

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN MOVIL ESCALADOR DE PAREDES LATERALES  
Y SUPERIORES PARA INSPECCION EN TRABAJOS DE  
CONSTRUCCIÓN CIVIL**

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

**José Alejandro Alvarado Ruiz**

**Asesor: FRANCISCO FABIÁN CUÉLLAR CÓRDOVA**

Lima, febrero de 2015

## Resumen

En la actualidad, son conocidos los robots capaces de escalar paredes verticales, horizontales y terreno uniforme. La variedad de diseño y distintas formas de sujeciones incentivan a los investigadores a seguir desarrollando la tecnología de robots capaces de movilizarse en todo tipo de terreno presente. Adicionalmente, se desarrollan estos móviles con algún fin, como la investigación de terrenos poco accesibles y la carga de equipos de reconocimiento o vigilancia.

Por otro lado, la seguridad en el área de trabajo es primordial para los trabajadores, y enviar a personas a verificar el estado de alguna construcción de difícil acceso puede poner en riesgo su salud física, ya que algún accidente laboral podría ocurrir si no se toman todas las medidas preventivas necesarias.

El presente trabajo consiste en el diseño de un móvil capaz de escalar paredes verticales y superiores, con la ventaja de que éste puede cambiar de un plano vertical a uno horizontal, y viceversa, para así realizar trabajos de investigación. Se presenta una solución de un vehículo con cuatro extremidades, cada una dotada de una rueda para el desplazamiento en el plano, y de un sistema mecánico - eléctrico para la adherencia del móvil a la superficie de trabajo. Este sistema será controlado remotamente.

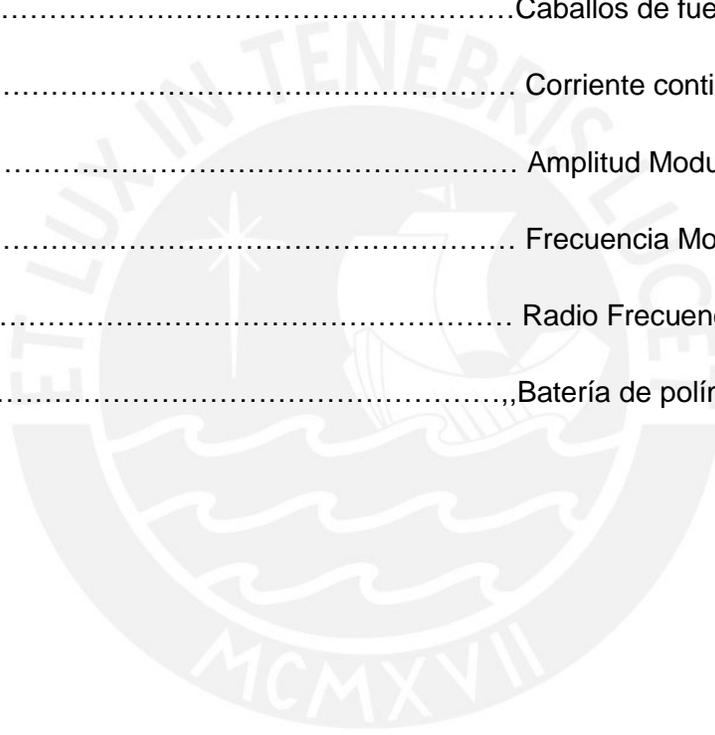
Esta tesis está compuesta de 5 capítulos. En primer lugar, se presentara la problemática y los antecedentes. En segundo lugar, se mencionaran los requisitos generales, mecánicos, electrónicos y de control, seguidos por la propuesta de solución. Luego, se explicara el funcionamiento del sistema mecatrónico propuesto, se detallaran los sensores y actuadores empleados, se describirán los planos mecánicos y los sistemas electrónicos integrados, así como el diagrama de flujo del programa de control. En cuarto lugar, se presentara el presupuesto para la solución planteada en este documento. Finalmente, se expondrán las conclusiones del trabajo.

# Índice

Capítulo 1: Presentación de la problemática .....	3
1.1 Antecedentes .....	4
Capítulo 2: Requerimientos del sistema mecatrónico y presentación del concepto .....	6
2.1 Requerimientos del sistema mecatrónico.....	6
2.1.1 Requerimientos generales .....	6
2.1.2 Requerimientos mecánicos .....	6
2.1.3 Requerimientos eléctricos y electrónicos .....	6
2.1.4 Requerimientos de control .....	7
2.2 Concepto de la solución .....	8
Capítulo 3: Sistema Mecatrónico.....	11
3.1 Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico.....	11
3.2 Sensores y actuadores .....	17
3.2.1 Sensores seleccionados .....	17
3.2.2 Actuadores seleccionados .....	19
3.3 Planos del sistema mecatrónico.....	22
3.4 Diagramas esquemáticos de los circuitos del sistema mecatrónico .....	26
3.5 Diagrama de flujo del programa de control .....	33
Capítulo 4: Presupuesto.....	43
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones .....	46
Bibliografía .....	48

Lista de acronimos:

EDF.....	Electric Ducted Fan
SRI.....	Standford Research Institute
ESC .....	Electrical Speed Control
PWM.....	Modulacion por ancho de pulsos
RPM.....	Revoluciones por minuto
HP.....	Caballos de fuerza
DC.....	Corriente continúa
AM.....	Amplitud Modulada
FM.....	Frecuencia Modulada
RF.....	Radio Frecuencia
Lipoly .....	Batería de polímero de litio



## Capítulo 1: Presentación de la problemática

La industria de construcción civil en el Perú se encuentra en un gran crecimiento [1] [2]. En los últimos años, se puede observar como inmensos edificios son levantados en distintos puntos del país, y en poco tiempo se abren al público como residencias, oficinas o centros comerciales, entre otros. Además, el equipo humano en la labor de construir un edificio está integrado por obreros, arquitectos, diseñadores e ingenieros. Estos últimos se encargan de verificar que la construcción se realice de manera eficiente, limpia y segura usando conceptos de cálculos y de ingeniería para llegar a sus conclusiones.

Una de las tareas más críticas del trabajo de construcción es la inspección de materiales. Para esta labor, existen ensayos destructivos, como extraer un testigo usando discos de diamantino, y ensayos no destructivos, como el ensayo de dureza superficial, control de humedad en el concreto y ensayos de presencia de acero en vigas y columnas. Para los ensayos destructivos, se emplean grandes equipos para romper el concreto y extraer las muestras requeridas [3], mientras que para los ensayos no destructivos, equipos integrados por sensores y procesadores son ampliamente utilizados, como son el caso de los esclerómetros para la dureza superficial, higrómetros para la humedad del concreto, detectores de metales o “pacometers” para la detección del acero, así como cámaras especiales para hacer seguimientos a grietas en concreto o verificar presencia de objetos (principalmente acero) en este [4].

En ciertas situaciones, los lugares que requieren inspección se encuentran en una zona elevada o de difícil acceso, y a fin de que se puedan alcanzar estos puntos, es necesario instalar andamios y enviar a un obrero y tomar la muestra, o usar varillas extensibles con el sensor y maniobrarla para llegar a las zonas deseadas. En estos casos se pone en riesgo la salud física de las personas, ya que se trabaja en altura, o con objetos difíciles de maniobrar que pueden causar un accidente, y en el caso de instalar un andamio, tiempos muertos en instalación, que provocan un atraso en la finalización de la obra civil.

Por lo tanto, se propone un sistema mecatrónico que sea capaz de llegar a lugares de difícil acceso para una persona en trabajos de inspección y verificación, con el fin de efectuar ensayos no destructivos a vigas, columnas, paredes y techumbre.

## 1.1 Antecedentes

La tecnología de robots escaladores se ha diversificado con el pasar de los años [5]. Ahora se pueden encontrar diseños de estos con distintas formas y distintos tipos de sujeción, dependiendo de la finalidad de la aplicación. El uso que se les da a estos robots escaladores es principalmente para investigación, vigilancia, entretenimiento, entre otros.

Los dispositivos más empleados para la sujeción del móvil a la superficie a escalar son tres: ventosas con generadores de vacío, electroimanes y garras o pinzas [5]. Cada uno de estos métodos posee sus ventajas y desventajas; por ejemplo, los que emplean electroimanes están diseñados para trabajar en estructuras ferromagnéticas, y además consumen mucha potencia eléctrica; mientras que para terrenos rocosos o con muchas imperfecciones, los robots que usan garras o pinzas son primordiales. Estos robots también varían en su diseño, dependiendo de la aplicación. Un robot pequeño y silencioso para vigilancia que se moviliza por las paredes a una velocidad moderada, o un gran robot cuadrúpedo que puede adherirse a cualquier superficie en un espacio tridimensional [5] son algunos ejemplos de la variedad de tamaños que un robot escalador puede tener. Por ende, los diseñadores le otorgan la forma más adecuada que crean conveniente para la utilidad de estos. Con esto en cuenta, uno puede idealizar el robot escalador con forma de un vehículo móvil con ruedas, o un diseño inspirado en algún animal, como son comúnmente vistos orugas, insectos, reptiles o mamíferos [5, pp. 55-63].

A continuación, se presentan proyectos similares existentes, que van desde objetos comerciales hasta proyectos de investigación en universidades.

Con respecto a los productos en el mercado, existe el Climb@Tron R.E.X [6], un pequeño juguete capaz de escalar paredes verticales usando ventosas. Además, "The Ibex" [7], usa el mismo principio de las aspiradoras para mantenerse sujeto a las paredes. Adicionalmente, existen robots investigadores desarrollados por alumnos en distintas universidades, como el StickyBot [8], robot con forma de lagartija, escala vidrios usando microfibras en sus patas, y su sucesora, el StickyBot III [9]; RiSE [10], un hexápodo para investigación militar; un sistema robótico móvil para el desplazamiento en una superficie horizontal y vertical por el método de vórtice, desarrollado por estudiantes de la Universidad de Bucaramanga [11]; SRI International desarrollo un móvil que usa electroadhesión [12] para adherirse a las paredes; el Hex-piderix [13], un robot de ocho patas con forma parecía a una araña, usa ventosas para su adhesión a

las superficies; REMLED II [14], proyecto cuadrúpedo diseñado para limpieza de vidrios en un edificio.

El Dr. Antonio Gimenez Fernandez, en su tesis doctoral [5] explica de forma específica como un robot escalador puede ser usado en distintas áreas, como la industria nuclear, civil, minera, química, topografía, entre otras [5, pp. 15-23]. Además, en dicha tesis se pueden encontrar otros robots escaladores que diversas universidades alrededor del mundo han desarrollado previamente [5, pp. 30-51]



## Capítulo 2: Requerimientos del sistema mecatrónico y presentación del concepto

### 2.1 Requerimientos del sistema mecatrónico

Se requiere de un sistema que satisfaga los requerimientos a continuación.

#### 2.1.1 Requerimientos generales

El sistema mecatrónico debe ser capaz de movilizarse sobre superficies verticales y horizontales, así como realizar la transición entre pared y techo de manera autónoma. Su uso será principalmente en paredes en construcción, es decir, debe ser capaz de adherirse a las paredes de concreto de una manera segura para que el sistema no resbale.

#### 2.1.2 Requerimientos mecánicos

Se requiere que la propuesta de solución este adherida a las superficies en todo momento, por ende, es necesario implementar un sistema de sujeción adecuado para la superficie destinada. Además, el ensamblado del sistema mecatrónico debe permitirle adaptarse al cambio entre pared y techo sin perder sujeción. Adicionalmente, para que el sistema de sujeción sea efectivo y se obtenga un ahorro de energía, el móvil debe ser liviano.

#### 2.1.3 Requerimientos eléctricos y electrónicos

El sistema mecatrónico debe ser alimentado con corriente continua debido a los componentes electrónicos presentes; por lo tanto, alojará baterías recargables. Los componentes electrónicos que se usarán deben ser ligeros, debido al factor peso de los requerimientos mecánicos, pero que brinden la potencia necesaria según los cálculos efectuados. Serán necesarios actuadores que permitan la adhesión del móvil a la superficie, actuadores que impongan un movimiento de traslación para el movimiento del sistema en el plano, y sensores del tipo detectores de presencia para la seguridad y control del móvil cuando encuentre un obstáculo plano.

Adicionalmente, el sistema de control debe estar junto a la estructura del móvil, y debe poseer las entradas y salidas mínimas para la cantidad de actuadores y sensores que se instalarán.

#### 2.1.4 Requerimientos de control

El sistema debe ser capaz de saber si se encuentra un obstáculo plano en frente suyo, para así efectuar el cambio entre dos superficies. Adicionalmente, el sistema de control tiene el trabajo de controlar el sistema de sujeción seleccionado, así como la forma de movilizarse por las paredes. Por último, es recomendable incluir sensores que midan la posición del móvil para la retroalimentación de variables controladas, para así tener un lazo de control más sofisticado.



