

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA



TRABAJO DE GRADO PREVIO LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

TITTLE:

“MOBILE ROBOT FOR RESEARCH ON PATH PLANNING
ALGORITHMS: ODOMETRY SYSTEM”

TEMA:

“ROBOT MÓVIL PARA INVESTIGACIÓN EN ALGORITMOS DE
PLANEAMIENTO DE RUTAS: SISTEMA DE ODOMETRÍA”

AUTOR:

WILSON ANDRES VACA PAREDES

DIRECTOR:

ING. CARLOS XAVIER ROSERO, MSc.

IBARRA, 2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del norte dentro del Proyecto Repositorio Digital Institucional determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la universidad.

Por medio del presente documento dejamos sentada nuestra voluntad de participar en este proyecto, para lo cual se pone a disposición la siguiente información:

DATOS DEL AUTOR	
CEDULA DE IDENTIDAD	100329325-3
APELLIDOS Y NOMBRES	Vaca Paredes Wilson Andres
DIRECCIÓN	Calle Zarcillejo 1-92 entre De las orquídeas y Ñukanchisisa Otavalo
E-MAIL	andres_vaca23@outlook.es
TELÉFONO MÓVIL	0969507183
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	Robot móvil para investigación en algoritmos de planeamiento de rutas: sistema de odometría.
AUTOR	Andres Vaca
FECHA	2017/12/12
PROGRAMA	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA	INGENIERO EN MECATRÓNICA
ASESOR	Ing. Carlos Xavier Rosero, MSc.

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Wilson Andres Vaca Paredes con cédula de identidad Nro. 1003293253, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

3. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 12 de diciembre de 2017.



Vaca Paredes Wilson Andres

C.I.: 100339207-1



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE
LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Vaca Paredes Wilson Andres con cédula de identidad Nro. 100329325-3, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la ley de propiedad intelectual del Ecuador, artículos 4, 5,6, en calidad de autor del trabajo de grado denominado: ROBOT MÓVIL PARA INVESTIGACIÓN EN ALGORITMOS DE PLANEAMIENTO DE RUTAS: SISTEMA DE ODOMETRÍA, que ha sido desarrollada para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, 12 de diciembre de 2017.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'W. Andres', is written over a horizontal dotted line.

Vaca Paredes Wilson Andres

C.I.: 100329325-3



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DECLARACIÓN

Yo, Vaca Paredes Wilson Andres, con cédula de identidad N°. 100329325-3, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de autoría; y que este no ha sido previamente presentado en ningún grado o calificación profesional.

A través de la presente declaración cedo los derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Técnica del Norte, según lo establecido por las Leyes de la Propiedad Intelectual, Reglamentos y Normativa vigente de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, 12 de diciembre de 2017.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'W. Paredes', is written over a light blue circular stamp. The signature is fluid and cursive.

.....
Vaca Paredes Wilson Andres

C.I.: 100329325-3

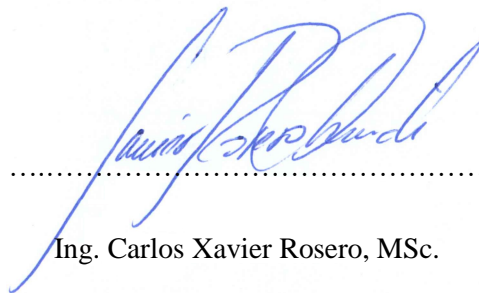


UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

Que la Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica con el tema: ROBOT MÓVIL PARA INVESTIGACIÓN EN ALGORITMOS DE PLANEAMIENTO DE RUTAS: SISTEMA DE ODOMETRÍA, ha sido desarrollado y terminado en su totalidad por el Sr. Vaca Paredes Wilson Andres, con cédula de identidad: 100329325-3, bajo mi supervisión para lo cual firmo en constancia.

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Carlos Xavier Rosero', is written over a horizontal dotted line.

Ing. Carlos Xavier Rosero, MSc.

DIRECTOR

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios quien supo darme las fuerzas necesarias para poder llegar a esta instancia de mi vida, mi más sincero agradecimiento a mis padres, Wilson y Marisol, quienes con tanto esfuerzo, paciencia y amor lograron apoyarme y darme todo lo que un hijo necesita para conseguir sus sueños.

A mis hermanos, Daysi, Edison y Grace, quienes siempre pusieron su granito de arena para poder seguir adelante y salir triunfante en todos estos años de mi carrera universitaria.

A mi familia que siempre está para brindarme su apoyo, su cariño y su deseo de que salga triunfante ante toda adversidad que se presente.

A mi novia Catherine Cruz quien ha estado para acompañarme y ayudarme en lo que ha estado a su alcance para culminar mi carrera.

A todos mis profesores, quienes han inculcado en mi dedicación, entrega, conocimiento, sabiduría y sobre todo el deseo de superación.

Andres Vaca P.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a las personas más importantes en mi vida, mis Padres, ustedes quienes me dieron la vida, quienes han sabido aconsejarme siempre, quienes me han visto caer y levantar y han estado siempre cuando les necesite, ustedes quienes con infinito amor y sabiduría han sabido guiar mi vida por el sendero de la verdad y respeto porque gracias a sus palabras de aliento me motivaron a salir adelante y así llegar a cumplir esta meta, para ustedes dedico todo mi esfuerzo reflejado en este trabajo.

Andres Vaca P.

RESUMEN

El universo de la robótica está experimentando un desarrollo impresionante impulsado por los avances tecnológicos que se ven día a día tanto en hardware como en software. La robótica móvil en los últimos años ha estado en constante innovación y evolución por lo que es un eje fundamental dentro del proceso enseñanza aprendizaje de robots.

Al ser importante el aprendizaje de robótica móvil es complicado que los laboratorios dispongan de herramientas para desarrollar prácticas y probar algoritmos de planeamiento de rutas. Lamentablemente dentro de las soluciones existen robots móviles que son costosos.

Ante aquello esta tesis propone desarrollar un robot móvil con hardware de gran capacidad y software propietario existentes en los laboratorios. Esta plataforma servirá para desarrollar investigaciones relacionadas con robótica, programación, visión artificial, control y automatización.

En la realización del robot móvil se utilizaron motores acoplados a llantas para su locomoción, colocados en configuración diferencial para estimar el desplazamiento y la rotación sobre su eje. Además, se cuenta con un sistema de medición basados en codificadores incrementales utilizados para la odometría, situados en cada uno de los motores.

Dichas señales son procesadas por un sistema embebido sbRIO usado para el control y adquisición de datos en tiempo real. Existe una interfaz gráfica humano – robot desarrollado en LabVIEW que permite manipular al robot y observar las señales de los sensores a través de indicadores fáciles de interpretar.

Como resultado se obtuvo un robot cuyas características están dentro de lo estipulado, dicho mecanismo es útil para futuros trabajos de investigación y aprendizaje de algoritmos de planeamiento de rutas.

ABSTRACT

The universe of robotics is experiencing an impressive development driven by the technological advances that are seen every day in both hardware and software. Mobile robotics in recent years has been in constant innovation and evolution so it is a fundamental axis in the process of teaching learning robots.

As it is important to learn mobile robotics, it is difficult for laboratories to have tools to develop practices and test route planning algorithms. Unfortunately within the solutions there are mobile robots that are expensive.

Before that, this thesis proposes to develop a mobile robot with high capacity hardware and proprietary software existing in laboratories. This platform will serve to develop investigations related to robotics, programming, artificial vision, control and automation.

In the realization of the mobile robot, motors coupled to rims were used for their locomotion, placed in a differential configuration to estimate the displacement and the rotation on their axis. In addition, there is a measurement system based on incremental encoders used for odometry, located in each of the motors.

These signals are processed by an embedded sbRIO system used for the control and acquisition of data in real time. There is a human-robot graphic interface developed in LabVIEW that allows you to manipulate the robot and observe the signals of the sensors through easy-to-interpret indicators.

As a result, a robot whose characteristics are within the stipulated was obtained, this mechanism is useful for future research and learning of route planning algorithms.

