

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



Diseño de un robot móvil prototipo para la implementación de un algoritmo de seguimiento de trayectorias mediante motores sin escobillas con control vectorial

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

Patricia Monica Villarreal Giraldo

ASESOR: MSc. Ing. Pablo Cárdenas Cáceres

Lima, agosto de 2022

RESUMEN

En el campo de la teleoperación robótica, los robots móviles son empleados como dispositivos esclavos para realizar tareas a largas distancias en lugares peligrosos e inaccesibles por el humano, ello debido a que, en un sistema de teleoperación existe un dispositivo maestro (operado por un ser humano), que replica movimientos en el dispositivo esclavo a través de un joystick, una computadora o un dispositivo cuyos comandos de control de movimiento son transmitidos por un medio alámbrico o inalámbrico; Sin embargo, cuando la distancia entre el robot móvil y el dispositivo maestro supera el límite de comunicación y, sobre todo, el límite de control, el dispositivo esclavo podría perderse e incluso en un lugar inaccesible por el humano, ya que el impacto negativo de la inestabilidad, que se produce por los retardos en el intercambio de información, actúa sobre el robot móvil. Ante dicha pérdida de control resulta relevante que el robot móvil pueda retornar a su estación base de forma autónoma, es por ello que, implementar un algoritmo de seguimiento de trayectorias surge como una alternativa para que el robot móvil regrese al lugar donde se encuentra el usuario para evitar su pérdida e incrementar su robustez. La presente tesis hace una revisión teórica de los robots móviles que se han presentado en artículos académicos e investigaciones para seguir trayectorias cuando surge la pérdida de control en los sistemas de teleoperación robótica. Además, se plantea utilizar motores sin escobillas como mecanismo para realizar trabajo mecánico y producir movimiento en la locomoción diferencial del robot móvil. En efecto, el control en motores diferentes a los de corriente continua implica emplear nuevas técnicas de control, como el control vectorial. Por último, el funcionamiento del prototipo del robot móvil con la implementación de un algoritmo de seguimiento de trayectorias mediante motores sin escobillas con control vectorial, se valida en simulaciones realizadas en Matlab y Simulink.



A mi abuela Amada, mi segunda madre



¡Gracias!

A mi familia, por el constante apoyo y la confianza. A mis amigos, por el compañerismo sincero durante la etapa universitaria. A mi asesor y a todos los profesores de la facultad de Ingeniería Electrónica, por las enseñanzas. A Dani, por las risas y el inmenso cariño.

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras	1
Índice de tablas	3
Introducción	4
Capítulo 1: Importancia de los robots móviles que siguen trayectorias y problemática	6
1.1. Motivación.....	7
1.2. Marco histórico.....	8
1.3. Justificación.....	12
1.4. Objetivos	13
1.4.1. Objetivo general.....	13
1.4.2. Objetivos específicos	13
1.5. Alcance de la tesis	13
Capítulo 2: Fundamentos teóricos para el diseño de un robot móvil con motores sin escobillas	14
2.1. Marco teórico.....	14
2.1.2. Configuración y disposición de las ruedas del robot móvil.....	15
2.1.3. Modelo cinemático del robot móvil.....	16
2.1.4. Algoritmo de seguimiento de trayectorias	17
2.1.1. Control vectorial.....	19
2.2. Marco metodológico	23

Capítulo 3: Diseño del robot móvil con motores sin escobillas	24
3.1. Elaboración de la lista de exigencias.....	24
3.2. Elaboración de la estructura de funciones.....	26
3.3. Elaboración de la alternativa de solución óptima	29
3.4. Diseño definitivo del robot móvil.....	35
3.4.1. Diseño del dominio electrónico	35
3.4.2. Diseño del dominio mecánico.....	47
3.4.3. Diseño del dominio de control	48
Capítulo 4: Análisis y simulaciones	55
4.1. Validación del diseño del dominio de control.....	55
4.1.1. Simulación del algoritmo de control vectorial	56
4.1.2. Simulación del algoritmo de seguimiento de trayectorias.....	66
Conclusiones	69
Recomendaciones	70
Bibliografía	71
Anexos	

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Robot móvil de configuración diferencial
- Figura 2.** Robot móvil de tracción diferencial
- Figura 3.** Robot móvil con el punto de control desplazado a una distancia 'a'
- Figura 4.** Circuito equivalente del motor de corriente continua
- Figura 5.** Diagrama de bloques del control vectorial de velocidad para un motor sin escobillas
- Figura 6.** Representación de caja negra del robot móvil
- Figura 7.** Diagrama de la estructura de funciones del robot móvil
- Figura 8.** Bosquejo de la primera alternativa de color verde
- Figura 9.** Bosquejo de la segunda alternativa de color naranja
- Figura 10.** Bosquejo de la tercera alternativa de color azul
- Figura 11.** Modelo de solución definitivo
- Figura 12.** Diagrama de fuerzas de una rueda del robot móvil
- Figura 13.** Diagrama esquemático del circuito total de un motor sin escobillas
- Figura 14.** Modelado 3D de la tarjeta PCB – capa superior
- Figura 15.** Modelado 3D de la tarjeta PCB – capa inferior
- Figura 16.** Vistas principales del robot móvil. Elaboración Propia
- Figura 17.** Modelo cinemático del robot móvil de tracción diferencial
- Figura 18.** Función de transferencia del motor sin escobillas en el eje directo (d)
- Figura 19.** Función de transferencia del motor sin escobillas en el eje (q)
- Figura 20.** Diseño del sistema de control de corriente (i_d)
- Figura 21.** Respuesta del sistema de control de corriente (i_d)
- Figura 22.** Lugar geométrico de raíces de la planta de corriente (i_d)

- Figura 23.** Sistema de control de velocidad en cascada
- Figura 24.** Lugar geométrico de raíces de la planta de velocidad (ω)
- Figura 25.** Respuesta del sistema de control de velocidad
- Figura 26.** Diagrama de simulación de algoritmos de control vectorial para un motor sin escobillas
- Figura 27.** Respuesta del control vectorial ante una entrada de 60rad/s
- Figura 28.** Descripción de valores obtenidos de la respuesta de velocidad a 60 rad/s
- Figura 29.** Respuesta del control vectorial ante una entrada de 75 rad/s
- Figura 30.** Respuesta del control vectorial ante una entrada de 100 rad/s
- Figura 31.** Voltaje requerido para alcanzar la referencia de 60 rad/s
- Figura 32.** Corriente requerida para alcanzar la referencia de 60 rad/s
- Figura 33.** Respuesta del control vectorial ante una entrada de 5 rad/s
- Figura 34.** Respuesta del control vectorial ante una entrada de 1 rad/s
- Figura 35.** Voltaje requerido para alcanzar la referencia de 5 rad/s
- Figura 36.** Corriente requerida para alcanzar la referencia de 5 rad/s
- Figura 37.** Respuesta de velocidad de una referencia de 55 rad/s
- Figura 38.** Voltaje requerido para alcanzar la referencia de 55 rad/s
- Figura 39.** Corriente requerida para alcanzar la referencia de 55 rad/s
- Figura 40.** Diagrama de simulación para un algoritmo de seguimiento de trayectorias
- Figura 41.** Trayectoria circular deseada y obtenida
- Figura 42.** Trayectoria deseada y obtenida realizada por tramos

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1.** Lista de exigencias del diseño del robot móvil
- Tabla 2.** Matriz morfológica del robot móvil
- Tabla 3.** Evaluación técnica
- Tabla 4.** Evaluación económica
- Tabla 5.** Datos necesarios para el diseño de un robot móvil
- Tabla 6.** Características de los motores sin escobillas (Parte 1)
- Tabla 7.** Características de los motores sin escobillas (Parte 2)
- Tabla 8.** Tabla comparativa de dispositivos de conmutación
- Tabla 9.** Tabla comparativa de drivers de potencia comerciales
- Tabla 10.** Tabla comparativa de sensores de posición angular
- Tabla 11.** Tabla comparativa de bus CAN (Parte 1)
- Tabla 12.** Tabla comparativa de bus CAN (Parte 2)
- Tabla 13.** Tabla comparativa de microcontroladores comerciales (Parte 1)
- Tabla 14.** Tabla comparativa de microcontroladores comerciales (Parte 2)
- Tabla 15.** Características de la batería Ion Litio
- Tabla 16.** Señales de voltaje en las tres fases del motor (referencia 60 rad/s)
- Tabla 17.** Señales de corriente en las tres fases del motor (referencia 60 rad/s)
- Tabla 18.** Características de las señales de voltaje en las tres fases del motor para una referencia de 55 rad/s
- Tabla 19.** Características de las señales de corriente en las tres fases del motor para una referencia de 55 rad/s

INTRODUCCIÓN

La constante investigación tecnológica ha permitido a la teleoperación robótica realizar diversas operaciones, tales como la desactivación de bombas, telemedicina, navegación espacial, manipulación de residuos tóxicos e incluso la limpieza de zonas afectadas por enfermedades infecciosas.

Un sistema de teleoperación se caracteriza porque está formado por un dispositivo maestro (operado por un humano) que envía comandos, a través de una línea de comunicación a un dispositivo esclavo (p. ej. brazo robótico, robot móvil, manipuladores móviles). Sin embargo, los problemas debido al retraso de transmisión de información o latencia, que son importantes para el diseño del sistema de control de teleoperación, pueden convertirse en un problema cuando el manipulador maestro y el dispositivo esclavo se encuentran a una distancia muy lejana [1], debido a que se perdería la comunicación y desorientaría al dispositivo esclavo en la realización de tareas, o lo que sería peor, se perdería el robot móvil en el lugar inaccesible por el humano.

La teleoperación robótica es un sistema que involucra componentes fundamentales para hacer tareas a distancia. Por un lado, la estación local es un lugar donde el operador humano utiliza dispositivos manuales (denominados maestros) para controlar a dispositivos remotos (denominados esclavos). Por otro lado, dichos dispositivos esclavos se encuentran en la estación remota, donde interactúan con el entorno para realizar tareas específicas. Ambas estaciones están conectadas mediante una línea de comunicación, permitiendo así el intercambio de información, que naturalmente está sujeta a posibles pérdidas de información, retardos de transmisión o latencias durante la ejecución de la tarea [2].

Nof [3], citado por Barrientos et al. [4], encontró una primera definición de la NASA de los robots teleoperados como aquellos “dispositivos con brazos manipuladores [...] controlados remotamente por un operador humano de manera directa o a través de un ordenador”. En resumen, se evidencia la exclusión de los robots que no tengan la capacidad de manipular objetos a pesar de ser operados de manera remota [4]. Las aplicaciones más resaltantes de estos manipuladores estáticos operados a distancia son en cirugías no invasivas, pues no solo se garantiza seguridad en los procedimientos, sino que permiten expandir las capacidades del operador [5], así también en microteleoperación, que permiten la manipulación de objetos pequeños en dimensiones escaladas [6].

Es importante notar que, si bien los sistemas teleoperados consideran como dispositivos esclavos a los robots estáticos, como se mencionó, la teleoperación robótica ya se extiende hasta la inclusión de robots móviles.

Como muestra de ello, es el manipulador móvil, sistema conformado por uno o más brazos robóticos montados sobre un robot móvil. Dicha configuración es capaz de combinar la manipulación (mediante algoritmos complejos de teleoperación de manipuladores o brazos robóticos) y locomoción (mediante algoritmos de seguimiento de trayectorias para robots móviles) en un solo sistema [7].

En efecto, entre las ventajas se incluyen la precisión, seguridad y versatilidad de los manipuladores estáticos descritos anteriormente, pero sobre todo permite incrementar el área de trabajo del manipulador debido al transporte de la plataforma móvil que lo traslada, obteniéndose así mejores posiciones para la realización de tareas.



CAPÍTULO 1

IMPORTANCIA DE LOS ROBOTS MÓVILES QUE SIGUEN TRAYECTORIAS Y PROBLEMÁTICA

El capítulo 1 está compuesto por la motivación, el marco histórico, la justificación y los objetivos de la tesis. La motivación contempla una breve descripción de la problemática, el marco histórico hace un análisis de los métodos que se han empleado en el pasado para resolver la problemática, en la justificación se explica por qué se usarán los fundamentos teóricos para realizar la tesis; finalmente, se describe el objetivo general y los objetivos específicos para desarrollar la tesis.

1.1. Motivación

Durante la aparición del ébola (2014), The White House Office of Science and Technology Policy (OSTP) and the National Science Foundation (NSF) reconocieron tres áreas en las que los robots pueden desarrollarse notablemente: el cuidado clínico, la logística y el reconocimiento [8]. En particular, el servicio de los manipuladores móviles teleoperados en medio de crisis sanitarias, como la COVID-19, resulta vital para tareas en las que se requiere una hábil manipulación, debido a que pueden acelerar el proceso de toma de muestras a personas posiblemente enfermas, de esa manera, evitarían que profesionales médicos estén expuestos al virus, a pesar de que usen un buen equipo de protección [9].

Otro aspecto vital es su respuesta en la desinfección de superficies mediante la manipulación de residuos nocivos y contagiosos para el ser humano. Por ello, una alternativa a la limpieza de hospitales, hogares vulnerables y en general espacios públicos, es el aliado robótico que la empresa alemana Siemens, en colaboración con Aucma Company Limited, ha desarrollado para ayudar a combatir la epidemia de la COVID-19. Se trata de un robot eléctrico de ruedas tipo oruga, que combina una pistola de doble atomizador para desinfectar áreas de hasta 36 metros cuadrados por hora. Adicionalmente, cuenta con una cámara que transmite información en tiempo real al operador, ayudándole así, a localizar áreas afectadas de forma remota ¹. Por consiguiente, International Federation of Robotics menciona que la ayuda y la demanda de los robots móviles en tiempos de COVID-19, opera ya en más de 40 países, siendo Asia y Europa los predominantes².

Por otra parte, los robots móviles de reparto también están siendo tendencia en más de 100 ciudades de 20 países del mundo. La compañía europea Starship Technologies, creó una flota de robots móviles que entregan paquetes de comida o mensajería con una carga aproximada de 9 kg. Estos dispositivos, que navegan autónomamente por las calles y veredas, cuentan con un motor eléctrico para mover sus seis ruedas, y están equipados por sensores de ultrasonido y radares. Además, su sistema de inteligencia artificial les permite mapear y entender su ambiente de navegación, no obstante, cuentan con un sistema de cámaras estéreo que permiten al operador monitorear, y de ser requerido, intervenir en el control del robot para avalar su seguridad ³.

De la misma forma, los robots móviles denominados Kiwibots, controlados a distancia por operadores humanos mediante sensores GPS y cámaras, ya hicieron más de 100,000 transacciones de comida. Este startup, creado en la Universidad de Berkeley en California, cuenta con un sistema de visión artificial para reconocer obstáculos en su navegación, y en

¹ Revisado en <https://www.elmundo.es/motor/2020/04/10/5e8ef62a21efa0363f8b456f.html> (accedido may 05, 2020).

² Consultado en <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robots-help-to-fight-corona-virus-sars-cov-2-worldwide> (accedido may 05, 2020).

³ Revisado en <https://www.roboticsbusinessreview.com/robotic-company/directory/listings/starship-technologies/> (accedido may 19, 2020).

tiempos de cuarentena proporcionan a sus clientes todo lo que necesitan, evidenciando seguridad y satisfacción. De hecho, el equipo de trabajo detrás de estos robots, estableció un sistema de entrega delivery para suministrar productos de higiene sanitario, como máscaras y geles antibacteriales, a la comunidad de Berkeley y Denver⁴.

Según lo expuesto en párrafos anteriores, los sistemas de teleoperación permiten realizar actividades en lugares inalcanzables o nocivos implementando, por un lado, algoritmos para la manipulación y, por otro lado, algoritmos para el desplazamiento del robot móvil. No obstante, cuando el dispositivo maestro y el dispositivo esclavo se encuentran a una distancia bastante lejana, el retardo de tiempo que influiría negativamente en el sistema ya no sería insignificante, pues se perdería la comunicación y dejaría al robot móvil varado consumiendo energía [2].

Ante esa posible pérdida de control de los robots teleoperados, que realizan tareas recorriendo largas distancias, es conveniente asegurar su llegada al punto deseado o retornar a su estación de carga de forma autónoma [10]. Ello puede ser logrado a partir de una previa planificación de trayectoria, de modo que el problema se concretaría en planificar y controlar el movimiento del robot móvil para mantenerlo en la trayectoria deseada.

Por esa razón, resulta de interés que en este trabajo de tesis, propuesta por el Laboratorio de Investigación, Desarrollo e Innovación (LIDEIN) de la Pontificia Universidad Católica del Perú, donde se investigan sobre sistemas de teleoperación, se implemente un algoritmo de control de seguimiento de trayectorias para que un robot móvil teleoperado llegue a su destino o retorne a su estación base, a pesar de la existencia de los problemas en la línea de comunicación (como la latencia o pérdidas de información).

1.2. Marco histórico

El sistema de locomoción de un robot móvil permite su navegación en lugares que comprometen la salud e integridad del ser humano [11]. Su autonomía es la capacidad que tiene su controlador para mantenerlo en cierta posición y orientación mientras interactúa con su entorno, pero un problema de control es seguir una trayectoria de manera regulada y estable. Una solución, es emplear un algoritmo de control que faculte su desplazamiento, involucrando posiciones y orientaciones para garantizar su estabilidad respecto a la trayectoria a seguir[12].

La aparición de los primeros vehículos guiados automáticamente (VGA), surge en los años 80 como medida de transporte de materiales en distintas zonas de una cadena de producción [11]. Para seguir una trayectoria establecida, un método popular era mediante la detección

⁴ Consultado en <https://www.kiwibot.com/kiwibot-covid-19> (accedido may 19, 2020).

de cintas o líneas pintadas en el suelo. Aunque son estrategias ineficientes, limitadas y caras porque necesitan un continuo mantenimiento, aún se utilizan en modernas fábricas [13].

Por ejemplo, en [14] se diseña un VGA, que se traslada siguiendo cintas magnéticas en el suelo. El conjunto de dichas cintas forma un mapa con estaciones predefinidas de paradas. La función de ese vehículo, que traslada un carrito de carga, es transferir materiales con una carga útil máxima de 578 kg. Además, cuenta con dos motores de 200W para lograr una velocidad de 1 m/s.

Por el contrario, en la tesis de maestría de Hernández, se establece una estrategia de control local para el seguimiento de trayectorias de un manipulador móvil. Este sistema recibía la información enviada por el operador desde la estación base, para procesarla y generar las leyes de control que correspondían al movimiento tanto de la plataforma móvil, como al brazo manipulador. De esa manera, el sistema destacó la flexibilidad para ejecutar cálculos localmente, evitando así posibles retrasos de comunicación si la información recibida fuese de manera continua. El prototipo desarrollado, cuenta con una plataforma móvil tipo (2,0) de tracción diferencial y un brazo robótico de tres grados de libertad. Los actuadores (formados por un motor) se activaban cuando recibían las señales de un controlador de movimiento de alta potencia de la marca Pololu. Además, se diseñó una ley de control en base a la función discreta de Lyapunov, utilizando el modelo discreto exacto del robot móvil. Adicionalmente, los algoritmos de control fueron implementados en un sistema embebido fit-PC3i, y el envío de señales de posición para el manipulador y las señales de velocidad para la plataforma móvil, fueron por medio de un gamepad inalámbrico F710 de la marca Logitech. También se usó el software Simulink de Matlab para el cálculo de las leyes de control [12].

De la misma forma, en el artículo de Carelli et al., se evidencia el desarrollo de un control autónomo para un robot móvil tipo triciclo teleoperado. La inclusión del control en la teleoperación logró flexibilidad, ya que el operador pudo generar señales de corrección al robot móvil mediante un control visual. De esa manera, el prototipo logró seguir trayectorias planeadas y llegar a una ubicación definida de forma estable. El robot desarrollado en la Universidad Nacional de Tecnología en Argentina, cuenta con un manipulador de cinco grados de libertad y una plataforma ad-hoc de tres ruedas, donde la rueda delantera cumple la función de tracción y dirección mediante servomotores DC. Por otro lado, el radioenlace implementado en el manipulador móvil (IEE 802.11) denotó gran capacidad de transmisión para el control y comunicación. Además, el diseño del controlador incluyó una compensación dinámica del robot y una ganancia variable para la posible saturación del servomotor. Finalmente, los retrasos e interrupciones de comunicación, entre el dispositivo maestro y el dispositivo esclavo, lograron tener menos efecto en la realización de las tareas, pues las simulaciones relataron la efectividad del sistema de teleoperación [15].

También es posible que un robot o manipulador móvil siga una trayectoria mediante el control de comandos continuos enviados por el operador. Dicho control puede implicar otros

métodos de teleoperación. Por ejemplo, Jia, desarrolla un método para que un operador controle múltiples manipuladores móviles bajo condiciones como la pérdida de información o los retrasos en la comunicación entre el dispositivo maestro y el esclavo. La técnica está enfocada en la planificación y el control perceptivo no temporal, que permiten a dichos manipuladores realizar sus tareas de forma estable y eficiente. Dicho enfoque utiliza una referencia no temporal para reemplazar la referencia tradicional del tiempo en el sistema de control [16].

Otro aspecto, es el desarrollo que se demuestra en [7]. En el cual, se implementa un control en cascada (desarrollado en el modelo cinemático y dinámico del manipulador móvil), un control de redundancia (para la evasión de obstáculos) y un controlador dinámico (para la compensación de errores que se podrían presentar en la velocidad del robot). El dispositivo esclavo está compuesto por controladores de movimiento (para la plataforma tipo unicycle y el manipulador), sensores (para evitar obstáculos) y una cámara (para la transmisión de imágenes). Además, la comunicación entre el dispositivo local y remoto, es mediante una red inalámbrica local para disminuir posibles retardos, por ello se utilizan dos tipos de canales de comunicación. El primero es bidireccional para el intercambio de datos numéricos, el protocolo usado es TCP/IP. El segundo canal es unidireccional y corresponde a la transmisión de imágenes para el operador, el protocolo usado es UDP. A pesar de no ser una solución muy confiable, los resultados revelaron un retardo de información promedio de 106 milisegundos, permitiendo así el intercambio de información del sistema de teleoperación sin mayores complicaciones.

Si bien la estabilización de un robot móvil con características no-holónicas es difícil de conseguir, en [17] se propone una ley de control de modo deslizante para resolver los problemas de seguimiento de trayectoria. La contribución de este artículo reside en que dicho enfoque puede ser aplicado a la realidad. Por eso, se implementa en un robot compuesto por dos ruedas fijas en un mismo eje, que son accionadas por motores de corriente continua con controladores de movimiento LM629, de esa forma se consigue una máxima velocidad de 1.46 metros por segundo. Los comandos de control son generados por un operador y enviados al CPU del robot (AT89C52) mediante radio frecuencia, también se cuenta con una cámara TMC-7 CCD para estimar la postura del robot. Finalmente, para validar el esquema de control, el robot móvil tuvo que seguir dos referencias de trayectoria: la primera en línea recta y la segunda fue un movimiento de curva.

En comparación con los motores DC convencionales, los motores sin escobillas son más confiables, menos ruidosos e incluso tienen más tiempo de vida por el hecho de no usar escobillas que se desgasten. Por esto, en el artículo [18], se presenta el diseño de *hardware* y *software* necesarios para controlar la velocidad y posición de los robots móviles que usan motores de corriente continua sin escobillas. La plataforma móvil presenta una tracción diferencial, en la que se incluyen dos motores *brushless* para las ruedas de navegación, y dos ruedas giratorias para asegurar el balance del prototipo. Para codificar la posición en el eje

del motor, se hace uso de las salidas digitales de los sensores magnéticos de efecto Hall que tienen dichos motores, así también, para controlar la velocidad se hace uso del esquema *Pulse Width Modulation* (PWM). Este sistema incorpora un circuito amortiguador de sobretensión en el circuito de potencia, de manera que se logra reducir la tensión de los mosfets de potencia durante su conmutación y así se asegura un trabajo certero.

