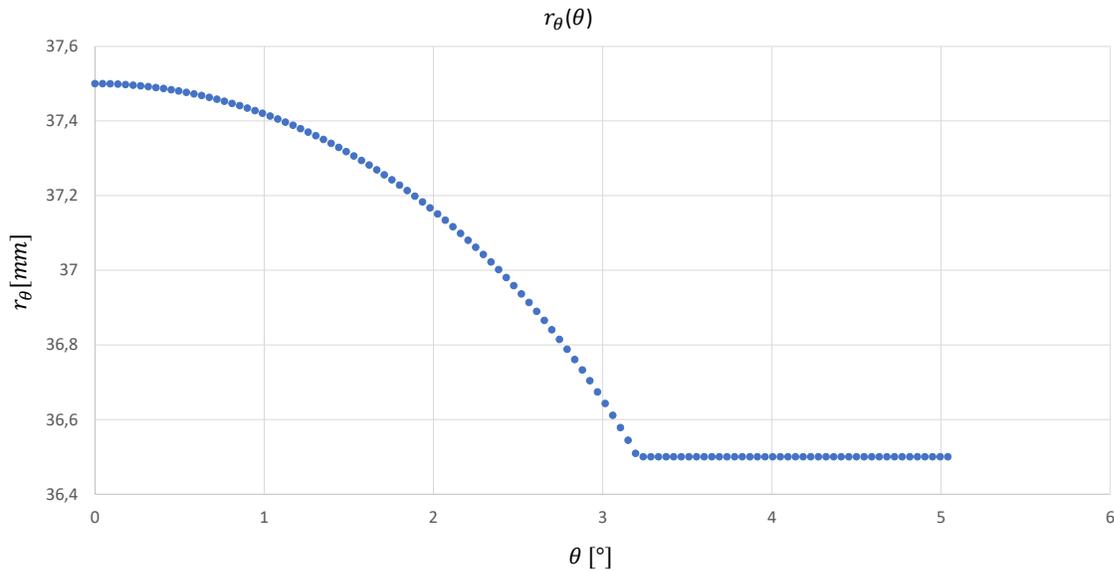


Figura 5.3: Distancia  $r_\theta$  en función del ángulo  $\theta$

Con  $r_\theta$  conocido, falta conocer el valor de la rigidez  $k$  del resorte para conocer  $F_k$ .

El valor de la constante de rigidez se calcula con la siguiente relación: [24]

$$k = \frac{Gd^4}{64nR^3} \quad (5.2)$$

En este caso,

- $G$ , el módulo de corte vale  $8 \cdot 10^{10}[\text{Pa}]$ .
- $d$ , el diámetro del alambre vale  $0,4 [\text{mm}]$ .

- $n$ , el número de espiras es 12.
- $R$ , el radio de las espiras es 3,9 [mm].
- $k$ , la constante de rigidez es 153 [ $\frac{N}{m}$ ].

Se procede a calcular la fuerza del resorte:

$$F_k = k \cdot (r_\theta - L_0) \quad (5.3)$$

De esta manera, se logra obtener el siguiente gráfico de la figura 5.4 de la fuerza del resorte en función del ángulo  $\theta$ .

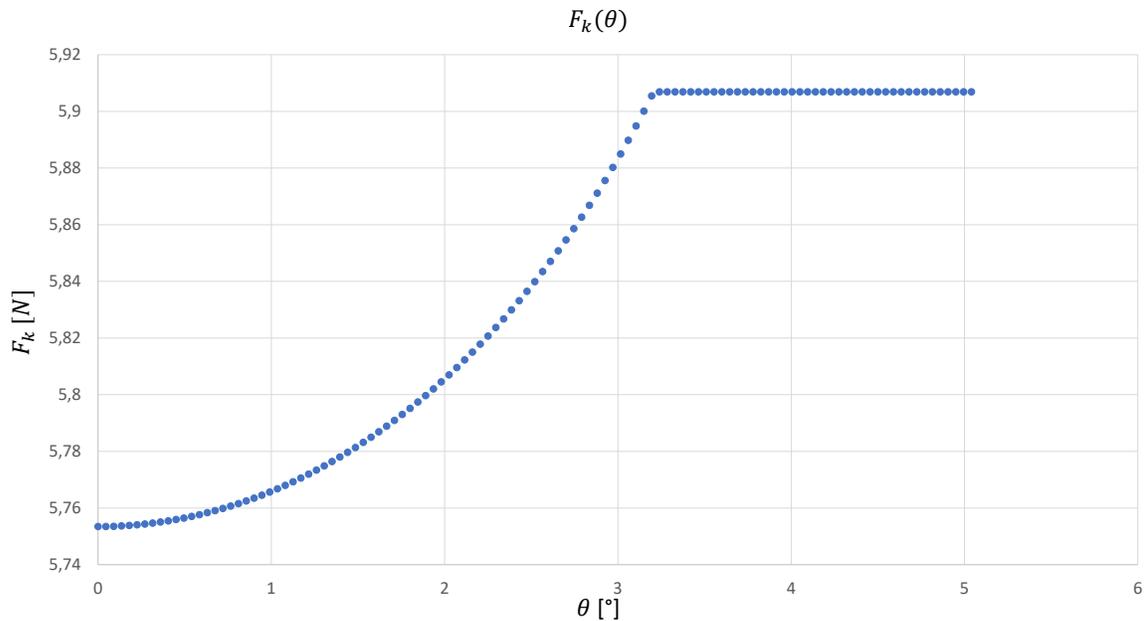


Figura 5.4: Fuerza del resorte  $F_k$  en función del ángulo  $\theta$

Con la fuerza del resorte conocida, ahora es posible calcular la fuerza de reacción tangencial. Utilizando el teorema del seno, es posible calcular el ángulo  $\alpha$ , ver figura 5.2.

$$\alpha = \arcsin(\sin(\theta) \cdot \frac{R_C}{r_v}) \quad (5.4)$$

Sabiendo que  $F_k = F_{N,radial}$  y conociendo el valor de  $\alpha$ , la fuerza tangencial a vencer para mover la pelota de valle resulta ser:

$$F_{N,tangencial} = F_k \cdot \tan(\alpha) \quad (5.5)$$

Así, finalmente se logra obtener el gráfico de la figura 5.5 donde se aprecia la fuerza con la que se debe girar la parte móvil para lograr que la bola logre cambiar de valle.