INDICE DE CONTENIDOS

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN	ii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.....	iv
DECLARACIÓN.....	v
CERTIFICACIÓN	vi
AGRADECIMIENTO	vii
DEDICATORIA	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
INDICE DE CONTENIDOS	xi
INDICE DE FIGURAS.....	xvi
INDICE DE TABLAS	xviii
INDICE DE ECUACIONES	xviii
INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
ALCANCE.....	2
JUSTIFICACIÓN.....	3
ANTECEDENTES.....	3

CAPÍTULO I.....	5
MARCO TEÓRICO.....	5
1.1 ROBOT MÓVIL	5
1.2 LOCALIZACIÓN DEL ROBOT.....	5
1.3 CINEMÁTICA DEL ROBOT	6
1.3.1 REPRESENTACIÓN DE LA POSICIÓN DEL ROBOT.....	7
1.3.2 CINEMÁTICA DE ACCIONAMIENTO	9
1.4 PERCEPCIÓN	10
1.5 ODOMETRÍA.....	11
CAPITULO II.....	13
MARCO METODOLÓGICO.....	13
REQUERIMIENTOS Y REQUISITOS DEL SISTEMA.....	13
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA	13
2.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	13
2.3 APROXIMACIÓN EN BLOQUES	14
2.3.1 SUBSISTEMA DE SENSADO.....	15
2.3.2 SUBSISTEMA DE PROCESAMIENTO.....	15
2.3.3 SUBSISTEMA DE RESPUESTA.....	15
2.3.4 SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	15
2.3.5 SUBSISTEMA INTERFAZ HUMANO – ROBOT.....	15
2.4 CARACTERIZACIÓN DEL HARDWARE	16

2.4.1	CHASIS	16
2.4.2	SUBSISTEMA DE SENSADO	17
2.4.2.1	CODIFICADORES	17
2.4.2.2	UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL (IMU).....	18
2.4.2.3	SENSOR PING	19
2.4.3	SUBSISTEMA DE PROCESAMIENTO.....	21
2.4.3.1	SINGLE BOARD RIO SBRIO – 9642	21
2.4.3.2	COMPONENTES PRINCIPALES	22
2.4.4	SUBSISTEMA DE RESPUESTA.....	25
2.4.4.1	PUENTE H.....	25
2.4.4.2	MOTORES.....	26
2.4.5	SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	27
2.4.5.1	BATERIAS LI-PO	27
2.4.6	SUBSISTEMA INTERFAZ HUMANO – ROBOT.....	29
2.4.6.1	LABVIEW	29
2.4.6.2	DESARROLLO DEL SISTEMA EN LABVIEW.....	29
2.5	MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT MÓVIL	31
2.5.1	SIMULACIÓN DEL MODELO EN MATLAB	34
2.5.2	MEDICIÓN DEL DESPLAZAMINETO	35
2.5.2.1	DIAGRAMA DE FLUJO DEL ANÁLISIS ODOMÉTRICO.....	36
2.5.2.2	IMPLEMENTACIÓN DEL ANÁLISIS ODOMÉTRICO EN LABVIEW ..	37

2.6	DIAGRAMA DE FLUJO DE FUNCIONAMIENTO	38
2.7	IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA EN EL ROBOT.....	38
2.8	IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA EN EL COMPUTADOR	40
2.9	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO GENERAL.....	40
3.	CAPITULO III	42
	RESULTADOS.....	42
3.1	PRUEBA DE LECTURA DE CODIFICADORES	42
3.2	PRUEBA DE VELOCIDAD DE LOS MOTORES	43
3.3	PRUEBA DE LECTURA DE VOLTAJE DE LAS BATERÍAS	45
3.4	PRUEBA DE DISTANCIA SENSOR PING.....	45
3.5	PRUEBA DEL SENSOR IMU	47
3.6	PRUEBA DEL ANÁLISIS ODOMÉTRICO	48
3.7	PRUEBA FINAL DE LA PLATAFORMA.....	49
3.7.1	PRUEBA DE RECORRIDO EN SUPERFICIE LISA.....	49
3.7.1.1	PRUEBA DE TRAYECTORIA RECTILÍNEA	49
3.7.1.2	TRAYECTORIA EN UN MISMO PUNTO.....	51
3.7.2	PRUEBA DE RECORRIDO EN SUPERFICIE RUGOSA	52
3.7.2.1	TRAYECTORIA RECTILÍNEA	52
3.7.2.2	TRAYECTORIA EN UN MISMO PUNTO.....	54
	<u>CAPITULO IV.....</u>	56
4.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	56

4.1	CONCLUSIONES	56
4.2	TRABAJO FUTURO	56
5.	BIBLIOGRAFIA	56
	ANEXOS	60
	MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DE LA PLATAFORMA	60

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Posición del robot móvil.....	7
Figura 1.2. Marco de referencia global y marco de referencia local del robot	8
Figura 1.3. Calculo de trayectoria par accionamiento diferencial	9
Figura 1.4. Trayectoria del robot móvil	11
Figura 1.5. Robot en configuración diferencial	11
Figura 2.1. Diagrama de bloques del sistema	14
Figura 2. 2. Estructura del robot	16
Figura 2. 3. Implementación de la estructura del robot	17
Figura 2.4. Codificador acoplado al motor	18
Figura 2.5. 9DOF Razor IMU sensor.....	19
Figura 2.6. Funcionamiento sensor PING.....	20
Figura 2.7. Sensor PING.....	21
Figura 2.8. Principales partes de la tarjeta sbRIO 9642.....	23
Figura 2.9 Software de la tarjeta sbRIO 9642.....	24
Figura 2.10. Driver puente H	25
Figura 2.11. Ubicación de motores	27
Figura 2.12. Baterías LIPO	28
Figura 2.13. Interfaz Humano-Robot.....	31
Figura 2. 14. Variables físicas del robot	32
Figura 2.15. Variables cinemáticas globales del robot móvil.....	32
Figura 2.16. Modelo cinemático robot móvil en simulink de Matlab	34
Figura 2.17. Respuesta del modelo a velocidades iguales	34
Figura 2.18. Respuesta del modelo a velocidades distintas en mismo sentido.....	35

Figura 2.19. Diagrama de flujo del análisis odométrico	36
Figura 2.20. Sub Vi análisis odométrico.....	37
Figura 2.21. Diagrama de flujo de funcionamiento de la plataforma	38
Figura 2.22. Implementación del programa en el robot.....	39
Figura 2.23. Implementación del programa en el computador	40
Figura 2.24. Diagrama esquemático	41
Figura 3.1. Prueba de lectura de codificadores	42
Figura 3.2. Lectura de codificadores.....	43
Figura 3.3. Toma de datos de velocidades en rpm.....	44
Figura 3.4. Velocidades de motores.....	44
Figura 3.5. Lectura de entradas analógicas de voltaje	45
Figura 3.6. Toma de datos de distancia sensor ping	46
Figura 3.7. Distancia sensor ping.....	47
Figura 3.8. Funcionamiento sensor IMU.	47
Figura 3.9. Interfaz gráfica de trayectoria rectilínea en superficie lisa.....	49
Figura 3.10. Prueba de campo de trayectoria rectilínea en superficie lisa.....	50
Figura 3.11. Polinomio de trayectoria rectilínea en superficie lisa.....	51
Figura 3.12. Interfaz gráfica de trayectoria en mismo punto superficie lisa.....	51
Figura 3.13. Prueba de campo de trayectoria en mismo punto superficie lisa.....	52
Figura 3.14. Interfaz gráfica de trayectoria rectilínea en superficie rugosa.....	52
Figura 3.15. Prueba de campo de trayectoria rectilínea en superficie rugosa.....	53
Figura 3.16. Polinomio de trayectoria rectilínea en superficie rugosa	54
Figura 3.17. Trayectoria recta en ambas superficies.....	54
Figura 3.18. Prueba 4 trayectoria en mismo punto superficie rugosa.....	55
Figura 3.19. Prueba de campo de trayectoria en mismo punto superficie rugosa	55

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Resultados lectura de codificadores.....	43
Tabla 3. 2 Velocidades en rpm de cada motor.....	44
Tabla 3.3 Mediciones de voltaje	45
Tabla 3.4. Distancias sensor ping	46
Tabla 3.5.Datos de la posición del robot móvil	48

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1): Velocidad lineal y tangencial de las ruedas del robot	6
Ecuación (2): Velocidad lineal del robot	7
Ecuación (3): Velocidad angular del robot	7
Ecuación (4): Modelo jacobiano velocidad lineal y angular	7
Ecuación (5): Vector postura del robot.....	8
Ecuación (6): Matriz de rotación ortogonal	8
Ecuación (7): Distancia recorrida rueda izquierda.....	9
Ecuación (8): Distancia recorrida rueda derecha	9
Ecuación (9): Distancia recorrida del robot	10
Ecuación (10): Parte viajada de un circulo en radianes	10
Ecuación (11): Ángulo de giro del robot	10
Ecuación (12): Ecuaciones cinemáticas referidas a un sistema de referencia global	33
Ecuación (13): Modelo cinemático del robot móvil	34
Ecuación (14): Posición del robot móvil	36

INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad existen varias plataformas de desarrollo en el área de la robótica móvil que son usadas para varias aplicaciones entre las que se encuentra la planificación de trayectorias. Sin embargo estas plataformas tienen un costo demasiado elevado y son cerradas ya que no permiten actualización en su hardware. Es necesario tomar en consideración que la robótica móvil ha aportado con grandes soluciones para problemas cotidianos referentes a la navegación autónoma.