Entonces, para analizar la estabilidad del sistema de controladores no lineales, y sobre todo para diseñar controladores más precisos y eficientes, Chang et al. [19], hacen uso de los motores sin escobillas DC, en lugar de los motores con escobillas como los mencionados en párrafos anteriores. Así, para resolver el problema de regulación y seguimiento de trayectoria de los robots móviles con restricciones no holonómicas, se diseñan dos controladores no lineales: uno de ellos es adoptado para controlar el sistema con la posición y torque requeridos (sin contar las dinámicas del actuador), mientras que el otro controlador sigue la trayectoria considerando las dinámicas de posición, torque y las del actuador para un control paso a paso. La estructura de control de este sistema está dividida en dos niveles, por un lado, el control de bajo nivel hace referencia al TI DSP para controlar a los servomotores del robot; por otro lado, el control de alto nivel hace referencia a los algoritmos complejos que son ejecutados en el *Personal Digital Assitant System (PDA)*. El robot móvil de tracción diferencial de este artículo, está equipado con conversores A/D y D/A, sensores de ultrasonido, encoders, y la estabilidad del sistema se valida a partir del análisis de Lyapunov.

Acerca de los sistemas de orden fraccional, estudios señalan que producen mejores resultados que los sistemas de orden entero. En efecto, la popularidad de los controladores PI de orden fraccional ha incrementado su uso en muchas áreas, sobre todo en las aplicaciones de control. Por esta razón, en el artículo de Orman et al. [20], se aplica un controlador PI de dicho orden para demostrar sus ventajas, frente a un controlador convencional PI, en la aplicación de seguimiento de trayectoria para un robot móvil. Para controlar su velocidad y ángulo de dirección, este experimento se realiza en un robot móvil equipado con 4 ruedas deslizantes, los cuales son impulsados por los Maxon Motor (ED 32) *brushless* DC. Estos motores de respuesta rápida incluyen enconders incrementales, que cuentan 500 pulsos por vuelta, y una caja de engranajes de reducción de velocidad. Para afirmar el desempeño del controlador propuesto, se realizan simulaciones con tres entradas diferentes de referencia para la velocidad (señal senoidal, onda cuadrada y una entrada de diente de sierra) y tres entradas de referencia iguales para la dirección del ángulo (entradas senoidales). Con ello, se concluye que a pesar de que el controlador convencional PI puede llegar a tener un tiempo de respuesta más rápida, el controlador fraccionario PI describe una mejor respuesta en estado estable, con menos sobreimpulso y poco error de velocidad.

En cuanto a los algoritmos heurísticos, son también una técnica que ha facilitado la solución a los problemas de regulación y seguimiento de trayectoria en los robots móviles. Por ejemplo, en [21], el método inspirado en la optimización de compuestos químicos es aplicado al controlador difuso de seguimiento de trayectorias para un modelo de robot móvil tipo

uniciclo. Esta estrategia metaheurística realiza una búsqueda aleatoria de posibles soluciones óptimas que se encuentran dentro de un cuadro de búsqueda definida. Allí, cada solución es representada como un elemento o compuesto, que es evaluado para verificar el rendimiento con respecto al objetivo. El prototipo móvil, cuenta con dos ruedas fijas ubicadas en un mismo eje y una rueda orientable ubicada en la parte frontal, así las ruedas fijas son controladas de manera independiente por motores.

Una metodología de control basado en redes neuronales, también permite la estabilidad del movimiento de un manipulador móvil. En [22], se pretende controlar la posición del brazo robótico mediante redes neuronales. La salida de dicho controlador comprende un control lineal (PID) y una compensación basada en redes neuronales para que amortice las dinámicas no lineales entre el manipulador y la base, y las perturbaciones causadas por terrenos irregulares o las del mismo vehículo móvil. Así, mediante dicha compensación en línea, se estiman las dinámicas no conocidas. Para validar dicha teoría, los experimentos fueron llevados a cabo en un robot con dos brazos, conducidos por motores de corriente continua sin escobillas (*brushless*) y equipados por sensores de posición y torque.

1.3. Justificación

Debido a que los robots móviles en un esquema de teleoperación, pueden hacer tareas a larga distancia, como se mencionó en párrafos anteriores, es necesario asegurar que dichos dispositivos lleguen al lugar deseado para proceder con la actividad para la que fue encomendada. Además, ante un posible corte de comunicación, el robot móvil puede quedarse varado y no regresar a la estación base [10]. Por ello, se hace importante la implementación de un algoritmo de seguimiento de trayectorias, que pueda garantizar una navegación óptima para que luego se pueda realizar las tareas correspondientes. Si bien en la mayoría de robots móviles se hacen uso de motores de corriente continua con escobillas, la implementación de un algoritmo de seguimiento de trayectoria que considere motores sin escobillas, incrementa la eficiencia energética y la robustez del robot móvil [19], aunque para ello también se tenga que implementar algoritmos avanzados como el control vectorial.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

El objetivo general de la tesis es diseñar un robot móvil prototipo para implementar un algoritmo de seguimiento de trayectorias mediante motores sin escobillas con control vectorial.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar el concepto de solución tomando como referencia la norma alemana VDI2221
- Diseñar el circuito electrónico para implementar algoritmos de control vectorial para los motores sin escobillas
- Diseñar un prototipo del chasis mecánico del robot móvil de tracción diferencial
- Implementar algoritmos de control vectorial para motores sin escobillas
- Implementar un algoritmo de seguimiento de trayectorias en el robot móvil de tracción diferencial

1.5. Alcance de la tesis

En el presente trabajo de tesis solo se emplea el modelo cinemático del robot móvil para implementar el algoritmo de seguimiento de trayectorias. Además, se diseña únicamente el hardware para implementar el control vectorial en cada motor del robot móvil, donde la entrada de cada placa es la velocidad de referencia para ejecutar el control vectorial de velocidad, esto debido a que no se diseña la electrónica encargada de enviar las referencias de velocidad.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA EL DISEÑO DE UN ROBOT MÓVIL CON MOTORES SIN ESCOBILLAS

El capítulo 2 está compuesto por el marco teórico y el marco metodológico. El primero contempla los conceptos necesarios para el diseño del robot móvil prototipo con motores sin escobillas; mientras que, el segundo, expone la estrategia que se debe seguir para desarrollar la tesis.

2.1. Marco teórico

El marco teórico abarca la descripción de la configuración de ruedas para el robot móvil. Luego se desarrolla el modelo cinemático para describir el comportamiento del sistema, para tal propósito se empleará las ecuaciones de movimiento de la mecánica de Newton -

Lagrange. Seguidamente, se propone la ley de control que permitirá seguir una trayectoria planificada. Por último, se realiza la justificación del control que dirigirá los movimientos de los motores *brushless* del robot móvil.

2.1.1. Configuración y disposición de las ruedas del robot móvil

Una adecuada movilidad de los robots móviles, que se desplazan en diversos entornos para realizar sus tareas, recae en la distribución de sus ruedas porque permiten tener una mejor maniobrabilidad y ofrecen la tracción y dirección de la plataforma [11]. A continuación, se describirá la configuración diferencial del robot móvil para esta investigación.

- **Robot móvil de tracción diferencial**

Esta configuración se caracteriza por conseguir el sistema de tracción y dirección mediante cada rueda fija dispuesta en un mismo eje. En la Figura 1, se puede observar que cada rueda fija es accionada por un motor de forma independiente, además el robot móvil cuenta con ruedas orientables necesarias para su soporte [1].

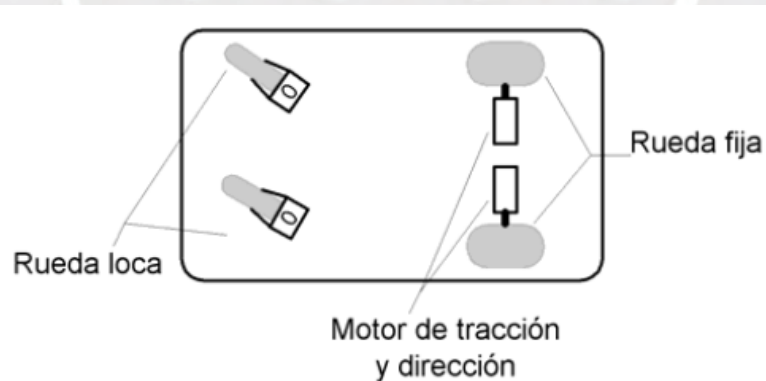


Figura 1. Robot móvil de configuración diferencial

2.1.2. Modelo cinemático del robot móvil

Considerando al robot móvil de tracción diferencial, mencionado previamente, se describirá el procedimiento para obtener el modelo matemático basado en su cinemática, importante para implementar un algoritmo de seguimiento de trayectoria.

En la Figura 2, se observa al robot móvil de tracción diferencial, y sus parámetros se detallan a continuación:

- $P(x, y)$: Punto medio del eje que une a sus dos ruedas
- b : Distancia de una rueda a su eje central
- V_R y V_L : Velocidad lineal de la rueda derecha y la rueda izquierda respectivamente
- ω : velocidad angular del robot móvil
- φ : ángulo que forma el eje de simetría del robot móvil con respecto al eje x

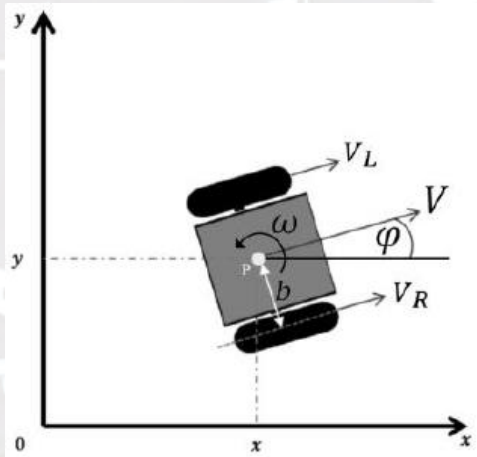


Figura 2. Robot móvil de tracción diferencial

Es importante detallar que, para cada velocidad V_R y V_L , actuará una fuerza F_R y F_L en las ruedas del robot móvil. Ahora, tomando como coordenadas generalizadas (x, y, φ) , podemos determinar la posición de cada una de las ruedas en el plano XY:

$$\bar{r}_R = (x + b \cdot \text{sen}\varphi)\hat{x} + (y - b \cdot \text{cos}\varphi)\hat{y} \quad (2.1)$$

$$\bar{r}_L = (x - b \cdot \text{sen}\varphi)\hat{x} + (y + b \cdot \text{cos}\varphi)\hat{y} \quad (2.2)$$

Por otra parte, se puede definir las componentes de fuerza generalizada sustentado en las ecuaciones de Lagrange. Donde las denominadas fuerzas generalizadas, también pueden ser

halladas mediante las de fuerzas del robot móvil, definidas en la Segunda Ley de Newton. Finalmente, podemos relacionar las velocidades lineales V_R y V_L con las velocidades angulares ω_R y ω_L mediante el radio “r” de cada rueda.

$$V_R = r \times \omega_R \quad (2.3)$$

$$V_L = r \times \omega_L \quad (2.4)$$

De modo que, el modelo cinemático estaría representado por las velocidades angulares del robot móvil, la ecuación 2.5, representa el modelo en la forma matricial.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r \cos(\varphi)}{2} & \frac{r \cos(\varphi)}{2} \\ r \operatorname{sen}(\varphi) & r \operatorname{sen}(\varphi) \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.1.3. Algoritmo de seguimiento de trayectorias

A partir del modelo cinemático, podemos reescribir las ecuaciones de espacio estado considerando que la velocidad lineal del robot móvil está determinada por las velocidades lineales de cada rueda (V_R y V_L). Entonces, la nueva representación del sistema cinemático estaría determinado por las entradas (V y ω), según la ecuación 2.6:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 \\ \operatorname{sen}(\varphi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Sin embargo, nuestro nuevo punto de interés para el control será a una distancia ‘a’ del centro del eje de las ruedas, como se muestra en la Figura 3:

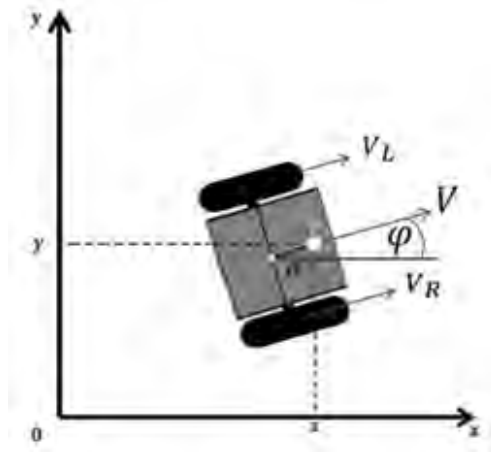


Figura 3. Robot móvil con el punto de control desplazado a una distancia 'a'

Entonces, el modelo matricial del robot móvil es la ecuación 2.7.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -a \cdot \text{sen}(\varphi) \\ \text{sen}(\varphi) & a \cdot \cos(\varphi) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Considerando que en el robot móvil no se controlará su orientación, el nuevo resultado del modelo matricial será la relación matemática de la ecuación 2.8.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -a \cdot \text{sen}(\varphi) \\ \text{sen}(\varphi) & a \cdot \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Ahora, como queremos que el robot se desplace a una velocidad deseada, debemos hallar las velocidades que debemos aplicar al robot móvil, para ello despejamos la matriz de velocidad lineal y velocidad angular. Luego, se ingresa las posiciones deseadas lo que conllevará a que la ley de control se exprese en función de errores de posición y eliminará los elementos no lineales de la matriz inversa, dicha descripción se muestra en la ecuación 2.9.

$$\begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -a \cdot \text{sen}(\varphi) \\ \text{sen}(\varphi) & a \cdot \cos(\varphi) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} K_1 x_e + \dot{x}_d \\ K_2 y_e + \dot{y}_d \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

La relación espacio estado que permitirá hallar las constantes K_1 y K_2 es la ecuación 2.10.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_1 & 0 \\ 0 & -K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Donde:

- x_e, y_e : representan los errores de la posición deseada en el plano bidimensional, y están expresados por la siguiente relación matemática:

$$x_e = x_d - x$$

$$y_e = y_d - y$$

- K_1, K_2 : representan los polos en el error x_e e y_e

2.1.4. Control vectorial

Field Oriented Control (FOC) es una técnica del control vectorial que se caracteriza por tener una respuesta precisa y adecuada en el régimen estacionario [23]. El objetivo principal es controlar el torque del motor por medio de la regulación de la corriente del estator, esto conllevará a imitar un control análogo al de los motores de corriente continua. Para entender la analogía, primero se explicará el control para la obtención del torque en los motores DC, y luego se detallará la implementación del control vectorial en los motores *brushless*.

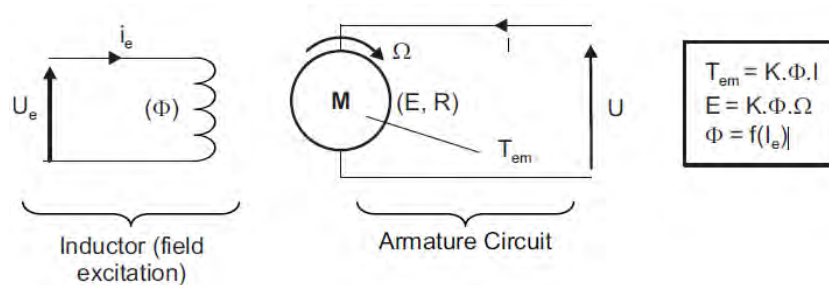


Figura 4. Circuito equivalente del motor de corriente continua

En la Figura 4, podemos notar que para obtener el par del motor (T_{em}), el flujo magnético (ϕ) y la corriente de armadura (I) se pueden controlar de forma independiente uno del otro, porque el flujo magnético depende principalmente de la corriente del campo de excitación, entonces el torque producido por el motor, es determinado por la corriente que circula en los bobinados del rotor. Así, para obtener el máximo torque, basta con mantener perpendicular el campo del rotor (referido al flujo producido por el bobinado en la armadura) con el campo de excitación del estator (referido a la corriente del estator en el inductor) [23]. Sin embargo, este control no es compatible con los motores de corriente alterna, a pesar de que en ambos exista un componente en común a controlar: la corriente del estator.

Debido a ello, el control vectorial es empleado como una solución en las máquinas síncronas, como los motores sin escobillas, porque permite desacoplar las componentes de la corriente del estator, como la magnitud de par y el flujo de magnetización, para ser controladas de forma independiente. Este desacoplamiento que imita el control de los motores de corriente continua (descrito en párrafos anteriores) resulta ser fácil para controlar directamente el par del motor síncrono y así alcanzar una referencia deseada [23]. Sin embargo, para lograr dicho desacoplamiento es necesario emplear transformaciones matemáticas, característico del control vectorial, en las etapas que describe la Figura 5:

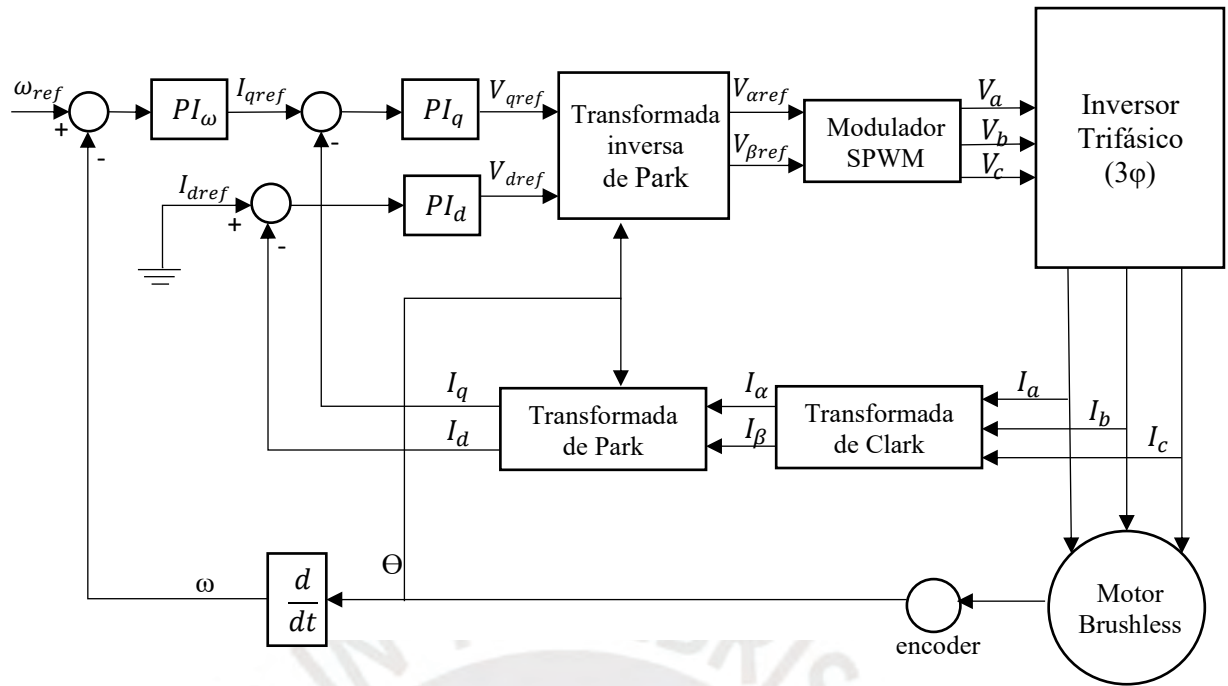


Figura 5. Diagrama de bloques del control vectorial de velocidad para un motor sin escobillas

- I. Debido a que se trata de un motor trifásico, el primer paso en el control vectorial es medir los parámetros eléctricos como la corriente, el voltaje y la fase del estator.
- II. Luego, aplicando la transformada de Clarke es posible cambiar el sistema trifásico (denotado por las 3 corrientes de fase del estator I_a , I_b , I_c) a un sistema bifásico ortogonal (denotado por las corrientes I_α y I_β).
- III. Seguidamente, haciendo uso de la transformada de Park, es posible convertir el plano bifásico estático (α , β) en un plano bifásico giratorio, cuyos ejes directo (d) y en cuadratura (q) coinciden con las componentes de flujo y torque, respectivamente.
- IV. Las corrientes resultantes de la transformada de Park (I_d , I_q), ya pueden ser comparadas con las corrientes de referencia (I_dref , I_qref), para que las señales de error sean reguladas mediante los controladores PI.
- V. Las salidas reguladas (V_dref y V_qref), son aplicadas a la transformada inversa de Park para obtener los voltajes en la referencia estática (α , β). Los resultados serán las entradas de un modulador SPWM, para que generen las señales necesarias al circuito inversor y así accionar al motor sin escobillas.

Es importante detallar que, al tratarse de un motor síncrono de imanes permanentes, el flujo del rotor ya es determinado por los imanes, entonces no hay necesidad de referenciar uno ($I_dref = 0$). Adicionalmente, es importante conocer la posición del flujo del rotor (Θ) para cambiar del sistema estático (α , β) al sistema rotativo (d,q), y viceversa. Donde (Θ), es el ángulo que forma el eje del sistema estático (α) con el eje correspondiente al flujo del rotor

(d). Por ese motivo, en la Figura 5, se evidencia el uso de un encoder que sensorará la posición del rotor para que luego, mediante una derivación, se logre el control vectorial de velocidad del motor.

Otro aspecto importante en el diseño de un diagrama de simulación para algoritmos de control vectorial son las tres transformaciones para obtener la respuesta de velocidad con la que se moverá el robot móvil: la transformada de Clarke, la transformada de Park y la transformada inversa de Park.

- **Transformada de Clarke**

Es un procedimiento matemático que permite representar las características eléctricas de un sistema trifásico (voltaje o corriente) a un sistema bifásico ortogonal (α, β) . La ecuación matricial 2.11 es denominada la Transformada de Clarke, mientras que la ecuación 2.12 ejemplifica la obtención de la corriente en el plano bifásico y variante en el tiempo (α, β) [24].

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

- **Transformada de Park**

Es el procedimiento matemático que permite convertir los valores bifásicos, que se obtienen al aplicar la Transformada de Clarke, a valores constantes e invariantes en el tiempo; además, para lograr dicha transformación, es relevante conocer la posición del rotor (θ) . La ecuación 2.13 describe la Transforma de Park; mientras que, la ecuación 2.14 es la aplicación de dicha transformada para obtener valores de corriente constantes [24].

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

- **Transformada inversa de Park**

Es el procedimiento inverso de la Transformada de Park y puede ser implementado usando la ecuación 2.15 y 2.16.

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

2.2. Marco metodológico

La presente tesis contempla, primero, la revisión de los métodos que se han empleado en la literatura robótica para resolver el problema declarado, de esa manera se busca justificar el marco de la problemática y definir los objetivos que se desean desarrollar. Segundo, se describe el Marco Teórico, que abarca los conceptos necesarios para el desarrollo de la plataforma mecatrónica. Tercero, el Marco Metodológico menciona brevemente la secuencia del desarrollo de la tesis. El diseño del robot móvil es el cuarto paso, y se basa en la norma alemana VDI 2221, que involucra una secuencia de pasos para desarrollar exitosamente la etapa del diseño dividido en tres módulos: el dominio electrónico, el dominio mecánico y el dominio de control. Finalmente, el quinto paso describe las simulaciones, conclusiones y futuras recomendaciones del trabajo de tesis.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL ROBOT MÓVIL CON MOTORES SIN ESCOBILLAS

El desarrollo del capítulo 3 se basará en la norma alemana VDI 2221, la cual contempla la elaboración de la lista de exigencias (descrito en la Tabla 1), la estructura de funciones, la alternativa de solución óptima y el diseño definitivo del robot móvil. En la última etapa se desarrollará el diseño del robot móvil dividido en 3 dominios: el electrónico, el mecánico y el de control.

3.1. Elaboración de la lista de exigencias

De acuerdo con los objetivos planteados en el Capítulo 1, se elabora una lista de exigencias para el sistema mecatrónico. La descripción de lo planteado se describe en la Tabla 1.