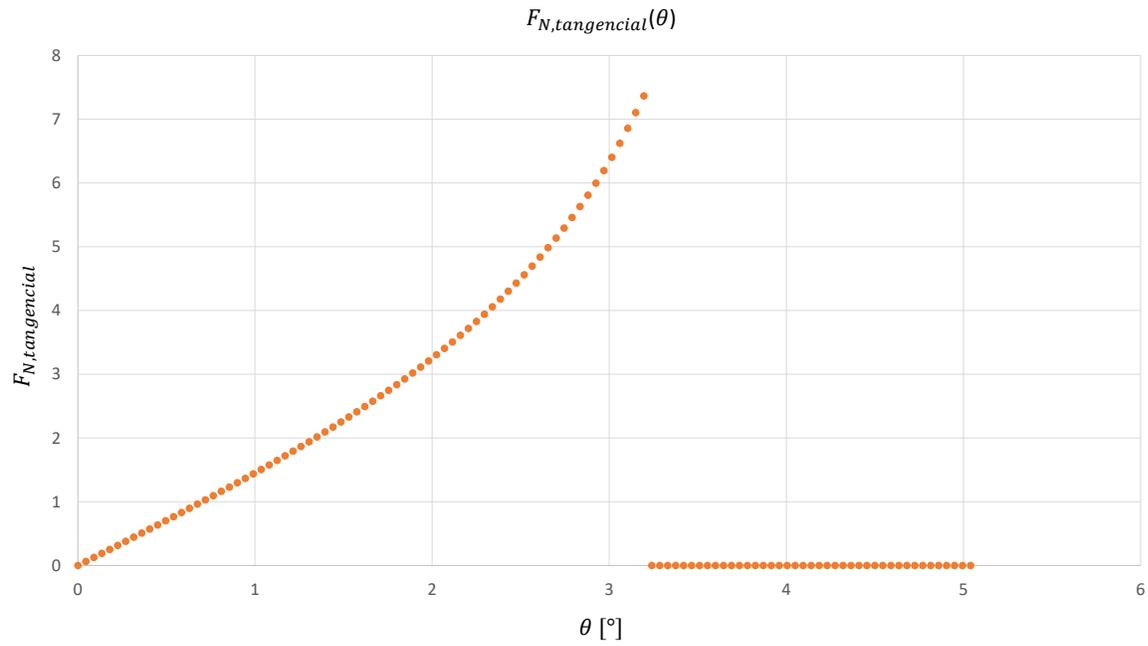


Figura 5.5: Fuerza normal tangencia  $F_{N,tangencial}$  en función del ángulo  $\theta$

## 5.3. Caracterización del manipulador

### 5.3.1. Metodología

Se requiere caracterizar los movimientos que el brazo es capaz de realizar.

Para esto, se fabrica un montaje experimental en el cual es posible fijar el brazo y manipularlo.

1. Fijar el brazo al montaje experimental.
2. Fijar posición de la cámara y fotografiar la posición inicial.
3. Sucesivamente, manipular el brazo, adoptando diferentes posiciones y fotografiar.



Figura 5.6: Caracterización del manipulador: montaje experimental

### 5.3.2. Resultados

En primera instancia fotografió una secuencia de movimientos realizados por el manipulador de carga desde una posición inicial con ambas palancas verticales, hasta llegar a una posición final en la cual ambas palancas se encontraban totalmente horizontales. Los resultados se observan en la figura 5.7. Las posiciones intermedias fotografiadas se realizaron con las palancas a  $30^\circ$  y  $60^\circ$  de inclinación.

Luego, se fotografiaron todas las posiciones extremas que puede alcanzar el manipulador de cargas. Existe la posibilidad de tirar de a uno o dos cables, es decir, moviendo una o las dos palancas a la vez. Así, 8 son las posiciones extremas: 4 tirando de un cable y 4 tirando de ambos cables a la vez. Los resultados se aprecian en la figura 5.8, donde se incluye al inicio la fotografía de la posición de partido con ambas palancas en vertical.

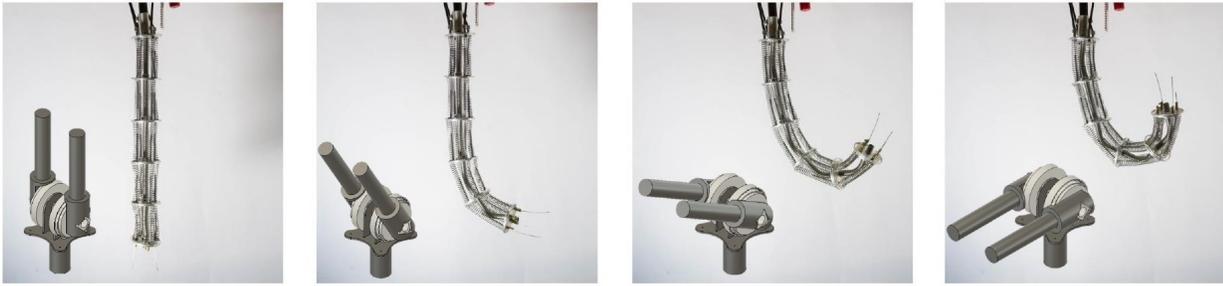


Figura 5.7: Transición del manipulador de cargas para llegar de una posición a otra; En cada una de las posiciones se aprecia la posición del controlador para tener al manipulador en esa posición.



Figura 5.8: Posiciones límites alcanzada por el manipulador de cargas, vista lateral; En cada una de las posiciones se aprecia la posición del controlador para tener al manipulador en esa posición.

Finalmente, se fotografió el manipulador de cargas en las mismas posiciones extremas desde abajo. Se obtuvo así, los resultados expuestos en la figura 5.9.