Hay que tener presente que dentro de la Universidad Técnica del Norte y especialmente en la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, no existen plataformas de robots móviles, ya sean orientados para el uso académico o como base para el desarrollo de investigación. La causa para que no exista investigación dentro del área de la robótica móvil es atribuible a la inexistencia de plataformas que fomenten el desarrollo de estudio e investigación.

Por otro lado, en los laboratorios de mecatrónica existen hardware y software poco aprovechados, como son ciertas tarjetas con sistemas embebidos de gran capacidad computacional y software propietario con módulos de robótica. Usando éstos se obtendría un robot con costo bajo y de fácil construcción, cuya arquitectura podría ser escalable tanto en software como en hardware, diferenciándose notablemente de las soluciones presentes en el mercado local.

OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema para la estimación de posición y orientación de un robot móvil usando técnicas de odometría.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los requisitos necesarios para la construcción del robot móvil.
- Determinar la cinemática del robot, útil para la odometría.
- Realizar la interfaz básica humano-robot.
- Validar el funcionamiento del robot móvil.

ALCANCE

El proyecto a implementarse consistirá en el desarrollo de una interfaz básica humano-robot con la cual a partir de la estimación odométrica se obtiene la posición del robot. Además se contará con un sistema embebido trabajando en tiempo real para optimizar el uso del procesador, con el uso de software y hardware disponibles en los laboratorios de mecatrónica. Este sistema contará con sensores de rango, unidad de medición inercial, ruedas motorizadas con codificadores, sistema embebido, tal como se observa en la Fig. 0.1.

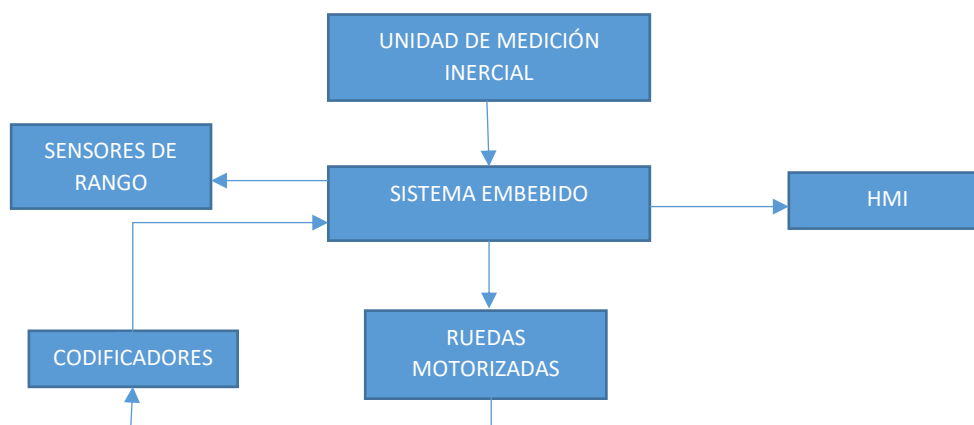


Figura 0.1. Diagrama de bloques de la implementación

JUSTIFICACIÓN

Para lograr la autonomía de un vehículo, este debe tener la capacidad de conocer su posición dentro de su ambiente. Un vehículo que no pueda localizarse a sí mismo corre el riesgo de chocar contra obstáculos, elegir las rutas inadecuadas o no poder evitar las áreas peligrosas. Esas son algunas de las razones por las cuales el problema de la localización es importante.

La relevancia del dispositivo propuesto consiste en una investigación aplicada que servirá como desarrollo de una plataforma base para investigación, estudio de sistemas robóticos móviles con planificación de trayectorias, y así obtener conocimiento práctico y no sólo teórico, como indicador para exponer el nivel de conocimientos y el gran potencial innovador de los estudiantes de la UTN.

La implementación de este sistema se basa en nociones, habilidades, capacidades, destrezas, aptitudes, vinculadas a la competencia profesional y a los conocimientos adquiridos por el Ingeniero Mecatrónico.

ANTECEDENTES

En la Universidad Técnica del Norte no se ha encontrado temas similares al propuesto, por lo que se tomará como referencia tesis y trabajos realizados dentro y fuera del país. Por ejemplo, Arellano en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos en Lima Perú en cambio construye un robot de dos ruedas que es monitoreado en tiempo real por una computadora que a través de una interfaz gráfica desarrollada en Java permite observar los parámetros de control del robot; la implementación del algoritmo de control lo hace en un dsPIC por las características que presenta y así poder obtener la estimación odométrica; para comunicar el robot con la PC utiliza comunicación serial RS-232; utiliza un controlador PID para la regularización de la posición y orientación angular del robot [1].

Benavides en la Universidad de la Republica en Montevideo Uruguay realiza la programación en java en el software Eclipse, realiza una propuesta que se basa en la representación del espacio de configuraciones libres a través de la construcción de roadmaps, muestreo aleatorio de configuraciones en torno a las aristas del roadmap y búsqueda de caminos óptimos con un algoritmo genético; no especifica si construyó o no el robot [2].

Zambrano en la Escuela Politécnica Nacional en Quito Ecuador utiliza la plataforma Robotino, que es una plataforma educativa de robot autónomo de alto costo fabricado por Festo; se aplica un modelo cinemático para determinar el controlador a usar; la planificación de ruta la realiza con el método de la construcción de grafos de conectividad, método por campos potenciales, método de descomposición de celdas; realiza la programación en LabVIEW [3].

Yandún en la Escuela Politécnica Nacional en Quito Ecuador realizó la selección del método por el cual el robot realizará la planificación de trayectorias, en este caso escogió los diagramas de Voronoi debido a la seguridad que presenta la trayectoria al considerarse a esta lo más alejado de los obstáculos; usa LabVIEW como software para desarrollar la programación de la planificación de la trayectoria; usa la plataforma Robotino que es una plataforma educativa de robot autónomo de la marca Festo; la comunicación con este robot es mediante wireless [4].

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se establecen las teorías para el diseño del modelo cinemático y del sistema de odometría a implementarse en el robot móvil.

1.1 ROBOT MÓVIL

Según la norma ISO 8373 define robot móvil como: “Robot capaz de viajar bajo su propio control moviéndose dentro de su entorno, con la capacidad para realizar las tareas previstas basadas en el estado actual y la detección, sin intervención humana.”

“Nota: Un robot móvil puede ser una plataforma móvil con o sin manipuladores” [5].

Para tener una noción más clara sobre que es un robot móvil se tiene la siguiente definición: robot móvil es una plataforma mecánica provisto de un sistema de locomoción capaz de navegar en un determinado ambiente, dotado de cierto nivel de autonomía para su desplazamiento con la suficiente inteligencia como para reaccionar y tomar decisiones basándose en determinadas observaciones tomadas de ese entorno. Sus aplicaciones pueden ser muy variadas y siempre están relacionadas con tareas que normalmente son riesgosas y nocivas para la salud humana, en áreas como la agricultura, en el transporte de cargas peligrosas o en tareas de exploración solitarias o cooperativas junto a otros vehículos no tripulados [6].

1.2 LOCALIZACIÓN DEL ROBOT

La estimación de la localización en un robot móvil constituye uno de los requerimientos principales para su navegación, pues permitirá estimar la posición y orientación desde un punto inicial hasta un punto final sobre un espacio de trabajo. El método que casi todos los robots móviles llevan incorporado y el más común es el odométrico. Este sistema integra la trayectoria estimando la posición y orientación del robot por el movimiento de las ruedas motrices, sin

embargo, se caracteriza por presentar distintas fuentes de error, unas asociadas a los sistemas mecánicos empleados que son acumulativas en el tiempo y otras debidas a deslizamientos, falta de simetría en las ruedas, etc. Estos errores provocan un aumento de la incertidumbre en la posición y orientación, pudiéndose llegar a un punto en el que la información proporcionada por el sistema odométrico no sea acorde con la realidad [7].

1.3 CINEMÁTICA DEL ROBOT

La cinemática es el estudio del comportamiento de los sistemas mecánicos. En robótica móvil, se necesita entender el comportamiento mecánico para diseñar robots móviles apropiados para tareas específicas así como para entender cómo desarrollar software de control para una instancia de hardware del robot [8].

El proceso básico para la localización de un robot móvil se basa en el modelo cinemático del sistema de tracción. Este sistema es el que permite al robot moverse alrededor de un determinado entorno. De las distintas configuraciones basadas en ruedas de tracción la más popular es la configuración diferencial, la posición de un robot de este tipo puede ser estimada a partir de las ecuaciones geométricas que surgen de la relación entre los componentes del sistema de tracción y de la información de los codificadores rotativos que llevan acoplados a sus ruedas [9].