Tabla 1. Lista de exigencias del diseño del robot móvil

LISTA DE EXIGENCIAS	
CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
1. Función principal	El diseño de la plataforma mecatrónica deberá permitir la implementación de un algoritmo de seguimiento de trayectorias mediante motores sin escobillas.
2. Geometría	De acuerdo a la revisión de los diferentes robots móviles existentes en el mercado, se tomará como referencia al robot Pioneer-3DX usado en [25]. Se considerará una dimensión máxima de 470x400x240 mm y un diámetro aproximado de 195 mm para cada rueda del robot móvil.
3. Cinemática	La velocidad de desplazamiento del robot móvil dependerá de los valores establecidos por el operador, pero se definirá como mínimo un desplazamiento de una longitud en un tiempo de 1 segundos.
4. Control	El sistema mecatrónico deberá ser capaz de implementar un control de seguimiento de trayectorias basado en el modelo cinemático del robot móvil. El sistema de control de los motores deberá estar implementados con el control vectorial.
5. Electrónica	El diseño electrónico deberá permitir la implementación del control vectorial.
6. Comunicaciones	El robot móvil deberá estar preparado para soportar una conexión inalámbrica.
7. Fabricación	La estructura mecánica del robot móvil deberá incluir materiales como el MDF y el ABS.
8. Ergonomía	El diseño de la plataforma no deberá causar incomodidades ergonómicas durante las pruebas y deberá ser portátil. Además, se plantea que debe soportar una carga máxima del 15% del peso de una persona adulta. Se determina una carga máxima de 10kg para el sistema mecatrónico.

3.2. Elaboración de la estructura de funciones

A partir de la información descrita en la lista de exigencias, se determina la estructura de funciones del sistema mecatrónico. En primer lugar, el robot móvil será considerado como una caja negra para establecer las entradas y las salidas de forma abstracta. Luego, se describe una secuencia de operaciones según los subsistemas existentes en la caja negra. Finalmente, se elabora una estructura de funciones para el robot móvil.

3.2.1. Caja negra del robot móvil

La Figura 6 muestra la representación de caja negra para el robot móvil. Para identificar el tipo de entradas y salidas de la caja negra, se establece la relación de colores:

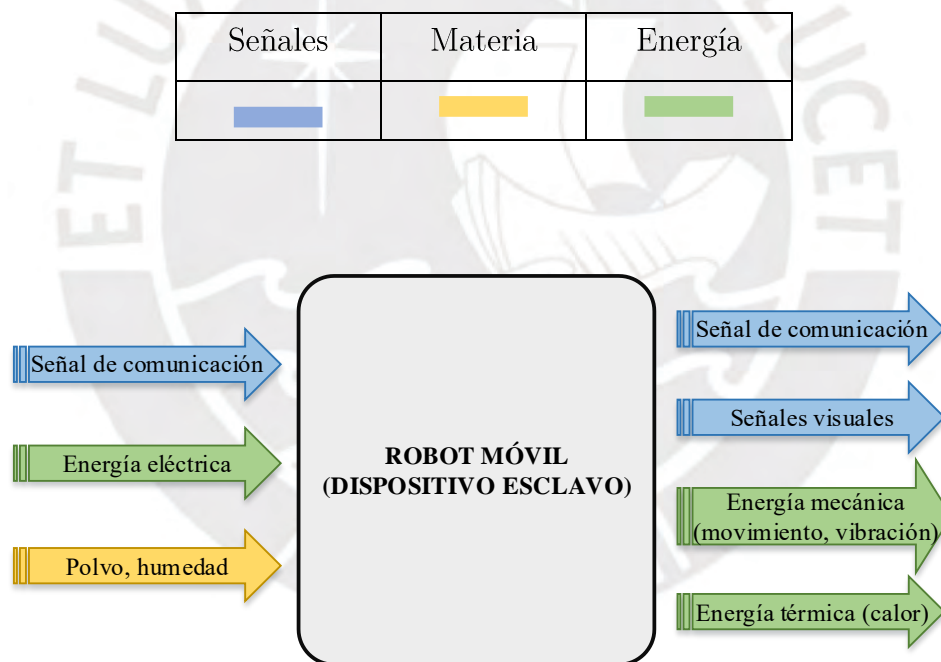


Figura 6. Representación de caja negra del robot móvil

3.2.2. Diagrama de estructura de funciones del robot móvil

De acuerdo a las descripciones abstractas de entradas y salidas de la caja negra y la secuencia de operaciones del robot móvil, en la Figura 7 se plantea la estructura de funciones del robot móvil dividido en los tres dominios que establece la norma alemana VDI 2221.



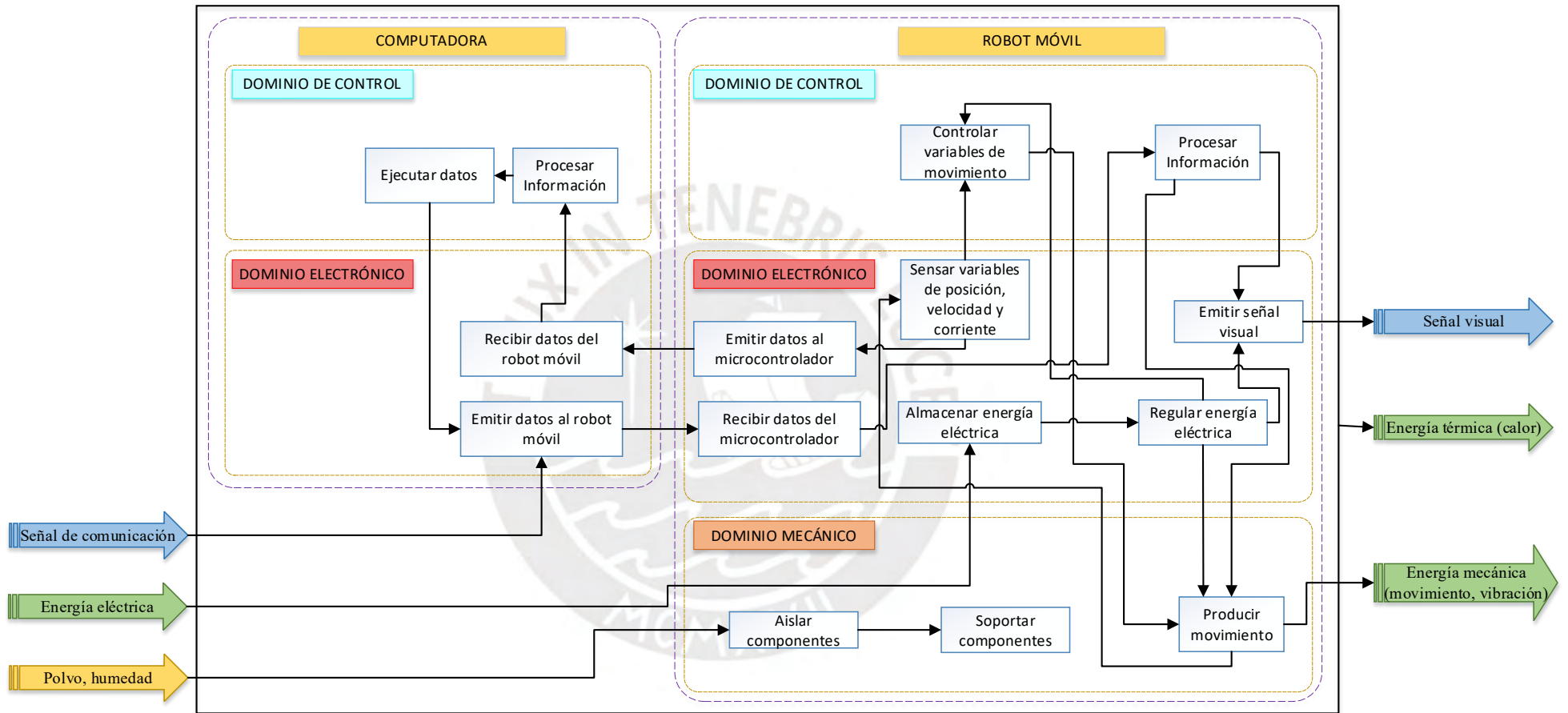




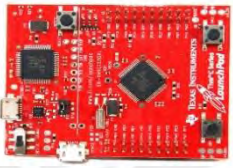





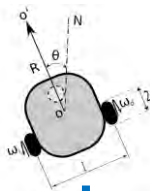

Figura 7. Diagrama de la estructura de funciones del robot móvil


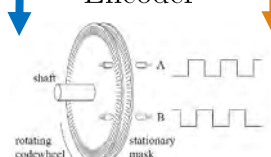
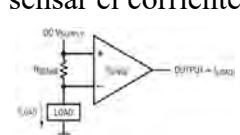



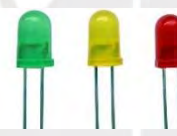

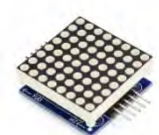


3.3. Elaboración de la alternativa de solución óptima

3.3.1. Matriz morfológica

La matriz morfológica del robot móvil permitirá combinar las tecnologías propuestas en la Tabla 2, para construir tres soluciones que cumplan con el objetivo principal.

Tabla 2. Matriz morfológica del robot móvil

Funciones Parciales	Portadores de funciones		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Enviar y recibir información		Conexión inalámbrica 	Conexión alámbrica 
Procesar información	Microcontrolador 	Microcomputadora 	FPGA 
Controlar variables de movimiento	Microcontrolador 	Microcomputadora 	FPGA 
Desplazar al robot		Diferencial 	
Generar movimiento		Motor sin escobillas 	

Sensar variables de posición y velocidad	Sensor de efecto Hall 	Encoder 	
Sensar la corriente	Amplificador para sensar el corriente 	Sensor de corriente 	
Regular energía eléctrica	Convertidor DC-DC Step up 	Convertidor DC-DC Step down 	
Emitir señales visuales	Leds 	LCD 16x2 	Matriz de leds 
Almacenar energía eléctrica	Baterías Li- Ion 	Baterías Li-Po 	

3.3.2. Desarrollo de las alternativas de solución

De acuerdo con la Tabla 2, se obtiene tres alternativas de solución que se evaluarán para determinar la más óptima.

- Primera alternativa de color verde

Esta alternativa plantea enviar información de una computadora a una microcomputadora (de forma inalámbrica) para que se procese el algoritmo de seguimiento de trayectorias en el robot móvil. Por otro lado, el sensor de efecto hall

brindará la información de posición del rotor al microcontrolador, con el objetivo de ejecutar el control vectorial en los motores sin escobillas del robot móvil. Los componentes del circuito electrónico serán alimentados por un convertidor de tipo step down, y se emitirán señales visuales mediante leds para confirmar el correcto funcionamiento de la tarjeta electrónica cuando se implemente los algoritmos de control vectorial. Se opta usar baterías Li-Po para almacenar la energía eléctrica de cada motor del robot móvil. Ver Figura 8.

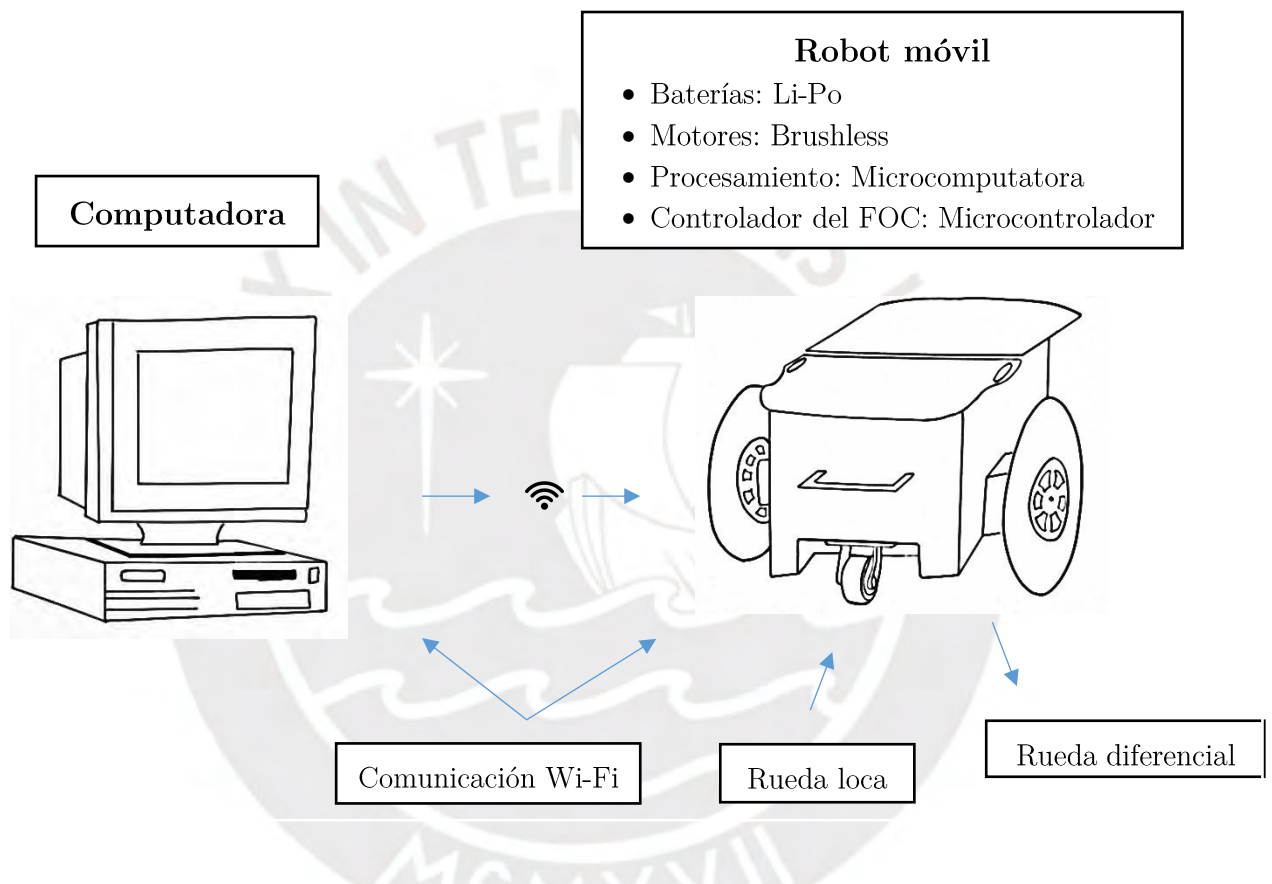


Figura 8. Bosquejo de la primera alternativa de color verde

• **Segunda alternativa de color naranja**

En esta solución se opta por usar una conexión cableada para enviar los algoritmos de seguimiento de trayectorias a un FPGA. Se empleará encoders que proveerán la información necesaria a la microcomputadora, con el fin de efectuar el control vectorial de velocidad en los motores sin escobillas del robot móvil. Las baterías Li-Ion alimentarán a los motores brushless, mientras que el convertidor reductor de tipo dc-dc, alimentará al resto

de los componentes involucrados en la tarjeta electrónica. El usuario reconocerá el correcto funcionamiento de los algoritmos de control vectorial que implementó en la tarjeta electrónica de cada motor sin escobillas, cuando se emitan las señales de luz en la matriz led. Ver Figura 9.

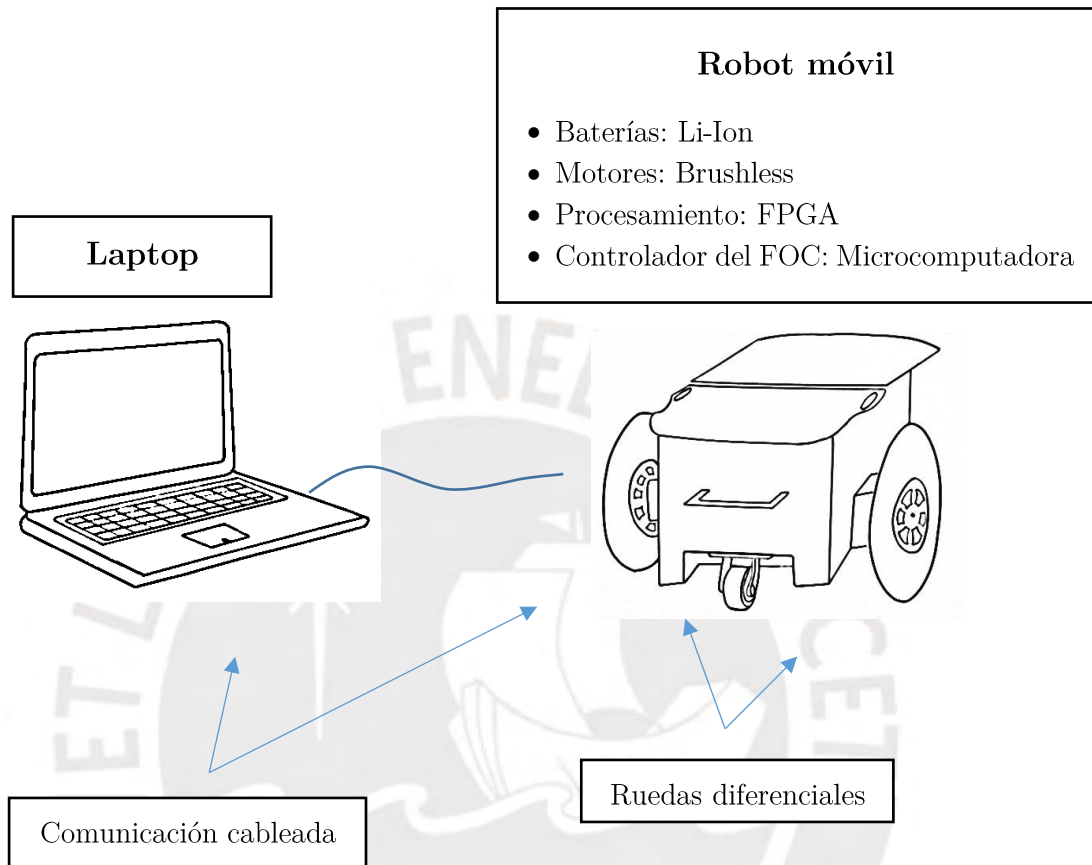


Figura 9. Bosquejo de la segunda alternativa de color naranja

- **Tercera alternativa de color azul**

Esta solución plantea usar una conexión inalámbrica para enviar el algoritmo de seguimiento de trayectorias a una microcomputadora. Se hará uso de los encoders para sensar la posición del rotor de cada motor sin escobillas y, los datos sensados serán transmitidos a un FPGA para que se pueda efectuar el control vectorial en cada motor del robot móvil. La propuesta involucra ruedas en configuración diferencial y se opta por usar un convertidor dc-dc tipo elevador para alimentar a los componentes electrónicos involucrados en el sistema mecatrónico. Finalmente, una pantalla LCD 16x2 mostrará un mensaje indicando el estado actual del sistema. Ver Figura 10.

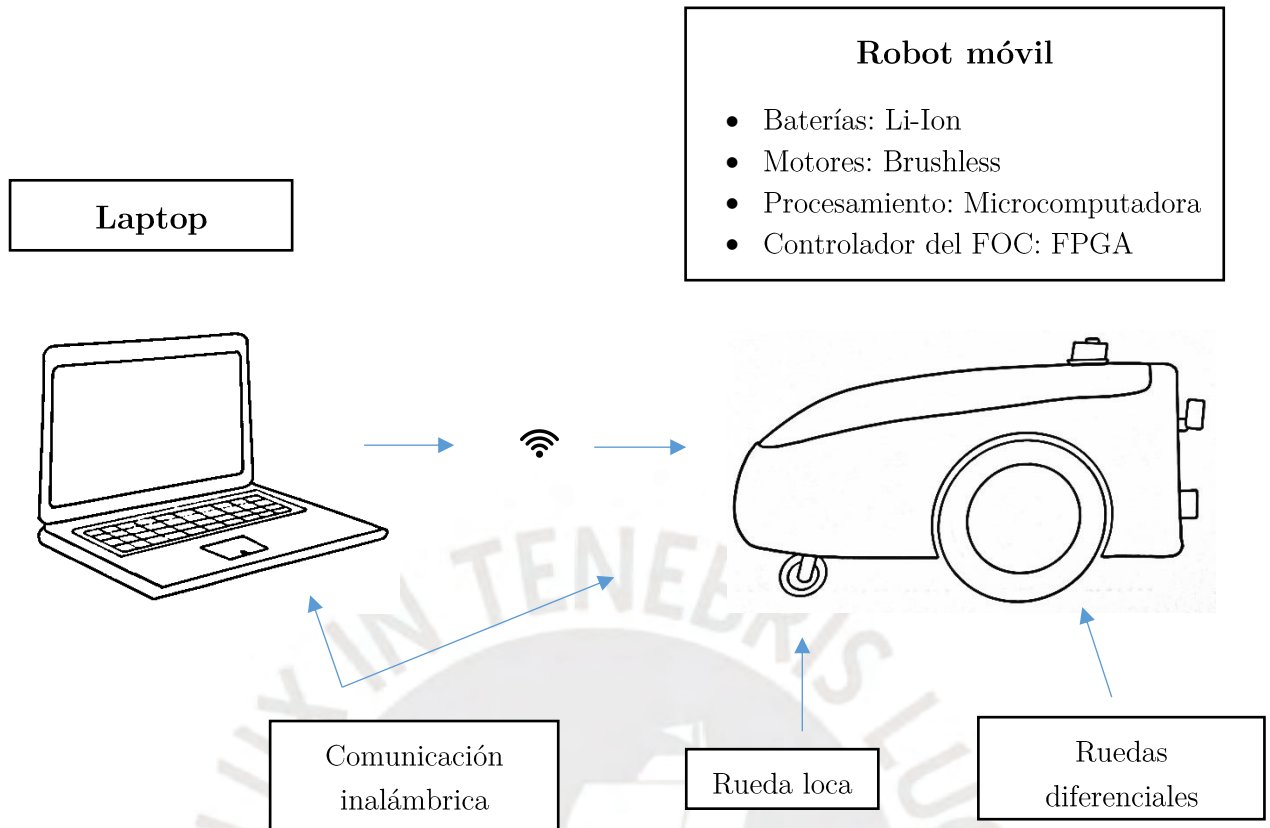


Figura 10. Bosquejo de la tercera alternativa de color azul

3.3.3. Evaluación técnico-económica

En esta etapa, de acuerdo a la norma alemana VDI 2221, se realizará un análisis técnico y económico de las tres alternativas descritas en párrafos anteriores, por tal motivo, se toma como referencia los criterios detallados en [26]. La Tabla 3 y la Tabla 4, correspondientes a la evaluación técnico y económico del robot móvil, determinarán la solución que satisface los objetivos de la tesis. Según la información descrita en dichas tablas, el valor relativo que se acerca más a la solución ideal es la solución 1 (alternativa de color verde). Por ende, será considerado como una solución aceptable para el desarrollo de la tesis.

Tabla 3. Evaluación técnica

Valor técnico (x_i)										
N°	Criterios de evaluación	G	Solución 1		Solución 2		Solución 3		Solución ideal	
			P	GP	P	GP	P	GP	P	GP
1	Funcionamiento	3	3	9	2	6	3	9	4	12
2	Diseño	2	3	6	2	4	2	4	4	8
3	Ergonomía	3	3	9	2	6	3	9	4	12
4	Uso de energía óptima	3	3	9	3	3	3	9	4	12
5	Control/Software	3	3	9	3	9	3	9	4	12
6	Electrónica	3	3	9	2	6	2	6	4	12
7	Seguridad	3	3	9	3	9	3	9	4	12
8	Uso sencillo	3	3	9	2	6	2	6	4	12
Puntaje máximo		23	24	69	19	49	21	61	32	92
Valor técnico (x_i)			0.75		0.53		0.66		1.00	

Tabla 4. Evaluación económica

Valor económico (y_i)										
N°	Criterios de evaluación	G	Solución 1		Solución 2		Solución 3		Solución ideal	
			P	GP	P	GP	P	GP	P	GP
1	Costo de la tecnología	3	3	6	2	6	2	6	4	12
2	Facilidad de adquisición	2	2	4	2	4	1	2	4	8
3	Eficiencia energética	3	3	9	3	9	3	9	4	12
4	Compatibilidad	3	3	9	2	6	2	6	4	12
Puntaje máximo		11	10	28	9	25	8	23	16	44
Valor económico (y_i)			0.63		0.57		0.52		1.00	

3.4. Diseño definitivo del robot móvil

Considerando el análisis previamente descrito, se presenta el diagrama de solución en la Figura 11, para la elección de los componentes del robot móvil.

