

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**SISTEMA MECATRÓNICO DE TRES GRADOS DE LIBERTAD,
BASADO EN CABLES Y CONTROLADO POR DISPOSITIVO
MÓVIL: GM-LK**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Mecatrónico**, que presenta el bachiller:

Katherine Lucy Zegarra Tacsá

ASESOR: Diego Eiji Onchi Suguimitzu

Lima, diciembre de 2015

RESUMEN

En la actualidad, se emplean sistemas destinados a la carga de grandes volúmenes en espacios determinados con la finalidad de ordenar, mover, sujetar o ensamblar objetos. En caso de objetos en pequeños talleres, almacenes o habitaciones, la mayoría de veces, la acción de carga es asumida por el usuario, debido a que el peso es relativamente ligero y una o varias personas pueden realizar esta acción. Esto conlleva a sobreesfuerzos en el operario durante la acción de carga, uso innecesario de tiempo y recurso humano. Por otro lado, los dispositivos de carga usados actualmente ocupan espacios considerables.

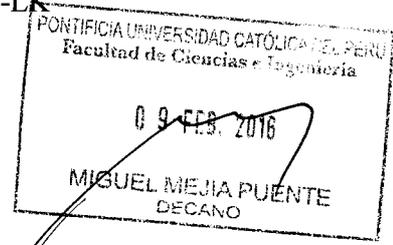
Por ello, se propuso el diseño de un sistema mecatrónico con tres grados de libertad basada en cables y controlada por dispositivo móvil: GM-LK. Este sistema es capaz de mover una carga máxima de 50 kg a lo largo de un área flexible, previamente determinada por el operario, de hasta 16 m²; el movimiento de la carga será controlada por el usuario a través de una interfaz gráfica desarrollada para *tablets* o *smartphones*. La interfaz mostrará la disposición de los elementos del sistema, distribuidos en el área útil de carga, de modo que el usuario se oriente, es decir, tenga una visión general del espacio de trabajo para decidir la posición final del objeto.

El sistema consiste en 4 soportes telescópicos que ejercen presión sobre el piso y el techo para mantenerlos erguidos y estáticos durante su funcionamiento. Dichos soportes se unen mediante cuatro cuerdas que coinciden en el manipulador, el cual se encarga de sujetar y desplazar la carga en las tres direcciones del plano cartesiano dentro del área efectiva. Esta propuesta puede ser instalada en ambientes con un techo de 3m de altura como máximo. El peso de cada soporte es de 9 kg y sus dimensiones de traslado son de 0.18 m x 0.18 m x 1.3 m.



**TRABAJO DE FIN DE CARRERA PARA OPTAR
EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

Título : Grúa Mecatrónica de tres grados de libertad basada en cables y controlada por dispositivo móvil: GM-LK
Asesor : Ing. Diego Eiji Onchi Suguimitzu
Alumno : Katherine Lucy Zegarra Tacsá
Código : 20097182
Tema N° : # 125
Fecha : 10-11-2015



Descripción y Objetivos

En la actualidad, se emplean sistemas destinados a la carga de grandes volúmenes en espacios determinados con la finalidad de ordenar, mover, sujetar o ensamblar objetos. En caso de objetos en pequeños talleres, almacenes o habitaciones, la mayoría de veces, la acción de carga es asumida por el usuario, debido a que el peso es relativamente ligero y una o varias personas pueden realizar esta acción. Esto conlleva a sobreesfuerzos en el operario durante la acción de carga, uso innecesario de tiempo y recurso humano. Por otro lado, los dispositivos de carga usados actualmente ocupan espacios considerables.

Por ello, se propone el diseño de una Grúa mecatrónica con tres grados de libertad basada en cables y controlada por dispositivo móvil: GM-LK. Este sistema será capaz de mover una carga máxima de 50 kg a lo largo de un área flexible, previamente determinada por el operario, de hasta 16 m²; el movimiento de la carga será controlada por el usuario a través de una interfaz gráfica desarrollada para tablets o smartphones. La interfaz mostrará la disposición de los elementos de la grúa distribuidos en el área útil de carga, de modo que el usuario se oriente para decidir su posición final.

La grúa consiste en 4 soportes telescópicos que ejercen presión sobre el piso y el techo para mantenerlos erguidos y estáticos durante su funcionamiento. Dichos soportes se unen mediante cuatro cuerdas que coinciden en el manipulador, el cual se encarga de sujetar y desplazar la carga en las tres direcciones del plano cartesiano dentro del área efectiva. Esta propuesta puede ser instalada en ambientes con un techo de 3m de altura como máximo. El peso de cada soporte es de 9 kg y sus dimensiones de traslado son de 0.18mx0.18mx1.3m.

Erika J. Padilla



[Signature]

7.



*Dedico este trabajo a mis padres
por ser el pilar fundamental en todo lo que soy,
por sus consejos, sus valores, por la motivación constante
e incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.*

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
RESUMEN.....	i
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
INTRODUCCION	6
CAPÍTULO 1	7
1.1 PRESENTACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	7
1.2 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	7
1.3 OBJETIVOS DE LA TESIS	8
1.4 ANTECEDENTES	9
CAPÍTULO 2.....	13
2.1 FORMULACIÓN DE PROPUESTA DEL SISTEMA MECATRÓNICO.....	13
2.2 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS	13
2.2.1 <i>Requerimiento General</i>	13
2.2.2 <i>Requerimientos mecánicos</i>	13
2.2.3 <i>Requerimientos electrónicos y eléctricos</i>	14
2.2.4 <i>Requerimientos de control y comunicación</i>	15
CAPÍTULO 3.....	16
3.1 SISTEMA MECATRÓNICO.....	16
3.1.1 <i>Descripción del sistema mecatrónico</i>	16
3.1.2 <i>Estructura de funciones</i>	19
3.1.3 <i>Diseño electrónico y eléctrico</i>	22
3.1.4 <i>Diseño mecánico</i>	47
3.1.5 <i>Diseño de control</i>	58
CAPÍTULO 4.....	66
4.1 EXPERIMENTO	66
4.1.1 <i>Objetivos</i>	66
4.1.2 <i>Consideraciones</i>	66
4.1.3 <i>Resultados, observaciones y conclusiones</i>	67
CAPÍTULO 5.....	68
5.1 PRESUPUESTO.....	68
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	70
CONCLUSIONES	72
BIBLIOGRAFÍA	73

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1.1: Resumen de la tecnología actual para elevación y desplazamiento de carga</i>	10
<i>Tabla 3.1: Principales plataformas de procesamiento y características.</i>	22
<i>Tabla 3.2: Especificaciones Arduino Mega 2560.</i>	23
<i>Tabla 3.3: Especificaciones Motor DC.</i>	24
<i>Tabla 3.4. Especificaciones motor DC NIDEC.</i>	25
<i>Tabla 3.5. Especificaciones RoboClaw 2x5A.</i>	26
<i>Tabla 3.6. Especificaciones Módulo Puente H-L298N.</i>	27
<i>Tabla 3.7. Especificaciones sensor de fuerza</i>	28
<i>Tabla 3.8. Especificaciones técnicas del sensor de proximidad.</i>	30
<i>Tabla 3.9. Especificaciones sensor magnético</i>	32
<i>Tabla 3.10. Especificaciones diodo Láser.</i>	33
<i>Tabla 3.11. Especificaciones del interruptor.</i>	34
<i>Tabla 3.12. Especificaciones módulo bluetooth HC-05.</i>	36
<i>Tabla 3.13. Consumo eléctrico del sistema.</i>	37
<i>Tabla 3.14. Especificaciones del regulador.</i>	38
<i>Tabla 3.15. Especificaciones técnicas del colector rotativo.</i>	51
<i>Tabla 3.17. Parámetros de un motor DC</i>	64
<i>Tabla 5.1. Presupuesto de los componentes mecánicos</i>	68
<i>Tabla 5.2. Presupuesto de componentes electrónicos</i>	69

INTRODUCCIÓN

El presente documento consta de 5 capítulos y emplea la metodología de diseño mecatrónico basado en las recomendaciones de la Asociación Alemana de Ingenieros VDI 2221 [1]. Esta metodología, provee una estructura de solución frente a una problemática. El primer capítulo describe la problemática que se desea solucionar, relacionada a la tecnología actual y su poca flexibilidad. Se delimita la aplicación del sistema mecatrónico diseñado, así como el planteamiento de objetivos que son alcanzados al culminar el presente trabajo. El diseño presentado se basa en la mejora y aplicación de modelos de tecnología aplicados en robots de cables encontrados en prototipos, patentes y productos comerciales.

En el capítulo 2 se desarrolla los requerimientos generales para el diseño del sistema. Se plantean los requerimientos electrónicos y eléctricos: tipo de alimentación requerida, la necesidad del uso de sensores y actuadores para el logro de las tareas que atañen el funcionamiento del sistema, entre otros. Los requerimientos de control y comunicación se orientan a la búsqueda del manejo del sistema mediante teleoperación. Finalmente son descritos los requerimientos mecánicos concernientes al tipo de material utilizado para su fabricación, límites de peso, factor de seguridad, entre otros.

El capítulo 3 describe al sistema mecatrónico diseñado: diseño mecánico, electrónico y de control. En la sección mecánica, se muestra los mecanismos que conciernen a la instalación y puesta en marcha del sistema propuesto. Para ello, se diseñó cuatro soportes telescópicos que definen el área de trabajo a través del cual es desplazada la carga. Los cuatro soportes y la carga se unen mediante cuerdas que son enrolladas a cuatro carretes que giran en sentido horario o antihorario coherente al movimiento de los motores que van acoplados a cada carrete. La sección mecánica finaliza con la descripción de planos de los principales subensambles del sistema y algunos detalles de fabricación. La sección de diseño electrónico muestra la elección de dispositivos como el controlador, sensores y actuadores, además de los diagramas esquemáticos de las conexiones de todos los dispositivos al controlador. Finalmente, en el diseño de control se desarrolla los diagramas de flujo de los principales programas y se presenta una posible estrategia para el control de los motores principales encargados del movimiento de la carga en el espacio de trabajo.

En el capítulo 4 se hace una prueba de concepto relacionada con el diseño mecánico del sistema mediante la fabricación de una maqueta, en ella se pone a prueba los cuatro soportes del diseño dispuestos entre una superficie superior e inferior y las cuerdas de carga que van unidas a la carga a desplazar.

El capítulo 5 hace mención al presupuesto que implica el desarrollo de un sistema como el descrito, se considera la fabricación de los diseños mecánicos, compra de piezas estándares, sensores y actuadores utilizados.

Finalmente, el presente documento, recopila las conclusiones, observaciones y recomendaciones para una mejora del diseño planteado, información adquirida durante el desarrollo del concepto del sistema mecatrónico diseñado.

CAPÍTULO 1

1.1 PRESENTACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Con las tecnologías actuales, la manipulación de productos de ensamble en la industria o en los talleres de prototipado resulta en un uso excesivo de recurso humano, pérdida de tiempo, y se requiere de un amplio espacio de trabajo.

Por ejemplo, el ensamble de un prototipo requiere una persona para mantener las piezas suspendidas mientras otro atornilla o las ensambla a otro elemento. En este caso, la necesidad de recurso humano y, en consecuencia, mayor espacio y tiempo a utilizar se convertiría en un problema si el ambiente de trabajo es limitado y el personal escaso. Incluso, en ambientes laborales tan limitados como el descrito, los trabajadores asumen la responsabilidad de desarrollar la actividad física por sí mismos lo que provoca una sobrecarga postural y traumatismos acumulativos, que, a la larga, se traducen en pérdidas de dinero por el alto porcentaje de absentismo laboral: problema común en todos los países industrializados y con clara tendencia al desarrollo [2].

Nuestro país registra, según EsSalud que el 80 % de los descansos médicos de trabajadores asegurados es debido a hernias en la columna provocadas por condiciones laborales desfavorables, que atañen, inclusive, a jóvenes estudiantes quienes realizan trabajos manuales en su centro de estudio y cargan materiales muy pesados [3].

1.2 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

La mayoría de casos donde las personas asumen la responsabilidad de carga de objetos pesados es en lugares sin diseño previo para instalar un dispositivo de carga o lugares que fueron acondicionados para ser un taller como habitaciones con dimensiones estándares o salones, en caso de centros de formación académica. Por esta razón, se limitó el alcance de la tesis a ambientes con medidas estándares según las Condiciones Generales de Diseño emitidas por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [4]. Estas dimensiones incluyen los cambios de altura en los techos de una habitación ocasionados por la construcción de vigas y otros

factores de diseño. Además, el diseño del sistema solo aplica a superficies donde su techo y piso sean paralelas (rugosidad mínima en la superficie).

Por otro lado, se busca un dispositivo que desarrolle tareas que impliquen precisión durante el movimiento del objeto, de modo que se limita a acciones que ayuden al armado de un ensamble general de dispositivos, prototipos, etc., compuestos de varias piezas con un límite de peso y dimensión, información detallada en capítulos posteriores.

1.3 OBJETIVOS DE LA TESIS

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema mecatrónico orientado a habitaciones con medidas estándares, con capacidad de adaptarse a distintas alturas y espacios de trabajo. La finalidad es sujetar, elevar y desplazar con precisión y sin esfuerzo elementos de un ensamble.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un dispositivo con tres grados de libertad para el movimiento de objetos en un espacio específico.
- Diseñar un sistema de fácil e intuitivo uso, que permita agilizar las operaciones de ensamble, de modo que una sola persona pueda realizarlo por sí misma, ahorrando tiempo, espacio y empleo de recurso humano.
- Incentivar la integración de la tecnología móvil para manipulación de sistemas como el propuesto.

1.4 ANTECEDENTES

A continuación, se menciona una serie de dispositivos utilizados con fines de carga pesada y liviana en distintos ambientes. Dispositivos que representan al estado de la tecnología actual, los más utilizados y comercializados. Y dispositivos que forman parte del estado del conocimiento: patentes y prototipos, orientados al mismo fin. En este último, los sistemas emplean la tecnología de robots de cable, los cuales basan su diseño en el uso de cables para sujetar y movilizar la carga en el espacio, pueden ser de tres a más grados de libertad, dependiendo del número de cables que utilicen en su diseño. Este tipo de robots fue escogido por su versatilidad y fácil adaptabilidad respecto a los grados de libertad; además de usar de modo eficiente la mayor parte del área de trabajo.

1.4.1 Estado de la tecnología actual

Pese al avance tecnológico que se vive a nivel mundial, muchos países como el nuestro aun emplean tecnología tradicional para la carga y desplazamiento de objetos pesados. En muchos casos, la manipulación manual de carga es el método más empleado para trasladar objetos, acción que es resumida en la combinación del peso y factores como la postura, posición de carga, etc. que generan fuerzas compresivas en la columna vertebral para lograr levantar el objeto.

Por lo tanto, el estado de la tecnología actual no integra la flexibilidad de sistemas de carga y aún requiere la intervención y esfuerzo del operario, esto resulta en altas inversiones dirigidas a métodos y sistemas de carga no eficientes.

La siguiente tabla (*Tabla 1.1*) menciona algunos productos utilizados para la carga y movilización de objetos pesados dirigidos a talleres y ambientes cerrados.

Tabla 1.1: Resumen de la tecnología actual para elevación y desplazamiento de carga

Producto	Descripción	Capacidad	Dimensión	Peso	Desventaja
Carretillas elevadoras [5]	Vehículo autónomo motorizado destinado a llevar cargas en voladizo y elevarlas	3 ton	2.11 m x 1,228 m x 3.79 m	4320 Kg	Depende del espacio dispuesto para su movilización
Grúa Pluma [6]	Estructura de vigas a través del cual se moviliza el elemento de carga y elevación, incluye modulación de inclinación.	250 Kg	6 m x 3.5 m x 0.08 m	453 Kg	Estructura fija, área de trabajo limitada por un perímetro
Grúa hidráulica [7]	Emplea un cilindro hidráulico para ejercer la fuerza de carga	1 Ton	1.85 m x 1.07 m x 1.48 m	47 Kg	Existencia de fugas de aceite
Mesa hidráulica móvil [8]	Utilizado solo para elevación de maquinas	500 kg	0.82 m x 0.5 m x 0.05 m	71 kg	Altura de elevación limitada y espacio de trabajo reducido

De la tabla anterior se revalida, como fue mencionado, las limitaciones de la tecnología actualmente usada, relacionada al traslado del dispositivo usado, durante la acción de carga, y el área reducida de trabajo, restringida por el espacio empleado durante la utilización e instalación de dichos dispositivos.

Como se observa en la tabla, en muchos casos, la capacidad de carga del dispositivo pierde ventaja frente al peso y dimensiones del mismo, debido a que se requiere un contrapeso para evitar volcaduras durante la acción de carga.

1.4.2 Estado del Conocimiento

Por otro lado, patentes y prototipos muestran la posibilidad de desarrollar un dispositivo mejorado y orientado a la aplicación de carga y desplazamiento de objetos pesados y livianos, que carezca de las limitaciones mencionadas. Esta lista de patentes y prototipos está basada en el uso de robots de cable, los cuales basan su diseño en el uso de cables para sujetar y movilizar la carga en el espacio, estos pueden ser de 3 o más grados de libertad, dependiendo del número de cables que utilicen en su diseño.

La patente N°US6826452B1 [9] (*Figura 1.1*) describe un sistema robótico-macro, orientado a embarcaciones para la carga y descarga de un producto de varias toneladas, basa su funcionamiento en el uso de un sistema multicables fijo, controlado mediante un ordenador por decisión del operador. Evidenciando las ventajas de emplear más cables, la patente US6566834B1 [10], presenta la opción de un efector final con seis grados de libertad usando nueve cables; su diseño se basa en el uso de una espina dorsal unida a una plataforma triangular, sujeta por un lado a tres de los cables y por el otro, a dos cables adicionales en cada vértice de la plataforma. Esta disposición del efector, provee al sistema control de giro mediante el uso de un mando multi-eje joystick.

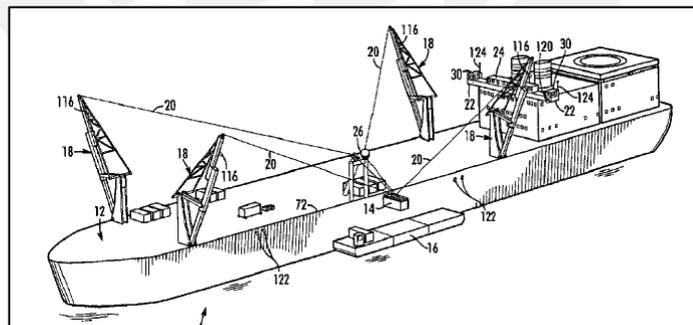


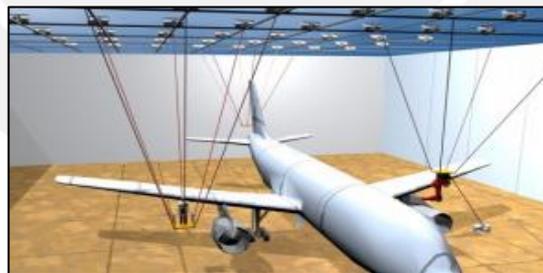
Figura 1.1: Sistema robótico para embarcaciones

El NIST RoboCrane es un prototipo que utiliza tres cables que proporciona una libertad de movimiento en dos ejes; a diferencia del anterior, todo el sistema es móvil gracias al uso de tres vehículos de orugas, proporcionando dinamismo en el espacio de trabajo. El sistema se controla mediante un controlador que permite el control en forma remota (RF) [11].

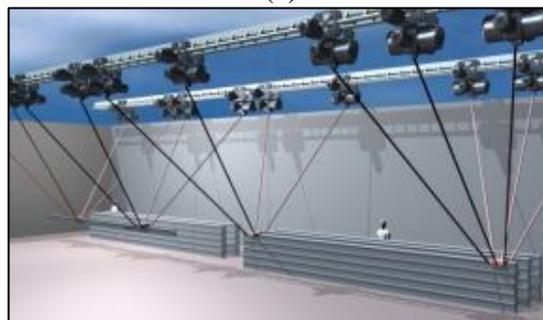


Figura 1.2 Prototipo del RoboCrane

Un producto comercial que presenta el uso de este tipo de robots es el llamado CableBOT (*Figura 1.3*), el cual se orienta a la automatización de procesos a gran escala como el ensamblado de aviones; su diseño integra el uso de varios robots de cable que se desplazan a través de una estructura fija y presenta diferentes configuraciones en el efector final para el logro de flexibilidad y reconfigurabilidad [12]. Siguiendo con productos comerciales, Marionet-Crane es un sistema utilizado como grúa de rescate, su diseño cuenta con grandes trípodes como soportes y pueden ser instalados a lo largo de un amplio espacio de acuerdo a lo requerido, en este caso, el efector final está sujeto a una camilla que es capaz de levantar aproximadamente una tonelada de carga [13].



(a)



(b)

Figura 1.3: (a) Uso de robots cable en el ensamble de aviones. (b) Distintas configuraciones de robots cable

CAPÍTULO 2

2.1 FORMULACIÓN DE PROPUESTA DEL SISTEMA MECATRÓNICO

El presente capítulo consiste en la descripción de los parámetros de diseño, organizada en una lista de requerimientos, la cual fue determinada a partir de la información del estado del arte, presentado en el capítulo 1. La recopilación de esta información ayudó a determinar las deficiencias de la tecnología actual y las necesidades de mejora, mediante la integración de la tecnología desarrollada en el estado del conocimiento, además de otras propuestas de mejora para la definición de la solución óptima.

Se definen los requerimientos del sistema necesarios para el desarrollo de los conceptos de solución presentados en el *Anexo 1*. Este anexo, además, presenta la matriz morfológica donde se definen posibles dispositivos (sensores y actuadores) utilizados en las funciones y operaciones que realizará nuestro sistema, a partir de ellos se desarrollan las alternativas (conceptos de solución). Éstas alternativas se comparan, mediante una evaluación técnica y económica, descrita en el anexo mencionado; ésta evaluación ayuda a formular el concepto solución ideal, descrito en el capítulo 3.

