

**DISEÑO DE UNA ARQUITECTURA DE CONTROL
PARA VEHICULOS ELECTRICOS OMNIDIRECCIONALES**

Por

LINA EUGENIA COCK ATEHORTUA

Ingeniera Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín

TESIS

Presentada en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

MAGISTER EN INGENIERIA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE DISEÑO
DECANATURA DE INGENIERIAS**

**UNIVERSIDAD EAFIT
Medellín, Colombia**

2015

Asesor:

Ing, Gilberto Osorio Gómez, Ph.D.

Resumen

La necesidad de vehículos silenciosos sin emisiones de carbono, así como, el avance en motores eléctricos, baterías y controladores, han impulsado el desarrollo e investigación de productos de movilidad eléctrica en todo el mundo, desde pequeños robots que juegan fútbol, vehículos para transportar equipos de rescate o cámaras de vigilancia, sillas de ruedas o vehículos para movilidad unipersonal, hasta buses y montacargas.

Lo anterior motivó que se incorporara en el pensum de Ingeniería de Diseño de Producto de la Universidad EAFIT, un curso en el que los estudiantes deben diseñar y construir el prototipo de un producto de movilidad eléctrica. La experiencia con el curso, muestra que el sistema de control y su integración con los sensores, actuadores y mandos del producto es esencial para lograr que éste sea confiable, robusto, amigable y constituye un factor diferenciador e innovador. Así mismo, se han evidenciado dificultades en los prototipos que utilizan dirección por diferencial de velocidad, es decir cuando la dirección de desplazamiento se determina mediante el control de la velocidad y sentido de giro de dos de las ruedas cada una con un sistema de propulsión independiente.

Adicionalmente, una de las necesidades recurrentes ha sido el diseño y construcción de un vehículo fácil de maniobrar y de bajo costo que pueda evadir obstáculos, estacionar y circular fácilmente por pasillos estrechos o congestionados. Para esto, en la actualidad existen vehículos eléctricos omnidireccionales pero son productos costosos que integran todos los componentes (mecánicos y eléctricos).

Lo anterior motivó el estudio del estado del arte en vehículos eléctricos omnidireccionales y el análisis de la posibilidad de ofrecer a los estudiantes del curso la opción de controladores que se puedan utilizar en diferentes productos con características de movimiento omnidireccional.

Se encontraron fabricantes de vehículos omnidireccionales, pero sus productos son costosos y los controladores utilizados son específicos para los componentes mecánicos y eléctricos.

Se plantea el objetivo de desarrollar una arquitectura de control para plataformas eléctricas omnidireccionales con cuatro ruedas tipo Mecanum, que pueda utilizarse en vehículos con diferentes requerimientos de potencia mecánica y condiciones de uso.

Se inicia con la determinación de la arquitectura y la selección del tipo de componentes que permitirán utilizar controlar plataformas que tengan diferentes requerimientos de potencia mecánica, sin que sea necesario cambiar el hardware de control.

Se desarrolla un procedimiento para determinar el motor-transmisión-ruedas de acuerdo con los requerimientos de potencia mecánica y un procedimiento para calcular los parámetros que deberán cambiarse en la programación del controlador si se cambia alguno de los componentes del subsistema: motor-transmisión-ruedas.

Se desarrolla y construyen dos plataformas con especificaciones eléctricas y mecánicas muy diferentes:

- La primera es un modelo escala, construido para entender y verificar la cinemática de estos vehículos y probar la versatilidad del controlador.
- La segunda es un prototipo de la plataforma de referencia. Este prototipo permite de acuerdo con las especificaciones de potencia requerida, intercambiar los motores por otros de la misma serie con potencia diferente: 500 o 650 o 800 Vatios, sin que deba cambiarse el controlador del motor BLDC, ni el sistema de transmisión, siempre y cuando los requerimientos de diseño respecto a velocidad del vehículo no cambie.

En ambas plataformas, la arquitectura de control es la misma, sólo cambian unos parámetros de programación.

Es importante anotar que ninguna de las dos plataformas tiene sistema de suspensión ni frenos, pues el objetivo de las mismas es probar la funcionalidad y adaptabilidad de la arquitectura de control con diferentes requerimientos de potencia mecánica.

La arquitectura de control se prueba con las dos plataformas. Se analiza su adaptabilidad a las diferentes especificaciones mecánicas. Se compara el comportamiento real respecto a lo esperado por el modelo cinemático. Y se prueba el comportamiento para los modos de operación con y sin retroalimentación con el fin de validar cual modo de operación proporciona una mejor maniobrabilidad.

De acuerdo con los resultados de las pruebas, se concluye:

- La arquitectura de control sí puede adaptarse a plataformas con diferentes especificaciones de potencia mecánica.
- En el modo de operación con retroalimentación, la arquitectura de control utilizada proporciona una mejor maniobrabilidad de la plataforma.
- A futuro se debe mejorar aspectos constructivos de las plataformas, que no estaban dentro del alcance del proyecto, como son: un sistema de suspensión que garantice el contacto con el piso de las cuatro ruedas y un mecanismo de freno.
- A futuro se debe estudiar y buscar otras opciones de materiales en los rodillos de las ruedas Mecanum que permitan disminuir el deslizamiento.

Abstract

The need for quiet vehicles without carbon emissions, as well as progress in electric motors, batteries and controllers, have supported the research and development of electric mobility products worldwide, from small robots that play soccer, vehicles to transport teams rescue or surveillance cameras, wheelchairs or vehicles for one-man mobility, to buses and forklifts.

This motivates to get into the curriculum of Product Design Engineering at EAFIT University, a course in which students must to design and build a prototype of an electric mobility product. The experience with this course, shows that the control system and its integration with sensors, actuators and commands are essential to ensure that the product is reliable, robust, friendly and is a differentiating factor and innovative. Likewise, the students have difficulties using steering speed differential, ie when the direction of travel is determined by controlling the speed and direction of rotation of two wheels each with an independent propulsion system.

Besides, the need of a vehicle able to dodge obstacles, and park easily in narrow or cluttered halls is a challenge for mobility products designers who are looking for reliable, user friendly and low cost products. There are commercial and academic products currently omnidirectional electric vehicles but are expensive products that integrate all components (mechanical and electrical) and do not offer an option of a control architecture compatible with different omnidirectional platforms.

Was studied the state of art in omnidirectional electric vehicles and analized the possibility of offering a control architecture that can be used in different products with features of omnidirectional movement.

This motivates the development of a controller for omnidirectional electric platforms with four wheels Mecanum type that can be used in vehicles with different mechanical power requirements and conditions arise.

It starts with determining the architecture and selecting the type of components that will use in platforms with different requirements for mechanical power, without having to change the hardware of the control architecture.

A procedure was developed to determine the engine-transmission-wheels according to the requirements of mechanical power and a method for calculating the parameters to be changed in programming the controller if any component of the subsystem is changed: engine-transmission-wheels.

It is developed and built two very different platforms with electrical and mechanical specifications:

- The first is a scale model built to understand and verify the kinematics of these vehicles and test the versatility of the controller.

- The second is a prototype of the reference platform. This prototype allows according to the specifications of power required to exchange the engines with the same number of different power: 500 or 650 or 800 watts, without having to change the BLDC motor controller or the transmission system provided when the design requirements regarding vehicle speed does not change. On both platforms, the control architecture is the same, only change programming parameters.

It is important to note that platforms has not suspension system and brakes, for the purpose of these is to test the functionality and adaptability of the control architecture to different requirements of mechanical power.

The control architecture was tested with both platforms. Its adaptability to different mechanical specifications are analyzed. The expected behavior according with the kinematic model was compared with real behavior. Also, was compared the behavior for operating modes with and without feedback in order to validate mode which provides better maneuverability test.

According to test results, we conclude:

- The control architecture can be adapted to other platforms with different specifications of mechanical power.
- In the operating mode with feedback, the controller provides better maneuverability of the platform.
- A future must enhance constructive aspects of the platforms, which were not within the scope of the project, including: a suspension system that ensures contact with the floor of the four wheels and a brake mechanism.
- A future must study and look for alternative materials on rollers that allow the wheels Mecanum reduce slippage

Tabla de Contenido

Resumen.....	1
Listado de figuras.....	1
Listado de tablas	3
1 Introducción.....	4
1.1 Palabras claves	5
1.2 Definiciones	5
1.3 Objetivos	5
1.3.1 General.....	5
1.3.2 Específicos	6
2 Estado del arte	7
3 Fase uno: Diseño de la Arquitectura de Control.....	10
3.1 Selección arquitectura y tipo de componentes de la plataforma omnidireccional 10	
3.1.1 Ruedas.....	10
3.1.2 Motores	11
3.1.3 Controlador motor BLDC	13
3.1.4 Baterías	13
3.2 Modelo cinemático del vehículo	13
3.2.1 Representación con ecuaciones diferenciales	13
3.2.2 Representación en espacio de estado	15
3.3 Análisis de fuerzas	16
3.4 Procedimiento para la determinar los motores y transmisión de potencia a las ruedas 18	
3.5 Arquitectura de Control.....	23
3.6 Simulación del sistema.....	24
3.6.1 Representación con ecuaciones diferenciales	24
3.6.2 Representación en espacio de estado	30
3.7 Configuración de la arquitectura de control.....	36
3.8 Conclusiones fase uno.....	37
4 Fase dos: Desarrollo de la arquitectura de control	39
4.1 Entradas.....	40
4.1.1 Interruptores.....	40
4.1.2 Mandos en el PlayStation 2 Controller	41

4.1.3	Señal velocidad angular de las ruedas	43
4.2	Salidas	44
4.2.1	Indicadores.....	44
4.2.2	Señal control alimentación circuitos de potencia.....	45
4.2.3	Señal de referencia velocidad	45
4.2.4	Señal de sentido de giro de los motores.....	45
4.3	Componentes controlador OMNI2.....	46
4.3.1	Caja Procesador	46
4.3.2	Caja de mandos	49
4.3.3	Otros.....	49
4.3.4	Conexiones.....	49
5	Fase dos: Construcción plataformas para pruebas.....	54
5.1	Requerimientos de diseño	54
5.2	Especificaciones componentes para cada plataforma	55
5.2.1	Baterías LiFePO4 48V/10AH.....	57
5.2.2	Control velocidad motor BLDC BAC-0282P de OMNI2	57
6	Fase dos: Programación controlador	60
6.1	Librerías utilizadas	60
6.1.1	Librería para el PlayStation 2 Controller	60
6.1.2	Librería para la lectura de los encoder	61
6.2	Programa controlador.....	61
6.2.1	Activación alimentación potencia motores.....	61
6.2.2	Medición y cálculo velocidad de los motores.....	62
6.2.3	Determinación de la velocidad de referencia para cada motor	63
6.2.4	Control con y sin retroalimentación.....	69
6.2.5	Señal de salida pwm para velocidad de los motores.....	73
6.2.6	Señal de salida para sentido de giro de los motores.....	74
6.3	Procedimiento para determinar función de transferencia.....	75
6.3.1	Recolección de datos.....	75
6.3.2	Función de transferencia.....	76
6.3.3	Parámetros para los controles PID	77
7	Fase tres: Pruebas	80
7.1	Protocolo de pruebas	80
7.1.1	Dimensiones y masa	80

7.1.2	Lista de chequeo	81
7.1.3	Tiempo para desplazamiento	82
7.1.4	Desviación en trayectoria.....	83
7.2	Resultados	86
7.2.1	OMNI1	86
7.2.2	OMNI2.....	90
8	Conclusiones.....	94
	Anexo uno: Fundamentos motores BLDC.....	97
	Anexo dos: Programa controlador	100
	Anexo tres: Programa recolección de datos	125
	Anexo cuatro: Datos recolectados para obtener función de transferencia	135
	Anexo cinco: Tablas e imágenes de las pruebas	154
	Bibliografía	179

Listado de figuras

Figura 1. Prototipos desarrollados por estudiantes de Ingeniería de Diseño, Universidad EAFIT	4
Figura 2. Rueda Mecanum y Disposición de las ruedas	10
Figura 3. Rueda Mecanum.....	11
Figura 4. Sistema de Coordenadas.....	14
Figura 5. Descomposición de fuerza en la rueda Mecanum	16
Figura 6. Fuerzas en las ruedas y movimiento del vehículo	17
Figura 7. Curva desempeño motor BLT 500W 48V.....	22
Figura 8. Modelo Simulink Representación Vehículo con Ecuaciones Diferenciales	26
Figura 9. Modelo OMNI Representación Vehículo con Ecuaciones Diferenciales sin retroalimentación de la velocidad angular de los motores.....	26
Figura 10. Simulación movimiento al este sin perturbaciones	27
Figura 11. Simulación movimiento al norte sin perturbaciones	28
Figura 12. Simulación movimiento norte con perturbación en la velocidad de una rueda.....	28
Figura 13. Modelo OMNI Representación Vehículo con Ecuaciones Diferenciales con retroalimentación de la velocidad angular de los motores.....	29
Figura 14. Controlador por retroalimentación del estado	33
Figura 15. Simulación espacio de estado perturbación en una velocidad del vehículo....	34
Figura 16. Simulación espacio de estado perturbación en 2 velocidades del vehículo	34
Figura 17. Simulación espacio de estado perturbación en 3 velocidades del vehículo	35
Figura 18. Simulación espacio de estado perturbación en 1 velocidad del vehículo movimiento en diagonal.....	36
Figura 19. Arquitectura de control.....	39
Figura 20. Componentes controlador.....	40
Figura 21. Interruptores caja de mandos.....	41
Figura 22. Mandos utilizados en el PlayStation 2 Controller	41
Figura 23. Cableado PS2.....	42
Figura 24. R: Resistencia Pull-Up línea de Data en PS2	43
Figura 25. Encoders	43
Figura 26. Indicadores caja de mandos.....	44
Figura 27. Indicador PlayStation 2 Controller habilitado.....	45
Figura 28. Diagrama de conexiones control BAC-282.....	46
Figura 29. Arduino Mega 2560.....	47
Figura 30. Programador control BLDC	58
Figura 31. Plataforma OMNI1	59
Figura 32. Plataforma OMNI2	59
Figura 33. Eje de coordenadas plataformas OMNI	60
Figura 34. Determinación de parámetros del PID	78
Figura 35. Resultado ajuste parámetros controlador PID	78
Figura 36. OMNI1 Tiempo para desplazamiento según tipo de movimiento.....	88
Figura 37. OMNI1 Desviación en trayectoria y rotación sin perturbación.....	89
Figura 38. OMNI1 Desviación en trayectoria y rotación con perturbación	89
Figura 39. OMNI 2 Tiempos para desplazamiento según tipo de movimiento	92
Figura 40. OMNI2 Desviación en trayectoria y ángulo de rotación sin perturbación	93

Figura 41. Sistema de coordenadas OMNI 1 y 2	95
Figura 42. Plataformas OMNI 1 y 2	95
Figura 43. Back EMF y señal sensores hall	97
Figura 44. Forma de onda y corrientes por los devanados	98
Figura 45. Secuencia energización devanados.....	98
Figura 46. Prueba Desviación trayectoria en X	172
Figura 47. Prueba Desviación trayectoria en X Punto de inicio	172
Figura 48. Desviación trayectoria en X Punto de llegada sin perturbación.....	173
Figura 49. Desviación trayectoria en X con perturbación sin retroalimentación no llega a la meta.....	173
Figura 50. Desviación trayectoria en X con perturbación con retroalimentación llega a la meta.....	173
Figura 51. Prueba Desviación trayectoria en Y	176
Figura 52. Desviación trayectoria en Y Punto de inicio	177
Figura 53. Desviación trayectoria en Y Punto de llegada sin perturbación.....	177

Listado de tablas

Tabla 1 Cotizaciones vehículos omnidireccionales	9
Tabla 2. Datos requerimientos diseño vehículo	19
Tabla 3. Ecuaciones para calcular par y velocidad angular en las ruedas	19
Tabla 4. Ejemplo determinación motores	21
Tabla 5. Datos Motor BLT 500W 48V	21
Tabla 6. Par en el motor y en la rueda	22
Tabla 7. Par y ω en las ruedas en el punto de trabajo elegido para el motor con transmisión 1:4	23
Tabla 8. Par y ω en las ruedas en el punto de máxima potencia del motor con transmisión 1:4	23
Tabla 9. Tipos de movimiento del vehículo, motores activos, velocidad vehículo	24
Tabla 10. Valores para los voltajes que determinan dirección en X, Y y Z	25
Tabla 11. Perturbación en ruedas, error en velocidad del vehículo y esfuerzo de control, con arquitectura de control con retroalimentación.....	29
Tabla 12. Perturbación en ruedas, error en velocidad del vehículo y esfuerzo de control, con arquitectura de control con retroalimentación.....	30
Tabla 13. Perturbación en velocidades del vehículo y esfuerzo de control, controlador con retroalimentación del espacio de estado	36
Tabla 14. Entradas y salidas controlador	37
Tabla 15. Tipos de movimientos y velocidades del vehículo	37
Tabla 16. Ficha técnica Arduino Mega 2560	47
Tabla 17. Pines que soportan interrupciones externas	47
Tabla 18. Pines que pueden utilizar analogWrite().....	48
Tabla 19. Conexiones Componentes Controlador OMNI2.....	51
Tabla 20. Conexiones entre componentes Caja Procesador	53
Tabla 21. Requerimientos diseño y resultado potencia, par y velocidad angular plataformas OMNI1 y OMNI2	55
Tabla 22. Componentes plataformas OMNI1 y OMNI2	56
Tabla 23. Funciones de transferencia OMNI1	77
Tabla 24. Funciones de transferencia OMNI2	77
Tabla 25. Parámetros PID OMNI1 y 2	79
Tabla 26. Secuencia energización devanados BLDC giro horario	99
Tabla 27. Secuencia energización devanados BLDC sentido anti horario	99

1 Introducción

La necesidad de vehículos silenciosos sin emisiones de carbono, así como, el avance en motores eléctricos, baterías y controladores ha impulsado el desarrollo de vehículos eléctricos en todo el mundo. Esto motivó que se incorporara en el pensum de Ingeniería de Diseño de Producto de la Universidad EAFIT, un curso en el que los estudiantes deben desarrollar el prototipo de un vehículo eléctrico. En la Figura 1, se muestran algunos de los prototipos desarrollados por los estudiantes. Pero, en el desarrollo de los prototipos se ha observado dificultades al realizar dirección por diferencial de velocidad, lo cual implica controlar la dirección y sentido de giro de dos ruedas con propulsión independiente.



Figura 1. Prototipos desarrollados por estudiantes de Ingeniería de Diseño, Universidad EAFIT

Adicionalmente, diseñar y construir un vehículo que pueda evadir obstáculos, estacionar y circular fácilmente por pasillos estrechos o congestionados es una necesidad recurrente que se ha detectado en diferentes sectores y contextos, como: bodegas, hospitales, fábricas, hogares, etc. En la actualidad existen vehículos eléctricos omnidireccionales que son la solución a esta necesidad, pero son productos costosos que integran todos los componentes (mecánicos y eléctricos). Estos vehículos, independiente de la arquitectura y tipo de ruedas utilizadas, siempre requieren el control de tres o más motores.

Lo anterior, fueron las razones para desarrollar en la Universidad y con recursos de fácil acceso y bajo costo, una arquitectura de control adaptable a diferentes plataformas eléctricas omnidireccionales que puedan tener distintos requerimientos de potencia mecánica para utilizarse en diferentes contextos y condiciones de uso.

De esta manera se cumple el propósito que los estudiantes de la Universidad tengan la opción de diseñar y construir vehículos o productos eléctricos omnidireccionales innovadores, confiables, de bajo costo y amigables con el usuario, aprender como las variables de diseño determinan la selección de los componentes en el producto y se familiaricen con estas nuevas tecnologías.

Partiendo del estudio realizado sobre el estado del arte en vehículos omnidireccionales, que es el punto de partida para definir la arquitectura y tipo de componentes, el proyecto se divide en las siguientes fases:

- Fase uno: Corresponde al diseño de la arquitectura de control partiendo del modelo cinemático, al procedimiento para determinar los motores y sistema de transmisión de potencia a las ruedas dependiendo de los requerimientos de potencia mecánica y a la simulación de comportamiento del vehículo.
- Fase dos: Desarrollo de la arquitectura de control y de dos plataformas físicas con diferentes especificaciones de potencia mecánica. Programación del controlador y procedimiento para obtener los parámetros k_p , T_i y T_d .
- Fase tres: Corresponde al diseño y realización de las pruebas en las dos plataformas, en los dos modos: con y sin retroalimentación, y análisis de los resultados obtenidos.

Terminando con las conclusiones del proyecto.

1.1 Palabras claves

Vehículo omnidireccional. Control de vehículos eléctricos. Control de motores. Vehículo para pasillos estrechos. Control PID. Control en Espacio de Estado. Modelación. Simulación.

1.2 Definiciones

- Vehículo omnidireccional: Es aquel que puede moverse en cualquier dirección en un plano, sin importar la posición inicial [1].
- Vehículo holonómico: Es aquel que puede controlarse el movimiento en todos los grados de libertad [2].
- Controlador: Sistema diseñado para lograr el comportamiento deseado de un proceso (o sistema) [3].
- Sistema dinámico: Sistema en el cual el estado actual depende de las entradas actuales y anteriores [3].
- Modelo: Representación simplificada de un sistema en un aspecto particular, que muestra la relación entre las variables y permite una mejor comprensión y un estudio del comportamiento de dicho sistema en una forma útil [3].
- Simulación: Proceso de evaluación de un sistema compuesto de modelos y elementos reales, bajo condiciones de prueba deseadas [3].
- Retroalimentación o en lazo cerrado: Consiste en utilizar las salidas para cambiar el proceso mismo [3].
- Control PID: Control con retroalimentación en el que la acción de control es proporcional al error (Proporcional), al acumulado del error (Integral) y a la velocidad de cambio del error (Derivativa), siendo el error la diferencia entre el valor deseado y el valor medido en la salida [3].

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Desarrollar una arquitectura de control para plataformas eléctricas omnidireccionales con cuatro ruedas tipo Mecanum que tengan diferentes requerimientos de potencia mecánica y condiciones de uso. A través de un modelo matemático, simulaciones computacionales y validación de la adaptabilidad y funcionamiento del controlador en plataformas omnidireccionales físicas con diferentes especificaciones de potencia mecánica.

1.3.2 Específicos

- Definir la configuración de la arquitectura de control a través de una vigilancia tecnológica para seleccionar la arquitectura y tipo de componentes, y de la simulación con el modelo cinemático.
- Desarrollar un procedimiento para calcular la potencia mecánica de la plataforma teniendo en cuenta el análisis de fuerzas y los requerimientos de diseño; para determinar la potencia del motor y el sistema de transmisión necesarios para la propulsión del vehículo.
- Diseñar y construir dos plataformas omnidireccionales con diferentes especificaciones mecánicas, para probar la funcionabilidad y adaptabilidad de la arquitectura de control.
- Desarrollar un procedimiento para determinar los parámetros de programación del controlador que dependen de las especificaciones de los componentes: motor y encoder, y de la función de transferencia del subsistema: motor-controlador-transmisión-rueda.
- Probar el controlador con dos plataformas, siguiendo un protocolo de pruebas, para validar su adaptabilidad a las diferentes especificaciones mecánicas, verificar y comparar el comportamiento cinemático de las plataformas con lo esperado de acuerdo con el modelo cinemático y comprobar la diferencia de maniobrabilidad al trabajar con y sin retroalimentación.

2 Estado del arte

Se inicia con el estudio del estado del arte en tipos de movimientos y sistemas de dirección de vehículos y robots.

En el artículo de O. Jahanian [4] se muestra y analiza las ventajas y desventajas de diferentes tipos de sistemas de locomoción: ruedas, patas, orugas y sus combinaciones para lograr diferentes tipos de movimiento.

El documento de Andrew Davidson [2] explica la diferencia entre el movimiento holonómico y no holonómico y algunos métodos empleados para controlar la dirección del movimiento en robots.

En este siglo las competencias de robótica como RoboCup¹ han impulsado la investigación y creación de innovadoras versiones de pequeños robots omnidireccionales. Innovaciones que incluyen patentes que luego son apropiadas y empleadas en la industria para el desarrollo de sillas de ruedas, electrodomésticos, equipos de rescate o vigilancia, entre otros².

Se profundiza en el estudio de ruedas especiales, como las Omniwheel, Mecanum Wheel y OmniDisc [5], [6]. La primera rueda omnidireccional fue patentada a principios del siglo XX por J. Grabowiesky³. En 1973, Bengt Ilon desarrolló la rueda omnidireccional moderna⁴, cuya patente fue comprada por la US Navy y vendida en 1997 a varios fabricantes. A finales de los noventa Hammonds Industries Inc., desarrolló el ODV (Omni Directional Vehicle) para remolcar aviones, barredoras y transportar personal de vigilancia⁵. En el año 2000 Vetex, desarrolló el montacargas omnidireccional Airtrax el cual empezó a ser comercializado en el 2008⁶.

Después de estudiar y analizar las ventajas y desventajas de cada uno de los tipos de ruedas y su distribución, teniendo presente lo planteado por Martin Udengaard [1], por lo indicado en los informes de los equipos participantes en la RoboCup de la Universidad de Cornell [7] y [8] y Santiago Martínez [9], así como en otros documentos ya mencionados, se toma la decisión de trabajar con cuatro ruedas tipo Mecanum.

Se busca información de sobre el control de vehículos omnidireccionales, encontrando información sobre el modelo cinemático y dinámico de estos vehículos, así como los tipos de control.

¹ <http://www.robocup2015.org/> <http://www.robocup2015.org/>

² <http://www.usfirst.org>, <http://robotics.nasa.gov>, <http://www.robocup.org>

³ <http://patft.uspto.gov>

⁴ <http://www.google.com/patents/US3876255>,
<http://www.progressiveengineer.com/profiles/nickFenelli.htm>

⁵ <http://www.hammondscos.com>

⁶ <http://www.vetexinc.com/>

Se emplea como punto de partida la tesis de Ryan Thomas [10] y lo presentado por Jefri Efendi Salih [11]. Teniendo también presente lo expuesto por Martin Udengaard [1], M.d.V.Nkgatho Tlale [12], Han Kyung Lyong [13] y Zhang Yunan [6]-

El artículo de Efendi permite concluir que para lograr un funcionamiento correcto en los movimientos de traslación, se requiere un método de control en lazo cerrado con algoritmo de control PID para la velocidad de cada motor y además plantea la opción a futuro de implementar sensores que permitan tener información de la posición actual en X y Y de la plataforma y así lograr que el vehículo a futuro pueda hacer de manera autónoma una trayectoria. Pone de manifiesto que el tipo de superficie es muy importante para el correcto funcionamiento.

Se estudian también opciones de control con lógica difusa para robots autónomos omnidireccionales, como el desarrollado por Samuel A. Miller [14] o el planteado por Víctor Costella [15]. Los artículos anteriores permiten concluir que al utilizar lógica difusa se logra un seguimiento de trayectoria mejor, lo cual es de gran importancia en robots autónomos, pero a su vez implica una mayor capacidad de procesamiento y mayor conocimiento de teoría de control.

Dado que el controlador será utilizado en productos en los que habrá un usuario que conduce el vehículo y corrige errores, que su principal propósito es la adaptabilidad a diferentes requerimientos de potencia mecánica, no la precisión y exactitud en el seguimiento de una trayectoria, y que esta pensado para que sea empleado en prototipos de productos de estudiantes de Ingeniería de Diseño, no se justifica el uso de la lógica difusa.

La vigilancia tecnológica realizada durante el primer semestre de 2014 para vehículos y controladores omnidireccionales, permite concluir:

- Los controladores comerciales existentes son específicos para los componentes eléctricos y mecánicos de un producto dado, por lo que en la mayoría de los casos se debe comprar el producto completo y cuando es posible adquirir un de esos controladores como repuesto, su costo es alto y no tienen garantía por parte del fabricante si no se utilizan en su producto.

En la tabla a continuación se resume algunas de las cotizaciones efectuadas:

Sitio	Producto	
	Descripción	Especificaciones
www.youBot-Store.com	KUKA youBot omni-directional mobile platform	Dimensiones: 580*380*140 mm Peso con máxima carga: 40 Kgr Velocidad: 0.8 m/s Controlador: mini ITX
www.robotnik.eu	Summit XL HL	Dimensiones: 731*578*440 mm Peso con máxima carga: 65 Kgr Velocidad: 3 m/s Controlador: Embedded PC with linux Open arquitectura ROS

www.vetexinc.com	17" axle kit	Este kit solo se vende después de un acuerdo con fabricantes OEM y con un pedido mínimo de 10 kits. El kit se modifica para que pueda integrarse de manera óptima con el producto. Una plataforma robótica estándar que se ofrece y utiliza este kit, tiene las siguientes especificaciones: Dimensiones: 1473*864*508mm Peso con máxima carga: 3182 Kgr Velocidad: 2 m/s Controlador: VMS (vehicle master controller) que utiliza protocolo CAN Buss para comunicarse con los módulos que controlan los motores.
------------------	--------------	---

Tabla 1 Cotizaciones vehículos omnidireccionales

Los precios de las cotizaciones, las cuales se realizaron en el primer trimestre del 2014, varían entre 16.000 y 56.800 dólares.

- Con base en las dificultades de accesibilidad comercial y en los altos costos comerciales de las plataformas y de los controladores, se replantea uno de los objetivos iniciales del proyecto, que era adquirir un controlador comercial y adaptarlo a la plataforma de referencia para compararlo con el controlador desarrollado. Por lo que se decide validar el controlador desarrollado realizando pruebas en dos plataformas que tienen diferentes especificaciones de potencia y comprar la maniobrabilidad de las mismas cuando se emplea con y sin retroalimentación.

3 Fase uno: Diseño de la Arquitectura de Control

3.1 Selección arquitectura y tipo de componentes de la plataforma omnidireccional

Se decide trabajar con plataformas de cuatro ruedas porque son más estables y permiten una mayor capacidad de carga, aunque el sistema de control es más complejo, puesto que se deben controlar cuatro variables (que corresponde a la velocidad aplicada a cada una de las ruedas) para un movimiento con tres grados de libertad (si se considera movimiento en un plano).

Las ruedas a emplear serán del tipo Mecanum, dispuestas por parejas en espejo, la distancia entre los centros de los ejes de las cuatro ruedas forman un cuadrado como se ilustra en la Figura 2.

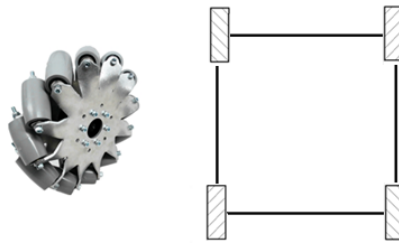


Figura 2. Rueda Mecanum y Disposición de las ruedas

Con este tipo de ruedas en la disposición indicada es posible obtener un movimiento omnidireccional del vehículo (traslación y rotación).

La plataforma soporta la carrocería del vehículo la cual puede cambiarse dependiendo del contexto y requerimientos de uso. Todas las plataformas tendrán los siguientes componentes y cuyas especificaciones pueden cambiarse dependiendo de los requerimientos de potencia mecánica y contexto de uso.

3.1.1 Ruedas

Las ruedas seleccionadas son tipo Mecanum.

En estas ruedas, se instalan sobre la periferia de la rueda principal unos rodillos pasivos que forman un ángulo de 45° respecto a la rueda principal, ver Figura 3.

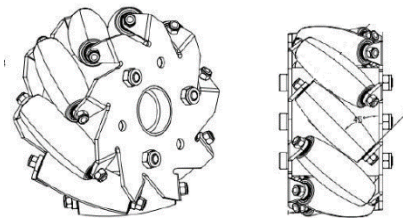


Figura 3. Rueda Mecanum⁷

La disposición de los rodillos en la rueda hace que la fuerza que se ejerce sobre la rueda principal se descomponga en dos vectores de fuerza: uno perpendicular al eje del rodillo, que brinda momento al rodillo y produce su rotación, y otro paralelo al eje del rodillo, que brinda momento al vehículo. Por lo que es posible, utilizando este tipo de ruedas en una distribución determinada lograr un vehículo con movimientos omnidireccional, sin tener que emplear complejos mecanismos de dirección, solamente controlando el par y el sentido de giro de cada rueda de manera independiente.

Teniendo en cuenta lo anterior, es de suma importancia garantizar que todas las ruedas tengan contacto con la superficie por la que se desplaza el vehículo y que la distribución de la carga en las ruedas sea lo más equilibrada posible. Por lo tanto, en los vehículos con más de tres ruedas es importante utilizar un sistema de suspensión. También es recomendable que el centro de masa sea bajo.

Otra característica de las ruedas Mecanum es la baja tolerancia a irregularidades en la superficie sobre la que se desplazan, pues el escalón máximo que puede ser superado está determinado por el radio de los rodillos, lo cual puede limitar y debe considerarse al momento de definir el contexto de uso del vehículo.

Adicionalmente, con este tipo de ruedas el punto de contacto con el piso es el de un rodillo, por lo que toda la carga ejerce presión sobre ese punto, lo que origina baja fricción y limita la capacidad de carga del vehículo, pues puede deteriorarse la superficie sobre la cual circula.

3.1.2 Motores

Para la selección de los motores, se tuvo presente los requerimientos de los proyectos académicos desarrollados por los estudiantes respecto al par, respuesta dinámica, peso del vehículo, volumen, así como el hecho que la fuente de alimentación es con baterías.

Teniendo en cuenta lo anterior, se decide hacer un estudio de motores eléctricos para un voltaje de alimentación directa de 48 voltios (muy baja tensión de acuerdo con la clasificación RETIE) y con un rango de potencia entre 200 y 2000 vatios. Es requisito que los motores puedan girar en sentido horario y anti horario y que el respectivo controlador cumpla con los requerimientos que se indican en el siguiente numeral.

Se elige estudiar los motores con imán permanente sincrónicos, dado que estos motores ofrecen una buena respuesta de velocidad contra par (casi plana dentro del rango de operación), muy buena respuesta dinámica gracias a la baja inercia del motor, alta eficiencia, mayor durabilidad, bajo ruido y operan en un amplio rango de velocidades.

⁷ <http://robocave.pkmediacatalogproduct>

Entre los motores de imán permanente sincrónicos están los BLDC (brushless DC) y los PMSM o PMAC (permanent magnet synchronous ó permanent magnet AC), ambos tipos de motores tienen imanes permanentes en el rotor, pero la distribución del flujo y forma de onda de la fuerza contraelectromotriz (back EMF) es diferente.

A continuación se indican las principales características de ambos tipos de motores:

BLDC

- Sincrónico.
- Se alimenta con corriente directa.
- Back EMF con forma de onda trapezoidal.
- La variación del flujo en el estator se produce por conmutación en la alimentación de las fases.
- Solo 2 fases encendidas al mismo tiempo.
- Rizado en el par en las conmutaciones.
- Bajos armónicos de corriente en el rango audible.
- Pérdidas por los armónicos.
- Menores pérdidas de conmutación.
- Algoritmos de control relativamente simples.

PMAC

- Sincrónico.
- Se alimenta con corriente senoidal.
- Back EMF con forma de onda senoidal.
- La variación del flujo en el estator varía de forma continua.
- Es posible tener tres fases encendidas al mismo tiempo.
- No hay rizado en el par por conmutación.
- Menores armónicos debido a la alimentación senoidal.
- Menores pérdidas.
- Mayores pérdidas por conmutación a la misma frecuencia.
- Algoritmos de control intensivos matemáticamente.

En los motores PMAC el controlador debe generar una corriente alta con forma de onda senoidal lo más pura posible, esto implica un diseño electrónico complejo a nivel de potencia y sensores, en consecuencia el controlador del motor es más costoso y se debe utilizar un devanado adicional en el estator, lo cual incrementa el peso y costo del motor.

Los motores seleccionados son tipo BLDC, deben ser cuatro motores iguales uno para cada rueda, con potencia mecánica en un rango entre 200 y 2000 vatios, que puedan girar en sentido horario y anti horario, y que el controlador cumpla con los requerimientos que se indican en el siguiente numeral.

De acuerdo con el modelo matemático del motor BLDC [16] puede afirmarse que la velocidad del motor es directamente proporcional al back EMF y que el par utilizable es

proporcional a la corriente de la fase, aspectos que deben tenerse en cuenta al momento de elegir el controlador de los motores.

3.1.3 Controlador motor BLDC

En los motores BLDC es fundamental controlar la secuencia como se energizan las fases del estator, de tal forma que pueda crearse y mantenerse un campo rotatorio que será seguido por el rotor de manera sincrónica. Por lo tanto, requieren un control con retroalimentación para determinar la posición de rotor y así realizar la secuencia de conmutación en cada fase del estator, generalmente se utilizan tres sensores de efecto Hall. La velocidad de giro del eje del motor depende de la corriente y/o voltaje eficaz en cada fase. Ver anexo (Fundamentos motores BLDC).

Para la selección del control del motor BLDC, se debe tener en cuenta que sea el adecuado para las especificaciones de: número de fases, potencia, voltaje de alimentación y que los sensores de efecto Hall tengan entre sí un desfase de 60 o 120 grados. Además, debe tener entrada para la señal de sentido de giro: horario/anti horario y para la señal de velocidad de referencia, la cual debe ser con voltaje análogo entre 0 y 5 voltios.

3.1.4 Baterías

Para la selección de las baterías, se tuvo presente los requerimientos de los proyectos académicos desarrollados por los estudiantes y la decisión de utilizar 4 motores BLDC alimentados a 48 VDC en un rango de potencia entre 200 y 2000 vatios.

Las baterías seleccionadas son Litio Hierro Fosfato (LiFePO4).

Se eligen estas baterías por su alta densidad de potencia, buen precio, confiabilidad y larga vida útil. La capacidad de la batería en amperios hora depende de la autonomía deseada y de la potencia mecánica requerida.

3.2 Modelo cinemático del vehículo

3.2.1 Representación con ecuaciones diferenciales

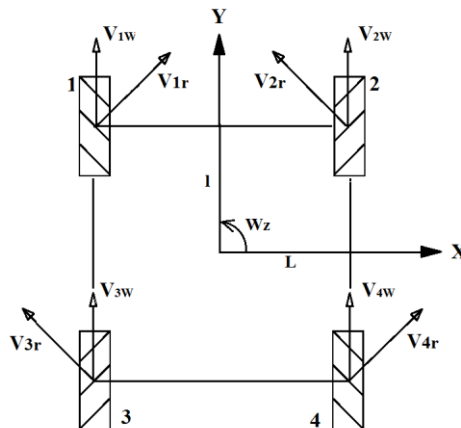


Figura 4. Sistema de Coordenadas

En la Figura 4 se ilustra el sistema de coordenadas para el vehículo y para cada una de las cuatro ruedas, donde:

- V_{iW} (m/s) es la velocidad tangencial en cada rueda, siendo i el número de la rueda. La velocidad tangencial está definida por la ecuación $V_{iW} = \omega_{iW} * R_W$, con ω_{iW} (rad/s) la velocidad angular de la rueda y R_W (m) el radio de la rueda.
- V_{ir} (m/s) es la velocidad tangencial del rodillo que está en contacto con el piso en cada rueda.

Se utilizan las ecuaciones cinemáticas presentadas por R.Thomas [10] en las que la velocidad de cada rueda es expresada en términos de la velocidad del vehículo:

$$\begin{aligned} V_{1W} &= V_X + V_Y - (L+l) * \omega_Z \\ V_{2W} &= -V_X + V_Y + (L+l) * \omega_Z \\ V_{3W} &= -V_X + V_Y - (L+l) * \omega_Z \\ V_{4W} &= V_X + V_Y + (L+l) * \omega_Z \end{aligned}$$

Ecuación 1

Donde V_X (m/s) es la componente en X de la velocidad del vehículo, V_Y (m/s) es la componente en Y, ω_z (rad/s) es la velocidad angular del vehículo, L y l (m) son las distancias en X y Y desde el centro del vehículo al centro del eje de cada rueda, respectivamente.

Las Ecuación 1 en forma de matriz queda:

$$\begin{bmatrix} V_{1W} \\ V_{2W} \\ V_{3W} \\ V_{4W} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -(L+l) \\ -1 & 1 & (L+l) \\ -1 & 1 & -(L+l) \\ 1 & 1 & (L+l) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix}$$

Ecuación 2

Siendo:

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -(L+l) \\ -1 & 1 & (L+l) \\ -1 & 1 & -(L+l) \\ 1 & 1 & (L+l) \end{bmatrix}$$

Ecuación 3

Utilizando la matriz pseudo inversa izquierda de J , la velocidad del vehículo puede determinarse conociendo la velocidad de las ruedas:

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ L+l & L+l & L+l & L+l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \omega_1 \\ R \omega_2 \\ R \omega_3 \\ R \omega_4 \end{bmatrix}$$

Ecuación 4

Donde R (m) es el radio de la rueda y ω_i (rad/s) es la velocidad angular de la rueda Mecanum i.

Luego, empleando la Ecuación 4, se obtiene:

- Si: $\omega_1=\omega_2=\omega_3=\omega_4=\omega$. Luego: $V_X=0$, $V_Y=R*\omega$ y $\omega_Z=0$. El vehículo se mueve en dirección Y con la misma velocidad tangencial de las ruedas.
- Si: $\omega_1=\omega_4=\omega$ y $\omega_2=\omega_3=-\omega$. Luego: $V_X=R*\omega$, $V_Y=0$ y $\omega_Z=0$. El vehículo se mueve en dirección X con la misma velocidad de las ruedas.
- Si: $\omega_1=\omega_4=\omega$ y $\omega_2=\omega_3=0$. Luego: $V_X=(R*\omega)/2$, $V_Y=(R*\omega)/2$ y $\omega_Z=0$. El vehículo se mueve en diagonal X, Y con velocidad igual a la mitad de la velocidad tangencial de las ruedas.
- Si: $\omega_1=\omega_3=\omega$ y $\omega_2=\omega_4=-\omega$. Luego: $V_X=0$, $V_Y=0$ y $\omega_Z=-(R*\omega)/(L+l)$. El vehículo gira sobre su propio eje en dirección horaria.

De lo anterior puede concluirse:

- Para los casos en que la magnitud de la velocidad en las ruedas es igual en las cuatro ruedas, la magnitud de la velocidad de vehículo es igual a la magnitud de la velocidad de las ruedas y dependiendo del sentido de giro de las ruedas el vehículo se mueve en dirección norte o sur o este u oeste.

$$|V_X| = |V_Y| = |\omega_W| * R$$

Ecuación 5

- Para los casos en que solo se tienen dos ruedas activas que están una diagonal a la otra y ambas tienen la misma magnitud en la velocidad y sentido de giro, la magnitud de la velocidad del vehículo es igual a la mitad de la magnitud de la velocidad de las ruedas activas y dependiendo de cuales ruedas están activas y su sentido de giro el vehículo se mueve en diagonal noreste, noroeste, sureste o suroeste

$$|V_X| = |V_Y| = \frac{|\omega_W| * R}{2}$$

Ecuación 6

Por lo tanto, aunque la magnitud de la velocidad en las ruedas activas sea siempre igual, la magnitud de la velocidad de traslación del vehículo es diferente si se mueve en X, Y o en diagonal, lo cual resulta en un movimiento anisotrópico.

3.2.2 Representación en espacio de estado

Utilizando la Ecuación 4 y derivando con respecto al tiempo, se obtienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} a_X &= \frac{R}{4}(\dot{\omega}_1 - \dot{\omega}_2 - \dot{\omega}_3 + \dot{\omega}_4) \\ a_Y &= \frac{R}{4}(\dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_2 + \dot{\omega}_3 + \dot{\omega}_4) \\ a_Z &= \frac{R}{(4(L+l))}(-\dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_2 - \dot{\omega}_3 + \dot{\omega}_4) \end{aligned}$$

Ecuación 7

Donde, a_X (m/s^2) es la componente en X de la aceleración del vehículo, a_Y (m/s^2) es la componente en Y de la aceleración del vehículo, a_Z (rad/s^2) es la componente en Z de la

aceleración del vehículo, L (m) es la distancia en X desde el centro de la rueda al centro del vehículo, l (m) es la distancia en Y desde el centro de la rueda al centro del vehículo, ω_i (rad/s²) es la aceleración angular de la rueda i y R (m) es el radio de la rueda.

La representación en espacio de estado del vehículo queda:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX + DU\end{aligned}$$

Ecuación 8

Donde:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} & X &= \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega_z \end{bmatrix} & Y &= \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega_z \end{bmatrix} & U &= \begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \\ \dot{\omega}_3 \\ \dot{\omega}_4 \end{bmatrix} \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & B &= \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{-1}{(L+l)} & \frac{1}{(L+l)} & \frac{-1}{(L+l)} & \frac{1}{(L+l)} \end{bmatrix} & C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & D &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

Ecuación 9

3.3 Análisis de fuerzas

Se utiliza el modelo presentado por R. Thomas [10] y M. d. V. Nkgatho Tlale [12].

En las ruedas Mecanum al aplicar una fuerza F (azul) a la rueda principal, esta se descompone en dos componentes: A (rojo oscuro) paralelo y B (rojo claro) perpendicular al eje del rodillo como se muestra en la Figura 5.

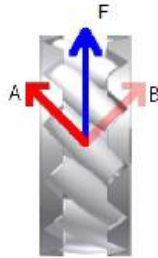


Figura 5. Descomposición de fuerza en la rueda Mecanum

Por lo tanto, el componente A proporciona un momento al vehículo y el B proporciona un momento al rodillo.

Si en el vehículo se posicionan las cuatro ruedas Mecanum como se muestra en la Figura 4, con los rodillos de las ruedas 1 y 4 formando un ángulo de -45° y los rodillos de las ruedas 2 y 3 formando un ángulo de 45° respecto al eje X de acuerdo con el sistema de coordenadas, siempre el componente B de la rueda 1 estará en dirección contraria al

componente B de la rueda 2 y el componente B de la rueda 3 estará en dirección contraria al componente B de la rueda 4 por lo que se anularan, sin importar la dirección de la fuerza F.

Por lo tanto, es el componente A el que determina la dirección de desplazamiento del vehículo y corresponde a $F * \sin 45^\circ = F * \sqrt{2}$.

Las diferentes combinaciones de la magnitud y dirección de la fuerza F aplicada al eje principal en cada una de las cuatro ruedas Mecanum determina la dirección de traslación y rotación del vehículo, como se ilustra en la Figura 6 .

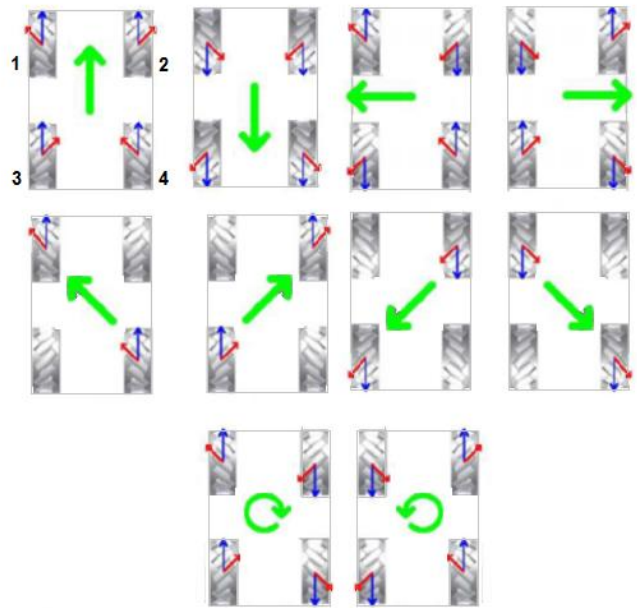


Figura 6. Fuerzas en las ruedas y movimiento del vehículo

Al realizar el análisis de fuerzas en las ruedas Mecanum y en el vehículo se obtiene:

- Para los casos en que el vehículo se mueve en dirección $\pm X$ (este/oeste) o $\pm Y$ (norte/sur) en los que la magnitud de la velocidad del vehículo es igual a la magnitud de la velocidad tangencial de las ruedas que es igual para las cuatro ruedas, debido al ángulo que forman los rodillos con la rueda principal; la magnitud de la fuerza en cada rueda es:

$$F_W = \frac{F}{4} * \sqrt{2}$$

Ecuación 10

- Para los casos en que el vehículo se mueve en diagonal en los que la magnitud de la velocidad del vehículo es igual a la mitad de la magnitud de la velocidad tangencial de las dos ruedas activas, la magnitud de la fuerza en cada rueda activa es:

$$F_W = \frac{F}{2} * \sqrt{2}$$

Ecuación 11

Siendo F_W (N) la fuerza requerida en las ruedas activas, F (N) la fuerza total en el vehículo.

- Cuando las ruedas no son Mecanum: si el vehículo se mueve en dirección $\pm Y$ (norte/sur), la magnitud de la fuerza en cada rueda es igual a la magnitud de la fuerza en el vehículo dividida por 4. El vehículo no puede moverse en dirección $\pm X$ (este/oeste), ni en diagonal.

3.4 Procedimiento para la determinar los motores y transmisión de potencia a las ruedas

Para determinar los motores y la transmisión de potencia a las ruedas se debe tener en cuenta los requerimientos en par y velocidad necesarios para los movimientos de traslación del vehículo.

En los numerales (3.2.1 y 3.3), correspondientes al modelo del comportamiento cinemático y al análisis de fuerzas, se indicó que:

- Para movimientos del vehículo en dirección norte/sur/este/oeste (N/S/E/O) la velocidad de desplazamiento del vehículo es igual a la velocidad tangencial de las ruedas y la fuerza total debe en cada motor es repartirse entre 4 motores.
- Para movimientos del vehículo en diagonal (D), la velocidad de desplazamiento del vehículo es la mitad de la velocidad tangencial de las dos ruedas activas y la fuerza total requerida debe repartirse entre 2 motores.