## 2.2 Concepto de la solución

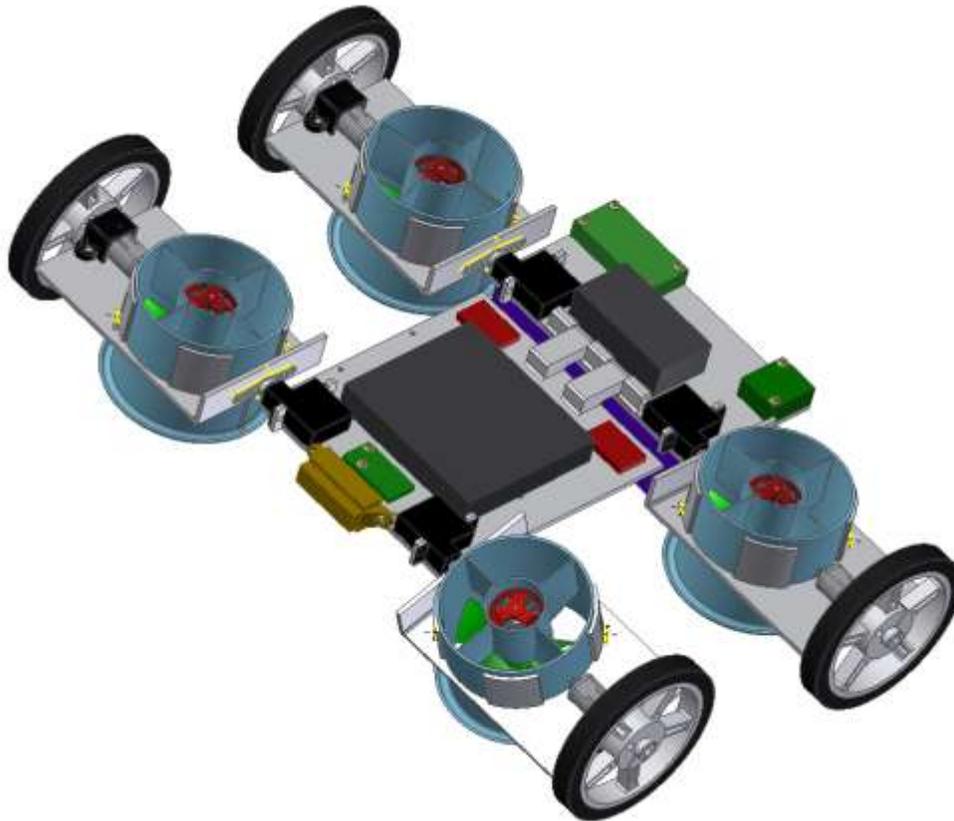


Figura 2.1: Móvil escalador de paredes laterales y superiores. Fuente: PROPIA

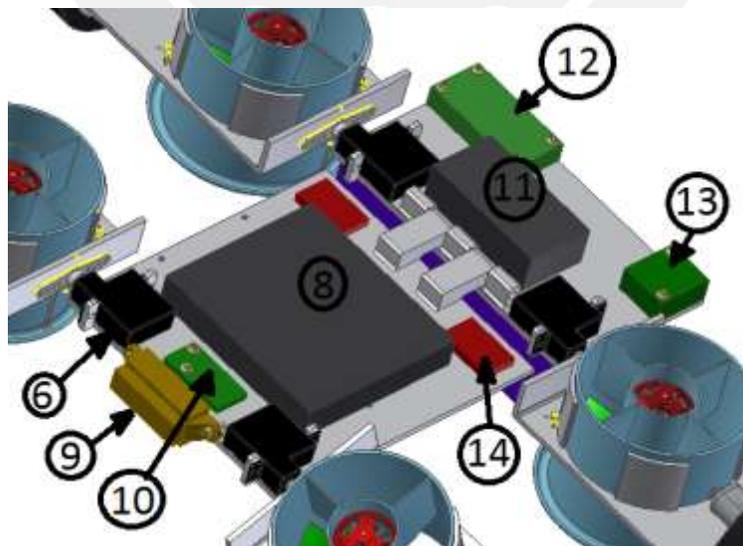


Figura 2.2: Cuerpos y partes. (6) Servomotor, (8) ESC, (9) sensor ultrasónico, (10) sistema de sensado inercial, (11) receptor RF, (12) (13) regulador de voltaje, (14) controlador de motores DC. Fuente: PROPIA

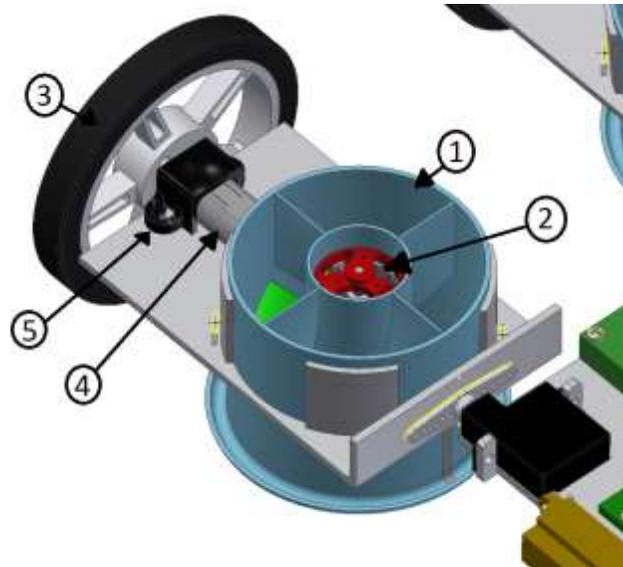


Figura 2.3: Extremidad. (1) EDF, (2) Motor “brushless”, (3) rueda, (4) micro motor. (5) soporte. Fuente: PROPIA

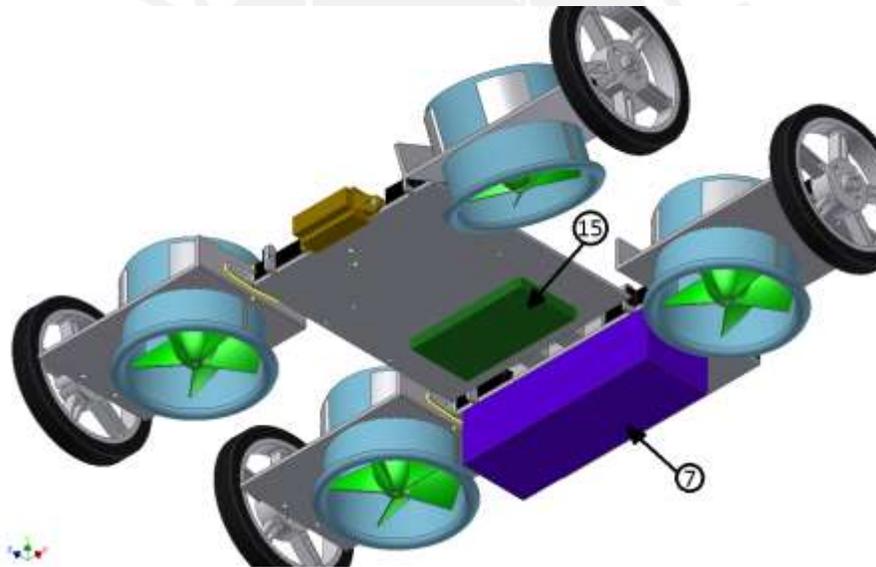


Figura 2.4: Vista inferior del sistema mecatrónico. (7) Batería lipoly, (15) microcontrolador. Fuente: PROPIA

El sistema mecatrónico propuesto consta de dos cuerpos (Ver Figura 2.2), cada uno con dos “extremidades” (Ver figura 2.3). Estas alojan el sistema de sujeción seleccionado: turbinas eléctricas (1), o conocidas como EDF (Electric Ducted Fan por sus siglas en inglés). Estas generan una fuerza de empuje (“Thrust Force”) al girar su hélice a grandes velocidades usando motores eléctricos especiales (2). Adicionalmente, se instalaron ruedas (3) al final de las extremidades, las que permitirán el movimiento por las superficies gracias a que son giradas por un micro motor eléctrico (4), con su soporte (5) para asegurarlo a la estructura.

Estos miembros se encuentran al frente del cuerpo, ya que las ruedas son lo primero que debe estar en contacto con la otra superficie donde se realizara el cambio. Un micro servomotor (6) controla el ángulo de giro de la extremidad, para así posicionar la fuerza de empuje que produce el EDF perpendicular al plano de movimiento, lo cual ayuda también en el momento de realizar el cambio de superficies.

La función principal de los cuerpos es alojar todos los elementos electrónicos que se emplearan (sensores, actuadores, el microcontrolador, controladores de velocidad (ESC) de los motores, la batería, etc.), los cuales están distribuidos de tal manera que el centro de gravedad se encuentre lo más cerca al centro del móvil y de la superficie. Ambos cuerpos están unidos por medio de una articulación mecánica que permite que estos se acomoden mientras el sistema mecatrónico está efectuando el cambio de plano de movimiento.

El cuerpo carga una batería de polímero de Litio (7) (Lipoly), capaz de soportar el amperaje de los motores instalados en los EDFs. Estos también necesitan de controladores de velocidad especiales llamados ESC (8) que regulan el voltaje y la cantidad de amperaje que se les suministra. Se cuenta también con un sensor ultrasónico de presencia de cercanía (9) para detectar la pared cuando el móvil se encuentra muy cerca de esta, y un sistema de sensado inercial (10) que servirá de referencia y feedback para el correcto direccionamiento del móvil.

El sistema mecatrónico será direccionado remotamente con un control de mando de radiofrecuencia. En el chasis del vehículo inspector se encuentra un receptor (11) con 8 canales. En esta aplicación se usarán menos canales de los disponibles; sin embargo, se instala este modelo para contar con más vías de comunicación para futuras mejoras.

Se encuentran también dos convertidores de voltajes, para reducir la tensión que brinda la batería Lipoly a 5V cada una. El regulador (12) alimentará los micro-motores en las extremidades, los cuales estarán conectados su controlador (14), mientras que el (13) se encargará de suministrar energía a todos los demás componentes electrónicos, incluido el microcontrolador (15).

## Capítulo 3: Sistema Mecatrónico

### 3.1 Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico

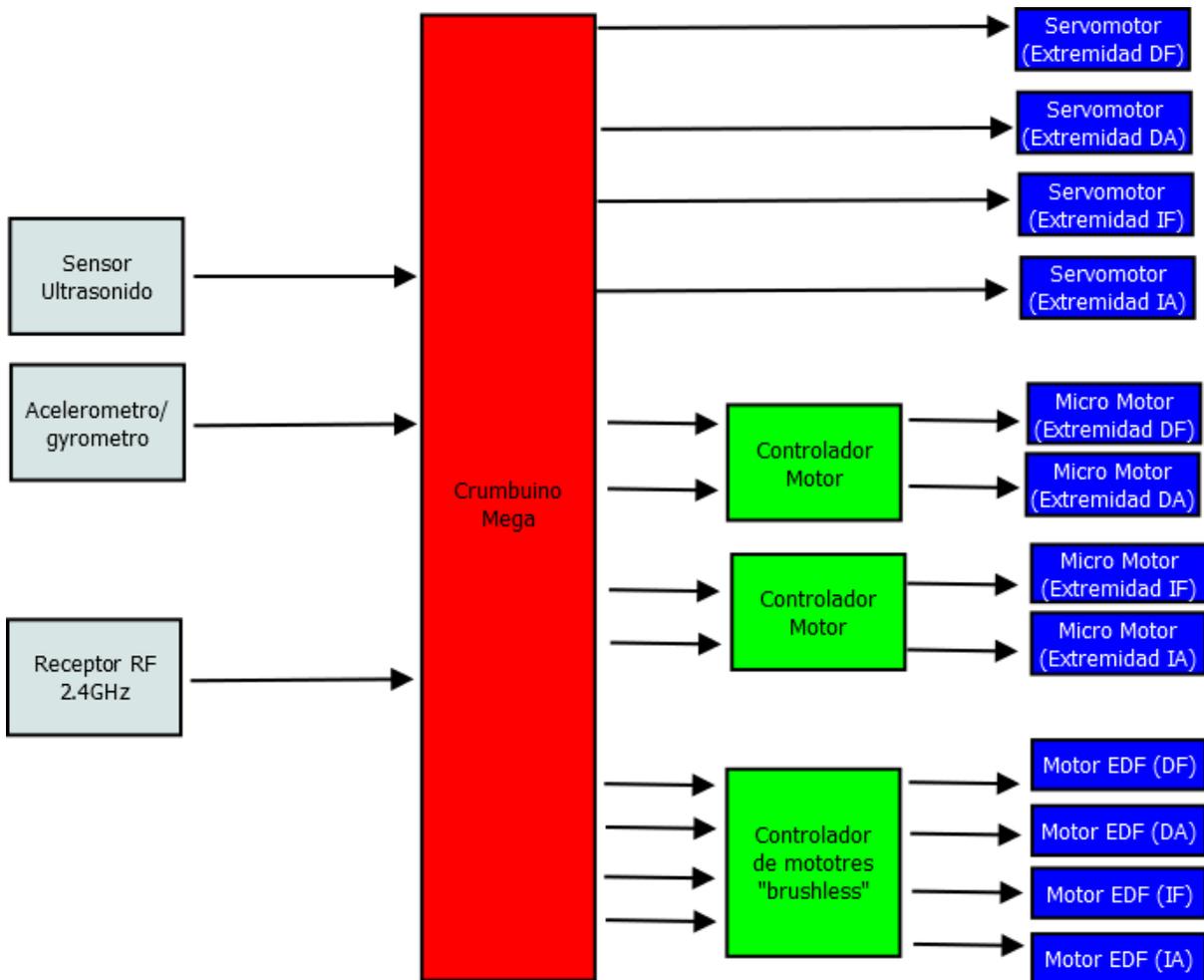


Figura 3.1: Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico propuesto. Ubicación de los actuadores: Derecha frente (DF), derecha atrás (DA), izquierda frente (IF), izquierda atrás (IA). Fuente: PROPIA