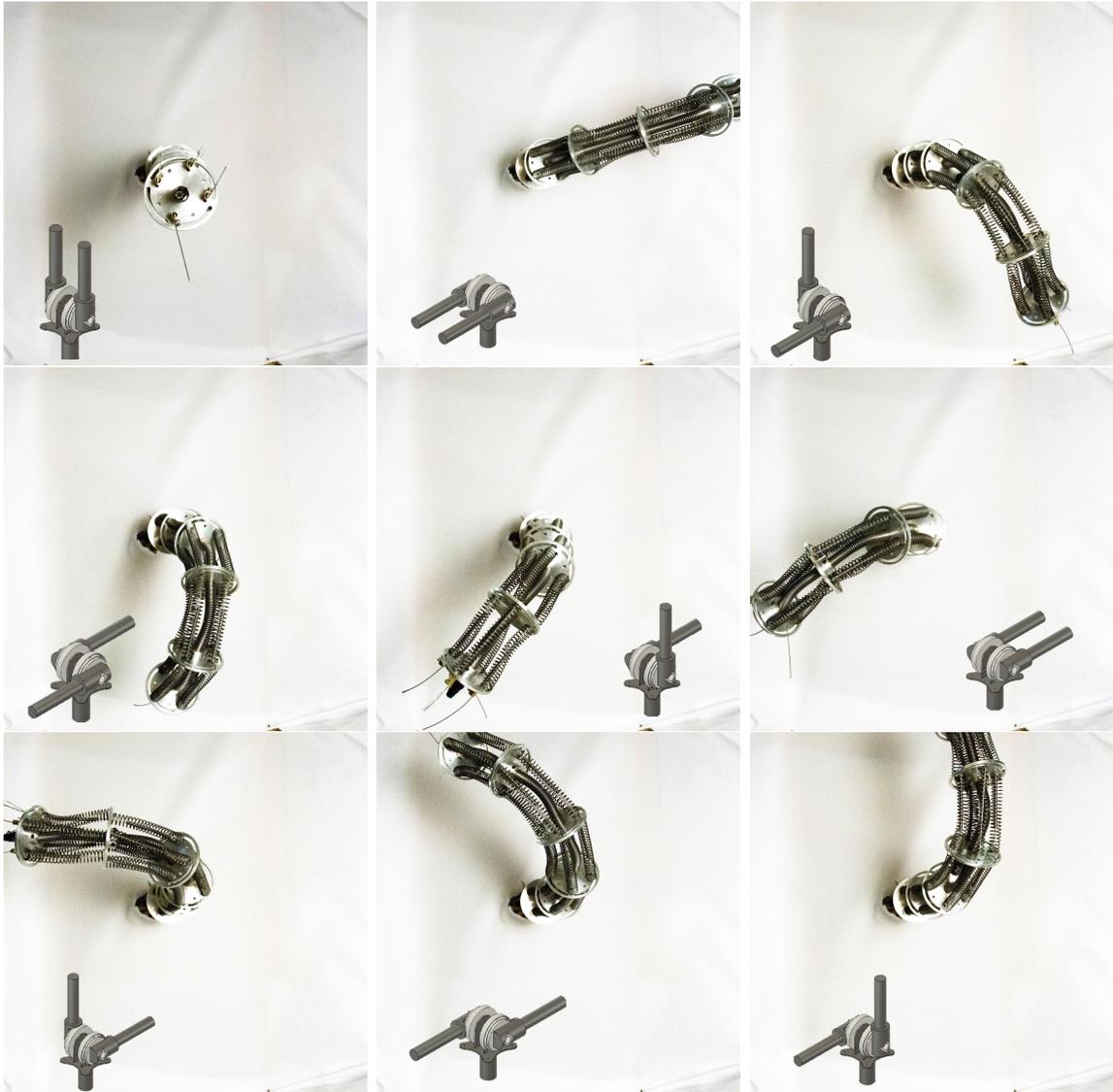


Figura 5.9: Posiciones límites alcanzada por el manipulador de cargas, vista inferior; En cada una de las posiciones se aprecia la posición del controlador para tener al manipulador en esa posición.

### 5.3.3. Análisis

Para caracterizar los movimientos posibles de realizar por el manipulador de cargas, se superpusieron distintas fotografías.

En la figura 5.10, se aprecian los resultados de la transición del manipulador de cargas superpuestos.

De esta manera, se observan las posiciones alcanzadas por el manipulador de cargas,

cuando las palancas de del controlador del manipulador se encuentran en las posiciones  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$  respecto a la estructura principal desplegable.

En amarillo, se resalta la posición del resorte principal. En líneas segmentadas rojas se marca la trayectoria seguida por el último módulo. Las flechas verdes indican la dirección y el sentido que tendría la cámara en las distintas posiciones.

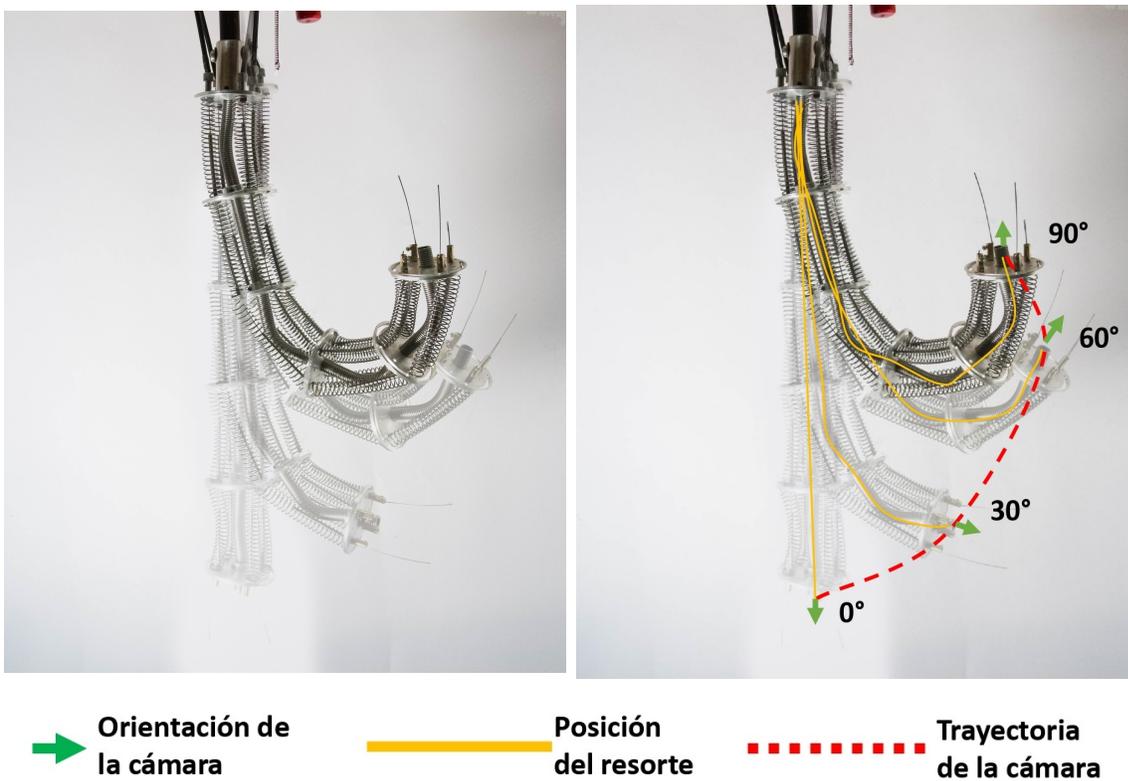


Figura 5.10: Superposición de fotografías de las posiciones de transición del manipulador de cargas

A partir de esta figura 5.10, se elaboraron 4 gráficos.

El primero, corresponde al gráfico de la figura 5.11. En este, se aprecia como varía el ángulo de observación de la cámara, es decir el ángulo de la normal del último módulo respecto a la estructura principal desplegable, en función del ángulo de la palanca del controlador del manipulador de cargas respecto a la estructura principal desplegable.