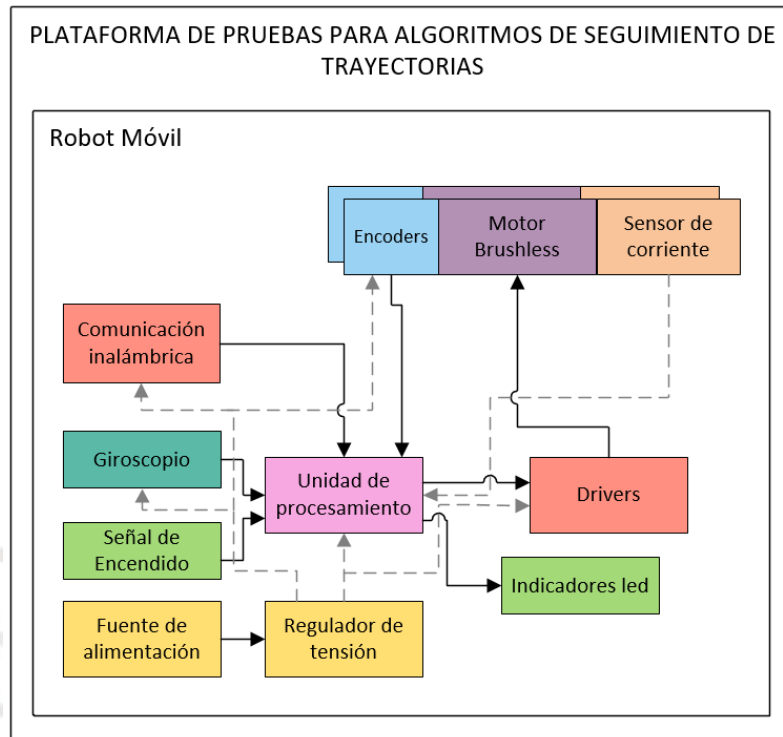


Figura 11. Modelo de solución definitivo

3.4.1. Diseño del dominio electrónico

Las tecnologías involucradas en el diseño electrónico son las que conforman la solución verde del análisis de la matriz morfológica. Para seleccionar los componentes adecuados, primero se analizará los requerimientos descritos en la Tabla 1, y se evaluará las alternativas disponibles en el mercado tecnológico.

- **Motor sin escobillas**

El robot móvil de tracción diferencial debe contemplar dos motores sin escobillas con características idealmente similares. Si bien el robot móvil se desplazará en una superficie horizontal, como criterio de diseño se considera una inclinación de 15 grados respecto a

la superficie. Además, como se especificó en la lista de exigencias, la plataforma mecatrónica debe ser capaz de soportar una carga máxima de 10kg, entonces la masa que recae en cada una de las ruedas deberá ser de 3.3kg. Adicionalmente, se contemplará ruedas de un tamaño aproximado de 195 mm de diámetro, según lo planteado en la Tabla 1.

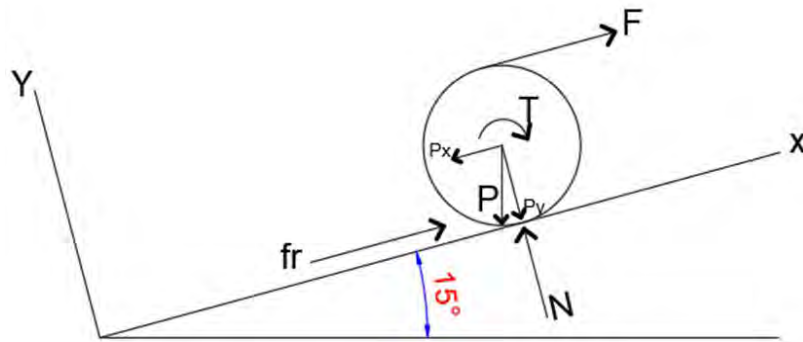


Figura 12. Diagrama de fuerzas de una rueda del robot móvil

De acuerdo con la Figura 12, la descomposición de fuerzas en una rueda del robot móvil permite resolver la Segunda Ley de Movimiento de Newton: $\sum F_x = m \cdot a$, y determinar el torque (T) empleando la ecuación 3.1 y los datos descritos en la Tabla 5.

$$T = n \cdot R \cdot M \cdot (a + g \cdot \text{sen}(15^\circ)) \quad (3.1)$$

Tabla 5. Datos necesarios para el diseño de un robot móvil

n: eficiencia	85%
D: diámetro de una rueda	0.195 m
Dimensión del robot móvil	0.470x0.400x0.240 m
M: masa en una rueda	3.3kg
g: aceleración de la gravedad	$9.8m/s^2$
a: aceleración del robot móvil	$1m/s^2$
v: velocidad del robot móvil	1 longitud en 1 segundos

Realizando los cálculos se obtiene: $T = 1 Nm$ o $T = 10.2 kg/cm$. Sin embargo, se considerará un factor de seguridad de 2. Por ende, el torque requerido será $T = 2 Nm$ o $T = 20.4 kg/cm$. Por otro lado, considerando la profundidad del robot móvil (0.470 m), la distancia que recorren las ruedas al girar una vez (0.613 m) y el tiempo en recorrer

dicha distancia (1s), se determina la velocidad mínima requerida en revoluciones por minuto en la ecuación 3.2.

$$RPM = \frac{0.470}{1 \cdot 0.613} * 60 = 46 \text{ RPM} \quad (3.2)$$

Con los parámetros de torque y velocidad definidos, se procede a realizar una tabla comparativa con las características de los motores fabricados por la empresa T-motor para evaluar y elegir la alternativa que cumpla con los requerimientos descritos. El torque y potencia de los motores comerciales será calculado utilizando la ecuación 3.3, demostrado en [27].

$$T = \frac{P}{n} * \frac{60}{2\pi} \quad (3.3)$$

Donde:

P: Potencia del motor (kW)

T: Torque o par motor (N.m)

n: Revoluciones por minuto (rpm)

De la información recopilada en la Tabla 6 y 7, se desprende la información de motores que cumplen con los requisitos previamente descritos, entre ellos se puede notar que los motores U8 Lite y U10 II son los que disipan mayor potencia y tienen un costo elevado, entonces se elegirá el motor U8II PRO para el diseño del circuito electrónico.

Tabla 6. Características de los motores sin escobillas (Parte 1)

Características	Requerimientos	Alternativas		
		U8 Lite	U8II PRO	U10 II
KV(RPM/V)	-	95	100	100
Tensión de alimentación (V)	-	24	24	24
Corriente operación (A)	-	20.62	20.75	21.70
Máxima corriente (A)	-	38	31	32.4
Potencia disipada (W)	El menor posible	977	973	1055

Tabla 7. Características de los motores sin escobillas (Parte 2)

Características	Requerimientos	Alternativas		
		U8 Lite	U8II PRO	U10 II
Masa (kg)	-	0.280	0.287	0.415
Resistencia interna (Ω)	-	0.146	0.134	0.101
Numero de polos	-	42	42	42
Velocidad del motor (RPM)	Al menos 46	3157	3488	3114
Torque (Nm)	Aproximadamente 2	2.34	2.09	2.58
Costo (\$)	El menor	329.90	309.99	339.99

- **Dispositivo de conmutación**

Se considera al mosfet de potencia canal N como dispositivo de conmutación porque es asequible, posee una alta impedancia en la entrada, se puede controlar por voltaje y su alta frecuencia de conmutación es ideal para la modulación SVPWM [28]. Mediante un arreglo de 6 conmutadores (que trabajarán en la zona de corte y saturación) se podrá generar la señal senoidal y realizar el control vectorial en el motor sin escobillas. De acuerdo con la Tabla 8, los componentes IRFZ48N y IRFZ44N disipan mayor potencia, entonces se elige el integrado AON7418; sin embargo, es necesario demostrar que esta alternativa puede trabajar hasta 31A sin disipador (corriente máxima del motor); por ende, se recurre a la ecuación 3.4.

$$I^2 * (R_{ds-on}) = \frac{T_{jmax} - T_{amb}}{R_{thj-a}} \quad (3.4)$$

Ahora, reemplazando los parámetros por los datos proporcionados en la hoja de datos del mosfet, se obtiene:

$$I^2 * (0.0022) = \frac{150-25}{55}$$

$$I = 32.14A \quad (3.5)$$

Del resultado obtenido en la ecuación 3.5, se puede concluir que el integrado elegido garantiza una operación de hasta 32.14A sin disipador, idóneo para el diseño de la tesis.

Tabla 8. Tabla comparativa de dispositivos de conmutación

Características	Requerimientos	Alternativas		
		IRFZ48N	AON7418	IRFZ44N
Fabricante	-	Vishay Siliconix	Alpha & Omega Semiconductors	INCHANGE Semiconductor
Tipo de canal	Canal N	Canal N	Canal N	Canal N
Máxima corriente Id (A)	Al menos 31	64	50	49
Máximo voltaje Vds (V)	Mayor a 24	55	30	55
Máximo voltaje Vgs (V)	-	+/-20	+/-20	+/-20
Voltaje gate threshold (V)	-	[2;4]	[1.2; 2.2]	[2;4]
Máxima potencia disipada (W)	El menor posible	180	6.2	94
Temperatura de operación (°C)	-	[-55; 175]	[-55; 150]	[-55;175]
Costo (\$)	El menor posible	0.45	0.51	0.54

- **Driver de potencia**

La función principal del driver en aplicaciones con motores sin escobillas, es representar un circuito que permita activar o desactivar un arreglo de seis interruptores según las señales de control que envía el microcontrolador. Se busca que el driver incluya a los mosfets de potencia como dispositivos de conmutación por ser fáciles de controlar por voltaje, por su precio económico en el mercado y por su alta frecuencia de conmutación

que permitirá a la modulación del SVPWM obtener las señales necesarias para el control vectorial [28]. El driver que cumple con las características descritas es el DRV8302 de la Tabla 9, además cuenta con un reductor de voltaje (step-down) necesario para alimentar otros componentes del circuito y permite sensar la corriente en las fases del motor.

Tabla 9. Tabla comparativa de drivers de potencia comerciales

Características	Requerimientos	Alternativas		
		DRV8302	DRV8305	DRV8303
Fabricante	-	Texas Instruments	Texas Instruments	Texas Instruments
Voltaje de operación (V)	-	[8; 60]	[4; 45]	[6; 60]
Tecnología	Mosfet	Mosfet	Mosfet	Mosfet
Gate drive output (V)	Al menos 2.2	[9.5; 11.5]	[9; 10.5]	[9.5; 11.5]
Interfaz	-	Paralela	SPI	SPI
Frecuencia de Switching (Hz)	El mayor	200k	100k	200k
¿Es compatible con motores brushless?	-	Sí	Sí	Sí
Temperatura de operación (°C)	-	[-40; 125]	[-40; 150]	[-40; 125]
Costo (\$)	El menor posible	5.83	7.18	3.92

- **Sensor de posición angular**

El sensor de posición angular es el dispositivo fundamental que permite sensar la posición del rotor para realizar la transformación más importante del control vectorial: la transformación de Park [23]. Entonces, se proponen sensores de efecto hall por ser capaces de suprimir cualquier campo magnético externo; además, se busca que tenga una alta resolución para medir velocidades angulares considerables, que cuente con comunicación SPI y tenga un valor económico reducido. Se elije el AS5147P-HTSM por cumplir con los requerimientos descritos en la Tabla 10.

Tabla 10. Tabla comparativa de sensores de posición angular

Características	Requerimientos	Alternativas	
		AS5045	AS5147P-HTSM
Voltaje de alimentación (V)	[3.3; 5]	[3; 5.5]	[3; 5]
Interfaz	SPI	SPI	SPI
Resolución	El mayor	12 bits	14 bits
Velocidad (RPM)	El mayor	30k	28k
Tecnología	-	CMOS	CMOS
Temperatura de operación (°C)	-	[-40; 125]	[-40; 125]
Costo (\$)	El menor posible	13.26	7.2

- **Bus CAN**

El propósito del bus CAN es incrementar la robustez eléctrica del robot móvil. A pesar de no ser una interfaz rápida (velocidad de datos máxima 1MBps), este protocolo garantiza fiabilidad en la red de comunicación entre los actuadores, los microcontroladores y la microcomputadora que procesará el algoritmo de seguimiento de trayectorias [29]. Se elige el componente MCP2562 de la Tabla 11 y 12 que es fabricado por Microchip.

Tabla 11. Tabla comparativa de bus CAN (Parte 1)

Características	Requerimientos	Alternativas	
		MCP2561	MCP2562
Fabricante	-	Microchip	Microchip
Voltaje de alimentación (V)	5	[4.5; 5.5]	[4.5; 5.5]
Voltaje de alimentación digital (V)	3.3	-	[1.8; 5.5]

Tabla 12. Tabla comparativa de bus CAN (Parte 2)

		Alternativas	
Características	Requerimientos	MCP2561	MCP2562
Temperatura de operación (°C)	-	[-40; +125]	[-40; +125]
Costo (\$)	El menor posible	2.71	1.28

- **Microcontrolador**

El microcontrolador será el responsable del procesamiento de la información recibida, de la ejecución de algoritmos de control vectorial y de transferir señales de control a la etapa de potencia [30]. Como el control vectorial involucra una gran cantidad de operaciones y requiere un rápido procesamiento de señales para generar las variaciones de ancho de pulso correspondientes, se elige el microcontrolador STM32F446 de la Tabla 13 y 14 porque tiene una frecuencia de ejecución de 180M Hz; además, es compatible con los componentes de la etapa de potencia, el sensor de posición angular y cuenta con los pines necesarios para el diseño electrónico.

Tabla 13. Tabla comparativa de microcontroladores comerciales (Parte 1)

		Alternativas		
Características	Requerimientos	STM32F103C8T6	STM32F446	TM4C123GH6PM
Fabricante	-	STMicroelectronics	STM	Texas Instrument
Tensión de alimentación (V)	[3.3; 5]	[2; 3.6]	[1.8; 3.6]	[1.08; 3.63]
Frecuencia (Hz)	El más rápido	72M	180M	80M
Puertos I/O	Mayor a 18	32	63	43
Puertos SPI	Al menos 1	2	4	3
Puertos CAN	Preferible 2	1	2	2

Tabla 14. Tabla comparativa de microcontroladores comerciales (Parte 2)

Características	Requerimientos	Alternativas		
		STM32F103C8T6	STM32F446	TM4C123GH6PMI
Puertos PWM	Al menos 3	12	10	16
Puertos ADC	-	10	14	12
Temperatura de operación (°C)	-	[-40; 85]	[-40; 80]	[-40; 85]
Costo (\$)	El menor posible	4.94	4.30	11.66

- **Fuente de alimentación**

Para alimentar la etapa de potencia se emplearán baterías Ion-Litio porque son ligeras, almacenan gran cantidad de energía y son recargables. Se pretende que el robot este en constante movimiento al menos dos horas, entonces considerando la corriente de operación continua del motor sin escobillados de 24V (detallado en la Tabla 6), se realiza los cálculos y se decide armar seis baterías en serie para conseguir el voltaje requerido, de acuerdo con las características de la batería elegida en la Tabla 15. Luego, se utilizará cinco juegos de baterías en serie para agruparlas en paralelo, y de esa manera conseguir una capacidad de 44Ah, lo cual es necesario para garantizar la continuidad de funcionamiento del robot móvil. Finalmente, se decide que la etapa de control será alimentada por el reductor (step down) que incluye el driver DVR8302.

Tabla 15. Características de la batería Ion Litio

Características	Cafini CN-18650DC
Voltaje (V)	4.2
Capacidad (Ah)	8.8
Conector	XT30
Costo (\$)	5

Finalmente, se diseñó el diagrama esquemático y la placa PCB para controlar un motor sin escobillas del robot móvil. Se empleó el software EasyEDA y el diseño se basó en el análisis de los componentes seleccionados. Ver Figuras 13, 14 y 15.

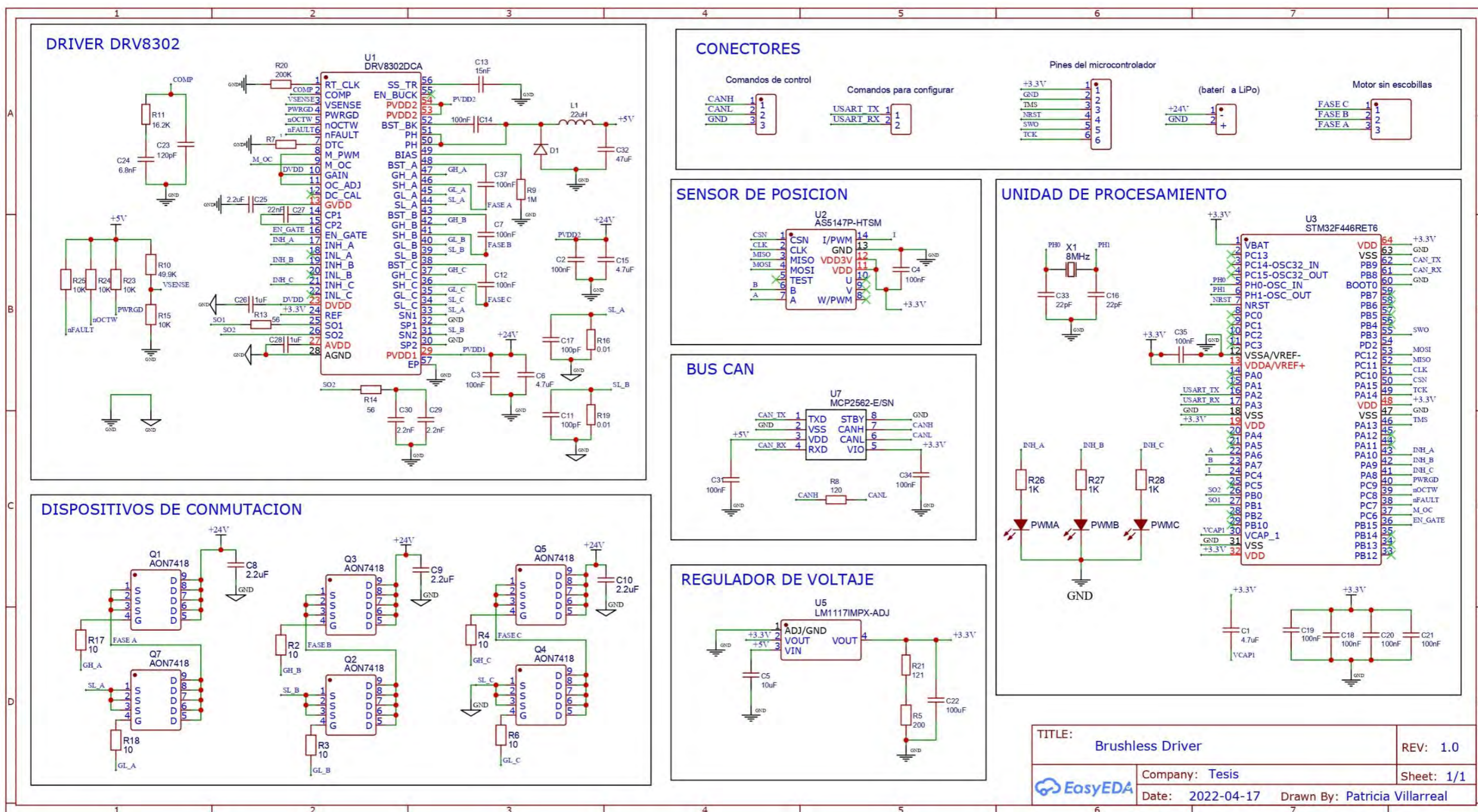


Figura 13. Diagrama esquemático del circuito total de un motor sin escobillas

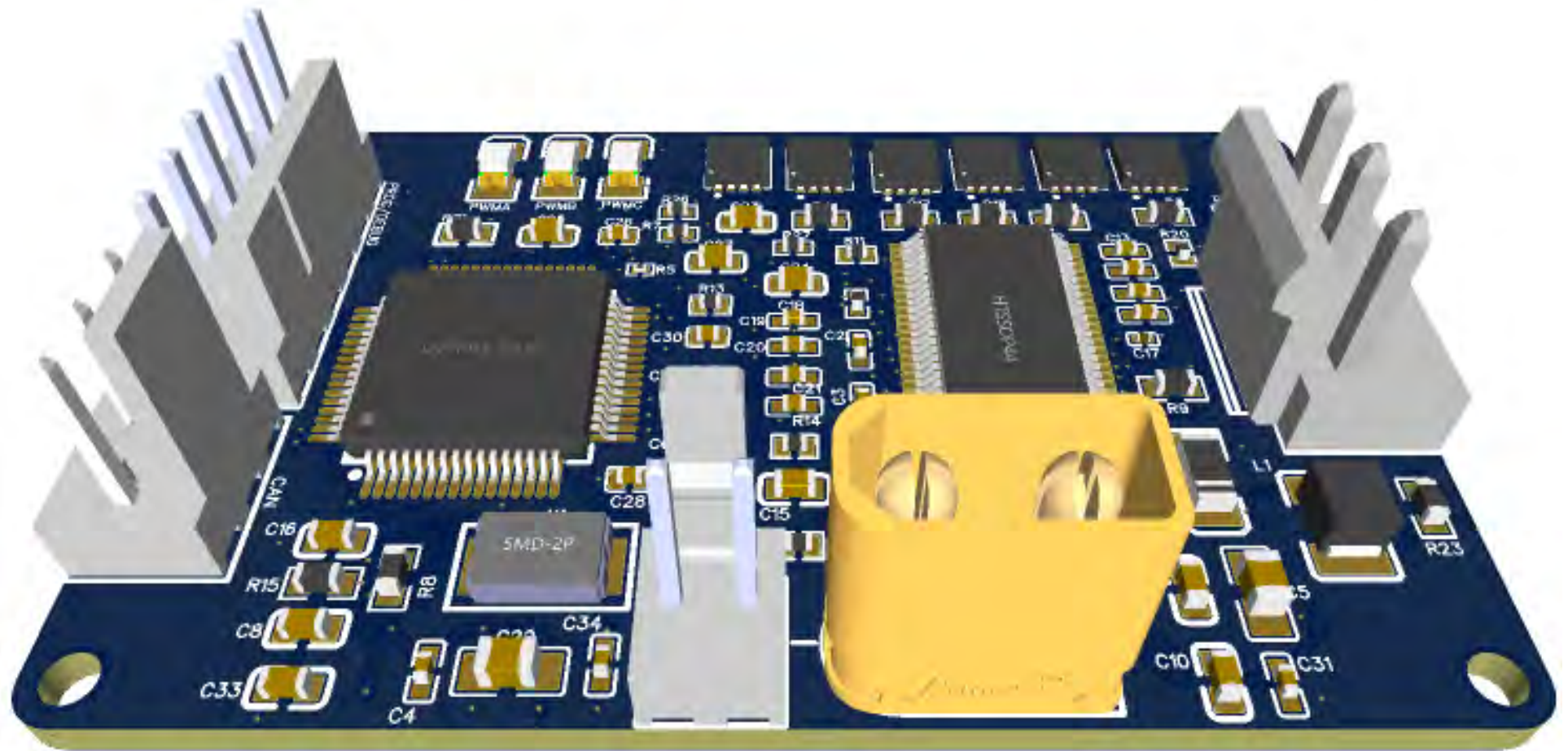


Figura 14. Modelado 3D de la tarjeta PCB – capa superior

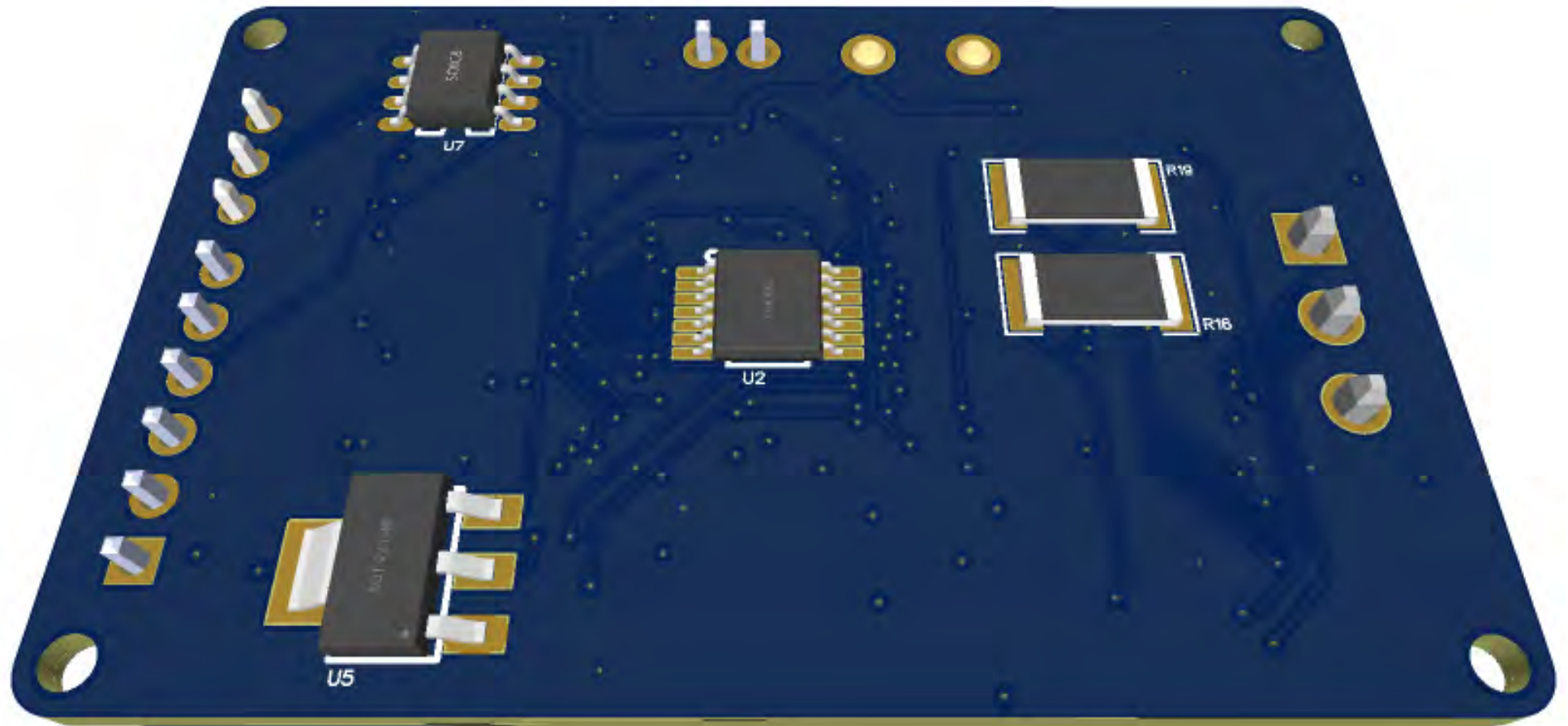


Figura 15. Modelado 3D de la tarjeta PCB – capa inferior

3.4.2. Diseño del dominio mecánico

Las vistas principales del chasis del robot móvil, desarrollado en Solidworks, se muestra en la Figura 16, se consideró el material MDF con un espesor de 15mm y dos piezas curvas del material ABS. Se respetó las dimensiones expuestas en la lista de exigencias y el detalle de los planos de cada pieza involucrada puede ser consultada en el anexo adjunto.