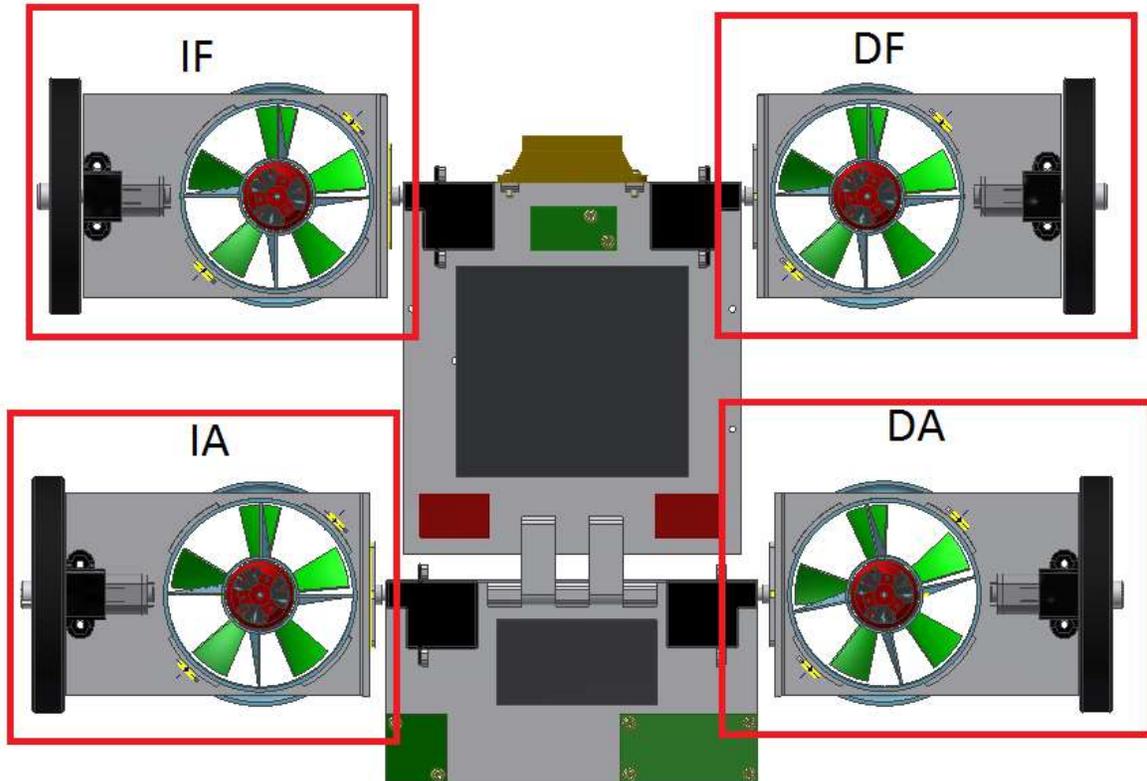


Figura 3.2: Ubicación de las extremidades con nominación. Derecha frente (DF), derecha atrás (DA), izquierda frente (IF), izquierda atrás (IA). Fuente: PROPIA

La figura 3.1 muestra el diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico propuesto. Antes de efectuar alguna tarea, se debe asegurar que la batería Lipoly esté completamente cargada. Una vez comprobado este paso, se procede a conectar la alimentación. El sistema comprueba el estado de los servomotores y se ajusta para que se alinee con la superficie donde se encuentra. Para la calibración, se recomienda que el sistema se encuentre en una superficie plana horizontal.

Dada la calibración del sistema, el usuario puede comandar el movimiento del robot escalador de paredes por medio del control remoto. El sistema espera un comando proveniente del control del usuario para efectuar alguna acción. Desde este se envían ondas de radio de altas frecuencias (2.4GHz) que son recibidas por un receptor en el móvil, el cual envía dicha señal al microcontrolador. Dependiendo de la señal adquirida, el móvil está programado para avanzar, girar, retroceder y efectuar la acción del cambio de plano.

Las acciones de avanzar, girar y retroceder son todas relacionadas con los micro-motores en las extremidades del móvil escalador. El microcontrolador manda envía de mando a los controladores de motores, a los cuales están conectados los micro-motores. Con estos integrados, es posible variar la velocidad y dirección del giro del eje del motor para efectuar todos los movimientos de desplazamiento.

El sistema mecatrónico cuenta con una tarjeta electrónica que incluye un acelerómetro y un girómetro; por ende, permite conocer la posición y giro en el espacio del robot escalador, así como un sensor ultrasónico al frente para captar la pared contigua y efectuar acciones preventivas a una colisión indeseada.

La acción de cambio de plano tiene diversos pasos. Al recibir una señal específica desde el control remoto, el móvil escalador de paredes laterales y superiores activa los servomotores que harán girar las extremidades noventa grados, para así cambiar de plano de movimiento y adherirse a la nueva superficie. Este cambio solo será posible si el sistema mecatrónico se encuentra junto a una esquina (cambio de pared lateral a superior o viceversa), ya que es necesario que las ruedas en las extremidades estén en contacto con ambas superficies en determinado momento. Primero se comprueba que el móvil se encuentre frente a un obstáculo planar (Figura 3.3); luego, las extremidades del frente del móvil tomaran turnos para girar y posicionarse en la nueva superficie de movimiento (Figura 3.5). Al estar ambas aplicando la fuerza de empuje perpendicular al obstáculo planar, el móvil empieza a avanzar lenta y coordinadamente (Figura 3.6). Luego de que el sistema se acomode, es decir, que todo el cuerpo del frente se encuentre paralelo al nuevo plano de movimiento (Figura 3.7), las dos extremidades de atrás giraran noventa grados una por una, realizar el cambio y llegar a adherirse a la nueva superficie de movimiento (Figura 3.8). Cabe mencionar que durante el giro de la extremidad, el motor del EDF estará apagado para reducir el torque que el servomotor tendrá que entregar, y la extremidad cuenta con una guía para que el EDF pueda girar sin problemas con esta pieza (Figura 3.4).

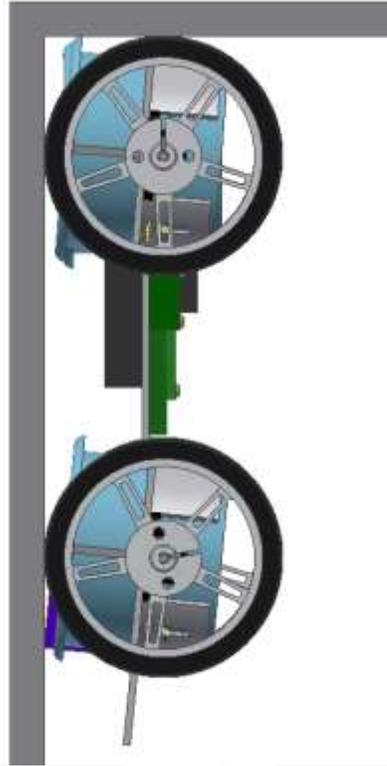


Figura 3.3: Posición Inicial para la acción de cambio de plano. Fuente: PROPIA

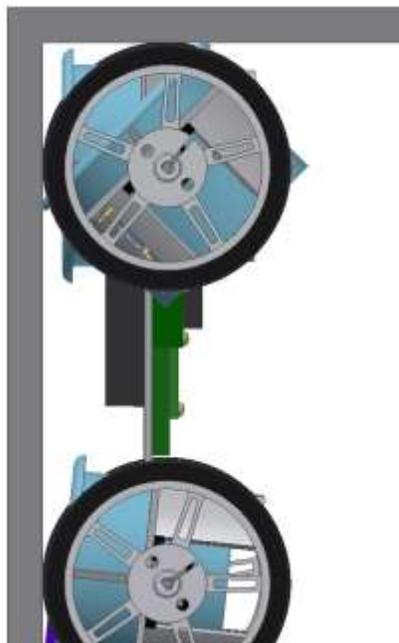


Figura 3.4: EDF girado 45 grados. El sistema de pin y guía en la extremidad le da libertad al EDF para acomodarse mientras se efectúa el giro. Fuente: PROPIA

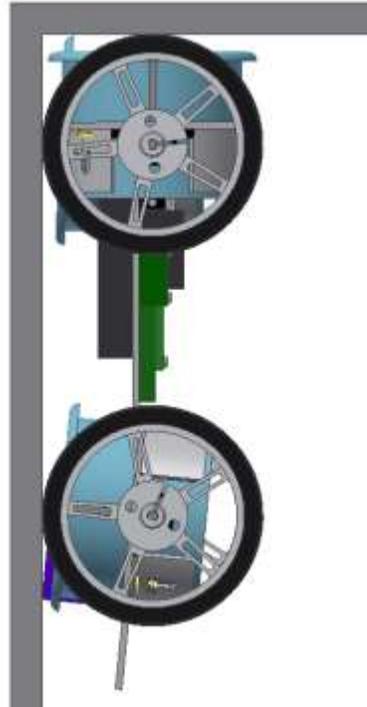


Figura 3.5: EDF superior girado 90 grados. La fuerza que ejerce es perpendicular al plano horizontal. Fuente: PROPIA

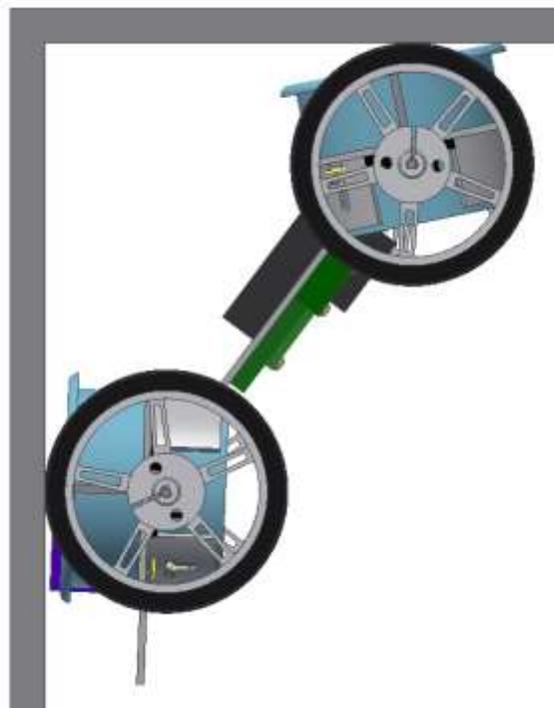


Figura 3.6: Momento de transición. Las ruedas superiores avanzan y las inferiores suben hasta llegar a la pared superior. Fuente: PROPIA

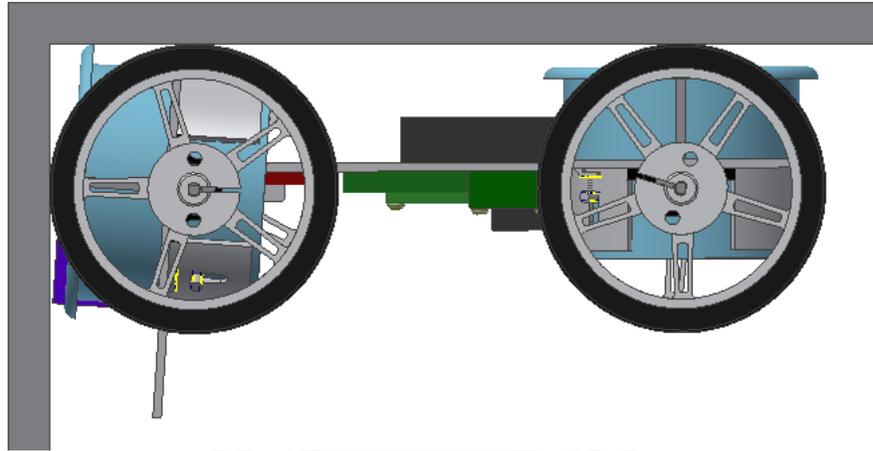


Figura 3.7: El móvil se encuentra horizontal. Se procede a girar las articulaciones inferiores. Fuente: PROPIA

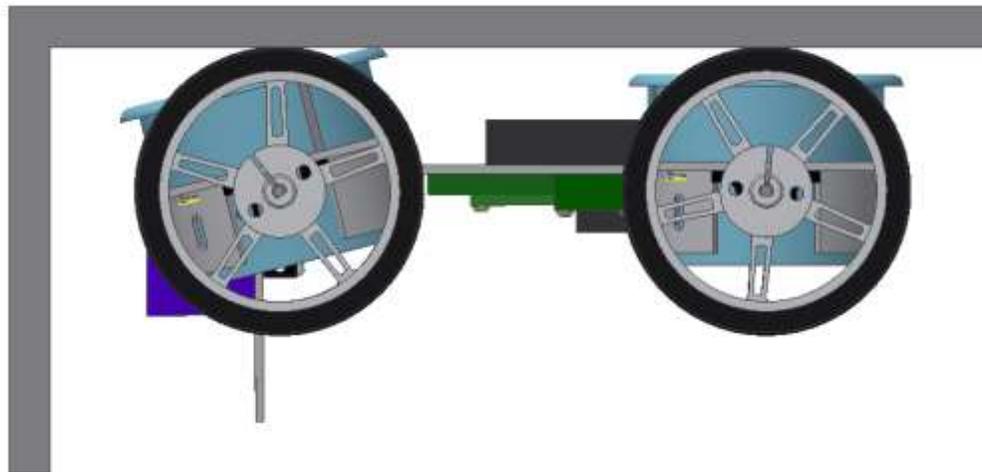


Figura 3.8: Móvil en posición final, con los 4 EDFs apuntando perpendicularmente al nuevo plano de movimiento. Fuente: PROPIA

El control de los motores en los EDFs estarán a cargo del microcontrolador, el cual estará conectado a las entradas de control del ESC, y por medio de señales PWM de 50kHz, encienden y apagan los motores cuando es necesario (al encontrarse sobre superficie horizontal que no sea techumbre y cuando se realiza la secuencia de cambio de superficie de movimiento).

## 3.2 Sensores y actuadores

### 3.2.1 Sensores seleccionados

#### Sharp GP2Y0A41SK0F Analog Distance Sensor 4-30cm

Este sensor se ubicará al frente del móvil, y detectará la aproximación a un obstáculo (una pared) para que automáticamente realice el cambio entre pared lateral y superior. La salida de este sensor es una señal analógica, proporcional a la distancia leída.