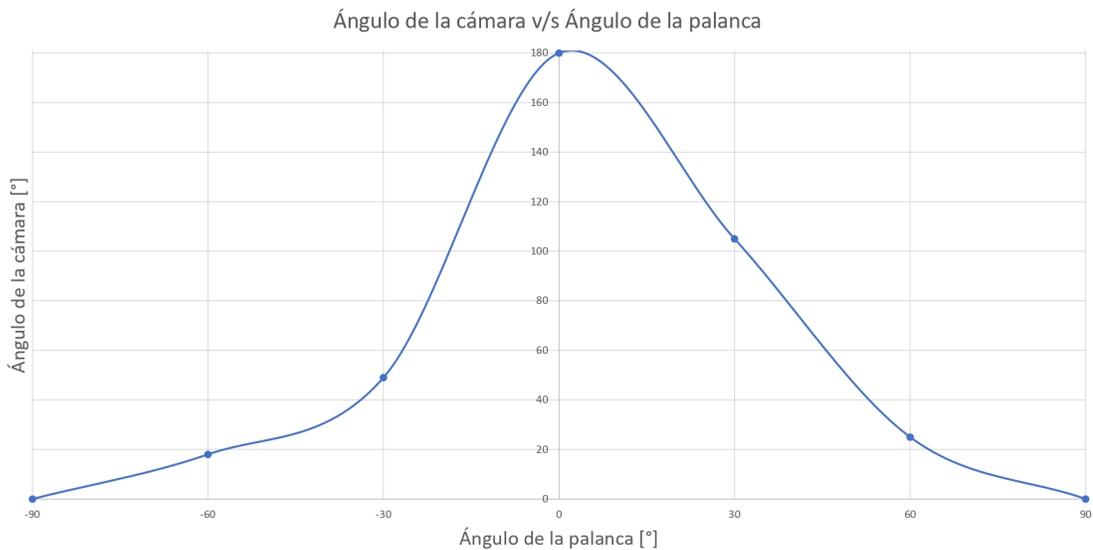


Figura 5.11: Ángulo de observación de la cámara v/s Ángulo de la palanca.

Así del gráfico de la figura 5.11, se pueden emitir las siguientes aseveraciones:

- Cuando las palancas están a  $90^\circ$  respecto a la estructura principal desplegable, la cámara se posiciona de manera paralela a la estructura principal y de esa manera se puede "mirar hacia arriba".
- Al tener las palancas de manera vertical, es decir a  $0^\circ$  respecto a la estructura principal desplegable, la cámara también se ubica de manera paralela a esta en sentido "hacia abajo".
- No existe simetría de los movimientos del manipulador de cargas respecto a la posición vertical. Si bien existe cierta similitud en las tendencias que se obtienen para ambos lados, las posiciones intermedias equivalentes de un lado y otro son diferentes.
- Estas diferencias, pueden deberse, entre otras cosas, al proceso de tensado que al ser manual, cabe la posibilidad que los cables queden tensiones diferentes por lo que los movimientos que dependan de diferentes cables serán distintos.

Los siguientes gráficos corresponden a las distancias entre la punta del manipulador de carga en horizontal y vertical y el acople, según la posición en la que se encuentra la palanca. Estos gráficos corresponden a las figuras 5.12 y 5.13.

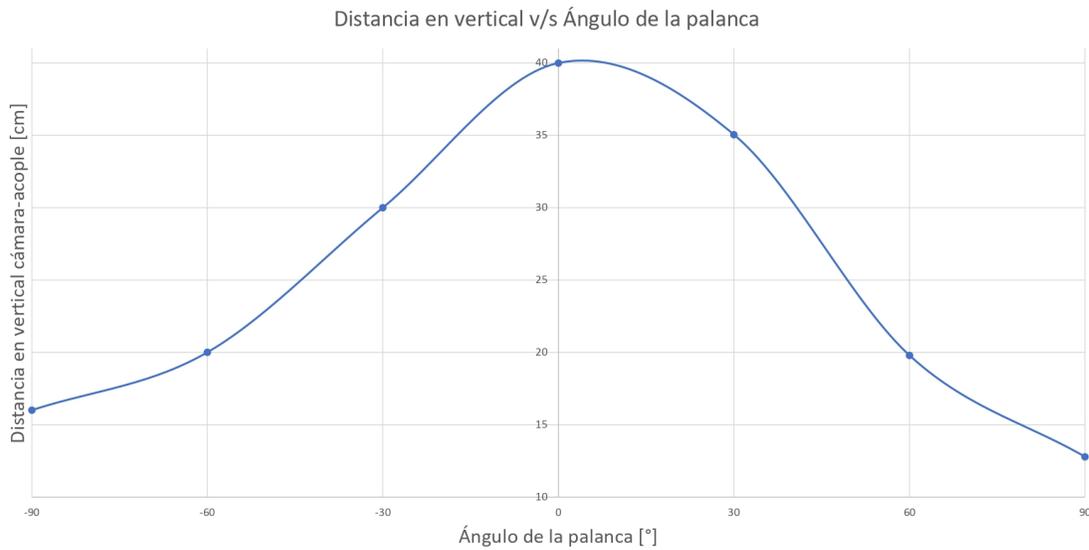


Figura 5.12: Distancia en vertical v/s Ángulo de la palanca

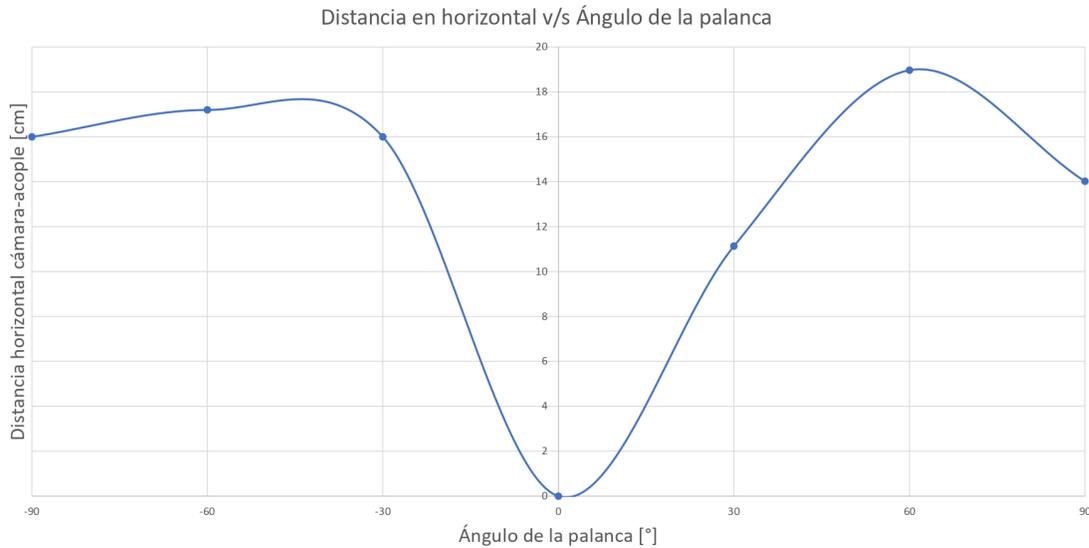


Figura 5.13: Distancia en horizontal v/s Ángulo de la palanca

A partir de estos gráficos, se pueden realizar los siguientes comentarios:

- Al igual que en el gráfico que muestra el comportamiento del ángulo de la normal al último módulo, en ambos gráficos se aprecia la similitud del comportamiento del

movimiento del manipulador de cargas. Sin embargo, las posiciones alcanzadas son simétricas.