2.2 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS

En primera instancia, se describe el requerimiento general del sistema mecatrónico. Paso siguiente, los requerimientos mecánicos, electrónicos, de control y otros adicionales para el desarrollo del concepto solución.

2.2.1 Requerimiento General

La función principal del sistema consiste en la sujeción y desplazamiento de la carga en las tres direcciones del plano cartesiano XYZ en un espacio limitado por el sistema diseñado, espacio variable y adaptable: área máxima de trabajo de $4 \times 4 \text{ m}^2$ en el plano horizontal, altura máxima de 3 m y mínima de 1.30 m, en la vertical.

2.2.2 Requerimientos mecánicos

Los requerimientos mecánicos que deben ser cumplidos son los descritos a continuación:

1. El sistema debe presentar un diseño compacto para fácilmente ser guardado luego de su uso, dimensiones máximas de 0.25x0.25x2 m.
2. Diseño portable para fácil guardado y transporte.
3. Masa mínima de componente portátil 9 Kg.
4. Componentes rígidos durante la acción de carga.
5. Componentes electrónicos y control deben estar a resguardo frente a condiciones externas.
6. Geometría del sistema adaptable a distintos espacios, área máxima de 4x4 m².
7. Fácil montaje durante la instalación.
8. Límite de carga con un límite de 50 kg.
9. Factor de seguridad de 2 relacionado a la capacidad de carga.
10. Diseño basado en la ergonomía, sin implicación directa del operador.
11. Diseño basado en mínimas vibraciones y ruido del sistema durante su funcionamiento.
12. Diseño que permita fácil mantenimiento del sistema relacionado al desensamble para el cambio de cables, engrase o reemplazo de dispositivos electrónicos o de control.
13. Principal elemento de unión durante el ensamblado de piezas mecánicas: tuercas, arandelas y tornillos.
14. Material predominante para la fabricación del sistema aluminio 6061 y plástico para piezas no sometidas a esfuerzo.

2.2.3 Requerimientos electrónicos y eléctricos

Los requerimientos electrónicos y eléctricos que deben ser cumplidos son los descritos a continuación:

1. El sistema debe integrar una serie de sensores para detectar distancias entre elementos del sistema respecto al techo y piso, hasta una distancia de 3 m.
2. El sistema debe integrar sensores que permitan el seguimiento y ubicación de la carga en el espacio delimitado.
3. El sistema debe integrar Interruptores como limitantes de los mecanismos durante el montaje, debido a que el sistema depende de las dimensiones de altura del lugar donde sea instalado.

4. El sistema debe integrar actuadores que permitan el movimiento de la carga en el espacio.
5. El sistema debe integrar actuadores que le permitan adaptarse al espacio de trabajo disponible, ya que el sistema depende de las dimensiones de altura del lugar donde sea instalado.
6. El sistema debe integrar un microcontrolador para la toma de información proveniente de los sensores, el procesamiento de la misma y envío de la señal de control hacia los actuadores.
7. El sistema debe ser capaz de energizarse mediante la toma directa de corriente doméstica de 220 VAC - 60 Hz.

2.2.4 Requerimientos de control y comunicación

Los requerimientos control y comunicación que deben ser cumplidos son los descritos a continuación:

1. Manipulación del desplazamiento de la carga de dos maneras: control mediante una aplicación móvil y control manual sin implicancia de esfuerzo por el operador.
2. La conexión interfaz-usuario y sistema debe ser inalámbrica, de modo que el movimiento de la carga sea manipulado mediante teleoperación
3. El sistema debe integrar un módulo de comunicación para el envío de información desde el dispositivo móvil hacia el microcontrolador.
4. Mediante el uso de la información de sensores, el sistema debe replicar la posición de cada elemento principal que lo constituye, uno respecto a otro, en la interfaz gráfica desarrollada en la aplicación móvil.
5. Deseable la implementación del algoritmo que relacione actuadores y sensores con el fin de evitar esfuerzo en el operario, en caso del control manual.
6. Deseable la implementación del algoritmo para la determinación de velocidad de movimiento de la carga, velocidad de desplazamiento cercana a 0.5 m/s, constante en todo el trayecto.
7. Deseable la implementación del algoritmo que permita la sincronización de los actuadores para movilizar la carga en el espacio.
8. Deseable la implementación del algoritmo para la determinación de posición de la carga ubicado en el espacio xyz delimitado.

CAPÍTULO 3

3.1 SISTEMA MECATRÓNICO

El capítulo presente muestra el desarrollo del sistema mecatrónico óptimo, escogido a través del análisis técnico-económico presentado en el *Anexo 1* donde se comparan los distintos conceptos de solución propuestos. En el capítulo, primero se hace una descripción general del sistema, luego, subensambles principales del diseño mecánico, componentes empleados para el diseño electrónico y sus conexiones al microcontrolador; finalmente, una descripción general de la lógica de control.

3.1.1 Descripción del sistema mecatrónico

El sistema presentado consiste en cuatro soportes telescópicos que alcanzan una altura máxima de 3 m y mínima de 1.3 m (ver *Figura 3.3*), los cuales serán ubicados según usuario en cualquier posición dentro de un área cuadrada máxima de $4 \times 4 \text{ m}^2$ (ver *Figura 3.1*) es decir el espacio definido por los cuatro soportes será el único a través del cual pueda ser desplazada la carga. Cada soporte se apoya, en la parte superior, con el techo de la habitación y por el lado inferior, con el piso, ejerciendo presión sobre ambas superficies (ver *Figura 3.2*).

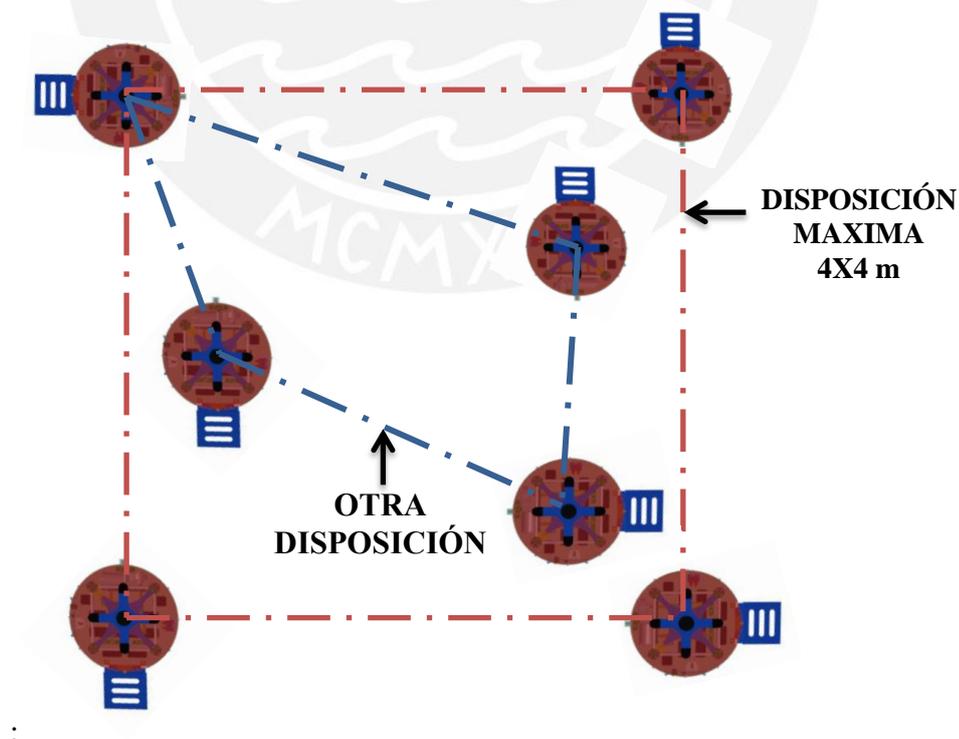


Figura 3.1: Ejemplo de posicionamiento de los soporte.

El sistema tiene tres grados de libertad con una capacidad de carga de 50 kg. Con la finalidad de evitar esfuerzos en el operario durante el transporte del sistema de un lugar a otro, el diseño presenta sus elementos independientes: los cuatro soportes telescópicos y el manipulador al cual va sujeta la carga. Para lograr su funcionamiento, el sistema requiere de una etapa previa de instalación (ver *Anexo 2*) de modo que los soportes queden unidos mediante cuerdas al manipulador (ver *Figura 3.2*). Cabe mencionar que en la cuerda recae el esfuerzo de tracción ejercida por el peso de la carga durante su desplazamiento [14].

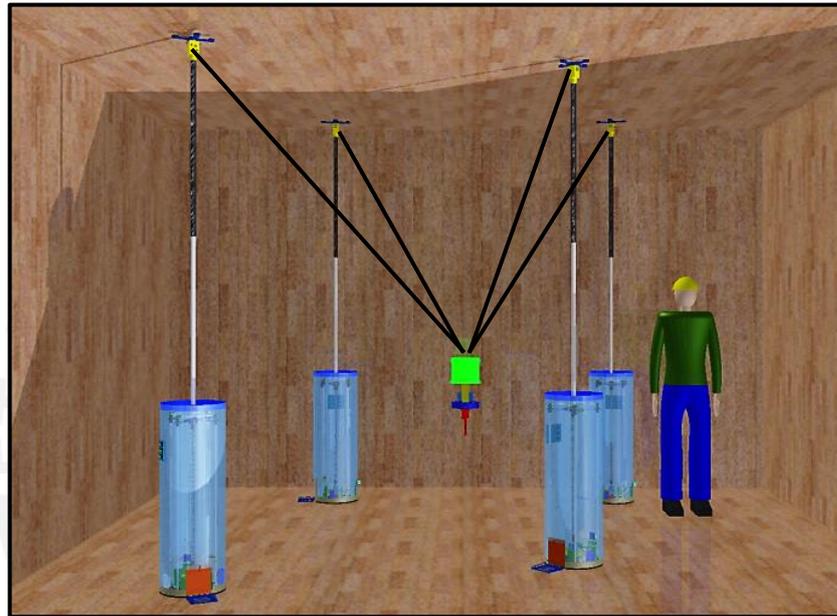


Figura 3.2: Disposición de soportes en el área de trabajo.

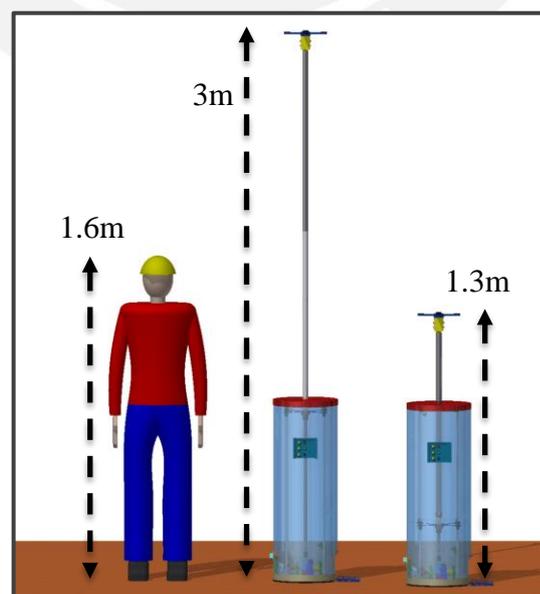


Figura 3.3: Izquierda: Persona estatura promedio. Centro: Soporte máxima altura. Derecha: Soporte plegado, mínima altura.

El movimiento de la carga se debe al uso de cabrestantes que giran por medio de un motor, esto permite que, según su movimiento horario o antihorario, la cuerda se suelte, retenga o enrolle, dependiendo de la dirección de movimiento deseada para la carga, mecanismo descrito más adelante en la Sección de Diseño Mecánico.

Un soporte fue centralizado con la fuente de energía que va conectada directamente a 220VAC-60Hz de la toma de corriente doméstica. La energía es distribuida a través de cables que acompañan a las cuerdas que unen los cinco elementos (soportes y manipulador), estos cables también permiten la comunicación entre los sensores y microcontrolador.

Existen dos opciones que permiten la interacción entre el usuario y el sistema durante el movimiento de la carga.

- La primera opción cuenta con una aplicación orientada a *Tablet* o *smartphone* que, mediante una interfaz amigable al usuario, permite el fácil ingreso de la posición final del objeto. Dicha aplicación muestra la distribución de cada elemento con las distancias más relevantes (altura del manipulador y separación entre los 4 soportes).

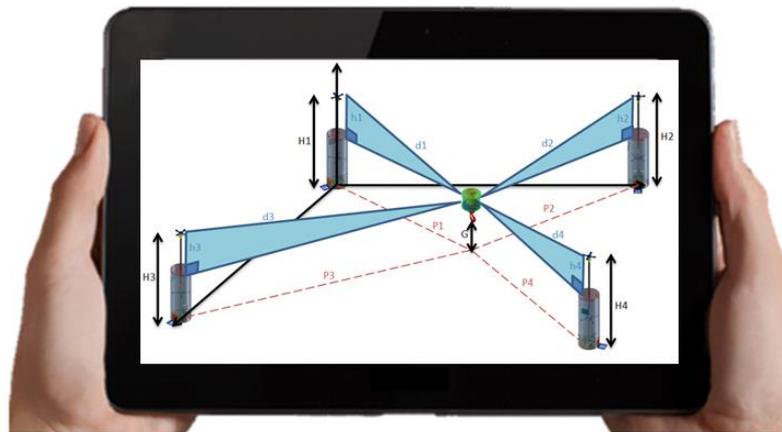


Figura 3.4: Interfaz Gráfica mostrando dimensiones relevantes de distribución de elementos

- La segunda opción es manual, es decir el usuario interviene directamente para direccionar el movimiento: coge el manipulador, ejerce presión sobre él y, sin ningún esfuerzo, la carga es movilizada. Esta función recae en el uso de los

sensores de fuerza distribuidos en la superficie del manipulador, de modo que el sensor o sensores que detecten mayor presión (ejercida por la mano del usuario) indicarán la dirección deseada para el movimiento del objeto en cualquiera de los tres ejes del plano XYZ. Esta opción será desarrollada en la Sección de Sensores y Actuadores.

3.1.2 Estructura de funciones

El sistema descrito con anterioridad ha sido dividido en cuatro bloques de funciones: Recepción de información, procesamiento de datos, mostrar datos en interfaz gráfica y enviar señal de control. Como se observa en la *Figura 3.5*, la información de entrada recae en el criterio del usuario, a partir del posicionamiento de los soportes dentro del marco límite de $4 \times 4 \text{ m}^2$ y la posición del manipulador ingresada por el usuario mediante la aplicación móvil. La información de salida se evidencia en el movimiento del manipulador a la posición deseada y la visión de su trayectoria en tiempo real a través de la interfaz gráfica.

➤ **Recepción de información**

- Recepción de información física: Función encargada de la adquisición de información de los sensores a partir de la posición inicial de los soportes ubicados por el usuario en la etapa previa de instalación.
- Recepción de información del móvil: Esta función es encargada de aceptar información proporcionada por el usuario a través de la aplicación móvil, información relacionada con la ubicación final del manipulador. Como se observa en la *Figura 3.5*, esta función se habilita luego de la etapa previa de instalación.

➤ **Procesamiento de datos**

- Procesamiento datos de sensores: Recibe la información de los sensores y la procesa para obtener las distancias y orientaciones entre los soportes y manipulador. Una vez instalado el sistema y solo al inicio, se hace la

procesamiento de datos relacionados con la ubicación de soportes. Durante el funcionamiento y de forma continua, se procesa la información relacionada con la ubicación del manipulador.

- Procesar datos en el móvil: Recibe la información de distancia y orientación de cada elemento y la procesa para generar las coordenadas de ubicación. Se ejecuta constantemente para la localización del manipulador.

➤ **Mostrar datos en interfaz gráfica**

Esta función muestra en una interfaz gráfica la posición de cada elemento de acuerdo a la representación en coordenadas generada. En ella se muestra, la posición del soporte 1, 2, 3 y 4, además del manipulador con sus debidas distancias en vista superior y lateral.

➤ **Envío de señal de control**

Esta función envía una señal de control a sus respectivos actuadores (motores). Esto depende de la información de posición final, ingresada por el usuario mediante la aplicación. En este caso, la información de control llega a los motores mediante la señal del driver.

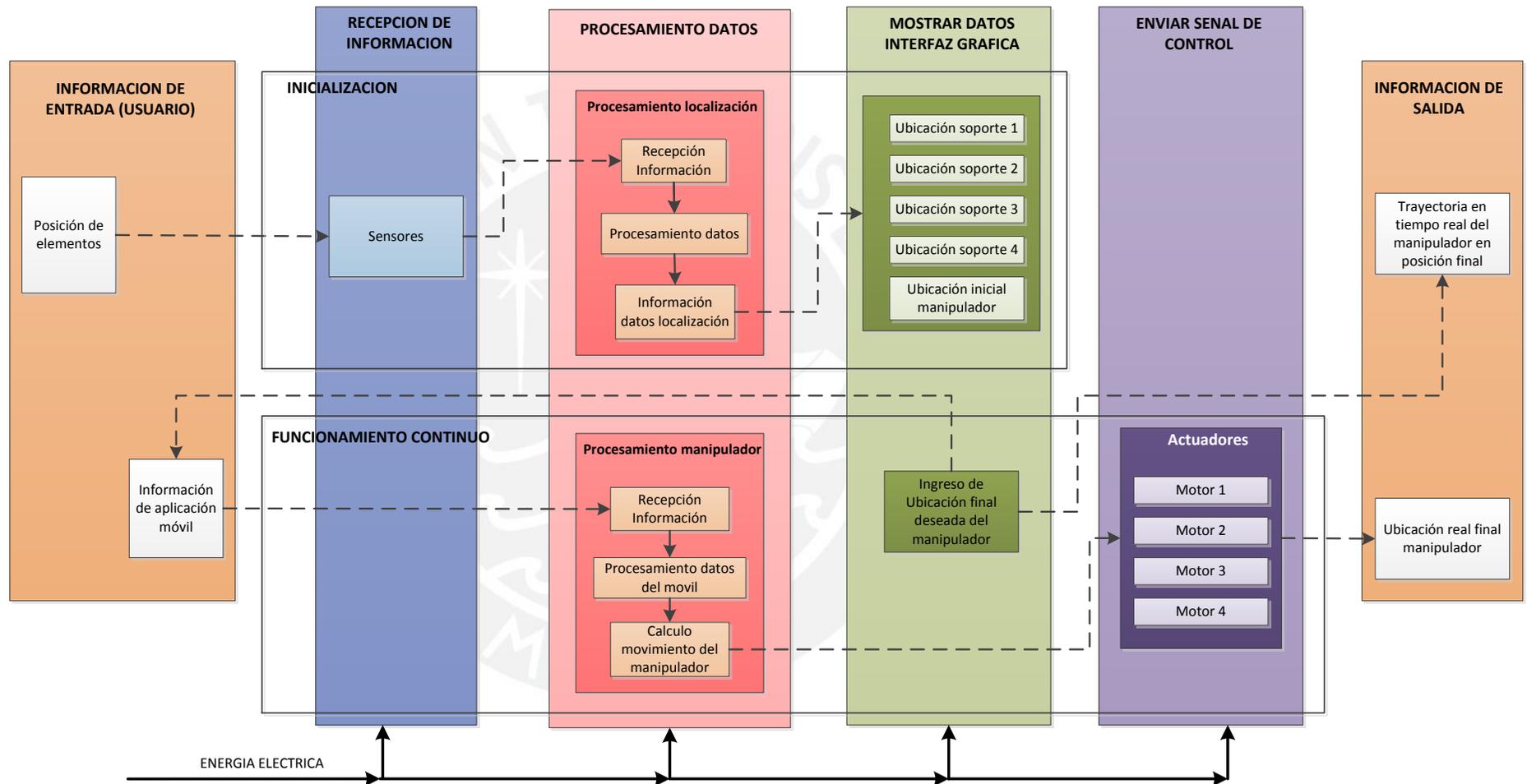


Figura 3.5: Diagrama de funcionamiento del sistema propuesto.

3.1.3 Diseño electrónico y eléctrico

3.1.3.1 Sensores y actuadores

- **Controlador**

Debido al gran número de sensores a utilizar, como será descrito líneas posteriores, es necesario un procesador capaz de manejarlos, de modo que se logre obtener la información necesaria para el control del sistema.

Es por ello que se necesita una alta cantidad de pines para el arreglo de sensores y otros componentes, pines digitales y analógicos.

En la *Tabla 3.1* se presenta tres opciones para escoger el controlador según requerimientos planteados.

Tabla 3.1: Principales plataformas de procesamiento y características.

Plataforma	Procesador	# Pines digitales (E/S)	# Pines analógicos (E)	Velocidad de procesamiento (MHz)
Arduino Mega R3	ATmega2560	54	16	16
Raspberry Pi	ARM1176	17	-	700
BeagleBone Black	ARM Cortex-A8	65	7	1000

Claramente, el Raspberry Pi se descarta por la falta de pines analógicos de entrada que son necesarios para la lectura de los sensores de fuerza, a menos que se agregue un ADC (conversor análogo digital), pero no se requiere ya que hay otras opciones. Si bien es cierto, la velocidad de procesamiento del BeagleBone Black es alta y se basa en un procesador ARM (ventaja de bajo consumo de energía y costo, entre otras), éste no alcanza el número de pines analógicos requeridos, motivo por el cual también es descartado. El Arduino Mega R3, cumple con el requerimiento de número de pines digitales y analógicos necesarios, pese a que el microcontrolador atmega2560 no es tan superior como las soluciones basadas en ARM, tiene capacidades superiores a otros como el Atmega320 del Arduino UNO. Por lo tanto, la velocidad de procesamiento y el tipo de procesador son suficientes para las operaciones requeridas por el sistema.

El Arduino escogido, se ubica al interior de una pieza del manipulador como se muestra en la *Figura 3.7*. El controlador estará encargado de las siguientes funciones:

- ❖ Recibir y procesar la señal generada por los *encoders* acoplado a los motores.
- ❖ Recibir y procesar la señal generada por los demás sensores.
- ❖ Enviar la señal de mando a los actuadores.
- ❖ Comunicarse con la *Tablet* de manera serial para recibir instrucciones.