Figura 3.9: Sensor de Ultrasonido. Fuente: POLOLU

Tabla 3.1: Especificaciones del sensor Sharp GP2Y0A41SK0F Analog Distance Sensor 4-30cm. Fuente: POLOLU

Rango	4 – 30 cm
Muestreo	60 Hz
Voltaje de operación	4.5 – 5.5 V
Corriente	12 mA
Tipo de salida	Analógica
Tipo de voltaje diferencial	2.3 V

Para ver el valor de la salida en relación a la distancia del objeto leído, ver Anexo 1

**AltIMU-10 v4 Gyro, Accelerometer, Compass, and Altimeter (L3GD20H, LSM303D, and LPS25H Carrier)**



Figura 3.10: Integrado con acelerómetro, girómetro y altímetro. Fuente: POLOLU

Este módulo integrado posee un giroscopio, un acelerómetro, un compás y un altímetro. Usando el modo de comunicación I<sup>2</sup>C, conectado al microcontrolador, solo son necesarios 2 pines (SCL Y SDA) de conexión para leer los datos registrados por este integrado.

Con la ayuda de librerías creadas para esta tarjeta y brindadas por la misma compañía desarrolladora, se recolecta la información de los diferentes sensores, se procesa en el microcontrolador y se obtiene la posición en el espacio de la tarjeta integrada. Incluso es posible simular en computadora como se encuentra posicionado el modulo en un espacio 3D. Se escogió este paquete de sensores por su fácil programación, reducido uso de pines (2 pines ya mencionados y 2 pines de alimentacion) y gran potencia para futuras mejoras y aplicaciones.

Tabla 3.2: Especificaciones del sistema de sensado inercial AltIMU-10 v4. Fuente: POLOLU

Interface	I <sup>2</sup> C
Voltaje de operación	2.5 – 5.5 V
Ejes	X Y Z
Rango de trabajo	±245, ±500, or ±2000°/s (gyro) ±2, ±4, ±6, ±8, or ±16 g (accelerometer) ±2, ±4, ±8, or ±12 gauss (magnetometer) 26 kPa to 126 kPa (barometer)
Corriente	6 mA
Voltaje de operacion integrados	3.3 V

Cabe resaltar que los integrados en la tarjeta funcionan con 3.3 voltios; sin embargo, en el mismo módulo se cuentan con resistencias pull-up que regularizan el voltaje de control al mismo empleado para alimentar al microcontrolador.

### 3.2.2 Actuadores seleccionados

#### Power HD High-Speed Digital Micro Servo DSM44

Este servomotor está encargado de girar las extremidades del móvil. Posee engranajes metálicos para una mayor resistencia. Brinda el torque necesario para girar 90 grados la extremidad cuando el motor del EDF no está funcionando. Al ser de entrada tipo digital, el giro es más preciso usando solo un PWM. Su reducido tamaño (20x8.7x27 mm), peso ligero (6 gramos) y torque brindado (1.6 kg.cm max) son adecuados para esta aplicación.



Figura 3.11: Servomotor con ejes metálicos. Fuente: POLOLU

Tabla 3.3: Especificaciones del servomotor Power HD High-Speed Digital Micro Servo DSM44. Fuente: POLOLU

Entrada	Digital
Voltaje	4.8 – 6 V
Velocidad de giro	0.09 – 0.07 sec/60°
Torque a rotor bloqueado	1.2 – 1.6 kg.cm
Temperatura de operación	50 – 60 °C

### 298:1 Micro Metal Gearmotor HP

Estos micro-motores son pequeños (24x10x12 mm) y con una masa de 10 gramos. Alimentados con 5 VDC, harán girar las ruedas de las extremidades, que permitirán el desplazamiento del móvil. Con una caja reductora, genera el torque necesario para hacer girar las ruedas en la superficie de concreto. Se contará con un motor en cada extremidad.



Figura 3.12: Micro Metal Gearmotor. Fuente: POLOLU

Tabla 3.4: Especificaciones del Micro Metal Gearmotor. Fuente: POLOLU

Tamaño	24 x 10 x 12 mm
Peso	0.34 oz (9.64 g)
Caja reductora	297.92:1
Corriente a Rotor Bloqueado (6 V)	360 mA
Torque a Rotor Bloqueado (6 V)	2.9 kg-cm
Velocidad a Rotor Libre (6 V)	45 rpm
Corriente a Rotor Libre (6 V)	30 mA

## EDF55 with H300 Motor Assembled 199.8W



Figura 3.13: Electric Ducted Fan (EDF). Fuente: HOBBYKING

Esta turbina eléctrica será la encargada de generar la fuerza para que el móvil se adhiera a la pared. Cuenta con un motor sin escobillas (o “brushless motor”) de altas revoluciones (4300 RPM por voltio) y alto consumo de corriente (18 amperios). Al contar con uno en cada extremidad (4 en total), se genera la fuerza necesaria para que el sistema mecatrónico pueda escalar tanto en superficies verticales como horizontales (boca abajo). Adicionalmente, su peso (58 gramos) y potencia (200 Watts) lo vuelve el actuador necesario para el móvil escalador de paredes laterales y superiores.

Tabla 3.5: Especificaciones del EDF55 with H300 Motor Assembled 199.8W. Fuente: POLOLU

Voltaje	11.1 V
Corriente	18 A
Empuje	490 g
Potencia	199.8 W
Motor	ADH300L 4300kv
Peso	58 g



### Cuerpo trasero

Esta pieza lleva consigo la batería Lipoly que alimenta a todo el sistema mecatrónico móvil. Es más pequeña y también tendrá instalados dos servomotores para movilizar las extremidades posteriores del móvil. Posee unos agujeros pasantes que servirán para conectar el cuerpo frontal con este elemento, por medio de un pin pasante. Al igual que el cuerpo frontal, el material de esta pieza es ABS y será fabricada en una impresora 3D.

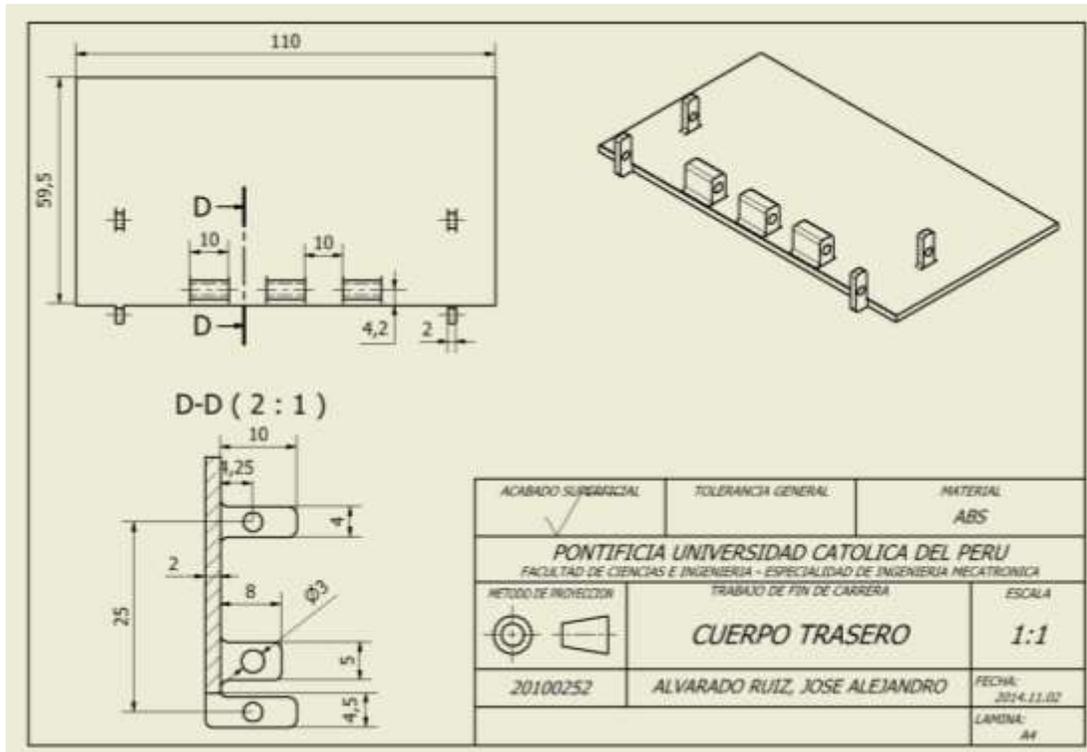


Figura 3.15: Plano de la pieza “Cuerpo Trasero”

### Extremidad

Esta pieza denominada como extremidad aloja el EDF para la fuerza de agarre y el micro-motor para el desplazamiento del móvil. Posee agujeros para que se sujete el micro-motor y otros agujeros para conectarlo al servomotor. Adicionalmente, unos pequeños apéndices se encuentran presentes para sujetar el EDF a la extremidad. Igualmente, una impresora 3D es precisa para la fácil fabricación de esta pieza, usando de material plástico ABS.

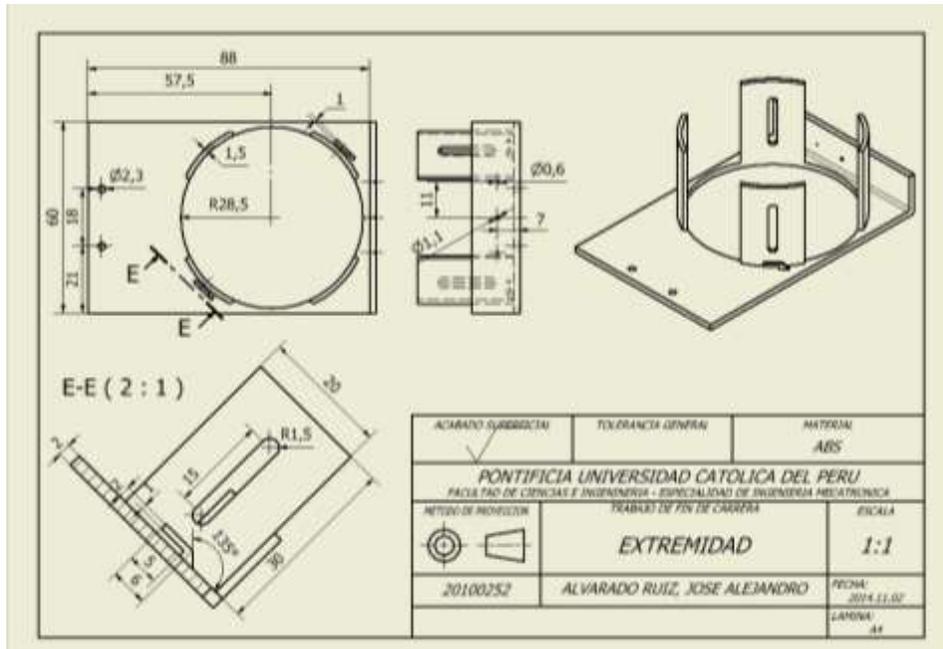


Figura 3.16: Plano de la pieza “Extremidad”

**Pin**

Este pasador será el encargado de juntar los dos cuerpos: el delantero y el trasero. Con esta pieza se logra un giro que permitirá al robot acomodarse cuando esté cambiando de plano de trabajo. Al igual que las demás, el material es el plástico ABS hecho en una impresora 3D.

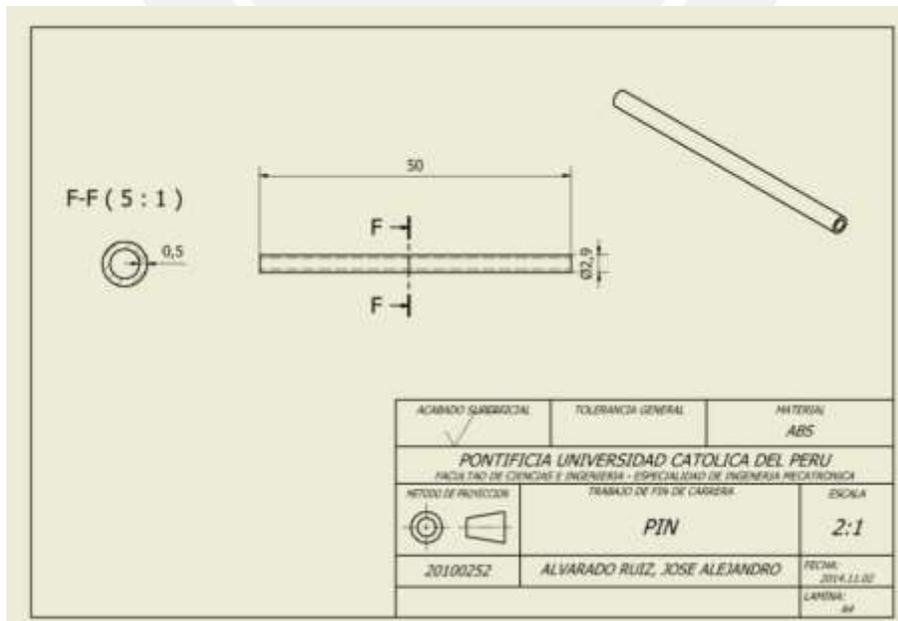


Figura 3.17: Plano de la pieza “Pin”

**PIN EDF**

Este pin se encuentra empotrado en el EDF, y su función es la de ser una guía para que esta turbina pueda desplazarse y no topar contra la superficie de movimiento mientras se realiza el giro de la extremidad. El material es ABS y será fabricado en una impresora 3D.