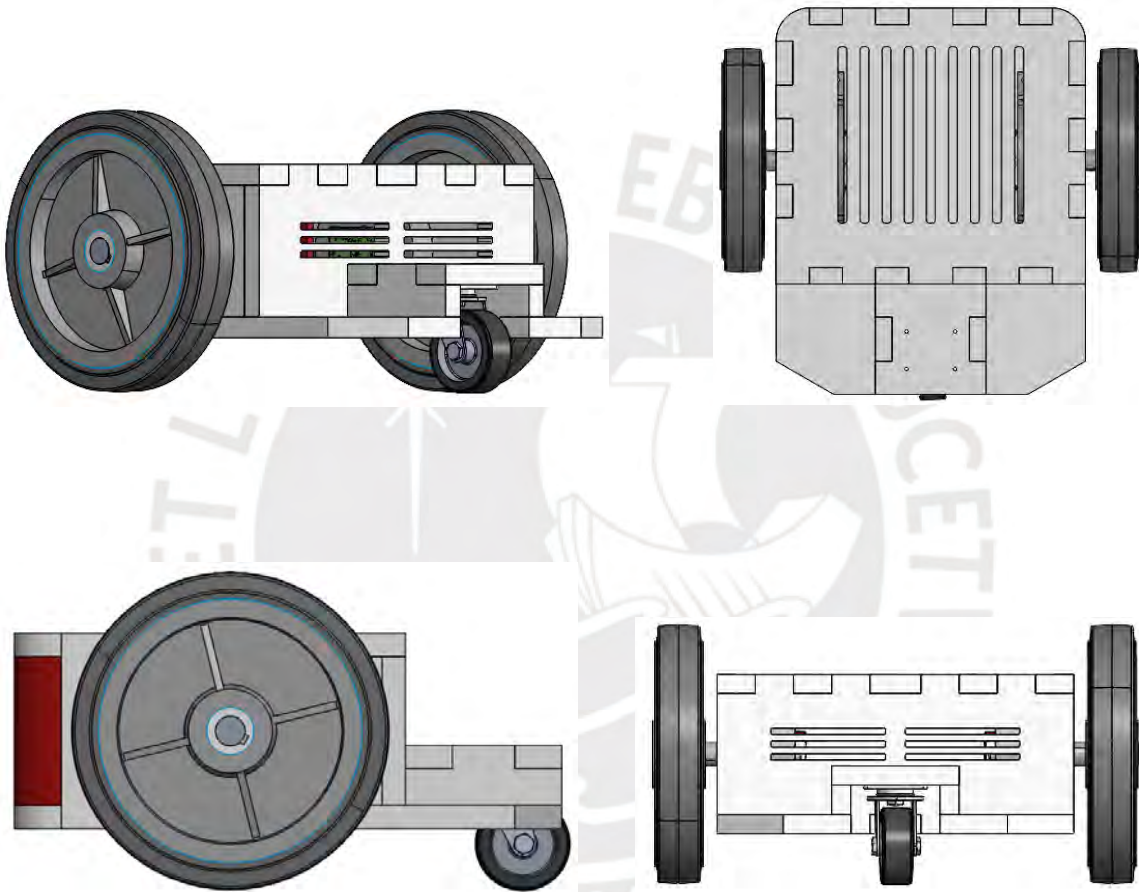


Figura 16. Vistas principales del robot móvil. Elaboración Propia

3.4.3. Diseño del dominio de control

Acerca del planteamiento del control de seguimiento de trayectorias mediante motores sin escobillas con control vectorial, primero se desarrolla el diagrama de bloques referente al modelo cinemático del robot móvil con tracción diferencial usando la herramienta Simulink. La Figura 17, describe la ecuación matricial 3.6, donde el radio de la rueda (r) es equivalente a 97.5mm, mientras que la distancia del centro del robot a una de las ruedas (b) es 135.5mm.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r \cos(\phi)}{2} & \frac{r \cos(\phi)}{2} \\ r \sin(\phi) & r \sin(\phi) \\ \frac{2}{r} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

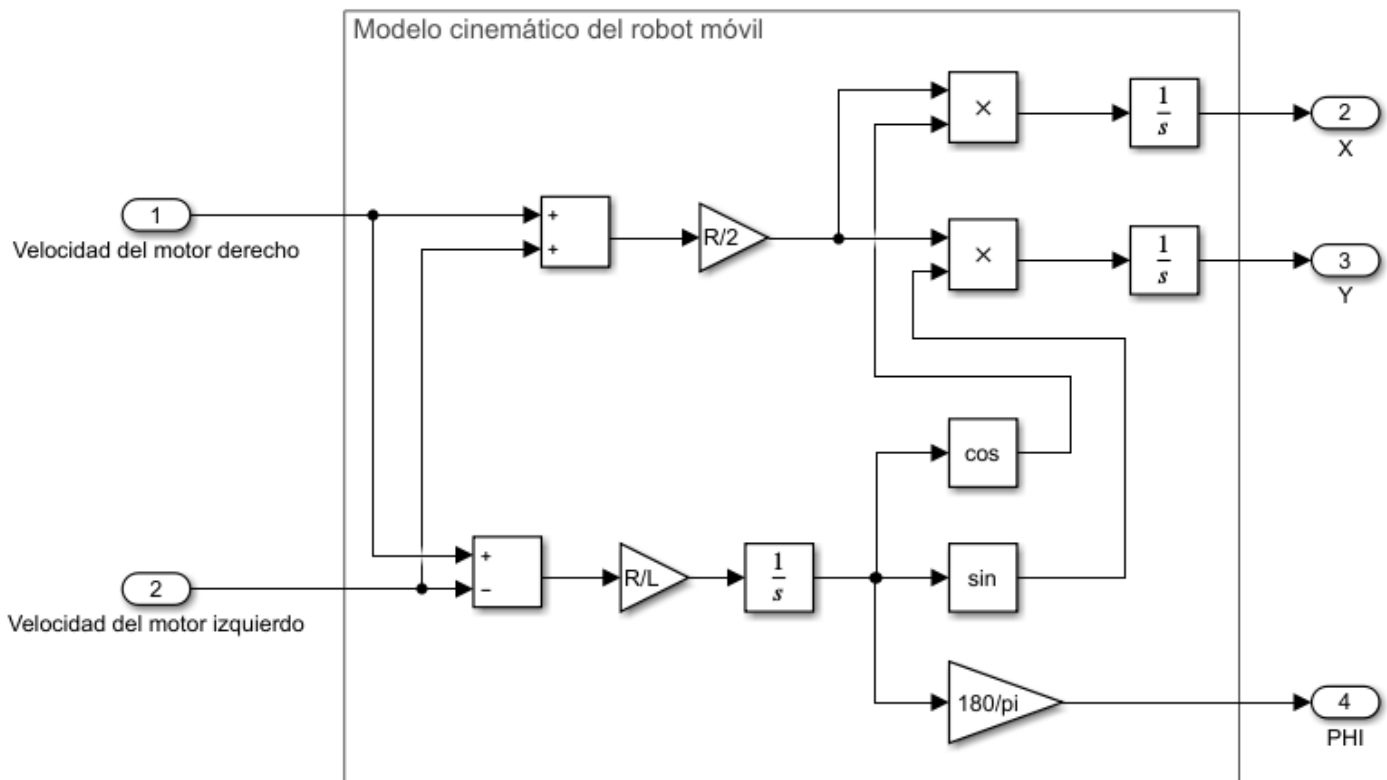


Figura 17. Modelo cinemático del robot móvil de tracción diferencial

Por otro lado, para diseñar los controladores que involucra el control vectorial, es imprescindible conocer el sistema de ecuaciones que modelan la planta (motor sin escobillas). Dichas ecuaciones deberán ser representadas en el sistema rotativo (d, q) y luego, serán transformadas al dominio de la frecuencia con la finalidad de obtener los diagramas de

bloques de control [24]. La Figura 18 y la Figura 19, muestran la representación del modelo del motor sin escobillas en el plano bifásico giratorio.

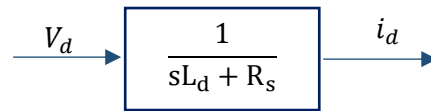


Figura 18. Función de transferencia del motor sin escobillas en el eje directo (d)

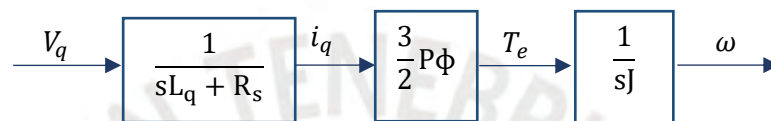


Figura 19. Función de transferencia del motor sin escobillas en el eje (q)

Donde:

L_d y L_q : Inductancia de fase de la bobina del motor (H)

R_s : Resistencia interna del motor (Ω)

J : Momento de inercia (kgm^2)

P : Número de polos del motor

Φ : Flujo del rotor (Wb)

En consecuencia, ya es posible diseñar los controladores del lazo de par electromagnético (i_q), del lazo de flujo (i_d) y del lazo de velocidad (ω). Este último contemplará un sistema de control en cascada con la finalidad de reducir las perturbaciones que se podrían generar [24].

- **Diseño del controlador referente al flujo del rotor (corriente i_d)**

La función de transferencia del motor sin escobillas se aproxima a una función de primer orden (descrita en la ecuación 3.7), cuyos valores eléctricos son datos tomados de los ensayos realizados en [31].

$$G_d(s) = \frac{1}{0.0035s + 1.49} \quad (3.7)$$

Como la función de transferencia de la ecuación 3.7 es de primer orden y de tipo 0 (no tiene un polo en el origen), se optó por diseñar un controlador proporcional integral (PI) para garantizar un error en estado estable igual a cero. El sistema de control que se diseñó se muestra en la Figura 20, y el método que se empleó para diseñar el controlador fue el lugar geométrico de raíces (LGR), con un periodo de muestro (T_s) igual a 0.000020.

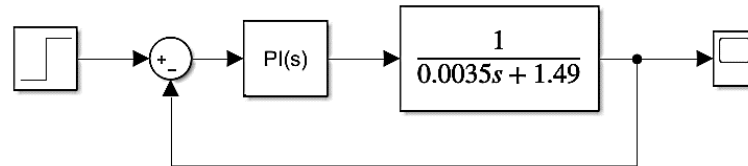


Figura 20. Diseño del sistema de control de corriente (i_d)

También se aplicó la teoría analítica para ubicar los polos deseados y obtener los parámetros del controlador: $K_p = 68.078$ y $K_i = 23173.895$; otro aspecto importante es que la constante de tiempo (τ) de la planta es equivalente a 0.00235, lo que significa que se espera tener una rápida respuesta dinámica en el régimen transitorio, esta hipótesis puede ser corroborada en la Figura 21, allí se ilustra que la respuesta de la planta se establece en 0.0003 segundos cuando se le aplica una entrada escalón unitario.

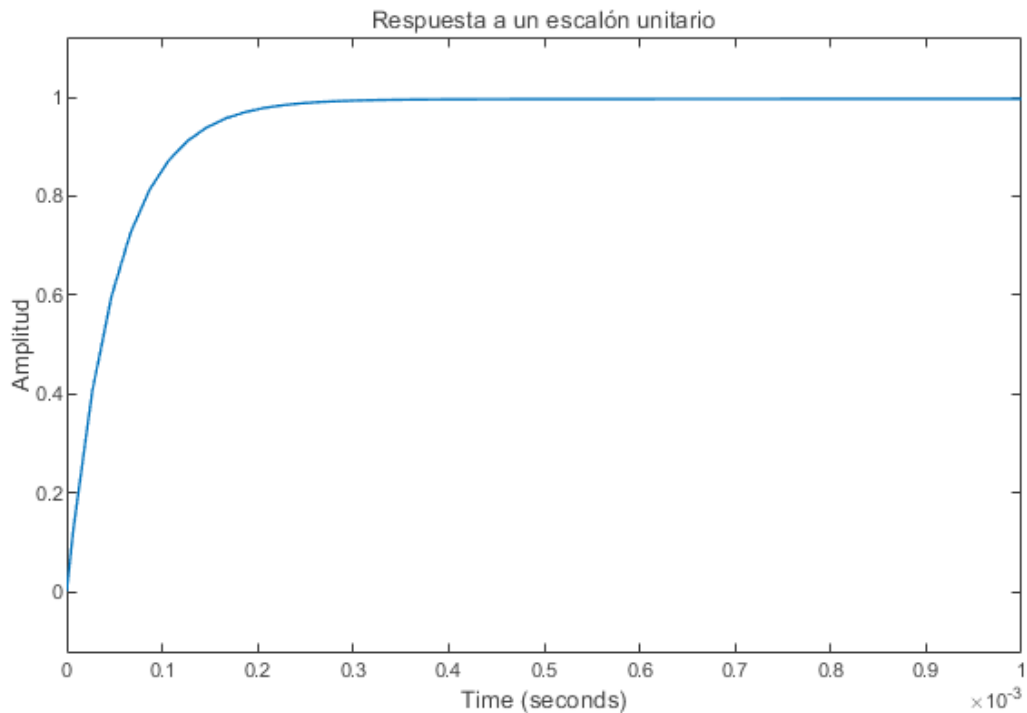


Figura 21. Respuesta del sistema de control de corriente (i_d)

Así mismo, la Figura 21 demuestra un error en estado estable (e_{ss}) igual a cero y evidencia la ausencia de un sobreimpulso (M_p), que va acorde al valor del *overshoot* que se obtiene del LGR que se muestra en la Figura 22.

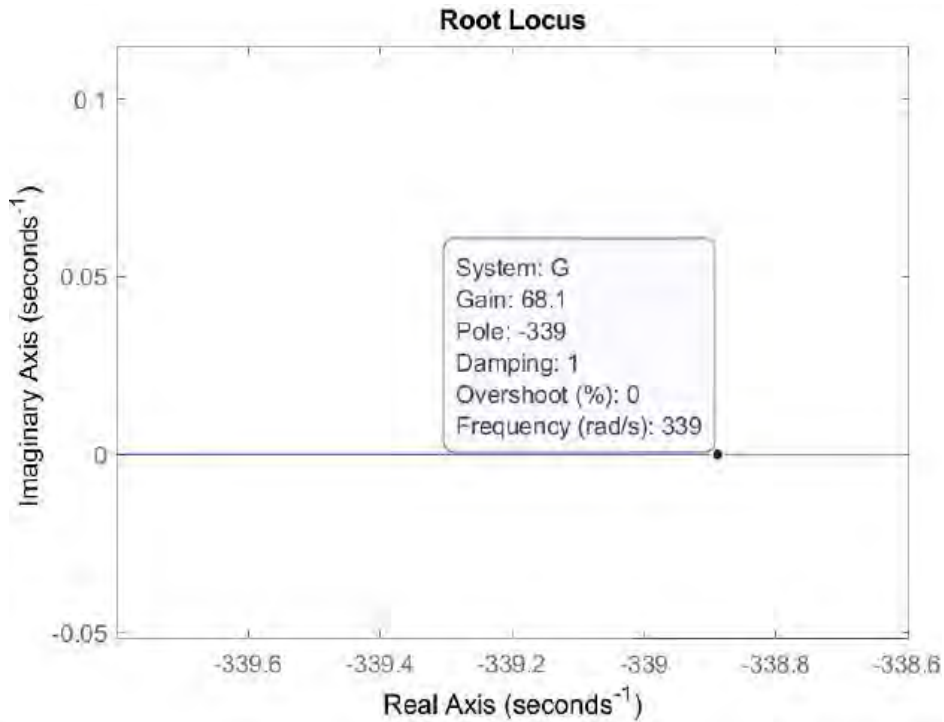


Figura 22. Lugar geométrico de raíces de la planta de corriente (i_d)

- **Diseño de los controladores referentes al par electromagnético (corriente i_q) y a la velocidad (ω)**

De acuerdo con la Figura 23, el sistema de control que se diseñó fue en cascada, donde el lazo de control secundario corresponde al control de corriente (i_q) y el lazo de control primario, al control de velocidad (ω). Se opta por un control en cascada con la finalidad de reducir las perturbaciones que se podrían generar en el lazo de control de velocidad [24].

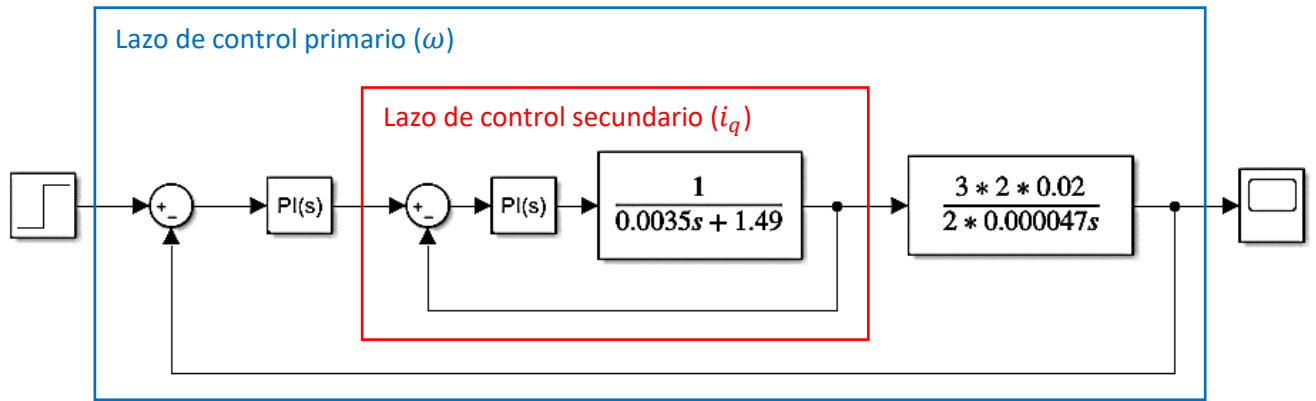


Figura 23. Sistema de control de velocidad en cascada

La función de transferencia del lazo de control secundario es la que se expresa en la ecuación 3.7, ya que la inductancia en el eje directo (L_d) se puede considerar aproximadamente igual a la inductancia en el eje en cuadratura (L_q), de acuerdo con lo investigado en [30], por ende, se considera los mismos parámetros del controlador PI que se detalló en el lazo de control de corriente i_d . Luego se procedió a diseñar el controlador del lazo primario, cuyo análisis basado en el LGR permitió obtener los siguientes parámetros: $K_p = 0.0078$ y $K_i = 0.0014$, la Figura 24 evidencia la ganancia proporcional que se alcanzó en el LGR y anticipa que la respuesta del sistema de control de velocidad no tendrá sobreimpulso ($overshoot = 0\%$).

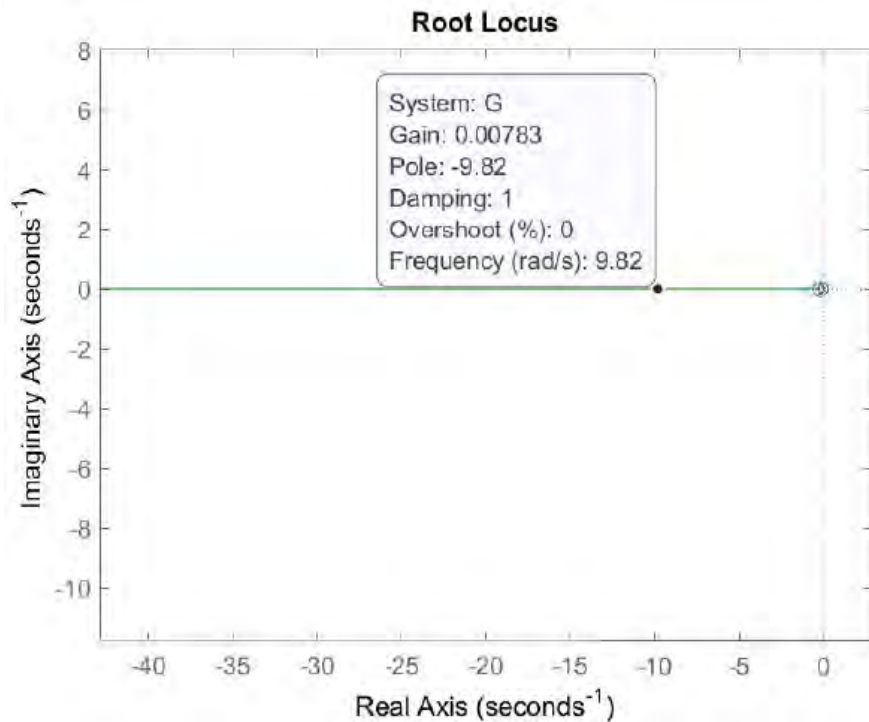


Figura 24. Lugar geométrico de raíces de la planta de velocidad (ω)

Cuando se le aplicó una entrada de 1 rad/s, el sistema de control de velocidad (lazo de control primario) tuvo la respuesta que se visualiza en la Figura 25, allí se corrobora la ausencia del sobreimpulso con un error en estado estable aproximadamente igual a cero.