Con los siguientes datos de entrada, definidos por el diseñador del producto, se calculan el par y velocidad angular necesarios en cada rueda:

Variable	Unidad	Descripción
m	Kilogramos (Kg)	Masa total a mover
V	metros/segundo (m/s)	Velocidad máxima en superficie horizontal para desplazamientos N/S/E/O
V_D^8	metros/segundo (m/s)	Velocidad máxima en superficie horizontal para desplazamientos en diagonal
V_{rampa}	metros/segundo (m/s)	Velocidad máxima subiendo una rampa para desplazamientos N/S/E/O
V_{rampaD}^9	metros/segundo (m/s)	Velocidad máxima subiendo una rampa para desplazamientos en diagonal

⁸ La velocidad de desplazamiento en diagonal deber ser la mitad de la velocidad de desplazamiento en dirección N/S/E/O.

⁹ La velocidad de desplazamiento en diagonal subiendo una rampa debe ser la mitad de la velocidad de desplazamiento en dirección N/S/E/O.

Variable	Unidad	Descripción
t	segundo (s)	Tiempo para acelerar
C _r		Coefficiente de fricción cinético de las ruedas
α	radianes (rad)	Máximo ángulo la rampa ¹⁰
R	metros (m)	Radio de las ruedas
C _w		Coefficiente de arrastre dinámico
δ	Kilogramos/metro cúbico (Kg*m ³)	Densidad del aire
V _{viento}	metros/segundo (m/s)	Velocidad del viento
A	metro cuadrado (m ²)	Área frontal del vehículo (se establece que es igual para todos los lados)

Tabla 2. Datos requerimientos diseño vehículo

Con estos datos se calcula:

Variable	Unidad	Descripción	Ecuación
A	(m/s ²)	Aceleración	$a = \frac{V}{t}$
ω _w	(rad/s)	Velocidad angular rueda	$\omega_w = \frac{V}{R}$
F _r	Newton (N)	Fuerza de rodadura	$F_r = m * C_r * 9,81$
F _a	(N)	Fuerza de aceleración	$F_a = m * a$
F _g	(N)	Fuerza de gravedad	$F_g = m * 9,81 * \sin 0,083$
F _{arrastre}	(N)	Fuerza de arrastre dinámico	$F_{arrastre} = \frac{C_w * A * \delta * V^2}{2}$
F _e	(N)	Fuerza de empuje vehículo	$F_e = F_r + F_a + F_g + F_{arrastre}$
P	Vatios (W)	Potencia vehículo para movimientos N/S/E/O	$P = F_e * V$
P _D	Vatios (W)	Potencia vehículo para movimientos en diagonal	$P = F_e * \frac{V}{2}$
P _w	(W)	Potencia en cada rueda para movimientos N/S/E/O	$P_w = \frac{P}{4} = \frac{F_e * V}{4}$
P _{wD}	(W)	Potencia en cada rueda para movimientos diagonal	$P_{wD} = \frac{P}{2} = \frac{F_e * V / 2}{2} = \frac{F_e * V}{4}$
T _w	Newton*Metro (Nm)	Par en cada rueda	$T_w = \frac{P_w}{\omega_w}$

Tabla 3. Ecuaciones para calcular par y velocidad angular en las ruedas

En la Tabla 3 se observa que el par y la velocidad angular en las ruedas activas es igual para movimientos del vehículo en diagonal o dirección N/S/E/O, cuando se cumple que la

¹⁰

Fuente: http://www.vivienda.gob.pe/documentos/documentos_ds_010/1/A120_ACCESIBILIDAD_PARA_PERSONAS_CON_DISCAPACIDAD-

velocidad de desplazamiento del vehículo en diagonal es la mitad de la velocidad de desplazamiento del vehículo en las direcciones N/S/E/O.

En la Tabla 4 se muestra un ejemplo, con los requerimientos de diseño y los resultados de los cálculos de par y velocidad angular para vehículos capaces de mover una masa total de hasta 200, 400, 1000 o 1200 Kg. Todos los vehículos deben parar y arrancar subiendo una rampa con ángulo de $0,083\text{rad}^{11}$ a 8 Km/h (2,22 m/s) con máximo 3 s para acelerar de 0 a 8 Km/h. Así mismo deben moverse en una superficie horizontal a 10 Km/h (2,78 m/s) con máximo 3 s para acelerar de 0 a 10 Km/h. Todos usarán ruedas Mecanum de 8" de diámetro (Radio=0,1016m) cada una formada por 12 rodillos hechos con exterior de uretano.

Requerimientos de diseño Datos	Caso			
	1	2	3	4
m: Masa total a mover (Kg)	Hasta 200	201-400	401-1000	1001-1200
V _{en rampa} : Velocidad máxima N/S/E/O subiendo una rampa (m/s)	2,22			
V: Velocidad máxima N/S/E/O en superficie horizontal (m/s)	2,78			
α : ángulo de la rampa (rad)	0.083			
t: Máximo tiempo para acelerar (s)	3			
C _r : Coeficiente de fricción	0,01			
R: Radio de la rueda (m)	0,1016			
C _w : Coeficiente de arrastre dinámico	1,5			
δ : Densidad del aire (kgr*m ³)	1,2			
V _{viento} : Velocidad del viento (m/s)	0,86			
A: Area (m ²)	1			
Resultados				
<i>Movimiento uniformemente acelerado subiendo una rampa de 4,8°</i>				
- a: aceleración (m/s ²)	0,74			
- ω_w : Velocidad angular en cada rueda (rad/seg)	21,87			
- F _c : Fuerza en el vehículo (N)	335,64	666,84	1660,44	1991,64
- F _{ew} : Fuerza en cada rueda (N)	118,67	235,76	587,05	704,14
- P _w : Potencia en cada rueda (W)	263,44	523,39	1303,25	1563,20
- T _w : Par en cada rueda (Nm)	12,06	23,95	59,64	71,54
<i>Movimiento uniformemente acelerado en superficie horizontal</i>				
- a: aceleración (m/s ²)	0,93			
- ω_w : velocidad angular en cada rueda (rad/seg)	27,34			
- F _c : Fuerza empuje en el vehículo (N)	211,75	416,55	1030,97	1235,78
- F _{ew} : Fuerza empuje en cada rueda (N)	74,86	147,27	364,50	436,91
- P _w : Potencia en cada rueda (W)	208,12	409,42	1013,31	1214,61

¹¹ Una rampa con un ángulo de 0,083 rad equivale a un inclinación del 12%, que corresponde al alcance extremo recomendado en rampas de peatones: www.planning.org

- T _w : Par en cada rueda (Nm)	7,61	14,96	37,03	44,39
---	------	-------	-------	-------

Tabla 4. Ejemplo determinación motores

Se trabaja con los resultados de la potencia requerida en cada rueda y los datos del par y velocidad angular obtenidos para el movimiento uniformemente acelerado parando y arrancando en rampa, que corresponde al peor caso. De esta manera se garantiza que los motores podrán suministrar la potencia necesaria en la situación de máxima exigencia.

Trabajando el caso 2 del ejemplo, se buscan cuatro motores BLDC a 48 Voltios que tengan una potencia de más de 410 Vatios.

Se eligen de Golden Motor cuatro motores BLDC referencia BLT 500W 48V, cuatro controladores de velocidad referencia BAC-0282P y dos baterías de Litio Hierro Fosfato (LiFePo4) referencia de 48 V 10 AH.

Con la información que suministra Golden Motor para:

- Los motores que se muestra más adelante en la Tabla 5 y en la Figura 7. En pruebas previas al inicio de este proyecto, en el Banco de Pruebas de Motores del Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad Eafit se tomaron los datos de velocidad y corriente contra par de los motores, obteniendo una curva de desempeño similar a la entregada por el fabricante.
- El controlador BAC-0282P (Corriente continua: 25 A, corriente pico: 50 A, voltaje: 48V).
- Las baterías de Litio Hierro Fosfato referencia LiFePO4 48V/10AH (Corriente descarga continua: 30 A, corriente descarga pico: 50 A).

Y con los resultados del par y la velocidad angular que se requiere en las ruedas, información disponible en la Tabla 4, se determina el punto de trabajo del motor y el sistema de transmisión de potencia del motor a las ruedas.

Motor BLT 500W 48V	Voltaje	Co- rriente	P1 Potencia eléctrica	Par	Velocidad Angular	P2 Potencia mecánica	Eff
	V	A	W	N.m	rpm	W	%
No_Load	48	1,28	61,54	0,00	1176,00		
Max Eficiencia	48	11,563	555,02	4,32	1032,00	466,87	84,12
Max_Torque	48	20,39	978,48	8,18	917,00	785,51	80,28

Tabla 5. Datos Motor BLT 500W 48V

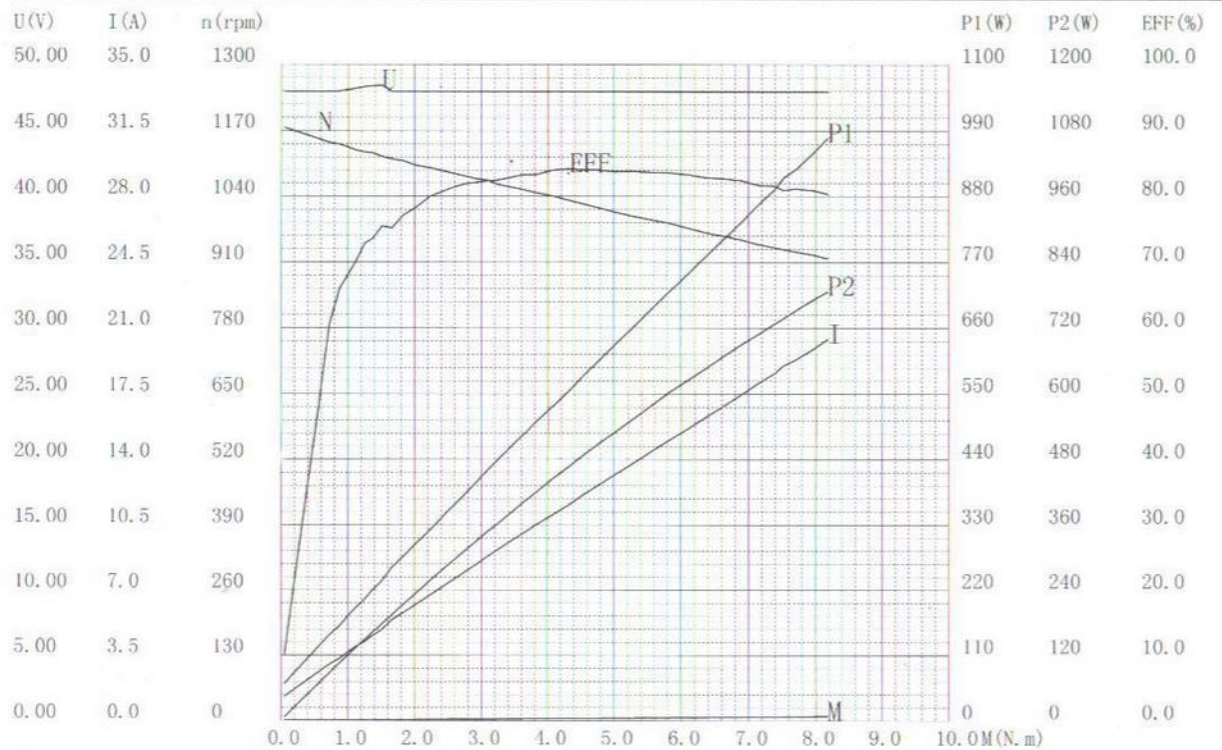


Figura 7. Curva desempeño motor BLT 500W 48V

Dado que dos baterías deben entregar la corriente para los cuatro motores, la corriente máxima continua en cada motor no debe ser mayor a 15 A y la corriente máxima pico no debe ser mayor a 25 A, estos valores están por debajo de los 30 A y los 50 A máximos continuos y pico respectivamente de cada controlador.

Se elige como punto de trabajo del motor, un punto entre el de máxima eficiencia y el de máxima potencia, en el que corriente sea 15 A. Es importante anotar, que este punto de trabajo corresponde a la situación más exigente, en la cual el vehículo con una masa de 400 Kg debe acelerar para pasar de estar detenido a la velocidad máxima en 3 segundos, incluso subiendo una rampa de 0.083 rad (inclinación 12%).

En la Tabla 6 se muestra para el punto de trabajo elegido del motor el par y la corriente, así como la relación en el sistema de transmisión para que el par del motor cumpla con el que se calculó que se requieren en las ruedas para el caso 2.

Punto de trabajo elegido	Ruedas	Motor	Relación
Par (Nm)	24	6	4
Corriente (A)		15	

Tabla 6. Par en el motor y en la rueda

Considerando este cálculo se elige una relación de transmisión de 1:4, con las que se obtiene el par y velocidad angular en las ruedas, que se muestra en la Tabla 7.

Para el punto de trabajo elegido con transmisión 1:4	Motor	Ruedas
Par (Nm)	6	24
Velocidad angular (rad/seg)	102,1	25,53

Tabla 7. Par y ω en las ruedas en el punto de trabajo elegido para el motor con transmisión 1:4

Por lo tanto, el par y la velocidad entregados por el motor con el sistema de transmisión 1:4, superan lo requerido según el cálculo (23,95 Nm y 21,87 rad/s).

Si el motor se pone a trabajar en el punto de máxima potencia con la relación de transmisión 1:4 se obtienen el par, velocidad y corriente que se muestra en la Tabla 8.

Para el punto de trabajo máxima potencia con transmisión 1:4	Motor	Ruedas
Par (Nm)	8,18	32,72
Velocidad angular (rad/seg)	96,03	24,01
Corriente (A)	20,39	

Tabla 8. Par y ω en las ruedas en el punto de máxima potencia del motor con transmisión 1:4

Por lo tanto, si la eficiencia en el sistema de transmisión es de 0,8, el par entregado por el motor en las ruedas para el punto de máxima potencia ($32,72 \cdot 0,8 = 26,18$ N) es mayor al par que se calculó como requerido para el caso 2 y la corriente no supera los 25 A pico que pueden entregar las baterías.

3.5 Arquitectura de Control

Para el diseño de la arquitectura de control con retroalimentación se utiliza la información encontrada sobre controladores para robots y plataformas omnidireccionales [10], [9], [13] y [14].

El controlador debe entregar la señal de referencia y el sentido de giro (horario/anti horario) para los controladores de cada uno de los motores BLDC.

Cuando se presenten perturbaciones de -5% en las velocidades angulares de los motores de cada rueda, el controlador en lazo cerrado debe:

- Asegurar ausencia de error en estado estacionario en las salidas de velocidad del vehículo (V_x , V_y , ω_z).
- Garantizar que el esfuerzo de control sea realizable, no supere el 15% de la velocidad de referencia para evitar la saturación de los motores.
- Minimizar el tiempo de ajuste, no mayor a 2 segundos. Y de esta manera minimizar el error en la dirección de movimiento en los ejes X, Y y Z durante el estado transitorio.

Retomando el modelo cinemático, presentado en el numeral 3.2.1 de la página 13, cuando las velocidades angulares en los motores de las cuatro ruedas activas son iguales ($\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega$) es posible combinando cuales motores están activos y su sentido de giro, obtener los tipos de desplazamiento que se muestran en la Tabla 9.

Tipos de movimiento del vehículo	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	V_X	V_Y	ω_z
1. Detenido	0	0	0	0	0	0	0
2. Movimiento al norte	ω	ω	Ω	ω	0	$\omega * R$	0
3. Movimiento al sur	$-\omega$	$-\omega$	$-\omega$	$-\omega$	0	$-\omega * R$	0
4. Movimiento al este	ω	$-\omega$	$-\omega$	ω	$\omega * R$	0	0
5. Movimiento al oeste	$-\omega$	ω	Ω	$-\omega$	$-\omega * R$	0	0
6. Movimiento norteste	ω	0	0	ω	$\frac{\omega * R}{2}$	$\frac{\omega * R}{2}$	0
7. Movimiento sureste	0	$-\omega$	$-\omega$	0	$\frac{-\omega * R}{2}$	$\frac{\omega * R}{2}$	0
8. Movimiento noroeste	0	ω	ω	0	$\frac{\omega * R}{2}$	$\frac{-\omega * R}{2}$	0
9. Movimiento suroeste	$-\omega$	0	0	$-\omega$	$\frac{-\omega * R}{2}$	$\frac{-\omega * R}{2}$	0
10. Giro horario	ω	$-\omega$	ω	$-\omega$	0	0	$\omega \frac{R}{L+1}$
11. Giro anti horario	$-\omega$	ω	$-\omega$	ω	0	0	$-\omega \frac{R}{L+1}$

Tabla 9. Tipos de movimiento del vehículo, motores activos, velocidad vehículo

3.6 Simulación del sistema

Dado que las plataformas están concebidas para desplazarse en ambientes interiores por pasillos congestionados o estrechos, la velocidad de desplazamiento no debe ser mayor a 2.78 m/s (10 Km/h). Por esta razón, para determinar la arquitectura de control con la simulación, utilizando Matlab y Simulink (lenguaje de programación gráfico de Matlab), se utiliza el modelo cinemático y no se considera el modelo dinámico.

3.6.1 Representación con ecuaciones diferenciales

De acuerdo con el modelo cinemático, utilizando la Representación con ecuaciones diferenciales que se muestra en la página 13 y considerando el subsistema del motor BLDC y su controlador como lineal y sin retardos, se puede trabajar el vehículo como un sistema lineal, con múltiples entradas y salidas (MIMO).

En la Figura 8 y Figura 13 se muestra la representación del vehículo en Simulink para el modelo cinemático utilizando la representación con ecuaciones diferenciales, en los cuales:
Entradas:

- VolVelRef es la magnitud (en porcentaje) de la velocidad de referencia del vehículo, la cual determina la velocidad angular de referencia de los motores activos (ω_{Ref}). ω_{Re} determina la velocidad posible del vehículo la cual depende de la dirección de movimiento:
 - Para movimientos en $\pm X$ o $\pm Y$, $V_{Xposible} = V_{Yposible} = |\omega_{Ref} * R|$
 - Para movimientos en diagonal, $V_{Xposible} = V_{Yposible} = |\omega_{Ref} * R| / 2$
 - Para movimientos en $\pm Z$ (giros del vehículo sobre su eje), $\omega_{Zposible} = |\omega_{Ref} * R| / (L+1)$
- VolX, VolY, VolZ corresponde a los voltajes de las señales que determinan la dirección de movimiento deseada del vehículo y así se inhabilita o habilita con signo positivo o negativo las velocidades posibles en X, Y y Z. En la Tabla 10 se muestra para los valores de VolX, VolY, VolZ cuales velocidades se habilitan y el signo para movimientos N/S/E/O, en diagonal y giro sobre su propio eje. En la tabla no se

muestran algunas de las posibles combinaciones de VolX, VolY, VolZ para obtener movimientos simultáneos del vehículo en $\pm X$, $\pm Y$ y $\pm Z$.

VolX	VolY	VolZ	Movimiento	V_X^{12}	V_Y^9	ω_Z^9
$33 \leq \text{VolX} \leq 66$	$33 \leq \text{VolY} \leq 66$	$33 \leq \text{VolZ} \leq 66$	Detenido	0	0	0
$66 < \text{VolX} \leq 100$			Este	+	0	0
$0 \leq \text{VolX} < 33$			Oeste	-	0	0
$33 \leq \text{VolX} \leq 66$	$66 < \text{VolY} \leq 100$	$33 \leq \text{VolZ} \leq 66$	Norte	0	+	0
	$0 \leq \text{VolY} < 33$		Sur	0	-	0
$66 < \text{VolX} \leq 100$	$66 < \text{VolY} \leq 100$	$33 \leq \text{VolZ} \leq 66$	Diagonal NE	+	+	0
$0 \leq \text{VolX} < 33$			Diagonal NO	-	+	0
$66 < \text{VolX} \leq 100$	$0 \leq \text{VolY} < 33$	$33 \leq \text{VolZ} \leq 66$	Diagonal SE	+	-	0
$0 \leq \text{VolX} < 33$			Diagonal SO	-	-	0
$33 \leq \text{VolX} \leq 66$	$33 \leq \text{VolY} \leq 66$	$66 < \text{VolZ} \leq 100$	Giro Horario	0	0	+
		$0 \leq \text{VolZ} < 33$	Giro anti Horario	0	0	-

Tabla 10. Valores para los voltajes que determinan dirección en X, Y y Z

- Error 1, 2, 3 y 4, corresponde al porcentaje error en las velocidades angulares de las ruedas 1, 2, 3 y 4.

Salidas:

- VelX, VelY y VelZ es la salida en porcentaje de la magnitud de la velocidad del vehículo en dirección X, Y y Z respectivamente.
- X, Y y Z, son las distancias en X y Y el ángulo de giro en radianes recorrido por el vehículo.
- w_1 , w_2 , w_3 y w_4 es la salida en porcentaje de la magnitud de la referencia para la señal de velocidad del control del motor para cada rueda.

Si w_i es positivo la rueda i gira en sentido horario y si es negativo gira en sentido anti horario.

Es importante tener en presente al momento de construir la arquitectura de control, que por la forma como se transmite el movimiento del eje del motor a cada rueda y teniendo

¹² + habilita V_{posible} con signo positivo, - habilita V_{posible} con signo negativo, 0 inhabilita V_{posible}
 Esto aplica para $V_{X\text{posible}}$, $V_{Y\text{posible}}$ y $\omega_{Z\text{posible}}$

presente el Sistema de Coordenadas que se muestra en la Figura 4, de la página 13 si las ruedas 2 y 4 giran en sentido horario los motores 2 y 4 giran en sentido horario, pero si las ruedas 1 y 3 giran en sentido horario los motores 1 y 3 giran en sentido anti horario.

Se prueba el sistema con perturbaciones tipo escalón en la velocidad angular de los motores, encontrando en la simulación, que el error en estado estacionario para las salidas de V_X , V_Y , ω_Z , permanece constante y que para perturbaciones tipo rampa el error en estado estacionario tiene a infinito, lo cual significa que el sistema es tipo 0.

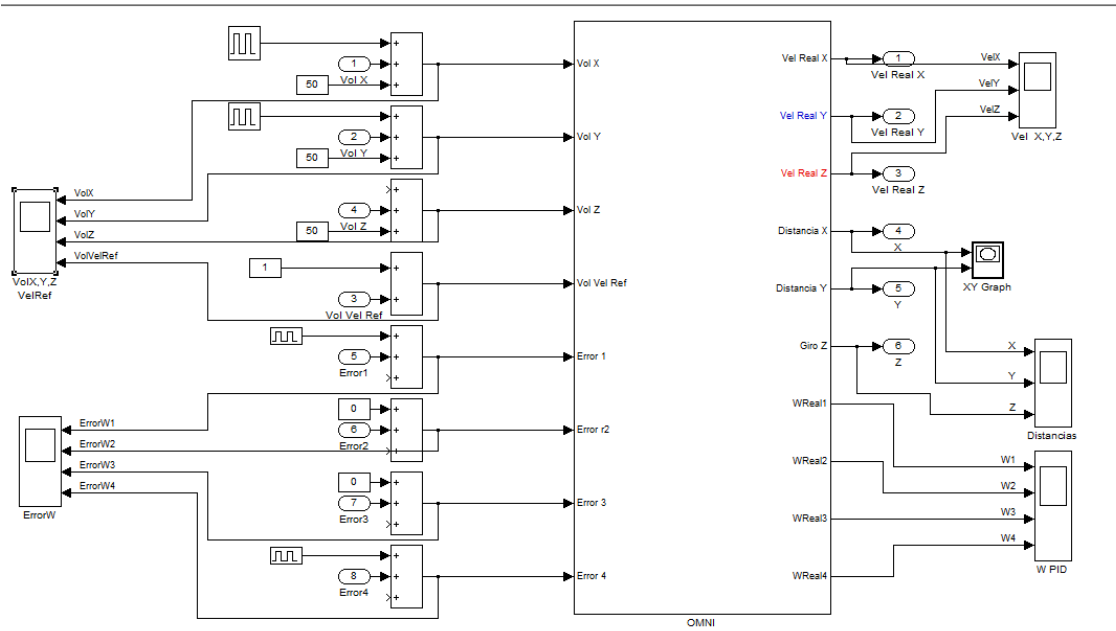


Figura 8. Modelo Simulink Representación Vehículo con Ecuaciones Diferenciales

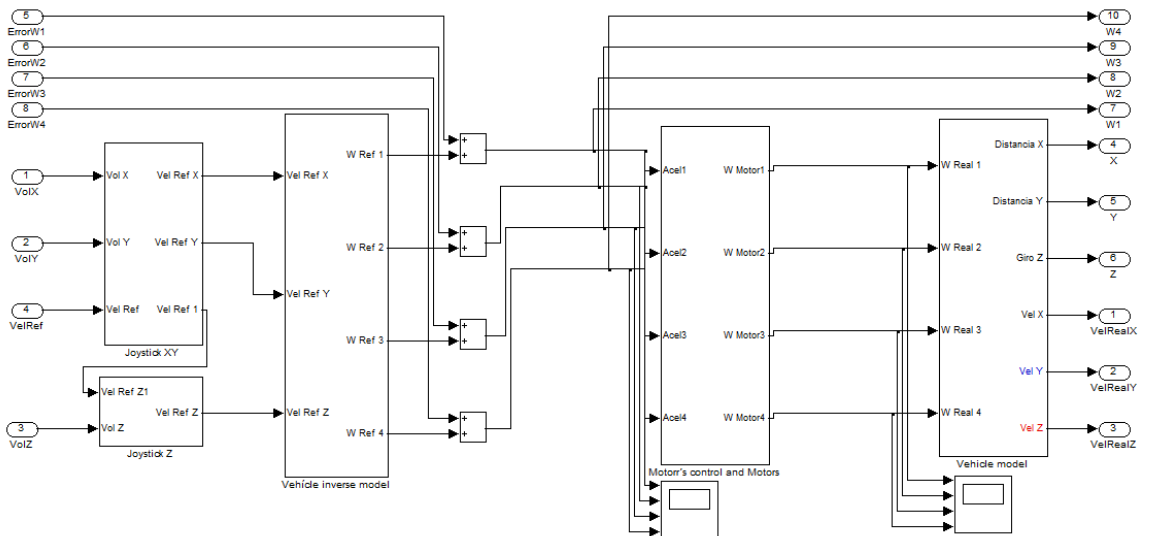


Figura 9. Modelo OMNI Representación Vehículo con Ecuaciones Diferenciales con arquitectura de control en lazo abierto

3.6.1.1 Análisis de sensibilidad a las perturbaciones

Se utiliza el modelo en Simulink que se muestra en la Figura 9, el cual considera el modelo cinemático del sistema en lazo abierto (la acción de control, no considera la señal de retroalimentación de la velocidad angular de los motores, solo la señal de los mandos dadas por el usuario). Se realiza un análisis de sensibilidad a las perturbaciones para las salidas de velocidad del vehículo (V_x , V_y , ω_z), para un tiempo de simulación de 100 segundos, en varios de los posibles modos de operación con perturbaciones tipo escalón del 5% en la amplitud de la velocidad angular de las ruedas. Por facilidad en los cálculos numéricos, en el modelo se utiliza $R=1$, $L=0.5$ y $l=0.5$ que corresponden al radio de las ruedas y las distancias del centro de las ruedas al centro geométrico del vehículo, todas en metros.

Este análisis no considera condiciones dinámicas, por lo tanto no se tiene cuenta aspectos como: inercia, fricción, deslizamiento de las ruedas o una inadecuada distribución de la carga lo cual afecta el centro de masa y hace que no coincida con el centro geométrico del vehículo.

En este modelo el subsistema del motor BLDC y su controlador se aproximan a un subsistema lineal, por lo que el vehículo se trata como un sistema lineal, con múltiples entradas y salidas (MIMO).

Para facilitar la simulación, el subsistema del motor BLDC y controlador de velocidad además de ser lineal, no presenta retardos.

En la Figura 10 se muestran las entradas y salidas para una simulación de 100 segundos en la cual las entradas hacen que el vehículo se desplace en dirección *este* de 0 a 50 segundos y se detenga después de los 50 segundos. No hay perturbación en la velocidad angular de las ruedas y la velocidad de referencia para el vehículo es de 100%.

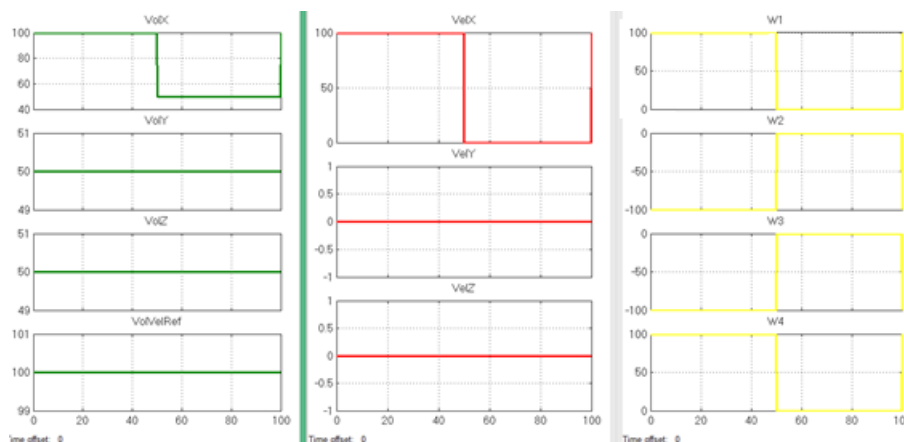


Figura 10. Simulación movimiento al este sin perturbaciones

Se observa en la Figura 10 que durante los primeros 50 segundos, el vehículo se mueve en dirección este (+X) al 100% de la velocidad ($VelX=100$), que las ruedas 1 y 4 giran al

100% de su velocidad angular en sentido horario (+100) y los ruedas 2 y 3 al 100% en sentido anti horario (-100). Después de los 50 segundos todas las velocidades se hacen cero.

En la Figura 11 se muestran las entradas y salidas para una simulación de 100 segundos en la cual las entradas hacen que el vehículo se desplace en dirección norte de 0 a 50 segundos y se detenga después de los 50 segundos. No hay perturbación en la velocidad angular de los motores y la velocidad de referencia para el vehículo es de 100%.

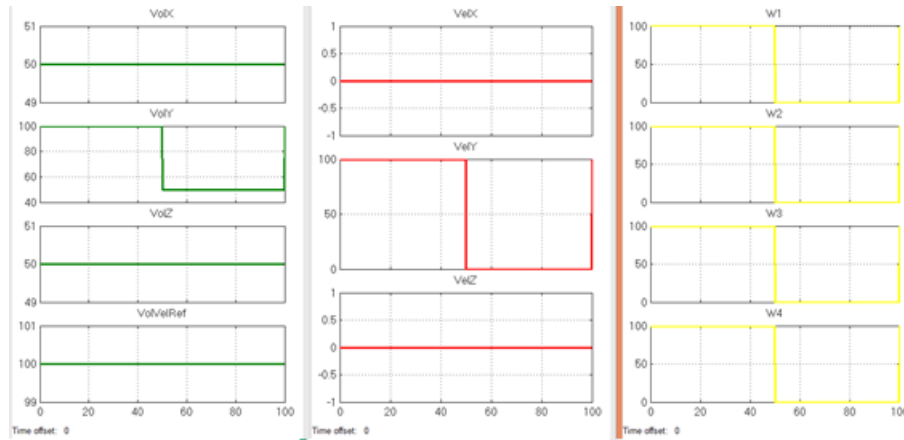


Figura 11. Simulación movimiento al norte sin perturbaciones

Se observa en la Figura 11 que durante los primeros 50 segundos, el vehículo se mueve en dirección norte (+Y) al 100% de la velocidad ($V_{elY}=100$), que todas las ruedas giran al 100% de su velocidad angular en sentido horario (+100) y que después de los 50 segundos todas las velocidades se hacen cero.

En la Figura 12 se muestran las entradas y salidas para una simulación de 100 segundos en la cual las entradas hacen que el vehículo se desplace en dirección *norte* de 0 a 50 segundos y se detenga después de los 50 segundos. Con una *perturbación del 5% en la velocidad angular del motor 3* durante los primeros 50 segundos y con la velocidad de referencia para el vehículo del 100%.

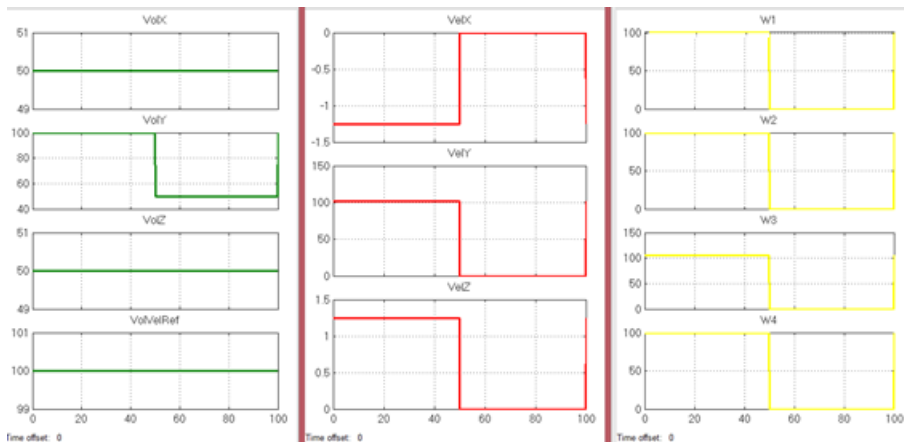


Figura 12. Simulación movimiento norte con perturbación en la velocidad de una rueda

Se observa en la Figura 12 que durante los primeros 50 segundos, para una perturbación tipo escalón de +5% en la velocidad de la rueda 3 se presenta error de 1,25% en las tres velocidades del vehículo V_X , V_Y y V_Z y que la referencia para la velocidad del motor de la rueda con perturbación (ω_3) tiene un incremento igual al error.

Este análisis se realiza con todos los posibles tipos de operación definidos para el vehículo, siempre con perturbaciones tipo escalón de -5% en la velocidad angular de las ruedas, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 11 .

Perturbación de -5% en la velocidad de las ruedas	Error en las velocidades del vehículo V_X y/o V_Y y/o ω_z	Variación en la referencia para la señal de velocidad de los motores (Esfuerzo de control)	
		En motor de la(s) rueda(s) con error	En motor de la(s) rueda(s) sin error
– Una rueda	hasta -1.25%	0	0
– Dos ruedas	hasta -2.50%	0	0
– Tres ruedas	hasta -3,75%	0	0
– Cuatro ruedas	hasta -5.00%	0	0

Tabla 11. Perturbación en ruedas, error en velocidad del vehículo y esfuerzo de control, con arquitectura de control en lazo abierto

Para mejorar la respuesta del vehículo y disminuir la sensibilidad a este tipo de perturbaciones, se propone utilizar un controlador PID en lazo cerrado para la velocidad de cada rueda.

3.6.1.2 Sintonización de los controladores PID

Para ajustar cada control PID se utiliza el modelo cinemático del vehículo en Simulink que se muestra en la Figura 13 y se emplea el método de Ziegler-Nichols [3].

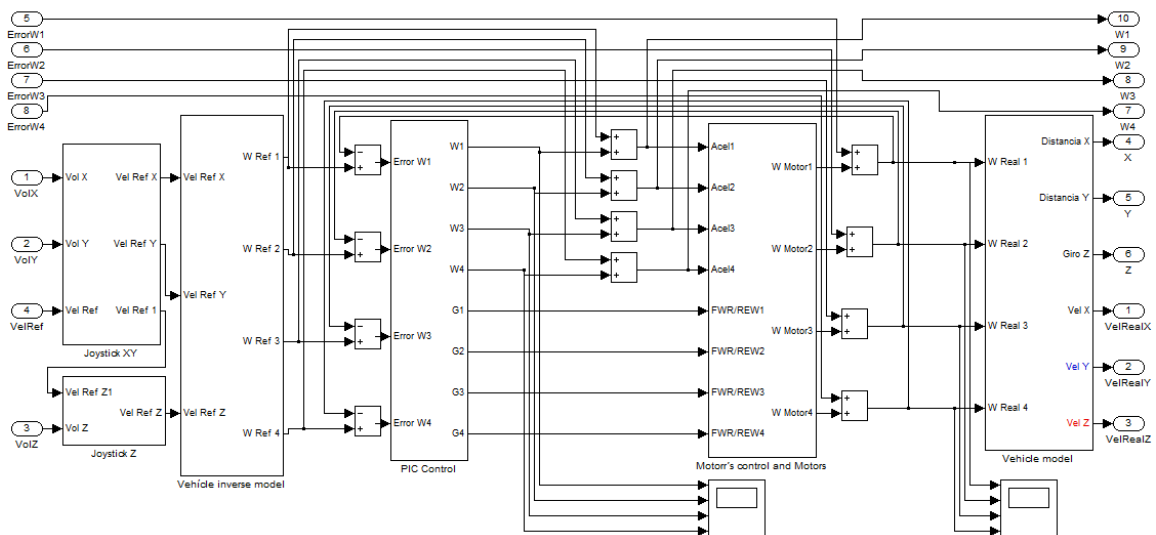


Figura 13. Modelo OMNI Representación Vehículo con Ecuaciones Diferenciales en lazo cerrado con retroalimentación de la velocidad angular de los motores

En las simulaciones se observa que las velocidades del vehículo (V_x , V_y , ω_z) no oscilan aun cuando la ganancia K sea igual a 50000, y que K igual a 100 es la mínima ganancia en la que el error en estado estacionario para las velocidades del vehículo (V_x , V_y , ω_z) es igual al 1%.

También se prueba la herramienta de ajuste automático para los PID de Matlab, el cual tiene un algoritmo que hace posible elegir los parámetros para k_p , T_i y T_d que proporcionan una mayor robustez y mejor desempeño. La herramienta permite probar con diferentes combinaciones de los parámetros K_p , T_i y T_d para perturbaciones de tipo escalón de $\pm 5\%$ en las velocidades de las ruedas.

Utilizando Simulink se prueban y eligen los parámetros de $K_p=0.330$, $T_i=2.444$, $T_d=0$, pues con estos valores el error para V_x , V_y and ω_z en estado estacionario es cero, el tiempo de ajuste es 1.88 segundos y en estado estacionario el esfuerzo de control en la referencia para la señal de velocidad del motor con la perturbación es igual a la referencia más el valor de la perturbación con signo contrario. En los motores sin perturbación el esfuerzo de control es igual a la referencia.

En la Tabla 12 se muestran para el estado estacionario el error en las velocidades del vehículo y el esfuerzo de control en la velocidad de referencia de los motores cuando se utiliza la arquitectura de control con retroalimentación con los parámetros de K_p , T_i y T_d indicados.

Perturbación de -5% en la velocidad de las ruedas	En estado estacionario Error en las velocidades del vehículo V_x y/o V_y y/o ω_z	En estado estacionario Variación en la referencia para la señal de velocidad de los motores (Esfuerzo de control)	
		En motor de la rueda(s) con error	En motor de las rueda(s) sin error
- Una rueda	0	+5%	0
- Dos ruedas	0	+5%	0
- Tres ruedas	0	+5%	0
- Cuatro ruedas	0	+5%	0

Tabla 12. Perturbación en ruedas, error en velocidad del vehículo y esfuerzo de control, con arquitectura de control en lazo cerrado

3.6.2 Representación en espacio de estado

De acuerdo con el modelo cinemático, utilizando la Representación en espacio de estado que se muestra en la sección 3.2.2; el vehículo es un sistema lineal, con múltiples entradas y salidas (MIMO) e invariante en el tiempo.

3.6.2.1 Análisis de estabilidad, controlabilidad y observabilidad.

Se utilizan los métodos para determinar la estabilidad, controlabilidad y observabilidad en sistemas representados en espacio de estado [3].

Un sistema se define como estable si para cualquier entrada acotada se obtiene una salida acotada, independiente de su estado inicial. Para determinar la estabilidad del sistema se calculan los valores propios (Eigen valores) de la matriz A. Se emplea la función eig(A) de Matlab obteniendo: $\text{eig}(A) = [0;0;0]$. Este resultado, en el que los polos son reales pero no están en el semiplano izquierdo, sino en el eje imaginario, indica que el sistema no es estable (es asintóticamente estable), por lo que el controlador elegido debe desplazar los polos del sistema al semiplano izquierdo.

Un sistema se define como completamente controlable si existe una secuencia de control que lleve el sistema de un estado inicial a un estado final en un tiempo finito. Si una variable de estado no depende de la variable de control, entonces no se puede controlar dicha variable y el sistema no es completamente controlable. Para conocer la controlabilidad del sistema, se debe obtener la matriz de controlabilidad definida como $m_c = [B \ A^*B \ A^2*B]$. Si el rango de la matriz de controlabilidad no es menor al orden del sistema, que en este caso es 3, el sistema es controlable. Utilizando la función rank de Matlab se obtiene $\text{rank}(m_c)=3$. Este resultado indica que el sistema es controlable.

Un sistema se define como completamente observable si se puede determinar el estado inicial del sistema a partir de la medición de entradas y salidas, en un tiempo finito. Si una variable de estado no influye en la salida, entonces no se puede observar dicha variable y el sistema no es completamente observable. Si el rango de la matriz de observabilidad no es menor al orden del sistema, que en este caso es 3, el sistema es observable. Para conocer la observabilidad del sistema, se utiliza la función rank de Matlab para la matriz de observabilidad $m_o = [C; CA; CA^2]$. $\text{rank}(m_o)=3$. El resultado indica que el sistema es observable.

3.6.2.2 Sintonización de la arquitectura de control por retroalimentación del estado

Para sintonizar el controlador, se utiliza el modelo en Simulink que se muestra en el numeral 3.2.2 de la página 15 teniendo en cuenta lo expresado en el numeral 3.5 de la página 23.

El modelo tiene como entradas:

- Velocidades de referencia del vehículo en X, Y y Z, varía entre -100% y 100%, siendo:
 - $V_X=100$, velocidad al 100% al este y $V_X=-100\%$, velocidad al 100 al oeste.
 - $V_Y=100$, velocidad al 100% al norte y $V_Y=-100\%$, velocidad al 100 al sur.
 - $V_Z=100$, giro al 100% sentido horario y $V_Z=-100\%$, giro al 100% sentido anti horario.
- Perturbaciones en las velocidades del vehículo en X, Y y Z, varía entre -5% y 5%, siendo:
 - $PV_X=5$, 5% al este y $PV_X=-5\%$, 5 al oeste.
 - $PV_Y=5$, 5% al norte y $PV_Y=-5\%$, 5 al sur.
 - $PV_Z=5$, 5% sentido horario y $PV_Z=-5\%$, 5% sentido anti horario.

Y salidas:

- Velocidades del vehículo en X, Y y Z. (Vel X,Y,Z) , varía entre -100% y 100%, siendo:
 - $V_X=100$, velocidad al 100% al este y $V_X=-100\%$, velocidad al 100 al oeste.
 - $V_Y=100$, velocidad al 100% al norte y $V_Y=-100\%$, velocidad al 100 al sur.
 - $V_Z=100$, giro al 100% sentido horario y $V_Z=-100\%$, giro al 100% sentido anti horario.

- Referencia para la señal de velocidad angular de cada una de las ruedas (Control Effort $\omega_{1,2,3,4}$), varía entre -100% y 100%, siendo:
 - $\omega_i=100$, velocidad angular de la rueda i al 100% con sentido de giro horario.
 - $\omega_i=-100$, velocidad angular de la rueda i al 100% con sentido de giro anti horario.

Como ya se había indicado es importante tener en presente al momento de construir la arquitectura de control, que por la forma como se transmite el movimiento del eje del motor a cada rueda y teniendo presente el Sistema de Coordenadas que se muestra en la Figura 4, de la página 13 si las ruedas 2 y 4 giran en sentido horario los motores 2 y 4 giran en sentido horario, pero si las ruedas 1 y 3 giran en sentido horario los motores 1 y 3 giran en sentido anti horario.

Para determinar el controlador por retroalimentación del estado más adecuado que haga que el sistema sea estable (ubicar los polos en el semiplano izquierdo) y que no haya error en el estado estacionario (agregar un integrador). Se cambia la representación del sistema de la forma canónica de Jordan a la forma canónica controlable y se calculan las matrices K y L que determinan la acción proporcional e integral. [3].

Se debe elegir los valores de la matriz PP, que corresponden a los polos deseados del sistema. Para determinar estos valores se utiliza Simulink, buscando que el esfuerzo de control sea realizable, puesto que no debe superar el 15% de la velocidad de referencia, con el fin de evitar la saturación de los motores.

Se construyen las matrices AA, BB y PP:

$$AA = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & I \end{bmatrix} \quad BB = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad PP = \begin{bmatrix} -0.5 \\ -0.5001 \\ -0.5002 \\ -0.5003 \\ -0.5004 \\ -0.5005 \end{bmatrix}$$

Ecuación 12. Matrices AA, BB, PP

Utilizando la función place de Matlab, se obtienen las matrices K y L:

$$K = 2.003 \begin{bmatrix} 1.003 & 1 & -1 \\ -1.003 & 1 & 1 \\ -1.003 & 1 & -1 \\ 1.003 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad L = 2.2514 \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 13. Matrices K y L

Utilizando Simulink, se probó el sistema con diferentes valores de la matriz PP, y por lo tanto con diferentes valores para las matrices K y L, para perturbaciones de $\pm 5\%$ en las velocidades del vehículo, observando:

- No es posible un control por retroalimentación de estado con acción solo proporcional.

- Si es posible un control por retroalimentación de estado con acción proporcional-integral.
- A medida que los polos se mueven hacia el semiplano izquierdo el tiempo de respuesta de las velocidades del vehículo V_X , V_Y y ω_Z disminuye, así como el sobre impulso en las velocidades del vehículo y en las señales de referencia para las velocidades de los motores de las ruedas.

Con los valores de K y L que se muestran en la Ecuación 13 se realizan varias simulaciones, alguna de las cuales se muestran a continuación.

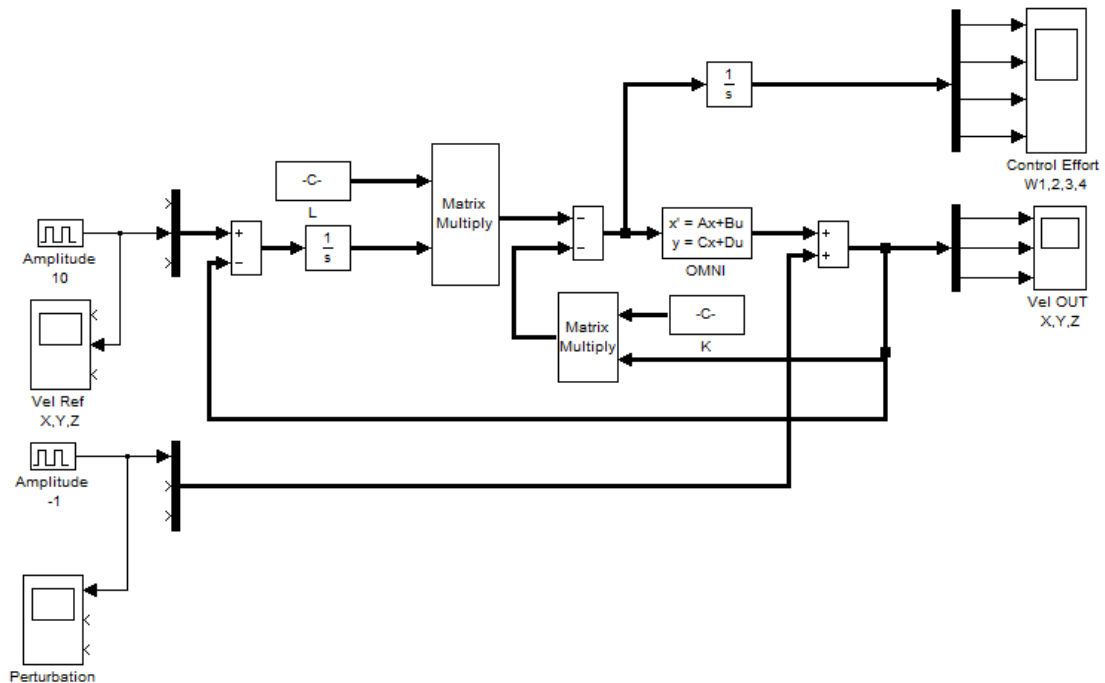


Figura 14. Controlador por retroalimentación del estado

En la Figura 15 se muestran las entradas y salidas para una simulación de 100 segundos en la cual las entradas hacen que el vehículo este detenido los primeros 50 segundos y luego se desplace en dirección *norte* hasta los 100 segundos. Hay perturbación de -5% en la velocidad en Y y la velocidad de referencia para el vehículo es de 100%.

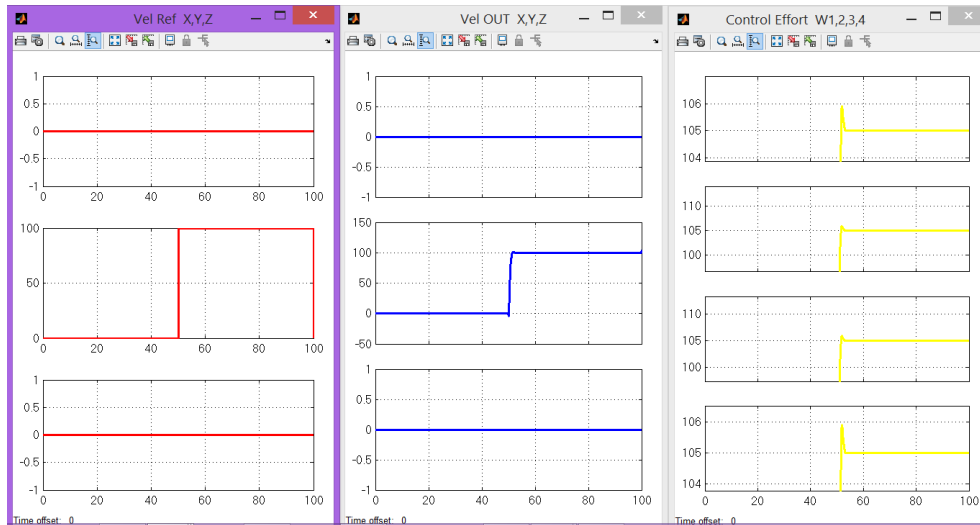


Figura 15. Simulación espacio de estado perturbación en una velocidad del vehículo

Se observa en la Figura 15 que durante los primeros 50 segundos el vehículo está detenido y luego se mueve en dirección norte (+Y) al 100% de la velocidad ($Vel_Y=100$), para quedar con todas las ruedas girando al 105% de su velocidad angular en sentido horario (+105) para así compensar la perturbación de menos 5%.