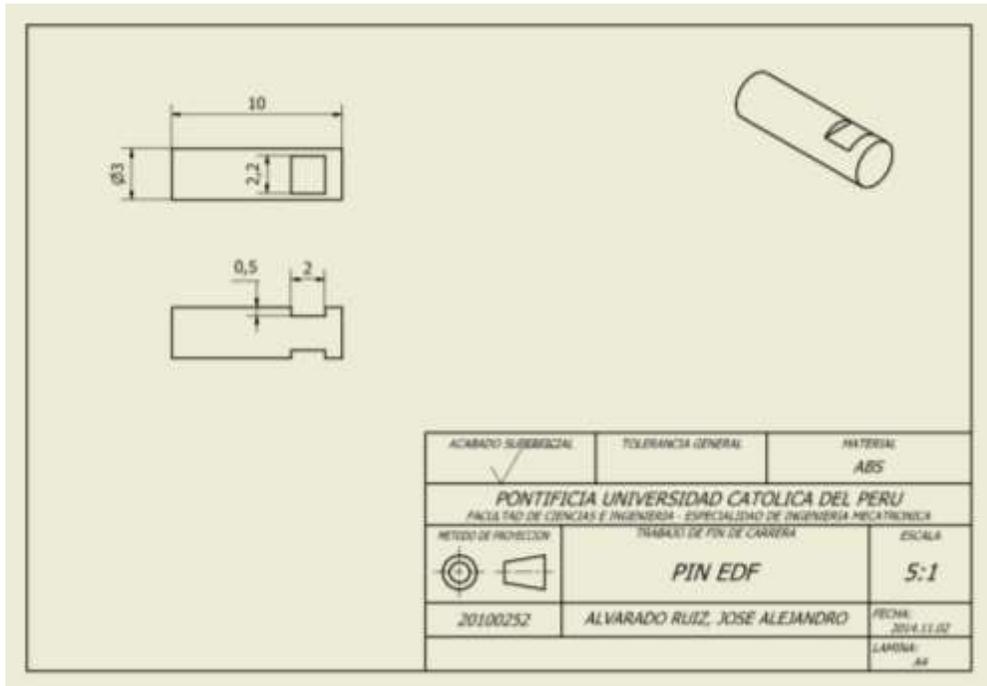


Figura 3.18: Plano del PIN EDF

### 3.4 Diagramas esquemáticos de los circuitos del sistema mecatrónico

En la presente propuesta se emplearán módulos integrados para los diversos controles.

#### Regulador de voltaje 5 Voltios 9 Amperios

Este integrado toma como entrada el voltaje de 11 V proveniente de la batería Lipoly y lo regula a una salida continua de 5V DC. La tarjeta ya está habilitada gracias a una resistencia “pull – up” en el integrado que conecta el pin de “ENABLE” al circuito. Se escoge este módulo para alimentar a los micro motores, ya que resiste el amperaje que estos consumirán (0.36 A x 4 = 1.44 amperios como máximo).

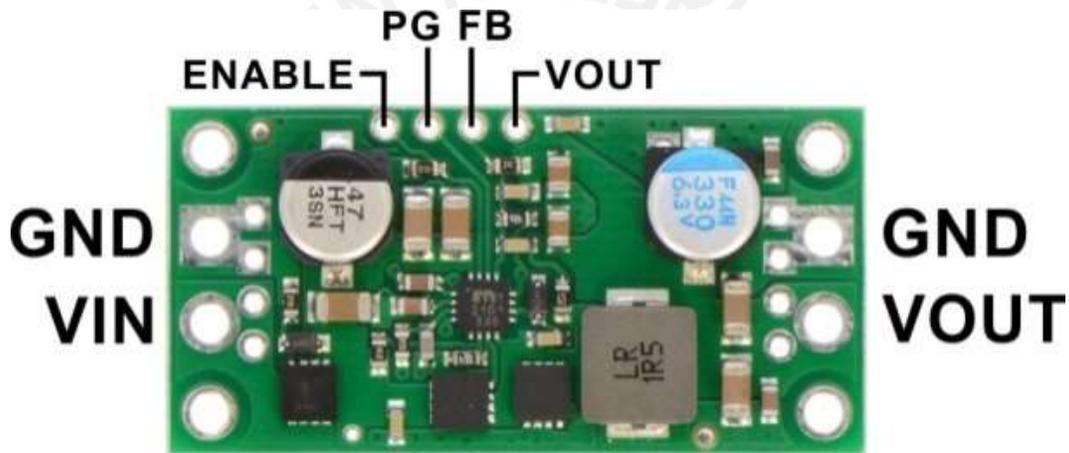


Figura 3.19: Entradas y salidas del regulador de voltaje 5V 9A. Fuente: POLOLU

Tabla 3.6: Especificaciones del regulador de voltaje D24V50F5. Fuente: POLOLU

Tamaño	1.6" × 0.8" × 0.3"
Peso	4.8 g
Voltaje de operación	5 – 38 V
Voltaje de salida	5 VDC
Protección ante voltaje de reversa	Si
Amperaje de salida continuo	9A

### Regulador de voltaje 5 Voltios 5 Amperios

Este integrado funciona igual como el presentado anteriormente; sin embargo, resiste solo 5A como máximo. La salida de 5 V de esta tarjeta será la encargada de alimentar todo el circuito de control: el microcontrolador, los controladores y los sensores.

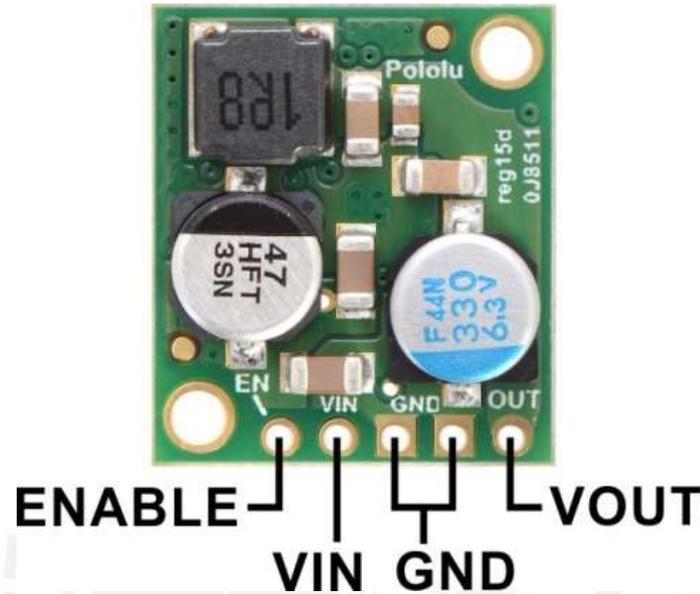


Figura 3.20: Entradas y salidas del regulador de voltaje 5V, 5A. Fuente: POLOLU

Tabla 3.7: Especificaciones del regulador de voltaje D24V90F5. Fuente: POLOLU

Tamaño	0.7" × 0.8" × 0.35"
Peso	3 g
Voltaje de operación	6 – 32 V
Voltaje de salida	5 VDC
Proteccion ante voltaje de reversa	Si
Amperaje de salida continuo	5A

Controladores de motores

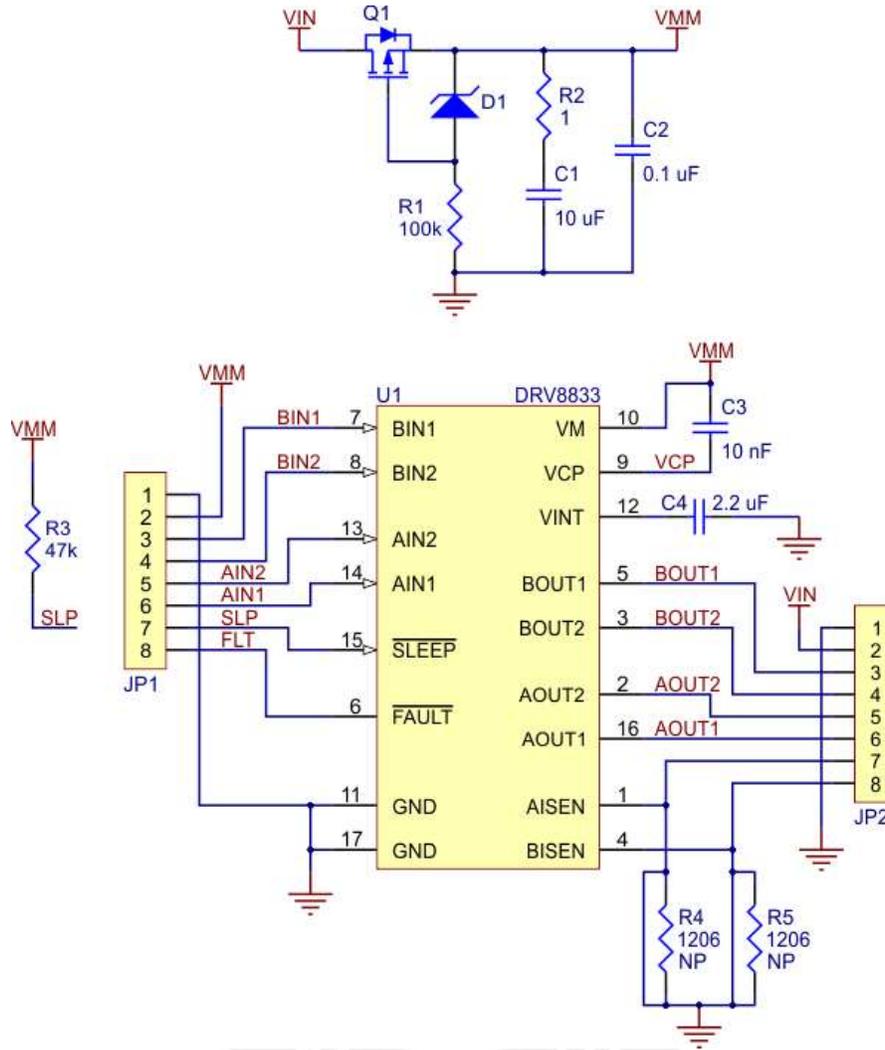


Figura 3.21: Diagrama esquemático del controlador de motor DVR8833. Fuente: POLOLU

Este controlador de motores usar el integrado DVR8833 de Texas Instrument, que contiene dos puentes H para controlar dos motores independientes. Las entradas de este están condicionadas para recibir voltaje lógico de 5V, mientras que la parte de potencia tiene su propia alimentación para los motores conectados.

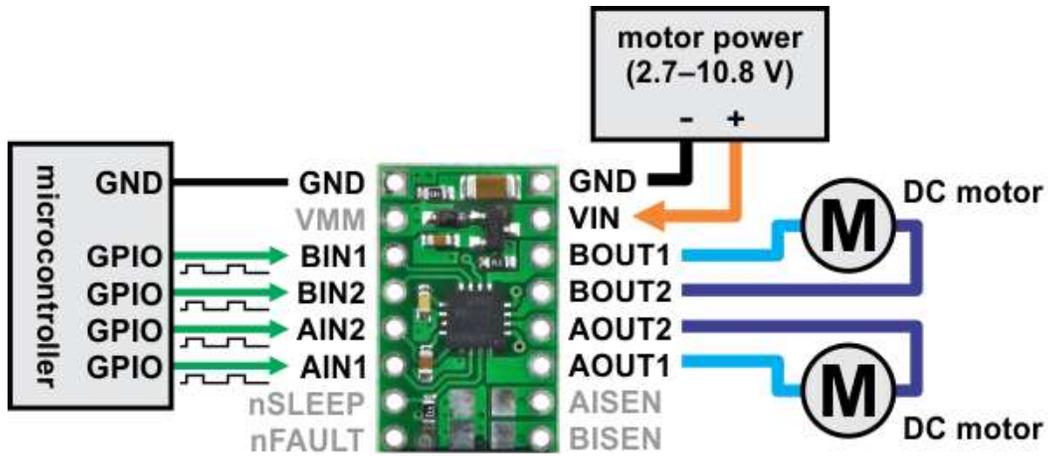


Figura 3.22: Diagrama de conexiones del controlador de motor DRV8833. Fuente: POLOLU

En la siguiente tabla se indica el funcionamiento de este integrado, la cual indica la función que realizara el motor de acuerdo a las posibles combinaciones de las entradas de control para cada canal. Las entradas pueden recibir una señal PWM, lo cual permitirá regular la velocidad del giro del motor si se requiere que esta sea menor a la nominal.

Tabla 3.8: Funcionamiento del puente H DVR8833

xIN1	xIN2	xOUT1	xOUT2	FUNCTION
0	0	Z	Z	Coast/fast decay
0	1	L	H	Reverse
1	0	H	L	Forward
1	1	L	L	Brake/slow decay

Tabla 3.9: Funcionamiento del puente H DVR8833 ante entradas PWM

xIN1	xIN2	FUNCTION
PWM	0	Forward PWM, fast decay
1	PWM	Forward PWM, slow decay
0	PWM	Reverse PWM, fast decay
PWM	1	Reverse PWM, slow decay

Tabla 3.10: Especificaciones del circuito integrado controlador de motores. Fuente: POLOLU

Dimensiones	0.5" × 0.8"
Peso	1 gramo
Canales	2
Voltaje de operación	2.7 – 10.8 V
Corriente de salida continua por canal	1.2 A
Corriente pico de salida por canal	2 A
Corriente de salida continua en paralelo	2.4 A
Protección ante voltaje de reversa	Si

### Controlador de velocidad electrónico (ESC)

Este controlador será el encargado de controlar los motores de los EDFs. Equipado con una circuitería que resiste alto amperaje (25 A), este controlador es capaz de controlar cuatro motores en un solo integrado. Para controlar el encendido y apagado de estos, cada uno tiene una entrada PWM de control. Este ESC tiene que ser previamente configurado con algunos parámetros importantes, como corriente de corte, freno, voltaje de corte, entre otros. Se ha seleccionado el controlador Q Brain 4 x 25A Brushless Quadcopter ESC 2-4S 3A SBEC dado que resiste el amperaje de los motores de los EDF con seguridad [15].