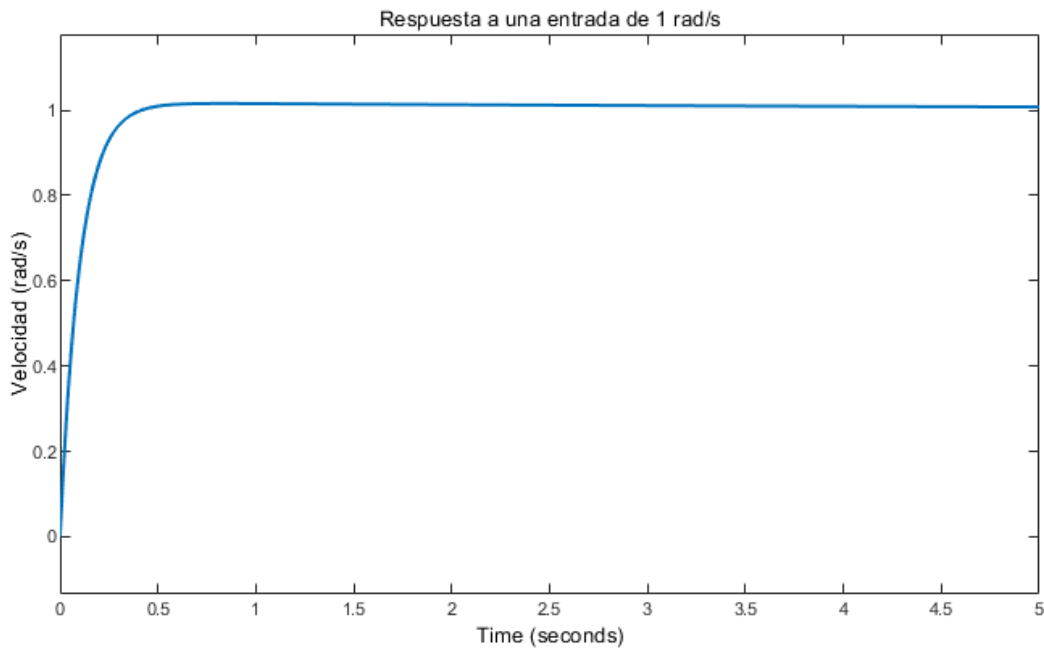


Figura 25. Respuesta del sistema de control de velocidad

En la Figura 25 también se puede observar que la respuesta se establece en 0.5 segundos, lo que evidencia que se trata de un proceso más lento en comparación a la respuesta del lazo de control de corriente (i_d , i_q), que se muestra en la Figura 21. Dicha afirmación se sustenta en el hecho de que un proceso eléctrico (control de corriente) siempre supondrá una respuesta más rápida que un proceso mecánico (control de velocidad) [24].

Finalmente, el diagrama de simulación para algoritmos de velocidad con control vectorial se muestra en la Figura 26, allí se aprecian los controladores y las transformadas que se detallaron previamente. La referencia del lazo de flujo (i_d) se establece a cero para que no genere un efecto desmagnetizante en el rotor del motor; mientras que, la referencia del lazo de par electromagnético (i_q) dependerá de la velocidad que tenga el robot móvil para seguir trayectorias. Además, se definió un tiempo de muestreo igual a 0.00002 porque en el control vectorial existe una gran cantidad de conmutaciones que realizan los *mosfets* para generar una señal de salida en el inversor, se estima que se involucran 6000 conmutaciones en 0.1 segundos, según lo investigado en [28]

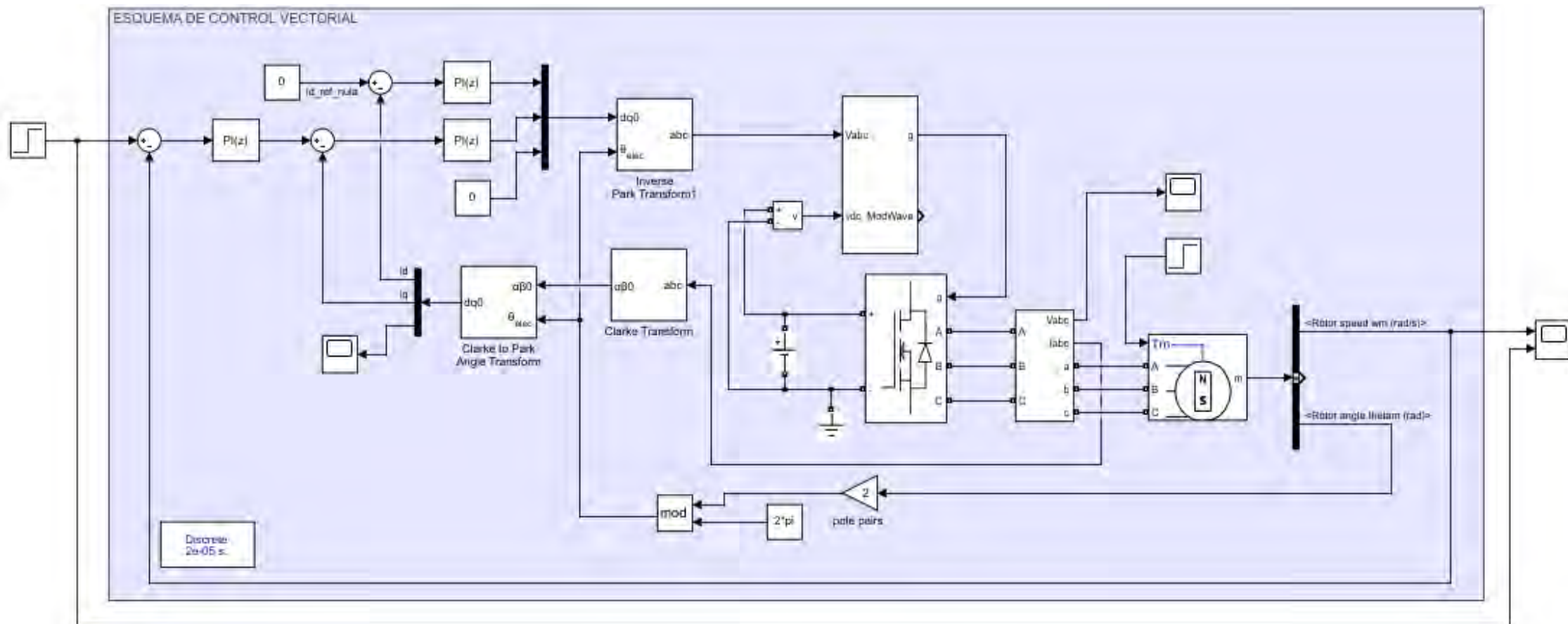


Figura 26. Diagrama de simulación de algoritmos de control vectorial para un motor sin escobillas

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y SIMULACIONES

En el presente capítulo se valida los diseños involucrados en el dominio de control. Para ello, se hace uso de la herramienta Simulink que permitirá simular y visualizar las trayectorias que realiza el robot móvil mediante motores sin escobillas con control vectorial. También se describirá el análisis de las simulaciones obtenidas en Simulink.

4.1. Validación del diseño del dominio de control

Para validar el dominio de control del robot móvil, se aplica el valor de los controladores que fueron diseñados y expuestos en el Capítulo 3. Es importante recalcar que dichos controladores fueron diseñados a partir de los valores reales de un motor sin escobillas.

4.1.1. Simulación del algoritmo de control vectorial

Se aplicó una velocidad de 60 rad/s al esquema de simulación de control vectorial diseñado en el Capítulo 3 (ver Figura 26), y su respuesta es la curva de color rojo que se ilustra en la Figura 27; mientras que, la curva de color azul describe la respuesta de velocidad del sistema de control en cascada de la Figura 23.

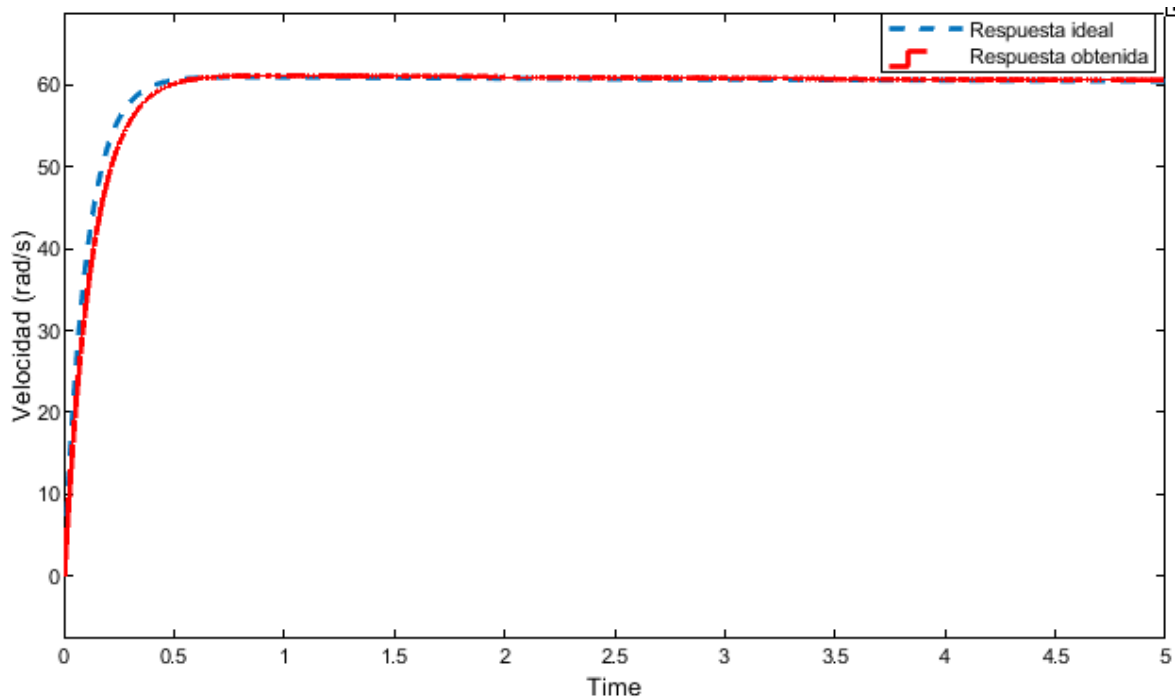


Figura 27. Respuesta del control vectorial ante una entrada de 60rad/s

Es evidente notar que ambas señales describen un buen seguimiento de referencia, pero difieren de una amplitud igual a 1.526 en el segundo 0.35, según la Figura 28. De acuerdo con el diseño de los controladores descritos en el Capítulo 3, la respuesta obtenida (curva de color rojo) debería establecerse en 0.35s como lo hizo la respuesta ideal (curva de color azul). Sin embargo, si se considera el 5% del valor final para determinar el tiempo de establecimiento, la respuesta podría considerarse aceptable porque la velocidad ya alcanza aproximarse a 57 rad/s.

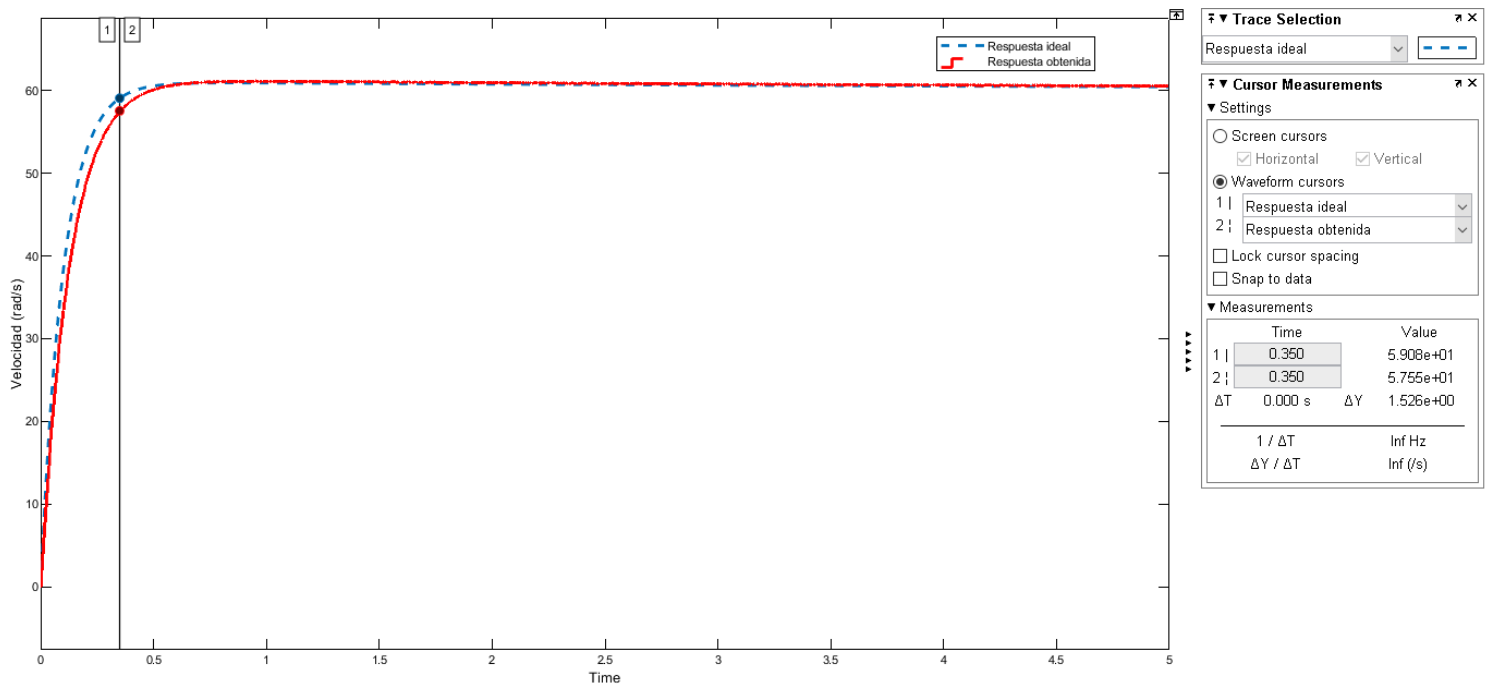


Figura 28. Descripción de valores obtenidos de la respuesta de velocidad a 60 rad/s

El diagrama de simulación de algoritmos de control vectorial, ilustrado en la Figura 26, también permite simular entradas superiores a 60 rad/s, como muestra de lo afirmado se aplicó entradas de 75rad/s y 100rad/s, y sus respectivas respuestas se muestran en la Figura 29 y la Figura 30.

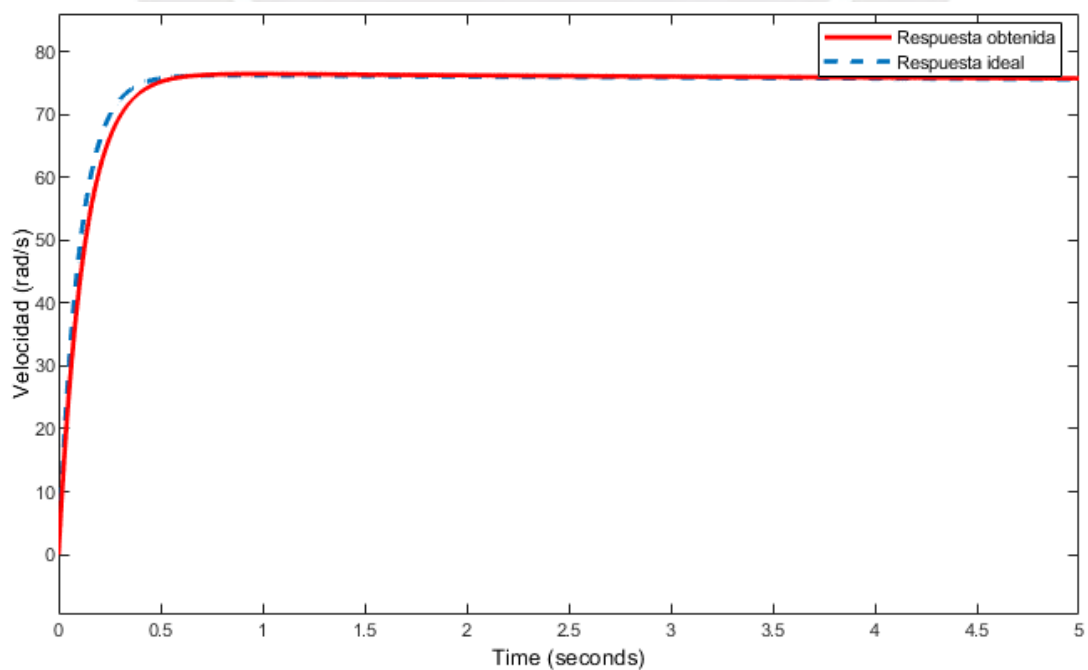


Figura 29. Respuesta del control vectorial ante una entrada de 75 rad/s

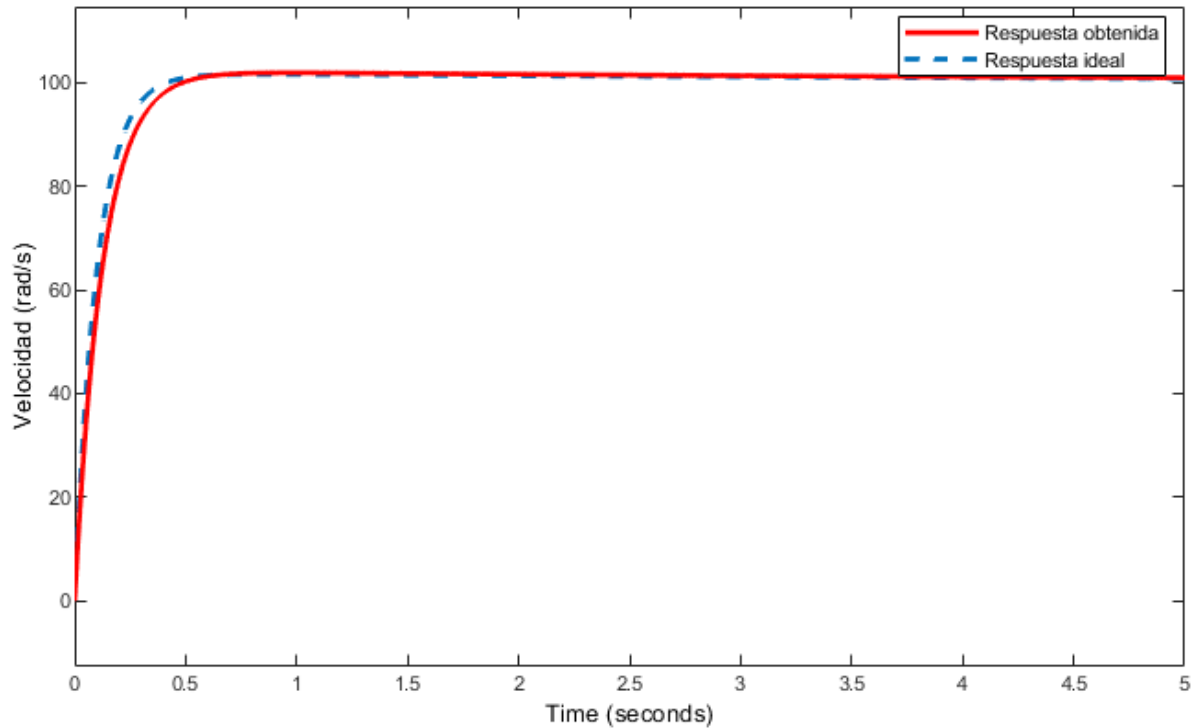


Figura 30. Respuesta del control vectorial ante una entrada de 100 rad/s

Pero, es importante mencionar que para llegar a la referencia de velocidad de 60 rad/s la “fase amarilla” del motor sin escobillas alcanza un pico máximo de 26.12 voltios y un pico mínimo de -11.12 voltios (ver Figura 31 y Tabla 16), lo cual supera el voltaje de alimentación del motor (24V), por otro lado, en el control de corriente la “fase amarilla” no supera los 0.5 amperios que se visualiza en la Figura 32, ello se puede corroborar en la Tabla 17 porque allí se describe las características principales de las señales de corriente en las tres fases del motor sin escobillas.

Tabla 16. Señales de voltaje en las tres fases del motor (referencia 60 rad/s)

Fase Amarilla			Fase Azul			Fase Naranja		
Signal Statistics			Signal Statistics			Signal Statistics		
	Value	Time		Value	Time		Value	Time
Max	2.612e+01	0.000e+00	Max	1.154e+01	0.499	Max	1.136e+01	0.410
Min	-1.112e+01	0.454	Min	-1.306e+01	0.000e+00	Min	-1.306e+01	0.000e+00
Peak to Peak	3.725e+01		Peak to Peak	2.460e+01		Peak to Peak	2.442e+01	
Mean	6.789e-02		Mean	4.630e-02		Mean	-1.142e-01	
Median	5.261e-02		Median	5.163e-02		Median	-8.034e-02	
RMS	2.991e+00		RMS	2.940e+00		RMS	2.998e+00	

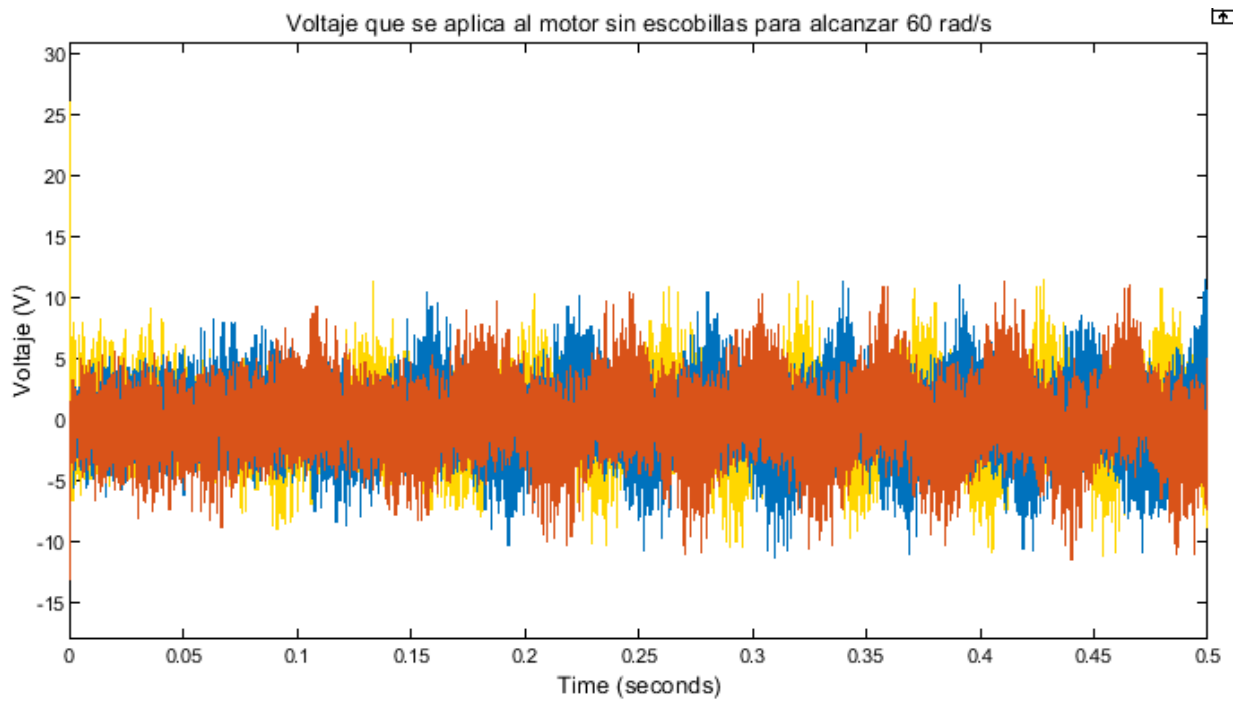


Figura 31. Voltaje requerido para alcanzar la referencia de 60 rad/s

Tabla 17. Señales de corriente en las tres fases del motor (referencia 60 rad/s)

Fase Amarilla			Fase Azul			Fase Naranja		
Signal Statistics			Signal Statistics			Signal Statistics		
	Value	Time		Value	Time		Value	Time
Max	4.862e-01	1.540e-03	Max	2.997e-01	0.065	Max	2.600e-01	0.109
Min	-2.923e-01	0.093	Min	-2.431e-01	1.540e-03	Min	-3.596e-01	0.037
Peak to Peak	7.785e-01		Peak to Peak	5.428e-01		Peak to Peak	6.196e-01	
Mean	2.175e-02		Mean	4.401e-03		Mean	-2.615e-02	
Median	5.832e-03		Median	1.794e-04		Median	-8.736e-03	
RMS	1.163e-01		RMS	8.612e-02		RMS	1.048e-01	

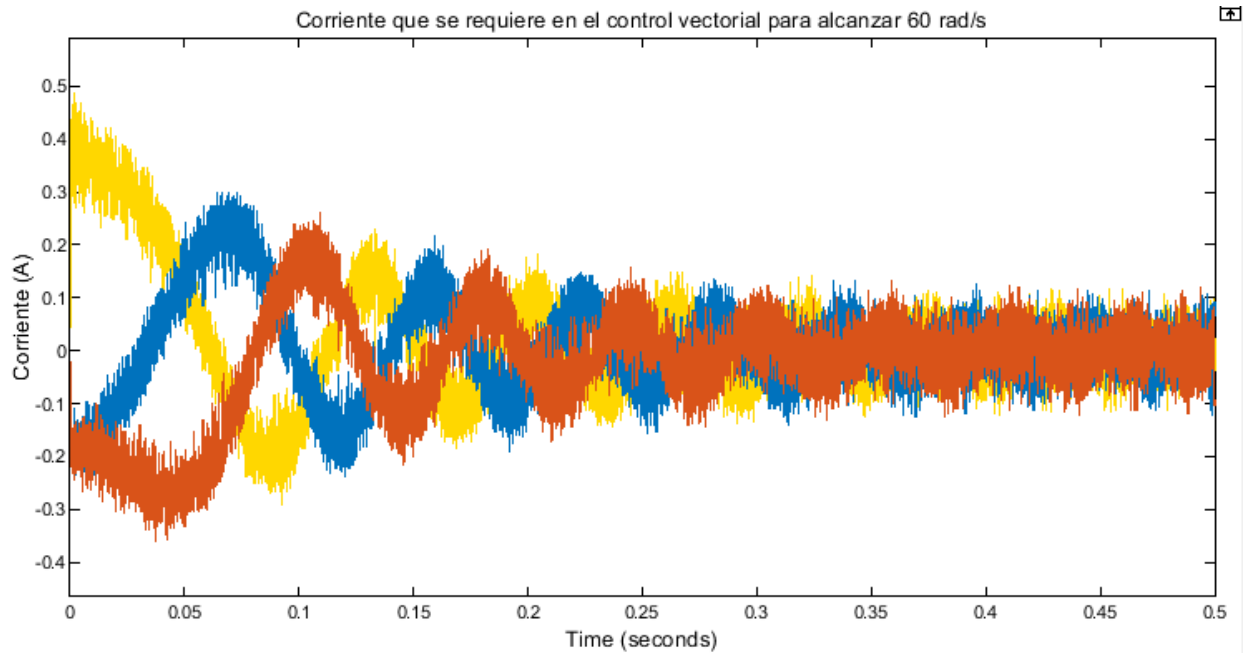


Figura 32. Corriente requerida para alcanzar la referencia de 60 rad/s

En cuando a las velocidades de 75 rad/s y 100 rad/s, se espera que los valores de voltaje y corriente superen lo alcanzado en la Figura 31 y 32, ya que obtener respuestas de velocidades mayores a 60 rad/s que sean estables y no presenten sobreimpulso implica usar más energía.