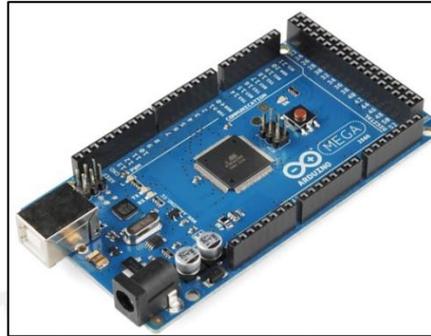


Figura 3.6: Arduino Mega 2560. Fuente: Arduino.cc

Tabla 3.2: Especificaciones Arduino Mega 2560. Fuente: Arduino.cc

Características Técnicas	
Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje operativo	5 Vcc
Voltaje de entrada (recomendado)	7 – 12 Vcc
Voltaje de entrada (límites)	6 – 20 Vcc
Pines digitales I/O	54 (15 pueden ser PWM)
Pines de entrada analógica	16
Corriente DC por pines I/O	40mA
Corriente DC por pines de 3.3V	50mA
Velocidad de clock	16 MHz

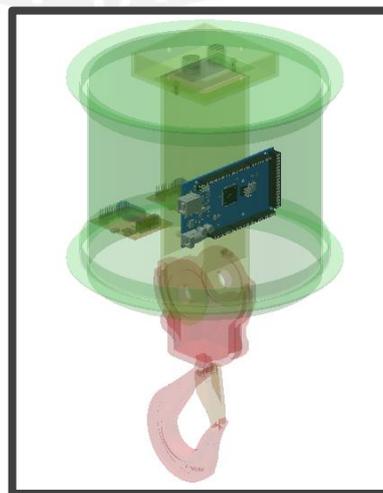


Figura 3.7: Ubicación del Arduino al interior del manipulador.

- **Motor para tornillo sin fin**

Empleado para el movimiento del tornillo sin fin encargado del ajuste de altura de cada soporte. Se emplea uno por soporte y están ubicados en la parte central de su base principal como se observa en la *Figura 3.9*. El motor fue escogido de acuerdo a los criterios considerados en los cálculos matemáticos desarrollados en el *Anexo 3*. El voltaje de alimentación es de 24 voltios y será suministrada de una fuente externa escogida de acuerdo a los requerimientos de todos los componentes electrónicos a utilizar, los criterios de selección serán desarrollados más adelante en el presente capítulo en la Sección de Consumo Eléctrico.



Figura 3.8: Motor DC 24V 100RPM. Fuente: Aliexpress

Tabla 3.3: Especificaciones Motor DC. Fuente: Aliexpress

Propiedades del motor	
Tipo	DC
Par nominal	2.04kg. cm
Velocidad nominal	100 rpm
Tensión nominal	24 V
Corriente nominal	160mA

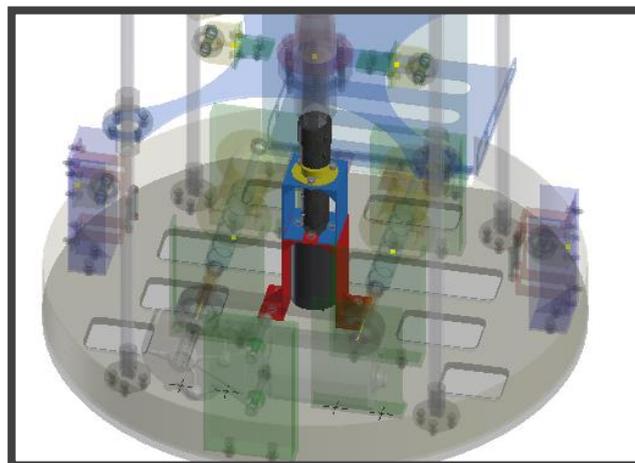


Figura 3.9: Ubicación motor DC para tornillo sin fin en un soporte.

- **Motor para la carga**

Utilizado para accionar el movimiento de 2 carretes o cabrestantes: Carrete que almacena la cuerda que eleva la carga y el carrete para el cable de datos. El motor DC fue escogido por cubrir el requerimiento del torque (ver *Anexo 3*) [15] y por incluir el *encoder* el cual trabaja con un voltaje de 5-24 V. Como fue mencionado, los 24 V que se requiere para el funcionamiento del presente motor serán provistos de una fuente externa. Como se observa en la *Figura 3.11*, el motor esta acoplado a la base principal de cada soporte y está fijado a la barrena. Mediante una faja, el movimiento se transmite al segundo cabrestante.



Figura 3.10. Motor NIDEC. Tipo 404 764. Fuente: Nidec

Tabla 3.4. Especificaciones motor DC NIDEC. Fuente: Nidec

Propiedades del motor DC	
Torque nominal	4 Nm
Velocidad nominal	22 RPM
Potencia nominal	7.54 W
Tensión nominal	24 V
Corriente nominal	1.8 A
Peso	0.44 Kg

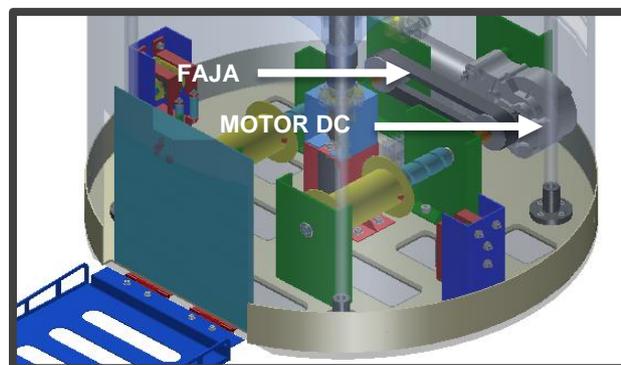


Figura 3.11. Ubicación motor DC para control de cabrestantes

- **Driver para motor de carga**

Los cabrestantes son los encargados de enrollar o desenrollar la cuerda destinada a la carga y el cable de datos; para ello es necesario controlar el sentido horario o antihorario de los motores para hacer posible el control del sistema en general. Por otro lado, los motores de carga de la marca NIDEC incluyen *encoders* para la medición continua de velocidad de giro de su eje que resulta útil para el control de la velocidad de movimiento del sistema durante la acción de carga.

Estos dos requerimientos son cumplidos por el módulo *Roboclaw* que a diferencia de otros como el L298N que solo incluye el puente H, para el control de giro de los motores, también, está provisto del lector de *encoder* e integra un PID, útil para controlar la velocidad en un lazo cerrado, mantener la velocidad de los motores, incluso si la carga varía.

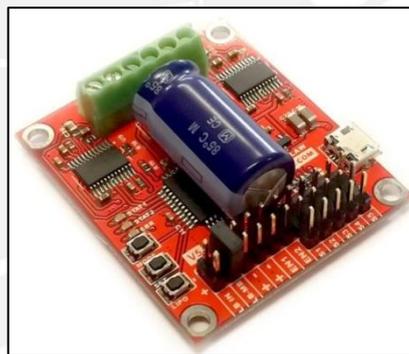


Figura 3.12. RoboClaw 2x5A. Fuente: POLOLU

Cada *Roboclaw* puede controlar dos motores, nuestro sistema tiene cuatro motores, motivo por el que solo se usan dos *Roboclaw* y serán ubicados en el manipulador como se observa en la *Figura 3.13*.

Referente a las especificaciones técnicas (ver *Tabla 3.5*) el modelo *Roboclaw 5A* (ver *Figura 3.12*) es el adecuado para el manejo de la corriente pico de 1.8A de los motores de carga, ya que presenta una corriente de salida máxima de 10 A.

Tabla 3.5. Especificaciones RoboClaw 2x5A. Fuente: POLOLU

Características Técnicas	
Canales de motor	2 motores DC
Voltaje funcionamiento	6 V to 34 V
Corriente salida continua	5 A
Corriente salida máxima	10 A

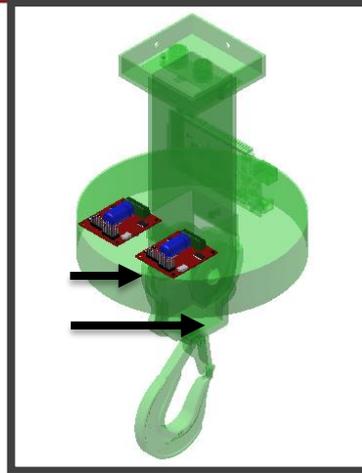


Figura 3.13. Ubicación de 2 Roboclaw en el manipulador.

- **Puente H para motor DC**

Con la finalidad de controlar el sentido de giro de los motores DC encargados del movimiento del tornillo sin fin, se empleará el módulo L298N (Figura 3.14). Fue escogido porque cumple los requerimientos necesarios para el control del motor DC que necesita 160 mA como corriente nominal, además puede ser alimentado de la misma fuente de 24V (ver Tabla 3.6). De este modo, en un sentido, el soporte aumenta su altura y en sentido contrario la disminuya. Cada módulo se ubica en la base de cada uno de los cuatro soportes como se muestra en la Figura 3.15.

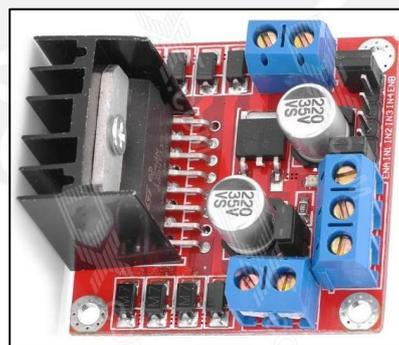


Figura 3.14. Módulo Puente H-L298N. Fuente: POLOLU

Tabla 3.6. Especificaciones Módulo Puente H-L298N. Fuente: POLOLU

Características Técnicas	
Voltaje Lógico	5V
Voltaje de conducción	5 V to 35 V
Corriente Lógico	0~36m A
Corriente de conducción	2A
Máxima Potencia	25W

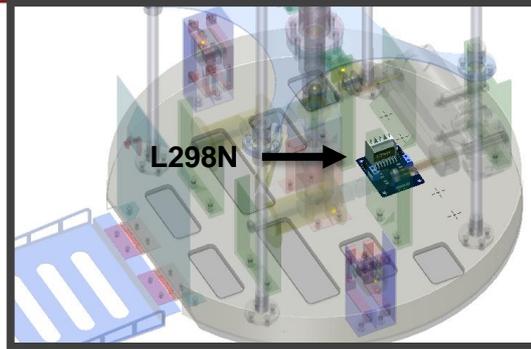


Figura 3.15. Ubicación de L298N para control de giro de motor DC

- **Sensor de fuerza**

Utilizado como parte de la segunda opción, además del uso de la *Tablet*, para desplazar y direccionar el movimiento de la carga en el plano horizontal y vertical. Es accionado por el usuario al ejercer presión sobre él. Existen distintas presentaciones de este tipo de sensores respecto al área de detección, pueden ser cuadrados, rectangulares, circulares o de tiras. En este caso, como se observa en la *Figura 3.16*, se escogió el de tiras con dimensiones 12x123 mm y serán dispuestos en el manipulador como indica la *Figura 3.17*. El largo del sensor, se aproxima a la altura de 120 mm del manipulador cilíndrico, evitando problemas con la instalación de los sensores en la superficie del manipulador.



Figura 3.16. Sensor de fuerza. Fuente: POLOLU

Tabla 3.7. Especificaciones sensor de fuerza. Fuente: POLOLU

Características Técnicas	
Rango de Sensibilidad	~0.2 to 20N
Fuerza de activación	~0.2N min
Dimensiones	10cm x 1cm

Como se observa en la *Figura 3.17*, los sensores están ubicados a lo largo en la vertical del manipulador cilíndrico, de modo que el sensor que detecte mayor presión sea el indicador para direccionarlo. Cabe mencionar, que mientras el sensor

sea más delgado por un lado, habrá la necesidad de utilizar más sensores para cubrir la superficie del manipulador, de modo que se logrará mayor precisión durante el direccionamiento. El movimiento en el plano vertical se debe a dos sensores dispuestos en el extremo superior e inferior (ver *Figura 3.17*) de modo que el que se active proporcionará la dirección arriba o abajo del manipulador.

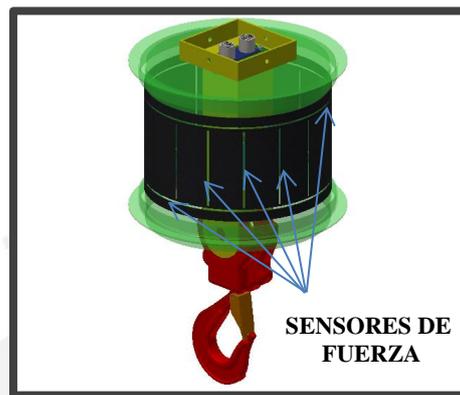


Figura 3.17. Disposición de Sensores de Fuerza en superficie del manipulador.

El principio de funcionamiento del sensor resistivo de fuerza escogido se basa en la curva mostrada en la *Figura 3.18*, de modo que, de acuerdo a la resistencia FSR, propia del sensor, para cada valor de fuerza corresponderá un valor de voltaje, el cual nos brindará el dato para discriminar qué sensor fue el que detectó mayor presión.

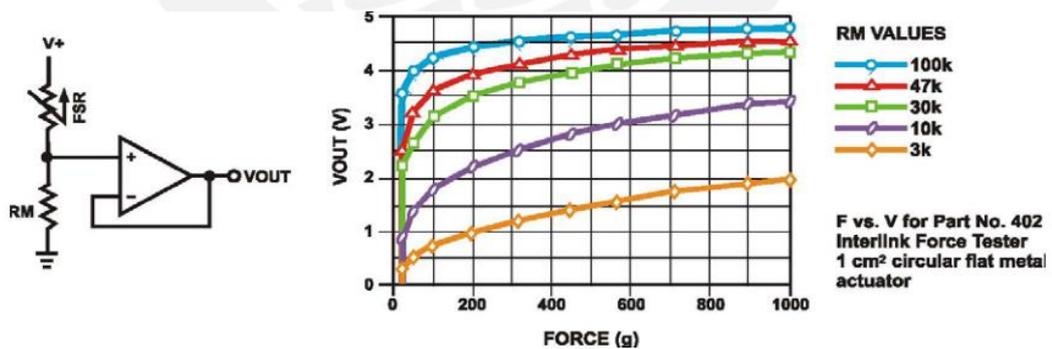


Figura 3.18. Curva de funcionamiento del sensor resistivo. Fuente: POLOLU

- **Sensor de proximidad**

Empleado para medir la distancia entre el manipulador y el techo del área de trabajo, dato del sensor utilizado para cálculos posteriores de distancias entre soportes.

La ubicación del sensor será en la zona superior del manipulador (ver *Figura 3.20*) y paralelo a la superficie del techo y suelo, de este modo, la distancia solo será detectada si se cumple este requerimiento de paralelismo, debido a las condiciones óptimas de trabajo definidos por el fabricante del sensor.

Debido a que la disposición de los elementos del sistema: soportes y manipulador, alcanzan una altura máxima de 3 m, se busca un sensor que logre detectar a éstas distancias. Una opción sería emplear sensores de infrarrojo pero su aplicación es para distancias pequeñas, por ejemplo, el sensor 2Y0A21 tiene un rango de 10 a 80 cm no aceptable para esta propuesta. En la mayoría de casos, los sensores con rangos altos de medición están dirigidos a aplicaciones industriales y el rango de alcance es bastante amplio, por ejemplo, el sensor fotoeléctrico o los sensores de láser que pueden medir hasta 30 m, en este caso no sería aprovechada la capacidad de medición de estos sensores, razón por la cual se optó por el uso de un sensor ultrasónico modelo HC-SR04 con capacidad de medición de hasta 4 m que, además, es muy utilizado con la plataforma de Arduino.



Figura 3.19. Sensor de proximidad o distancia. Fuente: Adafruit

Tabla 3.8. Especificaciones técnicas del sensor de proximidad. Fuente: Adafruit

Datos técnicos	
Rango de medición	Hasta 300 cm
Resolución	1cm
Corriente de alimentación	15 mA
Voltaje de alimentación	5.5 V
Frecuencia	40 KHz

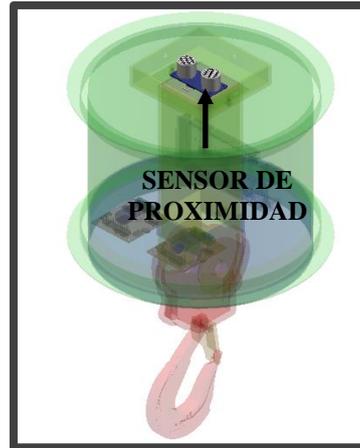


Figura 3.20. Ubicación del Sensor de proximidad en el manipulador.

- **Sensor Magnético y diodo láser**

Hasta el momento se tiene datos de algunas dimensiones adquiridas de los sensores antes descritos (ver *Figura 3.21*):

- Dimensión d: Longitud de la cuerda de carga que ha sido desenrollada, calculadas con ayuda del encoder de los motores NIDEC y del conocimiento previo de dimensiones del cabrestante (diámetros y longitud) y cuerda (diámetro).
- Dimensión H: La altura alcanzada por los soportes luego de la instalación, hallada gracias al uso del encoder acoplado al motor del tornillo sin fin y al conocimiento previo del paso del tornillo sin fin, en este caso de 2 mm.
- Dimensión G: Distancia del manipulador respecto al piso (superficie inferior), con ayuda del dato del sensor ultrasónico.
- Dimensión h: Resta entre altura H y distancia G.
- Dimensión P: Proyección en el plano horizontal, calculado del triángulo recto formado, con lados h y d.

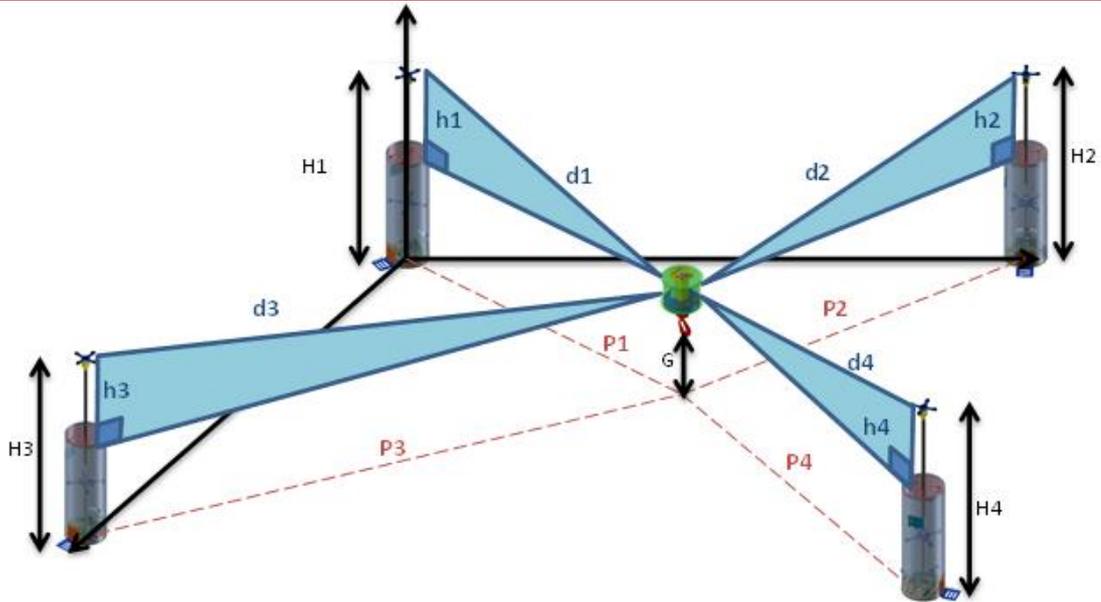


Figura 3.21: Datos obtenidos desde los sensores para el cálculo de distancias

De acuerdo a la *Figura 3.21*, la disposición de los soportes dependen de la dimensión P , pero aún no pueden ser calculadas las distancias entre soportes ya que es necesario datos de ángulos. Para este fin fue escogido un **sensor magnético** CMPS11 [16]. Su principio de funcionamiento se basa en la detección del polo norte magnético (mayor fuerza magnética) orientado en cualquiera de las tres direcciones XYZ, arrojando la desviación respecto a dicho norte; en este caso se utilizará solo el eje “Z”, perpendicular saliente a la tarjeta mostrada en la *Figura 3.22*. Respecto al soporte, el eje “Z” estará contenido en un plano horizontal en dirección saliente al soporte.

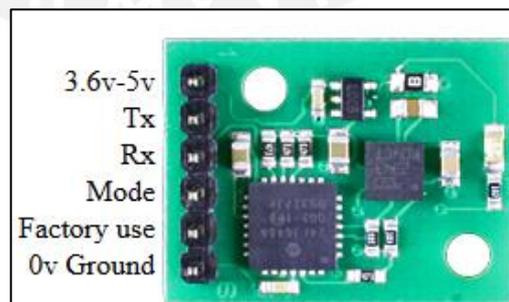


Figura 3.22. Sensor Magnético. Fuente: JAMECO

Tabla 3.9. Especificaciones sensor magnético

Características Técnicas	
Voltaje de alimentación	3.6 - 5v
Corriente nominal	25mA

Para hacer efectiva la idea de cálculo de ángulos, mediante el sensor magnético, es necesario asegurar que el eje “Z” apunte al soporte contiguo, es donde interviene el **diodo láser** (*Figura 3.23*) que sirve como guía al usuario para permitir la fácil ubicación de cada soporte, acomodándolo de manera que en cada uno de ellos sea reflejada la luz que emite el soporte contiguo. Para ello, el diodo debe ser alineado verticalmente al sensor magnético (*Figura 3.24*) y cada soporte debe tener una marca aproximada en la que deba ser vista la luz del diodo, disminuyendo la fuente de error.

El diodo láser fue escogido por su característica de emitir luz a largas distancias siendo visible, en todo momento, su haz de luz hasta tocar con una superficie. Además, la corriente y el voltaje está en el rango que puede brindar el controlador (ver *Tabla 3.10*).