- Esta asimetría puede deberse, entre otras cosas, al proceso de tensado de los cables.
- Como era de esperar, en ambos casos, se alcanzan posiciones mínimas y máximas.
- En el caso de la distancia en vertical, el máximo es de 40 [cm] y se alcanza a los  $0^\circ$  de inclinación de la palanca. Esto es cuando las palancas están totalmente verticales, y por consiguiente el manipulador de carga también.
- Las distancias mínimas en vertical se alcanzan al colocar las palancas de manera perpendicular al elemento rígido desplegable. Al poner las palancas de esta manera, se obtienen distancias en vertical de 12 y 16 [cm] dependiendo del lado hacia el cual se giraron las palancas.
- Las distancias en horizontal poseen un máximo que no se encuentra en la posición máxima de las palancas. Como se aprecia en el gráfico, este se alcanza con la palanca en  $60^\circ$ . La distancia máxima que se alcanza en horizontal es de 17 o 19 [cm] dependiendo de hacia qué lado se inclinaron las palancas.

Con todos estos datos, se pudo caracterizar en la figura 5.14 la trayectoria que realiza la punta del manipulador de cargas.

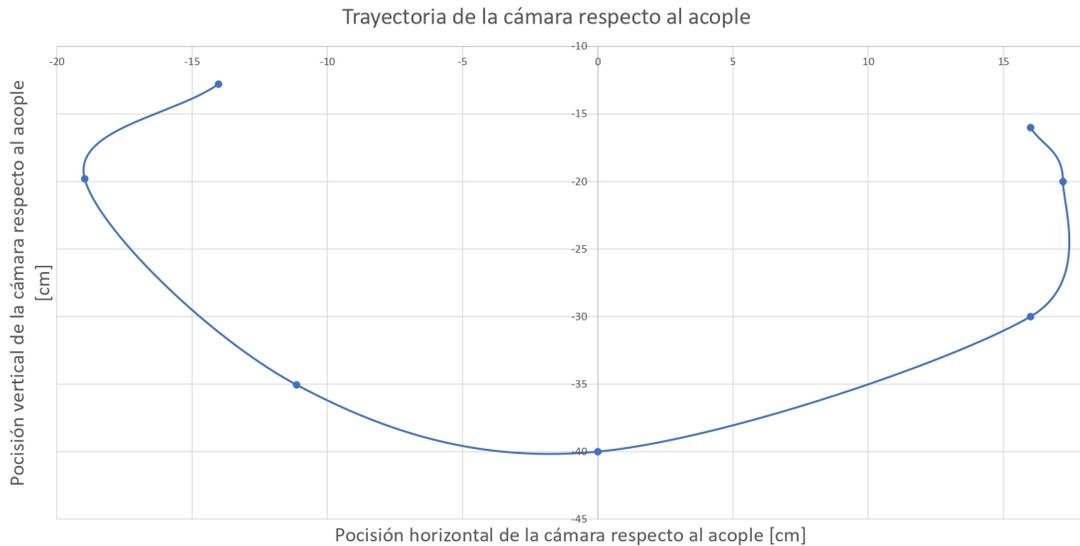


Figura 5.14: Trayectoria completa de la punta del manipulador de cargas

A continuación, se analizaron los resultados de la figura 5.9. Se segregaron en dos grupos. Por un lado, se tienen los resultados productos de traccionar de un solo cable al mover solo una palanca y por otro lado, los resultados obtenidos a partir de tirar de ambos cables. Así, se obtuvieron y analizaron las figuras 5.15 y 5.16.

En las figuras 5.15 y 5.16, las líneas verdes corresponden a lo que sería el resultado ideal o

esperado. Las líneas segmentadas amarillas corresponden a la posición real que se obtuvo del resorte principal. Las líneas segmentadas rojas corresponden a la proyección desde el centro hasta la punta del manipulador y sirve para medir el ángulo de desviación que se obtuvo respecto a la posición esperada.

Es pertinente comentar que las posiciones opuestas que se aprecian corresponden a posiciones extremas a las que se llega utilizando los mismos cables, ya sean 1 o 2, es decir con posiciones de palancas de  $-90^\circ$  y  $90^\circ$  respecto al elemento rígido desplegable.

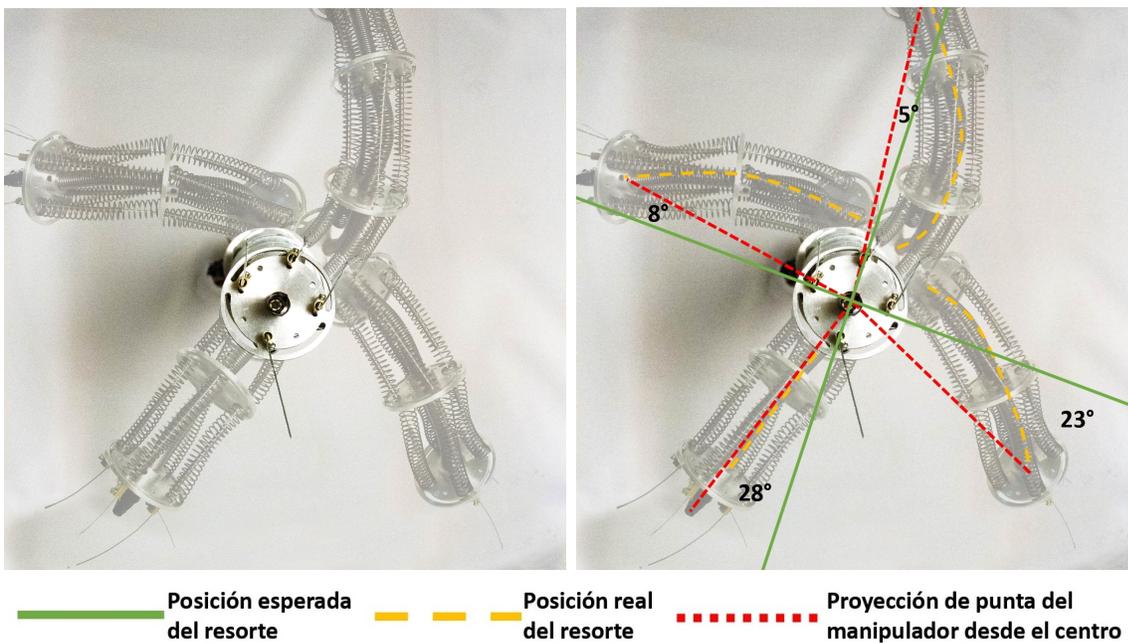


Figura 5.15: Superposición de fotografías al tirar 1 cable.

En la figura 5.15 se observan las posiciones alcanzadas al usar solo un cable. Se puede ver que, utilizando el mismo cable, de un lado y para el otro se tiene que para un lado el ángulo de desviación es de  $5^\circ$  y  $8^\circ$  y para el otro lado, el mismo aumenta a  $23^\circ$  y  $25^\circ$ .

Otra observación que se puede realizar es la diferencia que existe entre la línea roja y la amarilla. Esta diferencia revela la torsión que existe en el resorte principal. Solo se aprecia un caso, en que la torsión del cable es mínima, sin embargo, el ángulo de desviación respecto a la posición ideal (línea verde) es bastante significativo.