No obstante, el interés de la tesis radica en desplazar al robot móvil a velocidades más pequeñas, por ejemplo, la velocidad determinada en la ecuación 3.2. Dicho valor representa la velocidad mínima que se requiere para el control de seguimiento de trayectorias del robot móvil, entonces se simula una entrada con amplitud de 5 rad/s (equivalente a 46 RPM) y la respuesta del sistema se muestra en la Figura 33. En dicha figura se puede observar que la respuesta sigue describiendo un buen control de velocidad con control vectorial, por lo que se aplicó una entrada de 1 rad/s (ver Figura 34).

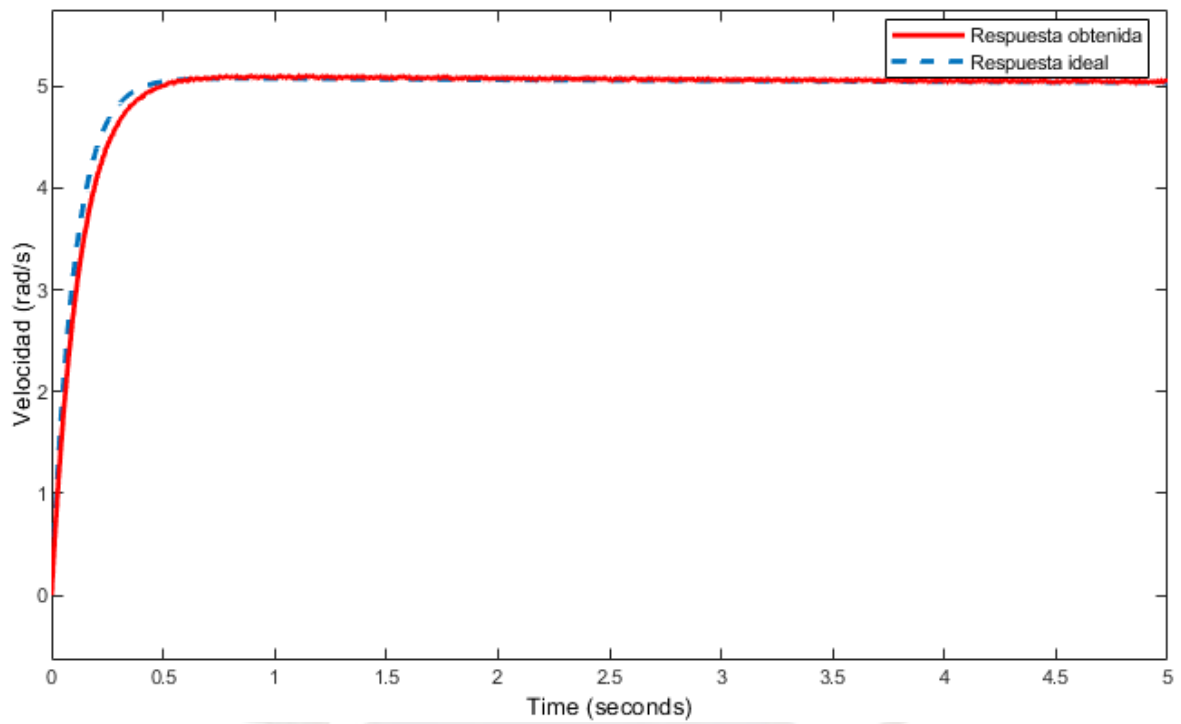


Figura 33. Respuesta del control vectorial ante una entrada de 5 rad/s

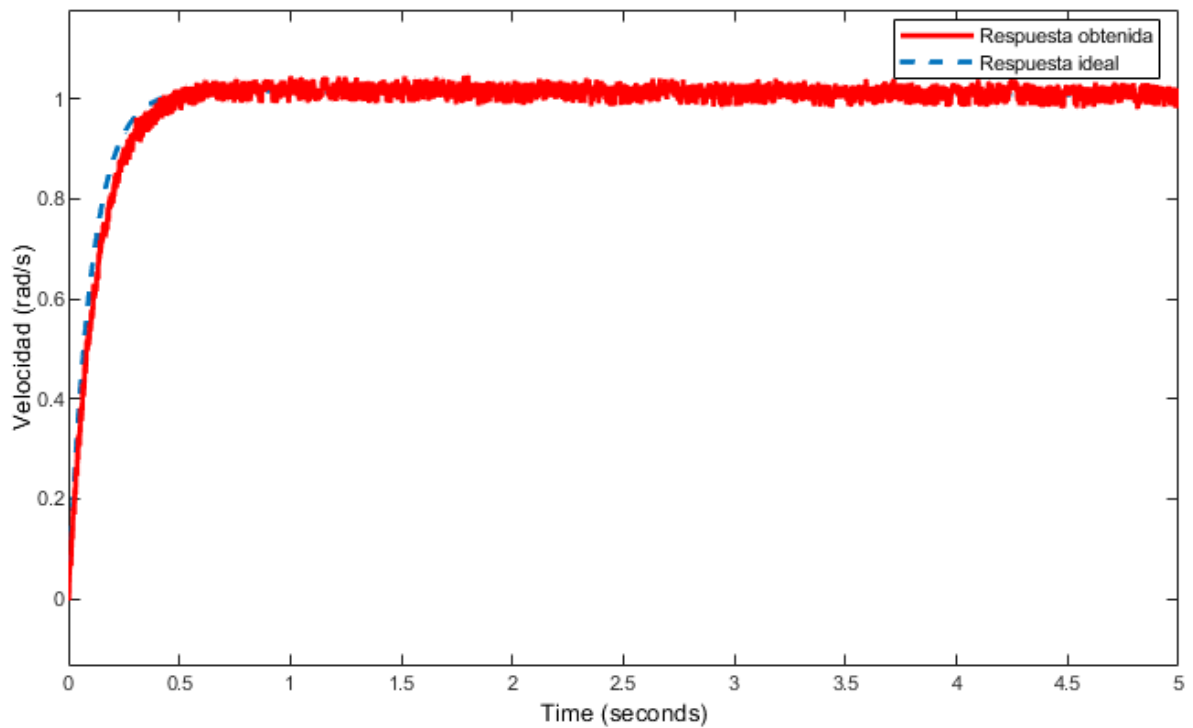


Figura 34. Respuesta del control vectorial ante una entrada de 1 rad/s

El comportamiento del voltaje y la corriente en las tres fases del motor sin escobillas que se obtiene cuando se aplica una entrada escalón de 5 rad/s, se muestra en la Figura 35 y 36. En la Figura 35, se evidencia un bajo consumo de voltaje, ya que el voltaje pico máximo alcanza el valor de 4.720 voltios en el tiempo 0.082 segundos (cursor 1), dicho pico corresponde voltaje del motor en la “fase amarilla”. En la figura también se muestra el pico mínimo de voltaje que corresponde a la “fase naranja”, dicho pico tiene un valor mínimo igual a -4.909 voltios en el tiempo de 0.177 segundos (cursor 2).

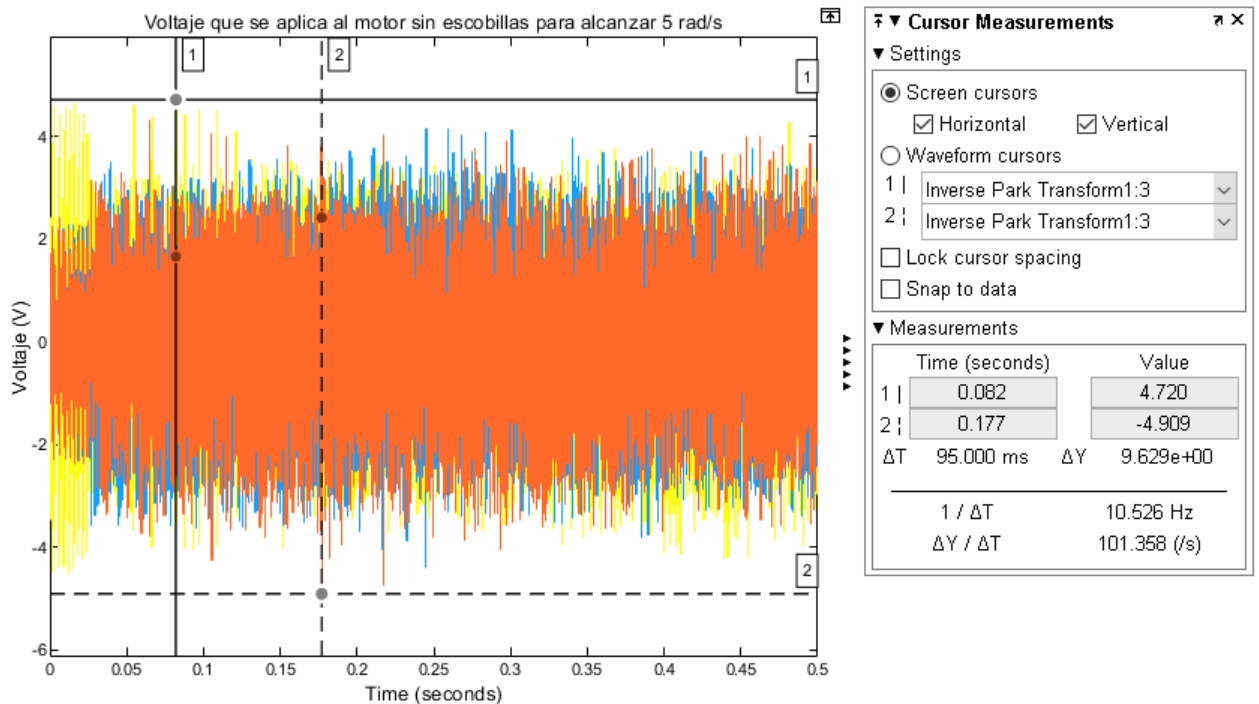


Figura 35. Voltaje requerido para alcanzar la referencia de 5 rad/s

En la Figura 36, se muestra el comportamiento de la corriente cuando se aplica una referencia de 5 rad/s. En dicha figura podemos notar que el máximo pico de corriente corresponde a la “fase amarilla” del motor, y llega a 0.102 amperios en 0.00140 segundos (cursor 1); mientras que el mínimo pico de corriente corresponde a la “fase naranja” del motor y tiene un valor igual a -0.082 amperios en el tiempo de 0.065 segundos (cursor 2).

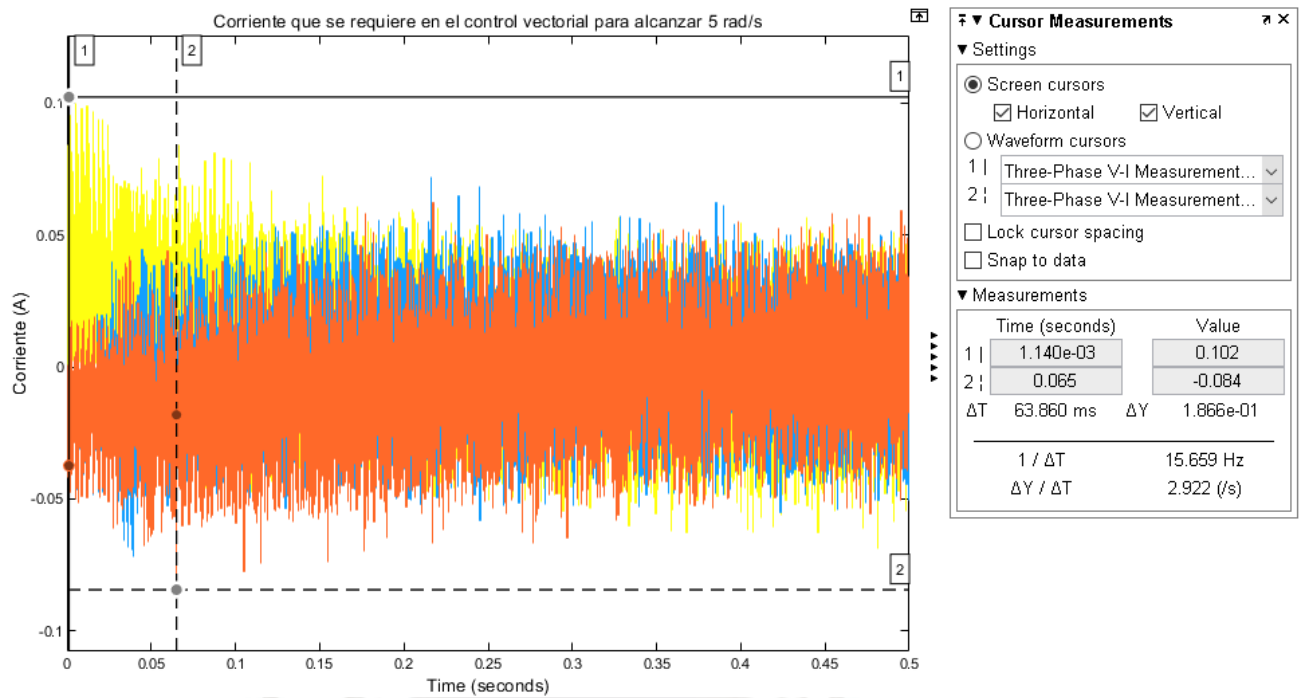


Figura 36. Corriente requerida para alcanzar la referencia de 5 rad/s

Por último, se puede afirmar que la velocidad máxima con la que el robot móvil puede seguir trayectorias es 55 rad/s, ya que el máximo consumo de voltaje para un tiempo igual a cero segundos, es aproximadamente 24 voltios (voltaje de alimentación de la batería), y el voltaje pico mínimo alcanza el valor de 8.73 voltios. Esto se puede verificar en la Tabla 18, allí se muestra las principales características de las tres señales de voltaje del motor sin escobillas que se ilustra en la Figura 38, efectivamente el máximo pico de voltaje en un tiempo igual a cero segundos lo registra la “fase amarilla”.

Por otro lado, la corriente alcanza un valor pico máximo de 0.4 amperios en la fase “amarilla” y un pico mínimo igual a -0.2168 en la “fase naranja” del motor, según la Figura 39. En la Tabla 19 se puede comprobar que el máximo pico de corriente en un tiempo igual a 0.00034 segundos corresponde la “fase amarilla del motor”, mientras que el pico mínimo correspondiente a la “fase naranja” se alcanza en 0.048 segundos.

Para terminar, la Figura 37 muestra la respuesta del control vectorial cuando se aplica una entrada equivalente a 55 rad/s.

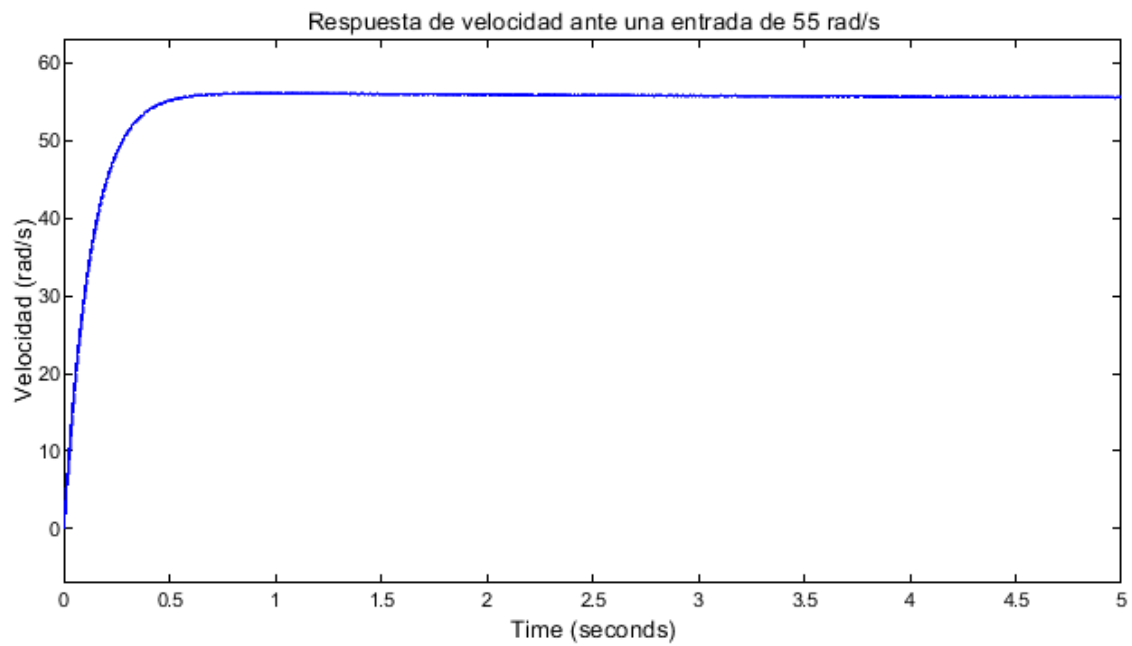


Figura 37. Respuesta de velocidad de una referencia de 55 rad/s

Tabla 18. Características de las señales de voltaje en las tres fases del motor para una referencia de 55 rad/s

Fase Amarilla			Fase Azul			Fase Naranja		
Signal Statistics			Signal Statistics			Signal Statistics		
	Value	Time		Value	Time		Value	Time
Max	2.394e+01	0.000e+00	Max	8.099e+00	0.478	Max	9.307e+00	0.382
Min	-8.729e+00	0.247	Min	-1.197e+01	0.000e+00	Min	-1.197e+01	0.000e+00
Peak to Peak	3.267e+01		Peak to Peak	2.007e+01		Peak to Peak	2.128e+01	
Mean	-2.157e-02		Mean	6.611e-02		Mean	-4.454e-02	
Median	-1.207e-02		Median	6.345e-02		Median	-7.558e-02	
RMS	2.237e+00		RMS	2.198e+00		RMS	2.230e+00	

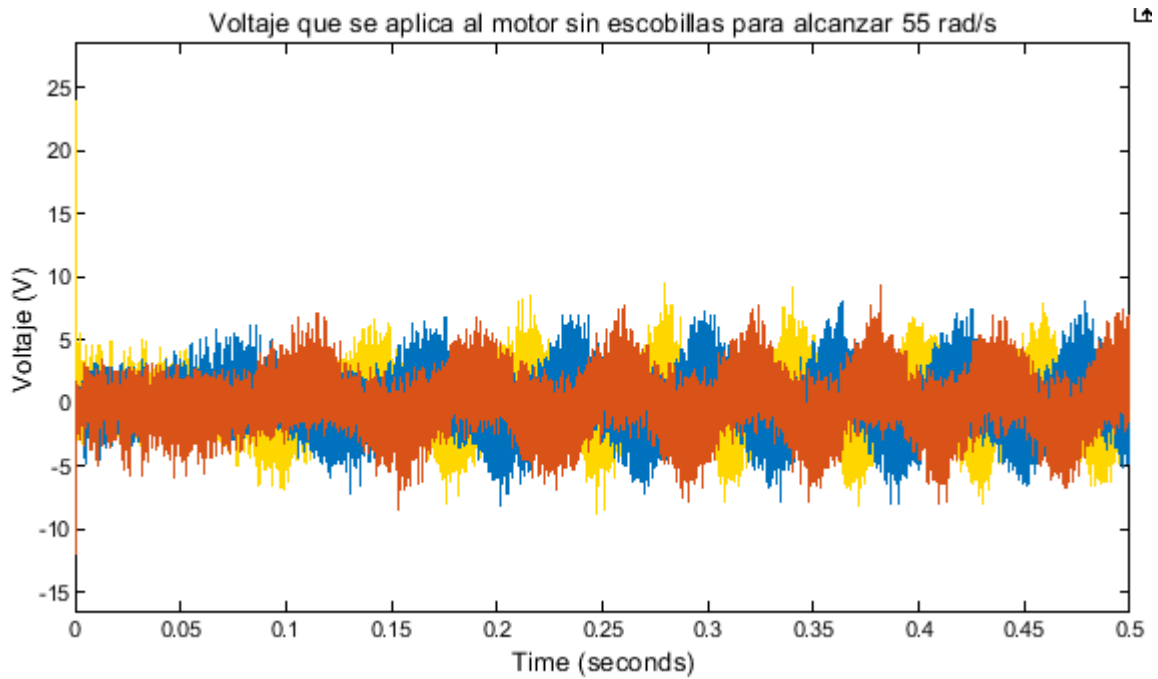


Figura 38. Voltaje requerido para alcanzar la referencia de 55 rad/s

Tabla 19. Características de las señales de corriente en las tres fases del motor para una referencia de 55 rad/s

Fase Amarilla			Fase Azul			Fase Naranja		
Signal Statistics			Signal Statistics			Signal Statistics		
	Value	Time		Value	Time		Value	Time
Max	4.091e-01	3.400e-04	Max	2.532e-01	0.075	Max	2.147e-01	0.111
Min	-2.267e-01	0.092	Min	-2.168e-01	4.140e-03	Min	-2.992e-01	0.048
Peak to Peak	6.357e-01		Peak to Peak	4.700e-01		Peak to Peak	5.138e-01	
Mean	2.055e-02		Mean	4.248e-03		Mean	-2.480e-02	
Median	3.862e-03		Median	1.007e-03		Median	-7.122e-03	
RMS	1.042e-01		RMS	7.488e-02		RMS	9.300e-02	

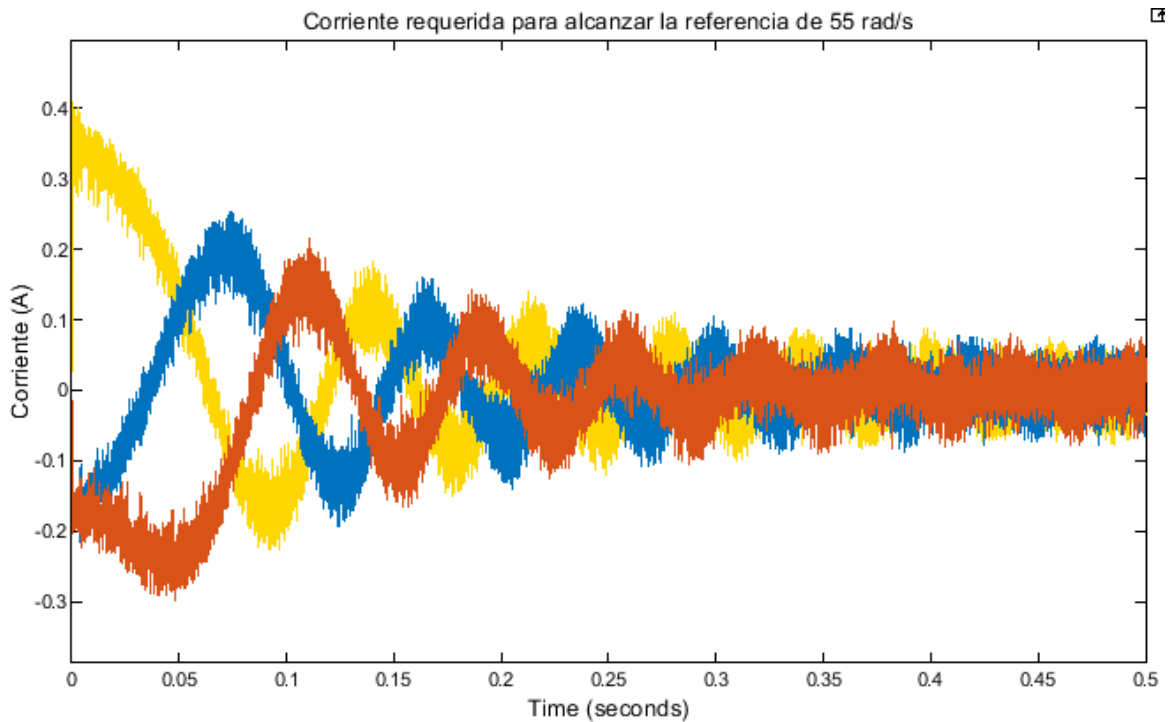


Figura 39. Corriente requerida para alcanzar la referencia de 55 rad/s

4.1.2. Simulación del algoritmo de seguimiento de trayectorias

Al inicio de la Figura 40, se ilustra el bloque *Matlab Function* que permitió implementar los algoritmos de control de seguimiento de trayectorias. Las salidas de velocidad derecho e izquierdo de dicha función, son aplicadas al bloque “control de velocidad con control vectorial” para obtener las velocidades controladas y aplicarlas al modelo cinemático del robot móvil, de esa manera se podrá visualizar la trayectoria que se obtuvo.