En la Fig. 1.1 se aprecia la localización del robot en el punto (x, y) , donde v es la velocidad lineal del robot móvil y V_L, V_R la velocidad tangencial de cada rueda que a través de las mismas se logra determinar la posición del robot mediante la ecuación

$$\begin{aligned} V_l &= \omega_l \cdot r \\ V_r &= \omega_r \cdot r, \end{aligned} \tag{1}$$

donde ω_l y ω_r son las velocidades angulares de cada rueda [10].

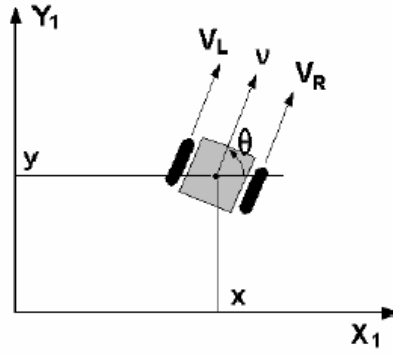


Figura 1.1. Posición del robot móvil [10]

Las velocidades lineales y angulares del robot se obtienen con la ecuación.

$$v = \frac{V_r + V_l}{2} = \frac{(W_r + W_l) \cdot r}{2} \quad (2)$$

$$w = \frac{V_r - V_l}{L} = \frac{(W_r - W_l) \cdot r}{L} \quad (3)$$

Conociendo que el robot se mueve en superficie plana se puede demostrar que:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & 0 \\ \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.3.1 REPRESENTACIÓN DE LA POSICIÓN DEL ROBOT

A lo largo del análisis cinemático al robot se modela como un cuerpo rígido sobre ruedas, operando en un plano horizontal. La dimensionalidad total del chasis del robot en el plano es de tres, dos para la posición en el plano y uno para la orientación a lo largo del eje vertical. Por supuesto, hay grados adicionales de libertad y flexibilidad debido a los ejes de las ruedas, las juntas de dirección de las ruedas y las articulaciones de la rueda. Sin embargo, por chasis de robot se refiere sólo al cuerpo rígido del robot, ignorando las articulaciones y los grados de libertad internos al robot y sus ruedas, [8].

Para especificar la posición del robot en el plano, se establece una relación entre el marco de referencia global del plano y el marco de referencia local del robot, como se muestra

en la Fig. 1.2. El punto O: $\{X_1, Y_1\}$ definen una base inicial en el plano como referencia global y se elige un punto P en el chasis del robot como marco de referencia local del robot $\{X_R, Y_R\}$. La posición de P en el marco de referencia global está especificada por las coordenadas “x” y “y”, y la diferencia angular entre los marcos de referencia global y local viene dada por θ [8].

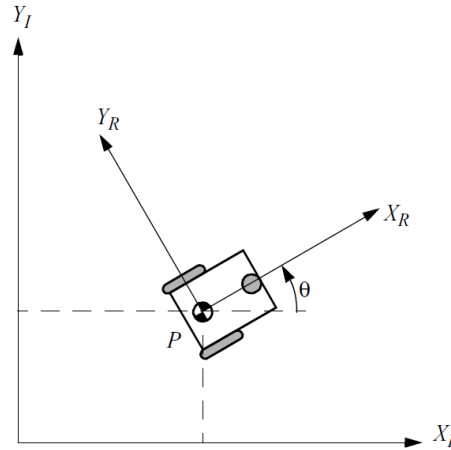


Figura 1.2. Marco de referencia global y marco de referencia local del robot, [8]

Se puede describir la postura del robot como un vector con estos tres elementos

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

donde ξ_I = postura del robot como marco de referencia global. Para describir el movimiento del robot en términos de movimientos de componentes, será necesario asignar el movimiento a lo largo de los ejes del marco de referencia global al movimiento a lo largo de los ejes del marco de referencia local del robot. Por supuesto, la asignación es una función de la postura actual del robot. Esta asignación se realiza utilizando la matriz de rotación ortogonal

$$R\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

y puede usarse para mapear el movimiento del robot. Esta operación se denomina $R\theta\xi_I$ porque el cálculo de esta operación depende del valor de teta, [8].

1.3.2 CINEMÁTICA DE ACCIONAMIENTO

Con el fin de obtener la trayectoria actual del vehículo, se necesita monitorear continuamente ambos codificadores de las ruedas (para un vehículo con accionamiento diferencial), como se puede observar en la Fig. 1.3 en donde muestra la distancia recorrida por un robot con accionamiento diferencial [11].

$$S_L = \frac{2\pi \times r \times \text{pulsosL}}{\text{pulsos_por_rev}} \quad (7)$$

$$S_R = \frac{2\pi \times r \times \text{pulsosR}}{\text{pulsos_por_rev}} \quad (8)$$

Donde se sabe que

- r = radio de la rueda.
- d = distancia entre las ruedas motrices.
- pulsos_por_rev = número de pulsos del codificador en una revolución completa.
- pulsosL = número de pulsos durante la medición del codificador izquierdo.
- pulsosR = número de pulsos durante la medición del codificador derecho.

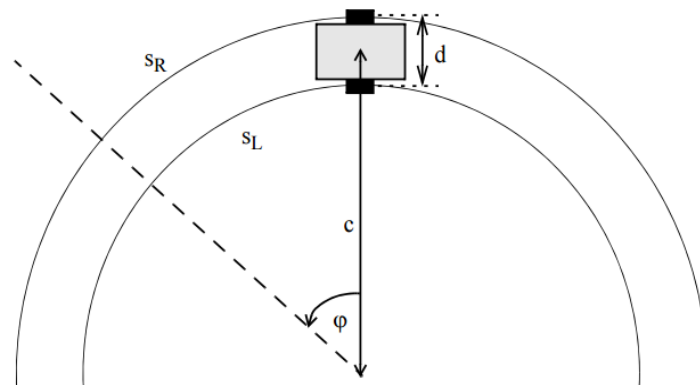


Figura 1.3. Cálculo de trayectoria por accionamiento diferencial, [11]

Primero se determina los valores de S_L y S_R en metros, que son las distancias recorridas por la rueda izquierda y derecha, respectivamente. La división entre los pulsos medidos y el número de pulsos por revolución da el número de revoluciones de las ruedas, que multiplicado esto por la circunferencia de la rueda se obtiene la distancia recorrida en metros [11].

Si se sabe la distancia recorrida de cada una de las ruedas del robot móvil se plantea la ecuación (9) que sirve para que un robot avance, retroceda o gire en el mismo sitio.

$$S = \frac{(SL + SR)}{2} \quad (9)$$

Sin embargo aún se requiere conocer la rotación φ del vehículo sobre la distancia recorrida. Suponiendo que el vehículo sigue un segmento circular, se puede definir SR y SL como la parte viajada de un círculo completo (φ en radianes) multiplicado por el radio de giro de cada rueda. Si el radio de giro del centro del vehículo es c , entonces durante un giro a la izquierda el radio de giro de la rueda derecha es $c + d / 2$, mientras que el radio de giro de la rueda izquierda es $c - d / 2$. Ambos círculos tienen el mismo centro, [11].

$$\begin{aligned} SR &= \varphi \cdot (c + d/2) \\ SL &= \varphi \cdot (c - d/2), \end{aligned} \quad (10)$$

restando ambas ecuaciones se elimina c :

$$SR - SL = \varphi \cdot d$$

Y finalmente despejando φ que es el ángulo de giro del robot móvil.

$$\varphi = \frac{(SR - SL)}{d} \quad (11)$$

1.4 PERCEPCIÓN

Una de las tareas más importantes de un sistema autónomo de cualquier tipo es adquirir conocimiento sobre su entorno. Esto se hace tomando medidas usando varios sensores y luego extrayendo información significativa de esas medidas, [8].

La percepción consiste en dotar al robot móvil de un sistema sensorial capaz de proporcionar suficiente información del entorno para poder determinar su localización de manera autónoma. Este sistema puede funcionar en base a diferentes tipos de sensores (sonares, cámaras, laser, GPS, giroscopios, etc.), seleccionando determinados tipos de datos u objetos a partir del conjunto de información adquirida, de tal manera que la localización del robot móvil

se determina a través del emparejamiento de los datos extraídos del entorno por el sistema sensorial, con datos previamente conocidos del entorno, [12].

1.5 ODOMETRÍA

La odometría es la técnica que estudia la estimación de la posición de un vehículo móvil a partir del desplazamiento de sus ruedas durante su navegación (coordenadas (x, y) y ángulo de orientación θ) con respecto a un punto inicial en un espacio determinado, como se muestra en la Fig. 1.4, [13].