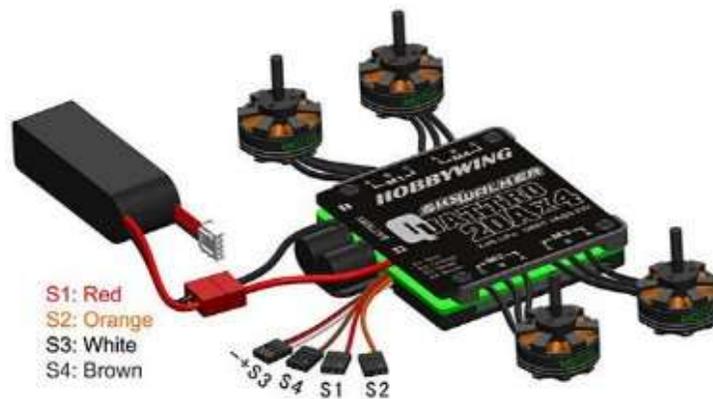


Figura 3.23: Conexiones del controlador de Velocidad Quattro. Fuente: HOBBYKING

Para ver más especificaciones de este módulo, ver Anexos 5 y 18.

A continuación, en la figura 3.24, se muestran el esquemático modular de todos los componentes del sistema mecatrónico, donde se especifican las entradas y salidas empleadas, con nombres y sus conexiones entre los distintos integrados.



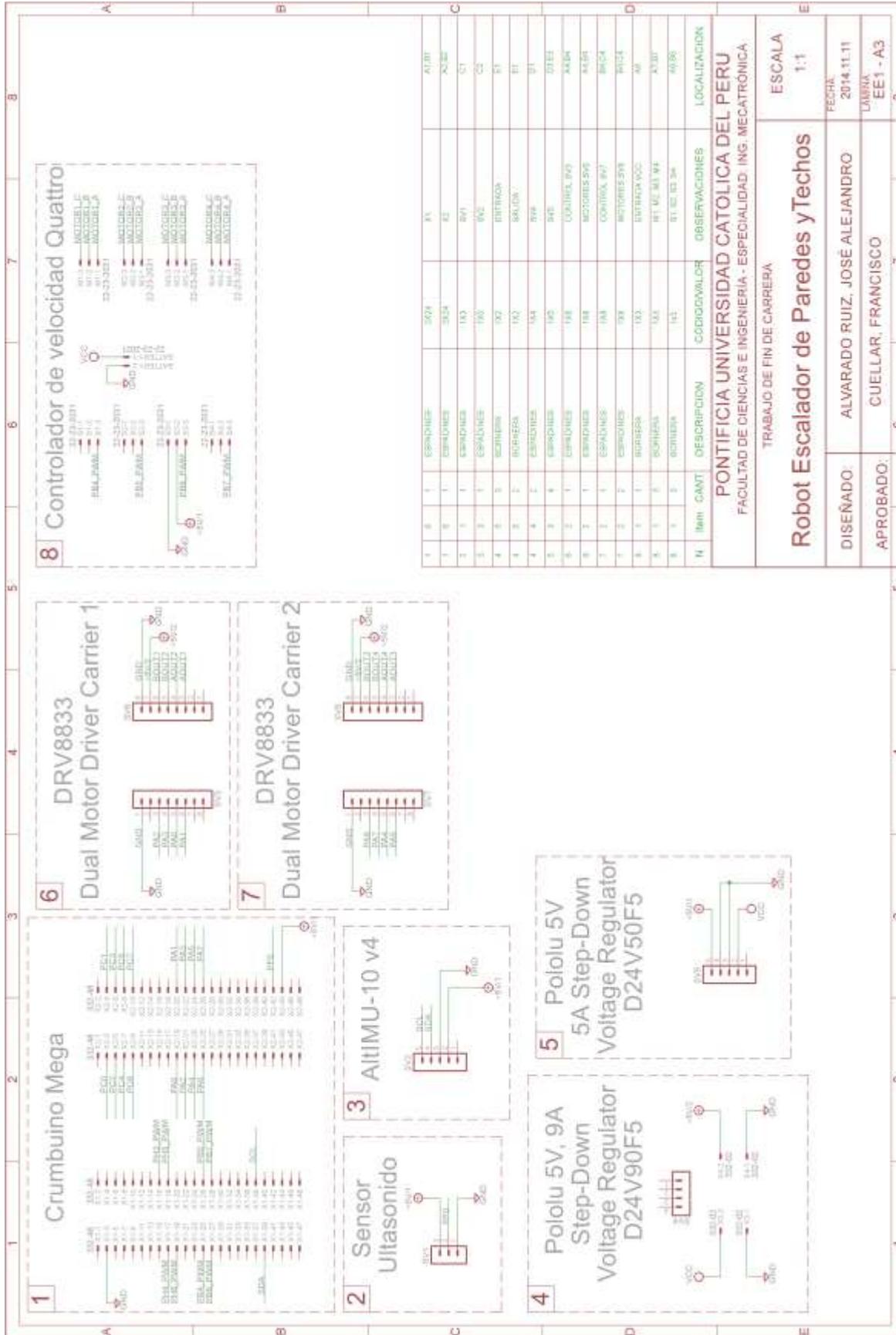


Figura 3.24: Diagrama esquemático modular

### 3.5 Diagrama de flujo del programa de control

La figura 3.25 muestra el diagrama de flujo del programa principal de control. El microcontrolador hace un escaneo constante (tiempo de muestreo de  $1\mu s$ ) de las entradas del receptor, el cual recibe comandos que el control remoto envía.

En primer lugar, se realiza la calibración del sistema mecatrónico. Para esto, se recomienda que el móvil escalador de paredes se encuentre en una superficie plana horizontal. En este paso, se calibra el módulo de sensado inercial y se posiciona las extremidades en forma horizontal. Luego, se verifica si el control remoto de RF ha habilitado la función de movimiento y la función para activar los EDFs con los interruptores de dos estados que este posee. Luego, revisa si se ha mandado alguna de las señales que causarán un movimiento en el móvil: avanzar, girar a la derecha, girar a la izquierda, retroceder o cambiar de plano. De ser así, se entrará en el sub programa de la función activada; de lo contrario, regresará a verificar todas las entradas en un loop infinito, hasta que algún comando sea enviado por el usuario.

La figura 3.26 presenta el sub programa “Avanzar”. Este solo podrá funcionar si se encuentra habilitado el movimiento del vehículo (comando que se envía desde el control remoto, y se verifica en el programa principal). Este sub programa hace uso del sensor de ultrasonido, para verificar si es posible avanzar (se cerciora si existe o no presencia de un obstáculo en frente del sistema mecatrónico). De no encontrar impedimento alguno, configura los pines de salida para que la tarjeta controladora de los micro motores accione los motores y avance el móvil. Este movimiento continúa hasta que el usuario deje de enviar la señal de avance, o cuando se encuentre un obstáculo frente al móvil. Finalizado el movimiento, se regresa al programa principal.

En la figura 3.27 se muestra el sub programa “Girar Derecha”. Su funcionamiento y lógica son iguales a las del sub programa “Avanzar”: solo funciona si se encuentra habilitado el movimiento, gira si no hay una pared en frente suyo, y se detiene cuando cesa la señal del control remoto o encuentra un obstáculo mientras gira. Para que el móvil realice esta acción, los motores de la izquierda giran en sentido horario, mientras que los de la derecha, en sentido antihorario.

En la figura 3.28 se encuentra el diagrama de flujo del sub programa “Girar Izquierda”. Tiene la misma lógica que el sub programa “Girar Derecha”, con la única diferencia de que este

configura los pines de salida del microcontrolador para que el móvil realice un giro anti horario sobre su centro: motores de la izquierda giran en sentido antihorario, y los de la derecha, en sentido horario.

El sub programa “Retroceder” se puede apreciar en la figura 3.29. Este configura las tarjetas controladoras de los motores para que estos giren y el móvil retroceda. Dado que no se cuenta con un sensor ultrasónico en la parte trasera del móvil, este movimiento debe ser controlado por el usuario en todo momento.



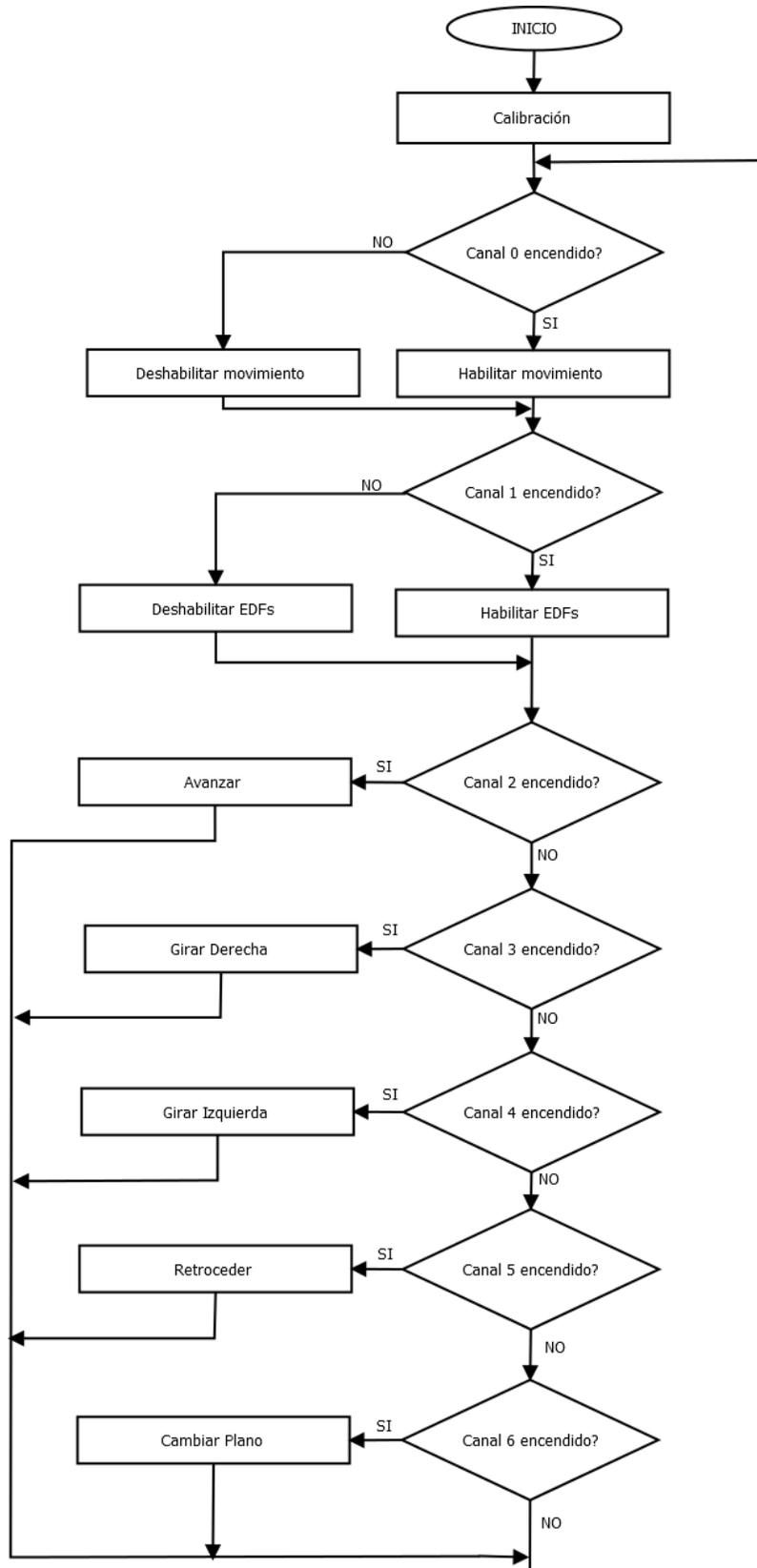


Figura 3.25: Diagrama de flujo del programa principal

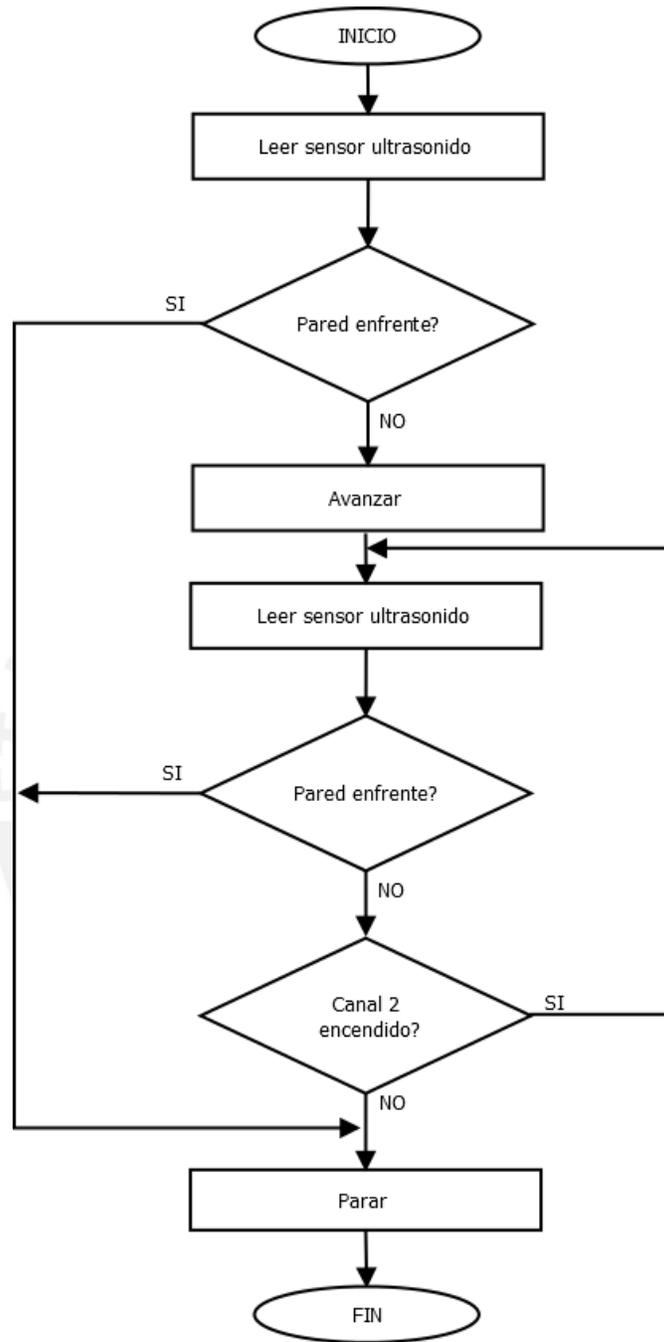


Figura 3.26: Sub programa "Avanzar"