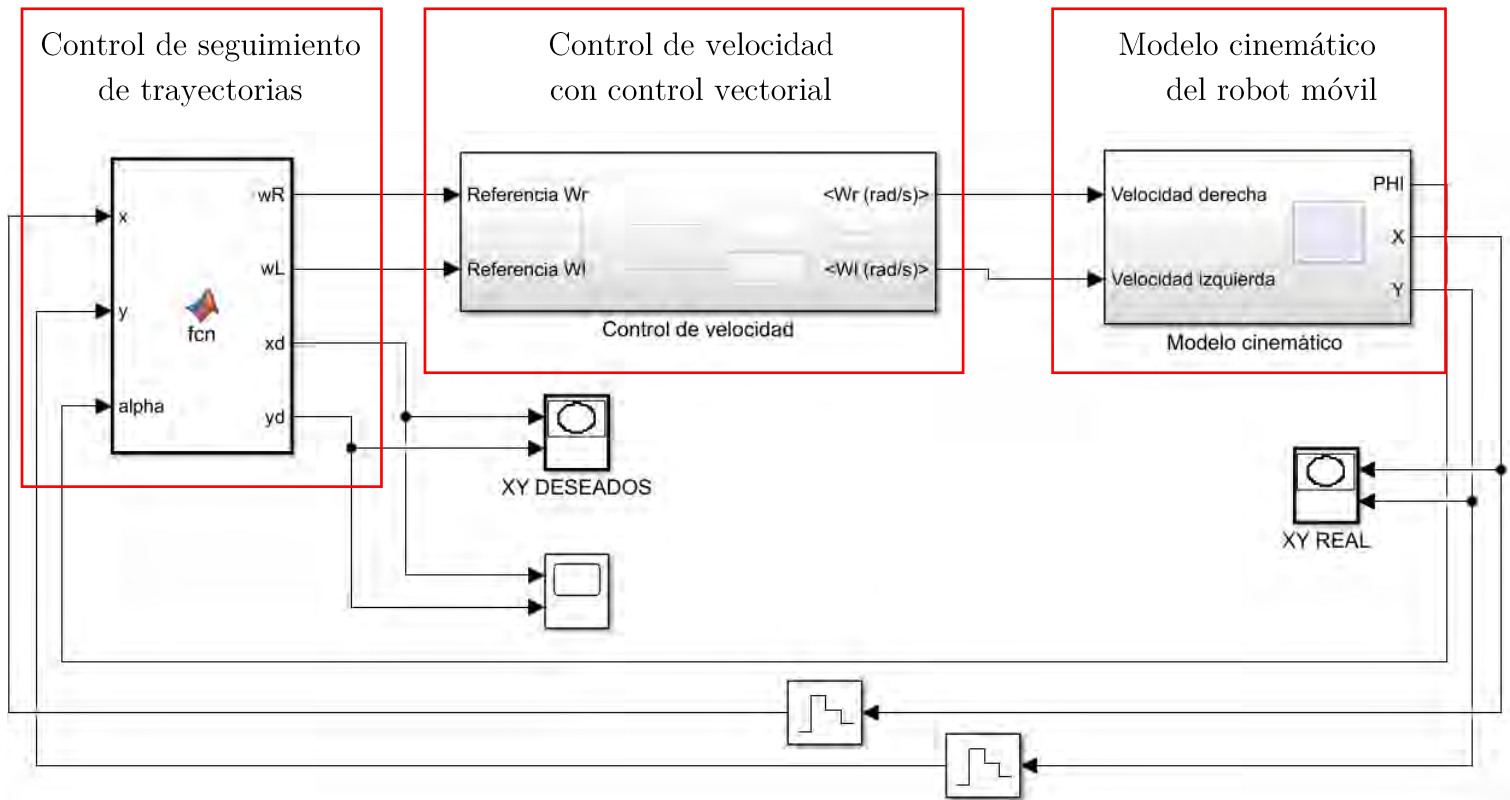


Figura 40. Diagrama de simulación para un algoritmo de seguimiento de trayectorias

Haciendo uso del diagrama de simulación de seguimiento de trayectorias con control vectorial, que se muestra en la Figura 40, se implementó la ley de control para que el robot móvil siga una trayectoria circular de radio de 6m a una velocidad de 5m/s. La Figura 41 muestra la simulación de la trayectoria deseada, pero, sobre todo la trayectoria real que se obtuvo en el plano XY. También se evidencia que, en la trayectoria real, el robot móvil inicia su recorrido en el origen del plano bidimensional XY.

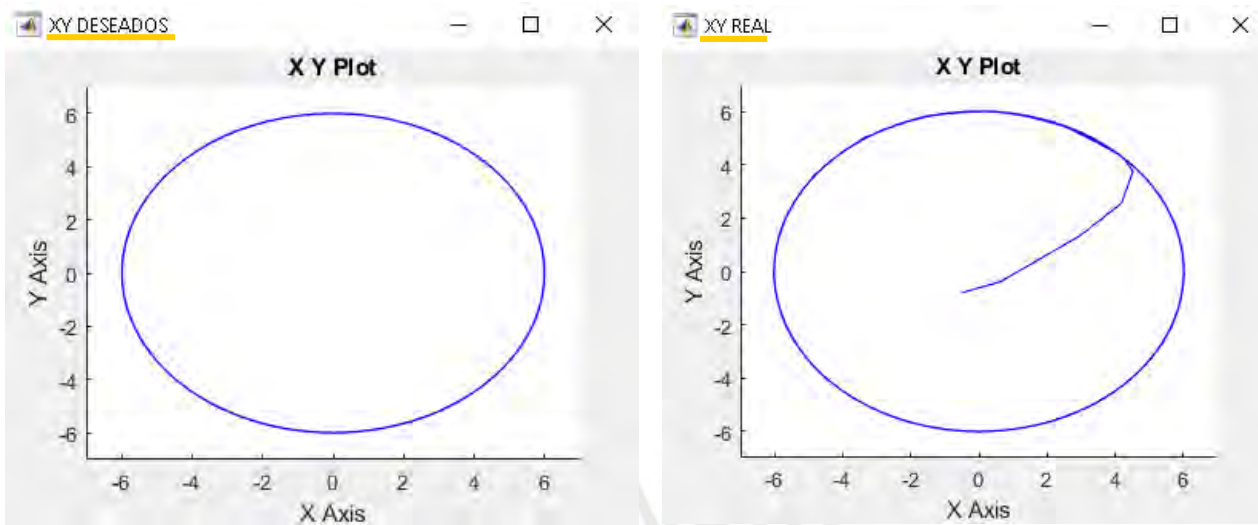


Figura 41. Trayectoria circular deseada y obtenida

Por último, se simuló la trayectoria ilustrada en la Figura 42, y consta de cuatro tramos: dos semicircunferencias de radio de 0.8m y dos rectas de longitud de 1m.

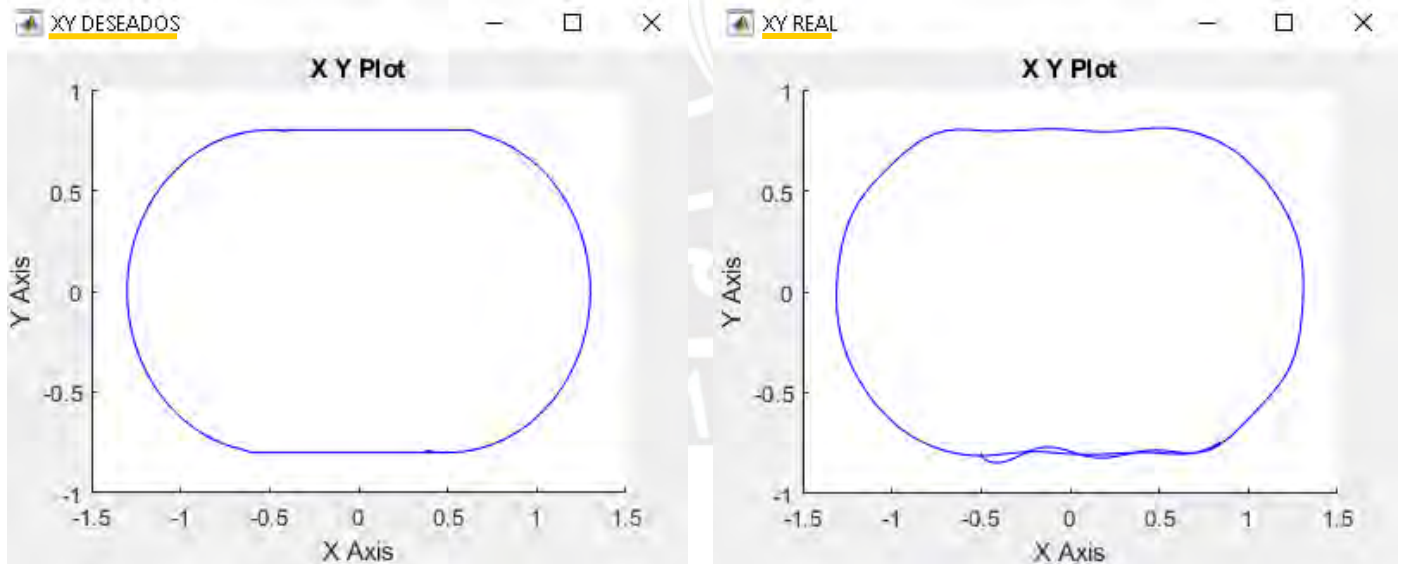


Figura 42. Trayectoria deseada y obtenida realizada por tramos

CONCLUSIONES

De acuerdo con el objetivo general de la tesis, se concluye que es posible diseñar un robot móvil prototipo que cuente con una carga operativa máxima de 10kg y sea empleado como una plataforma de pruebas en la que se pueda implementar un algoritmo de seguimiento de trayectorias mediante motores sin escobillas con control vectorial. Es importante recalcar que solo se consideró el modelo cinemático del robot móvil.

Se concluye que se diseñó una tarjeta electrónica funcional porque cumple con el objetivo específico de la tesis y con los requerimientos necesarios para la implementación de algoritmos de control vectorial en los motores sin escobillas del robot móvil. De hecho, la selección de cada componente involucrado en el diagrama esquemático electrónico, ilustrado en la Figura 13, fue seleccionado a partir de los cálculos teóricos que involucra el diseño de un robot móvil de tracción diferencial.

El diseño prototipo del chasis mecánico para un robot móvil con tracción diferencial, cumple con la característica ergonómica y las dimensiones que se detallan en la Tabla 1 de la tesis. Esto se concluye porque a partir de dichas especificaciones se diseñó el circuito electrónico para implementar algoritmos de control vectorial en el robot móvil, entonces se completa uno de los objetivos específicos de la tesis.

Se concluye que ha sido posible integrar el algoritmo de control vectorial con el algoritmo de seguimiento de trayectorias para controlar los movimientos que realizan los motores sin escobillas del robot móvil, y con esto se cumple uno de los objetivos específicos de la tesis. Además, es imprescindible conocer el sistema de ecuaciones que modela un motor sin escobillas, porque permitirá diseñar los controladores necesarios que serán aplicados en el control vectorial.

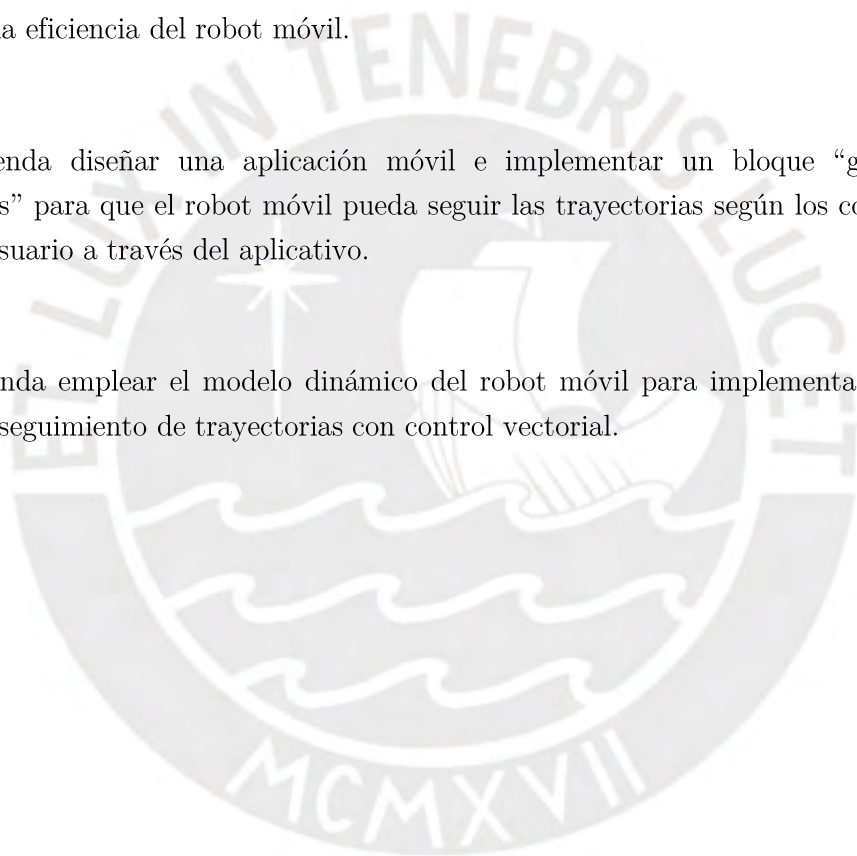
RECOMENDACIONES

Debido a que la información acerca de las características eléctricas, que se detalla en las hojas de datos de un motor sin escobillas, es escasa, se recomienda hacer ensayos o mediciones para obtener dichos parámetros porque son necesarios en el modelamiento del motor sin escobillas e imprescindibles para aplicar el control vectorial.

De acuerdo con las simulaciones en el Capítulo 4, se han implementado dos algoritmos de seguimiento de trayectorias, sin embargo, se recomienda realizar más ensayos con la finalidad de probar la eficiencia del robot móvil.

Se recomienda diseñar una aplicación móvil e implementar un bloque “generador de trayectorias” para que el robot móvil pueda seguir las trayectorias según los comandos que emite un usuario a través del aplicativo.

Se recomienda emplear el modelo dinámico del robot móvil para implementar una ley de control de seguimiento de trayectorias con control vectorial.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Ollero, *Robótica, manipuladores y robots móviles*. Barcelona, 2001.
- [2] J. Tafur, "Metodología de Diseño y Análisis de Sistemas Teleoperados Considerando Dinámica No Lineal". Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [3] S. Y. Nof, *"Handbook of industrial robotics"*. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [4] A. Bariantos, L. Felipe Penín, C. Balaguer, y R. Aracil, FUNDAMENTOS DE LA ROBÓTICA, 2007. [Ebook Online] Disponible: <http://www.ebooks7-24.com.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/stage.aspx?il=7370&pg=&ed=> (accedido may 03, 2020).
- [5] A. Torabi, M. Khadem, K. Zareinia, G. R. Sutherland, y M. Tavakoli, *"Manipulability of teleoperated surgical robots with application in design of master/slave manipulators, International Symposium on Medical Robotics (ISMR)"*, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISMR.2018.8333307.
- [6] A. Mohand Ousaid, A. Bolopion, S. Haliyo, S. Régnier, y V. Hayward, *"Stability and transparency analysis of a teleoperation chain for microscale interaction"*, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014, pp. 5946-5951, doi: 10.1109/ICRA.2014.6907735.
- [7] V. H. Andaluz, J. Varela-Aldás, F. A. Chicaiza, W. X. Quevedo, y B. Ruales, "Teleoperación de un manipulador móvil con retroalimentación de fuerzas para evasión de obstáculos", p. 15, abril 2019.
- [8] G.-Z. Yang *et al.*, *"Combating COVID-19—The role of robotics in managing public health and infectious diseases"*, *Sci. Robot.*, vol. 5, n.º 40, p. eabb5589, mar. 2020, doi: 10.1126/scirobotics.abb5589.
- [9] M. Tavakoli, J. Carriere, y A. Torabi, *"Robotics For COVID-19: How Can Robots Help Health Care in the Fight Against Coronavirus"*, 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.21723.52004.
- [10] A. Khamis, "INTERACCIÓN REMOTA CON ROBOTS MÓVILES BASADA EN INTERNET". Universidad Carlos III de Madrid, 2003.
- [11] I. Bambino "Una introducción a los robots móviles", 2008.
- [12] N. Hernández, "Sistema de control de movimiento para un manipulador móvil". Instituto Politécnico Nacional, 2015.
- [13] J. Pérez, "Sistema de control de robot móvil para transporte de material". Centro de Investigación en Ingeniería y Desarrollo Industrial, 2016.
- [14] L. Han *et al.*, *"System and design of a compact and heavy-payload AGV system for flexible production line"*, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, dic. 2013, pp. 2482-2488, doi: 10.1109/ROBIO.2013.6739844.
- [15] R. Carelli, G. Forte, L. Canali, V. Mut, G. Araguás, y E. Destéfánis, *"Autonomous and teleoperation control of a mobile robot"*, *Mechatronics*, vol. 18, n.º 4, pp. 187-194, may 2008, doi: 10.1016/j.mechatronics.2008.01.002.

- [16] Y. Jia, *"TELEOPERATION OF MOBILE MANIPULATORS"*, Michigan State University, 2014.
- [17] Jong-Min Yang y Jong-Hwan Kim, *"Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots"*, *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 15, n.º 3, pp. 578-587, jun. 1999, doi: 10.1109/70.768190.
- [18] L. Romero y A. Concha, *"Control of Position/Velocity in a Mobile Robot Using DC Brushless Motors"*, *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA '06)*, Cuernavaca, Morelos, sep. 2006, vol. 2, pp. 200-205, doi: 10.1109/CERMA.2006.29.
- [19] Chih-Fu Chang, C.-I. Huang, y Li-Chen Fu, *"Nonlinear control of a wheeled mobile robot with nonholonomic constraints"*, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583)*, The Hague, Netherlands, 2004, vol. 6, pp. 5404-5410, doi: 10.1109/ICSMC.2004.1401053.
- [20] A. Derdiyok, K. Orman, y A. Basci, *"Speed and Direction Angle Control of Four Wheel Drive Skid-Steered Mobile Robot by Using Fractional Order PI Controller"*, *Elektron. Ir Elektrotehnika*, vol. 22, n.º 5, pp. 14-19, oct. 2016, doi: 10.5755/j01.eie.22.5.16337.
- [21] L. Astudillo, P. Melin, y O. Castillo, *"CHEMICAL OPTIMIZATION PARADIGM APPLIED TO A FUZZY TRACKING CONTROLLER FOR AN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT"*, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, may 2013, vol. 9, p. 12.
- [22] Sheng Lin y A. A. Goldenberg, *"Neural-network control of mobile manipulators"*, *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 12, n.º 5, pp. 1121-1133, sep. 2001, doi: 10.1109/72.950141.
- [23] M. Bhardwaj, *"Sensored Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors"*, p. 35, 2013.
- [24] P. Castellanos, *"CONTROL VECTORIAL DE LA VELOCIDAD DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA DE IMANES PERMANENTES"*. Instituto Politécnico Nacional, 2011.
- [25] S. Zaman, W. Slany, y G. Steinbauer, *"ROS-based mapping, localization and autonomous navigation using a Pioneer 3-DX robot and their relevant issues"*, *Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC)*, Riyadh, Saudi Arabia, abr. 2011, pp. 1-5, doi: 10.1109/SIECPC.2011.5876943.
- [26] B. B. Gamarra, *"MÉTODOS DE DISEÑO EN INGENIERÍA MECATRONICA PROYECTO PRELIMINAR"*, Pontificia Universidad Católica del Perú, p. 19, 2016.
- [27] J. Castillo, V. Rojas y J. Martínez, *"Determinación del Torque y Potencia de un Motor de Combustión Interna a Gasolina Mediante el Uso de Bujía con Sensor de Presión Adaptado y Aplicación de un Modelo Matemático"*, Ecuador, 2017.
- [28] J. Hidalgo, *"DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO DE 0.5 kW APLICANDO LA TÉCNICA DE MODULACIÓN DE ANCHO DE PULSO DE VECTOR ESPACIAL"*, Pontificia Universidad Católica del Perú, p. 150, julio 2011.
- [29] B. G. Katz, *"A Low Cost Modular Actuator for Dynamic Robots"*, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, p. 104, 2018.

- [30] P. Flores, " DRIVER BASADO EN PROCESADOR ARM 32 BITS PARA UN MOTOR DC BRUSHLESS DE TRES FASES EMPLEANDO LA TÉCNICA DE CAMPO ORIENTADO", UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, España, 2017.
- [31] "E2000 STANDARD", DJI, 2016.



ANEXOS

Los documentos adjuntos corresponden al plano del chasis y las piezas del robot móvil:

- a) Robot móvil
- b) Base robot
- c) Espaldar robot
- d) Frontal robot
- e) Lateral robot
- f) Tapa robot
- g) Pieza curva 3D
- h) Eje de motor
- i) Placa PCB
- j) Rodamiento
- k) Soporte motor
- l) Soporte placa PCB