Figura 3.23. Diodo Láser M6505I . Fuente: JAMECO

Tabla 3.10. Especificaciones diodo Láser. Fuente: JAMECO

Características Técnicas	
Potencia Óptica	< 5 mW
Corriente de Trabajo	<25 mA
Voltaje de Trabajo	3-6 v
Longitud de onda	640-660 nm
Tamaño de punto	<9 mm a 10 m

Con la información del sensor magnético es posible el cálculo de distancias entre los cuatro soportes distribuidos, información relevante mostrada en la aplicación de *tablet*.

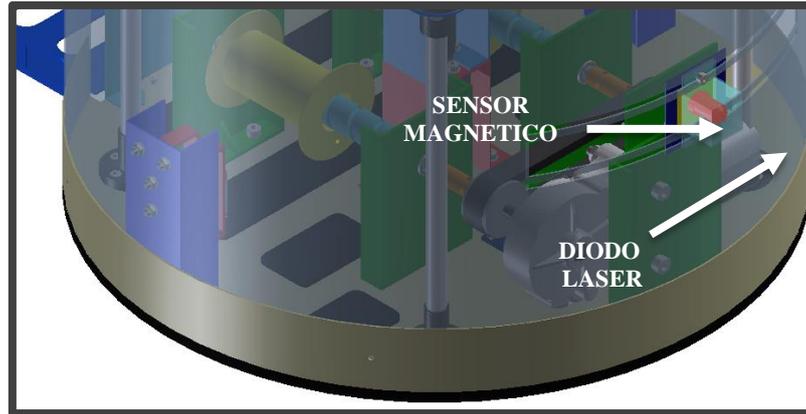


Figura 3.24. Ubicación Diodo Láser y sensor magnético en superficie de carcasa

- **Interruptor fin de carrera**

Su objetivo es detectar el tope máximo para plegar o elevar cada soporte, es decir, el giro del motor acoplado al tornillo sin fin se detiene al activarse uno de los tres interruptores que se emplean.



Figura 3.25. Interruptor fin de carrera. Fuente: JAMECO

Tabla 3.11. Especificaciones del interruptor. Fuente: JAMECO

Características Técnicas	
Función de conmutación	Off - On
Tipo de actuador	Palanca
Tensión nominal (AC)	125 V
Tensión nominal (DC)	250 V
Máxima Corriente nominal	5 A

Interruptor 1: Ubicado en una pieza interna del soporte, empleado como Interruptor límite para el plegado de cada soporte, evitando que su altura descienda más de lo permitido y pueda dañar la estructura mecánica.

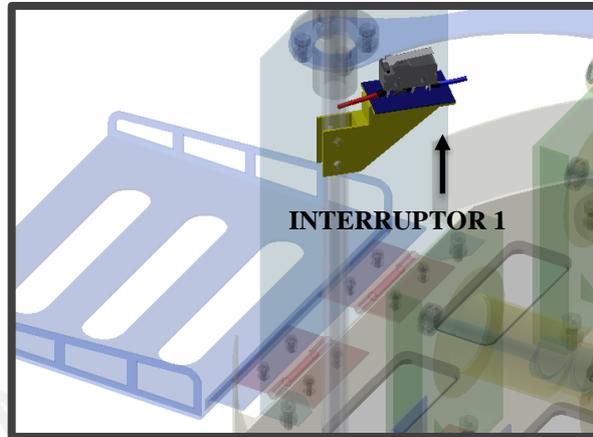


Figura 3.26. Ubicación Interruptor 1.

Interruptor 2: Interruptor que limita la máxima altura de elevación de un soporte (3 m). Ubicado en la parte superior de la estructura principal del soporte (cilindro con diámetro mayor) como se observa en la *Figura 3.27*, es activado con el contacto de una pieza interna responsable de la acción de elevación de soporte.

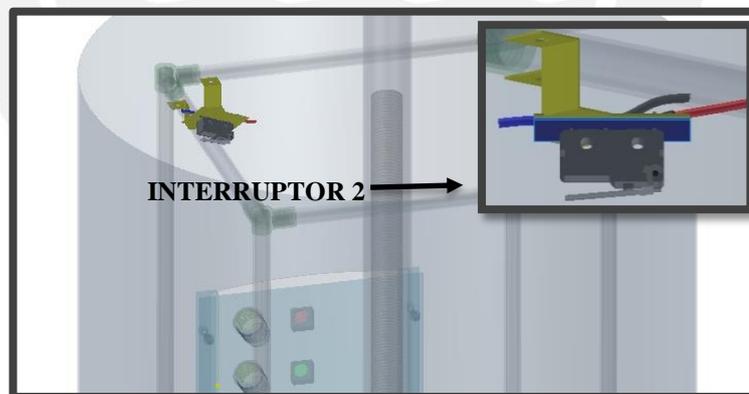


Figura 3.27. Ubicación Interruptor 2.

Interruptor 3: Empleado durante la elevación del soporte. Está ubicado en la parte superior del soporte en general (ver *Figura 3.28*) y se activa cuando se ejerce presión con el techo del lugar de instalación para longitudes menores a 3 m (entre techo y piso).

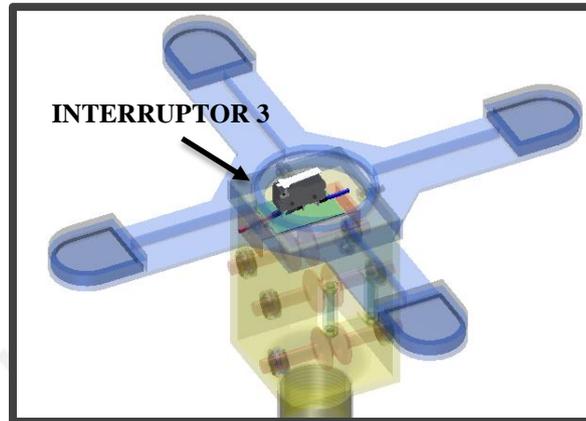


Figura 3.28. Ubicación Interruptor 3.

- **Módulo *Bluetooth* HC-05**

Este módulo permite la comunicación entre la *Tablet* y el controlador Arduino. Se encuentra ubicado al interior del manipulador. Será alimentado desde el Arduino ya que provee los 5 v que necesita y por pin brinda corriente máxima de 40 mA, necesario para la operación del presente módulo (ver *Tabla 3.12*).

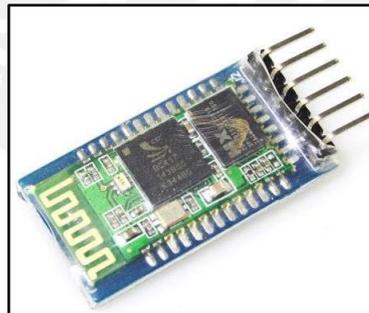


Figura 3.29. Módulo Bluetooth HC-05. Fuente: HC-05 Datasheet

Tabla 3.12. Especificaciones módulo bluetooth HC-05. Fuente: HC-05 Datasheet

Características Técnicas	
Sensibilidad	-80 dBm
Potencia de transmisión RF	Hasta +4dBm
Voltaje de alimentación	3.3 VDC a 6 VDC
Voltaje de operación	3.3 VDC
Corriente de operación	<40 mA
Corriente en reposo	<1 mA
Interfaz	UART

3.1.3.2 Consumo Eléctrico

La siguiente tabla muestra los consumos en corriente y potencia de cada dispositivo electrónico utilizado en el diseño del sistema mecatrónico propuesto, datos empleados para la elección de la fuente.

Tabla 3.13. Consumo eléctrico del sistema.

Cantidad	Componente	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Corriente total (A)	Potencia total (W)
4	Diodo Laser	5	0.025	0.125	2.8	14.2
1	Modulo <i>Bluetooth</i>	5	0.04	0.2		
23	Sensor fuerza	5	0.01	0.05		
1	Sensor proximidad	5	0.05	0.25		
12	Pulsador	5	0.1	0.5		
4	Puente H	5	0.036	0.18		
4	Sensor Magnetico	5	0.025	0.125		
1	Arduino Mega R3	5	0.8	4		
2	RoboClaw	5	0.09	0.45		
4	Motores DC	24	2	48	11.2	268.8
4	Motores DC	24	0.8	19.2		
					Total	283.020

De la *Tabla 3.13*, se observa que el consumo máximo del sistema en potencia es 283.02 W. De modo que $283.02W / 24V = 11.79 A$ para los motores. De este modo, se necesitará una fuente de 24V con $283.013W \approx 300W$ y un amperaje un tanto inferior a 11.79 A.

- Fuente Mean Well 350 W serie NES-350, otorga 24V-14.6 A (*Figura 3.32*). Fue escogida porque cumple con el amperaje necesitado para alimentar el sistema y ofrece una potencia cercana, ligeramente mayor. Sus especificaciones técnicas se observan en el *Anexo 4*.



Figura 3.30. Fuente 24v-14.6A. Fuente: Mean Well

Esta fuente proporcionaría un voltaje de 24 v, pero la mayoría de los componentes electrónicos descritos anteriormente, trabajan con voltajes de 5v, motivo por el cual se utiliza un regulador de voltaje de 24v a 5v.

- **Regulador de voltaje 24V-5V**

Utilizado para obtener la alimentación para componentes que requieren 5v. Este regulador fue escogido debido a que provee la corriente necesaria para los componentes que trabajan con esta tensión, como se observa en la *Tabla 3.14*, presenta una corriente continua de salida de 5 A, suficiente para los dispositivos, que en su conjunto consumen 2.8 A según la *Tabla 3.13*.



Figura 3.31. Regulador de voltaje 24V. Fuente: POLOLU

Tabla 3.14. Especificaciones del regulador. Fuente: POLOLU

Características técnicas	
Voltaje mínimo de operación	6 V
Voltaje máximo de operación	38 V
Corriente continua de salida	5A
Voltaje de salida	5 V
Máxima corriente en reposo	0.8 mA

3.1.3.3 Diagrama Esquemático

Los elementos electrónicos utilizados en el sistema propuesto se basan en el uso de módulos, estos cuentan con una hoja de datos que detalla su esquema interno y funcionamiento. El sistema completo de los circuitos se agrupa en 11 grupos y fueron desarrollados mediante la Software Eagle. A continuación, se presenta cada grupo del circuito electrónico general empleado para el desarrollo del sistema propuesto.

- Grupo 1:** Se emplea una fuente de alimentación que presenta como entrada a 220VCA-60Hz y como salida 24VCC. Se emplean un regulador de voltaje para obtener 5V necesarios para los dispositivos mencionados en la *Tabla 3.13*, incluyendo el controlador. En caso de los ocho motores DC, se usa 24v directo de la fuente. Como se observa en la *Figura 3.32*, se emplean fusibles que pueden soportar como máximo 13 A de corriente, evitando problemas de sobrecarga en la fuente.

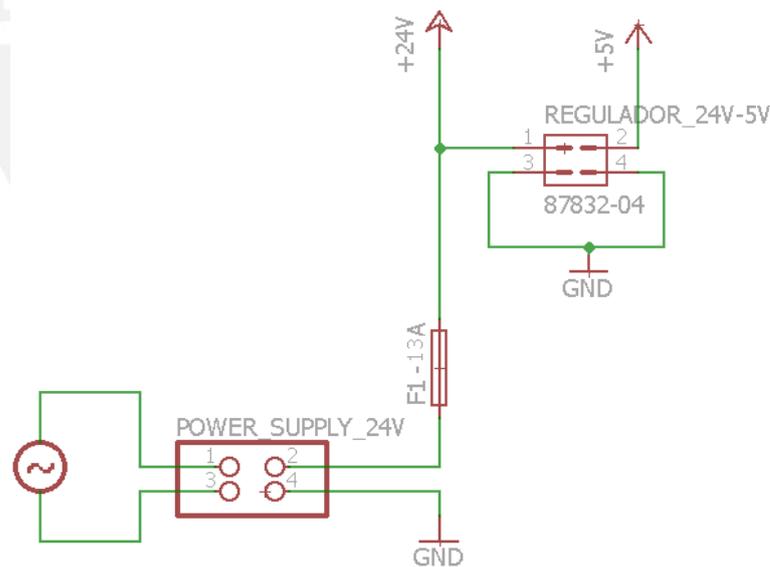


Figura 3.32. Fuente de alimentación 24v.

- Grupo 2:** Muestra el esquemático del Arduino Mega R3 y su distribución de pines (*Figura 3.33*). Es alimentado con 5V suministrado a partir del regulador de voltaje.

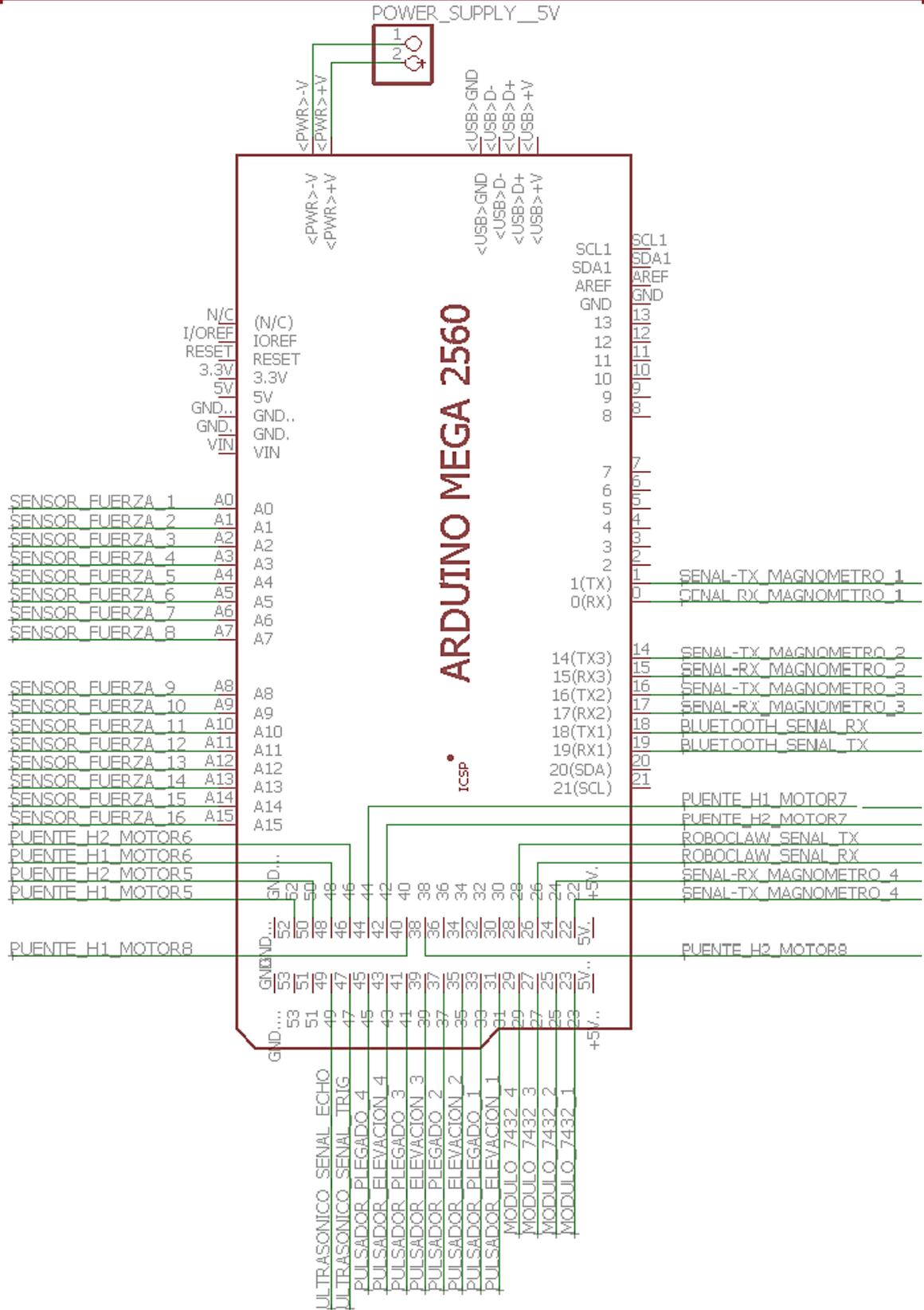


Figura 3.33. Pines de sensores y actuadores conectados del Arduino Mega 2560.

- Grupo 3:** Se compone de dos drivers (Roboclaw), los cuales se encuentran a cargo de dos motores cada uno (ver *Figura 3.34*) y presenta conexiones con los encoders respectivos. Se encuentran alimentados directamente de la fuente y las señales de entrada para ambos provienen del Arduino Mega2560. Ambos drivers se conectan al mismo pin 26(TX2) y 28(RX2). Estos pines son digitales pero serán configurados para la transmisión y recepción de datos en serie, respectivamente.

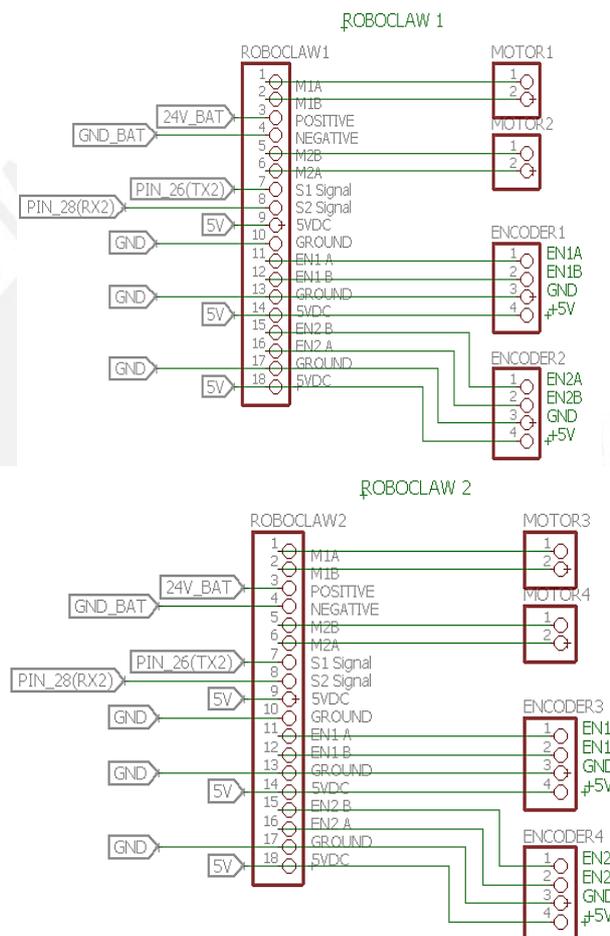


Figura 3.34. Conexiones de pines del Roboclaw con motor, encoder y controlador.

- Grupo 4:** Consta de cuatro sensores magnéticos CMPS11 conectados en modo serial, tres de ellos utilizan pines correspondientes al Tx y Rx del Arduino; el cuarto, utiliza pines digitales E/S que serán configurados para la comunicación, usando software serial de Arduino. Como se observa en la *Figura 3.35* el pin “Mode” es conectado a GND para la activación del modo serial. La alimentación es obtenida del Arduino.

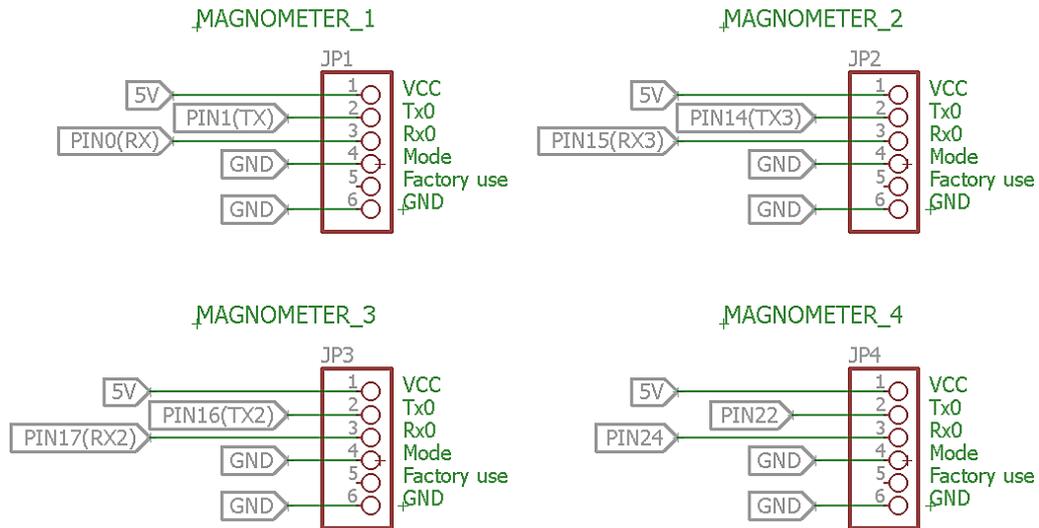


Figura 3.35: Distribución de pines del sensor magnético.

- **Grupo 5:** Uso del módulo de Bluetooth para la comunicación entre el Arduino y Tablet. El pin Tx y Rx del *bluetooth* se conecta al pin 18 y pin 19, correspondientes al Tx y Rx del Arduino (ver Figura 3.36).

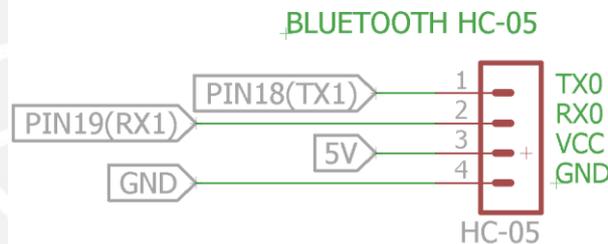


Figura 3.36. Distribución de pines del módulo bluetooth.

- **Grupo 6:** El sensor ultrasónico HC-SR04 es controlado mediante los pines 47 y 49 del Arduino Mega 2560 y alimentado con 5v proveniente del mismo (ver Figura 3.37).