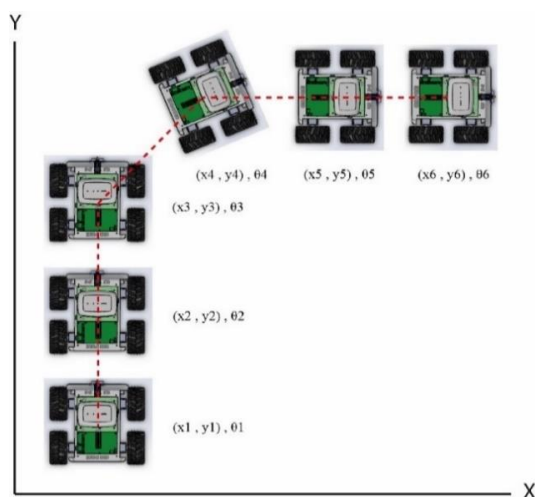


Figura 1.4. Trayectoria del robot móvil

En la Fig. 1.5 puede se puede ver una configuración típica de un robot diferencial de cuatro ruedas. Dispone de codificadores montados en los motores que cuentan las revoluciones de tal forma que así podrá llevar a cabo la odometría empleando ecuaciones geométricas para calcular la posición relativa del vehículo respecto a una posición inicial conocida, [13].

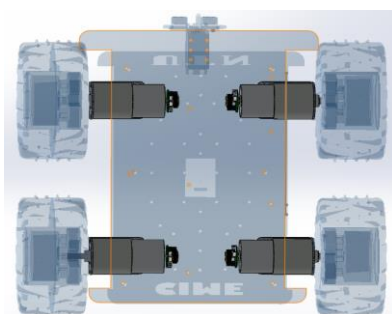


Figura 1.5. Robot en configuración diferencial

Es necesario recalcar que la odometría no determina la posición del robot móvil sino lo estima a partir de los datos obtenidos de la lectura de los codificadores de tal forma que la odometría introduce errores acumulativos en la medición del desplazamiento.

Se habla de estimación debido a que es imposible saber a ciencia cierta la posición del robot, los métodos que se utilizan para calcular la posición no tienen una precisión absoluta ya que las medidas de los sensores nunca se librarán de errores. En odometría es preciso hablar de posiciones relativas, pues no se puede hablar de coordenadas absolutas, o coordenadas del mundo. Con la odometría las posiciones que se dan, son relativas al punto de inicio, que será donde el robot comience a tomar las mediciones [13].

CAPITULO II

MARCO METODOLÓGICO

REQUERIMIENTOS Y REQUISITOS DEL SISTEMA

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

El sistema implementado deberá tener la capacidad para estimar su posición relativa a su localización inicial. La idea fundamental es la integración de información incremental del movimiento a lo largo del tiempo. Basado en la suposición de que las revoluciones de las ruedas se pueden traducir en desplazamiento lineal con relación al suelo.

2.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Los requerimientos del robot se especifican teniendo en cuenta las necesidades y considerando los factores que van a influenciar sobre el robot para obtener un funcionamiento óptimo, detallados a continuación:

- La estructura del robot móvil debe ser liviano y simétrico entre todos los elementos que lo conforman.
- El tamaño de la estructura dependen de los elementos que serán instalados para su funcionamiento.
- Los elementos que conforman el robot deben ser de fácil adquisición y sustitución.
- Los motores deben tener el torque suficiente capaz de mover la estructura y sus elementos.
- Las ruedas del robot móvil deben tener buen agarre para mejorar la fricción con el suelo y la estabilidad del robot se logra a través de cuatro ruedas.
- El funcionamiento del robot se lo hará en espacios abiertos planos y sin irregularidades en el suelo para evitar errores de lectura.
- Para la posición del robot se utiliza sensores digitales.

- El robot móvil debe tener un nivel de autonomía aceptable utilizando baterías adecuadas para la aplicación.
- La tarjeta de procesamiento será un sistema embebido en tiempo real para optimización de recursos.
- Incorpora un sensor de distancia para evasión de obstáculos.
- Conocer el estado de carga de las baterías.
- Comunicación con un enrutador inalámbrico para interacción humano-robot.
- Interfaz gráfica amigable donde se observa la información recibida del robot.

2.3 APROXIMACIÓN EN BLOQUES

La concepción básica del robot móvil se comprende a través de subsistemas con funciones específicas y constituidas por bloques de acuerdo a sus funciones tal como se muestra en la Fig. 2.1.

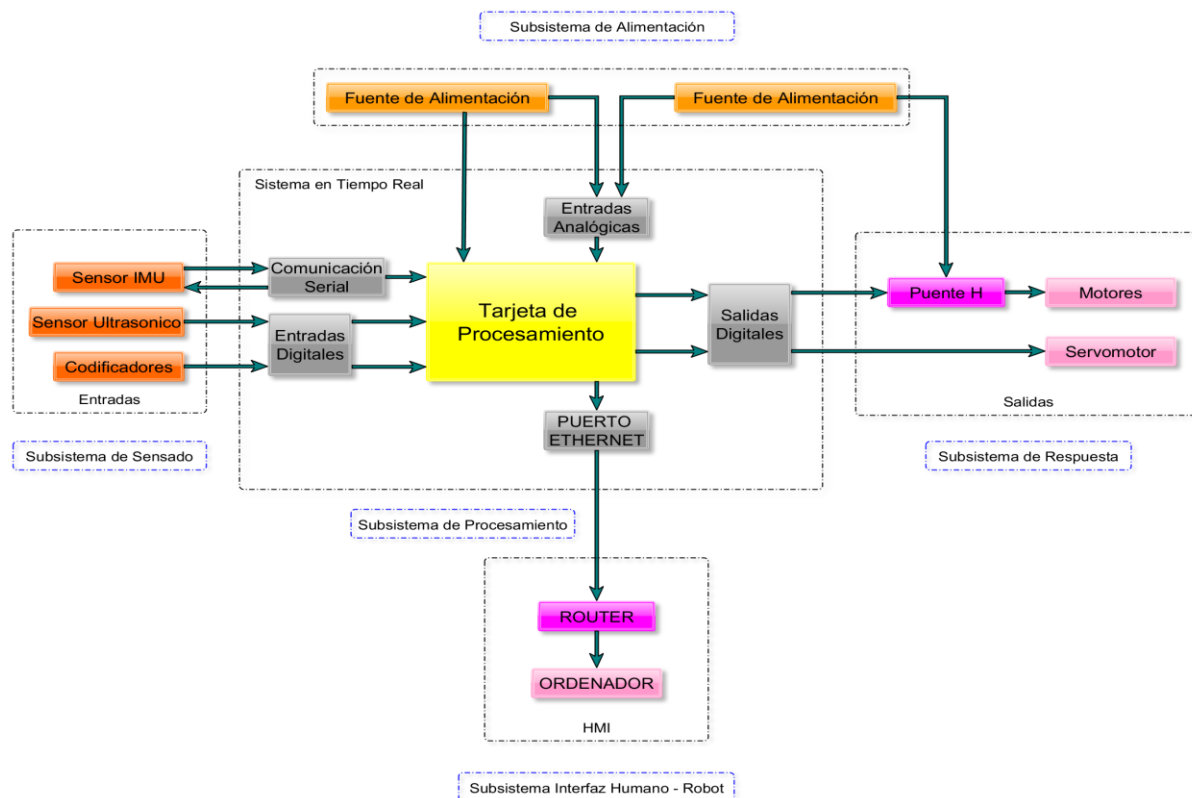


Figura 2.1. Diagrama de bloques del sistema

2.3.1 SUBSISTEMA DE SENSADO

El subsistema de sensado permite adquirir el valor en tiempo real de las variables implicadas en el funcionamiento del robot para enviarlas al subsistema de procesamiento.

Se adquieren señales a través del puerto serial, señales digitales y señales analógicas de voltaje.

2.3.2 SUBSISTEMA DE PROCESAMIENTO

Se basa fundamentalmente en un sistema embebido en tiempo real para optimizar el uso del procesador por la gran velocidad de respuesta en sus puertos de entradas y salidas mediante el cual controla y ejecuta las instrucciones internas y externas para el funcionamiento del robot móvil.

2.3.3 SUBSISTEMA DE RESPUESTA

Comprende los puentes h para manipular los actuadores de cada una de las ruedas del robot. Su función es adquirir cierta señal proveniente del subsistema de procesamiento para controlar el giro de los motores.

2.3.4 SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Se basa en unas baterías que suministran el voltaje y amperaje requeridos por los componentes del sistema. Posee protecciones que garantizan el buen funcionamiento ante condiciones desfavorables.