En la Figura 16 se muestran las entradas y salidas para una simulación de 100 segundos en la cual las entradas hacen que el vehículo este detenido los primeros cincuenta segundos y luego se desplace en dirección *norte*. Hay perturbación de -5% en la velocidad en Y y en X y la velocidad de referencia para el vehículo es de 100%.

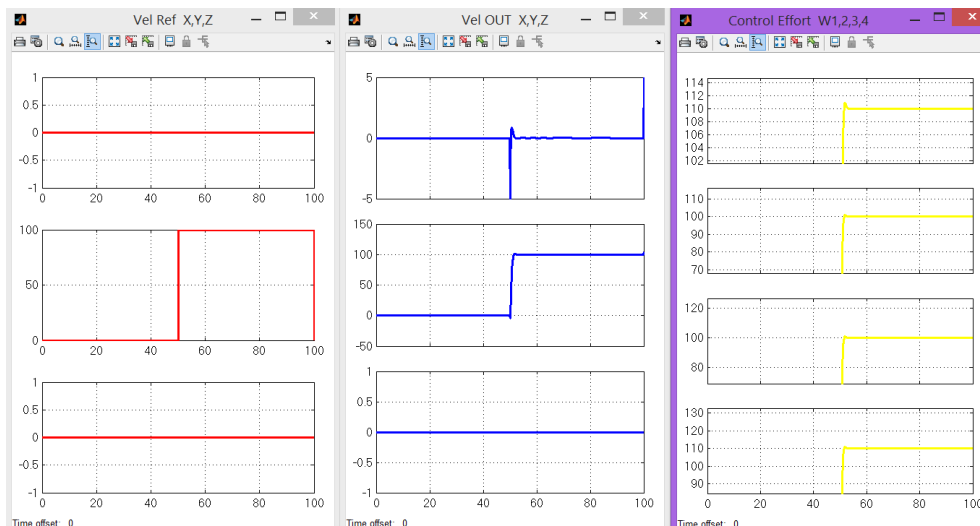


Figura 16. Simulación espacio de estado perturbación en 2 velocidades del vehículo

Se observa en la Figura 16 que durante los primeros 50 segundos el vehículo no se mueve y luego se mueve en dirección norte (+Y) al 100% de la velocidad ($Vel_Y=100$), que hay un tiempo de ajuste, durante el cual el vehículo se mueve en dirección E/O, para quedar con las ruedas 1 y 4 girando al 110% de su velocidad angular en sentido horario (+110) y las ruedas 2 y 3 al 100%, de esta manera ajusta la perturbación de menos 5% en X y Y.

En la Figura 17 se muestran las entradas y salidas para una simulación de 100 segundos en la cual las entradas hacen que el vehículo este detenido los primeros cincuenta segundos y luego se desplace en dirección *norte*. Hay perturbación de -5% en la velocidad en Y y en X y en Z. La velocidad de referencia para el vehículo es de 100%.

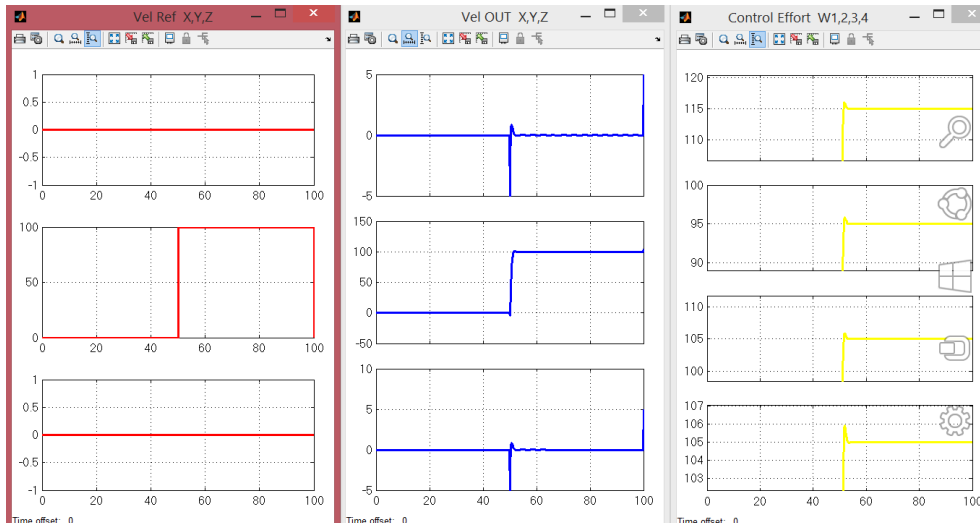


Figura 17. Simulación espacio de estado perturbación en 3 velocidades del vehículo

Se observa en la Figura 17 que durante los primeros 50 segundos el vehículo no se mueve y luego se mueve en dirección norte (+Y) al 100% de la velocidad ($VelY=100$), que hay un tiempo de ajuste en la que se afecta la $VelX$ y $VelZ$, durante el cual el vehículo se mueve en dirección E/O y gira, para quedar con la rueda 1 girando al 115% de su velocidad angular en sentido horario (+115) y las ruedas 2, 3 y 4 al 105%, de esta manera ajusta la perturbación de menos 5% en X y Y.

En la Figura 18 se muestran las entradas y salidas para una simulación de 100 segundos en la cual las entradas hacen que el vehículo este detenido los primeros 50 segundos y luego se desplace en dirección *noreste* hasta los 100 segundos. Hay perturbación de -5% en la velocidad en Y, la velocidad de referencia para el vehículo es de 50% en X y 50% en Y.

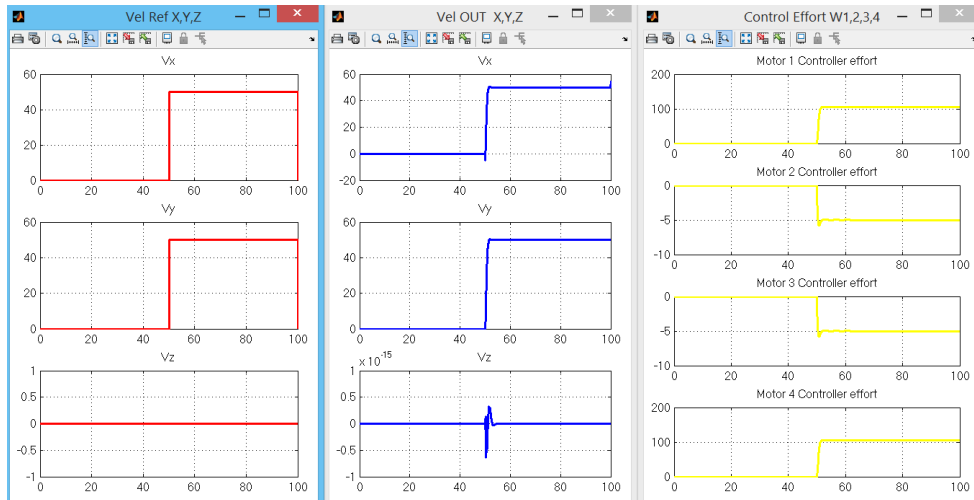


Figura 18. Simulación espacio de estado perturbación en 1 velocidad del vehículo movimiento en diagonal

Se observa en la Figura 18 que durante los primeros 50 segundos el vehículo no se mueve y luego se mueve en dirección noreste (+X+Y) al 50% de la velocidad ($V_{elX}=50$ y $V_{elY}=50$), que hay un tiempo de ajuste en la que se afecta la V_{elX} y V_{elZ} , durante el cual el vehículo se mueve en dirección O y gira, para quedar con las ruedas 1 y 4 girando al 105% de su velocidad angular en sentido horario (+105) y las ruedas 2 y 3 al 5% de su velocidad angular en sentido antihorario, de esta manera ajusta la perturbación de menos 5% en Y.

Los resultados de las simulaciones pueden resumirse en la Tabla 13.

Perturbación de -5% En las velocidades del vehículo	En estado estacionario Error en las velocidades del vehículo V_X, V_Y, ω_Z	Variación en la referencia para la señal de velocidad de los motores (Esfuerzo de control)
Una velocidad	0	$\pm 5\%$ en los cuatro motores
Dos velocidades	0	± 10 en dos motores
Tres velocidades	0	$\pm 15\%$ en un motor y $\pm 5\%$ en dos motores

Tabla 13. Perturbación en velocidades del vehículo y esfuerzo de control, controlador con retroalimentación del espacio de estado

3.7 Configuración de la arquitectura de control

El controlador debe integrarse con los controladores de los motores BLDC. En la Tabla 14 se muestran las entradas y salidas del controlador.

Cuatro controles PI	Retroalimentación de estado
<i>Entradas</i>	
– Señal para las direcciones de movimiento del vehículo en X, Y y Z.	– Señales de velocidad de referencia para el vehículo V_X, V_Y y V_Z de acuerdo con los tipos de movimiento de la Tabla 15.
– Señal de velocidad de referencia para el vehículo.	– Señal de velocidad de referencia para el vehículo

– Señal de los sensores para determinar la velocidad angular de las ruedas.
– Señal de activación o desactivación de la retroalimentación para control en lazo cerrado.
<i>Salidas</i>
– Señal de referencia para magnitud de la velocidad del control de cada uno de los motores BLDC.
– Señal de sentido de giro para el control de cada uno de los motores BLDC.

Tabla 14. Entradas y salidas controlador

Tipos de movimiento	V_X^{13}	V_Y^{11}	ω_Z^{14}
Detenido	0	0	0
Este	$+V_{Ref}$	0	0
Oeste	$-V_{Ref}$	0	0
Norte	0	$+V_{Ref}$	0
Sur	0	$-V_{Ref}$	0
Diagonal NE	$+V_{Ref}/2$	$+V_{Ref}/2$	0
Diagonal NO	$-V_{Ref}/2$	$+V_{Ref}/2$	0
Diagonal SE	$+V_{Ref}/2$	$-V_{Ref}/2$	0
Diagonal SO	$-V_{Ref}/2$	$-V_{Ref}/2$	0
Giro Horario	0	0	$+ \omega_{Ref} * R / (L+1)$
Giro anti Horario	0	0	$- \omega_{Ref} * R / (L+1)$

Tabla 15. Tipos de movimientos y velocidades del vehículo

3.8 Conclusiones fase uno

Con base en el modelo cinemático, utilizando una arquitectura de control formada por cuatro controles con PI en lazo cerrado para controlar la señal de referencia de velocidad y sentido de giro de los motores BLDC, es posible controlar las velocidades del vehículo en X, Y y Z, aun cuando se presentes perturbaciones de $\pm 5\%$ en las velocidades angulares de las ruedas.

El esfuerzo de control en la señal de referencia para la velocidad de los motores depende del valor de la perturbación, por ejemplo si la perturbación es de menos 5% en un motor, el esfuerzo de control se incrementa en un 5% en ese motor, si la perturbación es de menos 5% en dos motores, el esfuerzo de control se incrementa en un 5% en esos motores. Debido a las limitaciones de potencia en los motores reales, este incremento en el esfuerzo de control no siempre será posible por lo que aunque la señal de referencia se incremente, la salida que corresponde a la velocidad de giro del motor no se incrementará.

Con base en el modelo cinemático, utilizando una arquitectura de control con retroalimentación del estado, que tiene como entrada de retroalimentación el estado de las velocidades del vehículo V_X , V_Y , ω_Z , y como salidas la señal de referencia para la velocidad y sentido de giro de los motores de las ruedas, es posible controlar las velocidades del vehículo aun con perturbaciones que afecten dichas velocidades en $\pm 5\%$.

¹³ V_{Ref} es la velocidad de referencia

¹⁴ ω_{Ref} es V_{Ref}/R , siendo R el radio de la rueda

Dependiendo del modo de operación, el esfuerzo de control cambia en todos los motores, incluso en aquellos motores sin perturbación o que no están activos. Por ejemplo, si la perturbación es de ± 5 en una velocidad del vehículo, la señal de referencia para la velocidad de todos los motores cambia en más 5% o menos 5%, si la perturbación es de ± 5 en dos velocidades del vehículo, la señal de referencia para la velocidad de dos de los motores cambia en más 10% o menos 10% y si la perturbación es de ± 5 en las tres velocidades del vehículo, la señal de referencia para la velocidad de todos los motores cambia en $\pm 5\%$ para dos motor y en $\pm 15\%$ para un motor.

Lo anterior, es un problema, para los modos de operación correspondientes a los movimientos en diagonal cuando dos motores no están activos, puesto que si se presenta una perturbación, el controlador cambiará la señal de referencia para estos motores que estaban en 0.0 a 2.5%, y los motores BLDC disponibles no pueden moverse al 2.5% de la velocidad máxima.

Al momento de construir las plataformas, debe tenerse presente las limitaciones en potencia, conocer el comportamiento dinámico y cinemático de los cuatro motores, de tal manera que el esfuerzo de control sea realizable.

Lo anterior implica, calcular para los cuatro motores la función de transferencia para los dos sentidos de giro (horario y anti horario) y medir la máxima velocidad de giro. De tal forma, que la referencia para la velocidad máxima de los motores que entregue el controlador sea la menor de las ocho posibles referencias (cuatro motores, dos sentidos de giro), teniendo presente que debe permitir un sobre impulso en la velocidad de referencia del 10%.

Dado que el análisis realizado en las simulaciones solo tiene en cuenta el modelo cinemático y considera el subsistema control-motor-transmisión-rueda como un sistema lineal y sin retardos, los parámetros de la arquitectura de control PID deben recalcularse, reemplazando este subsistema en el modelo por la función de transferencia obtenido por el proceso de caracterización que se describe más adelante.

La fase 2 consiste en construir el controlador y dos plataformas con diferentes requerimientos de potencia mecánica y por lo tanto distintos componentes: motor-transmisión-ruedas, así como la respectiva programación para luego ser probadas en la fase 3.

4 Fase dos: Desarrollo de la arquitectura de control

La arquitectura de control está compuesta por cuatro controles que pueden operar en lazo abierto; o en lazo cerrado con retroalimentación de la velocidad angular de los motores utilizando un algoritmo de control PID, para controlar la velocidad angular de cada rueda. Este controlador debe integrarse con los controles de los motores BLDC. Como se ilustra en la Figura 19.

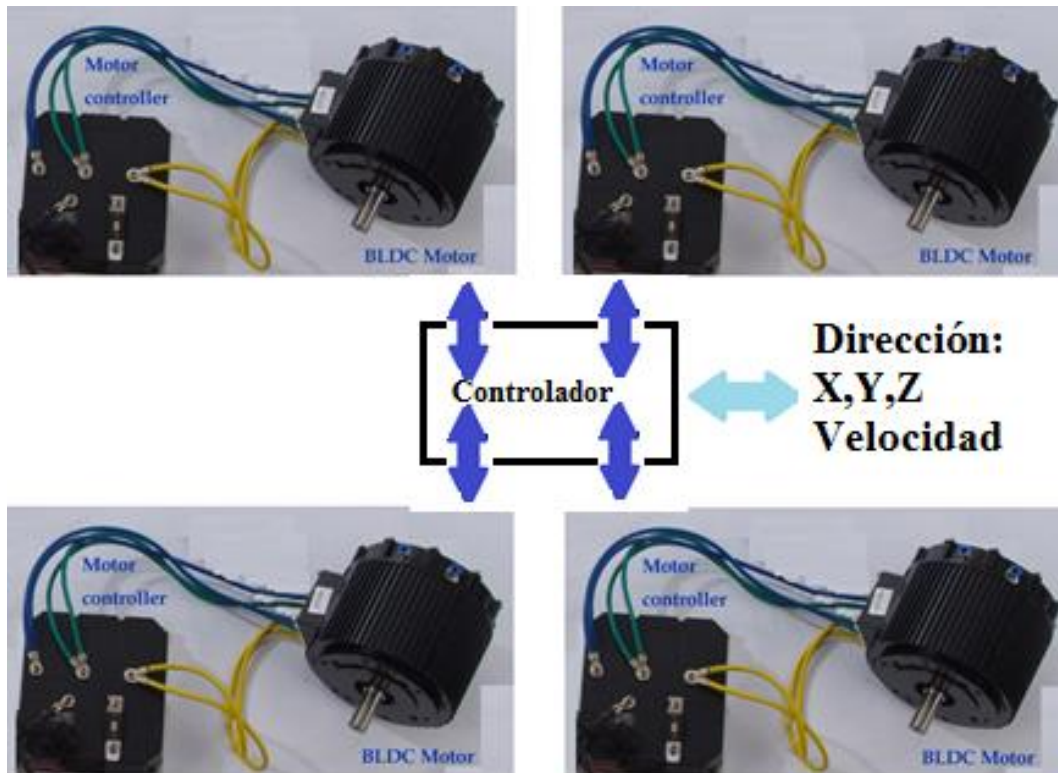


Figura 19. Arquitectura de control

El controlador tiene:

Entradas:

- Señal para las direcciones de movimiento del vehículo en X, Y y Z.
- Señal de velocidad de referencia para el vehículo.
- Señal de los sensores para determinar la velocidad angular de las ruedas.
- Señal para activación o desactivación de la operación en lazo cerrado.

Salidas:

- Señal de referencia para magnitud de la velocidad del control de cada uno de los motores.
- Señal de sentido de giro para el control de cada uno de los motores.

A continuación se explican los principales componentes del controlador utilizado en la plataforma de referencia denominada OMNI2 los cuales se muestran en la Figura 20.



Figura 20. Componentes controlador

4.1 Entradas

4.1.1 Interruptores

El controlador tiene los siguientes interruptores:

- **Interruptor con llave en caja de mandos.** Controla el paso de los 48V DC a la caja de mandos y caja del controlador.
- **Interruptor en caja de mandos.** Controla el paso de los 48V DC a la caja de mandos y caja del controlador.
- **Interruptor en caja del procesador.** Controla el paso de los 48V DC a la caja del controlador.
- Interruptores con llave en las baterías.

El usuario maneja desde la caja de mandos los interruptores 1 y 2. Los interruptores 3 y 4, deben estar normalmente cerrados y no están de fácil acceso al usuario, puesto que solo se manipulan en las revisiones técnicas.

En la Figura 21 se muestran los interruptores 1 y 2 de la caja de mandos.



Figura 21. Interruptores caja de mandos

Si los interruptores 3 y 4 están cerrados, cuando los interruptores 1 y 2 se cierran:

- Se encienden los LEDs indicadores de nivel de carga de las baterías.
- Se alimenta el Arduino y los demás componentes de la caja del controlador.
- Se enciende el primer LEDs indicador de velocidad de referencia.
- Se enciende el LED indicador del PlayStation 2 Controller.
- De esta manera se garantiza que solo quién tiene la llave de la caja de mandos puede encender la plataforma.

4.1.2 Mandos en el PlayStation 2 Controller

Para las entradas de señal para las direcciones de movimiento en X, Y y Z, señal de velocidad de referencia para el vehículo, señal para habilitar paso de alimentación de 48V a los motores, señal para activar control en lazo cerrado se empleará un PlayStation-2-Dualshock-Controller¹⁵ como el que se muestra en la Figura 22, en el que se usará:

- **Botón rosado** □ (1) para activar el paso de la alimentación 48 V a los motores.
- **Joystick izquierdo en X y en Y** (2) para indicar la dirección de avance deseada en X y Y: N/S/E/O o en diagonal: NE/SE/NO/SO o detenido.
- **Joystick derecho en X** (3) para indicar el sentido de giro deseado en Z: horario o anti-horario o detenido.
- **Botón verde** Δ (4) para aumentar la velocidad de referencia del vehículo.
- **Botón azul** X (5) para disminuir la velocidad de referencia del vehículo.
- **Botón rojo** ○ (6) para detener el paso de la alimentación a los motores.
- **Botón derecho R1** (7) para activar el control en operación en lazo cerrado.
- **Botón izquierdo L1** (8) para desactivar el control en operación en lazo cerrado.



Figura 22. Mandos utilizados en el PlayStation 2 Controller

¹⁵ <http://www.amazon.com/PlayStation-2-Dualshock-Controller-Black/dp/B00004YRQ9>

Se eligió este dispositivo, porque es fácil de utilizar, es ergonómico y liviano.

Para que el vehículo se mueva es necesario que el usuario:

- Cierre todos los interruptores.
- Presione el botón rosado.
- Mantenga presionado el joystick correspondiente al tipo de movimiento deseado.

Para que el vehículo se detenga, el usuario debe dejar de presionar los joystick.

Para reiniciar la marcha, el usuario debe nuevamente mantener presionado el joystick correspondiente al tipo de movimiento deseado.

Es posible cambiar la velocidad de referencia con el vehículo detenido o en movimiento.

Otra forma de detener el vehículo, es presionar el botón rojo o abrir cualquiera de los interruptores y así abrir el circuito de potencia que alimenta a los motores. Si el botón rojo es presionado, para poner el vehículo nuevamente en movimiento debe presionarse el botón rosado.

El controlador inicia operación en lazo abierto, si se desea activar la operación en lazo cerrado, el usuario debe presionar el botón R1. Una vez activada la operación en lazo cerrado, si desea desactivar el usuario debe presionar el botón L1.

Para las señales del PlayStation 2 Controller (PS2) se emplean cuatro entradas digitales de Arduino correspondientes a las señales: data, command, attention y clock.

En la Figura 23 se muestran los cables que corresponden a las señales clock, command, attention y data y los que corresponden a la alimentación.

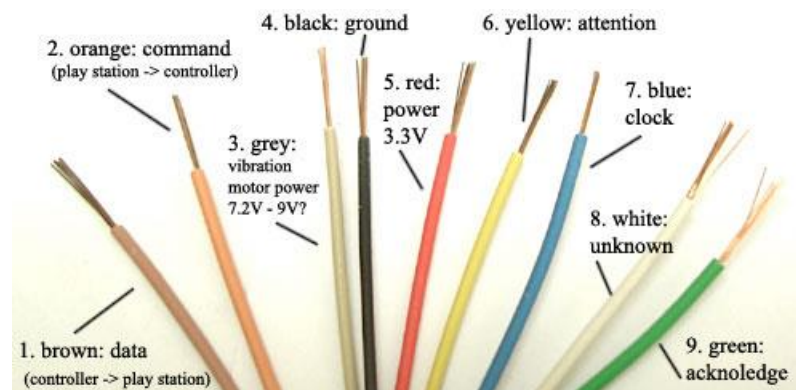


Figura 23¹⁶. Cableado PS2

Se utiliza una resistencia de Pull-up: $R=10K\Omega$ entre la línea de Data y el pin de Arduino, como se muestra en la Figura 24, siendo $V_{cc}=5$ VDC.

¹⁶ <http://www.billporter.info/2011/03/27/arduino-playstation-2-controller-library-troubleshooting-guide/>

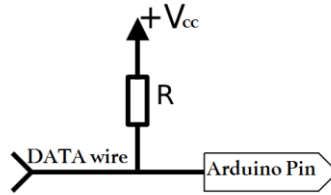


Figura 24. R: Resistencia Pull-Up linea de Data en PS2

4.1.3 Señal velocidad angular de las ruedas

Para determinar la magnitud de la velocidad angular y sentido de giro de una de las ruedas se utiliza un encoder óptico incremental. Se elige este tipo de dispositivo porque solo se requiere conocer la magnitud de la velocidad a la que giran las ruedas y su sentido de giro, no se requiere conocer la posición. Los encoder se alimentan a 5 VDC y deben tener salidas para los canales A y B.

Para no exceder la capacidad de procesamiento del Arduino Mega, que además de recibir y procesar las señales de los cuatro encoder, debe procesar los algoritmos de control PID y dado que el vehículo no estará sometido a perturbaciones de alta frecuencia, ni se requiere alta precisión, se decide acoplar los encoder al sistema de transmisión en el eje de las ruedas y no del motor o seleccionar un encoder de baja resolución.

Se eligen:

Para la plataforma con motores de 60 rpm, encoder Omron con las siguientes especificaciones: pulsos por revolución: 1024, alimentación: 5 – 12 VDC, salidas para los canales A, B y Z.

Para la plataforma con motores de 1450 rpm, encoder Vernitech, referencia 23-100-AQI-PU5-1L1, que tienen las siguientes especificaciones: pulsos por revolución: 100, alimentación: 5 – 12 VDC, salidas para los canales A, B y Z; de los cuales se tiene inventario en los Laboratorios de la Universidad.

En la Figura 25 se muestran ambos encoder.

Para las señales de los canales A y B de cada encoder se emplean entradas digitales de Arduino, de las cuales un debe ser uno de los pines de Arduino que soportan interrupciones externas.



Figura 25. Encoders

El cableado del encoder Vernitech es: Negro: Tierra, Rojo: 5 VDC, Azul: Canal A, Amarillo: Canal B y Naranja: Canal Z. Y del OMRON es: Azul: Tierra, Café: 5 VDC, Negro: Canal A, Blanco: Canal B y Naranja: Canal Z

4.2 Salidas

4.2.1 Indicadores

El usuario tiene los siguientes indicadores:

- **LEDs indicadores de velocidad de referencia.** Están ubicados en la Caja de mandos, Figura 26, son 4 LEDs de color rojo arriba de izquierda a derecha, que se van encendiendo o apagando a medida que se incrementa la velocidad. Si los interruptores están cerrados, siempre debe estar encendido el primer LED de la extrema izquierda, que corresponde a la velocidad de referencia mínima a la cual puede desplazarse el vehículo. Estos LEDs son controlados por salidas digitales del Arduino.
- **LED indicar de activación o desactivación de operación en lazo cerrado.** Está ubicado en la Caja de mandos, Figura 26, es un LED de color rojo arriba en la extrema derecha, que se enciende si se activa la operación en lazo cerrado. Este LED es controlado por una salida digital del Arduino.
- **LEDs indicadores de nivel de carga de las baterías.** Son seis LEDs, que están ubicados en la Caja de mandos, Figura 26. Empezando de izquierda a derecha, el primero, de color verde indica que hay alimentación, el segundo, de color rojo indica bajo nivel de voltaje en las baterías y los siguientes cuatro LEDs de color verde se van apagando a medida que baja el nivel de voltaje de la batería, el primero que se apaga es el de la extrema derecha. Este circuito es independiente del Arduino, se alimenta directamente desde el interruptor de la Caja de mandos y utiliza un comparador de voltaje. Si el LED rojo se enciende los motores de la plataforma no funcionarían y el usuario debe poner a cargar las baterías. Si solo queda un LED encendido, el usuario debe llevar la plataforma al sitio de recarga y poner a cargar las baterías.



Figura 26. Indicadores caja de mandos

- **LED indicador del PlayStation 2 Controller.** Es un LED de color rojo, que se muestra en la Figura 27 encerrado en un círculo gris y se enciende cuando el Arduino reconoce el PlayStation 2 Controller. Si este LED no se enciende el usuario deberá apagar todo, verificar la conexión entre la caja procesador y el PlayStation 2 Controller.



Figura 27. Indicador PlayStation 2 Controller habilitado

4.2.2 Señal control alimentación circuitos de potencia

Se utiliza una salida digital del Arduino, que a través de un transistor (PN2222A) configurado como interruptor energiza o des-energiza la bobina de un relé de 5 VDC (JQC-3F-1C-5VDC). Al abrir o cerrar este contacto, se controla la energización de la bobina del contactor de 48 VDC 200A (KZJ-48VDC 200A) que abre o cierra el paso de la alimentación a los circuitos de potencia del vehículo.

Para que la salida de Arduino correspondiente cambie de estado y haya alimentación para los circuitos de potencia, es necesario que todos los interruptores estén cerrados y que el usuario haya presionado el botón rosado del PlayStation 2 Controller. Y para que se des-energice se debe presionar el botón rojo o abrir cualquiera de los interruptores.

4.2.3 Señal de referencia velocidad

Se utiliza la función `analogWrite()` de Arduino en una de las salidas PWM, el valor del ciclo de trabajo es calculado por el algoritmo de control, dependiendo de la velocidad deseada y del error en la velocidad angular medida.

La señal PWM pasa por un filtro pasa bajos, luego por un seguidor de voltaje, para obtener un voltaje análogo variable (0-5 VDC) con alta impedancia que se conecta a la entrada de referencia para la velocidad del control del motor BLDC de Golden Motor, referencia BAC-0282P.

4.2.4 Señal de sentido de giro de los motores

Se utiliza una salida digital del Arduino, que energiza la bobina de un relé de 5VDC (SRD-05VDC-SL-C) a través de un optoacoplador (DP-817), contralando así la apertura o cierre de un interruptor del cual un extremo está conectado a tierra y el otro es la señal de entrada de sentido de giro para la entrada de sentido de giro del control del motor BLDC (BAC-0282P). El estado alto o bajo de esta salida es determinado por el programa del Arduino.

En la Figura 28 se muestra el diagrama para las conexiones del control de velocidad del motor que entrega el fabricante.

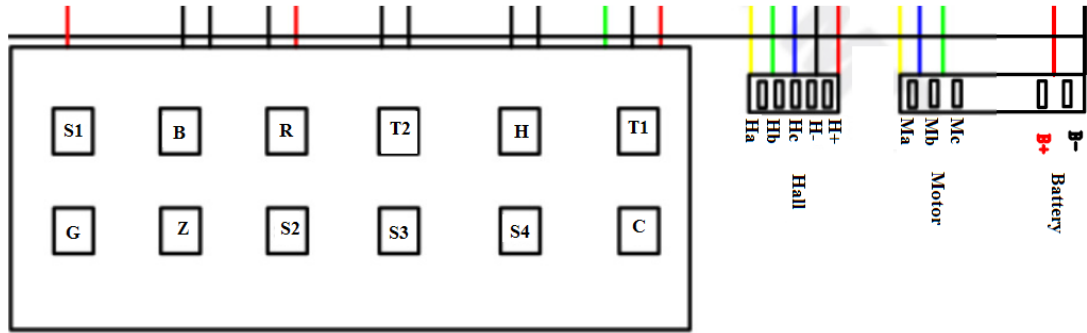


Figura 28. Diagrama de conexiones control BAC-282

De estas terminales se utilizan:

- B+, B-: Entrada alimentación +48 VDC y tierra, respectivamente.
- Ma, Mb, Mb: Salida devanados motor.
- H+, H-: Salida alimentación sensores Hall, +5VDC y tierra, respectivamente.
- Ha, Hb, Hc: Entrada señales sensores Hall.
- R: Entrada señal sentido de giro.
- T2: Entrada señal velocidad de referencia.
- Z: Entrada tierra 0VDC.

4.3 Componentes controlador OMNI2

4.3.1 Caja Procesador

Incluye los siguientes componentes:

4.3.1.1 Procesador

Se elige la plataforma de desarrollo Arduino Mega 2560, que tiene una capacidad de procesamiento suficiente para ejecutar los algoritmos de los cuatro controles PI en lazo cerrado y cuenta con los pines de entrada y salida necesarios.

Además, cumple con uno de los propósitos del proyecto, que es el estimular a los estudiantes de la Universidad EAFIT a que diseñen y construyan productos eléctricos omnidireccionales, puesto que los estudiantes ya conocen esta plataforma [17], la Universidad tiene inventario disponible en los Laboratorios y es un componente de fácil consecución a nivel local.

Las especificaciones del Arduino Mega 2560 son:

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (los limites)	6-20V
Pines de I/O digital	54 (de los cuales 15 proporcionan una salida PWM)
Pines de entrada análoga	16
Corriente DC I/O Pin	40 mA
corriente DC para 3.3V Pin	50 mA
Memoria flash	256 KB de los cuales 8 KB utilizadas por gestor de arranque
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad del cristal	16. MHz

Tabla 16. Ficha técnica Arduino Mega 2560

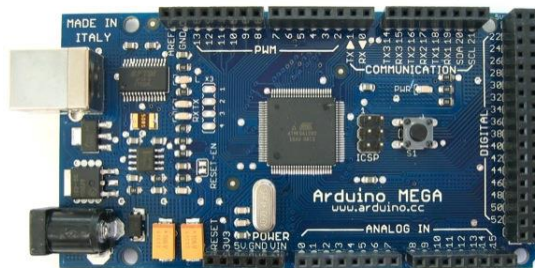


Figura 29. Arduino Mega 2560¹⁷

Pines que soportan interrupciones externas:

Nombre de la Interrupción	Pin Digital	Pin Físico	Utilizado
0	2	6	Canal A Encoder1
1	3	7	Canal A Encoder2
2	21	43	Canal A Encoder4
3	20	44	Canal A Encoder 3
4	19	45	
5	18	46	

Tabla 17. Pines que soportan interrupciones externas

Pines que soportan PWM y pueden utilizarse con la instrucción analogWrite()

Pin digital	Pin físico	Utilizado
4	1	
5	5	Velocidad referencia Motor1
2	6	
3	7	
6	15	Velocidad referencia Motor2

¹⁷ <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>

7	16	
8	17	
9	18	
10	23	
11	24	
12	25	
13	26	
46	38	
45	39	Velocidad referencia Motor4
44	40	Velocidad referencia Motor3

Tabla 18. Pines que pueden utilizar analogWrite()

4.3.1.2 Conversor DC/DC de 48 a 12VDC

Para obtener la alimentación de 12 VDC requerida por el Arduino, se emplea un conversor DC/DC de 48 a 12 VDC 10 A.

(CNX-52, <http://www.electricscooterparts.com>).

4.3.1.3 Fuente de 12 VDC a 5 VDC

Se emplea un regulador de voltaje LM7805 con su correspondiente disipador de calor y condensadores, que entrega la alimentación de 5 VDC para los encoders y para las tarjetas de los relés que controlan sentido de giro. Soporta una corriente máxima de 1 A.

4.3.1.4 Tarjetas relés señal sentido de giro

Son cuatro tarjetas de relés optoacoplados (SRD-OPT-GD)¹⁸ que reciben como entradas las señales de los pines correspondientes a sentido de giro de Arduino, activándose en bajo. Por lo tanto cuando la salida está en bajo, el motor gira en sentido anti-horario y cuando está en alto en sentido horario. De esta manera se controla la apertura o cierre de un interruptor NO (normalmente abierto) del cual un extremo está conectado a tierra y el otro es la señal de entrada de sentido de giro de los controles de los motores. Estas tarjetas incluyen 2 LEDs (verde y rojo) que indican el estado de la señal de entrada.

4.3.1.5 Tarjeta filtro RC, Relé habilita alimentación motores y Borneras distribución

Esta tarjeta tiene 4 filtros pasa bajos RC (R:resistencia variable:20K Ω , C:condensador:1 μ F) y cuatro seguidores de voltaje (utilizando un amplificador operacional LM324N), para convertir las señales PWM (con una frecuencia de 490Hz) correspondientes a las velocidades de referencia de Arduino a cuatro señales de voltaje análogo variable entre 0 y 5 VDC con alta impedancia de salida, que se conectan a las entradas de referencia de velocidad de los controles de los motores BLDC.

¹⁸

http://www.didacticaselctronicas.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=1656&category_id=59&option=com_virtuemart&Itemid=177

Además tiene el circuito de transistor como interruptor que activa el relé que controla la activación de la bobina del contactor que habilita el paso de alimentación a los motores. Incluye también las borneras de distribución para alimentación de los demás componentes del controlador: 0, 5, 12, 48 VDC.

4.3.2 Caja de mandos

4.3.2.1 Tarjeta LEDs indicadores de velocidad y operación en lazo cerrado

Son cinco LEDs alimentados a 5 VDC que se encienden cuando la salida correspondiente de Arduino pasa a bajo.

4.3.2.2 Tarjeta indicadores carga de batería

Tiene como entrada los 48 V DC e incluye seis LEDs, que se encienden o apagan dependiendo del nivel de voltaje de la batería. Estos LEDs pueden estar encendidos aun cuando el interruptor de la Caja Procesador este apagado.

4.3.3 Otros

Bornera de distribución: Tiene 16 terminales, de los cuales ocho se utilizan para la distribución de las conexiones a tierra y los otros ocho para la distribución de los +48 VDC que alimenta a los controles de los motores. Tiene una capacidad de hasta 200 A.

Contactor: Es un contactor cuya bobina se activa a 48 VDC y soporta hasta 200 A por los terminales 1 y 2.

PlayStation-2-Dualshock-Controller.

4.3.4 Conexiones

En la siguiente tabla se muestran las conexiones entre los componentes del controlador.

Contactor	
Terminal	Descripción
1.	Entrada +48VDC viene de las baterías y sirve también para conectar el cable que va al pin 2 conector 4 pines Caja Mandos.
2.	Salida +48 VDC.
A1.	Entrada terminal controlada de la bobina la señal viene del pin 3 del conector 3 pines Caja Procesador.
A2.	Entrada terminal bobina conectado a tierra.
Bornera de distribución Tierra	
Terminal	Descripción
1.	Entrada viene batería 1
2.	Entrada viene batería 2
3.	Salida B- Control Motor 1
4.	Salida B- Control Motor 2
5.	Salida B- Control Motor 3
6.	Salida B- Control Motor 4

7.	Salida Tierra Terminal A2 Contactor y Pin tierra conector 3 pines Caja Procesador	
8.	Salida Tierra Pin tierra conector 4 pines Caja Mandos	
Caja Mandos¹⁹		
Componente	Descripción	
Conector 4 pines	Pin 1	Salida +48 VDC, después de pasar por los dos interruptores en serie y alimentar el circuito indicador de baterías, sale al pin 1 del conector cuatro pines de la Caja Procesador, cable rojo.
	Pin 2	Entrada +48 VDC, viene del terminal A1 del contactor, cable rojo línea negra.
	Pin 3	Entrada Tierra, cable negro.
	Pin 4	Libre.
Conector 6 pines conecta a la Caja Procesador	Pin 1	Entrada +5 VDC, para alimentar los LEDs indicadores de velocidad, cable rojo.
	Pin 2	Entrada LED indicador operación en lazo cerrado, cable café.
	Pin 3	Entrada LED indicador velocidad 3, cable naranja.
	Pin 4	Entrada LED indicador velocidad 2, cable amarillo.
	Pin 5	Entrada LED indicador velocidad 1, cable verde.
	Pin 6	Entrada LED indicador velocidad 0, cable azul.
Caja Procesador⁴		
Componente	Descripción	
Conector 3 pines	Pin 1	Entrada +48 VDC que viene del Pin1 del conector de 4 pines de la Caja de Mandos. La alimentación debe pasar por el interruptor antes de alimentar todos los componentes de la Caja Procesador, cable rojo.
	Pin 2	Entrada Tierra, cable negro.
	Pin 3	Salida +48 VDC para alimentar la bobina del contactor (terminal A1) que habilita el paso de alimentación a los motores en OMNI2, cable naranja.
Conector 7 pines conecta al PS2	Pin 1	Data, cable café.
	Pin 2	Command, cable naranja.
	Pin 3	Clock, cable azul.
	Pin 4	Salida, Tierra, cable negro.
	Pin 5	Salida, +5 VDC, cable rojo.
	Pin 6	Attention, cable amarillo.
	Pin 7	Libre
Conector 6 pines conecta a la Caja Mandos	Pin 1	Salida +5 VDC, para alimentar los LEDs indicadores de velocidad, cable rojo.
	Pin 2	Salida LED indicador operación en lazo cerrado, cable café.
	Pin 3	Salida LED indicador velocidad 3, cable naranja.
	Pin 4	Salida LED indicador velocidad 2, cable amarillo.
	Pin 5	Salida LED indicador velocidad 1, cable verde.
	Pin 6	Salida LED indicador velocidad 0, cable azul.
Conector (1) 4 pines lateral izquierdo,	Pin 1	Salida sentido de giro motor 1, viene tarjeta relé, cable azul.
	Pin 2	Libre, cable verde.
	Pin 3	Salida Tierra, viene tarjeta filtro cable amarillo.

¹⁹ Se indica el color del cable dentro de la caja correspondiente.

conecta al control motor 1	Pin 4	Salida Velocidad referencia motor 1, viene tarjeta filtro borne T1, cable rojo.
Conector (1) 5 pines lateral izquierdo, conecta encoder 1	Pin 1	Libre, cable café.
	Pin 2	Entrada Canal A encoder 1, cable morado.
	Pin 3	Entrada Canal B encoder 1, cable gris.
	Pin 4	Salida Tierra, cable blanco.
	Pin 5	Salida 5 VDC, cable naranja.
Conector (3) 4 pines lateral izquierdo, conecta al control motor 3	Pin 1	Salida Sentido de giro motor 3, viene tarjeta relé, cable azul.
	Pin 2	Libre, cable verde.
	Pin 3	Salida Tierra, cable amarillo.
	Pin 4	Salida Velocidad referencia motor 3, viene tarjeta filtro borne T3, cable rojo.
Conector (3) 5 pines lateral izquierdo, conecta encoder 3	Pin 1	Libre, cable café.
	Pin 2	Entrada Canal A encoder 3, cable morado.
	Pin 3	Entrada Canal B encoder 3, cable gris.
	Pin 4	Salida Tierra, cable blanco.
	Pin 5	Salida 5 VDC, cable naranja.
Conector (2) 4 pines lateral derecho, conecta al control motor 2	Pin 1	Salida Sentido de giro motor 2, viene tarjeta relé, cable azul.
	Pin 2	Libre, cable verde.
	Pin 3	Salida Tierra, cable amarillo.
	Pin 4	Salida Velocidad referencia motor 2, viene tarjeta filtro borne T2, cable rojo.
Conector (2) 5 pines lateral derecho, conecta encoder 2	Pin 1	Libre, cable café.
	Pin 2	Entrada Canal A encoder 2, cable morado.
	Pin 3	Entrada Canal B encoder 2, cable gris.
	Pin 4	Salida Tierra, cable blanco.
	Pin 5	Salida 5 VDC, cable naranja.
Conector (4) 4 pines lateral derecho, conecta al control motor 4	Pin 1	Salida Sentido de giro motor 4, viene tarjeta relé, cable azul.
	Pin 2	Libre, cable verde.
	Pin 3	Salida Tierra, cable amarillo.
	Pin 4	Salida Velocidad referencia motor 4, viene tarjeta filtro borne T4, cable rojo.
Conector (4) 5 pines lateral derecho, conecta encoder 4	Pin 1	Libre, cable café.
	Pin 2	Entrada Canal A encoder 4, cable morado.
	Pin 3	Entrada Canal B encoder 4, cable gris.
	Pin 4	Salida Tierra, cable blanco.
	Pin 5	Salida 5 VDC, cable naranja.
Bornera equipotencial 48 VDC Motores		
Terminal	Descripción	
1.	Entrada viene terminal 2 contactor	
2.	Salida B+ Control Motor 1	
3.	Salida B+ Control Motor 2	
4.	Salida B+ Control Motor 3	
5.	Salida B+ Control Motor 4	

Tabla 19. Conexiones Componentes Controlador OMNI2

En las siguientes tablas se muestran las conexiones de los componentes que están dentro de la Cajas Procesador.

Arduino		
Pin Digital	Utilizado	Descripción
2	Canal A Encoder 1	Cable morado, viene conector encoder.
3	Canal A Encoder 2	Cable morado, viene conector encoder.
4	Sentido giro Motor 1	Cable azul va al relé 1
5	Velocidad referencia Motor 1	Cable azul va a la tarjeta filtro borne E1
6	Velocidad referencia Motor 2	Cable gris va a la tarjeta filtro borne E2
7	Sentido giro Motor 2	Cable gris va al relé 2
8	Canal B Encoder 4	Cable gris, viene conector encoder.
9	Canal B Encoder 1	Cable gris, viene conector encoder.
10	Canal B Encoder 2	Cable gris, viene conector encoder.
11	Canal B Encoder 3	Cable gris, viene conector encoder.
12	Habilita alimentación potencia motores OMNI: GDRIVER	Cable blanco, va tarjeta filtro borne G
20	Canal A Encoder 3	Cable morado, viene conector encoder.
21	Canal A Encoder 4	Cable morado, viene conector encoder.
30	PS2 Clock	Cable azul.
32	PS2 Attention	Cable amarillo.
33	PS2 Data	Cable café.
34	PS2 Command	Cable naranja.
44	Velocidad referencia Motor 3	Cable blanco a la tarjeta filtro E3
45	Velocidad referencia Motor 4	Cable café a la tarjeta filtro E4
46	Sentido giro Motor 4	Cable café al relé 4
47	Sentido giro Motor 3	Cable blanco al relé 3
48	LED Operación en lazo cerrado	Cable café.
50	LED Velocidad 3	Cable naranja.
51	LED Velocidad 2	Cable amarillo.
52	LED Velocidad 1	Cable verde.
53	LED Velocidad 0	Cable azul.
Tarjeta Filtro RC y seguidor voltaje, borneras y control alimentación motores		
Borne	Descripción	
0, Z	Tierra para encoders, tarjetas de relés, controles de motores	
5 V	5 VDC para encoders, tarjetas de relés	
12 VDC	12 VDC que viene del conversor DC/DC para alimentar Arduino y fuente de 5 VDC	
48 VDC	48 VDC	
D:	Entrada de Arduino de la señal para el transistor como interruptor que controla la bobina del relé que a su vez controla la alimentación de bobina contactor, cable blanco.	
G	Salida 48 VDC para la bobina del contactor que habilita alimentación motores, va al Pin 3 del conector de 3 pines, cable naranja.	
E1, E2, E3, E4	Entradas PWM de Arduino señal referencia velocidad, viene de Arduino, cables azul, gris, blanco y café respectivamente	
T1, T2, T3, T4	Salida voltaje señal referencia velocidad, va a los pines 4 de los conectores de cada control de motor, cables rojos	
Tarjetas relé para control sentido de giro		

Borne	Descripción
Vcc	Entrada 5 VDC
GND	Entrada Tierra
IN	Entrada señal activación sentido de giro, viene de los pines correspondientes de Arduino
Polo	Salida señal sentido de giro para el control de los motores
NO	Entrada contacto normalmente abierto. Se conecta a Tierra.
NC	Entrada contacto normalmente cerrado. No se conecta.

Tabla 20. Conexiones entre componentes Caja Procesador

5 Fase dos: Construcción plataformas para pruebas

Se construyen dos plataformas con cuatro ruedas tipo Mecanum con diferentes especificaciones de potencia mecánica.

La plataforma OMNI1 es un modelo a escala, cuya potencia mecánica es inferior al rango definido en el numeral 3 (Selección de arquitectura y tipo de componentes) y no utiliza el tipo de motores, controlador, ni batería indicados. OMNI1 tiene cuatro motores DC con escobillas a 12 VDC.

La plataforma OMNI2 es el prototipo de plataforma de referencia. Sus componentes cumplen con lo definido en el numeral 2.1. OMNI2 utiliza motores BLDC a 48 VDC de 500 Vatios. Esta plataforma permite gracias al controlador para motores BLDC seleccionado, intercambiar los motores por otros de la misma serie pero de potencia diferente (Golden Motor, serie BLT: 500, 650, 800 Vatios), sin que sea necesario cambiar alguno de los componentes del controlador y del sistema de transmisión (si los requerimientos de diseño respecto a velocidad no cambian). Pero, si se aumenta potencia, se debe aumentar la capacidad en amperios hora (AH) de las baterías y cambiar los respectivos fusibles para cada motor.

Con ambas plataformas, se verificará la funcionalidad y adaptabilidad de la arquitectura de control.

Es importante anotar que ninguna de las dos plataformas tiene sistema de suspensión ni frenos mecánicos, pues el objetivo de las mismas es probar la funcionalidad de la arquitectura de control.

Lo anterior implica al momento de hacer las pruebas, que la superficie para los desplazamientos no tenga irregularidades y sea horizontal, pues la plataforma estando detenida en un terreno inclinado podría rodar cuesta abajo.


5.1 Requerimientos de diseño

Requerimientos de diseño Datos	Plataforma OMNI1	Plataforma OMNI2
m: Masa total a mover (Kg)	7	Hasta 400
$V_{\text{en rampa}}$: Velocidad máxima N/S/E/O subiendo una rampa (m/s)	No aplica	No aplica
V: Velocidad máxima N/S/E/O en superficie horizontal (m/s)	1,11	2,78
α : ángulo de la rampa (rad)	No aplica	No aplica
t: Máximo tiempo para acelerar (s)	3	3
C_r : Coeficiente de fricción	0,01	0,01
R: Radio de la rueda (m)	0,0508	0,1016
C_w : Coeficiente de arrastre dinámico	1,5	1,5
δ : Densidad del aire (kgr*m ³)	1,2	1,2

V_{viento} : Velocidad del viento (m/s)	0,86	0,86
A: Area (m ²)	0,04	1
Resultados		
<i>Movimiento uniformemente acelerado en superficie horizontal</i>		
- a: aceleración (m/s ²)	0,37	0,93
- ω_w : velocidad angular en cada rueda (rad/seg)	6,28	27,34
- F_e : Fuerza empuje en el vehículo (N)	3,32	416,55
- F_{ew} : Fuerza empuje en cada rueda (N)	1,18	147,27
- P_w : Potencia en cada rueda (W)	1,31	409,42
- T_w : Par en cada rueda (Nm)	0,06	14,96

Tabla 21. Requerimientos diseño y resultado potencia, par y velocidad angular plataformas OMNI1 y OMNI2

5.2 Especificaciones componentes para cada plataforma

Componente	Plataforma OMNI1	Plataforma OMNI2
Ruedas	<p>VEX Robotics²⁰ Rueda Mecanum Diámetro 4" con 7 rodillos partidos por la mitad</p> 	<p>AndyMark²¹ Ruedas Mecanum AM2118 Diámetro 8" con 12 rodillos con exterior de uretano. Capacidad de carga: 500 lb (226,8Kgr)</p> 
Motores	<p>HOSSEN²² 12V DC 60 RPM 1.88W²³ High Torque Gear Box Electric</p> 	<p>Golden Motor BLDC Motor²⁴ BLT 500 500W 48V 1000rpm</p> 

²⁰ <http://www.vexrobotics.com/276-1447.html>

²¹ <http://www.andymark.com/Mecanum-s/53.htm>

²² <http://www.amazon.com/HOSSEN%C2%AE-Mini-Torque-Electric-Motor/dp/B00BX54O8A>

²³ Para el cálculo de la potencia se parte del dato Par=30Ncm, que aparece en el sitio de Amazon.