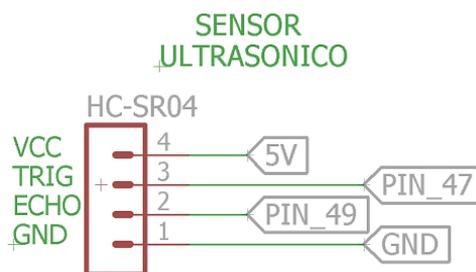


Figura 3.37. Distribución de pines del sensor ultrasónico.

- **Grupo 7:** Los sensores de fuerza mostrados en la *Figura 3.38* son controlados, cada uno, de modo independiente y conectados a los 16 pines analógicos del controlador elegido.

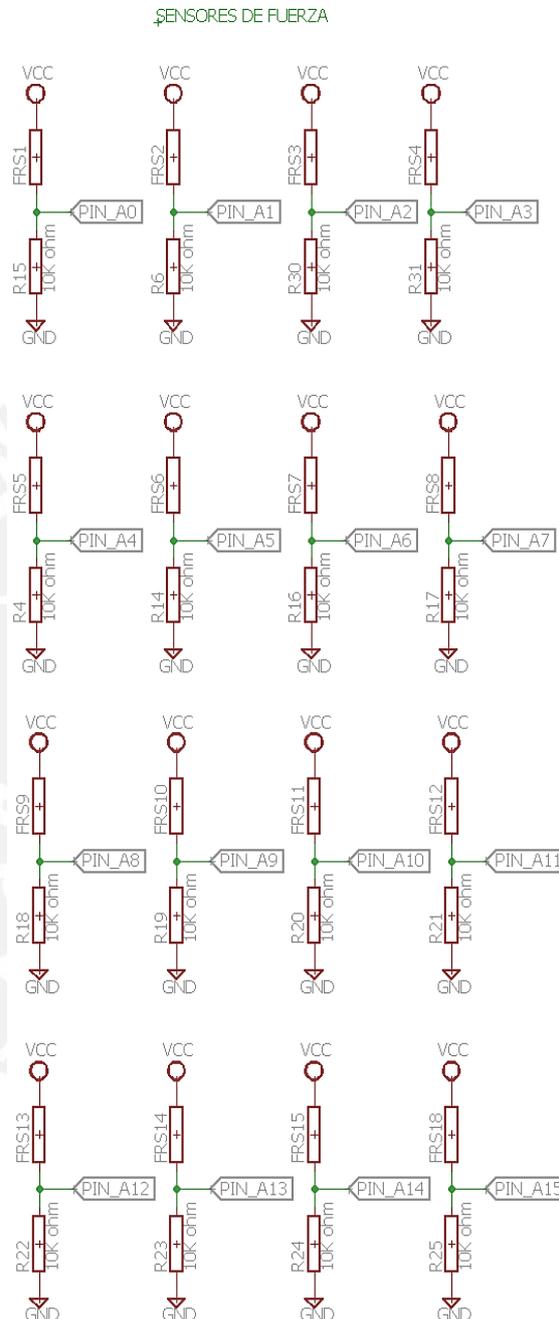


Figura 3.38. Conexiones de sensores de fuerza con pines de controlador.

- **Grupo 8:** Interruptores internos utilizados durante la elevación y plegado de cada soporte (P1, P2, P3, P4). Consta de cuatro por soporte, tipo “fin de carrera” conectados a sus respectivas resistencias pull-up. Con la finalidad de emplear una única señal y un solo pin del Arduino por cada soporte se hace uso de un

módulo 7432, el cual presenta cuatro compuertas lógicas OR, de modo que al ser activado cualquiera de los Interruptores se envíe una señal por el pin 23, 25, 27 o 29 (ver *Figura 3.39*) hacia el microcontrolador para detener el motor acoplado al tornillo sin fin correspondiente a cada soporte. Fue agregado un *switch* central encendido/apagado como seguridad en cada soporte que deberá ser activado manualmente por el operario para lograr hacer uso de los interruptores mencionados durante el proceso de elevación y plegado.

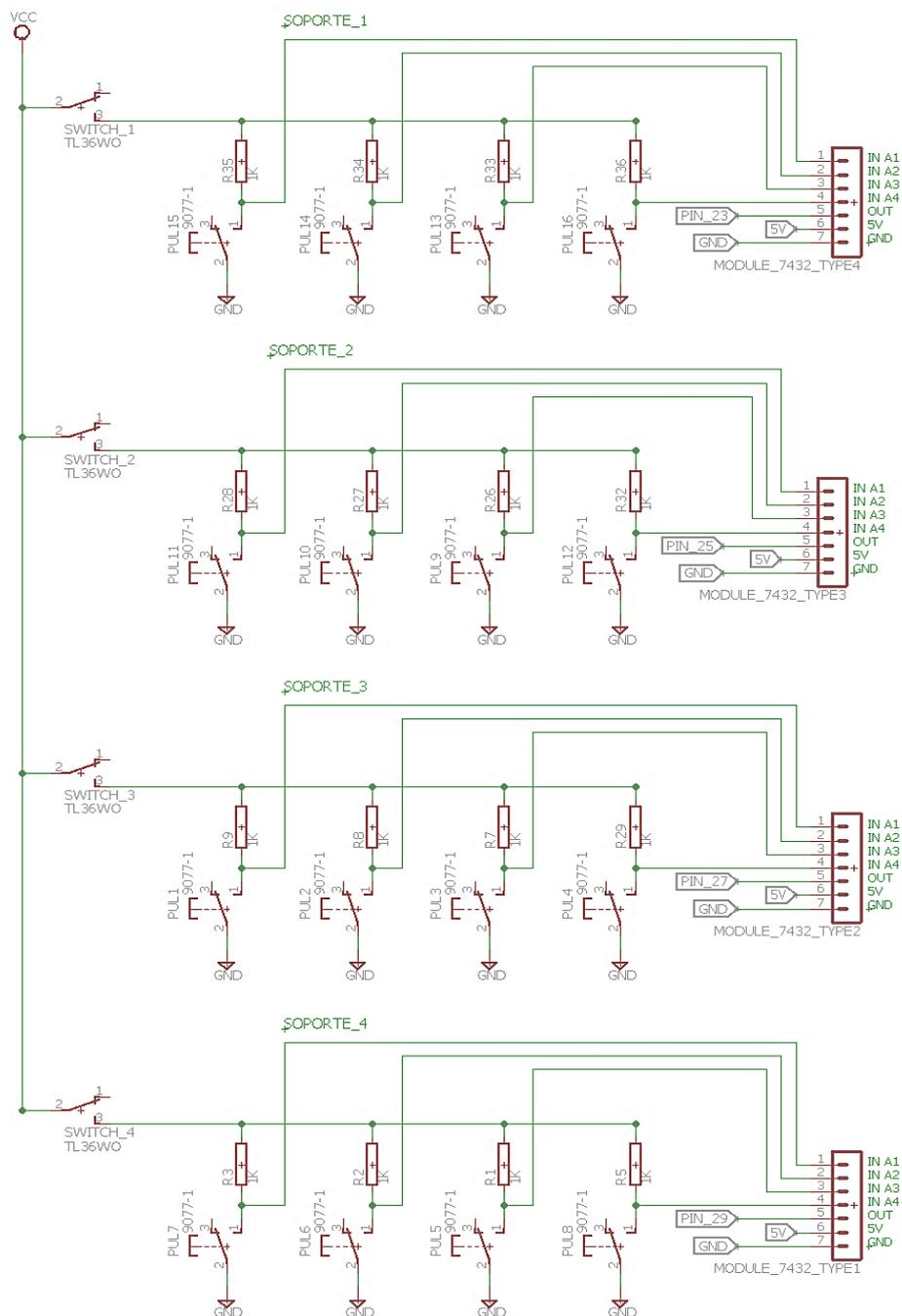


Figura 3.39. Distribución y conexión de Interruptores para los cuatro soportes.

- Grupo 9:** Se presenta un arreglo de cuatro diodos láser con sus respectivas resistencias pull-up, así como los cuatro led láser indicadores de color rojo. Todos dependen de la activación del mismo switch encendido/ apagado instalados en cada soporte. Este arreglo es alimentado con 5 v provenientes de la fuente (ver *Figura 3.40*).

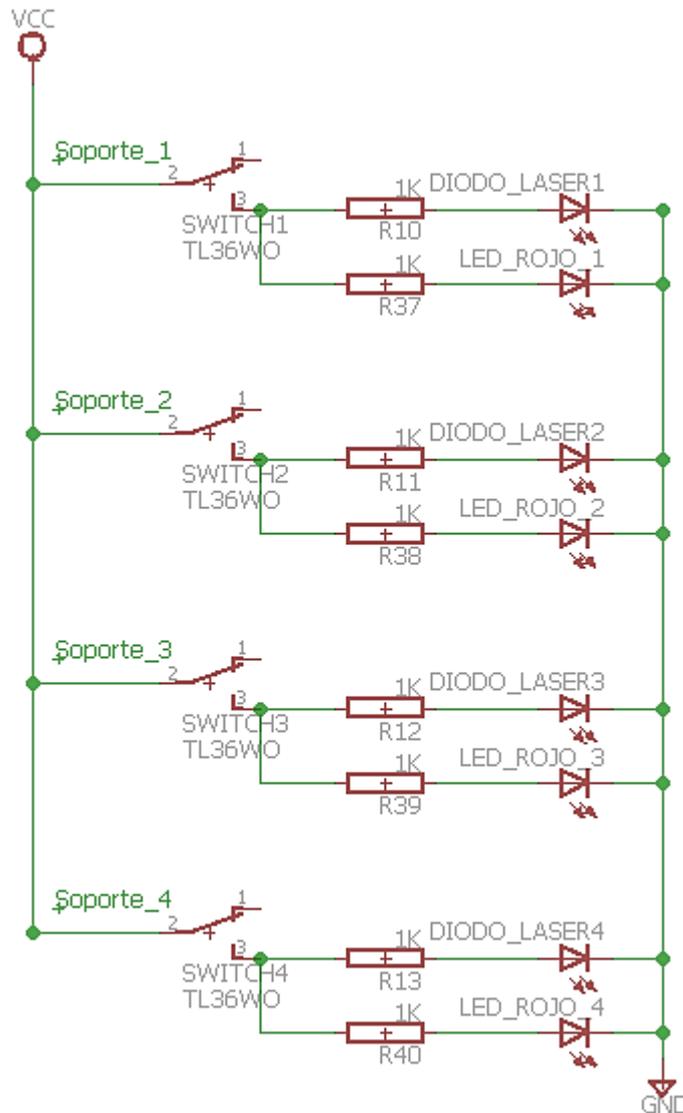


Figura 3.40. Arreglo de diodos en los cuatro soportes.

- Grupo 10:** Está compuesto por los pulsadores de elevación (P5) y plegado (P6) de dos tiempos On/Off ubicados en el panel de control externo de cada soporte. Como se observa en la *Figura 3.41*, cada pulsador es conectado a un pin digital del Arduino. Como fue mencionado anteriormente, éstos pulsadores también dependen del switch encendido/ apagado ubicado en cada soporte.

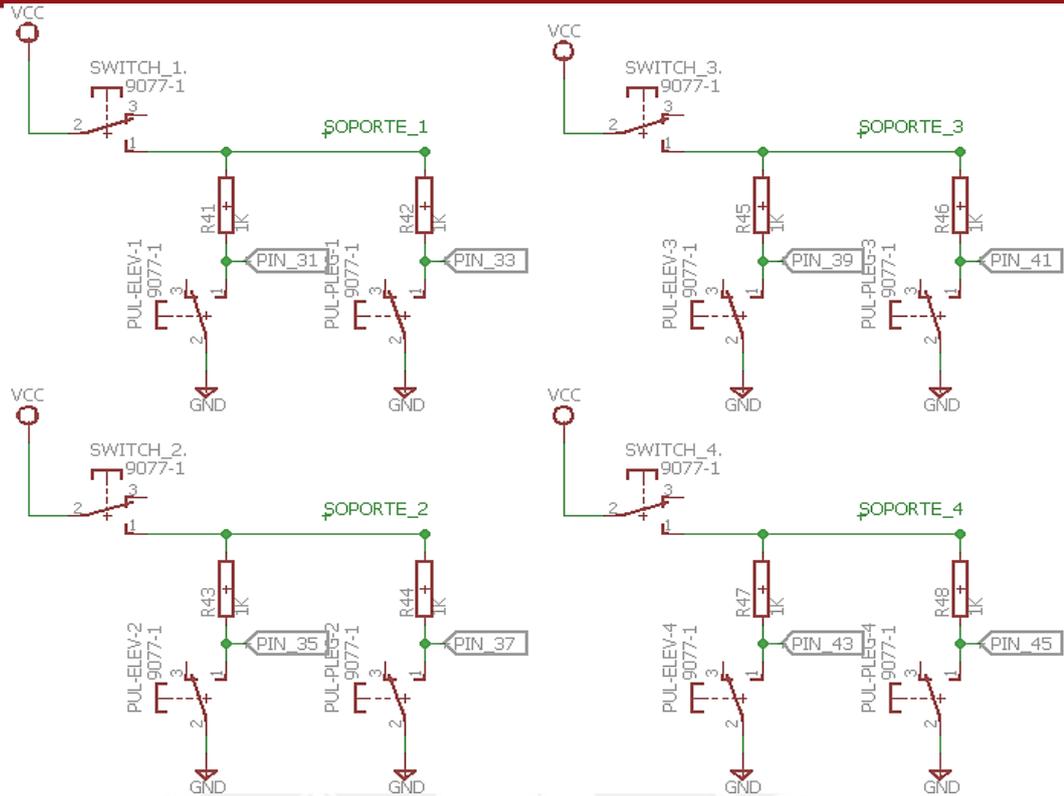


Figura 3.41: Distribución de pulsadores de elevación y plegado.

- Grupo 11:** Se compone de cuatro módulos que integran el puente H para controlar el giro del motor acoplado al tornillo sin fin. Sus entradas corresponden a los pines del Arduino (ver Figura 3.42) y sus salidas a los motores ubicados en cada soporte. El objetivo es girar el motor en un sentido u otro dependiendo de la activación del pulsador de elevación o plegado. De igual manera, detener el movimiento de giro si es detectada la activación de alguno de los Interruptores P1, P2, P3 o P4.

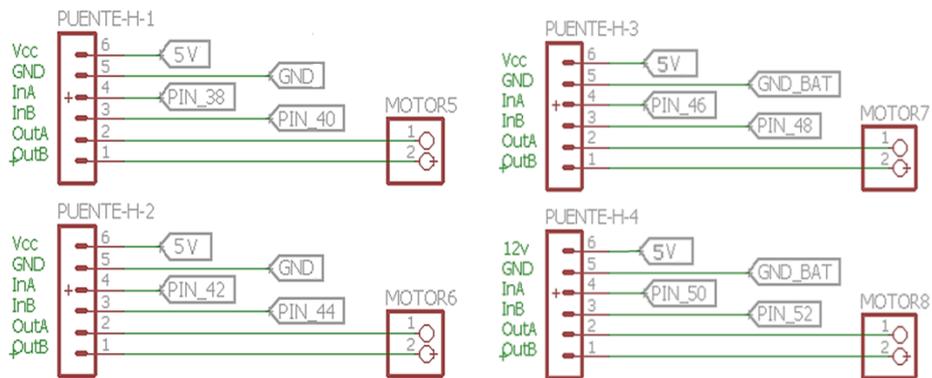


Figura 3.42: Conexión de los módulos del Puente H para cada soporte.

3.1.4 Diseño mecánico

Se inicia con la descripción del diseño mediante algunas piezas principales y su ubicación. Luego, se presenta los principales planos de despiece. El diseño mecánico presentado está compuesto de piezas y ensambles principales que fueron analizados mediante simulaciones en el programa Autodesk inventor para garantizar que no falle el sistema (ver *Anexo 5*).

3.1.4.1 Descripción del sistema mecánico general

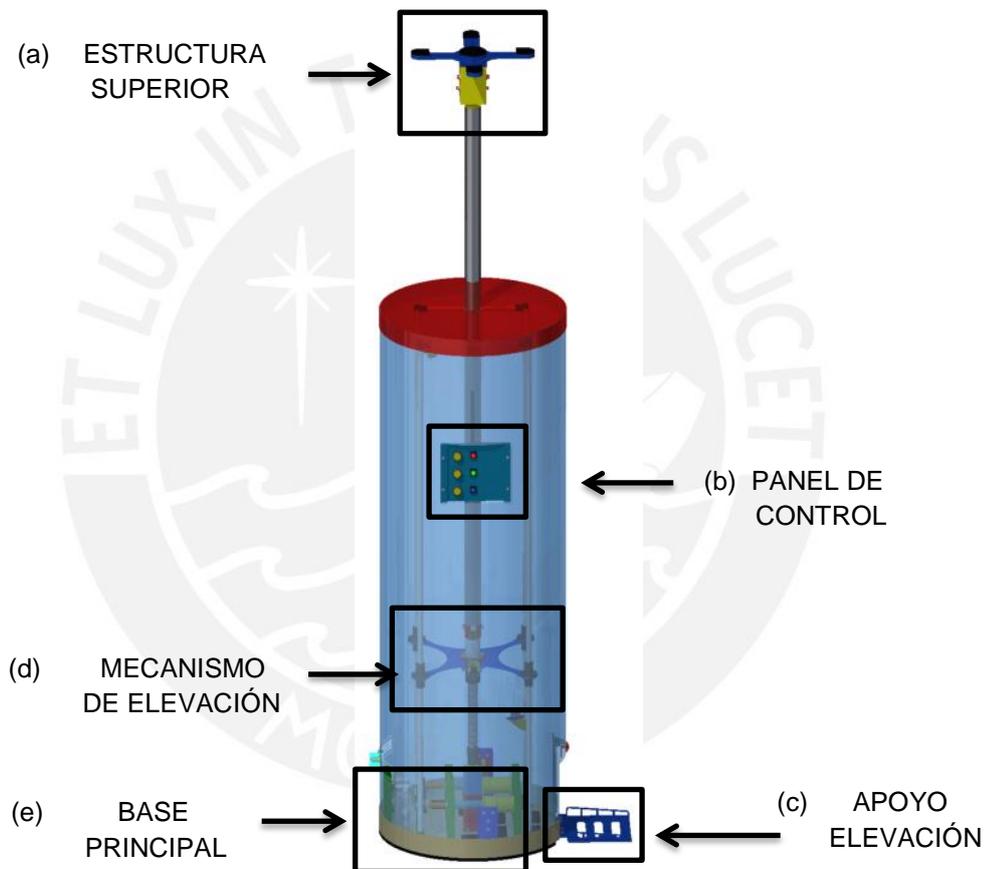


Figura 3.43. Soporte del sistema.

(a) Estructura superior

Cuenta con cinco piezas de caucho de nitrilo en la zona superior, material escogido por sus buenas propiedades mecánicas frente al desgaste, compresión y comportamiento mecánico al que será expuesto durante el proceso de instalación y funcionamiento del sistema. Esta estructura, además, presenta 3 ejes-poleas con sus respectivos rodamientos y un par de rodillos (ver *Figura 3.44*). La polea en el

extremo izquierdo está en contacto directo con el cable de datos y las dos poleas restantes con la cuerda de carga. Los rodillos son ubicados a las afueras del agujero por donde salen el cable de datos y cuerda y son empleados para minimizar el rozamiento entre estos elementos con la superficie de contacto durante la acción de enrollar y desenrollarlos.

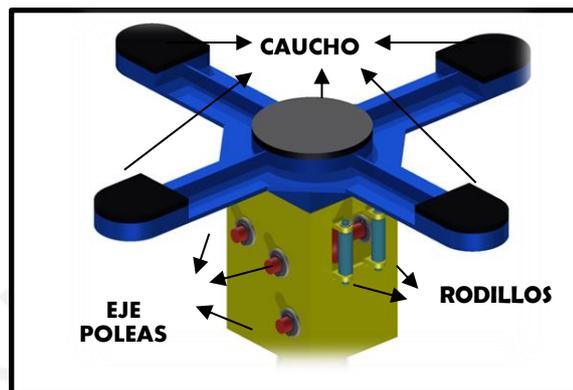


Figura 3.44. Estructura superior del soporte.

(b) Panel de control

Uso directo por el usuario y se ubican los tres pulsadores On/Off de control para cada soporte: encendido, elevación de soporte y plegado de soporte (ver Figura 3.45).



Figura 3.45. Panel de control ubicado en cada soporte.

(c) Apoyo elevación

Cuenta con un par de bisagras y un pin que sirve como seguro en la etapa de guardado de cada soporte, esta pieza se pliega en una cavidad hecha en la carcasa general (ver Figura 3.46). Esta pieza es utilizada como apoyo durante el ajuste de altura (elevación), el usuario ubica el pie sobre dicha pieza para evitar volcadura del soporte durante el proceso de elevación.

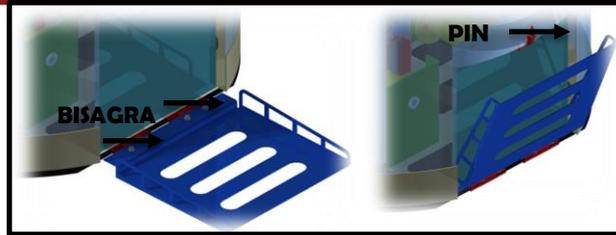


Figura 3.46. Apoyo para la elevación del soporte.

(d) Unidad de elevación

Compuesto de cuatro tubos guía y un tornillo sin fin central de 18 mm de diámetro, acoplados a la pieza en “x” mediante rodamientos lineales y de bolas, respectivamente. La pieza en “x” se encarga de elevar todos los elementos relacionados con la acción de “elevar” y “plegar” soporte. Se observa dos juegos de poleas-rodillos dispuestos como se observa en la *Figura 3.47*. Un juego contribuye al desplazamiento de la cuerda de carga y el otro al cable de datos. Entre cada dos rodillos se aprecia un agujero por el cual ingresa la cuerda o cable de datos al interior del tubo intermedio.