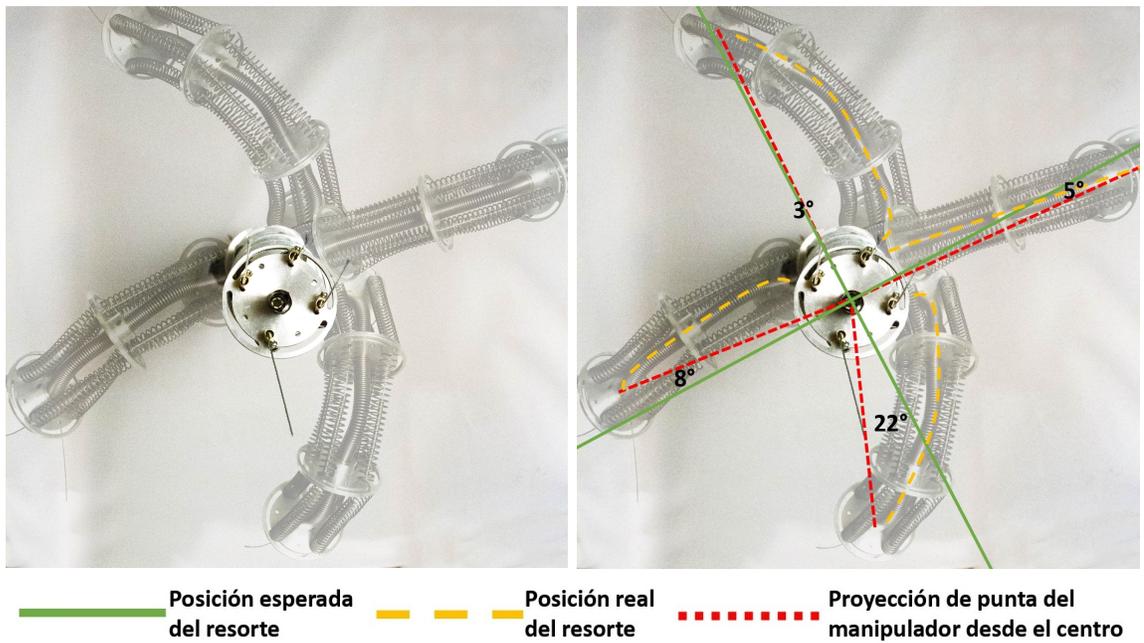


Figura 5.16: Superposición de fotografías al tirar 2 cables.

En la figura 5.16 se observan las posiciones alcanzadas al usar 2 cables a la vez. Como era de esperarse, se logra ver mayor estabilidad en las posiciones alcanzadas: los ángulos de desviación son menores que utilizando solamente un cable y las líneas amarillas se asemejan más a las líneas rojas, dejando en evidencia que al utilizar más cables se logra vencer de mejor manera la torsión del resorte principal.

También se aprecia que para los mismos cables, es decir para la posiciones opuestas, los comportamientos son similares. Se tiene un caso, el de ángulos  $5^\circ$  y  $8^\circ$ , donde la torsión observada es pequeña. Esta situación se produce al mover ambas palancas en la misma dirección. Por otro lado, en el caso de los ángulos de  $3^\circ$  y  $22^\circ$ , se tiene una línea amarilla bastante distante del la roja, lo que se traduce en un torsión importante del resorte principal. Este caso corresponde al movimiento de las palancas en direcciones opuestas.

## 5.4. Prueba en terreno

### 5.4.1. Metodología

Previamente a la prueba en terreno fue necesario previamente asistir y aprobar a una capacitación de seguridad de la Asociación Chilena de Seguridad. En terreno, se buscó probar la utilidad del brazo como tecnología de inspección.

La prueba en terreno consistió en una inspección en conjunto con dos inspectores de EFE, utilizando el brazo desplegable diseñado y construido para el efecto, en el puente ferroviario Aconcagua, ubicado en las cercanías de la localidad de Quillota, como se indica en la figura 5.17.



Figura 5.17: Ubicación en mapa del puente Aconcagua y su vista general

Llegando al puente, y luego de ponerse todos los EPP's necesarios, se procedió a inspeccionar los apoyos del puente. Esto se realizó desde abajo del puente, para alcanzar con el brazo los puntos altos y desde arriba del puente, pasando el brazo entre los durmientes. Estas dos formas de uso del brazo se aprecian en la figura 5.18.

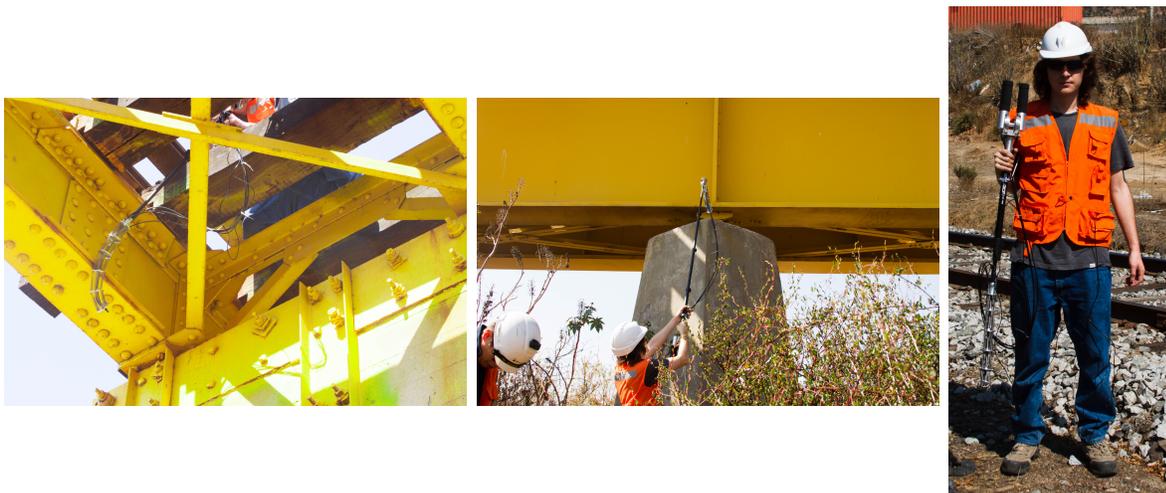


Figura 5.18: Uso del brazo para inspección desde arriba, abajo del puente ferroviario y su forma de transporte.

Para evaluar el desempeño del brazo como tecnología de inspección, se confeccionó la rubrica de la tabla 5.1 que permite evaluar la utilidad del brazo.

## 5.4.2. Resultados

### Evaluación del desempeño

|  | Nunca | A veces | Siempre |
|--|-------|---------|---------|
| Se logra visualizar estructuras de interes desde arriba del puente     |       |         | X       |
| Se logra visualizar estructuras de interes desde abajo del puente      |       | X       |         |
| Se logra una calidad de imagen capaz de visualizar fallas con claridad |       | X       |         |
| El dispositivo es cómodo de manipular                                  |       | X       |         |
| El dispositivo es cómodo de transportar                                |       |         | X       |

Tabla 5.1: Rubrica de evaluación del dispositivo.