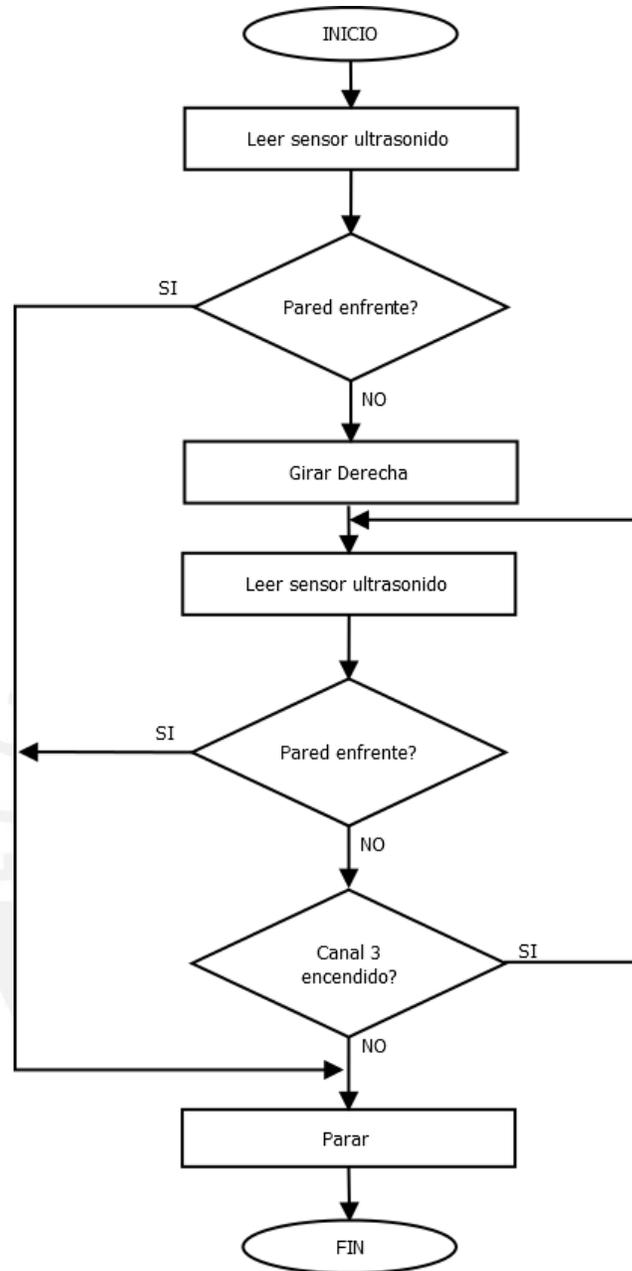


Figura 3.27: Sub programa “Girar Derecha”

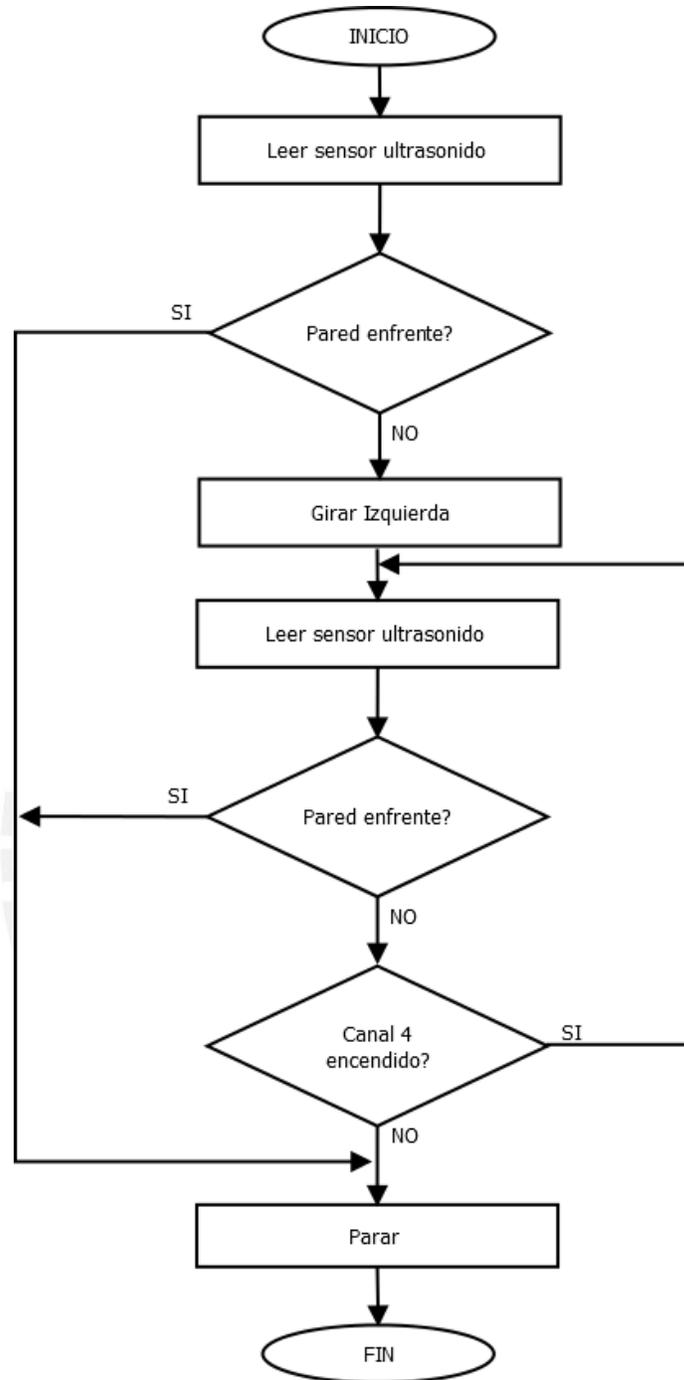


Figura 3.28: Sub programa “Girar Izquierda”

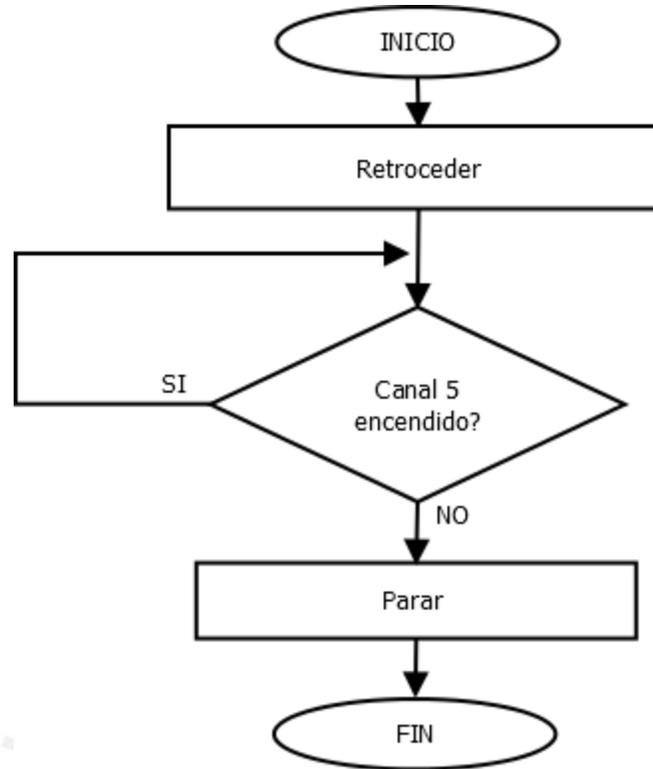


Figura 3.29: Sub programa "Retroceder"

El siguiente subprograma es el llamado "Cambiar Plano" (Figura 3.30). Este contiene la lógica de los pasos que se seguirán para que el móvil se adecue a una superficie perpendicular a la que se encontraba inicialmente. Ante todo, el programa solo se ejecuta si existe un obstáculo (pared) en frente de este. El sensor de ultrasonido verifica si esta condición se cumple y se toma una decisión. De encontrarse junto a la otra pared, se ejecuta la siguiente secuencia: apagar un EDF, girar el servomotor de la extremidad cuyo motor fue apagado, para estar paralelo a la nueva superficie, y prender el EDF. Luego de que las dos extremidades frontales se encuentren en posición, se ejecuta el sub programa "Avance y Giro Lento", cuya explicación se conocerá más adelante. Al final de este paso, las extremidades posteriores se encuentran en posición para realizar el cambio de plano de movimiento, y se ejecuta la misma secuencia por la que pasaron las dos primeras extremidades. Al finalizar, el móvil giró 90 grados y se encuentra adherido a la nueva superficie.

El sub programa "Avance y Giro Lento" realiza una sincronización del movimiento de las ruedas del móvil y del giro de los servomotores para que estén siempre paralelas a la superficie de

destino. Se lee el girómetro instalado en la tarjeta de sensado inercial, para así conocer la posición en el espacio del móvil en ese instante de tiempo, y con ello calcular la onda PWM que se debe enviar al servomotor para posicionarse en un ángulo deseado. Cabe resaltar que el “avance lento” consiste en enviar ondas PWM con un “duty cycle” de 20% a los controladores de motores, para así obtener un giro de estos más lentos que el nominal.



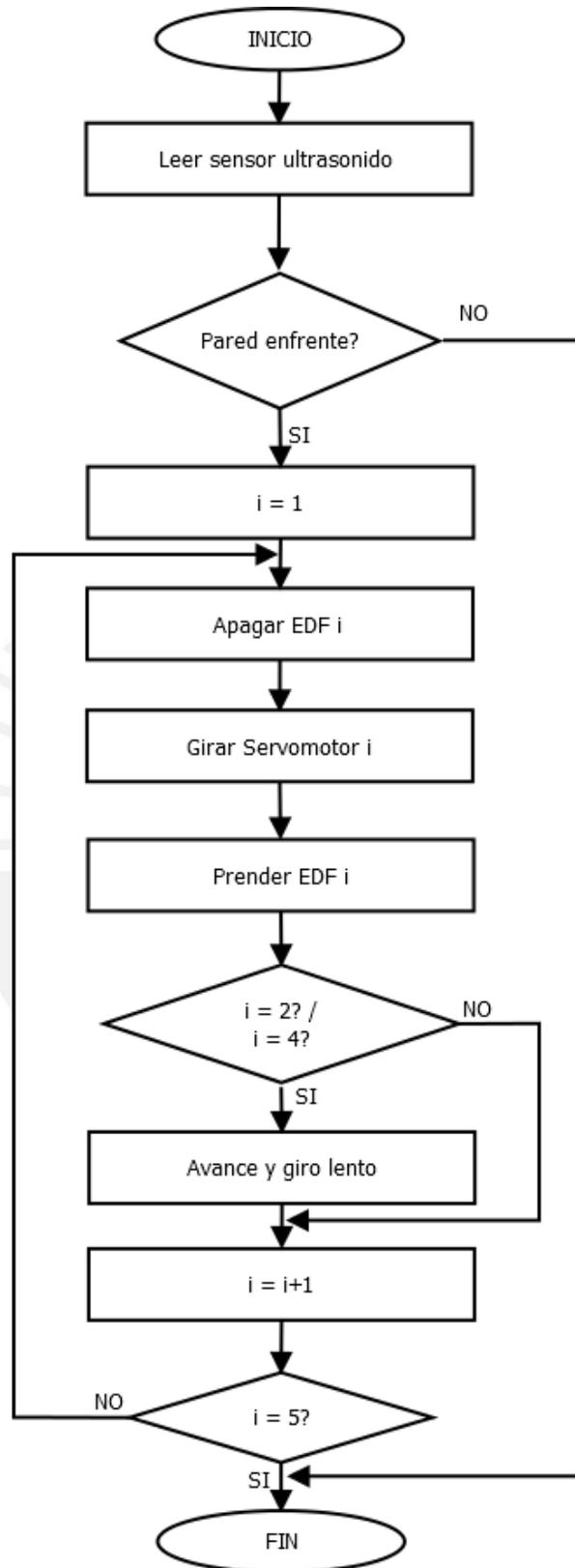


Figura 3.30: Sub programa "Cambiar Plano"

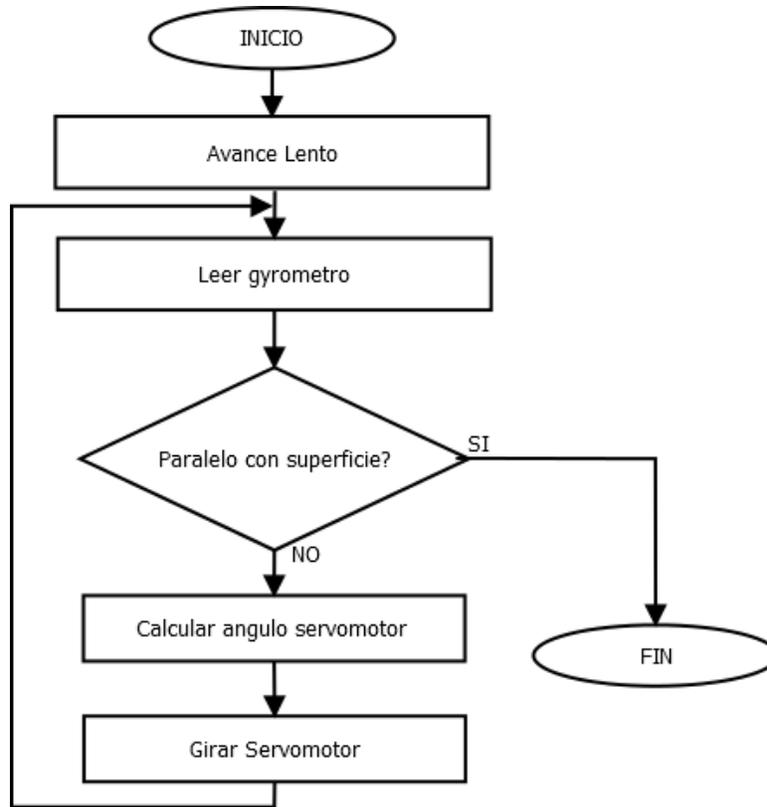


Figura 3.31: Sub programa “Avance y giro lento”

## Capítulo 4: Presupuesto

Se presentan a continuación, todos los componentes electrónicos necesarios para la fabricación de este sistema mecatrónico.