2.3.5 SUBSISTEMA INTERFAZ HUMANO – ROBOT

Su funcionamiento principal consiste en una interfaz gráfica amigable con el usuario que permite configurar parámetros para el funcionamiento de la plataforma y facilitar su comprensión sobre el estado actual del robot en tiempo real.

2.4 CARACTERIZACIÓN DEL HARDWARE

2.4.1 CHASIS

Para la realización del chasis del robot se tomó en consideración el tamaño de la tarjeta sbRIO como referencia ya que es el elemento que más espacio ocupa además se verificó las especificaciones físicas de los demás elementos para que se acoplen correctamente a la estructura; el chasis fue realizado en acrílico de 5mm de espesor mediante corte laser, consta de una base para la sujeción de los motores y baterías, otra para la sujeción de la tarjeta, y otra base para la sujeción del enrutador inalámbrico como se muestra en la Fig. 2.2.

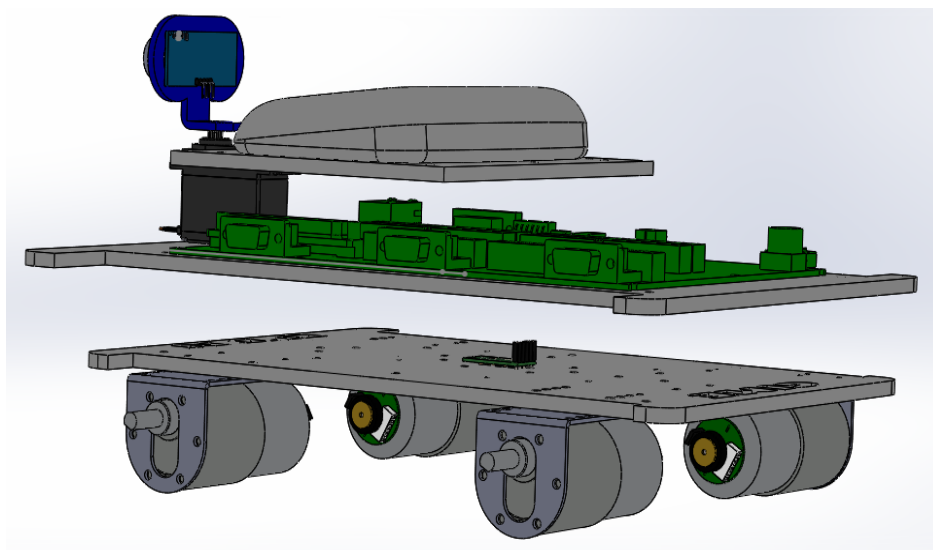


Figura 2. 2. Chasis del robot

Sobre la estructura se ensamblan todos los elementos que conforman el robot móvil tanto de control y potencia. Por tal motivo y para tener la seguridad de que todos los elementos encajen en sus posiciones se tiene una vista previa del chasis del robot realizada en SolidWorks.

Para la separación de las bases de la estructura se utilizó tubos poste de 25mm y 40mm, se realizó el montaje de todos sus componentes tal como se ve en la Fig. 2.3.

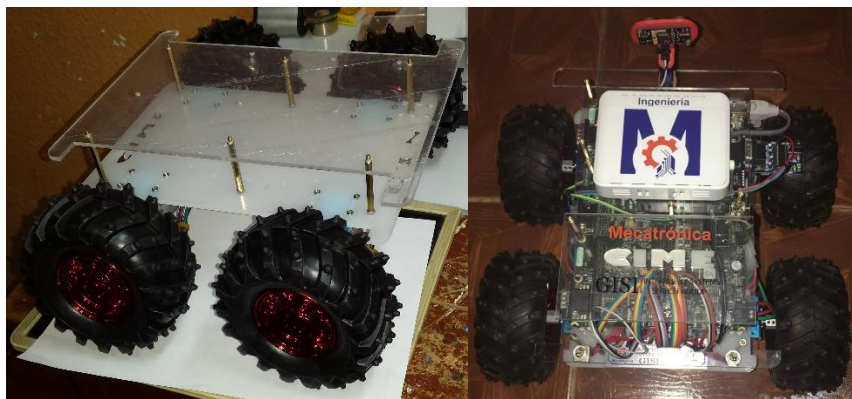


Figura 2. 3. Montaje del chasis del robot

Se ha desestimado el diseño de la estructura debido a que el enfoque de esta tesis es el hardware y la cinemática del robot móvil.

2.4.2 SUBSISTEMA DE SENSADO

2.4.2.1 CODIFICADORES

Los codificadores registran el movimiento real del robot generado por el movimiento de los motores. Cuando el robot se desplaza, estos detectan el movimiento a través de la rotación de sus ruedas y generan un tren de pulsos. Estos son leídos por la SbRio 9642 a través de sus entradas digitales puerto 4 y 9 en el que al mismo tiempo ejecuta un algoritmo que procesa las señales para obtener información incremental del movimiento a lo largo del tiempo, traducido en desplazamiento lineal con relación al suelo, los cuáles serán empleados posteriormente para el cálculo de la odometría del robot móvil.

Los codificadores están ubicados en cada uno de los motores del robot móvil como se muestra en la Fig. 2.4, sobre los cuales se utiliza un codificador de efecto hall de dos canales para detectar la rotación de un disco magnético ubicado en la parte posterior del eje motor. El codificador de cuadratura proporciona una resolución de 64 pulsos por revolución del eje del motor cuando se cuentan ambos bordes de los dos canales. Para calcular los conteos por revolución de la salida de la caja de cambios, se multiplica la relación de transmisión por 64.



Figura 2.4. Codificador acoplado al motor

Las salidas A y B son ondas cuadradas de 0 V a 5Vcc aproximadamente a un desfase de 90°. La frecuencia de las transiciones indica la velocidad del motor y el orden de las transiciones indica la dirección. En la Tabla 2.1 se observan las especificaciones técnicas de los codificadores.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas codificadores [14]

CODIFICADOR			
Especificaciones Eléctricas	Tensión de alimentación		5 V
	Corriente		10 mA
Especificaciones Electrónicas	Encoder	Resolución eje del motor	64 CPR
		Resolución salida caja de cambios	4480 CPR
Especificaciones Físicas	Tamaño		37 D x 70Lmm
	Peso		225 g
	Diámetro del eje		6 mm

2.4.2.2 UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL (IMU)

El 9DOF Razor IMU ubicado en el centro del robot incorpora tres sensores un ITG-3200 (giroscopio de triple eje), ADXL345 (acelerómetro de triple eje), y HMC5883L (magnetómetro de triple eje) para darle nueve grados de medición inercial como se puede apreciar en la Fig. 2.5. Las salidas de todos los sensores son procesadas por un ATmega328 a bordo que se encarga de recoger los datos de dichos sensores y enviarlos de forma ordenada al controlador mediante un protocolo de comunicación a través de una interfaz serie incorporado

en la IMU. Esto permite que sea utilizado como un poderoso mecanismo de control para vehículos aéreos no tripulados, vehículos autónomos y sistemas de estabilización de imagen [15].

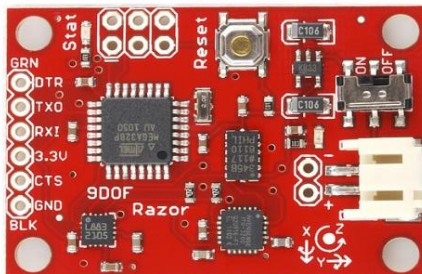


Figura 2.5. 9DOF Razor IMU sensor [15]

En la Tabla 2.2 se detalla las principales especificaciones técnicas del sensor.

Tabla 2.2 Especificaciones técnicas sensor IMU [15]

UNIDAD DE MEDICION INERCIAL IMU			
Especificaciones Eléctricas	Tensión de alimentación		3.3 V
	Giroscopio	ITG - 3200	3 ejes
	Acelerómetro	ADXL345	3 ejes
	Magnetómetro	HMC5883L	3 ejes
	Comunicación		Serial 232
	Procesamiento		ATmega328
	Frecuencia de trabajo		8 MHz
	Velocidad de transmisión de datos		57600 bps
Especificaciones Físicas	Dimensiones		28 x 41 mm

El sensor IMU está conectado a través del puerto serie que integra la sbRIO 9642 con un circuito integrado conversor de señales ttl a rs232, configurado a una velocidad de 115200 baudios para transmisión de datos.

2.4.2.3 SENSOR PING

Este sensor ultrasónico ofrece un método sencillo para la medición de distancias. Este sensor es perfecto para cualquier número de aplicaciones que requieren que se realice mediciones entre objetos en movimiento o estacionarios.