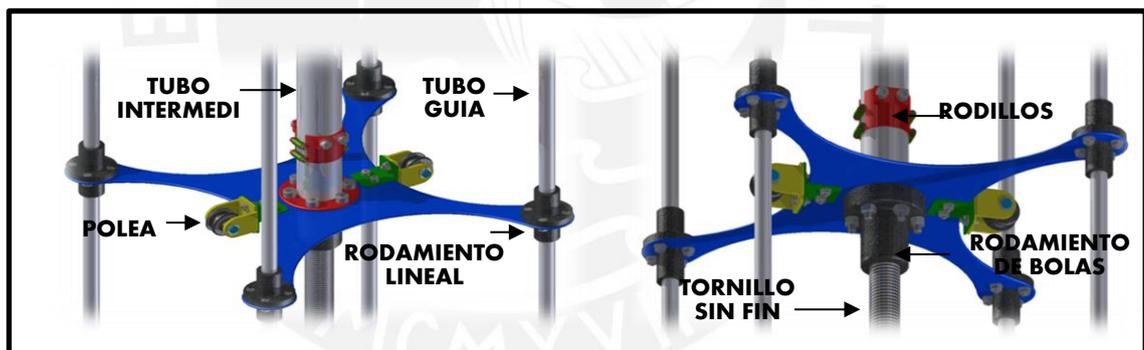


Figura 3.47. Unidad de Elevación.

(e) Base principal

La base del sistema consiste en una plancha de aluminio de 2 mm de espesor y es una superficie circular de radio 164 mm, cuenta con una abertura en un extremo para facilitar el plegado de la pieza “Apoyo de elevación” (ver *Figura 3.48*).

Alrededor de la base se cuenta con una pared delgada con agujeros para acoplarla mediante tornillos a la carcasa principal del soporte.

Sobre la superficie horizontal se cuenta con agujeros para las uniones atornilladas correspondientes a las estructuras de los dos motores que se usarán: Un motor

encargado del giro del tornillo sin fin, ubicado en la zona central de la base (ver *Figura 3.48*) y un segundo motor encargado del movimiento de dos cabrestantes, transmitido mediante una faja: cabrestante para cable de datos y cuerda de carga. Los cabrestantes cuentan con un mecanismo compuesto por las siguientes piezas:

- Un eje sin fin de envolvente doble (barrena)
- Carrete que acoge el cable de datos o cuerda
- Un rodamiento rígido de bolas ubicado en un extremo de la barrena que permite el libre giro con menor fricción y, por lo tanto, desgaste de la barrena y soporte al cual va acoplado
- Un acople para el eje del motor y de la barrena ya que presentan diámetros distintos

El mecanismo de cabrestantes combinado con la barrena resulta eficiente para el enrollado de cables o cuerdas. La barrena se encarga del avance y retorno constante del cabrestante en el eje horizontal, de modo que el cabrestante envuelva de forma uniforme la cuerda o cable, evitando la probabilidad de enredos durante los giros horarios y antihorarios, necesarios para el desplazamiento de la carga en el espacio de trabajo.

Las poleas y rodillos aseguran la menor fricción entre la cuerda o cables con las piezas que atraviesan.

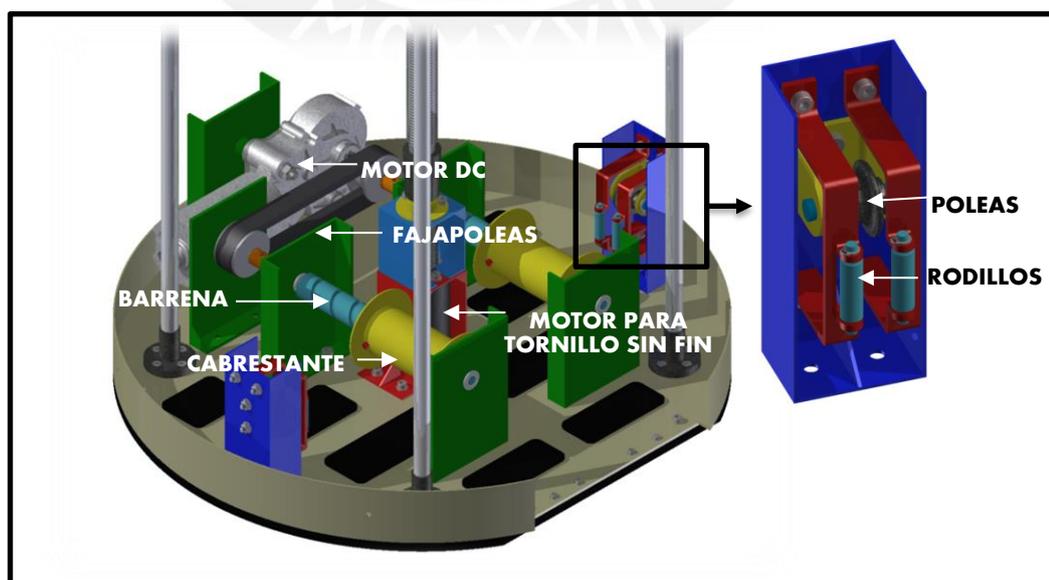


Figura 3.48. Base principal y elementos principales en cada soporte

El carrete de datos debe asegurar que los cables unidos a los componentes electrónicos no se desconecten o arranchen durante el giro y movimiento del carrete. Por este motivo se emplea una junta eléctrica rotativa comercial. La junta eléctrica o colector eléctrico (ver *Figura 3.49*) sirve como unión móvil entre dos componentes que se mueven uno respecto del otro haciendo posible la transmisión de datos mediante cables, fue escogida porque presenta una baja resistencia eléctrica, perturbaciones eléctricas reducidas y bajo desgaste mecánico. El modelo elegido es SRH 1254 por motivos de tamaño, ya que presenta como agujero interno de hasta 12,7 mm y diámetro externo de hasta 54 mm, dimensiones que se ajustan al diseño del soporte al cual va acoplado y al eje de la barrena la cual será acoplada al interior de dicho colector (ver *Tabla 3.15*).

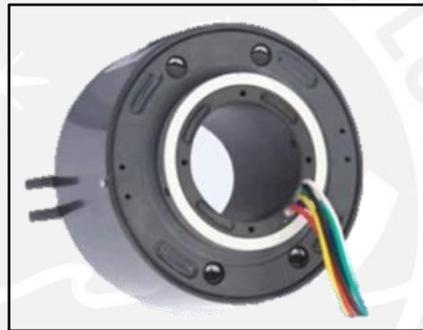


Figura 3.49: Colector eléctrico rotativo. Fuente: JKE Robotics

Tabla 3.15. Especificaciones técnicas del colector rotativo. Fuente: JKE Robotics

Características Técnicas	
Número de circuitos	6, 12, 18 y 24
Corriente	5 A
Voltaje	Hasta 240 VAC
Fuerza dieléctrica	500 Vac a 60Hz a
Resistencia aislante	> 500MΩ / 500 VDC
Resistencia Dinámica Contacto	<0,01Ω
Velocidad Nominal	Hasta mayores de 600 rpm
Rodamientos	Acero

Por lo tanto, el colector mencionado permite que uno de sus discos internos permanezca fijo mientras el otro gira sincronizadamente con la barrena, asegurando, en todo momento, el contacto y transmisión de datos. Del disco móvil salen los cables

(trenzados entre sí) los cuales son enrollados en el carrete, éstos no deben ser tensionados para evitar su desconexión, motivo por el cual presentan cierta soltura. Del disco fijo salen cables que son conectados a los dispositivos electrónicos. La junta rotativa actúa como rodamiento para un extremo del eje de la barrena que encaja en el agujero del colector (ver *Figura 3.50*).

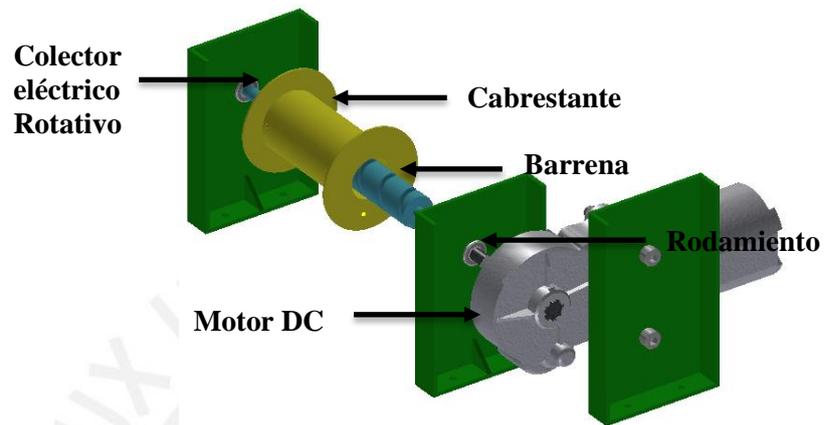


Figura 3.50: Ubicación del colector y barrena.

3.1.4.2 Descripción de sub-ensambles y piezas principales

3.1.4.2.1 Ensamble General

La vista isométrica del sistema se muestra en la *Figura 3.51*. Las dimensiones máximas para ubicar los cuatro soportes es un área de 16 m^2 . Los cuatro soportes mostrados tienen el mismo diseño, la mayoría de piezas son fabricadas de aluminio 6061 debido a la característica de densidad del material que aligera el peso.

Hay un soporte central que suministra energía al resto, de modo que en su interior será ubicada una fuente de energía.

Algunos elementos *standard* como rodamientos y anillos de seguridad para ejes son de acero. La carcasa, tapa de los soportes y pieza cilíndrica del manipulador son hechos de plástico, de modo que aliviane peso en el sistema. En el caso de la carcasa del soporte se usan tubos de PVC con dimensiones estándar de 160 mm de diámetro con espesor de 4 mm.

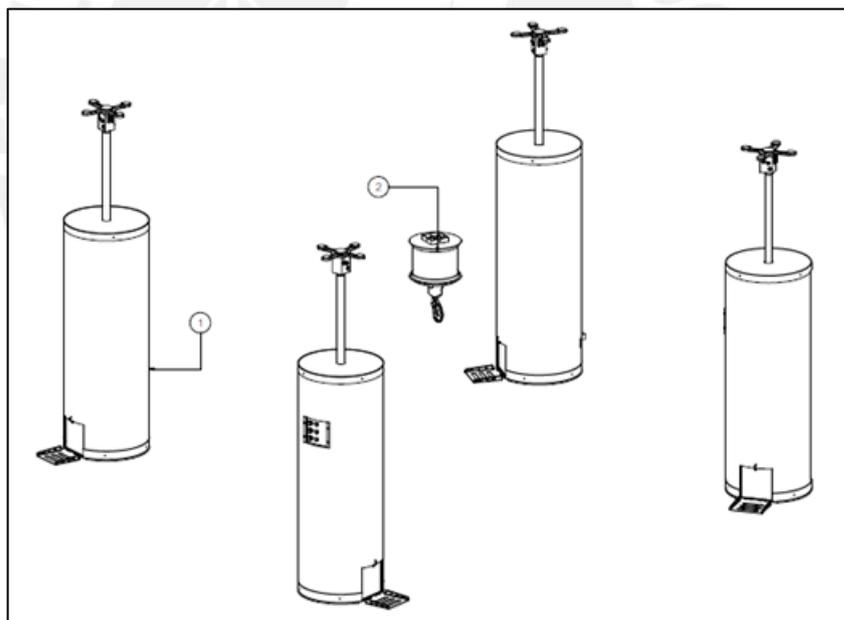


Figura 3.51. Vista isométrica de instalación del sistema mecatrónico.

3.1.4.2.2 Ensamble del Soporte

El ensamble del soporte es mostrado en la *Figura 3.52*, en su mayoría, emplea uniones atornilladas, en caso de tuercas se emplea la norma ISO 4032, para los tornillos ISO 4762 y arandelas DIN 125 (ver *Figura 3.51* Detalle A-A); elementos escogidos por lo comercial en el mercado. Como se observa, está compuesto por cuatro subensambles: El ensamble de la base se acopla al de la carcasa mediante

tonillos M3, al igual que la tapa superior (7). La estructura de tubos (2), la cual está al interior del soporte, se acopla a la base mediante uniones roscadas (a través de cuatro piezas con rosca interior).

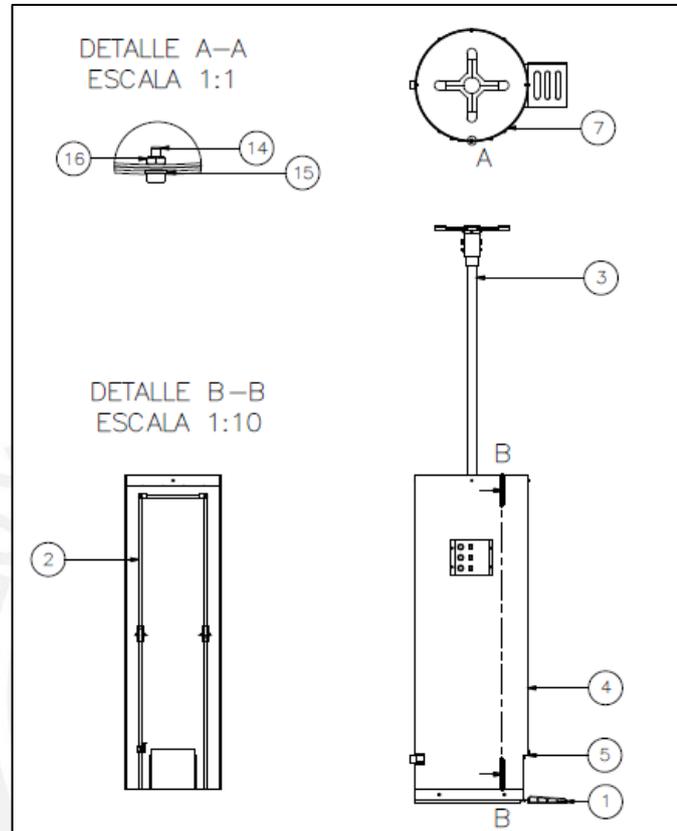


Figura 3.52. Vista frontal y superior de un soporte.

3.1.4.2.3 Ensamble Central

Este subensamble es el responsable del ajuste de altura del sistema, es decir, todas las piezas mostradas en la *Figura 3.53* se desplazan en la vertical. El desplazamiento se realiza con el apoyo de los rodamientos lineales (1); éstos se deslizan a través de la estructura de tubos los cuales sirven como guía a la pieza “x” (3). El movimiento es impulsado por el giro del tornillo sin fin que es transmitido mediante un rodamiento de bolas o husillo roscado (2) de la marca NEFF (ver *Anexo 6*).

La pieza “x” se acopla al ensamble de tubos mediante una pieza fabricada denominada junta tubo (4). Dicha pieza presenta nervios para evitar que falle por el esfuerzo generado al elevar la carga; se emplea tornillos M5 para acoplarla con la pieza “x”, los mismos utilizados para el acople con el husillo roscado NEFF (2).

Mediante una unión roscada el ensamble caja polea (13) se acopla al ensamble de tubos de elevación (12).

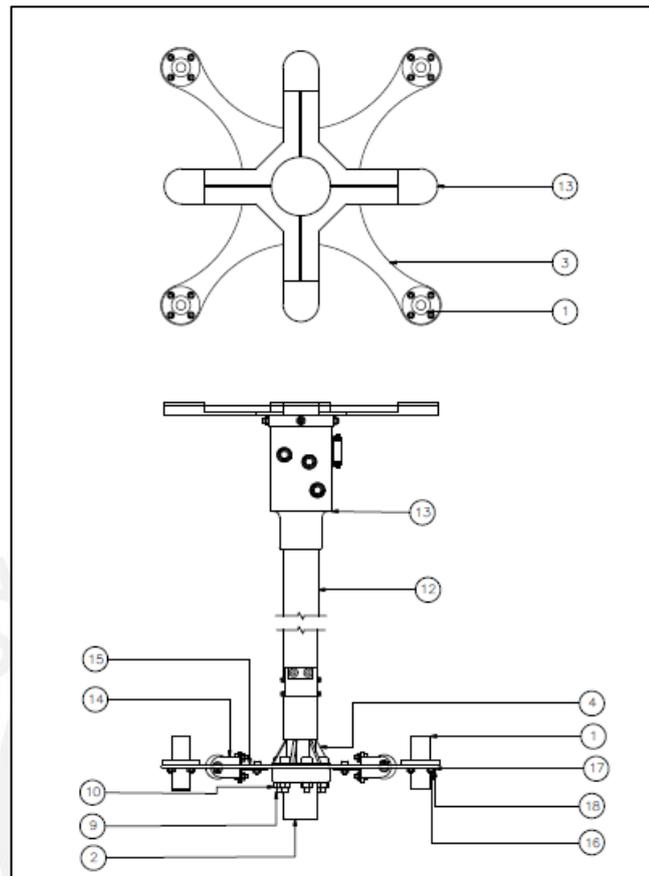


Figura 3.53. Ensamble central del soporte.

3.1.4.2.4 Ensamble de la base

En la vista superior, mostrada en la *Figura 3.54*, se observa la disposición simétrica de los elementos principales: mecanismo de cabrestantes (17 y 18), posición del motor para elevar la carga y subensambles compuestos de rodillos y poleas (8), este último, como se mencionó, son utilizados para el deslizamiento con menor fricción entre la cuerda y cable con las superficies a las cuales atraviesa.

En la vista lateral, se observa los soportes del motor encargado del giro del tornillo sin fin, ubicado en la zona central (3), así mismo, éste se encuentra acoplado al ensamble de tubos de elevación (2) mediante una pieza fabricada que acoge, en un extremo, al eje del tornillo sin fin y, por el otro, a la extensión del eje de su motor.

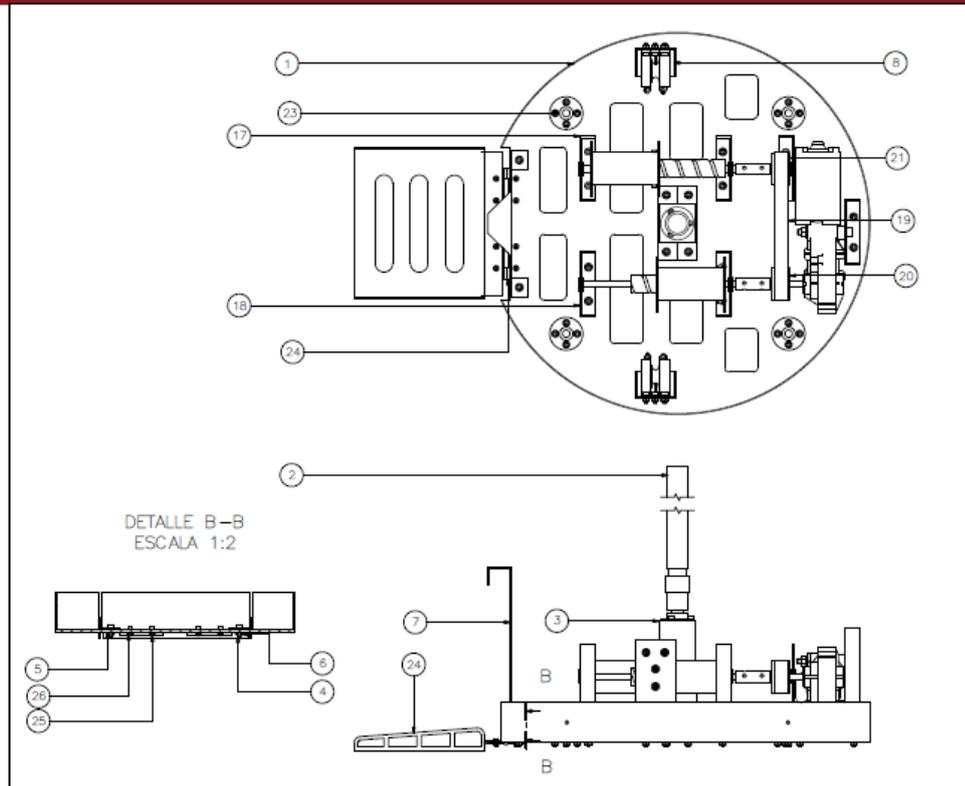


Figura 3.54. Ensamble de la base de los soportes.

3.1.4.2.5 Ensamble manipulador

El tamaño del manipulador fue dimensionado de acuerdo a parámetros de ergonomía según la norma Norma DIN 33.402 segunda parte [17], de modo que las dimensiones del cilindro, pieza donde van puestos los sensores, son máximas dimensiones de la mano según dicha norma.

Al interior de este ensamble se ubica algunos elementos electrónicos como el microcontrolador. Como se muestra en la *Figura 3.55*, la pieza cilíndrica es de plástico PVC que actúa como carcasa y no está sometida a esfuerzo, esta pieza es atravesada por una pieza de aluminio (1), la cual, por su extremo superior se acoplan las cuerdas de carga y de cables de datos mediante unos agujeros y, por el otro extremo, está sujeto el gancho que se adhiere directamente al objeto o carga a desplazar. En este ensamble, todas las piezas son unidas mediante tornillos M3.