²⁴ <http://www.goldenmotor.com/>

Driver	DFrobot ²⁵ 2A Motor Shield For Arduino L298N Two channel, 2A, 7-12V 	Golden Motor BLDC Motor Controller ²⁶ BAC-0282P 48V 30A 
Transmisión	1:1 Piñones en acrílico de 19 dientes 	1:4 Piñón cadena en dos etapas Cada etapa con una relación de 1:2. Cadena 40B. Piñón conductor 9 dientes Piñón conducido 18 dientes 
Chasis	Acrílico	Perfil de aluminio y acero
Dimensiones	43*37*13 mm	1200*775*1000 mm
Baterías	Batería Plomo Acido ²⁷ 6 V/1.2AH Dos conectadas en serie 	Golden Motor ²⁸ LiFePO4 con BMS y cargador 48V/10AH Dos conectadas en paralelo. 

Tabla 22. Componentes plataformas OMNI1 y OMNI2

²⁵

http://www.dfrobot.com/wiki/index.php?title=Arduino_Motor_Shield_%28L298N%29_%28SKU:DRI0009%29

²⁶ <http://www.goldenmotor.com/>

²⁷ http://www.suconel.com/virtual/products-mainmenu-64.html?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=6802010&category_id=81

²⁸ <http://goldenmotor.com/>

A continuación se describen algunas de las especificaciones más relevantes de los componentes utilizados en la plataforma OMNI2.

5.2.1 Baterías LiFePO4 48V/10AH

Considerando que uno de los objetivos del proyecto es construir un control que pueda ser utilizado en los vehículos que diseñen los estudiantes de Ingeniería de Diseño de Producto, se decide trabajar con un nivel de voltaje que cumpla con la clasificación de muy baja tensión para corriente continua.

Se eligen baterías de 48 VDC que soportan una corriente de descarga máxima: 50 A y corriente de descarga continua máxima: 30 A. Dado que se instalan dos baterías en paralelo que deben suministrar la energía para los 4 motores y el sistema de control, se decide limitar en el control de cada motor la corriente máxima continua a 15 A y la máxima pico a 20 A.

Con este tipo de batería se espera una autonomía de 8 Km, lo cual es adecuado considerando que es un prototipo para pruebas del controlador. Si se desea una mayor autonomía o se requiere una mayor potencia mecánica se deben poner más baterías en paralelo.

5.2.2 Control velocidad motor BLDC BAC-0282P de OMNI2

Algunas de las características de este control son:

- Corriente máxima continua: 25 A.
- Corriente máxima pico: 50 A.
- Voltaje: 48 VDC. Se puede programar para trabajar con motores de 24 y 36 VDC
- Soporta marcha adelante y reversa.
- Permite control de velocidad del motor aunque fallen los sensores hall, así como configurar el desfase de los sensores Hall en 60° o 120°.
- Protección contra sobre corriente y contra bajo voltaje.
- Programable desde un PC empleando el software Magic Pie3/Smart Pie Controller Programming, disponible en el sitio web de Golden Motor.

Los parámetros que pueden configurarse son:

- Corriente máxima continua. Depende del punto de trabajo elegido para el motor, como se explicó en la sección 3.4. Se introduce 15A.
- Corriente pico máxima. Depende del punto de trabajo en máxima potencia, como se explicó en la sección 3.4. Se introduce 20 A.
- Tipo de motor: Se selecciona: FWR, BLDC y desfase de sensores Hall: 120°.
- Asistencia por pedal (PAS): Se selecciona LOW y dirección: FWR.
- Aceleración: Hace referencia a la rampa de aceleración de los motores, se elige 35%. De esta manera se garantiza un arranque suave, sin grandes picos de corriente que afectan la vida útil de las baterías, controles y motores
- Voltaje del motor: Se selecciona 48 VDC.
- Velocidad máxima FWR: Se introduce 100%.

- Reversa (REV): Habilita la posibilidad de invertir sentido de giro del motor. Se selecciona habilitado. Puede elegirse si el motor invierte sentido de giro inmediatamente una vez se da la orden de invertir o espera a que el motor se detenga completamente para cambiar sentido de giro. Se selecciona inmediato y así obtener una mejor maniobrabilidad de la plataforma. También se determina la velocidad máxima en reversa introduciendo 100%.
- Sonido: Se selecciona encendido, de esta manera se facilita el proceso de programación.
- Freno: Determina que porcentaje de energía es regenerada durante el frenado. Se selecciona 0%.

En la Figura 30 se muestra la configuración del control BLDC.

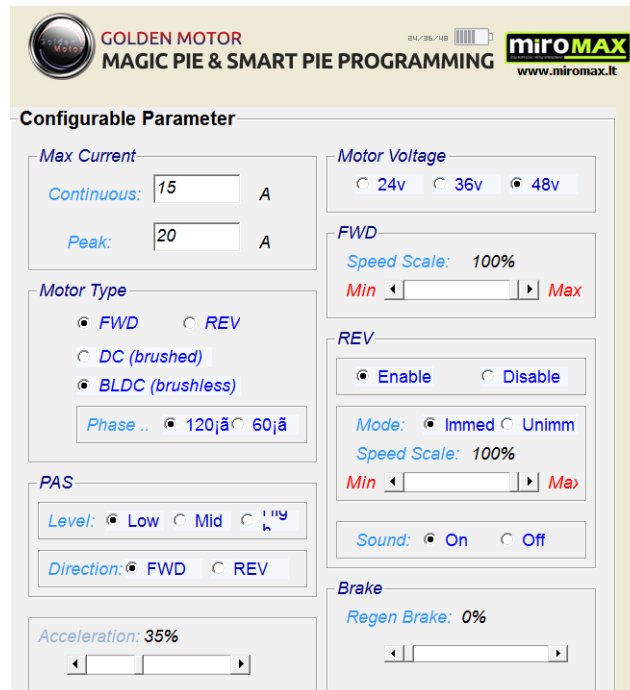


Figura 30. Programador control BLDC

Con este controlador es posible controlar los siguientes motores del fabricante Goldenmotor:

- BLT-500: 48 VDC, 500W, 1000 rpm, 20.4A.
- BLT-650: 48 VDC, 650W, 1000 rpm, 24.6A.
- BLT-800: 48 VDC, 800W, 1000 rpm, 25.5A.

Proporcionando de esta manera versatilidad para adaptarse a diferentes requerimientos de potencia.

A continuación se muestran fotos de ambas plataformas:

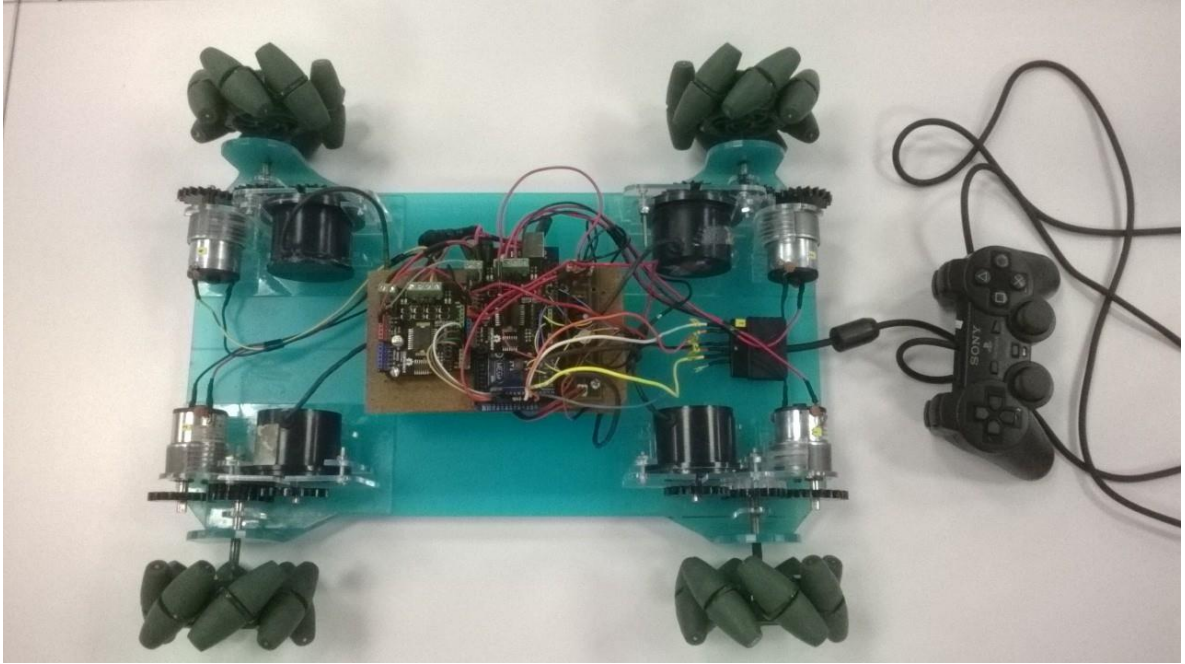


Figura 31. Plataforma OMNI1

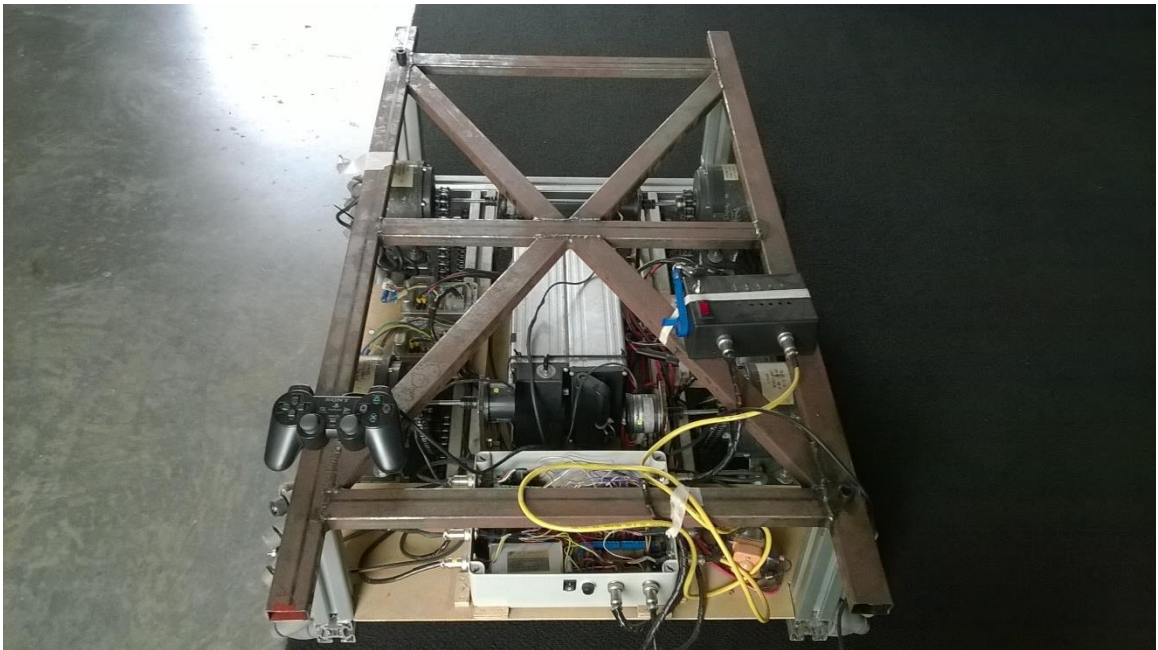


Figura 32. Plataforma OMNI2

6 Fase dos: Programación controlador

Es importante indicar las diferencias de programación entre las plataformas OMNI1 y OMNI2 que obedecen a las diferencias en los elementos constructivos de las plataformas.

Diferencia	OMNI1	OMNI2	Cambios en la programación
Alimentación	12 VDC	48 VDC	En la plataforma OMNI1 no se requiere la variable GDRIVER que permite al Arduino controlar el paso de alimentación de potencia a los motores que es a 48 VDC. Por lo tanto, en OMNI 1 no se emplea el botón rosado ni el rojo de Joystick. Los 12 VDC alimentan a los motores y al Arduino.
Velocidad de referencia vehículo	2	4	Dado que los motores de la plataforma OMNI1 son de baja potencia (1,88W) y velocidad (60 rpm), el usuario no percibe la diferencia en 4 velocidades, con 2 es suficiente.
Potencia nominal motores	1.8 W	500 W	Para evitar grandes picos de corriente cuando hay cambio de sentido de giro de los motores y estos se encuentren en movimiento, se pone un retardo en el programa de Arduino. Lo anterior implica crear en el programa las variables <code>antsignoref</code> y <code>newsignoref</code> para cada motor.

El sistema de coordenadas para las plataformas OMNI1 y OMNI2 es:

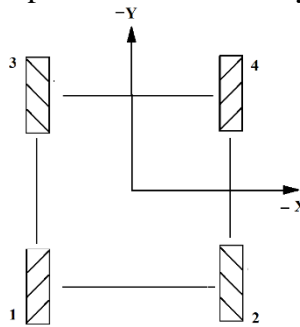


Figura 33. Eje de coordenadas plataformas OMNI

6.1 Librerías utilizadas

6.1.1 Librería para el PlayStation 2 Controller

Para el manejo del PlayStation 2 Controller se utiliza la librería `PS2X_lib.h` que se encuentra disponible en el sitio web <http://www.billporter.info/2011/03/27/arduino-playstation-2-controller-library-troubleshooting-guide/>

- La instrucción `PS2X ps2x;` crea la clase `ps2x` y va en el encabezado del programa.
- La instrucción `ps2x.config_gamepad(30,31,32,33, false, false);` define los pines en este orden: clock, command, attention, data, pressure, rumble. Los pines utilizados son entradas digitales de Arduino que en este caso corresponden a los pines 30, 31, 32 y 33

respectivamente. Esta instrucción debe estar en el setup. Para las plataformas no se emplea la vibración ni detección de presión.

- La instrucción `ps2x.read_gamepad()`; lee el PlayStation 2 Controller.
- La instrucción `ps2x.ButtonPressed(PSB_GREEN)`; utiliza el valor leído del botón verde es presionado, `ps2x.ButtonPressed(PSB_RED)`; detecta si el botón rojo es presionado, `ps2x.ButtonPressed(PSB_PINK)`; detecta si el botón rosado es presionado y `ps2x.ButtonPressed(PSB_BLUE)`; detecta si el botón azul es presionado.
- La instrucción `ps2x.Analog(PSS_LY)`; utiliza lee el valor análogo del joystick izquierdo en Y, `ps2x.Analog(PSS_LX)`; lee el valor análogo del joystick izquierdo en X y `ps2x.Analog(PSS_RX)`; lee el valor análogo del joystick derecho en X.

6.1.2 Librería para la lectura de los encoder

Para la lectura de los encoder se emplea la librería `encoder.h` que se encuentra disponible en el sitio web: https://www.pjrc.com/teensy/td_libs_Encoder.html.

- La instrucción `Encoder Enc1(2,9)`; crea el objeto `Enc1` que utiliza las entradas 2 y 9 para leer los canales A y B correspondientes al encoder 1 y así respectivamente para los otros tres encoders.
- Se recomienda que el primer pin, que en el caso del encoder 1 es el pin 2, permita interrupciones externas.
- La instrucción `attachInterrupt (0,Encoder1,CHANGE)`; indica cuando se activa la interrupción 0, que ejecuta la función `Encoder1`. El caso del encoder 1, sucede cuando se presenta un cambio de estado en el pin 2.
- La instrucción `Enc1.read()`; retorna el valor de la posición acumulada en el encoder 1.

6.2 Programa controlador

A continuación se explican algunas variables y secciones del programa. En el anexo dos se encuentra el código completo del programa.

6.2.1 Activación alimentación potencia motores

La variable `GDRIVER` maneja la señal de alimentación de la bobina de un contactor que permite o no el paso de energía a los controladores de los motores BLDC, esta variable depende de los botones rojo y rosado del PS2.

El programa inicia con la variable `GDRIVER` en 0, es decir no hay alimentación de potencia a los motores.

A continuación se muestra la sección del programa correspondiente al manejo de `GDRIVER`.

En el setup: <code>digitalWrite(GDRIVER,0);</code>
--

En el loop principal:

```
//para permitir el paso de la alimentación a los motores debe presionarse el boton rosado del PS2
if(ps2x.ButtonPressed(P SB_PINK)) { digitalWrite(GDRIVER,1); }
//para detener el paso de la alimentación a los motores debe presionarse el boton rojo del PS2
if(ps2x.ButtonPressed(P SB_RED)) { digitalWrite(GDRIVER,0); }
```

6.2.2 Medición y cálculo velocidad de los motores

La velocidad de los motores se determina al dividir la diferencia del conteo de pulsos entregados por el encoder, sobre la diferencia en el tiempo transcurrido: $\text{deltapulso} = \text{nuevapulos} - \text{anterior}$ y $\text{deltatiempo} = \text{tiempounuevo} - \text{tiempoviejo}$.

Para el cálculo se debe conocer la cantidad de pulsos que el encoder genera por cada revolución del motor. Los encoder de OMNI1 generan 1024 ppr (pulsos por revolución) y los de OMNI2 generan 100 ppr y en ambas plataformas los encoder están acoplados directamente al eje de cada motor.

La interrupción que utilizan los encoder (*attachInterrupt*) se configura en modo change. Esto implica que la función (*Encoder*) con la cual se actualiza el contador de posición (*nuevapulos*) y la variable de tiempo (*tiempounuevo*), se ejecuta cada vez que se presente un cambio de flanco en el pin correspondiente, generando un incremento en el contador de posición igual a 1024×4 para OMNI1 y a 100×4 para OMNI2 por cada revolución.

Dado que la velocidad debe entregarse en rpm (revoluciones por minuto) y la variable de tiempo está en milisegundos, se deben pasar los milisegundos a minutos.

Finalmente el valor de velocidad medida debe dividirse por la cantidad de pulsos por revolución (4096 pulsos para OMNI1 y 400 pulsos para OMNI2) y multiplicarse por 60000 milisegundos, factor que se denomina *res*. Para OMNI1: $\text{res} = \text{res1} = 60.000/4096 = 14.65$ y para OMNI2: $\text{res} = \text{res2} = 60.000/400 = 150$

El usuario debe cambiar el valor de *res* si utiliza un encoder con un número de pulsos por revolución diferente o si cambia la forma como la acopla al sistema de transmisión de potencia, de tal manera que el dato que entregue la función *Velpro* sea la velocidad del eje del motor.

Con el fin de detectar cuando el motor está en movimiento y cuando está detenido, se establece que si el valor de posición no ha cambiado ($\text{nuevapulos1} == \text{anterior1}$) y el valor de *tiempounuevo* no ha cambiado en los últimos 200ms ($\text{now1} > (\text{tiempounuevo1} + 200)$) el motor está detenido. La variable *now1* se actualiza antes de llamar la función *Velpro*.

A continuación se muestran las secciones del programa donde se mide y calcula la velocidad del motor:

En el setup:

```
attachInterrupt (0,Encoder1,CHANGE);
```

Y se inicializan todas las variables.

En el loop principal:

```
now1 = millis();  
Velpro1();  
Velpro2();  
Velpro3();  
Velpro4();
```

Funciones:

```
void Encoder1()  
{  
  nuevapos1 = Enc1.read();  
  tiempnuevo1=millis();  
}  
void Velpro1()  
{  
  if (nuevapos1 != anterior1 && tiempnuevo1 != tiempviejo1)  
  {  
    deltapulso1 = ((nuevapos1 - anterior1));  
    deltatiempo1 = (tiempnuevo1 - tiempviejo1);  
    anterior1 = nuevapos1;  
    tiempviejo1 = tiempnuevo1;  
    vel1 = ((deltapulso1*res)/deltatiempo1);  
    vella = abs(vel1);  
  }  
  else { if (nuevapos1 == anterior1 && now1> (tiempnuevo1+200)) { vella=0; } }  
  if(vella >= wMax) { vella = wMax; }  
  if(vella <= 0) { vella = 0; }  
}
```

Las funciones Encoder1() y Velpro1 son iguales con cambio de variables para los encoder 2, 3 y 4.

6.2.3 Determinación de la velocidad de referencia para cada motor

La velocidad de referencia para cada motor esta determinada por la velocidad de referencia elegida para la plataforma que depende de los botones verde y azul y de la dirección de desplazamiento deseada que depende de la señal de los joystick izquierdo y derecho.

6.2.3.1 Velocidad de referencia plataforma

En la plataforma OMNI1 se tienen 2 posibles velocidades para el desplazamiento: *wrefrpm11*, *wrefrpm21*.

En la plataforma OMNI2 se tienen 4 posibles velocidades para el desplazamiento: *wrefrpm12*, *wrefrpm32*, *wrefrpm32*, *wrefrpm42*.

Estas velocidades las determina el usuario y se programan en el setup, están dadas en rpm. El programa inicia con la velocidad mas baja.

Para el caso de OMNI1 las velocidades elegidas son:

1. 45 rpm en la salida del motor equivale a una velocidad de la plataforma de 0,24 m/s (0,86 Km/h).
2. 50 rpm en la salida del motor equivale a una velocidad de la plataforma de 0,27 m/s (0,96 Km/h).

Para el caso de OMNI2 las velocidades elegidas son:

1. 400 rpm en la salida del motor equivale a una velocidad de la plataforma de 1,06 m/s (3,8 Km/h).
2. 470 rpm en la salida del motor equivale a una velocidad de la plataforma de 1,25 m/s (4,5 Km/h).
3. 783 rpm en la salida del motor equivale a una velocidad de la plataforma de 2,08 m/s (7,5 Km/h).
4. 1044 rpm en la salida del motor equivale a una velocidad de la plataforma de 2,78 m/s (10 Km/h).

A continuación se muestran las secciones del programa donde convierte la señal de los botones verde y azul del joystick en la señal de velocidad de referencia de la plataforma y se encienden o apagan los respectivos leds indicadores de velocidad.

En el setup:

```
wrefrpm1 = 45;
wrefrpm2 = 50;
wrefrpm12 = 400;
wrefrpm22 = 470;
wrefrpm32 = 783;
wrefrpm42 = 1044;
Y se inicializan todas las variables.
```

En el loop principal:

```
//para seleccionar velocidad y manejo de los LEDs indicadores
if (OMNI == 1)
{
  //si se presiona el boton verde aumenta la velocidad de referencia y se enciende el led 0
  if(ps2x.ButtonPressed(PSB_GREEN))
  {
    velrefj=velrefj+1;
    if(velrefj==2) { velrefj=1; }
    digitalWrite(LEDVEL0,1);
    digitalWrite(LEDVEL1,0);
    digitalWrite(LEDVEL2,0);
    digitalWrite(LEDVEL3,0);
  }
  //si se presiona el boton azul disminuye la velocidad de referencia y se apaga el led 0
  if(ps2x.ButtonPressed(PSB_BLUE))
  {
    digitalWrite(LEDVEL0,0);
    digitalWrite(LEDVEL1,0);
    digitalWrite(LEDVEL2,0);
  }
}
```

```

digitalWrite(LEDVEL3,0);
if(velrefj==0) { velrefj=0; }
else { velrefj=velrefj-1;}
}
//equivalente en valor pwm de la velocidad de referencia
if (velrefj==0) { wrefrpm=wrefrpm11; }
if (velrefj==1) { wrefrpm=wrefrpm21; }
}
if (OMNI == 2)
{
//para ajustar la velocidad de referencia aumentando
if(ps2x.ButtonPressed(PSB_GREEN))
{
velrefj=velrefj+1;
if(velrefj==4) { velrefj=3; }
}
//para ajustar la velocidad de referencia disminuyendo
if(ps2x.ButtonPressed(PSB_BLUE))
{
if(velrefj==0) { velrefj=0; }
else { velrefj=velrefj-1;}
}
if (velrefj==0) { wrefrpm=wrefrpm12; }
if (velrefj==1) { wrefrpm=wrefrpm22; }
if (velrefj==2) { wrefrpm=wrefrpm32; }
if (velrefj==3) { wrefrpm=wrefrpm42; }
//para manejo de los LEDs indicadores de velocidad
if(wrefrpm==wrefrpm42)
{
digitalWrite(LEDVEL0,0);
digitalWrite(LEDVEL1,0);
digitalWrite(LEDVEL2,0);
digitalWrite(LEDVEL3,0);
}
if(wrefrpm==wrefrpm32)
{
digitalWrite(LEDVEL0,0);
digitalWrite(LEDVEL1,0);
digitalWrite(LEDVEL2,0);
digitalWrite(LEDVEL3,1);
}
if(wrefrpm==wrefrpm22)
{
digitalWrite(LEDVEL0,0);
digitalWrite(LEDVEL1,0);
digitalWrite(LEDVEL2,1);
digitalWrite(LEDVEL3,1);
}
if(wrefrpm==wrefrpm12)
{
digitalWrite(LEDVEL0,0);

```

```

digitalWrite(LEDVEL1,1);
digitalWrite(LEDVEL2,1);
digitalWrite(LEDVEL3,1);
}
}

```

6.2.3.2 Velocidad de referencia motor

Depende de la velocidad de referencia de la plataforma y se determina usando las funciones: *JoyVehXY()*, *JoyVehZ* y *VehMot*.

Primero se debe calcular la velocidad de referencia en X, Y y Z, para ello se debe considerar la señal de los joystick izquierdo y derecho del PS2.

Con la *JoyVehXY* se convierte la señal previamente escalada entre 0 y 100 del joystick izquierdo a las velocidades de referencia en X y Y, y en *JoyVehZ* se convierte la señal previamente escalada entre 0 y 100 del joystick izquierdo a la velocidad de referencia en Z, teniendo en cuenta:

JIX	JIY	JDX	Peso X	Peso Y	Peso Z
0 <= JIX < 33	0 <= JIY < 33	-	-1	+1	-
0 <= JIX < 33	33 <= JIY < 66	-	-2	0	-
0 <= JIX < 33	66 <= JIY <= 100	-	-1	-1	-
33 <= JIX < 66	0 <= JIY < 33	-	0	2	-
33 <= JIX < 66	33 <= JIY < 66	-	0	0	-
33 <= JIX < 66	66 <= JIY <= 100	-	0	-2	-
66 <= JIX <= 100	0 <= JIY < 33	-	+1	+1	-
66 <= JIX <= 100	33 <= JIY < 66	-	+2	0	-
66 <= JIX <= 100	66 <= JIY <= 100	-	1	-1	-
-	-	JDX < 33	-	-	+1
-	-	33 <= JDX <= 66	-	-	0
-	-	JDX > 66	-	-	-1

Siendo: velocidad en X (V_X) igual al producto del $PesoX$ por la velocidad de referencia de la plataforma ($wrefrpm$), velocidad en Y (V_Y) igual al producto del $PesoY$ por la velocidad de referencia de la plataforma y velocidad en Z (V_Z) igual al producto del $PesoZ$ por la velocidad de referencia de la plataforma.

Luego en VehMot se calcula el valor absoluto de la velocidad de referencia para cada uno de los cuatro motores ($wrefa$), aplicando las fórmulas del modelo cinemático, que son:

$$\begin{aligned}wref1 &= (velrefY + velrefX + ((largo + ancho) * velrefZ)) \\wref2 &= (velrefY - velrefX - ((largo + ancho) * velrefZ)) \\wref3 &= (velrefY - velrefX + ((largo + ancho) * velrefZ)) \\wref4 &= (velrefY + velrefX - ((largo + ancho) * velrefZ))\end{aligned}$$

Y se determina el sentido de giro, definido con la variable `newsignoref`. Debe observarse que para los casos en que la velocidad de referencia del motor ($wref$) es cero, el valor de la variable de sentido de giro no se actualiza, $newsignoref = antsignoref$. Esto se hace con el objetivo de no generar un retardo cuando el vehículo se está desplazando en una dirección, se detiene y reinicia el desplazamiento en la misma dirección.

Pero cuando el vehículo se está desplazando en una dirección y se quiere cambiar de dirección, lo cual implica necesariamente cambio de sentido de giro en uno o mas de los motores, se debe introducir un retardo en la señal de velocidad de referencia con el fin de evitar operaciones erróneas del motor y por consiguiente en la dirección de desplazamiento de la plataforma.

Es importante anotar que si la velocidad de referencia es positiva: en los motores 1 y 3, la variable de sentido de giro (`newsignoref`) es 0 y en los motores 2 y 4, es 1.

A continuación se muestran las secciones del programa donde se determinan las velocidades de referencia para cada motor.

```
En el setup:
Se inicializan todas las variables.

En el loop principal:
//lee los valores de los joystick de PS2 y determina las velocidades de cada motor
JIY=map((ps2x.Analog(PSS_LY)),0,255,0,100);
JIX=map((ps2x.Analog(PSS_LX)),0,255,0,100);
JDX=map((ps2x.Analog(PSS_RX)),0,255,0,100);
JoyVehXY(); //Devuelve velrefX y velrefY
JoyVehZ(); //Devuelve velrefZ
VehMot(); //Devuelve wref(1,2,3,4) y newsignoref(1,2,3,4)

Funciones:
//Función para convertir JoyStick izquierdo a velocidad de vehiculo en X y Y
void JoyVehXY()
{
  if((JIX >= 0 && JIX < 33) && (JIY >=0 && JIY < 33)) //Region suroeste
```

```

{
  pesoX=-1;
  pesoY=1;
}
if((JIX >= 0 && JIX < 33) && (JIY >= 33 && JIY < 66)) //Region oeste
{
  pesoX=-2;
  pesoY=0;
}
if((JIX >= 0 && JIX < 33) && (JIY > 66 && JIY <= 100)) //Region noroeste
{
  pesoX=-1;
  pesoY=-1;
}
if((JIX >= 33 && JIX < 66) && (JIY >= 0 && JIY < 33)) //Region sur
{
  pesoX=0;
  pesoY=2;
}
if((JIX >= 33 && JIX < 66) && (JIY >= 33 && JIY < 66)) //Region detenido
{
  pesoX=0;
  pesoY=0;
}
if((JIX >= 33 && JIX < 66) && (JIY > 66 && JIY <= 100)) //Region norte
{
  pesoX=0;
  pesoY=-2;
}
if((JIX > 66 && JIX <= 100) && (JIY >= 0 && JIY < 33)) //Region sureste
{
  pesoX=1;
  pesoY=1;
}
if((JIX > 66 && JIX <= 100) && (JIY >= 33 && JIY < 66)) //Region este
{
  pesoX=2;
  pesoY=0;
}
if((JIX > 66 && JIX <= 100) && (JIY > 66 && JIY <= 100)) //Region
noreste
{
  pesoX=1;
  pesoY=-1;
}
velrefX = -(wrefrpm) * pesoX * 0.5;
velrefY = wrefrpm * pesoY * 0.5;
}
//Función para convertir JoyStick derecho a velocidad de vehiculo en Z
void JoyVehZ()
{

```

```

if (JDX < 33) { pesoZ=1; }
if ((JDX >= 33) && (JDX <= 66)) { pesoZ=0; }
if (JDX > 66) { pesoZ=-1; }
velrefZ = wrefrpm * pesoZ;
}
//Función para convertir velocidad de vehiculo a velocidades de motores
void VehMot()
{
//Entrega la velocidad de referencia para el motor 1
wref1 = (velrefY + velrefX + ((largo + ancho) * velrefZ));
if (wref1 == 0) { wref1a = 0; newsignoref1 = antsignoref1; }
else
{
wref1a = abs(wref1);
if (wref1a == wref1) { newsignoref1 = 0; }
else { newsignoref1 = 1; }
}
//Entrega la velocidad de referencia para el motor 2
wref2 = (velrefY - velrefX - ((largo + ancho) * velrefZ));
if (wref2 == 0) { wref2a = 0; newsignoref2 = antsignoref2; }
else
{
wref2a = abs(wref2);
if (wref2a == wref2) { newsignoref2 = 1; }
else { newsignoref2 = 0; }
}
//Entrega la velocidad de referencia para el motor 3
wref3 = (velrefY - velrefX + ((largo + ancho) * velrefZ));
if (wref3 == 0) { wref3a = 0; newsignoref3 = antsignoref3; }
else
{
wref3a = abs(wref3);
if (wref3a == wref3) { newsignoref3 = 0; }
else { newsignoref3 = 1; }
}
//Entrega la velocidad de referencia para el motor 4
wref4 = (velrefY + velrefX - ((largo + ancho) * velrefZ));
if (wref4 == 0) { wref4a = 0; newsignoref4 = antsignoref4; }
else
{
wref4a = abs(wref4);
if (wref4a == wref4) { newsignoref4 = 1; }
else { newsignoref4 = 0; }
}
}

```

6.2.4 Control en lazo cerrado o lazo abierto

Para elaborar el código correspondiente se tienen en cuenta las recomendaciones de Brett Beauregard [18] en su documento de mejoras al PID de principiantes.

El usuario puede elegir si desea trabajar en modo lazo cerrado o abierto, presionando los botones R1 y L1 del PS2 respectivamente.

El programa al iniciar arranca en el modo de operación lazo abierto.

El PID se calcula con un intervalo de tiempo regular que está determinado por la variable *SampleTime0*, la cual puede ser modificada en el setup. En este caso se elige un *SampleTime0* igual al 200ms.

A continuación se muestra la sección del programa donde se define el intervalo de tiempo para calcular el PID, así como otras instrucciones:

```
now0 = millis();
timeChange0 = (now0-lastTime0);
if (timeChange0 >= SampleTime0)
{
```

Dado que el intervalo de cómputo del PID es siempre el mismo, al iniciar el loop se ajustan los parámetros *ki* y *kd*, así:

$$ki = ki * SampleTime0$$

$$kd = kd / SampleTime$$

El término integral (*ITerm*) es igual al *ITerm* anterior más el producto de *ki * error*, siendo *error* igual a la diferencia entre la velocidad de referencia y la velocidad medida (*error = wref - vela*). Para evitar el fenómeno “derivative kick” causado por cambios en el setpoint, se utiliza en lugar de la derivada de la salida, el valor negativo de la derivada de la entrada. Por lo tanto el término derivativo (*dwrefa*) es igual a la diferencia entre el valor actual de la velocidad de referencia y el valor anterior (*wrefa - lastwrefa*). Observese que no es necesario multiplicar o dividir estos términos por el intervalo de tiempo.

Dadas las limitaciones de velocidad máxima del motor, se limita el valor del término integral entre 0 y la velocidad máxima. Siendo la velocidad máxima (*wMax*) la menor de las cuatro velocidades máximas a la cual las cuatro ruedas giran cuando la plataforma está en el aire y la velocidad mínima (*wMin*) la velocidad más baja en la cual las cuatro ruedas giran cuando la plataforma está en el aire.

En la opción de control lazo cerrado de OMNI2, al resultado del PID (*w*) se le suma la velocidad de referencia absoluta (*wrefa*). $w1 = wref1a + w1$. Y este resultado se limita en un rango entre 0.85 y 1,15 de la velocidad de referencia.

- Valor mínimo (*Liminf*): 85% de la velocidad de referencia absoluta (*wrefa*). $Liminf = wrefa * 85 / 100$.
- Valor máximo (*Limsup*): 115% de la velocidad de referencia (*wrefa*). $Limsup = wrefa * 115 / 100$.

A continuación se muestran las líneas de código correspondientes.

```

//Funciones para calcular el PID de cada motor
void Compute1()
{
  if(inAuto == false) return; //si esta en modo manual se devuelve al loop principal
  error1 = (wref1a - vell1a);
  Liminf = wref1a*85/100;
  Limsup = wref1a*115/100;
  dwref1a = (wref1a - lastwref1a);
  if (newsignoref1 == 0)
  {
    ITermN1 += (ki1N * error1);
    if (ITermN1 > wMax) { ITermN1 = wMax; }
    if (ITermN1 < 0) { ITermN1 = 0; }
    w1 = kp1N * error1 + ITermN1 - kd1N * dwref1a;
  }
  else
  {
    ITermS1 += (ki1S * error1);
    if (ITermS1 > wMax) { ITermS1 = wMax; }
    if (ITermS1 < 0) { ITermS1 = 0; }
    w1 = kp1S * error1 + ITermS1 - kd1S * dwref1a;
  }
  w1 = wref1a + w1;
  if (w1 > Limsup) { w1 = Limsup; }
  if (w1 < Liminf) { w1 = Liminf; }
  lastwref1a = wref1a;
}

```

En OMNI1, se cambian los límites para la salida del PID, por:

- Valor mínimo (*Liminf*): Diferencia entre la velocidad mínima (*wMin*) y la velocidad de referencia absoluta (*wrefa*), que será un valor negativo. $Liminf = wMin - wrefa$.
- Valor máximo (*Limsup*): Diferencia entre la velocidad máxima (*wMax*) y y la velocidad de referencia (*wrefa*). $Limsup = wMax - wrefa$.

Luego al resultado (*w*) se le suma la velocidad de referencia absoluta (*wrefa*).

A continuación se muestra una sección del programa con estos cálculos:

```

//Funciones para calcular el PID de cada motor
void Compute1()
{
  if(inAuto == false) return; //Si está en modo manual se devuelve al loop principal
  error1 = (wref1a - vell1a);
  Liminf = wMin - wref1a;
  Limsup = wMax - wref1a;
  dwref1a = (wref1a - lastwref1a);
  if (newsignoref1 == 0)
  {
    ITermN1 += (ki1N * error1);

```

```

if (ITermN1 > wMax) { ITermN1 = wMax; }
if (ITermN1 < 0) { ITermN1 = 0; }
w1 = kp1N * error1 + ITermN1 - kd1N * dwref1a;
}
else
{
ITermS1 += (ki1S * error1);
if (ITermS1 > wMax) { ITermS1 = wMax; }
if (ITermS1 < 0) { ITermS1 = 0; }
w1 = kp1S * error1 + ITermS1 - kd1S * dwref1a;
}
if (w1 > Limsup) { w1 = Limsup; }
if (w1 < Liminf) { w1 = Liminf; }
w1 = wref1a + w1;
lastwref1a = wref1a;
}

```

Si se presiona el botón R1 y estaba en modo de operación lazo abierto, se inicializa el loop PID para cada motor y se enciende el led indicador de modo de operación lazo cerrado.

En la inicialización, para evitar cambios bruscos en la salida del PID se deben manipular los términos integral y derivado que son los que tienen en cuenta los valores anteriores de la salida. El término integral se hace igual al valor de la última salida del PID y el derivativo se hace igual al valor de la velocidad de referencia.

A continuación se muestra la sección del programa correspondiente:

```

En el loop principal:
//para activar el PID
if(ps2x.ButtonPressed(PSB_R1))
{
lazocerrado = 1;
newAuto = AUTOMATIC;
if(newAuto != inAuto)
{
IniciePID1();
IniciePID2();
IniciePID3();
IniciePID4();
}
inAuto = newAuto;
if ( OMNI == 1 ) { digitalWrite(LEDPID,1); }
if ( OMNI == 2 ) { digitalWrite(LEDPID,0); }
}
//para desactivar el PID
if(ps2x.ButtonPressed(PSB_L1))
{
lazocerrado = 0;
inAuto = MANUAL;
if ( OMNI == 1 ) { digitalWrite(LEDPID,0); }
}

```

```

if ( OMNI == 2 ) { digitalWrite(LEDPID,1); }
}
}

```

Y también en el loop principal:

```

if(lazocerrado == 1)
{
  if(wref1a == 0)
  {
    w1 = 0;
    ITermN1 = 0;
    ITermS1 = 0;
    lastwref1a = 0;
    newwsalida1pwm = 0;
  }
  else
  {
    Compute1();
  }
}

```

Función:

//Funcion para iniciar el PID

```

void IniciePID1()
{
  lastwref1a = wref1a;
  ITermN1 = w1;
  ITermS1 = w1;
  if(ITermN1>wMax) { ITermN1 = wMax; }
  if(ITermS1>wMax) { ITermS1 = wMax; }
  if(ITermN1<0) { ITermN1 = 0; }
  if(ITermS1<0) { ITermS1 = 0; }
}

```

Es importante anotar que cuando la velocidad de referencia es 0, los términos integral y derivativo, así como la salida del PID se igualan a 0.

6.2.5 Señal de salida pwm para velocidad de los motores

La velocidad de referencia (w_{refa}), así como la velocidad de salida del PID (w) están dadas en rpm y deben escalarse para obtener el valor de la salida para el pwm ($newsalida_{pwm}$), que determina el voltaje de salida del controlador al control del motor BLDC.

Los valores de velocidad máximo y mínimo en rpm está determinadas por las variables: w_{Max} (rpm): velocidad máxima a la cual gira el motor y w_{Min} (rpm): velocidad mínima a la cual el motor gira antes de detenerse.

Y deben escalarse entre: el $Limsuppwm$: el valor de la salida pwm correspondiente a la w_{Max} y $Liminfpwm$: el valor de la salida pwm correspondiente a la w_{Min} .

Debe observarse que el valor del Límite superior para el pwm en OMNI2 no puede ser 255, debido a una característica del controlador utilizado para los motores BLDC, que limita el voltaje de referencia máximo por debajo de 5V (3.8V) y cuando este voltaje se hace mayor el motor se detiene.

Los valores de $wMin$, $wMax$, $Liminfpwm$ y $Limsuppwm$ se determinan utilizando el programa de Recolección de datos que se explica en el numeral 6.3.1, variando y ajustando los valores de salida en pwm y midiendo la velocidad de en rpm.

El usuario debe programar los valores de estas variables en el setup. A continuación se muestran los valores para OMNI1 y 2.

```
wMax1 = 60;           //Velocidad máxima para OMNI1
wMax2 = 1450;
wMin1 = 9.4;         //Velocidad mínima para OMNI1
wMin2 = 340;
Liminfpwm1 = 100;   //Valor mínimo en pwm para OMNI1
Liminfpwm2 = 60;
Limsuppwm1 = 255;   //Valor máximo en pwm para OMNI1
Limsuppwm2 = 240;
```

Por lo tanto, la señal de salida del pwm ($newwsalidapwm$) queda:

= $map(w, wMin, wMax, Liminfpwm, Limsuppwm)$, para el modo de operación con retroalimentación o

= $map(wrefa, wMin, wMax, Liminfpwm, Limsuppwm)$ para el modo de operación sin retroalimentación

Excepto si la $wref$ es cero, donde $newwsalidapwm = 0$;

Una vez se determina la variable de salida pwm, estas solo se escriben si hay cambio en esta variable respecto a la anterior.

A continuación se muestra una sección del programa:

```
//solo se escribe en la salida del PWM de los motores cuando hay cambio
if(wsalida1pwm != newwsalida1pwm)
{
  analogWrite(E1A,newwsalida1pwm);
  wsalida1pwm = newwsalida1pwm;
}
```

6.2.6 Señal de salida para sentido de giro de los motores

La señal de sentido de giro esta dada por las variables $newsignoref$ y $antsignoref$, las cuales se determinan en la función $VehMot$. Solo cuando hay cambio de sentido de giro se escribe en la salida digital correspondiente.

Y si en un motor se presenta cambio de sentido de giro, el programa entra en un loop de espera, cuyo tiempo está determinado por la variable *interval*, que es igual a 200ms para OMNI1 y 500ms para OMNI2.

A continuación se muestra la sección del programa correspondiente:

En el setup y en el inicio del loop se inicializan las variables.

En el loop principal:

```
//para dar un tiempo de espera si hay cambio de sentido de giro
if(newsignoref1 == antsignoref1) { cambiogiro1=0; } else { digitalWrite(M1A,newsignoref1);
cambiogiro1 = 1; }
if(newsignoref2 == antsignoref2) { cambiogiro2=0; } else { digitalWrite(M2A,newsignoref2);
cambiogiro2 = 1; }
if(newsignoref3 == antsignoref3) { cambiogiro3=0; } else { digitalWrite(M1B,newsignoref3);
cambiogiro3 = 1; }
if(newsignoref4 == antsignoref4) { cambiogiro4=0; } else { digitalWrite(M2B,newsignoref4);
cambiogiro4 = 1; }
cambiogiro = cambiogiro1 + cambiogiro2 + cambiogiro3 + cambiogiro4;
if (cambiogiro != 0)
{
  now2 = millis();
  previoTime = now2;
  for(; now2 - previoTime <= interval;) { now2 = millis(); }
}
//escribe en los puertos correspondientes a sentido de giro
antsignoref1=newsignoref1;
antsignoref2=newsignoref2;
antsignoref3=newsignoref3;
antsignoref4=newsignoref4;
```

6.3 Procedimiento para determinar función de transferencia

6.3.1 Recolección de datos

Se ejecuta un programa para recolectar los datos necesarios para la caracterización de cada uno de los cuatro subsistemas: motor-controlador-transmisión-rueda en ambos sentidos de giro.

Para ello la plataforma debe estar elevada, es decir ninguna de las ruedas debe estar en contacto con el piso.

Se inicia con un sentido de giro y se va cambiando la señal de velocidad de referencia con señales tipo escalón desde 0 hasta llegar a la máxima velocidad del motor, en 5 tramos diferentes. El tiempo en que se realiza el cambio de señal de velocidad de referencia está determinado por el producto entre la variable *SampleTime0* y la variable *i* que determina la cantidad de muestras que se van a tomar, siendo para este caso = $15\text{ms} \cdot 320 = 4800\text{ms}$.

Los datos de velocidad de referencia, velocidad medida en eje del motor y tiempo de muestreo, se almacenan en los vectores *vectorvel* y *vectortiempo*.

Cuando se completan las 320 muestras, se pone en 0 la velocidad de referencia y se escribe por el puerto serial los valores de las variables:

- *Conteo*, corresponde a la cantidad de veces que el motor arranca de 0 hasta la velocidad máxima.
- *Tramo*, a cada tramo corresponde una velocidad de referencia.
- *signoref*, corresponde al sentido de giro.

Luego se escribe por el puerto serial, los 320 valores de las muestra tomadas del *vectorvel* y *vectortiempo*. Este proceso se repite 20 veces, cantidad que está determinada por la variable *conteo*.

El tiempo de muestreo es fijo y está determinado con la variable *SampleTime0*, que en este caso es 15ms.

Con los datos obtenidos de las 20 repeticiones se saca el promedio para el vector de velocidad medida, el cual se utiliza para obtener las funciones de transferencia del subsistema: motor-controlador-transmisión-ruedas en los dos sentidos de giro horario y anti horario.

En anexo tres se encuentra el programa para la toma de datos.

6.3.2 Función de transferencia

Con los vectores obtenidos se ejecutan las siguientes instrucciones en Matlab:

- Insertar los vectores de *wref* y *vectorvel* para el motor en cada sentido de giro.
- Escribir el comando *data= iddata(y,u,Ts)* donde "*data*" es un nombre arbitrario, "*y*" es *vectorvel*, "*u*" es el vector *wref* y "*Ts*" es el tiempo de muestreo.
- Escribir el comando *sys= tfest(data,nz)* donde "*sys*" es un nombre arbitrario, "*data*" es el archivo que uno creó con *iddata* y "*nz*" es el número de polos que debe tener la función de transferencia, que en nuestro caso es 2.

Las funciones de transferencia obtenidas para los motores de OMNI1 en ambos sentidos de giro son:

<p>Motor 1: Norte: $\frac{0.7122s+3.602}{s^2+27.08s+2.072}$</p> <p>Motor 1: Sur: $\frac{0.1023s+4.182}{s^2+27.76s+2.771}$</p> <p>Motor 2: Norte: $\frac{0.5142s+3.21}{s^2+25.56s+1.712}$</p> <p>Motor 2: Sur: $\frac{3.003s+3.172}{s^2+43.33s+2.327e^{-8}}$</p>

Motor 3: Norte: $\frac{1.627s+6.047}{s^2+37.16s+2.557}$
Motor 3: Sur: $\frac{0.0318s+5.771}{s^2+34.46s+3.601}$
Motor 4: Norte: $\frac{0.1217s+6.031}{s^2+28.31s+5.14}$
Motor 4: Sur: $\frac{0.1217s+6.085}{s^2+27.98s+5.496}$

Tabla 23. Funciones de transferencia OMNI1

Las funciones de transferencia obtenidas para OMNI2 son:

Motor 1: Norte: $\frac{1.089s+29.46}{s^2+1.384s+0.2493}$
Motor 1: Sur: $\frac{1.177s+0.4159}{s^2+1.553s+0.3695}$
Motor 2: Norte: $\frac{1.865s+1.515}{s^2+2.587s+1.261}$
Motor 2: Sur: $\frac{1.578s+1.098}{s^2+2.335s+1.049}$
Motor 3: Norte: $\frac{5.579s+18.98}{s^2+9.401s+21.68}$
Motor 3: Sur: $\frac{6.116s+19.67}{s^2+9.885s+22.33}$
Motor 4: Norte: $\frac{2.437s+1.781}{s^2+3.329s+1.781}$
Motor 4: Sur: $\frac{1.291s+0.7684}{s^2+2.008s+0.7913}$

Tabla 24. Funciones de transferencia OMNI2

6.3.3 Parámetros para los controles PID

Una vez obtenidas las funciones de transferencia se procede a determinar las constantes K_p , T_i y T_d para cada lazo de control PID en cada sentido de giro. En la Figura 34 se muestra programa utilizado para hallar los valores de K_p , T_i y T_d de un motor en uno de los dos sentidos de giro.