Un solo pin de E / S se utiliza para liberar una explosión ultrasónica (muy por encima de la audición humana) y luego escuchar el pulso de retorno del eco como se indica en la Fig. 2.6, el sensor mide el tiempo requerido para el retorno del eco, y devuelve este valor al microcontrolador como un pulso de anchura variable a través del mismo pin de E / S [16].

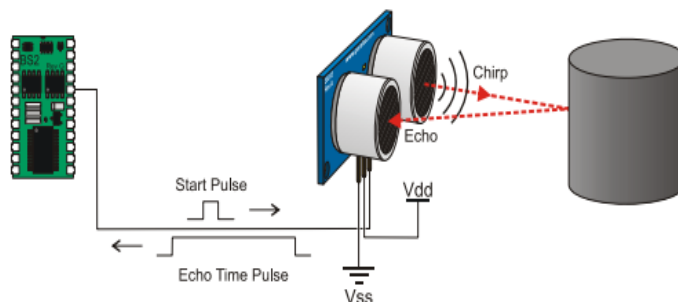


Figura 2.6. Funcionamiento sensor PING [16]

En la Tabla 2.3 se detallan algunas especificaciones técnicas del sensor.

Tabla 2.3 Especificaciones técnicas sensor PING [16]

SENSOR ULTRASONIDO		
Especificaciones Eléctricas	Tensión de alimentación	5 V
	Corriente de reposo	< 2 m A
	Corriente de trabajo	35 mA
	Ángulo de medición	30 °
	Ángulo de medición efectivo	< 20 °
	Detección	2 cm a 300cm
	Frecuencia de trabajo	40 KHz
	Resolución	3mm
Especificaciones Físicas	Dimensiones	46x22x16mm

Este sensor tiene la capacidad de medir la distancia a la que se encuentra un objeto para ello emite impulsos ultrasónicos, estos impulsos rebotan en el objeto volviendo de nuevo al sensor. La velocidad de estos impulsos es conocida, ya que viajan a la velocidad del sonido en el aire. De esta manera, el sensor lo que hace es comenzar a contar el tiempo una vez que emite el impulso, y para de contar cuando el impulso llega de vuelta. Este tiempo se conoce como

tiempo de vuelo. Conociendo este tiempo y la velocidad del sonido en el aire se calcula fácilmente la distancia a un objeto, [17].

El sensor está ubicado en la parte frontal del robot como se muestra en la Fig. 2.7 montado sobre un servomotor que le permite obtener un movimiento horizontal con un rango de apertura de 180° para que pueda detectar objetos.

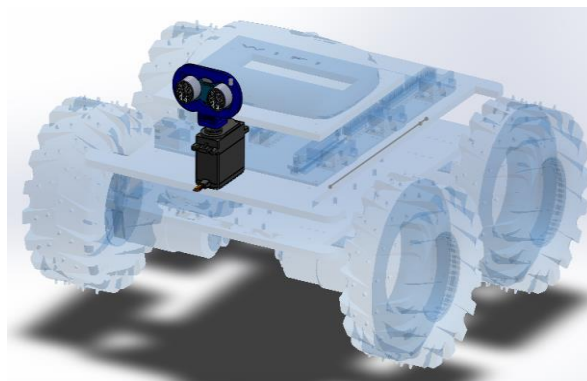


Figura 2.7. Sensor PING

2.4.3 SUBSISTEMA DE PROCESAMIENTO

2.4.3.1 SINGLE BOARD RIO SBRIO – 9642

Los dispositivos embebidos de control y adquisición sbRIO-9642 integran un procesador en tiempo real, una FPGA reconfigurable por el usuario y E/S en una sola tarjeta. En la Tabla 2.4 se muestra las especificaciones técnicas de la tarjeta [18].

Tiene un procesador industrial de 400 MHz, un FPGA xilinx spartan de 2M de compuertas, 110 canales de E/S digital de 3.3 V (tolerancia de 5 V/compatible con TTL), 32 entradas analógicas de 16 bits, 4 salidas analógicas de 16 bits, 32 canales industriales de 24 V. Ofrece un rango de temperatura de operación de -20 °C a 55 °C, incluyen un rango de entrada de suministro de voltaje de 19 vdc a 30 vdc, 128 MB en dram para operación embebida y 256 MB de memoria no volátil para programas de almacenamiento y registro de datos.

Tabla 2.4. Especificaciones técnicas sbRIO 9642 [18]

Single Board Rio 9642				
Especificaciones Eléctricas	Alimentación		19 v - 30 v	
	Entrada Analógica	Canales de una sola terminal:		32
		Canales diferenciales:		16
		Resolución:		16 bits
		Rango de voltaje máximo	Rango	10V -10V
			Precisión	6220 uV
		Rango de voltaje mínimo	Rango	200mV - 200mV
	Precisión		157 uV	
	Salida Analógica	Número de canales		4
		Resolución:		16 bits
		Rango de voltaje máximo	Rango	10V -10V
			Precisión	110mV
	E/S Digital	Canales bidireccionales		110
		Máxima velocidad de reloj		40 MHz
		Niveles lógicos		3.3 V LVTTTL
	Entrada Digital	Rango de voltaje máximo		0 V - 5 V
	Salida Digital	Rango de voltaje máximo		0 V - 3.3 V
Controlador reconfigurable	CPU clock frequency		400 MHz	
	Memoria no volátil		256 MB	
	Memoria del sistema		128 MB	
	Procesador		Power PC	
Especificaciones Físicas	Longitud		209 mm	
	Ancho		93 mm	
	Altura		17 mm	
	Peso		292 g (10.3 oz)	
	Conector de E/S		34-pin IDC	
			50-pin IDC	
			D-sub 37 pines	
	Temperatura de operación		"-20 °C - 50 °C	

Estos dispositivos tienen un puerto Ethernet que se usa para comunicación Web integrada (HTTP) y servidores de archivos (FTP). Además cuenta con un puerto serial RS232 para controlar dispositivos periféricos [18]

2.4.3.2 COMPONENTES PRINCIPALES

En la Fig. 2.8 se puede enfatizar los principales componentes que forman parte de la tarjeta sbRIO-9242 en donde se realizó las conexiones para el desarrollo de la plataforma.

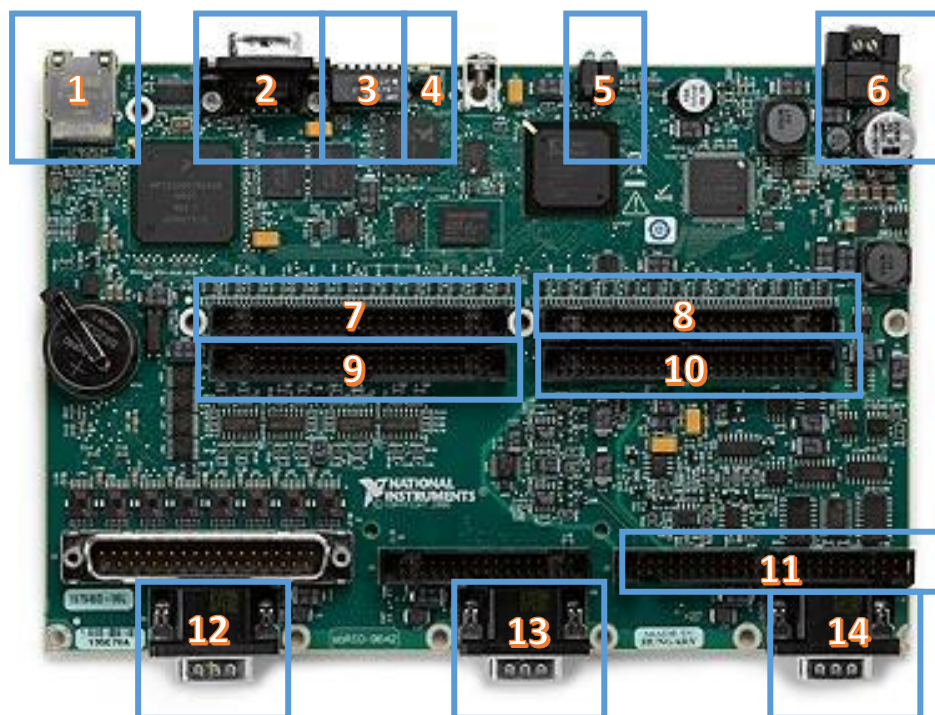


Figura 2.8. Principales partes de la tarjeta sbRIO 9642, [18]

1. Puerto Ethernet RJ45.
2. Puerto serial RS-232.
3. Interruptor DIP.
4. Botón reinicio.
5. Indicadores led.
6. Conector de alimentación DC.
7. Conector P2, E/S digitales 3,3v.
8. Conector P3, E/S digitales 3,3v.
9. Conector P4, E/S digitales 3,3v.
10. Conector P5, E/S digitales 3,3v.
11. Conector E/S analógicas.
12. Conector para módulo 1 serie C.
13. Conector para módulo 2 serie C.
14. Conector para módulo 3 serie C.