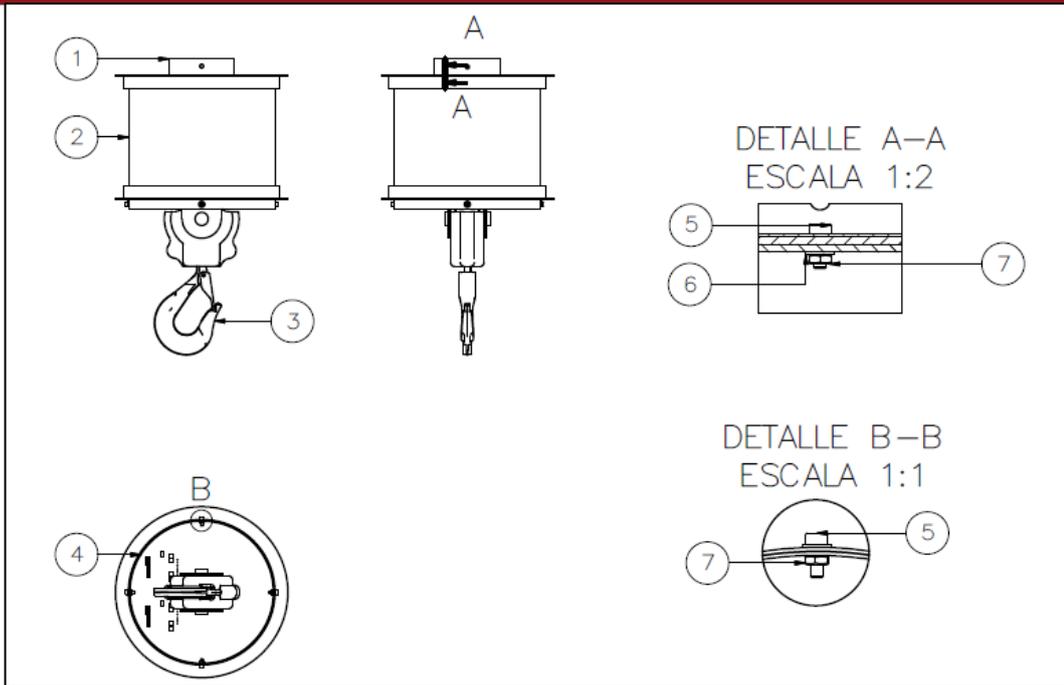
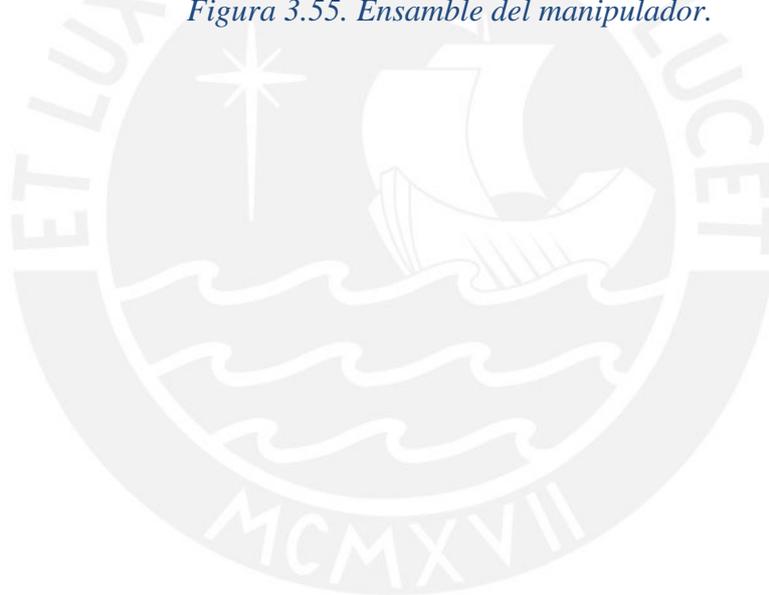


Figura 3.55. Ensamble del manipulador.



3.1.5 Diseño de control

3.1.5.1 Diagrama de flujo general

El primer paso para el funcionamiento del sistema es la conexión a la fuente de corriente alterna proveniente de enchufar el sistema a un tomacorriente común. Se activa el botón de encendido general ubicado en la superficie superior del manipulador y, a continuación, se inicia con el programa general, el cual empieza con la verificación de instalación de los cuatro soportes. Una vez culminada esta tarea, se asegura de bloquear todo Interruptor relacionado con el ajuste de altura para evitar fallas como presionar pulsador de plegado durante el desplazamiento de la carga.

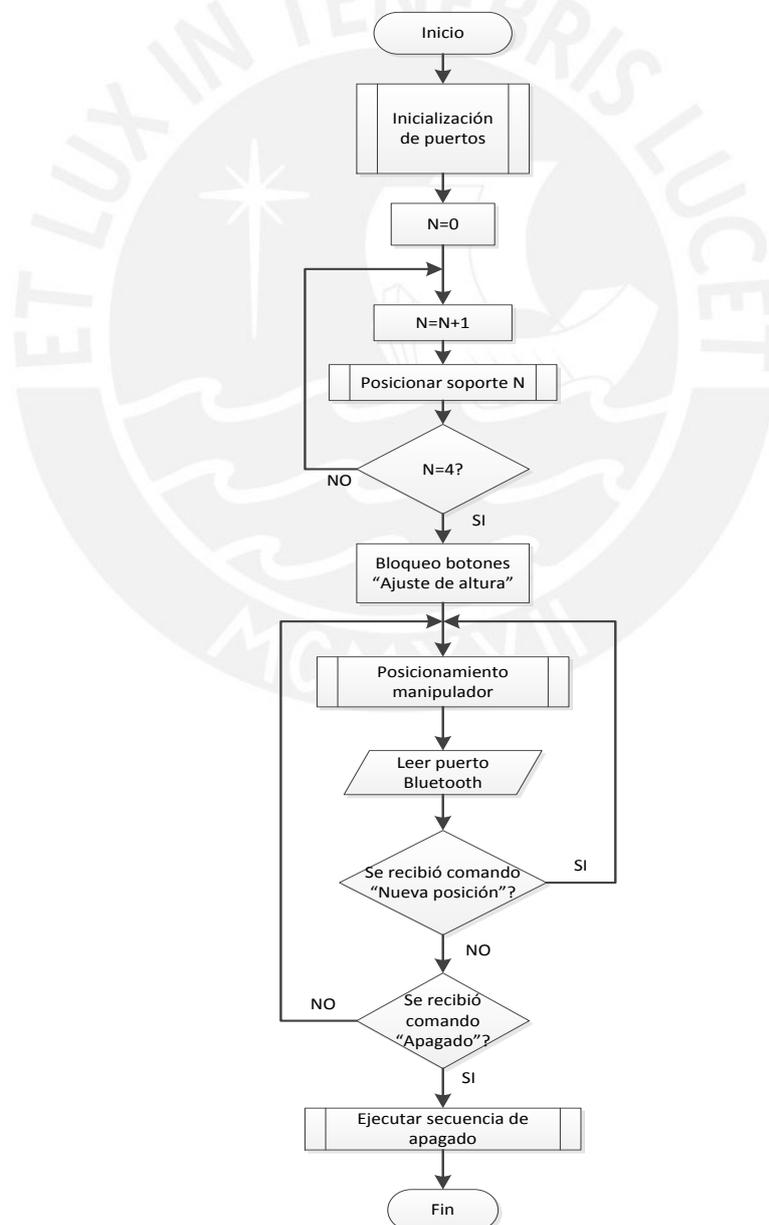


Figura 3.56. Diagrama de flujo del programa principal.

Como es visto en la Figura 3.56, en seguida se encuentra disponible la aplicación de Tablet para el posicionamiento de la carga. Culminado este subprograma, se tiene otra opción relacionada con una nueva posición del manipulador o apagar el sistema para dejar de usarlo y/o guardarlo.

3.1.5.2 Subprograma “Posicionar soporte”

Cada soporte cuenta con cuatro Interruptores fin de carrera (ubicados en el interior de cada soporte), dos Pulsadores On/Off (accesibles y destinados al usuario) y tres leds indicadores (usuario):

- **Interruptor 1 (P1) y 2 (P2):** P1 instalado en la pieza superior del sistema y P2, ubicado en una pieza intermedia. Son empleados para limitar la altura máxima de los soportes, es decir, solo intervienen durante la opción “Elevación del soporte”. Al activarse alguno de los Interruptores, se detiene el giro del motor (acoplado al tornillo sin fin) y encendido del led verde.
- **Interruptor 3 (P3) y 4 (P4):** Ambos instalados en la pieza inferior de cada soporte. Su función es delimitar el plegado del sistema, de modo que al ser activado alguno de ellos, el motor acoplado al tornillo sin fin deje de girar.
- **Elevación del soporte:** Cuenta con pulsador (P5) destinado al uso directo del usuario para la activación de la opción de “Elevación del soporte”. Un led indicador color verde se mantiene encendido mientras el soporte adquiere la altura adecuada mediante el giro del motor acoplado al tornillo sin fin, es decir hasta que uno de los Interruptores P1 o P2 sea activado.
- **Plegado del soporte:** Cuenta con pulsador (P6) destinado al uso directo del usuario para la activación de la opción de “Plegado del soporte”. Un led indicador color azul se mantiene encendido durante el plegado del soporte. Cabe mencionar que el plegado del soporte también está a cargo del motor unido al tornillo sin fin y el giro que desarrolla es en sentido opuesto a la opción de “Elevación del soporte”.
- **Switch de encendido/ apagado:** Cada soporte cuenta con un *switch* para su encendido/ apagado y un led indicador rojo correspondiente al encendido. El *switch* y led son ubicados en lo exterior del sistema (cada soporte) y visible al usuario. La activación del *switch* en cada soporte permite energizar los circuitos

correspondientes a los Interruptores P1, P2, P3, P4 y pulsadores P5 y P6, el motor acoplado al tornillo sin fin, y el diodo láser que se activará al instante en que el *switch* este en ON (encendido). Cabe recordar, que este diodo sirve solo como guía para posicionar un soporte respecto al otro y se mantiene encendido en todo momento hasta que el *switch* sea puesto en OFF (apagado).

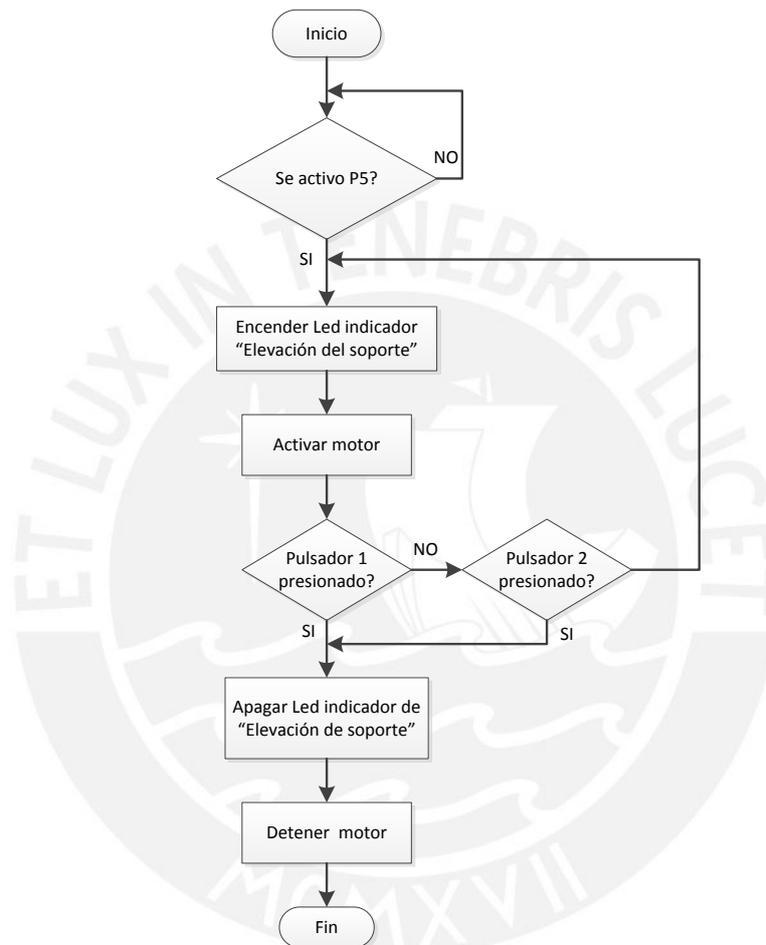


Figura 3.57. Diagrama de flujo del Subprograma "Ajuste de posición".

El resultado es cuatro soportes con suficiente presión entre las superficies de apoyo (piso y techo) de la habitación en la que fue instalado el sistema. La presión necesaria entre soporte y superficies, se obtiene con ayuda de la programación; de modo que, al ser activado el P1, el motor aun gira un número de vueltas hasta lograr la presión necesaria deseada, en este caso, dos revoluciones que equivalen a 6.6mm de desplazamiento vertical (tornillo sin fin con paso de 2mm). Este giro extra no afecta a la estructura debido a que la presión es ejercida en el jebe instalado en la pieza superior. Cabe resaltar, que el P2, instalado en cada soporte, sirve como

protección al sistema, es decir, al activarse, el sistema no puede alcanzar mayor altura, ya que se encuentra al límite.

El programa de “Posicionar soporte” (ver *Figura 3.57*) se inicia al ser presionado el *switch* de encendido/apago instalado en cada soporte, este permite habilitar el uso de los Interruptores y leds indicadores descritos anteriormente.

3.1.5.3 Subprograma “Posicionamiento Manipulador”

La aplicación permite indicar la posición final del efector, en qué lugar el usuario desea ubicar la carga. Una vez indicada y confirmada dicha posición, la plataforma se mueve y dirige al punto especificado. Se presenta la opción de ajuste de posición “Sintonía Fina” para que el operario mueva la carga pequeños desplazamientos mediante la aplicación, pero en tiempo real (en simultáneo) hasta lograr la posición exacta deseada.

Se propone una segunda opción para el logro del desplazamiento de la carga, mediante el sensor resistivo de fuerza instalado en el efector. El efector cuenta con una distribución de sensores de fuerza en forma de tiras en toda su superficie, de modo que la activación de uno de ellos será interpretada por el programa como un deseo de movimiento en dirección opuesta a la ubicación del sensor. Como resultado, se obtiene el desplazamiento de la carga sin ningún esfuerzo en la dirección proporcionada por el sensor.

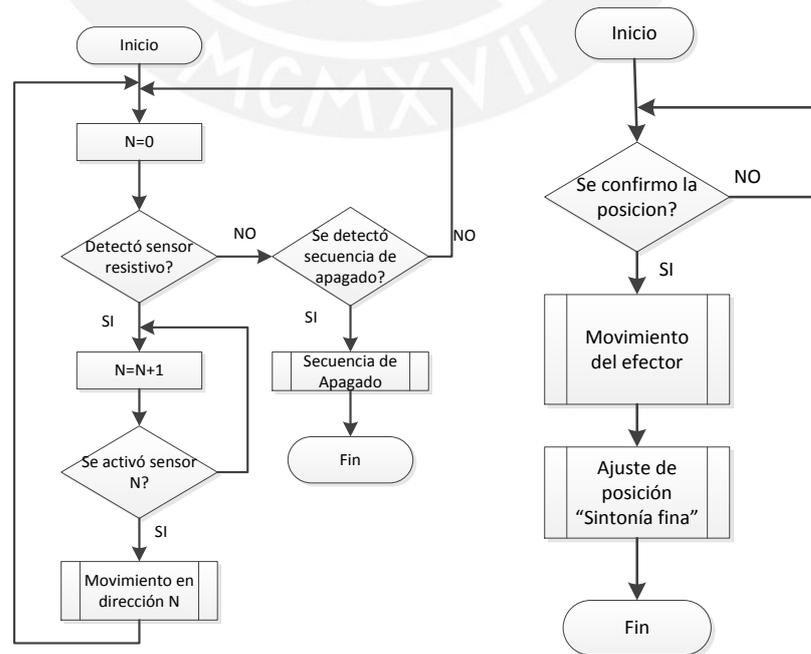


Figura 3.58. Diagrama de flujo del Subprograma “Posicionamiento manipulador”

3.1.5.4 Subprograma “Secuencia de apagado”

El programa requiere la confirmación del usuario relacionada a la desinstalación de las cuerdas con respecto a la plataforma, con el objetivo de que los motores se retraigan libremente hasta plegar totalmente la cuerda sobre cada soporte (posición inicial). En el programa inicial, se desactivaron todos los pulsadores relacionados con el “Ajuste de altura”, en esta sección del programa son reactivados para el uso del pulsador P6 correspondiente al “Plegado del soporte” (ver *Figura 3.59*).

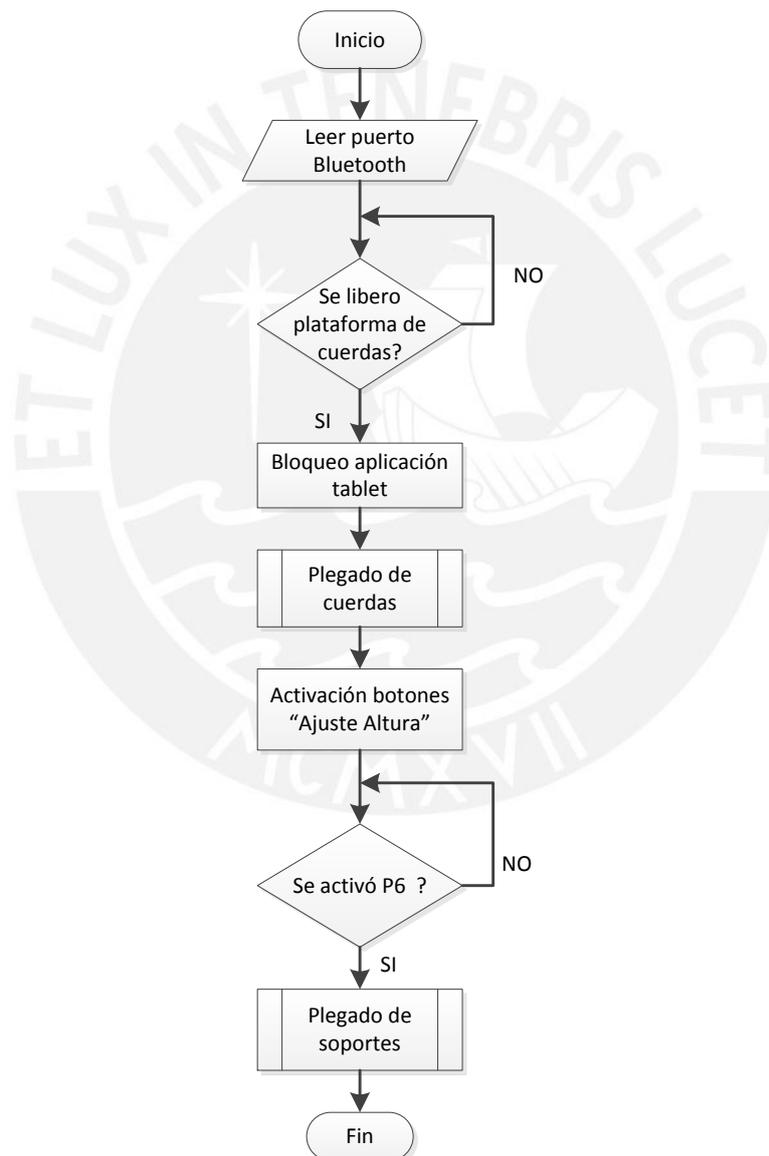


Figura 3.59. Diagrama de flujo del Subprograma “Secuencia de apagado”

3.1.5.5 Programa de control

3.1.5.5.1 Algoritmo de control

Se empleará un lazo de control cerrado ya que cuenta con realimentación de la velocidad de los motores, información obtenida de los *encoders*. La información de la velocidad sensada por los *encoders* es utilizada por el *driver* y el microcontrolador para control del motor que está acoplado a los cabrestantes, es decir, el control del motor influye directamente en la velocidad con que los cables mueven la carga. Se presenta el diagrama de bloques general del control de motor en la *Figura 3.60*.

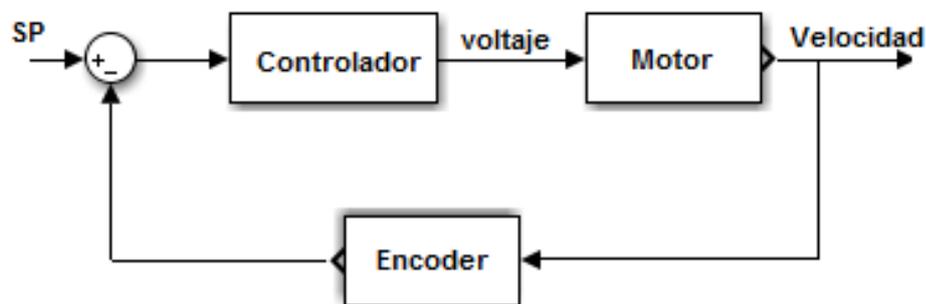


Figura 3.60. Diagrama de bloques del control de motor DC.

El uso del Roboclaw facilita el desarrollo de una estrategia de control debido a que integra un PID. El algoritmo del control PID consiste de tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo [18]. Las constantes, para este caso, deben ser encontradas según los parámetros del motor a emplear, de modo experimental.

En este caso se desea controlar que la velocidad del motor DC sea constante; para ello, la función de transferencia relaciona el voltaje como entrada y la velocidad angular como salida, según la siguiente función:

$$\frac{\Theta_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{s[(J_m s + b)(L_a s + R_a) + K_t K_e]}$$

Donde:

Θ_m : Velocidad angular

V_a : Voltaje del motor

$K_t, J_m, b, L_a, R_a, K_e$: Parámetros del motor

Debido a que no se cuenta con el motor en físico para el cálculo de sus parámetros utilizados en el control PID, se considera, a modo de ejemplo, un modelo de motor DC con los parámetros mostrados en la *Tabla 3.16*, los cuales ayudarán en la simulación para calcular dichas constantes. El procedimiento es el mismo para cualquier motor DC, el cambio recae en los parámetros del motor que proveen otra función de transferencia.

Tabla 3.16. Parámetros de un motor DC [19]

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Resistencia de armadura	Rm	Ω	6.14
Constante eléctrica	Ke	Vs/rad	0.04913
Constante mecánica	Km	N-m/A	0.04913
Coefficiente de fricción	B	u(Nm-s)/rad	40.923
Inductancia de armadura	Lm	mH	8.9
Momento de inercia	J+Jt	uKgm ²	7.95

3.1.5.5.2 Simulación del Algoritmo

Haciendo uso del programa Mathlab, Simulink, se simula un control en lazo cerrado con ganancia 1 (ver *Figura 3.61*), en el caso real se usará la información del *encoder*. La finalidad es encontrar los parámetros PID ingresados en el Roboclaw de modo que se alcance la velocidad requerida con mínimos sobreimpulsos y en un corto tiempo.