En la tabla 5.1, se aprecia el resultado de la evaluación de desempeño. Los resultados se detallarán a continuación.

Como se ve en la figura 5.19, desde arriba del puente, el brazo funcionó de manera muy satisfactoria. Este pasaba sin problema entre los durmientes y debido a la distancia constante que existe entre los durmientes y los apoyos, el largo del brazo no fue un problema. Además la fácil manipulación del brazo permitió acceder con facilidad a diversos lugares que serían de difícil acceso sin este dispositivo. En este caso el brazo fue muy cómodo de utilizar y de manipular.



Figura 5.19: Manipulación desde arriba del puente; se aprecia en la primera fotografía el modo de uso de los operarios, uno controla el brazo y otro visualiza las imágenes en el celular. En las dos fotografías siguientes, como el brazo logra de manera exitosa alcanzar lugares de difícil acceso.

Por otro lado, como se ve en la figura 5.20, desde abajo del puente el brazo tuvo un desempeño correcto. Sin embargo, la distancia entre el suelo y los apoyos en este caso es variable por lo que en ocasiones, el largo del brazo no fue el suficiente para alcanzar los lugares a los que se pretendía llegar. Además, al usar el dispositivo hacia arriba, su manipulación se volvió un poco molesta ya que el operario que manipulaba el dispositivo debía quedarse con los brazos levantados sosteniéndolo por un rato lo que resultaba ser cansador.



Figura 5.20: Manipulación desde abajo del puente.

### Imágenes obtenidas

Durante la inspección mediante el uso del brazo telescópico, se logró acceder de manera satisfactoria a lugares relevantes de la estructura los cuales no habían sido posible de acceder con los métodos de inspección visual utilizados hasta ahora.

Como resultado concreto de la utilización de este brazo se logró identificar y dejar registro fotográfico de una falla como se muestra la figura 5.21.

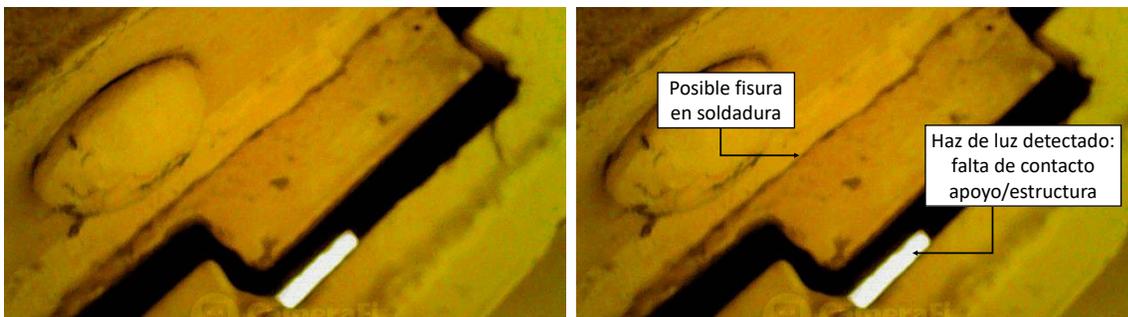


Figura 5.21: Fallas detectadas en apoyo de cepa n° 5: falta de contacto apoyo/estructura y posible fisura en soldadura

Asimismo, se logró acceder a otros puntos de difícil acceso dejándose registro fotográfico del estado de la estructura, como lo indican las figuras 5.22.



Figura 5.22: Ejemplos de fotografías logradas en lugares de interés de difícil acceso sin fallas



Figura 5.23: Proceso de toma de datos de la figura 5.22

### 5.4.3. Análisis

La figura 5.21 corresponde a una fotografía del apoyo de la cepa numero 5 del puente. Los inspectores señalaron que se sospechaba de una posible falla de falta de contacto en ese lugar sin embargo, debido a la falta de tecnología para la inspección, no habían logrado visualizarla. La fotografía lograda además revela una posible fisura.

Al comparar los resultados obtenidos entre las distintas inspecciones con y sin brazo telescópico, existe un salto importante en la calidad de las inspecciones. Por un lado, como se muestra en la figura 5.24, se logra una posición mucho más cercana al punto de interés y por otro lado, como se aprecia en la figura 5.25, la fotografías obtenidas tienen un acercamiento mucho mayor.



Figura 5.24: Distancia típica lograda respecto a la estructura durante la inspección; A la izquierda el posicionamiento del dron respecto al puente, a la derecha el posicionamiento del brazo desplegable.



Figura 5.25: Imágenes logradas durante la inspección; A la izquierda imagen obtenida por el dron, a la derecha imagen obtenida por el brazo desplegable.

# Capítulo 6

## Conclusiones

### 6.1. Conclusiones de las pruebas

#### 6.1.1. Pruebas de laboratorio

Respecto a los resultados obtenidos en laboratorio, se pueden emitir las siguientes conclusiones:

- Se logró obtener un movimiento controlado del manipulador de cargas.
- Se abarca un amplio espectro de movimiento para el acople de una cámara.
- Se propone mejorar el movimiento del manipulador y su control realizando las siguientes modificaciones:
  - Crear una zanja en el elemento móvil del manipulador de carga para evitar que el cable se salga a ratos de su posición, como ocurre actualmente.
  - Agregar un sistema de tensado tipo clavijas. Se considera que sería más cómodo, además que se podría controlar de mejor manera el nivel de tensión que alcanzan los cables.
  - Idear una mejor manera de apretar el último módulo con el resorte principal ya que este al soportar toda la tensión de los cables, tiende a deslizarse por el resorte hacia arriba. Esto provoca pérdida en la tensión de los cables.
  - Agregar alguna pieza a los resortes secundarios para que estos empujen de manera uniforme y queden fijos a los módulos.
- Se propone la realización de más pruebas de caracterización y de variación de posición de ciertas piezas para encontrar una configuración que funcione de mejor manera. Por ejemplo, estudiar el movimiento del manipulador de cargas variando la distancia entre módulos, variando la rigidez de los resortes, variando el material del cable, variando el diámetro de los módulos, entre otros.