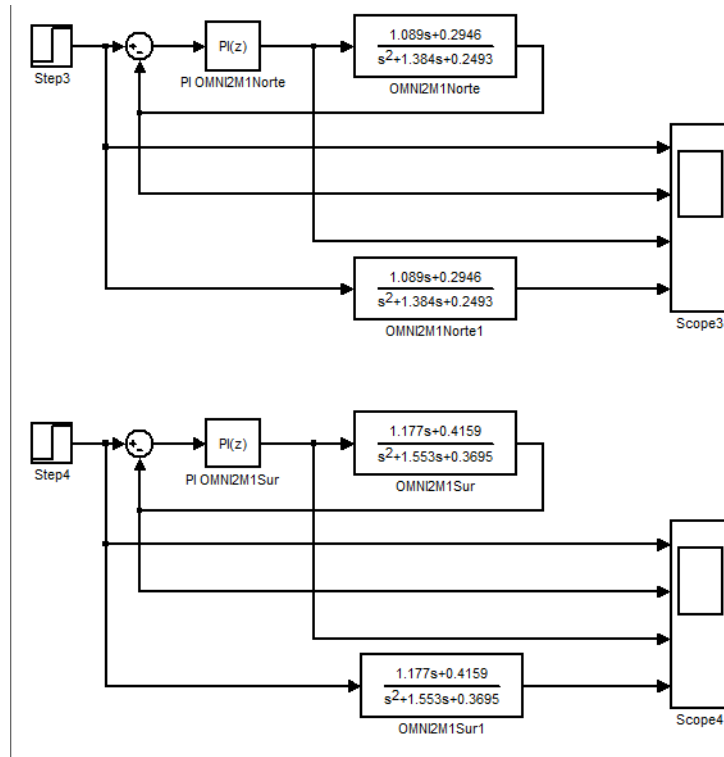


Figura 34. Determinación de parámetros del PID

Al ejecutar en el bloque de control PID, la opción tune, se utiliza la posibilidad que brinda la herramienta de variar el tiempo de ajuste, para cambiar los parámetros K_p , T_i y T_d , de tal forma que la salida de la señal de referencia no supere el 1,15 de la velocidad de referencia, buscando el tiempo de ajuste mas corto.

En la Figura 35 se muestra el procedimiento de ajuste para K_p , T_i y T_d de uno de los motores.

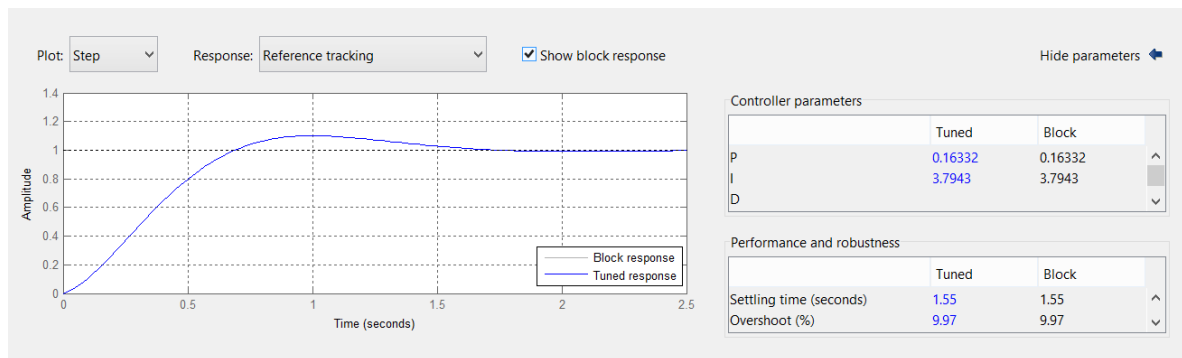


Figura 35. Resultado ajuste parámetros controlador PID

Repetiendo este procedimiento para todos los motores en los dos sentidos de giro se obtienen los valores para los parámetros, K_p y T_i de OMNI1 a continuación se muestran los valores de k_p , k_i y k_d para OMNI1 y OMNI2

OMNI1			
Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
kp1N = 0.229; ki1N = 0.063; kd1N = 0; kp1S = 0.421; ki1S = 0.148; kd1S = 0;	kp2N = 0.227; ki2N = 0.053; kd2N = 0; kp2S = 1.627; ki2S = 0.181; kd2S = 0;	kp3N = 0.204; ki3N = 0.048; kd3N = 0; kp3S = 0.258; ki3S = 0.091; kd3S = 0;	kp4N = 0.624; ki4N = 0.314; kd4N = 0; kp4S = 0.600; ki4S = 0.330; kd4S = 0;
OMNI2			
kp1N = 0.313; ki1N = 0.893; kd1N = 0; kp1S = 0.044; ki1S = 0.443; kd1S = 0;	kp2N = 0.071; ki2N = 0.680; kd2N = 0; kp2S = 0.056; ki2S = 0.555; kd2S = 0;	kp3N = 0.174; ki3N = 1.741; kd3N = 0; kp3S = 0.192; ki3S = 1.924; kd3S = 0;	kp4N = 0.106; ki4N = 1.056; kd4N = 0; kp4S = 0.063; ki4S = 0.633; kd4S = 0;

Tabla 25. Parámetros PID OMNI1 y 2

7 Fase tres: Pruebas

La fase tres se prueba la arquitectura de control con las dos plataformas OMNI 1 y 2, con el objetivo de comprobar su funcionamiento controlando dos vehículos con especificaciones mecánicas diferentes.

Se compara el comportamiento real respecto a lo esperado por el modelo cinemático.

Además, se compara el comportamiento de las plataformas para los modos de operación en lazo abierto y cerrado con el fin de validar cual modo de operación proporciona una mejor maniobrabilidad.

7.1 Protocolo de pruebas

Se harán cuatro pruebas a las dos plataformas: La primera corresponde a las medidas de dimensiones, distancias entre ruedas y masa de cada plataforma. La segunda un chequeo general de indicadores, mandos y funcionamiento en los diferentes tipos de movimiento. La tercera se mide el tiempo requerido para desplazarse una distancia fija. La cuarta se mide la desviación con y sin perturbación en el sistema cuando se trabaja en lazo abierto y cerrado. A continuación se describen cada una de las pruebas.

7.1.1 Dimensiones y masa

Prueba	2
Nombre	Dimensiones y masa
Objetivo	Mediciones dimensionales y de masa.

Fecha	
Responsable de la prueba	
Plataforma a probar	

Instrumentos de medida	Exactitud
Flexómetro y escuadras	1 mm
Báscula	1 Kgr

Item	
Largo (mm)	
Ancho (mm)	
Alto (mm)	
Distancia entre centro de las ruedas en Y (mm)	
Distancia entre centro de las ruedas en X (mm)	
Masa sin carga (Kgr)	
Observaciones	

7.1.2 Lista de chequeo

Prueba	1
Nombre	Lista de chequeo
Objetivo	Probar funcionamiento de mandos, indicadores y motores y anotar condiciones importantes de operación.

Fecha	
Responsable de la prueba	
Plataforma a probar	
Superficie sobre la que se desplaza la plataforma	
Masa a transportar (Kgr)	

Item	Cumple	
	SI	NO
LEDs indicadores		
Velocidad de referencia de la plataforma		
Modo de operación con y sin retroalimentación		
Nivel de carga de la batería		
Reconocimiento de PS2 por parte del arduino		
Mandos		
Interruptor en caja de mandos		
Interruptor con llave en caja de mandos		
Interruptor en caja procesador		
Botón rosado para habilitar alimentación de potencia a los motores		
Botón rojo para deshabilitar alimentación de potencia a los motores		
Botón verde aumentar la velocidad de referencia		
Botón azul para disminuir la velocidad de referencia		
Botón derecho R1 para activar modo de operación con retroalimentación		
Botón izquierdo L1 para activar modo de operación con retroalimentación		
Combinando traslación y rotación		
Observaciones		

Funcionamiento (*)	Operación lazo abierto					Operación lazo cerrado				
	0	V1	V2	V3	V4	0	V1	V2	V3	V4
Desplazamiento +Y										
Desplazamiento -Y										
Desplazamiento +X										
Desplazamiento -X										
Desplazamiento +Y+X										
Desplazamiento +Y-X										
Desplazamientos -Y+X										
Desplazamientos -Y-X										
Desplazamiento +Z										
Desplazamiento -Z										
Combinando traslación y rotación										

Observaciones

(*) Se marca si o no en la columna respectiva

7.1.3 Tiempo para desplazamiento

La prueba inicia con la plataforma detenida y debe desplazarse una distancia fija, tanto para movimientos en $\pm X$, $\pm Y$ y en diagonal. El movimiento realizado por la plataforma es una combinación de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado y movimiento rectilíneo uniforme.

De acuerdo con el modelo cinemático, la velocidad para desplazamientos en $\pm X$ es igual a la velocidad para desplazamientos en $\pm Y$ y la velocidad para desplazamientos en diagonal debe ser la mitad de la velocidad para desplazamientos en $\pm X$ y $\pm Y$. Independiente del tipo de movimiento (uniforme o uniformemente acelerado), la relación entre las velocidades debe cumplirse.

Por lo tanto, teniendo en cuenta lo anterior, el tiempo requerido por la plataforma para desplazarse la misma distancia en X y en Y, debe ser igual y para desplazarse la misma distancia en diagonal deber ser el doble.

Para esta prueba y la siguiente se realizan varias repeticiones con de fin de asegurar la validez de la información. El criterio para determinar la cantidad de repeticiones o muestras depende del error, el cual deberá ser menor o igual al 5%

La fórmula para determinar la cantidad de muestras es:

$$Muestras = \left(\frac{\text{coeficiente de variación}}{\text{error}} * 2 \right)^2$$

Ecuación 14

Siendo:

$$\text{Coeficiente de variación} = \frac{\text{Desviación estándar}}{\text{Promedio}} * 100$$

Ecuación 15

Prueba	3
Nombre	Tiempo para desplazamiento
Objetivo	Verificar que el tiempo para desplazarse una distancia igual para movimientos en X y en Y sean iguales y para movimientos en diagonal sea el doble. Comparar para cada tipo de movimiento los tiempos cuando se trabaja en lazo abierto y cerrado.

Método	Se mide el tiempo empleado para recorrer una distancia conocida y siempre igual en todos los tipos de movimiento y modos de operación. Con los datos medidos se calculan las relaciones de tiempo.
--------	--

Fecha	
Responsable de la prueba	
Plataforma a probar	
Superficie sobre la que se desplaza la plataforma	
Masa de la carga a transportar (Kgr)	

Instrumentos de medida	Exactitud
Cronómetro	1/100 seg
Flexómetro	1 mm
Escuadras	1 mm
Transportador	1 grado sexagesimal
Báscula	1 Kgr

Modo de operación (con/sin retroalimentación)	
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)	
Velocidad de referencia (1,2,3,4)	

Repetición	Distancia inicial (mm)	Distancia final (mm)	Diferencia Distancia (mm)	Tiempo (s)
1				
2				
3				
4				
Promedio				
Desviación				
Coeficiente				
Muestras				
Error				
Observaciones				

7.1.4 Desviación en trayectoria

Prueba	4
--------	---

Nombre	Desviación en trayectoria
Objetivo	Se calcula la desviación en la trayectoria X, Y, Z para los modos de operación en lazo abierto y cerrado y para varios tipos de movimiento, con el objetivo de conocer el comportamiento de los controles PID y como afecta la maniobrabilidad del vehículo.
Método	Se mide distancia recorrida en X, Y y Z. Con estos datos se calcula la distancia total en XY utilizando la fórmula para la hipotenusa de un triángulo rectángulo. Se tiene en cuenta rotación en Z. Estas distancias se comparan con las del caso de trayectoria ideal sin desviación.

Fecha	
Responsable de la prueba	
Plataforma a probar	
Superficie sobre la que se desplaza la plataforma	
Masa de la carga a transportar (Kgr)	

Instrumentos de medida	Exactitud
Cronómetro	1/100 seg
Flexómetro	1 mm
Escuadras	1 mm
Transportador	1 grado sexagesimal
Báscula	1 Kgr

Modo de operación (con/sin retroalimentación)									
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)									
Velocidad de referencia (1,2,3,4)									
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1									
Motor con perturbación (1,2,3,4)									
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY	Diferencia en distancia total XY
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
Promedio									
Desviación									
Coeficiente									
Muestras									

Error							
Observaciones							

Un signo positivo para rotación Z significa sentido horario.

También se prueba la respuesta de la plataforma frente a una perturbación conocida. Para la perturbación se realiza el siguiente cambio en el programa de arduino:

Para OMNI 1:

```

if(wsalida1pwm != newwsalida1pwm)
{
  if(newwsalida1pwm == 0) { analogWrite(E1A,newwsalida1pwm); }
  else { analogWrite(E1A,newwsalida2pwm-20); }
  wsalida1pwm = newwsalida1pwm;
}

```

Para OMNI 2:

```

if(wsalida1pwm != newwsalida1pwm)
{
  if(newwsalida1pwm == 0) { analogWrite(E1A,newwsalida1pwm); }
  else { analogWrite(E1A,newwsalida1pwm-4); }
  wsalida1pwm = newwsalida1pwm;
}

```

Que reemplazan las siguientes líneas del programa sin perturbación para ambas plataformas:

```

if(wsalida1pwm != newwsalida1pwm)
{
  analogWrite(E1A,newwsalida1pwm);
  wsalida1pwm = newwsalida1pwm;
}

```

Se observa que la perturbación consiste en restar al valor calculado una cantidad fija, que para el caso de OMNI1 es 20 y para el caso de OMNI2 es 4.

El valor a restar se obtiene así:

Para OMNI 1:

wMax = 60 rpm

wMin = 9,4 rpm

Liminfpwm = 100

Limsuppwm = 255

Esto significa que cuando la salida PWM es 255, la velocidad de salida del motor es 60rpm y cuando la salida PWM es 100, la velocidad de salida del motor es 9,4 rpm. El motor no puede girar a más de 60 rpm ni a menos de 9,4 rpm.

Si el comportamiento entre la entrada PWM y la salida rpm es lineal, la pendiente de la línea es: 0,326. Para valores en PWM cercanos a 255, un decremento del 18,4 (se aproxima

a 20) en el valor de la entrada PWM representa un decremento del 10% en las rpm de la salida.

Para OMNI 2:

wMax = 1450 rpm

wMin = 340 rpm

Liminfpwm = 61

Limsuppwm = 240

Esto significa que cuando la salida PWM es 240, la velocidad de salida del motor es 1450rpm y cuando la salida PWM es 61, la velocidad de salida del motor es 340 rpm. El motor no puede girar a más de 1450 rpm ni a menos de 340 rpm.

Si el comportamiento entre la entrada PWM y la salida rpm es lineal, la pendiente de la línea es: 6,2. Para valores en PWM cercanos a 77 que corresponde a 440 rpm, un decremento de 3,5 (se aproxima a 4) en el valor de la entrada PWM representa un decremento del 5% en las rpm de la salida.

7.2 Resultados

En el anexo cinco están las tablas con los resultados de las pruebas, a continuación se muestra un resumen y las principales observaciones.

7.2.1 OMNI1

7.2.1.1 Dimensiones y masa

Prueba	2
Nombre	Dimensiones y masa
Objetivo	Mediciones dimensionales y de masa.

Observaciones Dimensiones y masa OMNI1
La distancia entre los centros de las ruedas no son iguales en X y Y.

7.2.1.2 Lista de chequeo

Prueba	1
Nombre	Lista de chequeo
Objetivo	Probar funcionamiento de mandos, indicadores y motores y anotar condiciones importantes de operación.

Observaciones Lista de chequeo OMNI 1
Los mandos e indicadores funcionan correctamente. Algunos ítems del listado se marcan con NA porque no aplican para OMNI1.

Observaciones Funcionamiento OMNI 1
El tipo de superficie (material y planitud) es determinante para el funcionamiento de la plataforma, debido al material de los rodillos y a la falta de suspensión. La plataforma se probó en pisos de baldosa, mármol, madera y alfombra para todos los tipos de movimiento.

En los pisos de baldosa, mármol y madera se observó que no siempre se lograba el movimiento esperado para movimientos en $\pm X$ y en diagonal. Las razones son el deslizamiento de las ruedas y la falta de suspensión.

En el piso de alfombra se observó que la plataforma hace todos los tipos de movimientos posibles: $\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$ y las 4 diagonales.

La falta de suspensión hace que en ocasiones las ruedas giren sin hacer tracción en el piso.

7.2.1.3 Tiempo para desplazamiento

Prueba	3
Nombre	Tiempo para desplazamiento
Objetivo	Verificar que el tiempo para desplazarse una distancia igual para movimientos en X y en Y sean iguales y para movimientos en diagonal sea el doble. Comparar para cada tipo de movimiento los tiempos cuando se trabaja en lazo abierto y cerrado.

Resumen pruebas tiempo para desplazamiento OMNI 1

Prueba	Distancia (mm)	Tipo de movimiento	Retroalimentación	Tiempo medido (s)	Tiempo ideal (*) (s)
3.1	1174	+X	SIN	11,29	4,41
3.2	1174	+X	CON	6,71	4,41
3.3	1174	+Y	SIN	6,49	4,41
3.4	1174	+Y	CON	4,99	4,41
3.5	1174	-X+Y	SIN	15,76	8,82
3.6	1174	-X+Y	CON	9,46	8,82

(*)

De acuerdo con los datos obtenidos del comportamiento del subsistema motor-controlador-transmisión-ruedas de OMNI1 (anexo cuatro), se observa que en el aire el tiempo requerido para acelerar las ruedas de 0 a 50 rpm es 0,3s; y considerando que la medida de tiempo mas corta es 4,99s, se puede aproximar el movimiento de la plataforma a un movimiento rectilíneo uniforme.

Luego, para movimiento rectilíneo uniforme, cuando la velocidad de las ruedas (que en este caso es igual a la del motor) es 50 rpm la velocidad de la plataforma debe ser para movimientos en $\pm X$ y $\pm Y$: 265,99mm/s y en diagonal 132,99mm/s. Por lo tanto el tiempo requerido para desplazamientos de 1174mm en $\pm X$ y $\pm Y$ debe ser 4,41s y para desplazamientos de 1174mm en diagonal debe ser 8,82s.

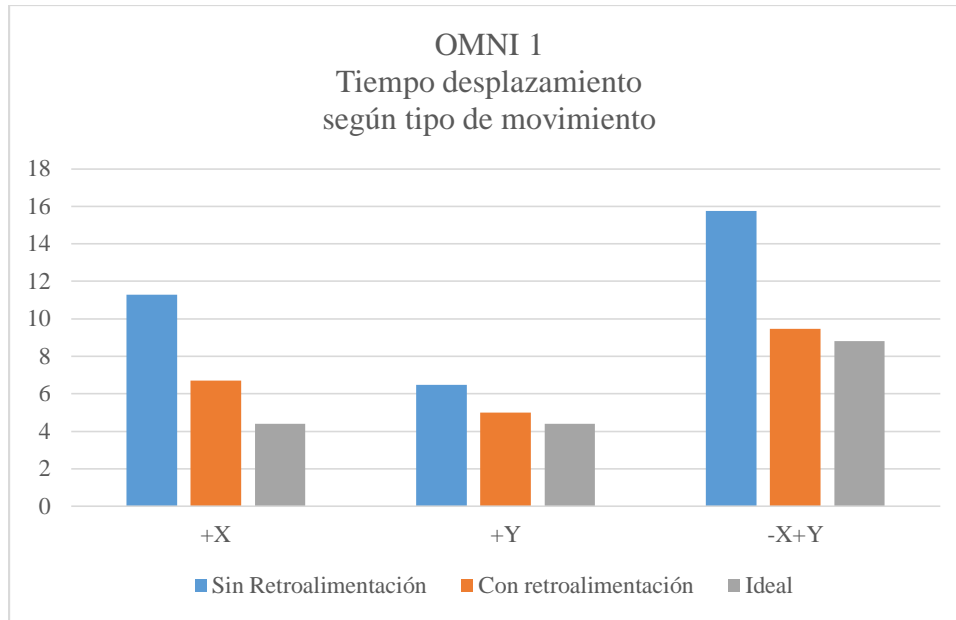


Figura 36. OMNI 1 Tiempo para desplazamiento según tipo de movimiento

Observaciones de las pruebas de Tiempo para desplazamiento OMNI 1

De acuerdo con el modelo cinemático el tiempo requerido para desplazarse una misma distancia debe ser igual para movimientos en $\pm X$ y $\pm Y$ y el doble para movimientos en diagonal.

Se observa:

- Para ambos modos de operación (con y sin retroalimentación) los tiempos para el movimiento en $-X$ son mayores que para movimiento en $+Y$, Figura 36.
- La diferencia entre el tiempo en X y el tiempo en Y , es menor cuando se tiene retroalimentación (lazo cerrado):

$$\left(\frac{\text{Tiempo en } X - \text{Tiempo en } Y}{\text{Tiempo en } Y} \right)_{\text{con PID}} < \left(\frac{\text{Tiempo en } X - \text{Tiempo en } Y}{\text{Tiempo en } Y} \right)_{\text{sin PID}}$$

$$\frac{6,71 - 4,99}{4,99} < \frac{11,29 - 6,49}{6,49}$$

$$0,34 < 0,74$$

- Para los tipos de movimiento: $+X$, $+Y$ y $-X+Y$ con retroalimentación (lazo cerrado) los tiempos requeridos para desplazarse se aproximan más a lo esperado, Figura 36.

Por lo tanto, el comportamiento cinemático de la plataforma es mejor y más cercano a lo esperado según el modelo para los modos de operación en lazo cerrado.

7.2.1.4 Desviación en trayectoria

Prueba	4
Nombre	Desviación en trayectoria
Objetivo	Se calcula la desviación en la trayectoria X, Y, Z para los modos de operación en lazo abierto y cerrado y para varios tipos de movimiento,

con el objetivo de conocer el comportamiento de los controles PID y como afecta la maniobrabilidad del vehículo.

Resumen Pruebas Desviación trayectoria

Prueba	Tipo de movimiento	Perturbación	Retroalimentación	Diferencia trayectoria XY	Diferencia rotación
4.1	-X	SIN	SIN	1,612	-9
4.2	-X	SIN	CON	1,612	-9
4.3	-X	CON	SIN	2,646	13 a 18
4.4	-X	CON	CON	0,587	5,857
4.5	+Y	SIN	SIN	0	0
4.6	+Y	SIN	CON	0,120	0
4.7	+Y	CON	SIN	0,581	0
4.8	+Y	CON	CON	0,285	0

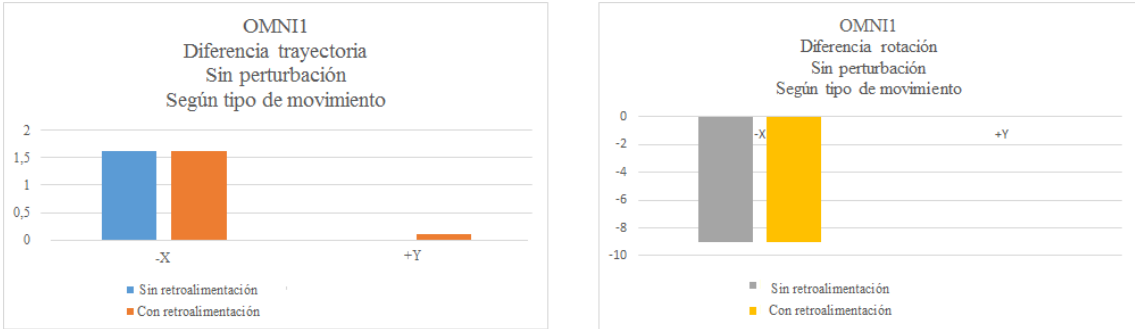


Figura 37. OMNI1 Desviación en trayectoria y rotación sin perturbación

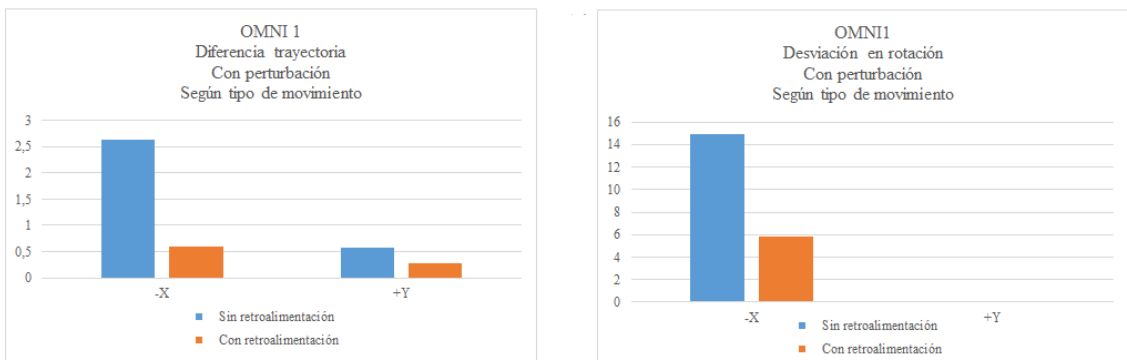


Figura 38. OMNI1 Desviación en trayectoria y rotación con perturbación

Observaciones de las pruebas de trayectoria OMNI 1

Se observa:

- Cuando no se presenta perturbación no hay diferencia apreciable en la desviación de la trayectoria al utilizar los modos en lazo abierto y cerrado, tanto para movimientos en -X como en +Y, Figura 37.

- Cuando se presenta perturbación, la desviación en la trayectoria y en el ángulo de desviación de la plataforma es mejor (menor) cuando se trabaja en lazo cerrado, siendo más evidente para el movimiento en $-X$, en el cual además se observa un decremento importante en la rotación de la plataforma en Z , Figura 38.

Por lo tanto, el comportamiento cinemático de la plataforma es mejor, es decir hay una menor desviación en la trayectoria, para el modo de operación en lazo cerrado cuando se presentan perturbaciones.

7.2.2 OMNI2

7.2.2.1 Dimensiones y masa

Prueba	2
Nombre	Dimensiones y masa
Objetivo	Mediciones dimensionales y de masa.

Observaciones Dimensiones y masa OMNI 2

La distancia entre los centros de las ruedas no son iguales en X y Y .

7.2.2.2 Lista de chequeo

Prueba	1
Nombre	Lista de chequeo
Objetivo	Probar funcionamiento de mandos, indicadores y motores y anotar condiciones importantes de operación.

Observaciones Lista de chequeo OMNI 2

Todos los indicadores y mandos funcionan correctamente.

Observaciones Funcionamiento OMNI 2

El tipo de superficie (material y planitud) es muy importante para el correcto funcionamiento de la plataforma.

La plataforma se probó en pisos de cemento, madera y alfombra argollada.

Para los pisos de madera y cemento debido al alto deslizamiento de las ruedas y a la falta de suspensión no fue posible los tipos de movimiento esperados incluso para movimientos en $\pm Y$ y $\pm Z$.

Al utilizar una alfombra argollada se logró un comportamiento aceptable para los desplazamientos en $\pm X$ y $\pm Y$ y $\pm Z$. Pero para los desplazamientos en diagonal no se obtuvo el movimiento esperado, debido a la falta de suspensión.

En esta plataforma, es evidente la necesidad de suspensión, ya que en todos los tipos de movimiento, se observó en ocasiones que una de las ruedas giraba sin hacer tracción en el piso.

La falta de frenos y de un espacio más amplio para las pruebas impidió probar la plataforma a velocidades más altas de las 440 rpm, que equivale a una velocidad del vehículo de 1,17 m/s (4,21 Km/h).

En el aire se probó la operación a velocidades más altas, observando que los motores pueden girar hasta 1450 rpm, que equivale a una velocidad máxima de desplazamiento de la plataforma de 9,88 Km/h. (2,74 m/s).

7.2.2.3 Tiempo para desplazamiento

Prueba	3
Nombre	Tiempo para desplazamiento
Objetivo	Verificar que el tiempo para desplazarse una distancia igual para movimientos en X y en Y sean iguales y para movimientos en diagonal sea el doble. Comparar para cada tipo de movimiento los tiempos cuando se trabaja en lazo abierto o cerrado.

Resumen pruebas tiempo para desplazamiento

Prueba	Tipo de movimiento	Retroalimentación	Distancia (cm)	Tiempo medido (s)	Tiempo ideal (*) (s)
3.1	+X	SIN	225	9,37	3,82
3.2	+X	CON	225	5,13	3,82
3.3	+Y	SIN	281	7,67	4,30
3.4	+Y	CON	281	4,30	4,30
3.5	-X+Y	SIN		No fue posible	
3.6	-X+Y	CON		No fue posible	

(*)

De acuerdo con los datos obtenidos del comportamiento del subsistema motor-controlador-transmisión-ruedas de OMNI2 (anexo cuatro), se observa que en el aire el tiempo requerido para acelerar las ruedas de 0 a 440 rpm es 1s, pero dada la masa de la plataforma este tiempo puede duplicarse o triplicarse, y considerando que la medida de tiempo mas corta es 4,30s no se puede aproximar el movimiento de la plataforma a un movimiento rectilíneo uniforme, es una combinación de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado y movimiento rectilíneo uniforme.

Si el tiempo para acelerar es 3,8s, en ese tiempo la plataforma se desplaza 2,22m, por lo que el tiempo total requerido para desplazarse 281cm es 4,3s y para desplazarse 225cm es 3,82s

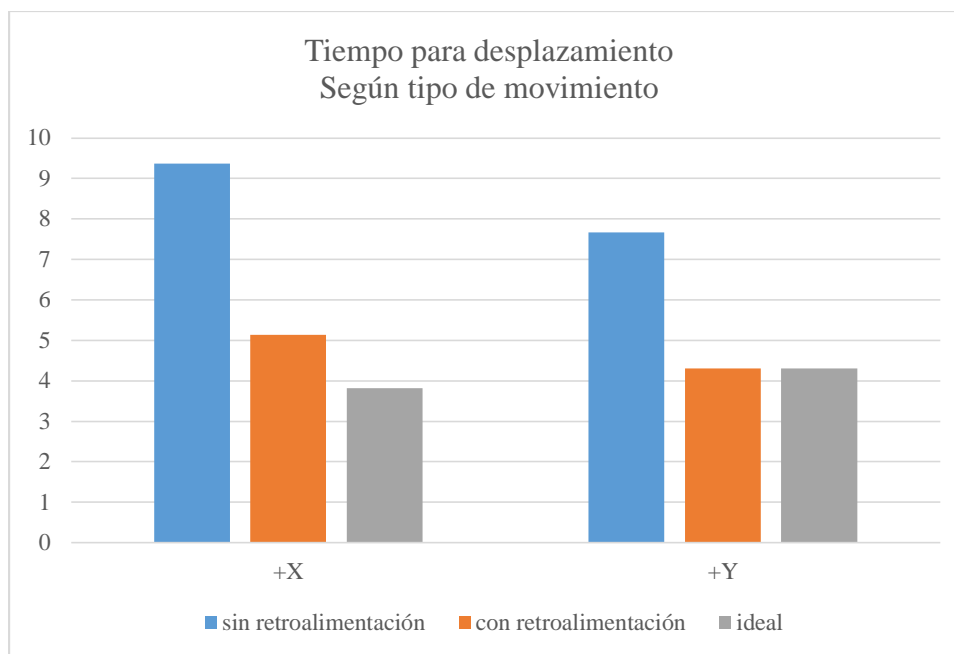


Figura 39. OMNI 2 Tiempos para desplazamiento según tipo de movimiento

Observaciones de las pruebas de tiempo para desplazamiento OMNI 2

De acuerdo con el modelo cinemático el tiempo requerido para desplazarse una misma distancia debe ser igual para movimientos en $\pm X$ y $\pm Y$ y el doble para movimientos en diagonal.

Se observa:

- Para ambos modos de operación (lazo abierto y cerrado) los tiempos para el movimiento en $-X$ son mayores que para movimiento en $+Y$, incluso teniendo presente que la distancia utilizada para el movimiento en $-X$ es menor a la distancia en Y , Figura 39.
- Para los movimientos en lazo cerrado siempre el tiempo es menor al requerido cuando no hay retroalimentación y se aproximan más a los valores esperados, Figura 39.

Por lo tanto, el comportamiento cinemático es mejor cuando se opera en lazo cerrado.

7.2.2.4 Desviación en trayectoria

Prueba	4
Nombre	Desviación en trayectoria
Objetivo	Se calcula la desviación en la trayectoria X, Y, Z para los modos de operación en lazo abierto y cerrado y para varios tipos de movimiento, con el objetivo de conocer el comportamiento de los controles PID y como afecta la maniobrabilidad del vehículo.

Resumen Pruebas Desviación trayectoria

Prueba	Tipo de movimiento	Perturbación	Retroalimentación	Diferencia trayectoria XY (cm)	Diferencia rotación Z (°)
4.1	+X	SIN	SIN	5,59	5°
4.2	+X	SIN	CON	5,75	0°
4.3	+X	CON	SIN	No llegó	
4.4	+X	CON	CON	27,34	Entre 24 y 28°
4.5	+Y	SIN	SIN	0,31	Entre 3 y 6°
4.6	+Y	SIN	CON	0,42	Inferior a 1°

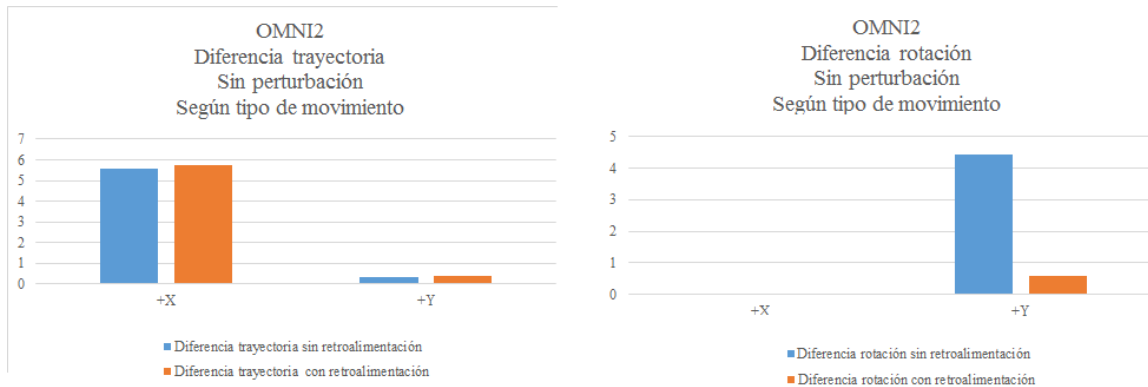


Figura 40. OMNI2 Desviación en trayectoria y ángulo de rotación sin perturbación

Observaciones de las pruebas de desviación trayectoria OMNI 2

La superficie (material y planitud) por la que se desplaza la plataforma es determinante para la desviación en trayectoria.

Se observa:

- Cuando no se presenta perturbación no es apreciable la mejora en la desviación en trayectoria en lazo cerrado, pero si es apreciable para rotación en Z, por lo que es mejor emplear el modo de operación en lazo cerrado, para tener una mejor trayectoria en X, Y, Z, Figura 40.
- Cuando se presenta perturbación y se trabaja en lazo cerrado para el movimiento en +X gran la desviación en la trayectoria de la plataforma impide llegar a la meta. Si se trabaja en lazo cerrado la plataforma si llega a la meta, pero la desviación es alta.

Por lo tanto, el comportamiento cinemático de la plataforma es mejor, es decir hay una menor desviación en la trayectoria, para el modo de operación en lazo cerrado cuando se existen perturbaciones.

8 Conclusiones

Se diseña y desarrolla una arquitectura de control para productos omnidireccionales, basados en plataformas que utilizan cuatro ruedas Mecanum propulsadas por cuatro motores DC sin escobillas (BLDC) alimentados a 48 VDC con un rango de potencia entre 200 y 2000 Vatios.

El controlador desarrollado se prueba en dos plataformas que tienen características mecánicas y eléctricas muy diferentes. La primera plataforma (OMNI 1) es un modelo a escala (dimensiones: 43*37*13 mm), que utiliza cuatro motores DC de 1,88 Vatios a 12VDC, para mover una masa total de 7 Kgr a una velocidad máxima de 0,32m/s. La segunda plataforma (OMNI 2) es el prototipo de referencia (dimensiones: 1200*775*1000 mm), utiliza cuatro motores sin escobillas (BLDC) de 500 Vatios alimentados a 48 VDC, permite mover una masa total de hasta 400 Kgr a una velocidad máxima en plano horizontal de 2,78m/s. La plataforma OMNI 2 permite, gracias al controlador seleccionado para los motores BLDC, intercambiar los motores de 500Vatios por otros motores BLDC de mayor potencia que se alimenten a 48 VDC, sin necesidad de cambiar los componentes de la arquitectura de control. El motor empleado pertenece a una serie en que además del motor de 500 Vatios se tienen motores de 650 y 800 Vatios que se alimentan a 48 VDC y tienen la misma velocidad angular en la salida del eje del motor. En caso de cambiar la potencia del motor se deben cambiar las baterías por otras de mayor capacidad en amperios hora, así como los fusibles correspondientes a cada motor. Además de algunos parámetros en la programación del controlador.

Se desarrolla un procedimiento que permite determinar a partir de las especificaciones de diseño el sistema de propulsión requerido: motor-transmisión-ruedas.

Adicionalmente se desarrolla un procedimiento para determinar los parámetros del controlador en lazo cerrado.

El controlador está conformado por cuatro controles que pueden operar el lazo abierto o en lazo cerrado con retroalimentación de la velocidad de giro de cada motor. Para la retroalimentación se utilizan encoders ópticos que están acoplados al sistema de transmisión de potencia del motor a las ruedas. El algoritmo de control empleado es PID.

El controlador está soportado en la plataforma de hardware Arduino y utiliza para las entradas de los mandos del usuario un Play Station Controller (PS2) por medio del cual el usuario selecciona:

- Dirección de avance, para los siguientes tipos de movimiento (ver el sistema de coordenadas que se muestra en la Figura 41): detenido, $\pm Y$, $\pm X$, 4 diagonales ($+X+Y$, $+X-Y$, $-X+Y$, $-X-Y$), los cuales pueden combinarse con movimientos de rotación sobre su propio eje en el plano Z: detenido; $\pm Z$.

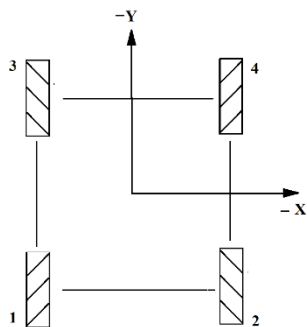


Figura 41. Sistema de coordenadas OMNI 1 y 2

- Velocidad de desplazamiento.
- Modo de operación con o sin retroalimentación.
- Y activación o desactivación de la alimentación de potencia para los motores.

En la Figura 42 se muestran ambas plataformas.



Figura 42. Plataformas OMNI 1 y 2

Los resultados de las pruebas y del desarrollo del proyecto permiten concluir:

1. Se desarrolló una arquitectura de control para controlar productos eléctricos omnidireccionales basados en plataformas que utilizan 4 ruedas Mecanum con diferentes especificaciones de potencia mecánica.
2. La arquitectura de controlador en el modo de operación en lazo cerrado ofrece una mejor maniobrabilidad de las plataformas, siendo más evidente cuando se presentan perturbaciones en el sistema. Las pruebas mostraron cuando se trabaja en lazo cerrado, no hay perturbaciones y el desplazamiento es en sentido longitudinal ($\pm Y$), no es apreciable la ventaja de emplear el control en lazo cerrado. Pero, cuando se trabaja en lazo cerrado, con y sin perturbaciones y el desplazamiento de las plataformas es en sentido longitudinal ($\pm X$) o en diagonal, si es apreciable la ventaja de emplear este modo de operación.
3. El Controlador no puede corregir los errores causados por la falta de suspensión o defectos en características constructivas de la plataforma por ejemplo: mala distribución del centro de masa o ubicación del centro geométrico o una incorrecta alineación, perpendicularidad y paralelaje de las cuatro ruedas.

4. Las plataformas que utilizan ruedas Mecanum requieren un correcto asentamiento de las cuatro ruedas en el piso (sistema de suspensión) y un coeficiente de fricción adecuado para evitar deslizamientos y garantizar tracción en todas las ruedas.
5. Las plataformas requieren un sistema de freno.
6. Se desarrolló un procedimiento para determinar a partir de las especificaciones de diseño el sistema de propulsión requerido: motor-transmisión-ruedas.
7. Se desarrolló un procedimiento para determinar los parámetros del Controlador en lazo cerrado.

Recomendaciones de trabajo futuro:

Se deben mejorar aspectos constructivos de las plataformas, que no estaban dentro del alcance del proyecto, como son:

- Sistema de suspensión que garantice el contacto con el piso de las cuatro ruedas.
- Mecanismo de freno para bloquear las ruedas y los rodillos.
- Estudiar y buscar otras opciones de materiales en los rodillos de las ruedas Mecanum que permitan disminuir el deslizamiento.

Anexo uno: Fundamentos motores BLDC

Se utiliza la información proporcionada por Yedamal Parmaraja [16] sobre Fundamentos de motores BLDC.

En los motores BLDC es fundamental controlar la secuencia como se energizan las fases del estator, de tal forma que pueda crearse y mantenerse un campo rotatorio que será seguido por el rotor de manera sincrónica.

Una alternativa ampliamente utilizada para conocer la posición del rotor, consiste en incorporar en uno de los extremos del estator tres sensores de efecto Hall desfasados 60 o 120 grados uno respecto al otro. La señal que entrega cada sensor varía de alto a bajo dependiendo de los polos norte o sur del rotor. Con base en la señal de los tres sensores se define la secuencia de conmutación para energizar las fases del estator.

La secuencia de conmutación para motores BLDC de tres fases se denomina “conmutación en seis pasos”, dado que cada 60 grados de rotación uno de los sensores de efecto Hall cambiará de estado por lo que se requieren seis pasos para completar un ciclo eléctrico. Pero un ciclo eléctrico no necesariamente corresponde a un giro completo del rotor, esto depende del número de pares de polos del rotor, por lo tanto el número de ciclos eléctricos es igual al número de giro de rotación multiplicado por el número de pares de polos del rotor.

En la Figura 43 se muestran para un motor BLDC las curvas de señal de los sensores efecto Hall y Back EMF en cada una de las fases del estator.

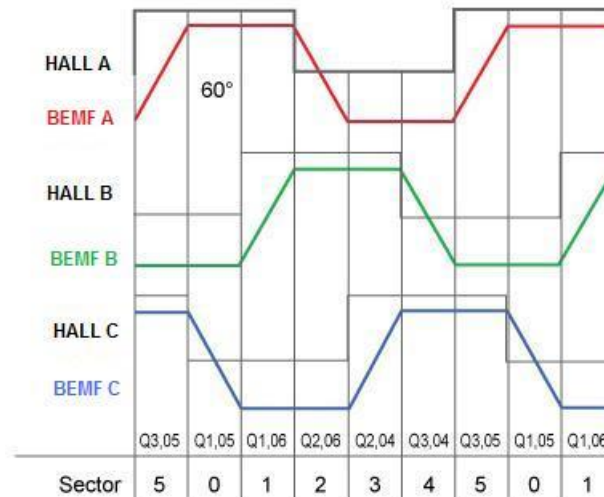


Figura 43. Back EMF y señal sensores hall

En el caso ideal las corrientes en las fases tienen forma de onda rectangular y el back EMF tiene forma de onda trapezoidal pura, por lo que el par que se produciría sería constante. En realidad la corriente en las fases del motor no se establece de forma instantánea, no es rectangular y esto genera un rizado en el par cada vez que se produce la conmutación entre

devanados, lo cual corresponde a cada 60° grados de giro del rotor. En la Figura 44 se ilustran las formas de onda del par y las corrientes por los devanados.

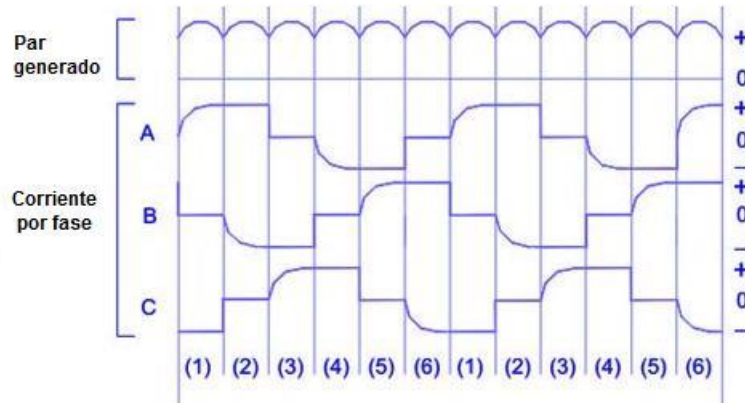


Figura 44. Forma de onda y corrientes por los devanados

En la Figura 45 se muestra la secuencia en seis pasos como se energizan los devanados del estator para giro en sentido horario.

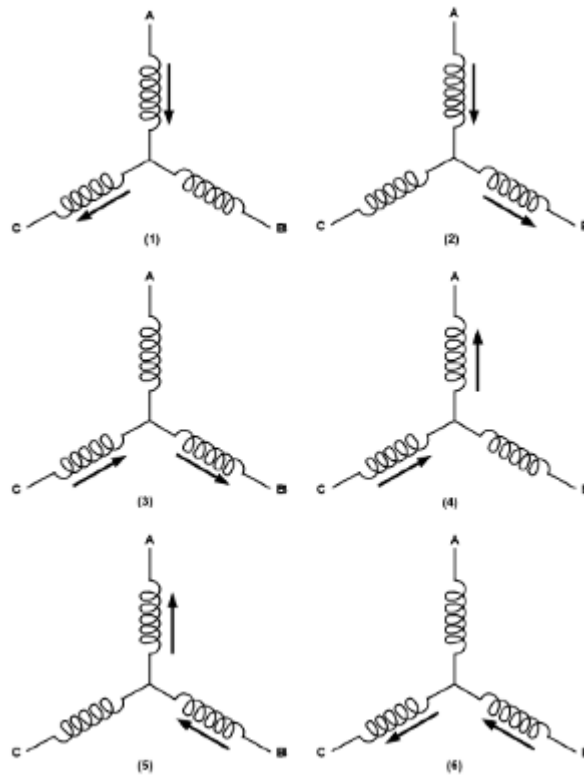


Figura 45. Secuencia energización devanados

Es importante anotar que la secuencia de energización de las tres fases determina la dirección de giro del rotor horario o anti horario (CW/CCW). En la Tabla 26 y Tabla 27 [16] se muestra las secuencias de energización de los devanados del estator cuando el motor gira en sentido horario y anti horario.

Secuencia #	Señal sensor Hall			Corriente de Fase		
	A	B	C	A	B	C
1	0	0	1	DC+	Off	DC-
2	0	0	0	DC+	DC-	Off
3	1	0	0	Off	DC-	DC+
4	1	1	0	DC-	Off	DC+
5	1	1	1	DC-	DC+	Off
6	0	1	1	Off	DC+	DC-

Tabla 26. Secuencia energización devanados BLDC giro horario

Secuencia #	Señal sensor Hall			Corriente de Fase		
	A	B	C	A	B	C
1	0	1	1	Off	DC-	DC+
2	1	1	1	DC+	DC-	Off
3	1	1	0	DC+	Off	DC-
4	1	0	0	Off	DC+	DC-
5	0	0	0	DC-	DC+	Off
6	0	0	1	DC-	Off	DC+

Tabla 27. Secuencia energización devanados BLDC sentido anti horario

Adicional al control de conmutación de las fases, debe controlarse la velocidad de giro. Esta función se hace mediante control de par, de tal manera que si se requiere más velocidad se incrementa la corriente y/o el voltaje eficaz en cada fase del motor.

Para ello se genera una señal de PWM a una frecuencia fija (entre 15 y 40 KHz), y a la cual se le controla el ciclo útil, utilizando un control PID de ciclo cerrado.

Para calcular la salida de velocidad puede emplearse la señal de los sensores hall la cual como se procesa e indica la velocidad de giro del rotor. Otra alternativa es mediante un “encoder” acoplado al eje del motor.

El driver de potencia, está formado por seis MOSFET o IGBT que permiten o paran el paso de la corriente de acuerdo con la señal PWM correspondiente a los dos lazos de control: secuencia de conmutación y velocidad de salida del rotor.