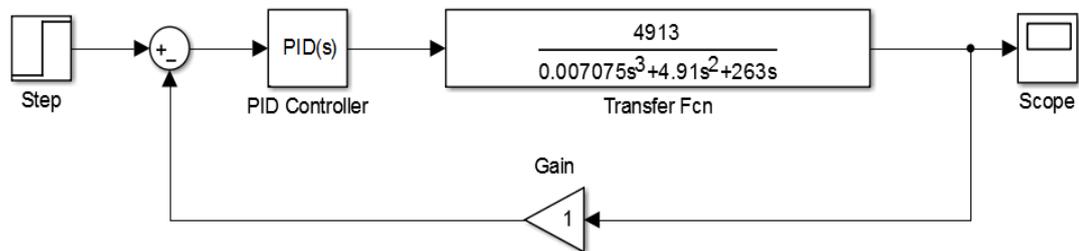


Figura 3.61. Diagrama de bloques general del control de un motor.

Con el objetivo de conseguir un control coherente a los requerimientos mencionados anteriormente, se probaron valores para el controlador PID, con una entrada tipo escalón. Los parámetros del controlador se muestran en la *Figura 3.62*.

Controller parameters	
Proportional (P):	<input type="text" value="3"/>
Integral (I):	<input type="text" value="8.5"/>
Derivative (D):	<input type="text" value="0.04"/>
Filter coefficient (N):	<input type="text" value="205"/>

Figura 3.62. Parámetros PID para el Roboclaw.

El resultado de la simulación, empleando los parámetros, fue una curva con sobre impulso de 4.3 % y en un tiempo de estabilización corto, menos a un segundo, valores cercanos a los buscados (ver *Figura 3.63*).

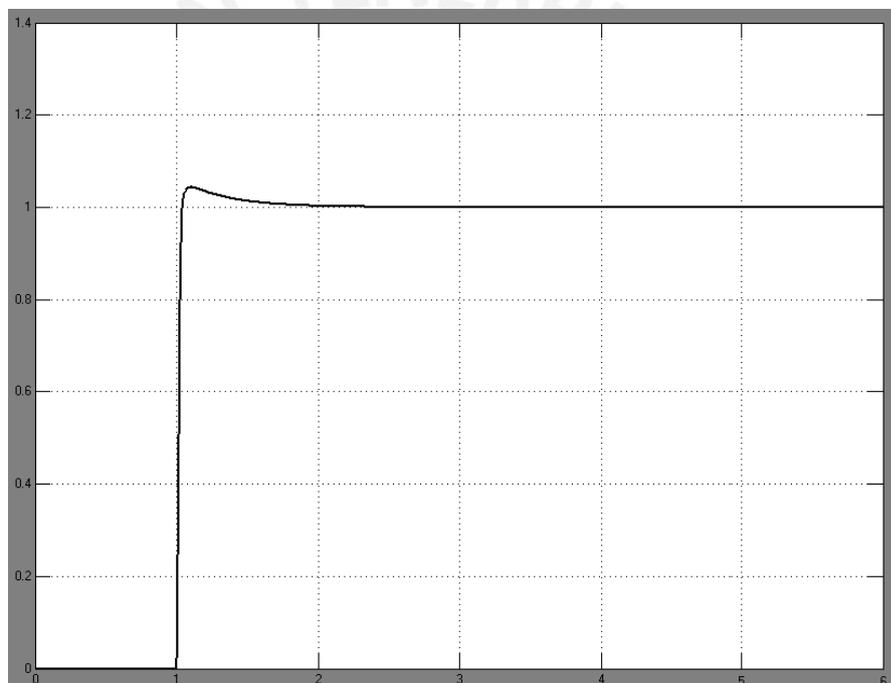


Figura 3.63. Gráfica a la salida del diagrama, velocidad angular del motor DC.

CAPÍTULO 4

4.1 Experimento

Se fabricó una maqueta con la finalidad de simular el principio de funcionamiento del sistema propuesto, en relación al mecanismo general para el alcance de altura.

4.1.1 Objetivos

- Demostrar que el mecanismo de soportes telescópicos desarrollado en el presente documento es una opción viable para evitar volcaduras durante la elevación y desplazamiento de la carga.
- Encontrar posibles dificultades generales durante la instalación y fabricación de los soportes de la maqueta, con la finalidad de considerarlas en el diseño mecánico propuesto.
- Manipular las cuerdas manualmente para simular el desplazamiento de la carga.

4.1.2 Consideraciones

- Se simula los soportes, poleas superiores, cuerdas y manipulador.
- Se utilizó antenas de Tv para simular los cuatro soportes, debido a que su diseño es telescópico, de metal y provee información de un posible diseño para los soportes. El diseño de una antena presenta varios cilindros de metal huecos que se acoplan entre sí mediante dos piezas. Estas piezas presentan un pin que encaja en agujeros realizados en los cilindros, de modo que actúan como obstáculo frente al siguiente cilindro de mayor ángulo acoplado (ver *Figura 4.1*).



Figura 4.1: Modo de acople entre cilindros de una antena de TV.

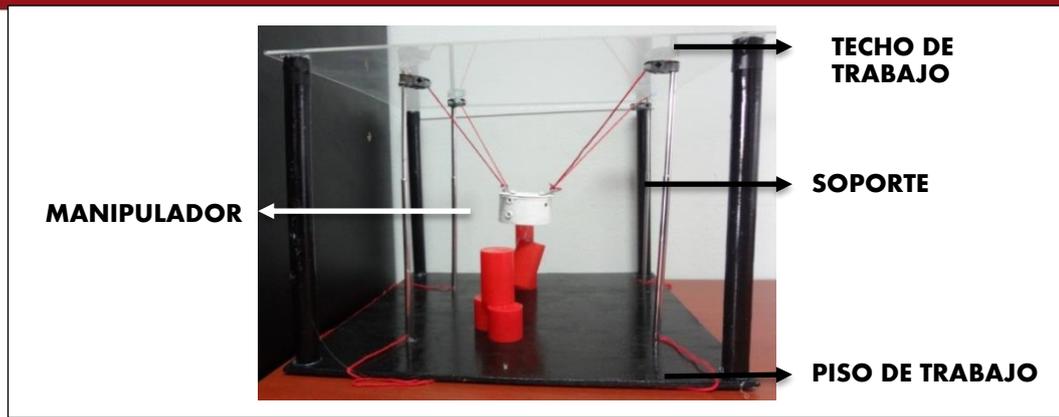


Figura 4.2. Disposición y ubicación de elementos distribuido en el área de trabajo.
 Vista isométrica.

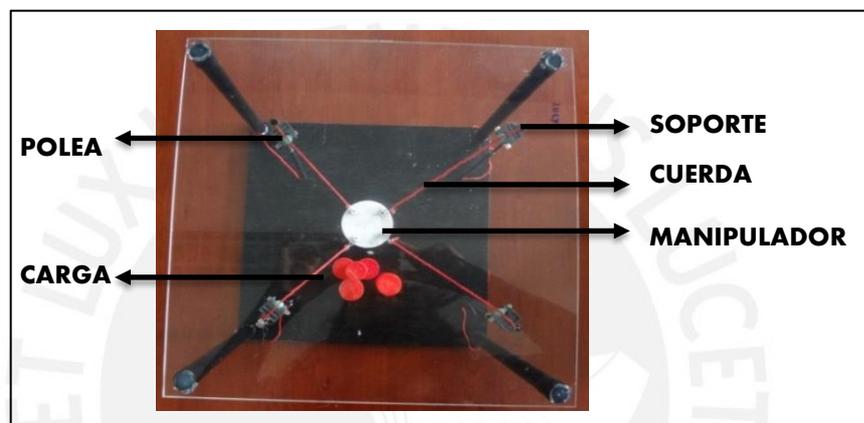


Figura 4.3. Distribución de elementos: Vista superior.

4.1.3 Resultados, observaciones y conclusiones

- Los soportes utilizados tuvieron poca área de contacto con el piso y techo de trabajo, ocasionando volcadura de los mismos durante el proceso de elevación y carga. Debido a ello se considera ventajoso que el soporte cuente con una pieza de mayor área de contacto en los extremos.
- A mayor presión de los soportes entre las superficies de contacto (techo y piso), mayor estabilidad y rigidez.
- El manipulador (ver *Figura 4.2*) presenta cuatro puntos de sujeción con las cuerdas, mientras más alejados estén entre sí, el movimiento de la carga durante el desplazamiento presenta mayor inestabilidad.
- En cada punto de quiebre o doblez de la cuerda se necesita un elemento que amilane el desgaste de la cuerda por contacto, por ello se propone el uso de rodillos o poleas en estas zonas.

CAPÍTULO 5

5.1 PRESUPUESTO

A continuación se presentan los costos implicados en la fabricación del diseño propuesto. La fabricación de los componentes mecánicos fueron cotizados por la empresa STEIN ST TRICES (ver *Anexo 7*) e incluyen el valor de IGV (ver *Tabla 5.1*). En caso de los componentes electrónicos, éstos serán importados de los proveedores mencionados en la *Tabla 5.2* y el precio total incluye los precios de envío.

5.1.1 Componentes mecánicos

Tabla 5.1. Presupuesto de los componentes mecánicos

Componente	Cantidad	Precio Unit. (S/.)	Precio Total (S/.)
Soporte inferior de tubos	4	19	76
Pin Carrete	4	5	20
Carrete	2	35	70
Barrena	2	189	378
Soporte barrena	2	24	48
Soporte motor	2	26	52
Base principal	1	160	160
Pisa	1	35	35
Soporte polea	4	10	40
Eje rodillo 1	4	12	48
Soporte rodillo 1	2	28	56
Soporte rodillo 2	2	28	56
Eje rodillo 2	4	12	48
Soporte motor tornillo sin fin	1	45	45
Soporte rodamiento	1	50	50
Eje 3	1	18	18
Caja para rodamiento	1	45	45
Acople para tornillo sin fin	1	12.8	12.8
Pieza en X	1	95	95
Junta tubo	1	40	40
Unión T	4	22	88
Tubo medio	1	105.4	105.4
Rodillo pequeño	2	22	44
Eje rodillo D4	2	19	38
Anillo rodillo	2	35	70
Tubo superior	1	80	80

Eje poleas	1	15	15
Caja poleas	1	15	15
Contacto superior	1	40	40
Soporte en L	2	45	90
Tubo transversal	4	25	100
Soportes	4	60	240
Arandela plana din 125 - a 2.2	4	0.6	2.4
Arandela plana din 125 - a 3.2	78	0.6	46.8
PERNO ALLEN ISO 4762 - M2 x 6	4	0.6	2.4
PERNO ALLEN ISO 4762 - M3 x 8	78	0.6	46.8
PERNO ALLEN ISO 4762 - M5 x 25	6	0.7	4.2
Tuerca hexagonal iso 4032 - m2	4	0.6	2.4
Tuerca hexagonal iso 4032 - m3	78	0.6	46.8
Tuerca hexagonal iso 4032 - m5	6	0.7	4.2
Subtotal			2474.2
IGV 18%			410.08
Importe total (S/.)			2884.28

5.1.2 Componentes electrónicos

Tabla 5.2. Presupuesto de componentes electrónicos

Componente	Proveedor	Cantidad	Precio Unit. (S/.)	Precio Total (S/.)
Motor DC 24V 100RPM	POLOLU	4	39	156
Motor NIDEC Tipo 404 764	NIDEC	4	180	720
Arduino Mega 2560	POLOLU	1	150	150
RoboClaw 5A	POLOLU	2	230	460
Modulo Puente H-L298N	POLOLU	4	10	40
Sensor de fuerza	POLOLU	18	26	468
Sensor de proximidad o distancia	JAMECO	1	50	50
Sensor Magnético	JAMECO	4	150	600
Diodo Láser	JAMECO	4	10	40
Interruptor carrera	JAMECO	12	6	72
Módulo Bluetooth HC-05	POLOLU	1	42	42
Fuente MEANWELL 350 W-24V	JAMECO	1	118	118
Regulador de voltaje 3.3 V	POLOLU	1	24.7	24.7
Regulador de voltaje 5 V	POLOLU	1	49	49
Subtotal				2989.7
Envío				118
Total				3107.7

El costo total de los componentes mecánicos y electrónicos sería de S/. 5991.98

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- La primera opción para el diseño de los soportes fue la propuesta de cuatro trípodes, la dificultad de este diseño se presentó en el peso que requería tener cada trípode para evitar volcadura, por otro lado, solo era apoyado sobre el suelo, esto implicaba que las patas del trípode sean lo suficientemente abiertas para lograr estabilidad en cada soporte (mayor área de contacto), empleando mucho espacio para su instalación. Por ello, el diseño fue descartado.
- De la maqueta realizada se tomó como modelo inicial el diseño de forma telescópica para los soportes. Debido a que el esfuerzo es alto por la carga a desplazar y la presión que se requiere entre los extremos de los soportes, el pin diseñado para aguantar la fuerza entre cuerpos (cilindros huecos del soporte telescópico) fallaba. El diseño fue descartado.
- En relación al punto anterior, se propuso unión roscada entre tubos, asegurando dos metros de altura del soporte como fijo y a ser acoplado mediante el usuario. El tercer metro se diseñó regulable como se explica en secciones anteriores del presente documento.
- Debido a que el sistema propuesto está orientado a talleres pequeños, habitaciones o salones, lugares de difícil acceso para dispositivos de carga convencionales, la altura máxima del sistema presentado es de 3 m. De acuerdo a la norma de Arquitectura A.010: Condiciones generales de diseño [4], la mínima altura, caso común en nuestro país, para techos horizontales respecto al suelo es de 2.30 m y hasta las vigas o dinteles, 2.10 m. Dimensiones que van acorde a la altura máxima propuesta.
- El sistema propuesto no está dirigido a ambientes con techos que presenten inclinación pronunciada, para lograr esa adaptabilidad se podría hacer uso de una rótula en la pieza superior de cada soporte. Por otro lado, cada soporte cuenta con piezas de caucho de nitrilo que aseguran mayor área de contacto en caso la superficie presente ciertos niveles de rugosidad o leves desniveles. El uso

de cuatro soportes independientes permite la instalación del sistema en zonas con techos horizontales con distintas alturas, por ejemplo, soportes en contacto con el techo principal y otros con las vigas. En este último caso, se llevaría el control de alturas de cada soporte (giro del motor) para evitar que falle el sistema al intentar elevar el manipulador por encima de uno de los soportes.

- En caso se requiera o sea necesario, puede agregarse rueditas a cada soporte para un mejor traslado.
- El mecanismo carrete y barrena está basado en el utilizado en las cañas de pesca para envolver el hilo en el carrete sin enredarlo [20].
- El sistema propuesto puede ser considerado en aplicaciones de rehabilitación en casa, dirigido a niños debido al límite de peso (50 kg). Por ejemplo, rehabilitación luego de una apoplejía, en la que el paciente necesita aprender a coordinar sus movimientos para sincronizarlos y lograr. En este caso, el sistema mecatrónico propuesto ayudaría a aliviar peso en los miembros inferiores.

CONCLUSIONES

- Se logró el diseño de un sistema mecatrónico con 3 grados de libertad haciendo uso de cuatro cuerdas suficientes para asegurar la estabilidad (menos vibraciones) al desplazar la carga a lo largo del área de trabajo.
- El uso de cables empleado en el diseño presenta restricciones en relación a la forma de trabajo, los cables trabajan solo en tensión, no en compresión.
- El sistema mecatrónico se convierte en portátil, debido a que cada elemento (soportes y manipulador) puede ser transportado independientemente por el usuario. Según la ley de seguridad de la salud [21], el peso de cada soporte (9 kg) es inferior al límite máximo permitido para la carga manual, tanto para varones como mujeres.
- El rango máximo del área de trabajo del sistema propuesto (16 m^2) es posible de incrementar considerando la carga máxima que se desea mover, relacionada directamente con el torque del motor. Cabe resaltar que a mayor rango de trabajo, el peso del sistema aumenta y se pierde portabilidad.
- Se considera un factor de seguridad de dos para asegurar exceso de carga y peso del sistema no considerado durante el diseño.
- Debido a que los soportes ejercen presión entre las superficies de contacto, no puede ser instalado en habitaciones con falso techo u otras particularidades de este tipo; motivo por el cual, el sistema se limita a áreas de trabajo con techo y piso rígidos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Recomendación VDI 2221, *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte (Métodos para el desarrollo y diseño de sistemas técnicos y productos)*.
- [2] F. WE, Back pain in the workplace. Management of disability in non-specific conditions, IASP, 1995.
- [3] EsSalud, «Seguro Social de Salud del Perú,» [En línea]. Available: <http://www.essalud.gob.pe/el-80-de-los-descansos-medicos-de-trabajadores-asegurados-del-pais-se-debe-a-problemas-en-la-columna-revela-essalud>. [Último acceso: 26 Agosto 2015].
- [4] c. y. s. Ministerio de vivienda, «NORMA A.010 CONDICIONES GENERALES DE DISEÑO,» 06 Mayo 2006. [En línea]. Available: http://www.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/Estudios_Normalizacion/Normalizacion/normas/A010_CONDICIONES_GENERALES_DE_DISEÑO.pdf. [Último acceso: 2 Noviembre 2015].
- [5] Ministerio de Trabajo y asuntos sociales España, «Carretillas elevadoras automotoras,» [En línea]. Available: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/701a750/ntp_713.pdf. [Último acceso: 27 Agosto 2015].
- [6] ABUS, «Sistemas de Grúas,» [En línea]. Available: <http://www.abusgruas.es/productos/gruas-pluma-giratorias>. [Último acceso: 27 Agosto 2015].
- [7] Instituto Nacional de Seguridad Higiene en el Trabajo, «Grúas hidráulicas articuladas sobre camión,» [En línea]. Available: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/856a890/868w.pdf>. [Último acceso: 27 Agosto 2016].
- [8] Angel Mir, «Mesas Elevadoras,» [En línea]. Available: http://www.angelmir.com/pdfs/catalog_general_altres244.pdf. [Último acceso: 2015 Agosto 29].
- [9] D. J. C. Carl S. Holland, «Cable array robot for material handling». USA Patente US6826452 B1, 30 Noviembre 2004.
- [10] R. V. B. A. S. J. James S. Albus, «Modular suspended manipulator». USA Patente US6566834 B1, 20 Mayo 2003.
- [11] «NIST Engineering Laboratory,» The National Institute of Standards and

- Technology (NIST), 25 Agosto 2011. [En línea]. Available: <http://www.nist.gov/el/isd/lunar-rover-3.cfm>. [Último acceso: 26 Agosto 2015].
- [12] Vicinay Cemvisa, «Parallel Cable Robots,» [En línea]. Available: <http://www.vicinaycemvisa.com/en/vicinay-news/item/116-vicinay-cemvisa-participa-en-el-proyecto-europeo-parallel-cable-robotics-for-improving-maintenance-and-logistics-of-large-scale-products-cablebot/116-vicinay-cemvisa-participa-en-el-proyecto-europeo-p>. [Último acceso: 26 Agosto 2015].
- [13] J. P. Merlet, «MARIONET, a family of modular wire-driven,» INRIA Sophia Antipolis - Mediterran ´ ee, Sophia Antipolis, France, [En línea]. Available: <http://www-sop.inria.fr/coprin/prototypes/main.html>. [Último acceso: 26 Agosto 2015].
- [14] Q. J. D. & X. Duan, «Workspace Classification and Quantification Calculations of,» 24 May 2014. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/358727>. [Último acceso: 02 Setiembre 2015].
- [15] Rui Yao, Xiaoqiang Tang, Jinsong Wang and Peng Huang, «Dimensional Optimization Design of the Four-Cable-Driven Parallel Manipulator in FAST,» 2009. [En línea]. Available: <http://www.researchgate.net/publication/224088756>. [Último acceso: 5 Setiembre 2015].
- [16] Robot electronics, «Tilt Compensated Compass Module,» [En línea]. Available: <http://www.robot-electronics.co.uk/htm/cmpps11ser.htm>. [Último acceso: 20 Setiembre 2015].
- [17] Estructplan, «Ergonomía aplicada a las Herramientas,» 9 Agosto 2002. [En línea]. Available: <http://www.estructplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=64>. [Último acceso: 20 Setiembre 2015].
- [18] K. Ogata, «Ingeniería de control moderno,» de *Ingeniería de control moderno*, Madrid, PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010, p. 904.
- [19] A. A. A. Linares-Flores J., «Ingeniería, investigación y tecnología,» Octubre 2010. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-77432011000200003&script=sci_arttext. [Último acceso: 24 Noviembre 2015].
- [20] Caballa, «Tecnología de los carretes de pesca Shimano,» 31 Mayo 2008. [En línea]. Available: <https://peskama.wordpress.com/2008/05/31/tecnologia-de>

- los-carretes-de-pesca-shimano/. [Último acceso: 10 Septiembre 2015].
- [21] Ministerio de trabajo y Promocion de empleo, «Seguridad y Salud en el trabajo, Ley N° 29088,» 19 Junio 2007. [En línea]. Available: http://trabajo.gob.pe/archivos/file/SNIL/normas/2007-06-19_29088_1283.pdf. [Último acceso: 02 Noviembre 2015].
- [24] P. C. Costas, Montaje E Instalacion De Gruas: Manual de Procedimientos para el Instalador de Maquinas y Equipos Industriales, Ideaspropias Editorial S.L., 2004.
- [25] EEPAT de Mexico, «EQUIPOS ELECTRICOS PARA ALTA TENSION S.A. DE C.V.,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.eepat.com/index/productos/cables-y-sogas-para-tendido/>. [Último acceso: 15 Septiembre 2015].
- [26] Cablecentro S.A.C., «TABLAS DE GARGA DE ROTURA DE LOS CABLES DE ACERO MAS UTILIZADOS,» [En línea]. Available: <http://www.cablecentrosac.com/tablas.html#6x19>. [Último acceso: 15 Septiembre 2015].
- [28] F. C. J.-P. M. Rémy Ramadour, «Inria. Inventeurs du monde numérique,» 19 Mayo 2014. [En línea]. Available: http://www.irisa.fr/lagadic/pdf/2014_icra_ramadour.pdf. [Último acceso: 20 Setiembre 2015].