### 6.1.2. Pruebas en terreno

Respecto a los resultados obtenidos en terreno, se pueden emitir las siguientes conclusiones:

- El brazo logra su cometido. Es capaz de acceder y tomar fotografías a lugares relevantes de la estructura del puente de difícil acceso.
- El brazo es de fácil manipulación y no requiere capacitación previa ya que fue utilizado directamente por los inspectores sin inconvenientes.
- Si bien, se logró el cometido, varias mejoras son posibles para que su uso sea más efectivo. Estas son:
  - Aumentar la extensión de la estructura desplegable para alcanzar desde abajo del puente, la visualización de apoyos en cepas que superan en altura la capacidad actual del brazo.
  - Aumentar la resolución de la cámara para obtener fotografías de mejor calidad. Además se propone el uso de una aplicación de celular que se sincronice con la cámara que sea capaz de generar videos. En las pruebas realizadas, se utilizó la aplicación CámaraFi que sólo era capaz de generar fotografías.
  - Se sugiere la implementación de algún sistema que sea capaz de mover la cámara independiente del movimiento del brazo.
  - Se recomienda forrar con algún material adecuado el manipulador para que minimizar el riesgo que este quede enganchado durante la inspección con algún cable o resorte.
  - Se sugiere también evaluar la posibilidad de acoplar a la punta del manipulador algún otro tipo de instrumento de inspección. Por ejemplo, un medidor de espesor.
  - Se recomienda el diseño y fabricación de un maletín que pueda contener el brazo y su respectivo kit de herramientas. De esta manera, se podría alargar su vida útil, además de aumentar la comodidad de su uso y transporte.

## 6.2. Conclusiones generales

Desde el punto de vista académico y científico, resultaría interesante continuar el estudio del movimiento del manipulador de cargas para poder entenderlo, así mejorar su desempeño y aumentar su largo.

El robot fabricado sirve para la inspección y puede ser mejorado. Tiene potencial para convertirse en un producto comercializable. El robot podría también ser utilizado para la inspección de otro tipo de obras y estructuras que están en altura y resulta difícil acceder sin ningún tipo de instrumentación.

Los objetivos planteados, fueron logrados en su totalidad: se diseñó y fabricó un brazo desplegable de más de un grado de libertad capaz de manipular una carga liviana, en este caso una cámara para inspección. Se realizaron pruebas en laboratorio que lograron caracterizarlo y pruebas en terreno que permitieron evaluar su uso y practicidad.

### 6.3. Limitaciones

- El brazo solo tiene el potencial de ser utilizado en líneas de trenes sin catenarias. De haber catenarias, el riesgo de electrocución resulta ser muy alto por lo que no es seguro utilizarse.
- El largo de la estructura principal desplegable limita el alcance del brazo.

# Bibliografía

- [1] L. Puig, A. Barton, and N. Rando, “A review on large deployable structures for astrophysics missions,” *Acta Astronautica*, vol. 67, no. 1-2, pp. 12–26, 2010.
- [2] ArcusWire Group, “Galvanized Stran 1.5mm 1x19 Grade 2070, Product Data Sheet.” <https://www.arcuswire.com/files/products/g019015.pdf>, 2019.
- [3] MatWeb, Material Property Data, “Overview of materials for AISI 4000 Series Steel .” <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=210fcd12132049d0a3e0cabe7d091eef>, 2019.
- [4] MatWeb, Material Property Data, “Aluminum 2017-T4; 2017-T451.” <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=53d0e31ee66f4cf9b28abb87c08e4d39>, 2019.
- [5] MatWeb, Material Property Data, “Aluminum 6061-O.” <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=626ec8cdca604f1994be4fc2bc6f7f63>, 2019.
- [6] MatWeb, Material Property Data, “Cytac (Solvay Group) CYCOM® 2020 Epoxy + T800-6K 2X2T Twill 200 Prepreg, without Post-Cure.” <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c40c4d4ac0da4aa9889e9d1c1856f2d3>, 2019.
- [7] MatWeb, Material Property Data, “Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer.” <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278>, 2019.
- [8] Grupo EFE, “Memoria Anual 2016.” [http://www.efe.cl/descargas/transparencia/memorias\\_anuales/MEMORIA\\_2016.pdf](http://www.efe.cl/descargas/transparencia/memorias_anuales/MEMORIA_2016.pdf), 2017.
- [9] G. Tibert, *Deployable tensegrity structures for space applications*. PhD thesis, KTH, 2002.
- [10] D. Trivedi, C. D. Rahn, W. M. Kier, and I. D. Walker, “Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research,” *Applied bionics and biomechanics*, vol. 5, no. 3, pp. 99–117, 2008.
- [11] R. J. Webster III and B. A. Jones, “Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 29, no. 13, pp. 1661–1683, 2010.

- [12] I. D. Walker, “Continuous backbone “continuum” robot manipulators,” *Isrn robotics*, vol. 2013, 2013.
- [13] Ministerio de Obras Públicas y Transporte, Costa Rica, “Manual de inspección de puentes.” [https://www.mopt.go.cr/wps/wcm/connect/31625228-76c4-44cf-963e-8d8b31540a79/manual\\_inspeccion2007.pdf?MOD=AJPERES](https://www.mopt.go.cr/wps/wcm/connect/31625228-76c4-44cf-963e-8d8b31540a79/manual_inspeccion2007.pdf?MOD=AJPERES), 2007.
- [14] Gobierno de Chile, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, “Antecedentes del sector ferroviario.” <http://www.mtt.gob.cl/pdl/ferroviario/antecedentes-del-sector>, 2019.
- [15] Gobierno de Chile, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, “Sinopsis de plan nacional de desarrollo ferroviario.” <http://www.mtt.gob.cl/pdl/ferroviario.1.html>, 2019.
- [16] Gobierno de Chile, Ministerio de transportes y Telecomunicaciones, Subsecretaría de Transportes, “Decreto 38, Plan Trienal de Desarrollo 2014-2016 de la Empresa de los Ferrocarriles del Estado.” [https://www.leychile.cl/Consulta/m/norma\\_plana?org=&idNorma=1065172](https://www.leychile.cl/Consulta/m/norma_plana?org=&idNorma=1065172), 2014.
- [17] Teletrece Noticias, “Cede puente ferroviario que une Padre Las Casas con Temuco debido a intensas lluvias.” <http://www.t13.cl/noticia/nacional/foto-puente-viejo-provincia-cautin-colapsa-crecida-del-rio>, 2018.
- [18] Grupo EFE, “Memoria Anual 2017.” [http://www.efe.cl/descargas/transparencia/memorias\\_anuales/memoria-anual-2017.pdf](http://www.efe.cl/descargas/transparencia/memorias_anuales/memoria-anual-2017.pdf), 2017.
- [19] N. Friedman, *Investigation of highly flexible, deployable structures: review, modelling, control, experiments and application*. PhD thesis, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2011.
- [20] R. Buckingham and A. Graham, “Snaking around in a nuclear jungle,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 32, no. 2, pp. 120–127, 2005.
- [21] V. Autores, “Robotics for in-situ repair.” [urlhttps://www.nottingham.ac.uk/mcm/research-new/robotics-for-in-situ-repair.aspx](https://www.nottingham.ac.uk/mcm/research-new/robotics-for-in-situ-repair.aspx), 2018.
- [22] BBC News, “Snake-arm robots slither forward.” <http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/5324708.stm>, 2006.
- [23] J. Burgner-Kahrs, D. C. Rucker, and H. Choset, “Continuum robots for medical applications: A survey,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 6, pp. 1261–1280, 2015.
- [24] V. Meruane, *Vibraciones Mecánicas, Apuntes para el curso ME4701*. 2016.