Anexo dos: Programa controlador

```
//Este programa permite manejar las plataformas OMNI1 y OMNI2 con y sin PID
//El usuario debe elegir en el setup cual plataforma va a trabajar y los
//parámetros para el PID

//Variable para seleccionar la plataforma y para iniciar el programa de acuerdo con
//la plataforma elegida
int OMNI;
int inicio;
//Variables que depende de la plataforma OMNI1 o OMNI2
//En OMNI1 la resolucio del encoder es 1024 ppp, por lo tanto
//res es 60000/(4*1024) y la w máxima de los motores es 60 rpm
//En OMNI2 la resolucio del encoder es 100 ppp, por lo tanto
//res es 60000/(4*100) y la w máxima de los motores es 1450 rpm
double res;
double res1;
double res2;
int Liminfpwm;
int Liminfpwm1;
int Liminfpwm2;
double Limsuppwm1;
double Limsuppwm2;
double Limsuppwm;
double Liminf1;
double Liminf2;
double Liminf;
double Limsup1;
double Limsup2;
double Limsup;
double wMax;
double wMax1;
double wMax2;
double wMin;
double wMin1;
double wMin2;
//Variables de los encoders
#include <Encoder.h>
//Variables del encoder1
float anterior1 = 0;
float deltapulso1 = 0;
float deltatiempo1 = 0;
float tiempnuevo1 = 0;
float tiempviejo1 = 0;
float nuevapos1 = 0;
float vell1;
```

```

float vel1a;
//Variables del encoder2
Encoder Enc1(2,9);
float anterior2;
float deltapulso2;
float deltatiempo2;
float tiemponuevo2;
float tiempoviejo2;
float nuevapos2;
float vel2;
float vel2a;
Encoder Enc2(3,10);
//Variables del encoder3
float anterior3;
float deltapulso3;
float deltatiempo3;
float tiemponuevo3;
float tiempoviejo3;
float nuevapos3;
float vel3;
float vel3a;
Encoder Enc3(20,11);
//Variables del encoder4
float anterior4;
float deltapulso4;
float deltatiempo4;
float tiemponuevo4;
float tiempoviejo4;
float nuevapos4;
float vel4;
float vel4a;
Encoder Enc4(21,8);
//Variables para sentido de giro de los motores y para detectar si hay cambio de sentido de
//giro y hacer un tiempo de espera
int antsignoref1;
int antsignoref2;
int antsignoref3;
int antsignoref4;
int newsignoref1 = 0;
int newsignoref2 = 0;
int newsignoref3 = 0;
int newsignoref4 = 0;
int interval;
int interval1;
int interval2;
unsigned long now2;

```

```

unsigned long previoTime;
int cambiogiro;
int cambiogiro1;
int cambiogiro2;
int cambiogiro3;
int cambiogiro4;
//Variable para detectar si el motor esta detenido y el conteo de pulsos del encoder no
//cambia en 200ms
unsigned long now1;
//Variables del joystick
#include <PS2X_lib.h> //Libreria de control PS2
PS2X ps2x; // create PS2 Controller Class
int error = 0;
byte type = 0;
int JDX = 50;
int JIX = 50;
int JIY = 50;
int velrefj = 0;
int velref;
float velrefX = 0;
int pesoX = 0;
float velrefY = 0;
int pesoY = 0;
float velrefZ = 0;
int pesoZ = 0;
//Variables dimensionales del vehiculo
int radio = 1;
float largo = 0.5;
float ancho = 0.5;
//Variables de velocidades de referencia
//para OMNI1
int wrefrpm11;
int wrefrpm21;
//para OMNI2
int wrefrpm12;
int wrefrpm22;
int wrefrpm32;
int wrefrpm42;
//Para ambas plataformas
int wrefrpm;
double wref1;
double wref1a;
double wref2;
double wref2a;
double wref3;
double wref3a;

```

```

double wref4;
double wref4a;
double dwref1a;
double dwref2a;
double dwref3a;
double dwref4a;
double lastwref1a;
double lastwref2a;
double lastwref3a;
double lastwref4a;
//Variables para determinar la frecuencia de cálculo de los PID
unsigned long now0;
int timeChange0;
int SampleTime0;
unsigned long lastTime0;
//Variables de los PID
#include <PID_v1.h>
double SampleTimeInSec;
unsigned long NewSampleTime;
//Variables para pasar la operacion con y sin PID
bool inAuto = false;
#define MANUAL 0;
#define AUTOMATIC 1;
int Mode;
int newAuto;
int lazocerrado;
//Variables del PID del motor1
double error1;
double ITermS1;
double ITermN1;
//Variables del PID del motor2
double error2;
double ITermS2;
double ITermN2;
//Variables del PID del motor3
double error3;
double ITermS3;
double ITermN3;
//Variables del PID del motor4
double error4;
double ITermS4;
double ITermN4;
//Parámetros PID
float kp1N;
float ki1N;
float kd1N;

```

```

float kp1S;
float ki1S;
float kd1S;
//para motor2
float kp2N;
float ki2N;
float kd2N;
float kp2S;
float ki2S;
float kd2S;
//para motor3
float kp3N;
float ki3N;
float kd3N;
float kp3S;
float ki3S;
float kd3S;
//para motor4
float kp4N;
float ki4N;
float kd4N;
float kp4S;
float ki4S;
float kd4S;
//Variables salida del PID y para escribir en la salida de cada motor
long w1;
int wsalida1pwm;
int newwsalida1pwm;
long w2;
int wsalida2pwm;
int newwsalida2pwm;
long w3;
long w3a;
long w3PID;
int wsalida3pwm;
int newwsalida3pwm;
long w4;
int wsalida4pwm;
int newwsalida4pwm;
//Variables y pines correspondientes a las salidas PWM y sentido de giro de los motores
int E1A = 5;
int E2A = 6;
int M1A = 4;
int M2A = 7;
int E1B = 44;
int E2B = 45;

```

```

int M1B = 47;
int M2B = 46;
//Variables y pines correspondientes a los leds indicadores de velocidad, PID y GDRIVER
int LEDVEL0 = 53;
int LEDVEL1 = 52;
int LEDVEL2 = 51;
int LEDVEL3 = 50;
int LEDPID = 48;
int GDRIVER = 12;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  pinMode(2,INPUT);
  pinMode(3,INPUT);
  pinMode(8,INPUT);
  pinMode(9,INPUT);
  pinMode(10,INPUT);
  pinMode(11,INPUT);
  pinMode(20,INPUT);
  pinMode(21,INPUT);
  attachInterrupt (0,Encoder1,CHANGE);
  attachInterrupt (1,Encoder2,CHANGE);
  attachInterrupt (3,Encoder3,CHANGE);
  attachInterrupt (2,Encoder4,CHANGE);
  pinMode(E1A,OUTPUT);
  pinMode(E2A,OUTPUT);
  pinMode(M1A,OUTPUT);
  pinMode(M2A,OUTPUT);
  pinMode(M1B,OUTPUT);
  pinMode(M2B,OUTPUT);
  pinMode(E1B,OUTPUT);
  pinMode(E2B,OUTPUT);
  pinMode(LEDVEL0,OUTPUT);
  pinMode(LEDVEL1,OUTPUT);
  pinMode(LEDVEL2,OUTPUT);
  pinMode(LEDVEL3,OUTPUT);
  pinMode(LEDPID,OUTPUT);
  pinMode(GDRIVER,OUTPUT);
  digitalWrite(LEDVEL0,1);
  digitalWrite(LEDVEL1,1);
  digitalWrite(LEDVEL2,1);
  digitalWrite(LEDVEL3,1);
  digitalWrite(LEDPID,1);
  analogWrite(E1A,0);
  analogWrite(E2A,0);
}

```

```

analogWrite(E1B,0);
analogWrite(E2B,0);
digitalWrite(GDRIVER,0);
error = ps2x.config_gamepad(30,34,32,33, false, false); //define los pines en el orden:
clock, command, attention, data, pressure?, rumble?
//inicializando variables
error = 0;
type = 0;
JDX = 50;
JIX = 50;
JIY = 50;
velrefj = 0;
anterior1 = 0;
deltapulso1 = 0;
deltatiempo1 = 0;
tiemponuevo1 = 0;
tiempoviejo1 = 0;
nuevapos1 = 0;
newsignoref1 = 0;
anterior2 = 0;
deltapulso2 = 0;
deltatiempo2 = 0;
tiemponuevo2 = 0;
tiempoviejo2 = 0;
nuevapos2 = 0;
anterior3 = 0;
deltapulso3 = 0;
deltatiempo3 = 0;
tiemponuevo3 = 0;
tiempoviejo3 = 0;
nuevapos3 = 0;
anterior4 = 0;
deltapulso4 = 0;
deltatiempo4 = 0;
tiemponuevo4 = 0;
tiempoviejo4 = 0;
nuevapos4 = 0;
radio = 1;
largo = 0.5;
ancho = 0.5;
velrefX = 0;
velrefY = 0;
velrefZ = 0;
pesoX = 0;
pesoY = 0;
pesoZ = 0;

```

```

inicio = 0;
cambiogiro = 0;
cambiogiro1 = 0;
cambiogiro2 = 0;
cambiogiro3 = 0;
cambiogiro4 = 0;
OMNI = 1;           //El usuario selecciona la plataforma
SampleTime0 = 200;
res1 = 14.648;
res2 = 150;
wMax1 = 60;        //Velocidad maxima para OMNI1
wMax2 = 1450;
wMin1 = 9.4;      //Velocidad minima para OMNI1
wMin2 = 340;
Liminfpwm1 = 100; //Valor mínimo en pwm para OMNI1
Liminfpwm2 = 60;
Limsuppwm1 = 255; //Valor máximo en pwm para OMNI1
Limsuppwm2 = 240;
lastTime0 = 0;
interval1 = 200;
interval2 = 500;
wrefrpm11 = 45;
wrefrpm21 = 50;
wrefrpm12 = 400; //estaba en 600, pero era demasiado rapido
wrefrpm22 = 450; //estaba en 825
wrefrpm32 = 500; //estaba en 1000
wrefrpm42 = 550; //estaba en 1260
//El usuario selecciona los valores de los parámetros del PID dependiendo de la
plataforma
/* //Valores de kp y ki de Matlab para OMNI1 tomadas con 25 muestras mayo 7 del
motor3
//para motor 1
kp1N = 0.229;
ki1N = 0.063;
kd1N = 0;
kp1S = 0.421;
ki1S = 0.148;
kd1S = 0;
//para motor2
kp2N = 0.227;
ki2N = 0.053;
kd2N = 0;
kp2S = 1.627;
ki2S = 0.181;
kd2S = 0;
//para motor3

```

```

kp3N = 0.204;
ki3N = 0.048;
kd3N = 0;
kp3S = 0.258;
ki3S = 0.091;
kd3S = 0;
//para motor4
kp4N = 0.624;
ki4N = 0.314;
kd4N = 0;
kp4S = 0.600;
ki4S = 0.330;
kd4S = 0;*/
//Valores de kp y ki de Matlab el 8 de Mayo para Motor 3 OMNI2
kp1N = 0.313;
ki1N = 0.893;
kd1N = 0;
kp1S = 0.044;
ki1S = 0.443;
kd1S = 0;
//para motor2
kp2N = 0.071;
ki2N = 0.680;
kd2N = 0;
kp2S = 0.056;
ki2S = 0.555;
kd2S = 0;
//para motor3
kp3N = 0.174;
ki3N = 1.741;
kd3N = 0;
kp3S = 0.192;
ki3S = 1.924;
kd3S = 0;
//para motor4
kp4N = 0.106;
ki4N = 1.056;
kd4N = 0;
kp4S = 0.063;
ki4S = 0.633;
kd4S = 0;
}

void loop()
{
//se inician las variables de acuerdo con la plataforma

```

```

if (inicio == 0)
{
ki1N = ki1N*SampleTime0;
ki1S = ki1S*SampleTime0;
ki2N = ki2N*SampleTime0;
ki2S = ki2S*SampleTime0;
ki3N = ki3N*SampleTime0;
ki3S = ki3S*SampleTime0;
ki4N = ki4N*SampleTime0;
ki4S = ki4S*SampleTime0;
kd1N = kd1N/SampleTime0;
kd1S = kd1S/SampleTime0;
kd2N = kd2N/SampleTime0;
kd2S = kd2S/SampleTime0;
kd3N = kd3N/SampleTime0;
kd3S = kd3S/SampleTime0;
kd4N = kd4N/SampleTime0;
kd4S = kd4S/SampleTime0;
lazocerrado = 0;
cambiogiro1 = 0;
cambiogiro2 = 0;
cambiogiro3 = 0;
cambiogiro4 = 0;
inicio = 1;
if (OMNI == 1)
{
wMax = wMax1;
wMin = wMin1;
res = res1;
interval = interval1;
Limsuppwm = Limsuppwm1;
Liminfpwm = Liminfpwm1;
digitalWrite(LEDPID,0);
digitalWrite(LEDVEL0,0);
}
if (OMNI == 2)
{
wMax = wMax2;
wMin = wMin2;
res = res2;
interval = interval2;
Limsuppwm = Limsuppwm2;
Liminfpwm = Liminfpwm2;
digitalWrite(LEDPID,1);
digitalWrite(LEDVEL0,0);
}
}

```

```

}
//lee el control PS2
ps2x.read_gamepad();
//para permitir el paso de la alimentación a los motores debe presionarse el boton rosado
del PS2
if(ps2x.ButtonPressed(PSB_PINK)) { digitalWrite(GDRIVER,1); }
//para detener el paso de la alimentación a los motores debe presionarse el boton rojo del
PS2
if(ps2x.ButtonPressed(PSB_RED)) { digitalWrite(GDRIVER,0); }
//para activar el PID
if(ps2x.ButtonPressed(PSB_R1))
{
lazocerrado = 1;
newAuto = AUTOMATIC;
if(newAuto != inAuto)
{
IniciePID1();
IniciePID2();
IniciePID3();
IniciePID4();
}
inAuto = newAuto;
if ( OMNI == 1 ) { digitalWrite(LEDPID,1); }
if ( OMNI == 2 ) { digitalWrite(LEDPID,0); }
}
//para desactivar el PID
if(ps2x.ButtonPressed(PSB_L1))
{
lazocerrado = 0;
inAuto = MANUAL;
if ( OMNI == 1 ) { digitalWrite(LEDPID,0); }
if ( OMNI == 2 ) { digitalWrite(LEDPID,1); }
}
//para seleccionar velocidad y manejo de los LEDs indicadores
if (OMNI == 1)
{
//si se presiona el boton verde aumenta la velocidad de referencia y se enciende el led 0
if(ps2x.ButtonPressed(PSB_GREEN))
{
velrefj=velrefj+1;
if(velrefj==2) { velrefj=1; }
digitalWrite(LEDVEL0,1);
digitalWrite(LEDVEL1,0);
digitalWrite(LEDVEL2,0);
digitalWrite(LEDVEL3,0);
}
}

```

```

//si se presiona el boton azul disminuye la velocidad de referencia y se apaga el led 0
if(ps2x.ButtonPressed(PSB_BLUE))
{
    digitalWrite(LEDVEL0,0);
    digitalWrite(LEDVEL1,0);
    digitalWrite(LEDVEL2,0);
    digitalWrite(LEDVEL3,0);
    if(velrefj==0) { velrefj=0; }
    else { velrefj=velrefj-1;}
}
//equivalente en valor pwm de la velocidad de referencia
if (velrefj==0) { wrefrpm=wrefrpm11; }
if (velrefj==1) { wrefrpm=wrefrpm21; }
}
if (OMNI == 2)
{
    //para ajustar la velocidad de referencia aumentando
    if(ps2x.ButtonPressed(PSB_GREEN))
    {
        velrefj=velrefj+1;
        if(velrefj==4) { velrefj=3; }
    }
    //para ajustar la velocidad de referencia disminuyendo
    if(ps2x.ButtonPressed(PSB_BLUE))
    {
        if(velrefj==0) { velrefj=0; }
        else { velrefj=velrefj-1;}
    }
    if (velrefj==0) { wrefrpm=wrefrpm12; }
    if (velrefj==1) { wrefrpm=wrefrpm22; }
    if (velrefj==2) { wrefrpm=wrefrpm32; }
    if (velrefj==3) { wrefrpm=wrefrpm42; }
    //para manejo de los LEDs indicadores de velocidad
    if(wrefrpm==wrefrpm42)
    {
        digitalWrite(LEDVEL0,0);
        digitalWrite(LEDVEL1,0);
        digitalWrite(LEDVEL2,0);
        digitalWrite(LEDVEL3,0);
    }
    if(wrefrpm==wrefrpm32)
    {
        digitalWrite(LEDVEL0,0);
        digitalWrite(LEDVEL1,0);
        digitalWrite(LEDVEL2,0);
        digitalWrite(LEDVEL3,1);
    }
}

```

```

}
if(wrefrpm==wrefrpm22)
{
digitalWrite(LEDVEL0,0);
digitalWrite(LEDVEL1,0);
digitalWrite(LEDVEL2,1);
digitalWrite(LEDVEL3,1);
}
if(wrefrpm==wrefrpm12)
{
digitalWrite(LEDVEL0,0);
digitalWrite(LEDVEL1,1);
digitalWrite(LEDVEL2,1);
digitalWrite(LEDVEL3,1);
}
}

//lee los valores de los joystick de PS2 y determina las velocidades de cada motor
JIY=map((ps2x.Analog(PSS_LY)),0,255,0,100);
JIX=map((ps2x.Analog(PSS_LX)),0,255,0,100);
JDX=map((ps2x.Analog(PSS_RX)),0,255,0,100);
JoyVehXY(); //Devuelve velrefX y velrefY
JoyVehZ(); //Devuelve velrefZ
VehMot(); //Devuelve wref(1,2,3,4) y signoref(1,2,3,4)

//para determinar cada cuanto se calcula los valores de velocidades y salida PWM de cada
motor
now0 = millis();
timeChange0 = (now0-lastTime0);
if (timeChange0 >= SampleTime0)
{
//para medir velocidad de cada motor
now1 = millis();
Velpro1();
Velpro2();
Velpro3();
Velpro4();
if(lazocerrado == 1)
{
if(wref1a == 0)
{
w1 = 0;
ITermN1 = 0;
ITermS1 = 0;
lastwref1a = 0;
newwsalida1pwm = 0;

```

```

}
else
{
  Compute1();
  newwsalida1pwm = map(w1,wMin,wMax,Liminfpwm,Limsuppwm);
}
if(wref2a == 0)
{
  w2 = 0;
  ITermN2 = 0;
  ITermS2 = 0;
  lastwref2a = 0;
  newwsalida2pwm = 0;
}
else
{
  Compute2();
  newwsalida2pwm = map(w2,wMin,wMax,Liminfpwm,Limsuppwm);
}
if(wref3a == 0)
{
  w3 = 0;
  ITermN3 = 0;
  ITermS3 = 0;
  lastwref3a = 0;
  newwsalida3pwm = 0;
}
else
{
  Compute3();
  newwsalida3pwm = map(w3,wMin,wMax,Liminfpwm,Limsuppwm);
}
if(wref4a == 0)
{
  w4 = 0;
  ITermN4 = 0;
  ITermS4 = 0;
  lastwref4a = 0;
  newwsalida4pwm = 0;
}
else
{
  Compute4();
  newwsalida4pwm = map(w4,wMin,wMax,Liminfpwm,Limsuppwm);
}
}

```

```

//si no esta activado el PID, los valores del PWM son las velocidades de referencia
if(lazocerrado == 0)
{
  if (wref1a == 0) { newwsalida1pwm = 0; }
  else { newwsalida1pwm = map(wref1a,wMin,wMax,Liminfpwm,Limsuppwm); }
  if (wref2a == 0) { newwsalida2pwm = 0; }
  else { newwsalida2pwm = map(wref2a,wMin,wMax,Liminfpwm,Limsuppwm); }
  if (wref3a == 0) { newwsalida3pwm = 0; }
  else { newwsalida3pwm = map(wref3a,wMin,wMax,Liminfpwm,Limsuppwm); }
  if (wref4a == 0) { newwsalida4pwm = 0; }
  else { newwsalida4pwm = map(wref4a,wMin,wMax,Liminfpwm,Limsuppwm); }
}
lastTime0 = now0;
}
//para dar un tiempo de espera si hay cambio de sentido de giro
if(newsignoref1 == antsignoref1) { cambiogiro1=0; } else {
digitalWrite(M1A,newsignoref1); cambiogiro1 = 1; }
if(newsignoref2 == antsignoref2) { cambiogiro2=0; } else {
digitalWrite(M2A,newsignoref2); cambiogiro2 = 1; }
if(newsignoref3 == antsignoref3) { cambiogiro3=0; } else {
digitalWrite(M1B,newsignoref3); cambiogiro3 = 1; }
if(newsignoref4 == antsignoref4) { cambiogiro4=0; } else {
digitalWrite(M2B,newsignoref4); cambiogiro4 = 1; }
cambiogiro = cambiogiro1 + cambiogiro2 + cambiogiro3 + cambiogiro4;
if (cambiogiro != 0)
{
  now2 = millis();
  previoTime = now2;
  for(; now2 - previoTime <= interval;) { now2 = millis(); }
}
//escribe en los puertos correspondientes a sentido de giro
antsignoref1=newsignoref1;
antsignoref2=newsignoref2;
antsignoref3=newsignoref3;
antsignoref4=newsignoref4;

//solo se escribe en la salida del PWM de los motores cuando hay cambio
if(wsalida1pwm != newwsalida1pwm)
{
  analogWrite(E1A,newwsalida1pwm);
  wsalida1pwm = newwsalida1pwm;
}
if(wsalida2pwm != newwsalida2pwm)
{
  analogWrite(E2A,newwsalida2pwm);
  wsalida2pwm = newwsalida2pwm;
}

```

```

}
if(wsalida3pwm != newwsalida3pwm)
{
  analogWrite(E1B,newwsalida3pwm);
  wsalida3pwm = newwsalida3pwm;
}
if(wsalida4pwm != newwsalida4pwm)
{
  analogWrite(E2B,newwsalida4pwm);
  wsalida4pwm = newwsalida4pwm;
}
}
//Funciones para la lectura de los encoder
void Encoder1()
{
  nuevapos1 = Enc1.read();
  tiempnuevo1=millis();
}
void Encoder2()
{
  nuevapos2 = Enc2.read();
  tiempnuevo2 = millis();
}
void Encoder3()
{
  nuevapos3 = Enc3.read();
  tiempnuevo3 = millis();
}
void Encoder4()
{
  nuevapos4 = Enc4.read();
  tiempnuevo4 = millis();
}
//Función para convertir JoyStick izquierdo a velocidad de vehiculo en X y Y
void JoyVehXY()
{
  if((JIX >= 0 && JIX < 33) && (JIY >=0 && JIY < 33)) //Region
  suroeste
  {
    pesoX=-1;
    pesoY=1;
  }
  if((JIX >= 0 && JIX < 33) && (JIY >= 33 && JIY < 66)) //Region
  oeste
  {
    pesoX=-2;

```

```

    pesoY=0;
  }
  if((JIX >= 0 && JIX < 33) && (JIY > 66 && JIY <= 100)) //Region
noroeste
  {
    pesoX=-1;
    pesoY=-1;
  }
  if((JIX >= 33 && JIX < 66) && (JIY >= 0 && JIY < 33)) //Region
sur
  {
    pesoX=0;
    pesoY=2;
  }
  if((JIX >= 33 && JIX < 66) && (JIY >= 33 && JIY < 66)) //Region detenido
  {
    pesoX=0;
    pesoY=0;
  }
  if((JIX >= 33 && JIX < 66) && (JIY > 66 && JIY <= 100)) //Region
norte
  {
    pesoX=0;
    pesoY=-2;
  }
  if((JIX > 66 && JIX <= 100) && (JIY >= 0 && JIY < 33)) //Region
sureste
  {
    pesoX=1;
    pesoY=1;
  }
  if((JIX > 66 && JIX <= 100) && (JIY >= 33 && JIY < 66)) //Region
este
  {
    pesoX=2;
    pesoY=0;
  }
  if((JIX > 66 && JIX <= 100) && (JIY > 66 && JIY <= 100)) //Region
noreste
  {
    pesoX=1;
    pesoY=-1;
  }
  velrefX = -(wrefrpm) * pesoX * 0.5;
  velrefY = wrefrpm * pesoY * 0.5;
}

```

```

//Función para convertir JoyStick derecho a velocidad de vehiculo en Z
void JoyVehZ()
{
if (JDX < 33) { pesoZ=1; }
if ((JDX >= 33) && (JDX <= 66)) { pesoZ=0; }
if (JDX > 66) { pesoZ=-1; }
velrefZ = wrefrpm * pesoZ;
}
//Función para convertir velocidad de vehiculo a velocidades de motores
void VehMot()
{
//Entrega la velocidad de referencia para el motor 1
wref1 = (velrefY + velrefX + ((largo + ancho) * velrefZ));
if (wref1 == 0) { wref1a = 0; newsignoref1 = antsignoref1; }
else
{
wref1a = abs(wref1);
if (wref1a == wref1) { newsignoref1 = 0; }
else { newsignoref1 = 1; }
}
//Entrega la velocidad de referencia para el motor 2
wref2 = (velrefY - velrefX - ((largo + ancho) * velrefZ));
if (wref2 == 0) { wref2a = 0; newsignoref2 = antsignoref2; }
else
{
wref2a = abs(wref2);
if (wref2a == wref2) { newsignoref2 = 1; }
else { newsignoref2 = 0; }
}
//Entrega la velocidad de referencia para el motor 3
wref3 = (velrefY - velrefX + ((largo + ancho) * velrefZ));
if (wref3 == 0) { wref3a = 0; newsignoref3 = antsignoref3; }
else
{
wref3a = abs(wref3);
if (wref3a == wref3) { newsignoref3 = 0; }
else { newsignoref3 = 1; }
}
//Entrega la velocidad de referencia para el motor 4
wref4 = (velrefY + velrefX - ((largo + ancho) * velrefZ));
if (wref4 == 0) { wref4a = 0; newsignoref4 = antsignoref4; }
else
{
wref4a = abs(wref4);
if (wref4a == wref4) { newsignoref4 = 1; }
else { newsignoref4 = 0; }
}
}

```

```

}
}
//Funciones para calcular la velocidad de los motores
void Velpro1()
{
if (nuevapos1 != anterior1 && tienponuevo1 != tiempoviejo1)
{
deltapulso1 = ((nuevapos1 - anterior1));
deltatiempo1 = (tienponuevo1 - tiempoviejo1);
anterior1 = nuevapos1;
tiempoviejo1 = tienponuevo1;
vel1 = ((deltapulso1*res)/deltatiempo1);
vel1a = abs(vel1);
}
else { if (nuevapos1 == anterior1 && now1 > (tienponuevo1+200)) { vel1a=0; }}
if(vel1a >= wMax) { vel1a = wMax; }
if(vel1a <= 0) { vel1a = 0; }
}
void Velpro2()
{
if (nuevapos2 != anterior2 && tienponuevo2 != tiempoviejo2)
{
deltapulso2 = ((nuevapos2 - anterior2));
deltatiempo2 = (tienponuevo2 - tiempoviejo2);
anterior2 = nuevapos2;
tiempoviejo2 = tienponuevo2;
vel2 = ((deltapulso2*res)/deltatiempo2);
vel2a = abs(vel2);
}
else { if (nuevapos2 == anterior2 && now1 > (tienponuevo2+200)) { vel2a=0; }}
if(vel2a > wMax) { vel2a = wMax; }
if(vel2a < 0) { vel2a = 0; }
}
void Velpro3()
{
if (nuevapos3 != anterior3 && tienponuevo3 != tiempoviejo3)
{
deltapulso3 = ((nuevapos3 - anterior3));
deltatiempo3 = (tienponuevo3 - tiempoviejo3);
anterior3 = nuevapos3;
tiempoviejo3 = tienponuevo3;
vel3 = ((deltapulso3*res)/deltatiempo3);
vel3a = abs(vel3);
}
else { if (nuevapos3 == anterior3 && now1 > (tienponuevo3+200)) { vel3a=0; }}
if(vel3a > wMax) { vel3a = wMax; }
}

```

```

if(vel3a < 0) { vel3a = 0; }
}
void Velpro4()
{
if (nuevapos4 != anterior4 && tiemponuevo4 != tiempoviejo4)
{
deltapulso4 = ((nuevapos4 - anterior4));
deltatiempo4 = (tiemponuevo4 - tiempoviejo4);
anterior4 = nuevapos4;
tiempoviejo4 = tiemponuevo4;
vel4 = ((deltapulso4*res)/deltatiempo4);
vel4a = abs(vel4);
}
else { if (nuevapos4 == anterior4 && now1 > (tiemponuevo4+200)) { vel4a=0; }}
if(vel4a > wMax) { vel4a = wMax; }
if(vel4a < 0) { vel4a = 0; }
}
//Funcion para iniciar el PID
void IniciePID1()
{
lastwref1a = wref1a;
ITermN1 = w1;
ITermS1 = w1;
if(ITermN1>wMax) { ITermN1 = wMax; }
if(ITermS1>wMax) { ITermS1 = wMax; }
if(ITermN1<0) { ITermN1 = 0; }
if(ITermS1<0) { ITermS1 = 0; }
}
void IniciePID2()
{
lastwref2a = wref2a;
ITermN2 = w2;
ITermS2 = w2;
if(ITermN2>wMax) { ITermN2 = wMax; }
if(ITermS2>wMax) { ITermS2 = wMax; }
if(ITermN2<0) { ITermN2 = 0; }
if(ITermS2<0) { ITermS2 = 0; }
}
void IniciePID3()
{
lastwref3a = wref3a;
ITermN3 = w3;
ITermS3 = w3;
if(ITermN3>wMax) { ITermN3 = wMax; }
if(ITermS3>wMax) { ITermS3 = wMax; }
if(ITermN3<0) { ITermN3 = 0; }
}

```

```

    if(ITermS3<0) { ITermS3 = 0; }
}
void IniciePID4()
{
    lastwref4a = wref4a;
    ITermN4 = w4;
    ITermS4 = w4;
    if(ITermN4>wMax) { ITermN4 = wMax; }
    if(ITermS4>wMax) { ITermS4 = wMax; }
    if(ITermN4<0) { ITermN4 = 0; }
    if(ITermS4<0) { ITermS4 = 0; }
}
//Funciones para calcular el PID de cada motor
void Compute1()
{
    if(inAuto == false) return; //si esta en modo manual se devuelve al loop principal
    error1 = (wref1a - vel1a);
    Liminf = wMin - wref1a;
    Limsup = wMax - wref1a;
    dwref1a = (wref1a - lastwref1a);
    if (newsignoref1 == 0)
    {
        ITermN1 += (ki1N * error1);
        if (ITermN1 > wMax) { ITermN1 = wMax; }
        if (ITermN1 < 0) { ITermN1 = 0; }
        w1 = kp1N * error1 + ITermN1 - kd1N * dwref1a;
    }
    else
    {
        ITermS1 += (ki1S * error1);
        if (ITermS1 > wMax) { ITermS1 = wMax; }
        if (ITermS1 < 0) { ITermS1 = 0; }
        w1 = kp1S * error1 + ITermS1 - kd1S * dwref1a;
    }
    if (w1 > Limsup) { w1 = Limsup; }
    if (w1 < Liminf) { w1 = Liminf; }
    w1 = wref1a + w1;
    lastwref1a = wref1a;
}
void Compute2()
{
    if(inAuto == false) return;
    error2 = (wref2a - vel2a);
    Liminf = wMin - wref2a;
    Limsup = wMax - wref2a;
    dwref2a = (wref2a - lastwref2a);
}

```

```

if (newsignoref2 == 1)
{
  ITermN2 += (ki2N * error2);
  if (ITermN2 > wMax) { ITermN2 = wMax; }
  if (ITermN2 < 0) { ITermN2 = 0; }
  w2 = (kp2N * error2 + ITermN2 - kd2N * dwref2a);
}
else
{
  ITermS2 += (ki2S * error2);
  if (ITermS2 > wMax) { ITermS2 = wMax; }
  if (ITermS2 < 0) { ITermS2 = 0; }
  w2 = (kp2S * error2 + ITermS2 - kd2S * dwref2a);
}
if (w2 > Limsup) { w2 = Limsup; }
if (w2 < Liminf) { w2 = Liminf; }
w2 = wref2a + w2;
lastwref2a = wref1a;
}
void Compute3()
{
  if(inAuto == false) return;
  error3 = (wref3a - vel3a);
  Liminf = wMin - wref3a;
  Limsup = wMax - wref3a;
  dwref3a = (wref3a - lastwref3a);
  if (newsignoref3 == 0)
  {
    ITermN3 += (ki3N * error3);
    if (ITermN3 > wMax) { ITermN3 = wMax; }
    if (ITermN3 < 0) { ITermN3 = 0; }
    w3 = (kp3N * error3 + ITermN3 - kd3N * dwref3a);
  }
  else
  {
    ITermS3 += (ki3S * error3);
    if (ITermS3 > wMax) { ITermS3 = wMax; }
    if (ITermS3 < 0) { ITermS3 = 0; }
    w3 = (kp3S * error3 + ITermS3 - kd3S * dwref3a);
  }
  if (w3 > Limsup) { w3 = Limsup; }
  if (w3 < Liminf) { w3 = Liminf; }
  w3 = wref3a + w3;
  lastwref3a = wref3a;
}
void Compute4()

```

```

{
  if(inAuto == false) return;
  error4 = (wref4a - vel4a);
  Liminf = wMin - wref4a;
  Limsup = wMax - wref4a;
  dwref4a = (wref4a - lastwref4a);
  if (newsignoref4 == 1)
  {
    ITermN4 += (ki4N * error4);
    if (ITermN4 > wMax) { ITermN4 = wMax; }
    if (ITermN4 < 0) { ITermN4 = 0; }
    w4 = (kp4N * error4 + ITermN4 - kd4N * dwref4a);
  }
  else
  {
    ITermS4 += (ki4S * error4);
    if (ITermS4 > wMax) { ITermS4 = wMax; }
    if (ITermS4 < 0) { ITermS4 = 0; }
    w4 = (kp4S * error4 + ITermS4 - kd4S * dwref4a);
  }
  if (w4 > Limsup) { w4 = Limsup; }
  if (w4 < Liminf) { w4 = Liminf; }
  w4 = wref4a + w4;
  lastwref4a = wref4a;
}

```

Programa arduino: 20150514Controlador

Cambios en las funciones del PID para limitar el rango de los valores de salida del PID, se utilizó en OMNI2 durante las pruebas.

```

//Funciones para calcular el PID de cada motor
void Compute1()
{
  if(inAuto == false) return; //si esta en modo manual se devuelve al loop principal
  error1 = (wref1a - vel1a);
  Liminf = wref1a*85/100;
  Limsup = wref1a*115/100;
  dwref1a = (wref1a - lastwref1a);
  if (newsignoref1 == 0)
  {
    ITermN1 += (ki1N * error1);
    if (ITermN1 > wMax) { ITermN1 = wMax; }
    if (ITermN1 < 0) { ITermN1 = 0; }
    w1 = kp1N * error1 + ITermN1 - kd1N * dwref1a;
  }
}

```

```

}
else
{
  ITermS1 += (ki1S * error1);
  if (ITermS1 > wMax) { ITermS1 = wMax; }
  if (ITermS1 < 0) { ITermS1 = 0; }
  w1 = kp1S * error1 + ITermS1 - kd1S * dwref1a;
}
w1 = wref1a + w1;
if (w1 > Limsup) { w1 = Limsup; }
if (w1 < Liminf) { w1 = Liminf; }
lastwref1a = wref1a;
}
void Compute2()
{
  if(inAuto == false) return;
  error2 = (wref2a - vel2a);
  Liminf = wref2a*85/100;
  Limsup = wref2a*115/100;
  dwref2a = (wref2a - lastwref2a);
  if (newsignoref2 == 1)
  {
    ITermN2 += (ki2N * error2);
    if (ITermN2 > wMax) { ITermN2 = wMax; }
    if (ITermN2 < 0) { ITermN2 = 0; }
    w2 = (kp2N * error2 + ITermN2 - kd2N * dwref2a);
  }
  else
  {
    ITermS2 += (ki2S * error2);
    if (ITermS2 > wMax) { ITermS2 = wMax; }
    if (ITermS2 < 0) { ITermS2 = 0; }
    w2 = (kp2S * error2 + ITermS2 - kd2S * dwref2a);
  }
  w2 = wref2a + w2;
  if (w2 > Limsup) { w2 = Limsup; }
  if (w2 < Liminf) { w2 = Liminf; }
  lastwref2a = wref1a;
}
void Compute3()
{
  if(inAuto == false) return;
  error3 = (wref3a - vel3a);
  Liminf = wref3a*85/100;
  Limsup = wref3a*115/100;
  dwref3a = (wref3a - lastwref3a);
}

```

```

if (newsignoref3 == 0)
{
  ITermN3 += (ki3N * error3);
  if (ITermN3 > wMax) { ITermN3 = wMax; }
  if (ITermN3 < 0) { ITermN3 = 0; }
  w3 = (kp3N * error3 + ITermN3 - kd3N * dwref3a);
}
else
{
  ITermS3 += (ki3S * error3);
  if (ITermS3 > wMax) { ITermS3 = wMax; }
  if (ITermS3 < 0) { ITermS3 = 0; }
  w3 = (kp3S * error3 + ITermS3 - kd3S * dwref3a);
}
w3 = wref3a + w3;
if (w3 > Limsup) { w3 = Limsup; }
if (w3 < Liminf) { w3 = Liminf; }
lastwref3a = wref3a;
}
void Compute4()
{
  if(inAuto == false) return;
  error4 = (wref4a - vel4a);
  Liminf = wref4a*85/100;
  Limsup = wref4a*115/100;
  dwref4a = (wref4a - lastwref4a);
  if (newsignoref4 == 1)
  {
    ITermN4 += (ki4N * error4);
    if (ITermN4 > wMax) { ITermN4 = wMax; }
    if (ITermN4 < 0) { ITermN4 = 0; }
    w4 = (kp4N * error4 + ITermN4 - kd4N * dwref4a);
  }
  else
  {
    ITermS4 += (ki4S * error4);
    if (ITermS4 > wMax) { ITermS4 = wMax; }
    if (ITermS4 < 0) { ITermS4 = 0; }
    w4 = (kp4S * error4 + ITermS4 - kd4S * dwref4a);
  }
  w4 = wref4a + w4;
  if (w4 > Limsup) { w4 = Limsup; }
  if (w4 < Liminf) { w4 = Liminf; }
  lastwref4a = wref4a;
}

```

Anexo tres: Programa recolección de datos

En este caso se muestra el programa cuando está habilitado para tomar los datos del subsistema correspondiente al motor3. Si se desea tomar los datos de otro subsistema, deben hacerse los cambios en las líneas del programa indicadas con el texto: Dependiente del subsistema.

```
//Este programa permite tomar los datos para sacar los parametros del PID de OMNI1 y OMNI2
```

```
//Variable para seleccionar la plataforma y para iniciar el programa de acuerdo con //la plataforma elegida
```

```
int tramo;
```

```
int conteo;
```

```
int OMNI;
```

```
int inicio;
```

```
unsigned int c;
```

```
int direccion;
```

```
//Variables que depende de la plataforma OMNI1 o OMNI2
```

```
//En OMNI1 la resolucio del encoder es 1024 ppp, por lo tanto
```

```
//res es 60000/(4*1024) y la w máxima de los motores es 60 rpm
```

```
//En OMNI2 la resolucio del encoder es 100 ppp, por lo tanto
```

```
//res es 60000/(4*100) y la w máxima de los motores es 1450 rpm
```

```
double res;
```

```
double res1;
```

```
double res2;
```

```
double wMax;
```

```
double wMax1;
```

```
double wMax2;
```

```
//Velocidades de referencia en rpm y en pmw
```

```
int vel1rpm;
```

```
int vel2rpm;
```

```
int vel3rpm;
```

```
int vel4rpm;
```

```
int vel5rpm;
```

```
int vel6rpm;
```

```
int vel1pwm;
```

```
int vel2pwm;
```

```
int vel3pwm;
```

```
int vel4pwm;
```

```
int vel5pwm;
```

```
int vel6pwm;
```

```
unsigned int i;
```

```
unsigned long vectortiempo[500];
```

```
//Variables de los encoders
```

```

//Variables del encoder1
#include <Encoder.h>
float anterior1;
float deltapulso1;
float deltatiempo1;
float tiemponuevo1;
float tiempoviejo1;
float nuevapos1;
float vectorvel1[500];
float vel1;
float vel1a;
//Variables del encoder2
Encoder Enc1(2,9);
float anterior2;
float deltapulso2;
float deltatiempo2;
float tiemponuevo2;
float tiempoviejo2;
float nuevapos2;
float vectorvel2[500];
float vel2;
float vel2a;
Encoder Enc2(3,10);
//Variables del encoder3
float anterior3;
float deltapulso3;
float deltatiempo3;
float tiemponuevo3;
float tiempoviejo3;
float nuevapos3;
float vectorvel3[500];
float vel3;
float vel3a;
Encoder Enc3(20,11);
//Variables del encoder4
float anterior4;
float deltapulso4;
float deltatiempo4;
float tiemponuevo4;
float tiempoviejo4;
float nuevapos4;
float vectorvel4[500];
float vel4;
float vel4a;
Encoder Enc4(21,8);
//Variables para determinar la frecuencia de escritura al vector de velocidad

```

```

unsigned long now0;
int timeChange0;
int SampleTime0;
unsigned long lastTime0;
//Variables para determinar la frecuencia de cambio en las veocidades de referencia
float now1;
int timeChange1;
int SampleTime1;
unsigned long lastTime1;
unsigned long now2;
//Variables y pines correspondientes a las salidas PWM y sentido de giro de los motores
int E1A = 5;
int E2A = 6;
int M1A = 4;
int M2A = 7;
int E1B = 44;
int E2B = 45;
int M1B = 47;
int M2B = 46;
int GDRIVER = 13;
int signoref1;
int signoref2;
int signoref3;
int signoref4;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  pinMode(2,INPUT);
  pinMode(3,INPUT);
  pinMode(8,INPUT);
  pinMode(9,INPUT);
  pinMode(10,INPUT);
  pinMode(11,INPUT);
  pinMode(20,INPUT);
  pinMode(21,INPUT);
  pinMode(GDRIVER,OUTPUT);
  //attachInterrupt (0,Encoder1,CHANGE); //DEPENDE SUBSISTEMA
  //attachInterrupt (1,Encoder2,CHANGE);
  attachInterrupt (3,Encoder3,CHANGE);
  //attachInterrupt (2,Encoder4,CHANGE);
  pinMode(E1A,OUTPUT);
  pinMode(E2A,OUTPUT);
  pinMode(M1A,OUTPUT);
  pinMode(M2A,OUTPUT);

```

```
pinMode(M1B,OUTPUT);
pinMode(M2B,OUTPUT);
pinMode(E1B,OUTPUT);
pinMode(E2B,OUTPUT);
analogWrite(E1A,0);
analogWrite(E2A,0);
analogWrite(E1B,0);
analogWrite(E2B,0);
digitalWrite(M1A,1);
digitalWrite(M2A,0);
digitalWrite(M1B,1);
digitalWrite(M2B,0);
digitalWrite(GDRIVER,0);
anterior1 = 0;
deltapulso1 = 0;
deltatiempo1 = 0;
tiemponuevo1 = 0;
tiempoviejo1 = 0;
nuevapos1 = 0;
anterior2 = 0;
deltapulso2 = 0;
deltatiempo2 = 0;
tiemponuevo2 = 0;
tiempoviejo2 = 0;
nuevapos2 = 0;
anterior3 = 0;
deltapulso3 = 0;
deltatiempo3 = 0;
tiemponuevo3 = 0;
tiempoviejo3 = 0;
nuevapos3 = 0;
anterior4 = 0;
deltapulso4 = 0;
deltatiempo4 = 0;
tiemponuevo4 = 0;
tiempoviejo4 = 0;
nuevapos4 = 0;
inicio=0;
OMNI = 1;
SampleTime0 = 15;
lastTime0 = 0;
SampleTime1 = 3000;
lastTime1 = 0;
res1 = 14.648;
res2 = 150;
wMax1 = 55;
```

```

wMax2 = 1450;
i = 0;
c = 0;
direccion = 0;
}

void loop()
{
//se inician las variables de acuerdo con la plataforma
if (inicio == 0)
{
//se deja un delay de 1 segundo y arrancan los motores
if (OMNI == 1)
{
wMax = wMax1;
res = res1;
vel1rpm = 40;
vel2rpm = 40;
vel3rpm = 50;
vel4rpm = 55;
vel5rpm = 55;
}
if (OMNI == 2)
{
wMax = wMax2;
res = res2;
vel1rpm = 600;
vel2rpm = 825;
vel3rpm = 1000;
vel4rpm = 1260;
vel5rpm = 1450;
}
inicio = 1;
i = 0;
conteo = 0;
if(direccion == 0)
{
//En OMNI1 al norte 0, al sur 1, para Motores 1 y 3 y al norte 1, al sur 0, para Motores
2 y 4
//En OMNI2 al norte 1, al sur 0, para Motores 1 y 3 y al norte 0, al sur 1, para Motores
2 y 4
signoref1 = 1;
signoref2 = 0;
signoref3 = 1;
signoref4 = 0;
}
}

```

```

if(direccion == 1)
{
  signoref1 = 0;
  signoref2 = 1;
  signoref3 = 0;
  signoref4 = 1;
}
//digitalWrite(M1A,signoref1);      //DEPENDE SUBSISTEMA
//digitalWrite(M2A,signoref2);
digitalWrite(M1B,signoref3);
//digitalWrite(M2B,signoref4);
delay(400);
vel1pwm = map(vel1rpm,0,wMax,0,255);
vel2pwm = map(vel2rpm,0,wMax,0,255);
vel3pwm = map(vel3rpm,0,wMax,0,255);
vel4pwm = map(vel4rpm,0,wMax,0,255);
vel5pwm = map(vel5rpm,0,wMax,0,255);
vel6pwm = map(vel6rpm,0,wMax,0,255);
digitalWrite(GDRIVER,1);
}
while(conteo<20)
{
  while(i<=320)
  {
    if (i<120) { tramo = 1;}
    if (i>=120 && i<170) { tramo = 2; }
    if (i>=170 && i<220) { tramo = 3; }
    if (i>=220 && i<270) { tramo = 4; }
    if (i>=270 && i<=320) { tramo = 5; }
    if(tramo == 1)
    {
      //analogWrite(E1A,vel1pwm);      //DEPENDE SUBSISTEMA
      //analogWrite(E2A,vel1pwm);
      analogWrite(E1B,vel1pwm);
      //analogWrite(E2B,vel1pwm);
    }
    if (tramo == 2)
    {
      //analogWrite(E1A,vel2pwm);      //DEPENDE SUBSISTEMA
      //analogWrite(E2A,vel2pwm);
      analogWrite(E1B,vel2pwm);
      //analogWrite(E2B,vel2pwm);
    }
    if(tramo == 3)
    {
      //analogWrite(E1A,vel3pwm);      //DEPENDE SUBSISTEMA

```

```

//analogWrite(E2A,vel3pwm);
analogWrite(E1B,vel3pwm);
//analogWrite(E2B,vel3pwm);
}
if (tramo == 4)
{
//analogWrite(E1A,vel4pwm);           //DEPENDE SUBSISTEMA
//analogWrite(E2A,vel4pwm);
analogWrite(E1B,vel4pwm);
//analogWrite(E2B,vel4pwm);
}
if (tramo == 5)
{
//analogWrite(E1A,vel5pwm);           //DEPENDE SUBSISTEMA
//analogWrite(E2A,vel5pwm);
analogWrite(E1B,vel5pwm);
//analogWrite(E2B,vel5pwm);
}
now0 = millis();
timeChange0 = (now0-lastTime0);
if (timeChange0 >= SampleTime0)
{
now1 = millis();
//VelM1();                             //DEPENDE SUBSISTEMA
//VelM2();
VelM3();
//VelM4();
//vectorvel1[i] = vel1a;                //DEPENDE SUBSISTEMA
//vectorvel2[i] = vel2a;
vectorvel3[i] = vel3a;
//vectorvel4[i] = vel4a;
vectortiempo[i] = millis();
lastTime0 = now0;
i++;
}
}
if (i==321)
{
//analogWrite(E1A,0);                   //DEPENDE SUBSISTEMA
//analogWrite(E2A,0);
analogWrite(E1B,0);
//analogWrite(E2B,0);
Serial.print(conteo);
Serial.print(" ");
Serial.print(tramo);
Serial.print(" ");

```

```

//Serial.println(signoref1);           //DEPENDE SUBSISTEMA
//Serial.println(signoref2);
Serial.println(signoref3);
//Serial.println(signoref4);
for (c=1;c<=320;c++)
{
//Serial.print(vectorvel1[c]);         //DEPENDE SUBSISTEMA
//Serial.print(vectorvel2[c]);
Serial.print(vectorvel3[c]);
//Serial.print(vectorvel4[c]);
Serial.print(" ");
Serial.println(vectortiempo[c]);
i = 0;
}
conteo++;
delay(4000);
}
}
if(conteo == 20 && direccion == 1)
{
inicio = 1;
i = 322;
}
if(conteo == 20 && direccion == 0)
{
inicio = 0;
direccion = 1;
}
}

//Funciones para la lectura de los encoder           DEPENDE SUBSISTEMA
/*void Encoder1()
{
nuevapos1 = Enc1.read();
tiemponuevo1=millis();
}
void Encoder2()
{
nuevapos2 = Enc2.read();
tiemponuevo2 = millis();
}*/
void Encoder3()
{
nuevapos3 = Enc3.read();
tiemponuevo3 = millis();
}*/

```

```

void Encoder4()
{
  nuevapos4 = Enc4.read();
  tiemponuevo4 = millis();
}*/
//Funciones para calcular la velocidad de los motores
void VelM1()
{
  if (nuevapos1 != anterior1 && tiemponuevo1 != tiempoviejo1)
  {
    delpulso1 = ((nuevapos1 - anterior1));
    deltatiempo1 = (tiemponuevo1 - tiempoviejo1);
    anterior1 = nuevapos1;
    tiempoviejo1 = tiemponuevo1;
    vel1 = ((delpulso1*res)/deltatiempo1);
    vel1a = abs(vel1);
  }
  else { if (nuevapos1 == anterior1 && now1 > (tiemponuevo1)) { vel1a=0; }}
  if(vel1a >= wMax) { vel1a = wMax; }
  if(vel1a <= 0) { vel1a = 0; }
}
void VelM2()
{
  if (nuevapos2 != anterior2 && tiemponuevo2 != tiempoviejo2)
  {
    delpulso2 = ((nuevapos2 - anterior2));
    deltatiempo2 = (tiemponuevo2 - tiempoviejo2);
    anterior2 = nuevapos2;
    tiempoviejo2 = tiemponuevo2;
    vel2 = ((delpulso2*res)/deltatiempo2);
    vel2a = abs(vel2);
  }
  else { if (nuevapos2 == anterior2 && now1 > (tiemponuevo2)) { vel2a=0; }}
  if(vel2a > wMax) { vel2a = wMax; }
  if(vel2a < 0) { vel2a = 0; }
}
void VelM3()
{
  if (nuevapos3 != anterior3 && tiemponuevo3 != tiempoviejo3)
  {
    delpulso3 = ((nuevapos3 - anterior3));
    deltatiempo3 = (tiemponuevo3 - tiempoviejo3);
    anterior3 = nuevapos3;
    tiempoviejo3 = tiemponuevo3;
    vel3 = ((delpulso3*res)/deltatiempo3);
    vel3a = abs(vel3);
  }
}