Tabla 4.1: Presupuesto para importación de componentes electrónicos.

Ítem	Precio	Cantidad	Subtotal	Proveedor
AltIMU-10 v4 Gyro, Accelerometer, Compass, and Altimeter (L3GD20H, LSM303D, and LPS25H Carrier)	\$ 27.95	1	\$ 27.95	Pololu
Sharp GP2Y0A41SK0F Analog Distance Sensor 4-30cm	\$ 5.95	1	\$ 5.95	Pololu
298:1 Micro Metal Gearmotor HP	\$ 15.95	4	\$ 63.80	Pololu
Pololu Micro Metal Gearmotor Bracket Pair – Black	\$ 4.99	2	\$ 9.98	Pololu
Power HD High-Speed Digital Micro Servo DSM44	\$ 12.95	4	\$ 51.80	Pololu
DRV8833 Dual Motor Driver Carrier	\$ 4.95	2	\$ 9.9	Pololu
Pololu Wheel 70x8mm Pair - Black	\$ 8.49	2	\$ 16.98	Pololu
High-Traction Sticky Tire (one tire)	\$ 3.25	4	\$ 13.00	Pololu
Machine Hex Nut: #2-56 (25-pack)	\$ 0.99	1	\$ 0.99	Pololu
Machine Screw: #2-56, 1/4" Length, Phillips (25-pack)	\$ 0.99	1	\$ 0.99	Pololu
Pololu 5V, 9A Step-Down Voltage Regulator D24V90F5	\$ 27.95	1	\$ 27.95	Pololu
Pololu 5V, 5A Step-Down Voltage Regulator D24V50F5	\$ 14.95	1	\$ 14.95	Pololu
0.100" (2.54 mm) Breakaway Male Header: 2x40-Pin, Straight	\$ 1.95	2	\$ 3.90	Pololu
EDF55 with H300 Motor Assembled 199.8W	\$ 14.95	4	\$ 59.80	HobbyKing
Turnigy nano-tech A-SPEC G2 2200mah 3S 65~130C Lipo Pack	\$ 30.20	1	\$ 30.20	HobbyKing

XT60 Harness for 2 Packs in Parallel (1pc)	\$ 2.31	1	\$ 2.31	HobbyKing
XT60 Harness for 2 Packs in Parallel (1pc)	\$ 2.39	1	\$ 2.39	HobbyKing
Q Brain 4 x 25A Brushless Quadcopter ESC 2-4S 3A SBEC	\$ 33.68	1	\$ 33.68	HobbyKing
TURNIGY BESEC Programming Card	\$ 6.91	1	\$ 6.91	HobbyKing
IMAX B6-AC Charger/Discharger 1-6 Cells (GENUINE)	\$ 36.99	1	\$ 36.99	HobbyKing
Futaba 14SG 14-Channel 2.4GHz Computer Radio System 2.4GHz FASSTest (Set) (Mode 1)	\$ 589.94	1	\$ 589.94	HobbyKing

Subtotal	\$ 1010.36
Transporte	\$ 100
Impuestos	30%
<b>TOTAL COMPONENTES ELECTRONICOS</b>	<b>\$ 1443.47</b>

Piezas mecánicas:

Serán fabricadas vía impresión 3D

Tabla 4.2: Presupuesto de fabricación de componentes mecánicos

Pieza	Precio Unitario	Cantidad	Sub Total	Material/Impresora
Cuerpo Frontal	S/. 76.1	1	S/. 76.1	MAKER/ABS
Cuerpo Trasero	S/. 43.5	1	S/. 43.5	MAKER/ABS
Extremidad	S/. 32	4	S/. 128	MAKER/ABS
Pin	S/. 2	1	S/. 2	MAKER/ABS
Pin Sujetado EDF	s/. 0.50	8	S/. 4	MAKER/ABS
<b>TOTAL</b>			<b>S/. 253.6</b>	

Microcontrolador

Tabla 4.3: Importación del microcontrolador Crumbuino-Mega

Ítem	Precio	Cantidad	Subtotal	Proveedor
Crumbuino-Mega ATmega2560 Module (Arduino-compatible)	37.82 €	1	37.82 €	Chip45

Subtotal	37.82 €
Gastos de envío	15.00 €
Impuestos	30%
<b>TOTAL CRUMBUINO MEGA</b>	<b>68.67 €</b>

En la tabla a continuación, se presenta el total a invertir para la fabricación del sistema mecatrónico.

Tabla 4.4: Total del presupuesto

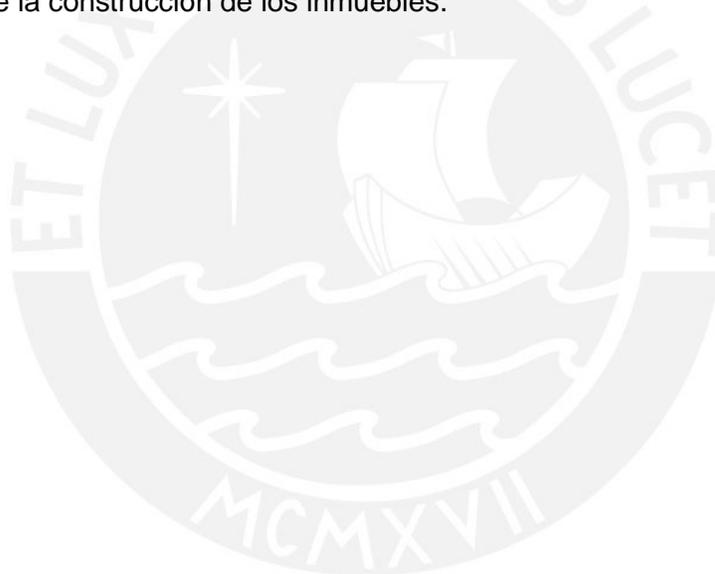
	Subtotal	Tipo de cambio	Subtotal Nuevos Soles
Componentes Electrónicos	\$ 1443.47	2,962	S/. 4245.94
Piezas Mecánicas	S/. 253.6	1	S/. 253.6
Crumbuino Mega	68.67 €	3,63059	S/. 249.27
	<b>TOTAL</b>		<b>S/. 4748.81</b>

## Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

- Se diseñó el móvil con la capacidad de movilizarse por paredes laterales, superiores y poder cambiar de plano de movimiento entre estas superficies. Esto lo convierte en un móvil capaz de desplazarse en un ambiente 3D con ciertas limitaciones. Esta acción podría ser útil para enviar al móvil a lugares poco accesibles, como esquinas internas en un ambiente de construcción civil, con el fin de realizar trabajos de inspección en dicha zona.
- Un sistema de retroalimentación de posición permite que el móvil conozca su ubicación en el espacio y permita tomar decisiones de cómo debe efectuar la tarea designada para garantizar el correcto funcionamiento y seguridad del sistema mecatrónico. El móvil debe efectuar varias acciones sincronizadas, que movimientos temporizados tendrían dificultad para coordinar, como la acción para cambiar de plano de movimiento. Al usar el sistema de sensado inercial, se conoce la posición en el espacio del móvil, y con una serie de comandos proporcionales al giro de todo el vehículo, se adecua la velocidad de la rotación del servomotor y de las ruedas para lograr este movimiento de forma segura.
- Este móvil tiene como fin llegar a lugares de difícil acceso para un ser humano, para así realizar alguna inspección o ensayo no destructivo a la superficie donde se encuentra. El móvil escalador de paredes laterales y superiores cuenta con un espacio libre que podría alojar un sensor que permita realizar estas actividades de reconocimiento. Con una capacidad de carga de 250 gramos como máximo (Ver anexo 10), hay una variedad de sensores en la actualidad que en este sistema mecatrónico puede tener instalado.
- Una cámara termográfica podría ser montada en el robot, y permitiría efectuar ensayos no destructivos con seguridad a las superficies donde el sistema mecatrónico se moviliza. La “Seek Thermal” [16] y la “FLIR ONE” [17] son cámaras portátiles que el vehículo propuesto podría albergar. Conectadas a un teléfono inteligente, estas

cámaras son capaces de registrar imágenes termográficas de las estructuras para visualizar grietas internas, espacios vacíos en las paredes y verificar presencia de fierro de construcción. Dado que estas cámaras requieren estar cerca de la superficie para obtener una mejor lectura, el móvil escalador de paredes laterales y superiores habilitaría la posibilidad de aproximar este instrumento, realizaría la lectura y enviaría la información vía comunicación inalámbrica a un centro de comando gracias a la tecnología del teléfono inteligente.

- En un futuro, los sensores que realicen la lectura en los higrómetros o *pachometers* podrán ser separados de estos, y al montarlos en el móvil, se podrán obtener otras propiedades del concreto de construcción y adquirir más datos que servirán para la seguridad de la construcción de los inmuebles.



## Bibliografía

- [1] «Lima albergará a 2,4 millones de nuevos hogares en 20 años,» *El Comercio*, 05 Setiembre, 2014.
- [2] «Inmobiliarias deben reconvertirse para atender a la clase media,» *El Comercio*, 26 Agosto 2014.
- [3] Coltrols. s.r.l, *Ensayos en hormigon*, 2014. [En línea]. Available: <http://www.controls-group.com/eng/technical-papers/catalogues/>. [Último acceso: 15 Octubre, 2014].
- [4] I. Cañas y J. Fuentes, *MÉTODOS DE ENSAYO NO DESTRUCTIVO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN*, Septiembre 2008. [En línea]. Available: <http://www.unizar.es/aeipro/finder/INGENIERIA%20CIVIL%20Y%20PLANEAMIENTO/HE01.htm>. [Último acceso: 15 Octubre 2014].
- [5] A. Giménez, «Metodología de diseño y control de robots escaladores. Aplicación a tareas de inspección». Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2000.
- [6] S. Fuentes, «Climb@Tron R.E.X., el robot escalador,» Septiembre 2007. [En línea]. Available: <http://www.xataka.com/robotica/climbtron-rex-el-robot-escalador>. [Último acceso: 22 Agosto 2014].
- [7] L. Operative RC, «IBEX,» [Online]. Available: <http://www.operativerc.com/products-ibex.html>. [Last Access: 2014 September 10].
- [8] «StickyBot,» Stanford University, 11 February 2011. [Online]. Available: <http://bdml.stanford.edu/twiki/bin/view/Rise/StickyBot>. [Last Access: August 2014].
- [9] «StickyBot III,» Stanford University, 24 May 2011. [Online]. Available: <http://bdml.stanford.edu/twiki/bin/view/Rise/StickyBotIII.html>. [Last Access: August 2014].
- [10] «RiSE Project,» 2004. [Online]. Available: <http://kodlab.seas.upenn.edu/~rise/newsite/>. [Last Access: 9 September 2014].
- [11] R. Quintero, «Robot Escalador de Paredes - Wall Climbing Robot,» Youtube, 13 October 2011. [En línea]. Available: <http://www.youtube.com/watch?v=TvYaDsMAyog>. [Último acceso: August 2014].
- [12] «Electroadhesive Surface-Climbing Robots,» SRI International, 2014. [Online]. Available: <http://www.sri.com/engage/products-solutions/electroadhesive-surface-climbing-robots>. [Last Access:

7 September 2014].

- [13] X. Sandoval, M. Garcia, L. Perez y E. Castillo, *Kinematics of Hex-Piderix - A Six-Legged*, INTECH, 2012.
- [14] B. Galan, D. Guillen y D. Tello, "Estudio, diseño y construcción de una pata para un robot cuadrúpedo escalador," Tesis de Bachillerato, Facultad de Ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2009.
- [15] R. Mentor, «ESC Selection guide,» February 2012. [Online]. Available: <http://rcmentor.com/escselection/>. [Last Access: October 2014].
- [16] S. T. Inc., «Seek Thermal,» Seek Thermal INC, 2014. [Online]. Available: [http://thermal.com/what\\_is\\_thermal\\_desktop.html](http://thermal.com/what_is_thermal_desktop.html). [Last Access: 1 November 2014].
- [17] F. S. Inc., «FLIR ONE,» FLIR® Systems, Inc., 2014. [Online]. Available: <http://www.flir.com/flirone/>. [Last Access: 1 November 2014].