```

```

}
else { if (nuevapos3 == anterior3 && now1 > (tiemponuevo3)) { vel3a=0; }}
if(vel3a > wMax) { vel3a = wMax; }
if(vel3a < 0) { vel3a = 0; }
}
void VelM4()
{
if (nuevapos4 != anterior4 && tiemponuevo4 != tiempoviejo4)
{
deltapulso4 = ((nuevapos4 - anterior4));
deltatiempo4 = (tiemponuevo4 - tiempoviejo4);
anterior4 = nuevapos4;
tiempoviejo4 = tiemponuevo4;
vel4 = ((deltapulso4*res)/deltatiempo4);
vel4a = abs(vel4);
}
else { if (nuevapos4 == anterior4 && now1 > (tiemponuevo4)) { vel4a=0; }}
if(vel4a > wMax) { vel4a = wMax; }
if(vel4a < 0) { vel4a = 0; }
}

```

Anexo cuatro: Datos recolectados para obtener función de transferencia

A continuación se muestran los datos recolectados para OMNII

Tiempo	Velref	Promedio							
		Motor 4 Sur	Motor 1 Norte	Motor 1 Sur	Motor 2 Norte	Motor 2 Sur	Motor 4 Norte	Motor 3 Sur	Motor 3 Norte
0	0	0	0	0	0	0	0		
15	40	0,005	0,002	0	0	0,007	0,004	0,003	0,0005
30	40	5,155	1,234	0,045	0,651	3,065	3,265	1,2225	0,2965
45	40	11,036	10,253	11,077	10,076	12,436	8,995	9,067	6,6865
60	40	17,188	14,125	16,722	14,709	17,664	13,294	14,2675	14,0875
75	40	18,51	18,333	18,362	18,121	18,805	19,292	17,278	16,6835
90	40	21,888	20,959	22,79	21,291	23,584	22,082	20,3885	20,9595
105	40	25,218	24,192	25,036	24,657	25,817	23,061	22,84	22,5845
120	40	26,561	25,598	26,534	28,515	25,585	26,827	24,6355	24,9225
135	40	30,273	29,883	30,47	28,531	30,067	28,516	25,9995	26,3175
150	40	31,628	31,056	31,043	31,055	32,058	28,516	28,063	28,502
165	40	30,874	33,426	30,484	32,812	31,055	30,651	29,0165	28,1925
180	40	34,376	34,767	33,972	33,936	35,145	32,657	30,679	31,1955
195	40	35,55	34,154	35,409	32,895	35,8	32,226	31,4475	32,022
210	40	34,156	36,189	34,377	38,22	33,594	35,55	32,6815	32,446
225	40	37,765	37,359	37,353	36,691	38,366	35,649	33,9365	33,2935
240	40	38,308	35,522	39,128	36,315	38,417	34,738	33,5645	33,687
255	40	36,62	39,06	36,254	39,254	37,121	37,658	34,2305	34,046
270	40	39,645	37,255	40,036	37,338	40,294	35,606	35,2195	34,377
285	40	38,085	40,866	38,28	41,537	37,507	39,256	35,5005	36,688
300	40	40,23	40,094	41,147	40,637	42,085	40,035	36,218	36,693
315	40	40,681	38,621	41,906	38,671	40,745	37,11	36,424	35,8045
330	40	38,97	41,469	38,475	41,892	39,523	40,23	36,2795	36,448
345	40	41,879	42,381	41,904	41,898	42,824	40,035	37,527	36,1755
360	40	42,112	41,293	43,08	39,73	43,066	37,597	37,6875	38,486
375	40	39,45	43,394	40,231	42,616	40,427	41,536	38,0225	37,417
390	40	42,689	41,811	43,554	43,593	43,286	41,306	36,925	37,1635
405	40	43,078	41,012	43,688	40,658	44,483	39,255	38,26	38,511
420	40	40,046	43,271	40,314	43,454	40,546	42,577	38,131	37,212
435	40	44,18	45,449	44,14	44,821	44,069	41,795	38,9865	40,072
450	40	43,275	40,538	43,359	39,654	45,115	39,645	38,1555	38,341
465	40	40,425	43,861	40,939	45,103	41,989	42,235	39,233	38,049
480	40	42,612	43,61	44,837	43,059	44,529	42,981	38,974	37,597
495	40	43,539	42,767	45,702	43,105	44,002	39,667	38,848	38,103
510	40	41,195	46,342	41,863	43,455	43,994	43,038	39,2425	39,239
525	40	44,529	41,404	43,528	41,185	43,845	40,817	39,3045	40,2575

540	40	40,561	44,053	42,978	46,538	42,087	42,503	38,889	38,683
555	40	44,252	44,836	46,149	43,65	45,029	42,372	39,878	37,7995
570	40	44,14	43,088	43,249	41,6	45,715	40,573	39,8295	38,913
585	40	41,439	46,232	42,687	45,424	42,224	42,783	39,189	39,8345
600	40	45,072	44,248	44,039	45,042	45,338	44,752	39,089	40,1115
615	40	44,53	42,629	46,637	42,612	46,607	39,412	39,206	40,022
630	40	41,488	45,712	41,805	44,029	42,309	43,583	39,2685	38,9505
645	40	44,444	47,011	44,545	45,001	45,436	42,968	39,6195	39,1075
660	40	44,739	42,505	44,708	42,738	45,993	40,938	39,719	40,26
675	40	42,405	43,862	43,102	45,256	42,588	43,472	40,123	39,383
690	40	44,53	45,031	44,767	43,833	46,3	43,079	39,6165	38,958
705	40	45,129	43,749	45,042	43,118	45,909	40,706	40,6345	39,4935
720	40	42,087	46,202	42,104	45,925	43,568	43,469	40,419	39,126
735	40	44,163	44,039	45,505	44,864	45,422	43,746	39,624	39,582
750	40	44,768	43,836	44,564	42,349	45,862	41,98	39,2005	40,4295
765	40	42,293	45,52	42,088	46,063	44,573	43,091	40,264	39,053
780	40	45,505	43,284	45,84	42,465	45,435	41,206	40,19	39,194
795	40	40,816	45,911	43,284	44,725	42,307	42,797	39,3845	39,6795
810	40	44,834	45,888	44,543	44,919	46,608	44,461	40,3315	40,308
825	40	44,656	42,908	44,459	42,965	46,872	40,62	40,829	40,7745
840	40	42,576	44,472	42,199	45,481	41,992	43,555	39,182	39,5945
855	40	45,029	45,115	46,873	45,116	45,97	44,054	39,4925	38,669
870	40	45,241	41,991	44,248	42,686	46,829	41,291	40,835	39,3365
885	40	40,634	46,481	42,298	46,188	43,285	43,945	39,7745	40,12
900	40	46,008	44,236	45,312	45,92	45,534	43,75	39,3785	39,713
915	40	44,189	42,507	45,896	42,588	46,411	40,694	39,912	40,354
930	40	43,287	47,068	42,125	46,587	42,882	44,95	40,1595	39,171
945	40	44,53	44,726	44,971	45,626	46,802	43,359	40,673	39,4325
960	40	44,53	41,942	44,513	42,686	46,872	41,146	39,9195	39,763
975	40	41,598	45,422	42,796	45,45	42,406	43,862	40,0955	39,881
990	40	44,92	46,287	44,362	45,311	47,361	43,555	39,2425	40,3955
1005	40	44,369	43,877	44,54	43,392	46,285	41,12	40,5405	39,0945
1020	40	42,529	43,872	41,55	45,018	43,025	43,776	40,655	40,5005
1035	40	44,456	42,186	46,4	42,335	46,286	41,035	39,4725	40,287
1050	40	41,906	45,116	42,26	46,942	43,298	43,592	40,013	40,5605
1065	40	44,92	46,324	43,885	46,677	47,221	43,945	40,1315	39,9655
1080	40	44,822	43,191	45,449	41,992	45,016	40,672	39,8775	38,8695
1095	40	41,466	45,309	40,367	46,251	44,251	44,252	39,6505	41,684
1110	40	45,06	45,506	46,326	46,303	46,677	43,481	39,6165	40,111
1125	40	44,432	41,99	45,227	42,124	45,883	40,867	40,3485	38,797
1140	40	42,296	46,872	40,023	46,593	43,191	44,08	40,348	39,3925
1155	40	45,158	45,622	44,335	45,505	46,09	43,887	40,2615	39,2325
1170	40	44,725	42,87	44,724	43,244	46,2	40,768	39,6915	40,86

1185	40	40,952	43,749	43,441	46,093	42,81	44,083	40,015	40,3105
1200	40	45,422	47,947	42,813	45,115	47,193	43,593	40,0415	40,3755
1215	40	45,114	43,638	44,334	42,49	46,066	41,515	40,0985	41,493
1230	40	41,342	44,627	41,209	47,179	44,083	43,945	40,403	39,885
1245	40	44,948	45,094	45,604	45,114	47,068	43,36	39,5315	40,87
1260	40	44,343	43,613	44,103	43,208	46,217	41,314	39,7855	39,0675
1275	40	42,82	47,096	41,222	46,58	43,391	43,959	40,4475	40,946
1290	40	45,057	42,186	43,847	42,493	46,09	41,61	40,929	40,06
1305	40	42,379	45,701	43,033	46,092	44,139	43,652	39,0575	39,313
1320	40	44,334	45,895	43,675	45,019	45,895	43,945	39,8405	41,2545
1335	40	44,639	43,164	44,14	41,746	46,763	41,085	40,8	39,822
1350	40	42,702	45,506	41,6	47,529	42,725	44,277	39,2925	40,7615
1365	40	45,309	46,189	44,921	44,37	46,649	44,556	40,5775	40,129
1380	40	44,92	44,251	43,211	43,651	46,72	41,094	40,6335	40,021
1395	40	41,598	46,677	42,726	44,948	43,666	43,273	40,0675	40,453
1410	40	45,505	44,92	44,152	47,403	45,395	44,642	40,1625	39,7195
1425	40	44,639	42,576	44,46	42,321	46,817	40,682	40,7145	40,5375
1440	40	42,014	45,98	41,598	47,402	43,09	43,9	39,7175	40,845
1455	40	44,752	45,912	45,505	46,165	46,789	44,166	39,6035	39,6115
1470	40	45,227	42,223	44,333	42,731	46,456	41,108	40,37	40,7815
1485	40	41,844	46,342	42,187	44,57	44,543	44,14	40,1855	39,642
1500	40	45,436	45,898	44,335	45,227	45,895	43,554	39,9095	41,012
1515	40	45,08	42,842	45,346	44,674	46,286	41,131	40,5665	39,208
1530	40	42,895	46,201	43,003	43,785	43,682	43,97	40,036	40,6195
1545	40	44,529	43,605	45,059	43,456	46,608	40,585	39,712	40,2315
1560	40	41,99	47,179	41,708	46,036	42,871	45,144	39,6895	41,1455
1575	40	45,115	44,725	45,631	47,459	47,795	43,359	40,7255	39,327
1590	40	45,115	42,443	46,092	42,772	45,31	41,206	40,418	39,7945
1605	40	42,505	45,616	42,773	44,919	43,945	43,554	39,9015	41,282
1620	40	45,032	45,85	45,31	47,262	45,309	43,492	40,1345	39,683
1635	40	45,506	43,065	44,847	41,734	47,626	42,295	39,2065	39,7015
1650	40	41,99	45,307	43,274	46,905	42,285	43,286	40,437	40,229
1665	40	45,309	46,216	45,895	44,823	46,957	43,37	39,709	40,646
1680	40	44,851	41,439	45,506	43,589	46,217	41,049	40,892	40,397
1695	40	42,479	46,915	42,113	46,035	43,675	44,461	39,835	40,4325
1710	40	44,431	46,482	45,619	45,7	46,621	44,14	40,2165	40,0405
1725	40	45,045	43,272	45,188	42,307	47,068	40,754	40,03	40,307
1740	40	42,8	45,241	43,604	46,608	43,358	44,266	41,0385	40,097
1755	40	44,444	46,483	46,022	46,014	45,894	43,359	40,2445	40,45
1770	40	45,117	43,758	45,161	42,476	46,48	41,744	39,7555	39,421
1785	40	42,895	45,017	43,945	46,989	43,94	43,944	39,499	39,454
1800	40	45,115	42,224	45,926	42,515	46,383	40,62	40,9595	40,448
1815	40	41,721	46,425	42,381	46,649	43,41	44,249	39,7055	41,016

1830	40	45,241	45,31	45,753	45,046	47,375	44,36	40,439	39,5255
1845	40	44,26	43,749	46,745	42,319	45,296	41,891	40,7555	40,3625
1860	40	42,296	46,286	44,069	45,618	43,566	43,467	39,9035	39,593
1875	40	44,26	44,528	45,029	46,762	46,286	43,861	40,103	39,53
1890	40	45,421	43,552	45,386	42,32	45,957	41,342	40,5075	41,605
1905	40	41,989	45,786	43,588	46,538	43,804	44,656	39,5425	40,093
1920	40	44,151	47,891	45,562	45,896	46,286	43,945	40,133	38,9885
1935	40	45,436	40,784	46,287	41,916	46,871	40,182	39,7845	41,2475
1950	40	42,87	47,025	41,795	46,551	42,967	43,718	40,2435	39,491
1965	40	44,432	45,157	46,773	44,862	46,676	43,357	39,737	39,712
1980	40	44,139	44,041	46,009	42,968	45,798	41,778	40,9125	39,6935
1995	40	42,794	47,138	41,795	44,761	42,908	44,249	40,226	40,098
2010	40	44,765	43,037	45,897	45,547	46,956	44,085	39,621	39,9025
2025	40	45,826	43,732	45,298	43,149	45,953	40,518	40,313	40,3175
2040	40	42,035	45,59	42,73	45,912	44,875	43,677	40,767	40,062
2055	40	45,326	44,446	45,143	43,786	46,316	41,061	40,23	39,323
2070	40	41,66	45,116	42,381	44,656	42,64	43,985	39,7875	39,086
2085	40	45,464	45,994	46,273	46,091	47,36	44,057	40,137	40,448
2100	40	45,31	42,28	45,498	42,698	45,826	41,011	40,433	41,1305
2115	40	41,538	47,124	42,055	46,817	43,078	43,457	39,064	40,2375
2130	40	45,74	45,506	45,437	44,92	46,301	44,18	40,0185	39,8
2145	40	44,837	42,379	46,905	41,992	47,583	41,245	40,1915	40,599
2160	40	42,186	46,773	40,928	46,287	42,101	43,69	40,1875	40,502
2175	40	44,334	44,836	45,936	45,701	46,901	43,981	39,9875	40,262
2190	40	44,725	41,209	45,439	42,526	46,816	42,198	41,0955	39,605
2205	40	42,699	45,994	43,188	46,036	42,894	43,945	40,4295	39,2725
2220	40	45,032	46,188	46,146	46,958	46,3	43,469	40,2375	40,255
2235	40	45,31	42,282	44,655	42,492	46,107	41,231	40,11	40,0715
2250	40	41,012	45,115	43,749	45,981	43,385	44,447	39,4995	39,645
2265	40	44,81	47,013	44,334	46,009	46,481	44,53	40,6085	39,525
2280	40	45,262	41,561	46,102	43,122	47,084	41,561	40,5665	40,495
2295	40	42,745	46,288	41,218	46,204	43,993	43,75	40,206	41,359
2310	40	44,682	41,794	45,548	42,686	45,872	40,62	40,0455	40,72
2325	40	41,758	47,458	42,828	45,043	44,755	44,554	39,4385	39,8905
2340	40	45,45	46,287	44,333	45,926	45,394	44,169	40,1245	39,0985
2355	40	44,14	41,321	45,602	42,867	45,906	40,951	40,3015	39,9135
2370	40	42,601	44,137	41,516	45,767	44,056	43,09	39,9095	40,8205
2385	40	45,032	45,631	44,849	46,412	46,969	44,461	40,0795	39,995
2400	40	44,139	44,248	46,522	43,552	45,323	41,5	40,0735	39,9895
2415	40	41,903	45,84	40,902	45,199	43,874	44,14	40,6845	40,8915
2430	40	45,032	45,701	45,115	47,766	46,189	43,75	40,048	39,385
2445	40	44,334	41,954	43,284	41,917	46,816	41,011	40,701	40,2915
2460	40	41,599	45,897	43,287	46,021	43,163	43,383	40,0795	39,566

2475	40	44,553	45,921	45,969	45,702	45,505	44,083	39,71	41,4955
2490	40	44,557	42,688	42,731	42,308	47,013	40,632	40,649	39,4995
2505	40	42,577	46,218	41,794	46,999	43,581	44,252	39,6825	40,0405
2520	40	44,529	45,897	43,748	45,701	46,9	44,14	40,202	40,1955
2535	40	44,036	43,403	47,295	42,412	46,227	41,195	39,9395	40,6675
2550	40	43,422	46,134	40,463	46,497	44,726	43,773	40,217	41,597
2565	50	45,143	44,09	45,31	44,74	47,262	41,78	41,3865	40,3535
2580	50	42,43	47,305	41,329	45,18	44,041	44,444	41,318	43,1015
2595	50	46,663	46,998	47,701	49,091	48,38	45,531	41,555	41,996
2610	50	46,676	45,506	46,232	45,347	48,046	43,384	43,1275	41,9995
2625	50	43,187	47,07	42,87	47,321	45,507	45,63	42,73	43,03
2640	50	48,116	48,706	46,399	47,851	49,055	45,213	42,7715	42,5635
2655	50	46,873	45,211	48,787	44,529	48,108	43,261	44,005	43,94
2670	50	44,358	48,888	44,139	48,631	45,826	46,676	42,1675	43,7545
2685	50	47,333	48,59	47,238	49,413	49,17	46,48	43,669	44,748
2700	50	48,633	46,677	46,472	45,702	50,379	43,667	43,908	44,228
2715	50	44,431	49,804	46,412	47,57	45,309	46,607	43,461	44,975
2730	50	48,468	48,534	46,483	50,153	49,303	46,871	43,748	44,2595
2745	50	47,56	46,176	47,632	45,7	50,031	43,944	44,4745	44,907
2760	50	45,743	49,524	44,723	49,095	46,495	46,871	44,296	45,3855
2775	50	47,422	48,513	48,381	50,098	49,775	46,711	43,432	44,127
2790	50	48,534	46,062	48,241	46,18	50,894	44,026	44,354	44,493
2805	50	45,428	49,608	46,323	49,027	46,584	47,262	44,8665	44,7105
2820	50	48,087	45,896	47,741	45,255	50,016	44,056	44,312	46,0565
2835	50	45,353	49,928	45,632	50,667	47,083	46,996	43,849	44,696
2850	50	48,719	49,889	50,584	48,868	50,152	47,066	44,8495	43,9645
2865	50	48,786	47,794	48,901	46,761	50,877	43,968	45,1905	44,4595
2880	50	44,638	49,803	44,948	49,345	46,999	47,613	44,5405	46,2735
2895	50	48,327	49,609	49,14	50,274	50,78	47,205	44,262	45,596
2910	50	49,317	46,872	49,957	44,906	49,292	43,749	45,0385	43,9555
2925	50	45,115	49,415	46,481	51,745	47,684	47,458	44,789	45,7905
2940	50	48,718	49,413	49,415	48,241	49,58	46,76	43,427	45,263
2955	50	48,786	45,895	49,413	47,655	51,17	44,556	45,966	45,2615
2970	50	45,114	50,072	46,091	48,825	46,2	47,194	43,745	43,5165
2985	50	48,384	49,148	49,793	48,888	51,007	47,459	44,4525	46,045
3000	50	49,886	47,837	49,651	47,823	50,389	43,859	44,4565	45,804
3015	50	45,017	50,475	45,923	48,718	47,141	47,598	44,628	44,7185
3030	50	47,802	48,59	49,432	49,6	50,753	46,32	44,775	44,072
3045	50	49,665	46,82	50,739	47,248	49,597	44,725	45,296	46,2045
3060	50	45,588	50,938	46,69	49,513	47,711	48,045	44,694	44,4225
3075	50	48,327	47,404	49,67	45,604	51,171	44,335	44,193	45,694
3090	50	46,217	49,023	47,123	50,378	46,774	47,459	44,6885	44,6205
3105	50	48,242	49,205	49,249	49,523	50,529	47,154	44,5045	45,089

3120	50	48,827	46,93	49,085	46,956	50,585	44,266	44,8965	45,1705
3135	50	45,31	51,006	46,175	48,435	46,97	47,46	43,913	45,8185
3150	50	48,324	48,901	50,5	49,639	48,994	47,067	44,878	45,073
3165	50	48,316	46,693	50,244	46,983	50,924	44,725	45,9025	44,9535
3180	50	45,143	50,509	46,942	49,776	46,763	47,46	44,7925	44,5005
3195	50	48,59	50,755	49,377	48,79	50,421	48,24	44,243	44,5735
3210	50	48,315	47,612	50,184	47,417	50,092	43,686	44,3525	45,853
3225	50	44,461	48,925	46,556	49,447	47,307	47,85	45,086	45,0175
3240	50	48,389	50,947	49,582	49,719	50,39	47,458	44,2765	44,5865
3255	50	49,328	46,873	49,474	45,436	50,226	44,92	44,769	44,762
3270	50	45,212	50,575	48,378	50,347	46,408	46,678	45,122	46,178
3285	50	48,296	48,941	47,936	48,217	50,031	47,457	45,0315	45,038
3300	50	49,569	46,405	50,646	47,184	50,577	44,673	44,432	44,84
3315	55	47,921	52,495	48,472	52,197	50,257	49,219	46,788	47,751
3330	55	51,365	49,584	52,441	49,193	53,123	46,285	48,531	49,046
3345	55	49,025	52,57	49,134	52,663	50,506	50,906	48,6625	48,8005
3360	55	52,538	54,472	53,835	52,376	53,444	51,202	49,162	49,338
3375	55	52,768	50,708	53,64	49,658	54,238	47,74	50,317	50,218
3390	55	49,431	53,413	50,035	54,363	52,767	51,143	49,73	50,847
3405	55	53,381	54,838	54,441	52,875	54,032	52,177	50,0875	50,654
3420	55	54,018	51,983	53,616	51,777	54,869	47,85	51,192	50,6805
3435	55	50,031	52,742	49,176	54,484	52,226	52,146	51,005	50,47
3450	55	53,938	53,666	54,596	53,351	54,68	52,182	50,667	51,0645
3465	55	53,368	53,322	54,094	52,044	54,534	48,174	50,583	51,573
3480	55	51,094	53,016	51,314	53,518	52,571	51,957	49,857	50,742
3495	55	53,525	54,141	53,103	53,672	54,931	52,763	50,0085	51,1745
3510	55	53,969	51,401	53,524	51,368	54,907	48,328	51,7565	51,749
3525	55	50,586	54,484	53,218	54,352	52	51,58	50,744	51,065
3540	55	53,72	53,497	54,08	54	54,717	51,752	51,5495	50,3365
3555	55	53,528	52,945	54,063	52,192	54,232	49,813	50,926	50,6695
3570	55	51,164	53,835	49,731	54,258	52,601	51,95	51,047	51,405
3585	55	53,84	49,023	53,898	50,829	54,742	48,34	51,0425	50,8635
3600	55	50,933	54,226	51,036	54,621	51,792	52,433	50,043	51,742
3615	55	53,595	54,13	54,055	54,453	54,9	51,565	51,8	52,4315
3630	55	54,391	50,557	53,959	51,023	54,931	49,176	51,8305	51,399
3645	55	50,529	54,484	49,57	54,546	52,629	51,602	49,9645	50,9735
3660	55	54,164	53,028	53,281	54,558	54,845	52,238	50,6565	50,5955
3675	55	53,711	52,241	54,649	51,792	54,576	48,064	51,1955	51,6575
3690	55	49,901	54,227	51,522	54,279	52,692	52,65	50,8495	51,5655
3705	55	54,061	54,453	51,899	54,226	54,907	52,145	50,59	51,999
3720	55	53,351	50,079	53,497	51,37	54,931	48,632	51,572	51,8885
3735	55	51,561	55	51,592	54,164	53,052	51,036	51,1405	51,4295
3750	55	52,843	52,726	54,783	54,711	54,669	51,46	50,8735	51,322

3765	55	54,717	51,561	52,289	51,068	54,876	48,801	51,1045	51,2455
3780	55	50,348	54,907	50,604	54,094	51,922	52,766	50,0975	51,3715
3795	55	53,968	53,591	54,485	54,289	54,357	52,404	50,452	51,67
3810	55	52,965	51,524	52,584	51,276	54,546	48,125	51,143	51,8145
3825	55	51,187	54,031	50,727	54,195	52,741	51,942	50,994	50,8415
3840	55	54,845	52,99	54,063	51,11	54,938	48,563	50,1405	51,038
3855	55	50	53,494	49,913	54,521	52,093	52,427	51,0475	51,7095
3870	55	54,329	54,938	53,401	53,31	54,094	51,686	50,6315	51,062
3885	55	53,938	52,09	54,289	51,564	54,748	48,828	51,778	50,915
3900	55	50,584	52,896	50,439	54,063	52,266	52,043	50,4385	52,084
3915	55	53,877	53,908	53,899	54,227	54,938	51,683	50,935	51,817
3930	55	54,391	53,144	52,716	52,252	54,907	49,54	50,65	51,4905
3945	55	50,78	53,349	52,018	54,652	52,24	51,996	50,58	52,012
3960	55	54,164	54,257	54,263	53,464	54,748	52,351	50,8045	52,1315
3975	55	53,614	51,231	53,482	51,37	54,748	49,15	50,9045	50,997
3990	55	51,518	54,845	51,142	54,503	52,23	51,292	51,127	51,698
4005	55	53,07	54,748	54,485	53,013	54,413	52,769	51,0225	51,181
4020	55	54,245	52,231	54,094	52,557	54,506	48,576	51,23	51,824
4035	55	50,975	52,554	51,439	53,757	51,996	52	50,147	51,349
4050	55	53,81	53,668	54,459	53,292	54,876	51,656	50,9635	52,214
4065	55	54,195	52,198	53,761	51,049	54,436	49,388	50,7245	51,444
4080	55	50,538	54,452	52,608	53,959	52,967	52,219	51,8635	50,972
4095	55	54,556	51,355	54,49	51,897	54,845	48,523	50,6865	53,1575
4110	55	50,975	54,326	52,6	53,797	51,958	51,957	51,3785	51,003
4125	55	53,652	54,397	53,383	54,264	54,962	52,226	49,8825	51,058
4140	55	54,018	52,454	54,969	51,813	54,969	49,568	52,0915	51,6165
4155	55	51,653	53,091	50,779	53,159	51,56	51,816	50,3355	51,916
4170	55	53,67	54,294	54,649	54,111	54,962	52,313	51,464	50,4395
4185	55	53,773	52,179	54,717	52,291	54,938	48,119	51,754	51,999
4200	55	50,585	54,503	52,014	53,023	51,818	52,703	49,733	52,049
4215	55	53,937	53,896	54,165	53,899	54,938	51,927	50,8105	50,4695
4230	55	53,747	51,799	54,717	50,566	54,907	48,829	51,5105	51,434
4245	55	50,537	53,958	51,909	54,326	52,208	52,031	50,6745	51,5875
4260	55	53,848	54,711	54,422	52,419	54,484	52,599	50,7545	51,9745
4275	55	54,649	51,775	54,907	50,513	54,969	48,29	50,3585	51,2515
4290	55	50,195	54,727	52,148	54,257	51,292	53,216	51,741	51,3615
4305	55	53,742	53,592	54,459	53,899	54,748	50,905	50,2825	52,0675
4320	55	53,19	53,178	54,232	51,147	53,737	49,705	51,286	52,1465
4335	55	51,218	53,709	52,375	54,307	53,304	52,96	50,1825	50,125
4350	55	53,689	51,656	54,338	52,179	54,938	48,511	51,692	51,5225
4365	55	50,031	54,382	51,355	53,108	52,763	52,885	50,6025	51,4175
4380	55	54,195	54,876	54,938	54,223	54,655	53,172	51,4235	51,9335
4395	55	53,772	49,071	53,33	51,491	54,876	48,979	50,022	51,035

4410	55	50,28	54,086	51,402	54,391	52,537	51,427	50,79	51,243
4425	55	53,897	54,938	54,845	54,258	54,779	53,546	51,769	51,8995
4440	55	53,822	51,675	54,063	51,415	54,509	48,828	50,7	51,719
4455	55	50,948	54,259	51,233	53,354	51,873	52,341	51,5725	51,071
4470	55	54,525	54,245	54,326	54,711	55	51,56	50,4675	51,437
4485	55	53,773	51,759	54,556	51,202	54,503	49,022	51,084	51,2875
4500	55	51,365	54,318	50,482	53,866	52,844	51,836	50,4885	50,627
4515	55	53,778	54,876	53,672	54,032	54,938	52,375	50,976	51,154
4530	55	54,391	50,193	54,428	51,356	54,845	49,568	50,72	52,358
4545	55	51,365	53,627	50,457	53,898	52,616	52,178	51,285	51,937
4560	55	53,968	54,147	54,484	54,422	54,123	50,917	51,044	49,6815
4575	55	52,477	52,382	54,131	52,084	54,779	49,754	50,6505	52,1555
4590	55	51,284	53,408	50,619	53,839	53,361	52,373	51,3415	50,9705
4605	55	54,845	51,893	53,867	51,262	54,516	48,829	50,9205	51,909
4620	55	49,756	53,506	50,169	54,32	52,63	52,146	50,0665	52,0305
4635	55	53,72	54,258	54,938	53,348	54,558	52,011	51,0755	50,43
4650	55	53,999	51,201	54,587	51,342	54,484	48,785	51,1625	52,334
4665	55	51,433	54,68	50,974	54,043	52,14	52,598	49,9755	51,9355
4680	55	54,556	51,602	53,092	54,32	54,779	52,785	51,247	51,075
4695	55	54,164	51,868	53,898	51,49	54,356	48,241	51,177	50,775
4710	55	50,39	54,558	50,631	54,876	52,496	52,315	51,2535	52,0255
4725	55	53,937	53,191	54,422	53,485	54,962	52,536	50,8455	51,0235
4740	55	53,582	51,501	53,513	52,151	54,503	48,707	51,615	51,01
4755	55	51,457	53,421	50,558	54,289	53,546	52,177	50,5225	52,992
4770	55	53,487	53,836	53,268	53,836	54,814	51,816	50,9845	52,2675
4785	55	54,164	51,562	54,508	51,593	54,772	49,163	50,666	51,2575
4800	55	50,195	54,876	50,392	54,454	52,629	51,909	51,6705	51,168

Archivo Excel 20150507OMNI1Datos

A continuación se muestran los datos recolectados para OMNI2

Conte o	Tiemp o	Velre f	Promedio					
			Motor 1 Norte	Motor 1 Sur	Motor 2 Norte	Motor 2 Sur	Motor 4 Norte	Motor 4 Sur
	0	0	0	0	0	0	0	0
0	15	600	0	0	0	0	0	0
1	30	600	0	0	0	0	0	0
2	45	600	0	0	0	0	0	0
3	60	600	0	0	0	0	0	0
4	75	600	0	0	0	0	0	0
5	90	600	0	0	0	0	0	0
6	105	600	0	0	0	0,003	0	0
7	120	600	0,005	0,01	0,006	0,003	0,009	0,009
8	135	600	0,065	1,482	0,005	0,003	0,031	2,012
9	150	600	14,448	10,823	0,961	0,033	3,218	9,191
10	165	600	29,131	25,603	13,077	10,316	11,126	16,114
11	180	600	36,673	38,677	27,152	30,877	32,2	38,314
12	195	600	46,564	47,481	32,586	37,347	39,304	34,828
13	210	600	57,999	54,803	39,542	45,179	37,376	44,533
14	225	600	61,966	67,721	49,266	55,141	63,877	57,402
15	240	600	71,6	72,137	57,574	61,462	55,491	26,009
16	255	600	80,571	81,966	66,822	72,717	18,812	33,995
17	270	600	89,318	90,83	73,873	82,01	64,137	91,645
18	285	600	97,826	96,035	81,51	90,701	34,764	79,306
19	300	600	103,827	105,628	84,964	99,716	23,056	75,24
20	315	600	118,75	114,838	94,127	108,337	91	94,208
21	330	600	123,624	120,231	104,428	114,552	114,181	121,049
22	345	600	132,366	136,511	117,114	123,781	120,732	131,88
23	360	600	146,125	143,089	120,498	129,991	129,817	144,368
24	375	600	146,368	146,361	131,272	142,832	137,236	156,272
25	390	600	165,525	161,047	137,846	148,471	147,768	157,893
26	405	600	169,615	170,112	144,775	158	154,74	170,304
27	420	600	171,335	174,791	152,054	170,773	158,072	176,83
28	435	600	187,864	189,849	162,536	176,097	169,929	193,392
29	450	600	193,719	196,036	169,362	183,125	176,786	195,537
30	465	600	199,093	199,911	174,661	199,608	188,625	206,376
31	480	600	210,162	215,918	179,893	208	191,537	217,196
32	495	600	224,071	218,412	189,429	210,733	206,338	224,571
33	510	600	223,605	227,243	200,5	226,598	207,696	232,625
34	525	600	236,875	234,25	202	218,696	222,249	241,714
35	540	600	238,961	245,029	215,838	241,336	221,892	254,762
36	555	600	261,535	259,535	213,16	247,928	234,92	260,589

37	570	600	262,946	260,571	223,798	259,803	240,482	269,964
38	585	600	268,625	266,196	234,071	269,25	252,25	280,25
39	600	600	282,25	278,232	248,625	270,413	258,25	288,375
40	615	600	292,375	288,75	251,714	286,357	268	296,503
41	630	600	294,36	292,393	258,25	276,125	278	308,411
42	645	600	308,286	310,143	270,393	290,831	280,268	316,286
43	660	600	314,286	314,018	274,286	302	292,161	322,036
44	675	600	317,911	316	288,161	314,018	298	332
45	690	600	336,054	335,75	292,304	318,143	308,051	346,194
46	705	600	340,608	343,765	289,375	332,286	318,321	355,25
47	720	600	345,375	348,179	307,5	340	325,529	351,661
48	735	600	359,804	358	310,465	341,875	331,625	376,571
49	750	600	360,429	369,75	317,875	357,375	338,571	379,5
50	765	600	381,5	373,821	321,125	372,714	351,5	392,571
51	780	600	381,294	384,339	333,954	371,5	358,714	399,5
52	795	600	392,357	388,875	354,428	390	366,625	403,699
53	810	600	395,125	400,821	351,625	393,375	370,913	415,5
54	825	600	417	409,714	359,375	394,25	381	421,5
55	840	600	420	418	372,089	407,714	391,375	442
56	855	600	429,25	424,824	377,75	412,625	400,518	436,5
57	870	600	433,25	432,393	382,125	431,518	401,125	456,286
58	885	600	441,25	441,125	386,107	428,75	422,411	461
59	900	600	455,25	446,125	397,125	449	420,125	471
60	915	600	463,286	465,572	395,893	448,25	430,304	480
61	930	600	463,125	468,268	413,554	462,018	440,161	488
62	945	600	488,446	476,875	412,304	456	443,453	492,875
63	960	600	479,625	486,179	423,143	465	462	505,75
64	975	600	496,036	492,607	436,179	485,125	459,339	512,607
65	990	600	504	507,571	442,446	482,304	471,089	528
66	1005	600	507,375	510,25	434,625	500,607	481,857	534,75
67	1020	600	522,393	533,624	453,143	502	492	533,607
68	1035	600	534,982	528,5	450,5	511,446	494,375	558,5
69	1050	600	540,357	538,5	466	528,482	506,089	560,875
70	1065	600	546,5	541,125	462,5	527,857	510,75	570,232
71	1080	600	552,375	558	486,089	520,625	518,375	572,375
72	1095	600	553,089	554,375	494	538,875	526	586,25
73	1110	600	574,5	570,25	494,375	545,625	520,831	588,536
74	1125	600	566,625	562,75	502	566,286	542,572	596,25
75	1140	600	566,232	560,607	493,676	552,625	532,25	582,625
76	1155	600	576	578,143	516,375	580,089	522,5	598,947
77	1170	600	568,375	574	517,036	568,25	540,554	592,411
78	1185	600	572,625	568,75	527,018	563,125	538,305	594
79	1200	600	579,536	573,911	528,893	570,536	535,25	598,125

80	1215	600	580,625	591,054	512,464	577,518	539,5	602,125
81	1230	600	580,536	578,5	530	588,143	545,903	585,286
82	1245	600	584	584,643	508,375	584,25	536,125	596,965
83	1260	600	571,316	588	524,393	586,25	532,5	614,429
84	1275	600	594,286	590,536	520	580,25	540,775	594
85	1290	600	584,25	590,25	522,625	576,357	556,572	592,941
86	1305	600	586,25	588,25	536,411	584,125	542,493	608,554
87	1320	600	584,625	580,5	518,786	585,036	534,625	580,875
88	1335	600	594,286	602,429	527,714	574,393	556,125	604,697
89	1350	600	582,706	592,375	526	584,625	536,493	602,697
90	1365	600	600,286	594,536	524,375	596,536	539	594,25
91	1380	600	592,375	598,125	528	573,066	547,375	598,375
92	1395	600	590,411	588,125	524,25	590,572	555,125	596,536
93	1410	600	592	582,75	532	586	543,25	592,625
94	1425	600	594	606,84	509,691	578,831	552,375	606,429
95	1440	600	590,375	588,5	524,357	584,429	554,411	590,375
96	1455	600	596,911	603,168	514,655	582,941	553,268	598,411
97	1470	600	604,411	597,227	520	596,429	559,536	600,25
98	1485	600	586,625	592,929	534,429	583,714	556,411	582,5
99	1500	600	596,286	594	520,941	576,125	548,831	602,125
100	1515	600	590,25	596,661	524,25	582,75	568,286	602,286
101	1530	600	596,25	592,822	518	582,643	554,625	590,125
102	1545	600	586,625	604,757	510,125	576,375	562,125	602,411
103	1560	600	608,983	587,036	516,875	592,125	562,786	587,331
104	1575	600	588,25	599,215	520,536	582,75	568,125	600,697
105	1590	600	582,375	590,5	532,286	588,946	547,456	602,429
106	1605	600	600,429	602,715	532	582	568,965	596
107	1620	600	598,25	594,125	526,125	580,625	562,125	596,25
108	1635	600	592,25	592,25	526	586	570,661	606,125
109	1650	600	580,25	588,375	509,125	586,125	570,536	584,956
110	1665	600	600	602	530,286	594	562,375	598,411
111	1680	600	590,875	588,125	518,25	580,5	562,536	598,5
112	1695	600	593,09	598,286	523,081	584,5	576,572	589,51
113	1710	600	583,948	594,25	526,822	578,625	568,125	610,858
114	1725	600	615,287	594,125	524,25	589,462	576,804	600,125
115	1740	600	586,25	590,125	522	590,572	566,375	590,125
116	1755	600	594,125	596	511	576,375	572,286	598
117	1770	600	596,125	594	528,536	596,25	574,125	596,125
118	1785	600	592,25	590,25	518,125	588	571,75	596
119	1800	600	596,375	588,875	526,786	572,625	580,286	596,25
120	1815	825	596,911	604,822	534,5	596	578,125	596,846
121	1830	825	598,786	588,625	536,554	592,25	582,125	600,822
122	1845	825	598,661	612,143	542,286	586,268	584,375	616,429

123	1860	825	609,09	600,992	534	612,715	600,429	616
124	1875	825	612,679	616,554	552,25	608,664	600	620
125	1890	825	628,858	630,858	557,875	616,161	614,446	634,446
126	1905	825	614	614,125	562	623,732	625,696	634
127	1920	825	630	624,125	575,875	632	621,268	646,446
128	1935	825	636	651,446	565,768	630	642,714	639,375
129	1950	825	626,235	634,411	580,893	652,625	638	676,429
130	1965	825	654,714	648,589	590,5	666,714	656	669,75
131	1980	825	653,875	660,714	605,571	657,625	651,39	679,75
132	1995	825	653,75	657,875	620	665,75	676,875	678,779
133	2010	825	668	662	609,875	669,411	684,5	706
134	2025	825	673,75	670,107	609,625	686,267	694	703,5
135	2040	825	686,464	696,375	614	688,529	692	720,143
136	2055	825	703,5	696,482	620,434	708,786	706,518	727,375
137	2070	825	700,875	699,375	642,679	719,286	708,577	730,625
138	2085	825	710,357	716,661	655,054	703,25	737,358	735,375
139	2100	825	721,625	713,375	659,036	717,25	733,25	749,643
140	2115	825	721,911	741,286	662,286	728	737,125	767,839
141	2130	825	755,251	738,5	659,5	732,5	745,821	768,696
142	2145	825	742,375	748,25	694,572	742,878	757,661	774,375
143	2160	825	743,518	742,375	676,625	753,732	774,143	783,589
144	2175	825	769,571	772	700,714	761,429	774,875	792,911
145	2190	825	768	768,696	685,643	763,929	775,125	808,304
146	2205	825	776	766,875	704,429	788,446	803,286	796,732
147	2220	825	777,25	787,052	704,25	775,228	808	819,172
148	2235	825	800,428	811,571	723,118	789,268	812,625	830,685
149	2250	825	792,875	788,875	734,482	802,571	810,25	841,018
150	2265	825	812	814	731	794,125	826,757	860,143
151	2280	825	816	816	736,75	809,554	848,429	852,5
152	2295	825	813,007	807,368	739,125	823,946	838,125	860,375
153	2310	825	833,25	852	762,482	820,928	864,286	877,036
154	2325	825	852,053	819,618	749,132	840,5	861,176	890,804
155	2340	825	837,125	861,304	758,786	824,5	863,98	855,875
156	2355	825	865,857	860,143	774,5	866,786	880,304	913,251
157	2370	825	851,125	849,412	782,857	860,607	890,178	911,089
158	2385	825	862,286	890,286	792,5	847,5	903,785	911,923
159	2400	825	905,001	877,125	788,125	880,75	912,964	929,512
160	2415	825	870,625	877,429	795,446	872,804	908,214	913,655
161	2430	825	890,25	902,571	805,855	900,107	917,446	954,428
162	2445	825	909,196	898,125	817,5	879,125	942,429	950,732
163	2460	825	904,696	909,071	826	915,233	925,375	923,346
164	2475	825	926,268	909,905	819,798	902	932	1005,71 4

165	2490	825	930	951,428	845	908,125	975,178	950,22
166	2505	825	916,375	918,375	837,625	931,518	961,018	980,125
167	2520	825	941,964	936,857	852,465	926,733	954,518	993,768
168	2535	825	959,018	948,893	844,941	937,625	981,482	994,768
169	2550	825	954,429	965,732	868	946,857	982,964	995,286
170	2565	1000	975,75	949,86	859,75	953,75	969,64	1018,78 6
171	2580	1000	961,5	981,875	882	955,875	1013,92 8	1017,5
172	2595	1000	978,893	982,768	865,375	965,446	1027,21 5	999,25
173	2610	1000	981,625	975,25	865,75	977,357	1003,27 9	1036,94 6
174	2625	1000	996,714	995,196	892,357	996,339	1035,14 2	1051
175	2640	1000	1001	1001,21 4	918,287	980,071	1019,52 9	1046,37 5
176	2655	1000	1013,982	1018,64 3	903,429	1002,37 5	1032,12 5	1032,25
177	2670	1000	1010,357	1005,76 1	898,125	991	1052,67 8	1085,10 7
178	2685	1000	1010,125	1033	920,661	1029,10 7	1048,87 5	1056,25
179	2700	1000	1046,571	1031,62 5	921,309	1017,80 4	1076,64 3	1089,71 4
180	2715	1000	1028,321	1033,69 6	934,018	1032,19 6	1066,85 7	1067
181	2730	1000	1067,713	1051,02 6	933,303	1025,92 9	1078,16 1	1086,04 1
182	2745	1000	1060,773	1079,28 5	947,196	1037,77 3	1098,57 1	1093,85 6
183	2760	1000	1063,803	1051,25	958,839	1064,92 8	1080,58 8	1125,42 9
184	2775	1000	1072,714	1078	927,357	1048,05 3	1074,37 5	1126
185	2790	1000	1077,5	1073	986,445	1070	1141,57 1	1120,75
186	2805	1000	1090,339	1086,01 7	972,875	1071	1104,62 5	1119,64 3
187	2820	1000	1091,232	1101,12 5	967,625	1060,58	1123,41 1	1148,80 3
188	2835	1000	1087,679	1085,58 8	984,982	1078,12 5	1129,53 6	1146,16 1
189	2850	1000	1132,59	1114,89 3	991,192	1112,73 2	1144,33 9	1132,67 9
190	2865	1000	1116,875	1098,01 8	1018	1096,26 8	1136,62 5	1151,41 1
191	2880	1000	1130,143	1140,75	987,875	1117,71 4	1144	1173,09

192	2895	1000	1126	1144,46 4	997,607	1085,12 5	1143,66 8	1189,92 9
193	2910	1000	1141,661	1139,25	1036,21 5	1158,42 9	1180,17 8	1163,62 5
194	2925	1000	1123,286	1129,96 4	1023,10 7	1104,25	1146,06 2	1184,87 6
195	2940	1000	1193,144	1151,01 8	1034,07 2	1155,57 2	1216,14 2	1186,08 9
196	2955	1000	1157,5	1177,05 4	1025,41 1	1142,53 6	1192,96 4	1231,57 1
197	2970	1000	1163,375	1182,42 9	1043,82 1	1160,07 1	1188	1192,37 5
198	2985	1000	1199,503	1177,25	1052,71 4	1155,17 9	1206,26 8	1224,53 6
199	3000	1000	1182,321	1163,39 7	1051,33 9	1153,5	1204,21 2	1227,23 2
200	3015	1000	1190,089	1210,99 9	1074	1181,66	1220,75	1204,80 4
201	3030	1000	1196,232	1203,60 7	1051,37 5	1173,41 8	1229,25	1255,17 9
202	3045	1000	1220,143	1220,71 4	1030,77 2	1210,07 1	1237,73 2	1244,51 8
203	3060	1000	1220,143	1195,42 6	1118,14 3	1195,46 4	1222,62 5	1258,51 8
204	3075	1000	1215,445	1218,03 3	1064,27 2	1188,12 5	1228,78 6	1270,16 1
205	3090	1000	1240,125	1252,03 6	1085,33 9	1216,53 6	1301,57 2	1265,48 9
206	3105	1000	1220,268	1229,62 5	1091,65 6	1217,07 6	1255,5	1283,28 6
207	3120	1000	1276,072	1249,55 4	1114,92 9	1217,25	1250,78 6	1274,37 5
208	3135	1000	1251,018	1248,57 1	1085,36 7	1216,5	1295,42 9	1297,28 6
209	3150	1000	1256,209	1275,01 8	1108,17 8	1226,85 7	1286	1275,62 5
210	3165	1000	1266,168	1278,91 1	1157,03 5	1234,26 8	1271	1315,32 1
211	3180	1000	1287,875	1260,71 4	1111,87 5	1263,87 5	1323,5	1304,73 2
212	3195	1000	1302,572	1279,91 1	1137,10 7	1224,58 1	1295,5	1313,01 7
213	3210	1000	1285,75	1316,05 4	1144,44 7	1252,16 7	1292,5	1307
214	3225	1000	1309	1278,71 7	1147,75	1300,12 5	1318,12 5	1369,57 1
215	3240	1000	1301,25	1334,64 2	1111,31 6	1262,75	1299,51 5	1326,75
216	3255	1260	1326,571	1314,69 6	1146,62 5	1249,75	1370,95 8	1337,15 4

217	3270	1260	1300,107	1320,5	1183,53 6	1337,85 8	1331,64	1356,26 8
218	3285	1260	1328,071	1327,5	1133,62 5	1251,48 5	1346,60 7	1380
219	3300	1260	1349	1342	1192,66	1322,41 1	1377,28 6	1341,62 5
220	3315	1260	1342,5	1350,37 5	1172,5	1304,37 5	1336,25	1370,33
221	3330	1260	1373,518	1344,37 5	1159,32 1	1278,80 4	1375,98 3	1404,55 4
222	3345	1260	1338,529	1362,37 5	1178,37 5	1339,37 8	1360,62 5	1406,42 9
223	3360	1260	1365,393	1356,78 6	1190,23 2	1311	1389,87 5	1369,62 5
224	3375	1260	1371,25	1398,28 6	1197,85 7	1316,5	1385,75	1387,12 5
225	3390	1260	1376,25	1355,18 4	1158,87 5	1324,91 1	1392,5	1413,87 5
226	3405	1260	1411,554	1416	1218,5	1339,71 7	1404,26 8	1400,12 5
227	3420	1260	1411	1383,62 5	1175,87 5	1336,5	1413,62 5	1428,12 5
228	3435	1260	1384,5	1418,14 2	1168,62 5	1380,96 5	1405,58 8	1404,57 4
229	3450	1260	1410,75	1389,37 5	1235,42 9	1370,29 4	1403	1407,87 5
230	3465	1260	1414,446	1420	1175,25	1366,62 5	1413,62 5	1436,75
231	3480	1260	1389,75	1389,87 5	1191,23 5	1360,18 4	1404,37 5	1408
232	3495	1260	1399,75	1413,20 1	1208,92 9	1383	1421,5	1436,75
233	3510	1260	1409,5	1391,69 9	1212,57 1	1353,12 5	1419,35 3	1429,75
234	3525	1260	1389,946	1415,57 1	1213,37 5	1360,90 4	1398,33 8	1405,12 5
235	3540	1260	1420	1382,12 5	1216,80 4	1369,57 2	1407,12 5	1436
236	3555	1260	1419	1408,5	1212,87 5	1380,75	1413,5	1418,37 5
237	3570	1260	1385,5	1388,75	1234,32 2	1374,5	1401,39	1427
238	3585	1260	1421,75	1409,32 1	1220,42 9	1356,25	1418,37 5	1416,60 3
239	3600	1260	1398,395	1407,44 6	1246,14 3	1373	1419,37 5	1431,75
240	3615	1260	1393,375	1382,69 6	1194,16 9	1383,91 9	1420,62 5	1417,37 5
241	3630	1260	1400,5	1415,64 2	1234,82 1	1342,43 4	1428,75	1429

242	3645	1260	1385,395	1401,84 1	1233,57 1	1370,59 5	1420	1418,35 3
243	3660	1260	1391,074	1425,44 6	1244,62 5	1388	1409,25	1405,72 8
244	3675	1260	1427	1422,57 1	1227,62 5	1364,75	1422,5	1429,75
245	3690	1260	1367,375	1390,75	1236,12 5	1360	1406	1416,75
246	3705	1260	1418,446	1398,19 6	1239	1389	1414,83 8	1422,75
247	3720	1260	1407	1399,87 5	1208,91 9	1382,12 5	1409,25	1436
248	3735	1260	1385,324	1398,94 6	1246,5	1358,29 4	1431	1420,37 5
249	3750	1260	1424	1400,19 6	1245,42 9	1382,03 6	1420,37 5	1421,12 5
250	3765	1260	1410,5	1402,69 9	1213,37 5	1344,12 5	1423,75	1410,5
251	3780	1260	1382,699	1383,32 4	1237	1393	1419,10 3	1414,12 5
252	3795	1260	1403,821	1415	1229	1364,82 1	1414,62 5	1421,12 5
253	3810	1260	1424,571	1396,82 4	1222,75	1370,53 6	1424,87 5	1422,75
254	3825	1260	1400,875	1392,25	1235,42 9	1355,75	1407,87 5	1424
255	3840	1260	1408,875	1420	1206,66 9	1375,5	1409,72 8	1429,75
256	3855	1260	1370,574	1394,82 4	1251,26 7	1349,01 5	1429,75	1396,55 1
257	3870	1260	1413,321	1393,37 5	1224,69 6	1367,37 5	1410,35 3	1433
258	3885	1260	1430,142	1409,87 5	1220,37 5	1368,5	1436	1416,37 5
259	3900	1260	1393,75	1402,44 6	1253	1376,86 5	1404,25	1424,62 5
260	3915	1260	1400,895	1391,25	1205,62 5	1363,75	1407,37 5	1422,75
261	3930	1260	1402,375	1394,57 4	1232,32 1	1394,05 4	1420,62 5	1419,72 8
262	3945	1260	1409,875	1404,57 1	1246,85 7	1368,55 4	1404,10 3	1427,37 5
263	3960	1260	1398,375	1399,19 6	1245,42 9	1385	1423	1418,37 5
264	3975	1260	1401,375	1409,32 1	1211,62 5	1354,55 9	1436	1422,37 5
265	3990	1260	1393,27	1388,5	1226,32 1	1362,62 5	1422	1419,62 5
266	4005	1260	1406,5	1392,37 5	1217,77 9	1381	1416,35 3	1421,87 5

267	4020	1260	1410	1415	1233,25	1339	1436	1423,5
268	4035	1260	1399,375	1389,82 4	1238,07 1	1398,42 9	1418,37 5	1418
269	4050	1260	1394,25	1407,5	1216,91 1	1339,79 4	1416,58 8	1436
270	4065	1450	1402,875	1413	1220,05 4	1360,75	1413,5	1422,75
271	4080	1450	1408,071	1389	1189,96 4	1337,32 1	1425,37 5	1418,5
272	4095	1450	1405,5	1400,75	1185,33 9	1274,19 6	1436	1430,5
273	4110	1450	1381,074	1389,87 5	1112	1288,28 6	1411,62 5	1416,75
274	4125	1450	1407,071	1397,37 5	1109,87 5	1206,37 5	1430,5	1408,25
275	4140	1450	1391,821	1415,07 1	1060,51 8	1190,60 7	1418,37 5	1421,12 5
276	4155	1450	1409,446	1404,57 1	1023,25	1139,57 1	1394,12 5	1422,37 5
277	4170	1450	1415	1398,37 5	980,482	1068,62 5	1415,5	1407,37 5
278	4185	1450	1399,699	1402,25	956,714	1048,83 9	1421,12 5	1421,12 5
279	4200	1450	1393,75	1400,44 6	911,75	1019,23 2	1386,94 1	1405,87 5
280	4215	1450	1384,125	1389,25	888	981,035	1431,62 5	1425,37 5
281	4230	1450	1410,946	1406,44 6	820,875	930,036	1424,62 5	1418,62 5
282	4245	1450	1407,446	1393,32 4	809,071	894	1422	1422,75
283	4260	1450	1418,446	1423	772,168	856,375	1424,62 5	1427,37 5
284	4275	1450	1378,125	1399,69 9	742,268	812,821	1412,72 8	1416,75
285	4290	1450	1400,75	1401	706	800	1429,25	1430,5
286	4305	1450	1418,446	1402,87 5	663,544	735,125	1418	1424,25
287	4320	1450	1418,071	1395,25	638,518	701	1411,75	1418,75
288	4335	1450	1397,875	1401,82 4	598	676,571	1414,12 5	1405,25
289	4350	1450	1412,27	1412	574,714	646,714	1411,5	1429,37 5
290	4365	1450	1393,27	1384,32 4	538,992	618,571	1436,75	1414,60 3
291	4380	1450	1408,946	1416	508,339	574,25	1423	1400,83 8
292	4395	1450	1411,946	1389,75	475,482	540,375	1424,62 5	1417,87 5

293	4410	1450	1404,446	1406,51 7	451,286	512	1413,37 5	1425,5
294	4425	1450	1376,449	1398,75	425	477	1424,62 5	1420,75
295	4440	1450	1397,5	1387,02	384	456	1431,62 5	1417,10 3
296	4455	1450	1391,821	1405,07 1	365	422,375	1416	1412,21 3
297	4470	1450	1406,804	1406,87 5	336,571	388,089	1422,75	1427,75
298	4485	1450	1421	1391,62 5	307,75	357,929	1417,87 5	1434
299	4500	1450	1367,25	1404,30 4	288,304	328,143	1411,5	1404,62 5
300	4515	1450	1408,625	1406,87 5	250,375	298	1419,21 3	1408,47 8
301	4530	1450	1409,5	1398,27	227,518	266,357	1414,75	1436,75
302	4545	1450	1389,5	1395,19 6	210,839	246,857	1436,25	1417,62 5
303	4560	1450	1392,25	1432,14 2	177,911	209,946	1422,75	1426,12 5
304	4575	1450	1418,446	1405,5	155,465	187,588	1420,37 5	1434,37 5
305	4590	1450	1398,576	1398,87 5	132,243	156,625	1407,37 5	1429
306	4605	1450	1410,321	1386,59 4	111,292	139,357	1429	1414,87 5
307	4620	1450	1425,463	1414	89,238	115,273	1407,60 3	1419,12 5
308	4635	1450	1407,446	1397,44 6	68,057	89,147	1427,75	1407,87 5
309	4650	1450	1394,25	1395,75	50,614	66,184	1410,12 5	1436
310	4665	1450	1407,517	1426,58 8	32,249	38,518	1415,5	1403,5
311	4680	1450	1394,77	1405,82 4	22,422	24,991	1420,37 5	1436,75
312	4695	1450	1411,75	1391,32 4	1,179	7,336	1432,37 5	1417,25
313	4710	1450	1383,77	1398,51 7	1,55	3,214	1405,87 5	1408,12 5
314	4725	1450	1401,375	1414,44 6	2,308	0,577	1436	1418,37 5
315	4740	1450	1391,196	1378,94 6	0	1,908	1414,87 5	1418,37 5
316	4755	1450	1426,588	1418,44 6	0	1,154	1438	1409,87 5
317	4770	1450	1400,75	1399,27	0	0	1436	1436

318	4785	1450	1410,5	1415,5	0	0	1412,37 5	1417,25
319	4800	1450	1388,875	1384,25	0	0	1416	1418,5

Archivo en Excel 2010508OMNI2Datos

Anexo cinco: Tablas e imágenes de las pruebas

1. Dimensiones y masa OMNI 1

Prueba	2
Nombre	Dimensiones y masa
Objetivo	Mediciones dimensionales y de masa.

Fecha	Mayo 2015
Responsable de la prueba	Lina Cock
Plataforma a probar	OMNI1

Instrumentos de medida	Exactitud
Flexómetro y escuadras	1 mm
Báscula	1 Kgr

Item	
Largo (cm)	43
Ancho (cm)	37
Alto (cm)	13
Distancia entre centro de las ruedas en Y (cm)	32
Distancia entre centro de las ruedas en X (cm)	31,5
Masa sin carga (Kgr)	7

2. Lista de chequeo OMNI1

Prueba	1
Nombre	Lista de chequeo
Objetivo	Probar funcionamiento de mandos, indicadores y motores y anotar condiciones importantes de operación.

Fecha	Mayo 2015
Responsable de la prueba	Lina Cock
Plataforma a probar	OMNI1
Superficie sobre la que se desplaza la plataforma	Alfombra
Masa a transportar (Kgr)	0

Item	Cumple	
	SI	NO
LEDs indicadores		
Velocidad de referencia de la plataforma	X	
Modo de operación con y sin retroalimentación	X	
Nivel de carga de la batería		X
Reconocimiento de PS2 por parte del arduino	X	
Mandos		
Interruptor en caja de mandos		NA
Interruptor con llave en caja de mandos		NA
Interruptor en caja procesador		NA
Botón rosado para habilitar alimentación de potencia a los motores		NA

Botón rojo para deshabilitar alimentación de potencia a los motores		NA
Botón verde aumentar la velocidad de referencia	X	
Botón azul para disminuir la velocidad de referencia	X	
Botón derecho R1 para activar modo de operación con retroalimentación	X	
Botón izquierdo L1 para activar modo de operación con retroalimentación	X	
Combinando traslación y rotación	X	

Funcionamiento	Operación sin retroalimentación					Operación con retroalimentación				
	0	V1	V2	V3	V4	0	V1	V2	V3	V4
Desplazamiento +Y	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Desplazamiento -Y	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Desplazamiento +X	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Desplazamiento -X	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Desplazamiento +Y+X	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Desplazamiento +Y-X	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Desplazamientos -Y+X	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Desplazamientos -Y-X	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Desplazamiento +Z	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Desplazamiento -Z	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Combinando traslación y rotación	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si

3. Tiempo para desplazamiento OMNI 1

Prueba	3
Nombre	Tiempo para desplazamiento
Objetivo	Verificar que el tiempo para desplazarse una distancia igual para movimientos en X y en Y sean iguales y para movimientos en diagonal sea el doble. Comparar para cada tipo de movimiento los tiempos cuando se trabaja con y sin retroalimentación.
Método	Se mide el tiempo empleado para recorrer una distancia conocida y siempre igual en todos los tipos de movimiento y modos de operación. Con los datos medidos se calculan las relaciones de tiempo.

Fecha	Mayo 2015
Responsable de la prueba	Lina Cock
Plataforma a probar	OMNI1
Superficie sobre la que se desplaza la plataforma	Alfombra
Masa de la carga a transportar (Kgr)	0

Instrumentos de medida	Exactitud
Cronómetro	1/100 seg
Flexómetro	1 mm
Escuadras	1 mm
Transportador	1 grado sexagesimal
Báscula	1 Kgr

Se hicieron las siguientes pruebas de tiempo para desplazamiento

3.1. +X sin retroalimentación

3.2. +X con retroalimentación

3.3. +Y sin retroalimentación

3.4. +Y con retroalimentación

3.5 +Y-X sin retroalimentación

3.6 +Y-X con retroalimentación

Prueba		3.1		
Nombre		Tiempo para desplazamiento		
Modo de operación (con/sin retroalimentación)		SIN		
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)		+X		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)		2		
Repetición	Distancia inicial (mm)	Distancia final (mm)	Diferencia Distancia (mm)	Tiempo (s)
1	0	1174	1174	11,27
2	0	1174	1174	11,38
3	0	1174	1174	11,44
4	0	1174	1174	11,12
5	0	1174	1174	11,26
Promedio				11,29
Desviación				0,12
% Coeficiente de variación				1,09
Muestras				5
% Error				0,97

Prueba		3.2		
Nombre		Tiempo para desplazamiento		
Modo de operación (con/sin retroalimentación)		CON		
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)		+X		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)		2		
Repetición	Distancia inicial (mm)	Distancia final (mm)	Diferencia Distancia (mm)	Tiempo (s)

1	0	1174	1174	6,84
2	0	1174	1174	6,31
3	0	1174	1174	6,69
4	0	1174	1174	6,84
5	0	1174	1174	6,85
Promedio				6,71
Desviación				0,23
% Coeficiente de variación				3,45
Muestras				5
% Error				3,08

Prueba		3.3		
Nombre		Tiempo para desplazamiento		
Modo de operación (con/sin retroalimentación)		SIN		
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)		+Y		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)		2		
Repetición	Distancia inicial (mm)	Distancia final (mm)	Diferencia Distancia (mm)	Tiempo (s)
1	0	1174	1174	6,60
2	0	1174	1174	6,47
3	0	1174	1174	6,44
4	0	1174	1174	6,44
5	0	1174	1174	6,52
Promedio				6,49
Desviación				0,07
% Coeficiente de variación				1,04
Muestras				5
% Error				0,93

Prueba		3.4		
Nombre		Tiempo para desplazamiento		
Modo de operación (con/sin retroalimentación)		CON		
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)		+Y		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)		2		

Repetición	Distancia inicial (mm)	Distancia final (mm)	Diferencia Distancia (mm)	Tiempo (s)
1	0	1174	1174	4,89
2	0	1174	1174	5,02
3	0	1174	1174	5,00
4	0	1174	1174	5,06
Promedio				4,99
Desviación				0,01
% Coeficiente de variación				1,45
Muestras				4
% Error				1,45

Prueba		3.5		
Nombre		Tiempo para desplazamiento		
Modo de operación (con/sin retroalimentación)		SIN		
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)		-X+Y		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)		2		
Repetición	Distancia inicial (mm)	Distancia final (mm)	Diferencia Distancia (mm)	Tiempo (s)
1	0	1174	1174	15,24
2	0	1174	1174	15,98
3	0	1174	1174	16,01
4	0	1174	1174	15,80
Promedio				15,76
Desviación				0,44
% Coeficiente de variación				2,77
Muestras				4
% Error				2,77

Prueba		3.6		
Nombre		Tiempo para desplazamiento		
Modo de operación (con/sin retroalimentación)		CON		
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)		-X+Y		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)		2		

Repetición	Distancia inicial (mm)	Distancia final (mm)	Diferencia Distancia (mm)	Tiempo (s)
1	0	1174	1174	9,87
2	0	1174	1174	9,67
3	0	1174	1174	9,23
4	0	1174	1174	9,07
Promedio				9,46
Desviación				0,33
% Coeficiente de variación				3,46
Muestras				4
% Error				3,46

4. Desviación en trayectoria OMNI 1

Prueba	4
Nombre	Desviación en trayectoria
Objetivo	Se calcula la desviación en la trayectoria X, Y, Z para los modos de operación con y sin retroalimentación y para varios tipos de movimiento, con el objetivo de conocer el comportamiento de los controles PID y como afecta la maniobrabilidad del vehículo.
Método	Se mide distancia recorrida en X, Y y Z. Con estos datos se calcula la distancia total en XY utilizando la fórmula para la hipotenusa de un triángulo rectángulo. Se tiene en cuenta rotación en Z. Estas distancias se comparan con las del caso de trayectoria ideal sin desviación.

Fecha	Mayo 2015
Responsable de la prueba	Lina Cock
Plataforma a probar	OMNII
Superficie sobre la que se desplaza la plataforma	Alfombra
Masa de la carga a transportar (Kgr)	0

Instrumentos de medida	Exactitud
Cronómetro	1/100 seg
Flexómetro	1 mm
Escuadras	1 mm
Transportador	1 grado sexagesimal
Báscula	1 Kgr

Se hicieron las siguientes pruebas de desviación en trayectoria

- 4.1. -X Sin perturbación y sin retroalimentación
- 4.2. -X Sin perturbación y con retroalimentación
- 4.3. -X Con perturbación y sin retroalimentación

4.4. -X Con perturbación y con retroalimentación

4.5. +Y Sin perturbación y sin retroalimentación

4.6. +Y Sin perturbación y con retroalimentación

4.7. +Y Con perturbación y sin retroalimentación

4.8. +Y Con perturbación y con retroalimentación

Prueba		4.1							
Nombre		Desviación en trayectoria							
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)							-X		
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1							NO		
Motor con perturbación (1,2,3,4)							NO		
Modo de operación (con/sin retroalimentación)							SIN		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)							2		
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY	Diferencia en distancia total XY
1	0	972	972	178	234	-56	-9	973,612	1,612
2	0	972	972	178	234	-56	-9	973,612	1,612
3	0	972	972	178	234	-56	-9	973,612	1,612
4	0	972	972	178	234	-56	-9	973,612	1,612
5	0	972	972	178	234	-56	-9	973,612	1,612
Promedio								973,612	
Desviación								0	
Coeficiente								0	
Muestras								4	
Error								0	
Resumen prueba 4.1									
Sin perturbación									
Modo de operación: Sin retroalimentación									
Tipo de movimiento: -X									
Distancia en trayectoria ideal = 972 mm									
Distancia en trayectoria medida = 973,612 mm									
Diferencia en trayectoria = 1,612 mm									
Rotación en Z = -9									

Prueba		4.2							
Nombre		Desviación en trayectoria							
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)							-X		
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1							NO		
Motor con perturbación (1,2,3,4)							NO		
Modo de operación (con/sin retroalimentación)							CON		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)							2		

Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY	Diferencia en distancia total XY
1	0	972	972	178	234	-56	-9	973,612	1,612
2	0	972	972	178	234	-56	-9	973,612	1,612
3	0	972	972	178	234	-56	-9	973,612	1,612
4	0	972	972	178	234	-56	-9	973,612	1,612
Promedio								973,612	
Desviación								0	
% Coeficiente de variación								0	
Muestras								4	
% Error								0	
Resumen prueba 4.2									
Sin perturbación									
Modo de operación: Con retroalimentación									
Tipo de movimiento: -X									
Distancia en trayectoria ideal = 972 mm									
Distancia en trayectoria medida = 973,612 mm									
Diferencia = 1,612 mm									
Rotación en Z = -9									

Prueba		4.3							
Nombre		Desviación en trayectoria							
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)							-X		
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1							SI 10%		
Motor con perturbación (1,2,3,4)							1		
Modo de operación (con/sin retroalimentación)							SIN		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)							2		
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY	Diferencia en distancia total XY
1	0	972	972	178	205	-27	15	972,375	0,375
2	0	972	972	178	250	-72	18	974,663	2,666
3	0	972	972	178	250	-72	18	974,663	2,666
4	0	972	972	178	257	-79	13	975,205	3,208
5	0	972	972	178	257	-79	13	975,205	3,208
6	0	972	972	178	257	-79	13	975,205	3,208
7	0	972	972	178	257	-79	13	975,205	3,208
Promedio								974,646	
Desviación								1,034	
% Coeficiente de variación								0,106	

Muestras						7	
% Error						0,080	
Resumen prueba 4.3							
Con perturbación							
Modo de operación: Sin retroalimentación							
Tipo de movimiento: -X							
Distancia en trayectoria ideal = 972 mm							
Distancia en trayectoria medida = 974,646 mm							
Diferencia = 2,646mm							
Rotación en Z = Varía entre 13° y 18°							

Prueba	4.4								
Nombre	Desviación en trayectoria								
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)							-X		
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1							SI 10%		
Motor con perturbación (1,2,3,4)							1		
Modo de operación (con/sin retroalimentación)							CON		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)							2		
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY	Diferencia en distancia total XY
1	0	972	972	178	204	-26	5	972,348	0,348
2	0	972	972	178	213	-35	6	972,630	0,630
3	0	972	972	178	212	-34	6	972,594	0,594
4	0	972	972	178	208	-30	6	972,463	0,463
5	0	972	972	178	216	-38	6	972,743	0,743
6	0	972	972	178	213	-35	6	972,630	0,630
7	0	972	972	178	215	-37	6	972,704	0,704
Promedio								972,587	
Desviación								0,138	
%Coeficiente de variación								0,014	
Muestras								7	
% Error								0,011	

Resumen prueba 4.4									
Con perturbación									
Modo de operación: Con retroalimentación									
Tipo de movimiento: -X									
Distancia en trayectoria ideal = 972 mm									
Distancia en trayectoria medida = 972,587mm									
Diferencia = 0,587mm									
Rotación en Z = 5,857°									

Prueba	4.5								
Nombre	Desviación en trayectoria								

Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)									+Y
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1									NO
Motor con perturbación (1,2,3,4)									NO
Modo de operación (con/sin retroalimentación)									SIN
Velocidad de referencia (1,2,3,4)									2
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY	
1	48	48	0	0	1338	0	0	1338	
2	48	48	0	0	1338	0	0	1338	
3	48	48	0	0	1338	0	0	1338	
4	48	49	-1	0	1338	0	0	1338	
5	48	49	-1	0	1338	0	0	1338	
6	48	49	-1	0	1338	0	0	1338	
Promedio								1338	
Desviación								0	
%Coeficiente de variación								0	
Muestras								6	
% Error								0	
Resumen prueba 4.5									
Sin perturbación									
Modo de operación: Sin retroalimentación									
Tipo de movimiento: +Y									
Distancia en trayectoria ideal = 1338 mm									
Distancia en trayectoria medida = 1338 mm									
Diferencia = 0 mm									
Rotación en Z = 0									

Prueba		4.6							
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)									+Y
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1									NO
Motor con perturbación (1,2,3,4)									NO
Modo de operación (con/sin retroalimentación)									CON
Velocidad de referencia (1,2,3,4)									2
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY	Diferencia en distancia total XY
1	48	29	19	0	1338	1338	0	1338,135	0,135
2	48	29	19	0	1338	1338	0	1338,135	0,135
3	48	31	17	0	1338	1338	0	1338,108	0,108

4	48	29	19	0	1338	1338	0	1338,135	0,135
5	48	31	17	0	1338	1338	0	1338,108	0,108
6	48	31	17	0	1338	1338	0	1338,108	0,108
7	48	29	19	0	1338	1338	0	1338,108	0,108
Promedio								1338,120	
Desviación								0,014	
%Coeficiente de variación								0,001	
Muestras								7	
% Error								0,001	
Resumen prueba 4.6									
Sin perturbación									
Modo de operación: Con retroalimentación									
Tipo de movimiento: +Y									
Distancia en trayectoria ideal = 1338 mm									
Distancia en trayectoria medida = 1338,12 mm									
Diferencia = 0,12 mm									
Rotación en Z = 0									

Prueba	4.7								
Nombre	Desviación en trayectoria								
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)							+Y		
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1							SI 5%		
Motor con perturbación (1,2,3,4)							1		
Modo de operación (con/sin retroalimentación)							SIN		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)							2		
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY	
1	48	93	-45	0	1338	1338	0	1338,757	
2	48	84	-36	0	1338	1338	0	1338,484	
3	48	90	-42	0	1338	1338	0	1338,659	
4	48	84	-36	0	1338	1338	0	1338,484	
5	48	83	-35	0	1338	1338	0	1338,458	
6	48	87	-39	0	1338	1338	0	1338,568	
7	48	90	-42	0	1338	1338	0	1338,659	
Promedio								1338,581	
Desviación								0,113	
%Coeficiente de variación								0,008	
Muestras								7	
% Error								0,006	
Resumen prueba 4.7									
Con perturbación									
Modo de operación: Sin retroalimentación									

Tipo de movimiento: +Y Distancia en trayectoria ideal = 1338mm Distancia en trayectoria medida = 1338,581mm Diferencia = 0,581mm Rotación en Z = 0°

Prueba	4.8								
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)	+Y								
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1	SI 5%								
Motor con perturbación (1,2,3,4)	1								
Modo de operación (con/sin retroalimentación)	CON								
Velocidad de referencia (1,2,3,4)	2								
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY	Diferencia en distancia total XY
1	48	75	-27	0	1338	1338	0	1338,272	0,272
2	48	76	-28	0	1338	1338	0	1338,293	0,293
3	48	76	-28	0	1338	1338	0	1338,293	0,293
4	48	75	-27	0	1338	1338	0	1338,272	0,272
5	48	76	-28	0	1338	1338	0	1338,293	0,293
Promedio								1338,285	
Desviación								0,011	
%Coeficiente de variación								0,001	
Muestras								5	
% Error								0,001	
Resumen prueba 4.8 Con perturbación Modo de operación: Con retroalimentación Tipo de movimiento: +Y Distancia en trayectoria ideal = 1338 mm Distancia en trayectoria medida = 1338,285 mm Diferencia = 0,285mm Rotación en Z = 0°									

5. Dimensiones y masa OMNI 2

Prueba	2
Nombre	Dimensiones y masa
Objetivo	Mediciones dimensionales y de masa.

Fecha	Mayo 2015
Responsable de la prueba	Lina Cock
Plataforma a probar	OMNI1

Instrumentos de medida	Exactitud
Flexómetro y escuadras	1 mm
Báscula	1 Kgr

Item	
Largo (mm)	1200
Ancho (mm)	775
Alto (mm)	1000(*)
Distancia entre ejes de las ruedas en Y (mm)	710
Distancia entre centro de las ruedas en X (mm)	700
Masa sin carga (Kgr)	75(*)

6. Lista de chequeo OMNI 2

Prueba	1
Nombre	Lista de chequeo
Objetivo	Probar funcionamiento de mandos, indicadores y motores y anotar condiciones importantes de operación.

Fecha	Mayo 2015
Responsable de la prueba	Lina Cock
Plataforma a probar	OMNI2
Superficie sobre la que se desplaza la plataforma	Tapete argollado
Masa a transportar (Kgr)	0

Item	Cumple	
	SI	NO
LEDs indicadores		
Velocidad de referencia de la plataforma	X	
Modo de operación con y sin retroalimentación	X	
Nivel de carga de la batería	X	
Reconocimiento de PS2 por parte del arduino	X	
Mandos		
Interruptor en caja de mandos	X	
Interruptor con llave en caja de mandos	X	
Interrptor en caja procesador	X	
Botón rosado para habilitar alimentación de potencia a los motores	X	
Botón rojo para deshabilitar alimentación de potencia a los motores	X	
Botón verde aumentar la velocidad de referencia	X	
Botón azul para disminuir la velocidad de referencia	X	
Botón derecho R1 para activar modo de operación con retroalimentación	X	
Botón izquierdo L1 para activar modo de operación con retroalimentación	X	
Combinando traslación y rotación	X	

Funcionamiento	Operación sin retroalimentación					Operación con retroalimentación				
	0	V1	V2	V3	V4	0	V1	V2	V3	V4
Desplazamiento +Y	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Desplazamiento -Y	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si

Desplazamiento +X	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Desplazamiento -X	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Desplazamiento +Y+X	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal
Desplazamiento +Y-X	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal
Desplazamiento -Y+X	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal
Desplazamiento -Y-X	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal	mal
Desplazamiento +Z	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Desplazamiento -Z	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
Combinando traslación y rotación	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si

7. Tiempo para desplazamiento OMNI 2

Prueba	3
Nombre	Tiempo para desplazamiento
Objetivo	Verificar que el tiempo para desplazarse una distancia igual para movimientos en X y en Y sean iguales y para movimientos en diagonal sea el doble. Comparar para cada tipo de movimiento los tiempos cuando se trabaja con y sin retroalimentación.
Método	Se mide el tiempo empleado para recorrer una distancia conocida y siempre igual en todos los tipos de movimiento y modos de operación. Con los datos medidos se calculan las relaciones de tiempo.

Fecha	Mayo 2015
Responsable de la prueba	Lina Cock
Plataforma a probar	OMNI2
Superficie sobre la que se desplaza la plataforma	Tapete argollado
Masa de la carga a transportar (Kgr)	0

Instrumentos de medida	Exactitud
Cronómetro	1/100 seg
Flexómetro	1 mm
Escuadras	1 mm
Báscula	1 Kgr

Se hicieron las siguientes pruebas de tiempo para desplazamiento

3.1. +X sin retroalimentación

3.2. +X con retroalimentación

3.3. +Y sin retroalimentación

3.4. +Y con retroalimentación

3.5 +Y-X sin retroalimentación

3.6 +Y-X con retroalimentación

Prueba	3.1
--------	-----

Nombre			Tiempo para desplazamiento	
Modo de operación (con/sin retroalimentación)			SIN	
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)			+X	
Velocidad de referencia (1,2,3,4)			2	
Repetición	Distancia inicial (cm)	Distancia final (cm)	Diferencia Distancia (cm)	Tiempo (s)
1	0	225	225	9,24
2	0	225	225	9,51
3	0	225	225	9,05
4	0	225	225	9,66
Promedio			9,37	
Desviación			0,27	
% Coeficiente de variación			2,91	
Muestras			4	
% Error			2,91	

Prueba			3.2	
Nombre			Tiempo para desplazamiento	
Modo de operación (con/sin retroalimentación)			CON	
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)			+X	
Velocidad de referencia (1,2,3,4)			2	
Repetición	Distancia inicial (cm)	Distancia final (cm)	Diferencia Distancia (cm)	Tiempo (s)
1	0	225	225	5,03
2	0	225	225	5,11
3	0	225	225	5,13
4	0	225	225	5,25
Promedio			5,13	
Desviación			0,09	
% Coeficiente de variación			1,77	
Muestras			5	
% Error			1,77	

Prueba			3.3	
Nombre			Tiempo para desplazamiento	

Modo de operación (con/sin retroalimentación)			SIN	
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)			+Y	
Velocidad de referencia (1,2,3,4)			2 (440 rpm)	
Repetición	Distancia inicial (cm)	Distancia final (cm)	Diferencia Distancia (cm)	Tiempo (s)
1	0	281,00	281,00	7,77
2	0	281,00	281,00	7,85
3	0	281,00	281,00	7,24
4	0	281,00	281,00	7,80
Promedio			7,67	
Desviación			0,29	
% Coeficiente de variación			3,72	
Muestras			4	
% Error			3,72	

Prueba			3.4	
Nombre			Tiempo para desplazamiento	
Modo de operación (con/sin retroalimentación)			CON	
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)			+Y	
Velocidad de referencia (1,2,3,4)			2	
Repetición	Distancia inicial (cm)	Distancia final (cm)	Diferencia Distancia (cm)	Tiempo (s)
1	0	281,00	281,00	4,34
2	0	281,00	281,00	4,38
3	0	281,00	281,00	4,23
4	0	281,00	281,00	4,23
Promedio			4,30	
Desviación			0,08	
% Coeficiente de variación			1,78	
Muestras			4	
% Error			1,78	

Prueba			3.5	
Nombre			Tiempo para desplazamiento	

Modo de operación (con/sin retroalimentación)			SIN		
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)			-X+Y		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)			2		
Repetición	Distancia inicial (cm)	Distancia final (cm)	Diferencia Distancia (cm)	Tiempo (s)	Velocidad (cm/s)
1					No fue posible
Promedio					
Desviación					
% Coeficiente de variación					
Muestras					
% Error					

Prueba			3.6		
Nombre			Tiempo para desplazamiento		
Modo de operación (con/sin retroalimentación)			CON		
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)			-X+Y		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)			2		
Repetición	Distancia inicial (mm)	Distancia final (mm)	Diferencia Distancia (mm)	Tiempo (s)	Velocidad (mm/s)
1	0				No fue posible
Promedio					
Desviación					
% Coeficiente de variación					
Muestras					
% Error					

8. Desviación en trayectoria OMNI2

Prueba	4
Nombre	Desviación en trayectoria
Objetivo	Se calcula la desviación en la trayectoria X, Y, Z para los modos de operación con y sin retroalimentación y para varios tipos de movimiento, con el objetivo de conocer el comportamiento de los controles PID y como afecta la maniobrabilidad del vehículo.
Método	Se mide distancia recorrida en X, Y y Z. Con estos datos se calcula la distancia total en XY utilizando la fórmula para la hipotenusa de un

	triángulo rectángulo. Se tiene en cuenta rotación en Z. Estas distancias se comparan con las del caso de trayectoria ideal sin desviación.
--	--

Fecha	Mayo 2015
Responsable de la prueba	Lina Cock
Plataforma a probar	OMNI2
Superficie sobre la que se desplaza la plataforma	Tapete argollado
Masa de la carga a transportar (Kgr)	0

Instrumentos de medida	Exactitud
Cronómetro	1/100 seg
Flexómetro	1 mm
Escuadras	1 mm
Transportador	1 grado sexagesimal
Báscula	1 Kgr

Se hicieron las siguientes pruebas de desviación en trayectoria

- 4.1. +X Sin perturbación y sin retroalimentación
- 4.2. +X Sin perturbación y con retroalimentación
- 4.3. +X Con perturbación y sin retroalimentación
- 4.4. +X Con perturbación y con retroalimentación

- 4.5. +Y Sin perturbación y sin retroalimentación
- 4.6. +Y Sin perturbación y con retroalimentación

Prueba		4.1							
Nombre		Desviación en trayectoria (medidas en cm)							
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)		+X							
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1		NO							
Motor con perturbación (1,2,3,4)		NO							
Modo de operación (con/sin retroalimentación)		SIN							
Velocidad de referencia (1,2,3,4)		440 rpm							
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY	Diferencia en distancia total XY
1	0	225	225	13,7	64	50,3	-5	230,55	5,66
2	0	225	225	13,7	64,4	50,7	-5	230,64	6,09
3	0	225	225	13,7	64	50,3	-5	230,55	6,23
4	0	225	225	137	64,4	50,7	-5	230,64	5,02
Promedio								230,59	
Desviación								0,05	
Coeficiente								0,02	
Muestras								4	

Error						0,02	
Resumen prueba 4.1 Con perturbación Modo de operación: Sin retroalimentación Tipo de movimiento: +X Distancia en trayectoria ideal = 225cm Distancia en trayectoria medida = 230,59cm Diferencia en trayectoria = 5,59cm Rotación en Z = -5°							

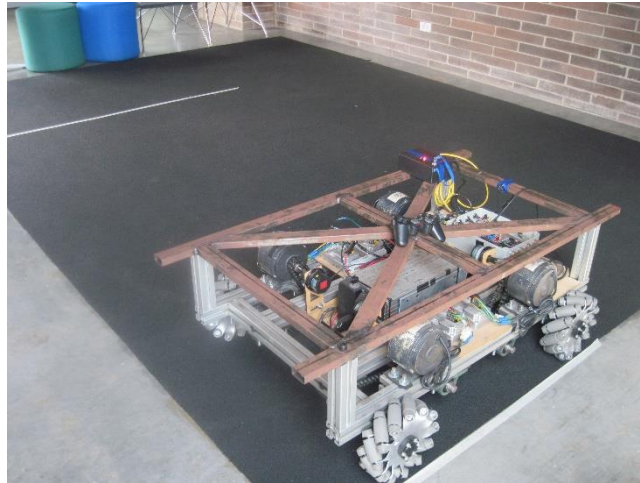


Figura 46. Prueba Desviación trayectoria en X

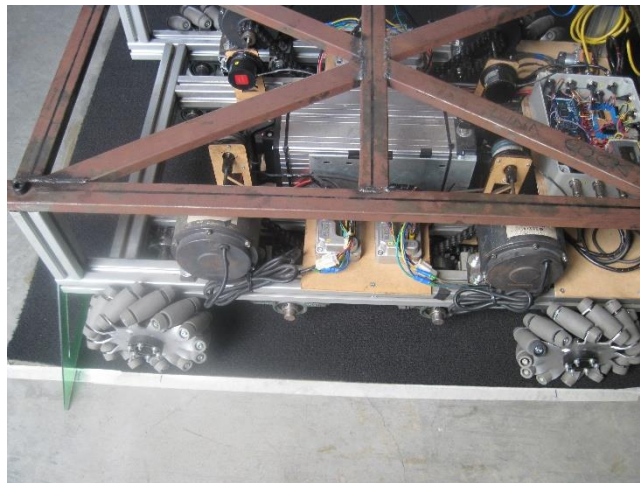


Figura 47. Prueba Desviación trayectoria en X Punto de inicio

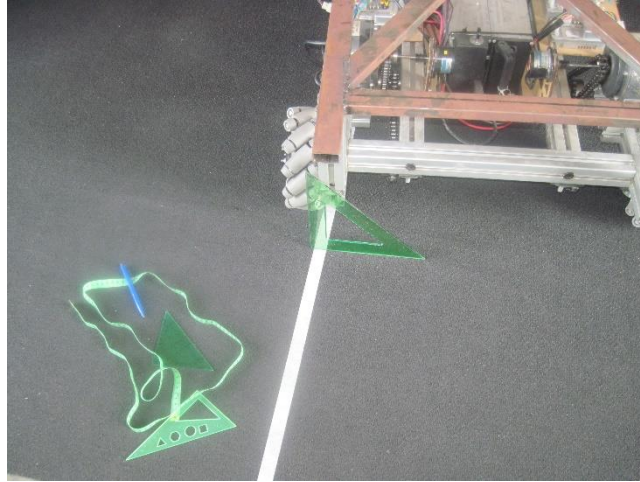


Figura 48. Desviación trayectoria en X Punto de llegada sin perturbación

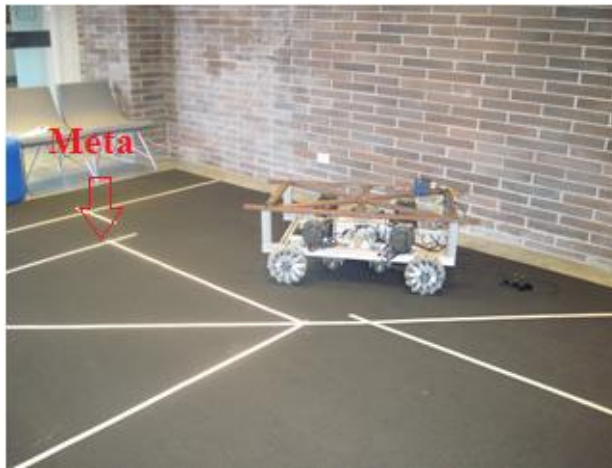


Figura 49. Desviación trayectoria en X con perturbación sin retroalimentación no llega a la meta

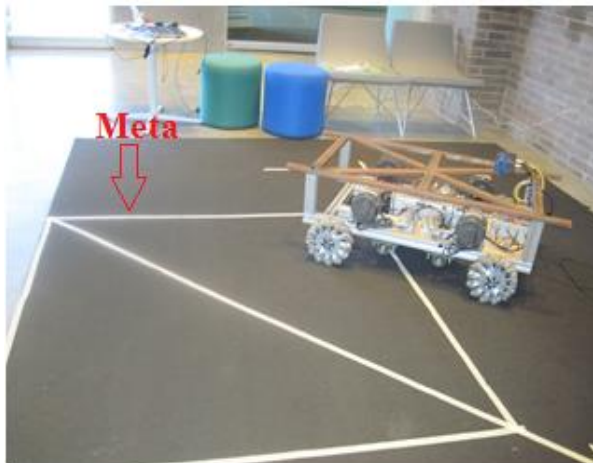


Figura 50. Desviación trayectoria en X con perturbación con retroalimentación llega a la meta

Prueba	4.2							
Nombre	Desviación en trayectoria							
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)	+X							
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1	NO							
Motor con perturbación (1,2,3,4)	NO							
Modo de operación (con/sin retroalimentación)	CON							
Velocidad de referencia (1,2,3,4)	440 rpm							
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY
1	0	225	225	13,7	64,5	50,8	0	230,66
2	0	225	225	13,7	66,4	52,7	0	231,09
3	0	225	225	13,7	67	53,3	0	231,23
4	0	225	225	13,7	61,5	47,8	0	230,02
Promedio								230,75
Desviación								0,54
% Coeficiente de variación								0,23
Muestras								4
% Error								0,23
Resumen prueba 4.2								
Sin perturbación								
Modo de operación: Con retroalimentación								
Tipo de movimiento: +X								
Distancia en trayectoria ideal = 225cm								
Distancia en trayectoria medida = 230,75cm								
Diferencia = 5,75cm								
Rotación en Z = 0°								

Prueba	4.3								
Nombre	Desviación en trayectoria								
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)	+X								
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1	SI 5%								
Motor con perturbación (1,2,3,4)	1								
Modo de operación (con/sin retroalimentación)	SIN								
Velocidad de referencia (1,2,3,4)	440 rpm								
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY	Diferencia en distancia total XY
1	0		En 4 intentos nunca llego						
Promedio									

Desviación							
% Coeficiente de variación							
Muestras							
% Error							

Resumen prueba 4.3

Con perturbación
 Modo de operación: Sin retroalimentación
 Tipo de movimiento: +X
 Distancia en trayectoria ideal = 225 cm
 Distancia en trayectoria medida = No llegó
 Diferencia = No llegó
 Rotación en Z = No llegó

Prueba	4.4								
Nombre	Desviación en trayectoria								
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)	+X								
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1	SI 10%								
Motor con perturbación (1,2,3,4)	1								
Modo de operación (con/sin retroalimentación)	CON								
Velocidad de referencia (1,2,3,4)	440 rpm								
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY	Diferencia en distancia total XY
1	0	225	225	13,7	125	-111,3	24	251,02	26,02
2	0	225	225	13,7	126,6	-112,9	24	251,74	26,74
3	0	225	225	13,7	132,1	-118,4	28	254,25	29,25
Promedio								252,34	27,34
Desviación								1,69	
% Coeficiente de variación								0,67	
Muestras								3	
% Error								0,78	

Resumen prueba 4.4

Con perturbación
 Modo de operación: Con retroalimentación
 Tipo de movimiento: -X
 Distancia en trayectoria ideal = 225cm
 Distancia en trayectoria medida = 252,34
 Diferencia = 27,34
 Rotación en Z = entre 24° y 28°

Prueba	4.6								
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)	+Y								
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1	NO								

Motor con perturbación (1,2,3,4)						NO		
Modo de operación (con/sin retroalimentación)						SIN		
Velocidad de referencia (1,2,3,4)						440 rpm		
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY
1	0	-11,5	11,5	0	281	-281	5	281,24
2	0	-11,5	11,5	0	281	-281	5	281,24
3	0	-14,1	14,1	0	281	-281	6	281,35
4	0	-12,5	12,5	0	281	-281	3	281,28
5	0	-11,5	11,5	0	281	-281	5	281,24
6	0	.10,8	10,8	0	281	-281	3	281,20
7	0	-16,1	16,1	0	281	-281	4	281,46
8	0	-16,1	16,1	0	281	-281	4	281,46
Promedio								281,31
Desviación								0,10
%Coeficiente de variación								0,04
Muestras								8
% Error								0,03
<p>Resumen prueba 4.5 Sin perturbación Modo de operación: Sin retroalimentación Tipo de movimiento: +Y Distancia en trayectoria ideal = 281cm Distancia en trayectoria medida = 281,31cm Diferencia = 0,31 Rotación en Z = entre 3° y 6°</p>								



Figura 51. Prueba Desviación trayectoria en Y

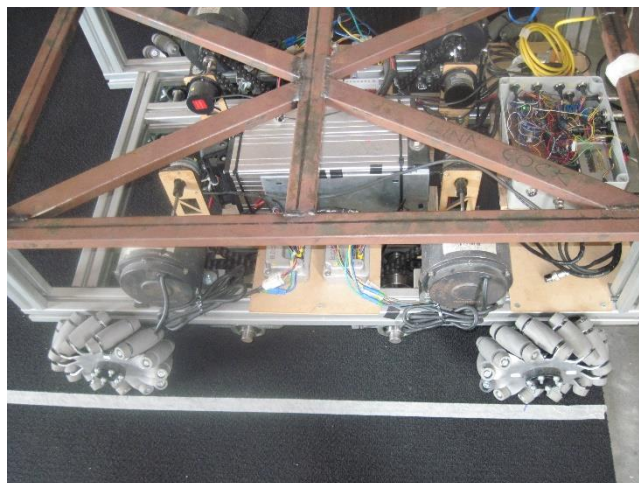


Figura 52. Desviación trayectoria en Y Punto de inicio

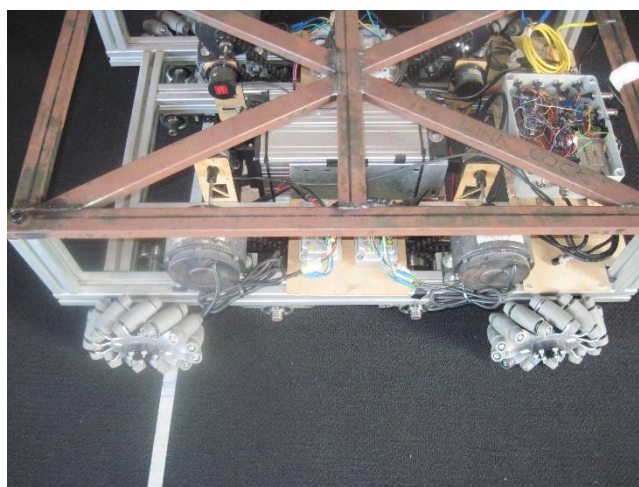


Figura 53. Desviación trayectoria en Y Punto de llegada sin perturbación

Prueba	4.6							
Nombre	Desviación en trayectoria							
Tipo de movimiento (+X,+Y,-X,-Y,+X+Y,-X-Y,+X-Y,-X+Y)								+Y
% Perturbación en la velocidad de la rueda 1								NO
Motor con perturbación (1,2,3,4)								NO
Modo de operación (con/sin retroalimentación)								CON
Velocidad de referencia (1,2,3,4)								440 rpm
Repetición	Distancia inicial X	Distancia final X	Diferencia Distancia X	Distancia inicial Y	Distancia final Y	Diferencia Distancia Y	Diferencia rotación Z	Distancia total XY
1	0	-16	16	0	281	281	0	281,46
2	0	-16	16	0	281	281	1	281,46

3	0	-15	15	0	281	281	1	281,40
4	0	-15	15	0	281	281	1	281,40
5	0	-15	15	0	281	281	0	281,40
Promedio								281,42
Desviación								0,03
%Coeficiente de variación								0,01
Muestras								4
% Error								0,01
<p>Resumen prueba 4.6 Sin perturbación Modo de operación: Con retroalimentación Tipo de movimiento: +Y Distancia en trayectoria ideal = 281 cm Distancia en trayectoria medida = 281,42 cm Diferencia = 0,42 Rotación en Z = inferior a 1°</p>								

Bibliografía

- [1] M. Udengaard y K. Iagnemma, «Analysis, Design, and Control of an Omnidirectional Mobile Robot in Rough Terrain,» *Journal of Mechanical Desig*, vol. 131, pp. 121002-1 a 121002-11, 2009.
- [2] A. Davidson y S. Leutenegger, «www.doc.ic.ac.uk,» [En línea]. Available: <http://www.doc.ic.ac.uk/~ajd/Robotics/RoboticsResources/lecture2.pdf>. [Último acceso: 15 Mayo 2015].
- [3] C. M. Vélez, *Curso de control de productos mecatrónicos*, Medellín, Colombia: Universidad Eafit, 2013.
- [4] O. Jahanian y G. Karimi, «Locomotion Systems in Robotic Application,» *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 689-696, 2006.
- [5] W. C. S. H. R. Damoto, «Holonomic-Omnidirectional Vehicle with New Omni-Wheel Mechanism,» *Proceeding of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 773-778, 2001.
- [6] Z. Yunan, W. Shuangshuang, Z. Jian, S. Quan y Gao Jianmin, «Research on Motion Characteristic of Omnidirectional Robot Based on Mecanum Wheel,» *International Conference on Digital Manufacturing and Automation (ICDMA)*, vol. 2, pp. 237-241, 2010.
- [7] P. Ahlawat, C. Gaw, J. Golden, K. Khera, A. Marino, M. McCabe, A. Nathan y N. Pagel, «www.cs.cornell.edu,» 12 5 2004. [En línea]. Available: <http://www.cs.cornell.edu/boom/2005/projectarchive/robocup/documentation.php>. [Último acceso: 15 5 2015].
- [8] G. Anderson, Christine Chang, David Chung, Patrick Dingle, Leonard Evansic, Hank Law, Sean Richardson, John Roberts, Ken Sterk y Jeremy Yim, «www.cs.cornell.edu,» 1 Mayo 2003. [En línea]. Available: <http://www.cs.cornell.edu/boom/2005/projectarchive/robocup/documentation/robocup/2003/2003me.pdf>. [Último acceso: 15 Mayo 2015].
- [9] R. S. Santiago Martínez, *Control y Comportamiento de Robots Omnidireccionales*, Montevideo - Uruguay: Proyecto de grado, Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, 2009.
- [10] R. Thomas, «Omni-Directional Mobile Platform for the Transportation of Heavy Objects,» Master's Thesis, Massey University, Palmerston North, New Zeland, 2011.
- [11] Salih, Jefri Efendi Mohd, Mohamed Rizon, Sazali Yaacob, Abdul Hamid Adom y Mohd Rozailan Mamat, «Designing omni-directional mobile robot with mecanum wheel,» *American Journal of Applied Sciences*, vol. 3, n° 5, pp. 1831-1835, 2006.
- [12] M. d. V. Nkgatho Tlale, «Kinematics and Dynamics Modelling of a Mecanum Wheeled Mobile Platform,» Council for Scientific and Industrial Research Pretoria, Pretoria.
- [13] K.-L. Han, O.-K. Choi, J. Kim, H. Kim y J. Lee, «Design and control of mobile robot with Mecanum wheel,» de *ICCAS-SICE, 2009*, Fukuoka, 2009.

- [14] S. A. Miller, «Network Interfaces and Fuzzy-Logic Control for a Mecanum Wheeled Omni-directional Robot,» 2005.
- [15] V. B. Costella y H. Rodríguez, «Sistema de control con lógica difusa y diseño de plataforma autónoma con ruedas Mecanum a partir de su arquitectura,» *RIDTEC*, vol. 9, n° 2, pp. 30-38, 2013.
- [16] P. Yedamal, «Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals AN885,» Microchip Technology Inc, 2003.
- [17] H. A. Murillo, «Curso Lenguajes Técnicos de Programación,» Medellín, 2013.
- [18] B. Beauregard, «www.brettbeauregard.com,» [En línea]. Available: <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction/>. [Último acceso: 14 mayo 2015].