En el dispositivo se procesa toda la información obtenida de los sensores, se utiliza el chip FPGA de la tarjeta para programar las entradas rápidas así como también el procesador en tiempo real asegurando así el control de los dispositivos, el envío remoto de datos y la ejecución de algoritmos. Se utiliza el puerto serial RS-232 tipo DB9 que integra la tarjeta para la comunicación con el sensor IMU e interpretar mediante software los datos adquiridos del mismo.

En el puerto 4 y puerto 9 de la tarjeta están conectadas las señales de los codificadores así como las señales para controlar cada motor a través del puente h, el puerto 5 es utilizado para controlar el servomotor que nos brinda un movimiento horizontal al sensor ping, el puerto 0 utilizado para la adquisición de señales del sensor ping y las entradas analógicas AI0, AI8 y AI9 para la lectura del voltaje de las baterías.

En la Fig. 2.9 se muestra el software que se requiere instalar previamente en la tarjeta a través de NI-MAX de LABVIEW.

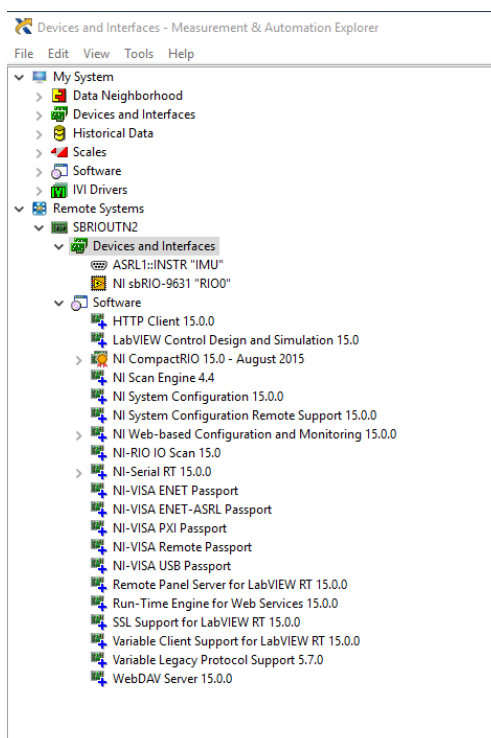


Figura 2.9 Software de la tarjeta sbRIO 9642

2.4.4 SUBSISTEMA DE RESPUESTA

2.4.4.1 PUENTE H

Controlador de dos canales con modo de trabajo en puente H, para crear una mayor eficiencia de trabajo, utiliza el L298N como chip principal. Tiene la capacidad para manejar un motor paso a paso de 2 fases, de 4 fases o dos motores de corriente continua en el caso de este robot además utiliza un suministro lógico de 5v (Ver Fig. 2.10).



Figura 2.10. Driver puente H

Utiliza condensadores de filtro de gran capacidad y diodos como función de protección, aumentando así la fiabilidad. La energía de trabajo puede ser aplicada hasta 35v, con gran capacidad de corriente que puede alcanzar 2A máximo, y una potencia de 25w.

En la Tabla 2.5 se muestra las especificaciones técnicas del mismo.

Tabla 2. 5 Especificaciones técnicas driver L298D

Driver L298D		
Especificaciones Eléctricas	Voltaje lógico	5 V
	Corriente lógica	0 mA - 36 m A
	Temperatura	-20 °C +135 °C
	Modo de operación	puente - H
	Corriente operación	2 A
	Voltaje operación	5 V - 35 V
	Potencia máxima	25 W
Especificaciones Físicas	Dimensiones	43x43x27mm
	Peso	24 g

Con el puente h se controla la velocidad y el sentido de giro del robot móvil, la sbRIO 9642 emplea ocho señales para realizar las conmutaciones de giro de los motores así como también envía cuatro señales pwm para el control de la velocidad de cada una de sus ruedas.

2.4.4.2 MOTORES

Con la heurística tratando de buscar un balance entre costo y torque se han escogido estos motores que mediante prueba y error se ha determinado que pueden mover el chasis con todo el hardware incluidas las baterías que son los elementos que más pesan.

Este motorreductor es un potente motor de escobillas de 12v dc con una relación de 70:1 en la caja de engranajes de metal y un codificador de cuadratura integrado que proporciona una resolución de 64 pulsos por revolución del eje del motor, que corresponde a 4480 pulsos por revolución del eje de salida de la caja de cambios, en la Tabla 2.6 se muestran las especificaciones técnicas de los motores [14].

Tabla 2. 6 Especificaciones técnicas motores pololu [14]

MOTORREDUCTOR POLOLU 70:1			
Especificaciones Eléctricas	Tensión de alimentación		12 V
	Corriente sin carga		300 mA
	Corriente máxima		5000 mA
Especificaciones Electrónicas	Encoder	Resolución eje del motor	64 CPR
		Resolución salida caja de cambios	4480 CPR
Especificaciones Mecánicas	Relación de transmisión		70;1
	Velocidad		150 RPM
	Torque		200 oz in
	Peso		225 g
	Diámetro del eje		6 mm

El robot móvil cuenta con 4 motores ubicado en la base de la plataforma como se aprecia en la Fig. 2.11 mismos que son los encargados de dotar de movimiento al robot móvil (adelante,

atrás, izquierda, derecha), dichos movimientos consisten en la conmutación de los motores controlados a través de la tarjeta sbRIO 9642 por medio del puente h.

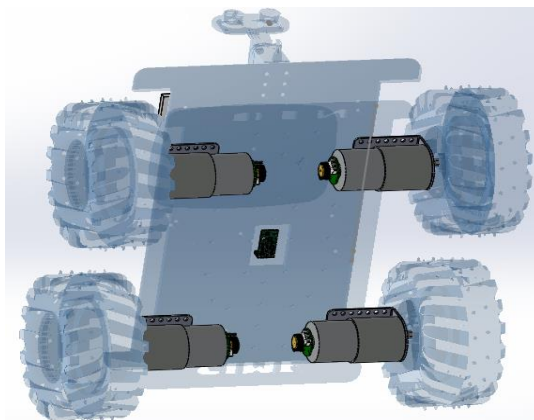


Figura 2.11. Ubicación de motores

2.4.5 SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN

El sistema requiere de dos niveles de tensión para su funcionamiento uno para la tarjeta sbRIO 9642 y demás componentes y otro para el sistema de potencia, la tensión de alimentación se obtiene directamente de unas baterías instaladas en el chasis del robot móvil.

El robot móvil cuenta con tres fuentes de alimentación, las cuales se conectan todas por separado, una de ellas alimenta la tarjeta NI sbRIO 9642 junto a los sensores ping, IMU, codificadores, servomotor y max 232.

Las otras dos proveen voltaje al sistema de potencia, cada batería suministra voltaje a dos motores, mismas que cuentan con interruptores de activación para el encendido y apagado independiente de la tarjeta y motores.

2.4.5.1 BATERIAS LI-PO

Las baterías instaladas en el robot móvil son recargables de tipo LIPO (polímeros de litio) las cuales permiten un mayor tiempo de duración de carga en el momento del funcionamiento. Para la alimentación de la tarjeta y demás componentes se utilizó una batería

de 22.2v a 4500mAh como se muestra en la Fig. 2.12 a. y para alimentar los motores del robot móvil se cuenta con dos baterías li-po de 11.1v a 3000 mAh como se muestra en la Fig. 2.12.b.

Además en caso de presentarse alguna condición perjudicial para el robot.se cuenta con fusibles de protección tanto para la parte de control como para la parte de fuerza.



Figura 2.12. Baterías LIPO

En las Tablas 2.7 y 2.8 se muestran las especificaciones técnicas de las baterías.

Tabla 2. 7 Especificaciones técnicas batería li-po 22,2v. [19]

BATERIAS LI - PO		
Especificaciones Eléctricas	Material	Li - Polimero
	Voltaje	22,2 V
	Capacidad de corriente	4500 mAh
	Celdas	6 s
	Capacidad de descarga	45 C
Especificaciones Físicas	Dimensiones	135x43x55mm
	Peso	500 g

Tabla 2. 8 Especificaciones técnicas batería li-po 11,1v [19]

BATERIAS LI - PO		
Especificaciones Eléctricas	Material	Li - Polimero
	Voltaje	11,1 V
	Capacidad de corriente	3000 mAh
	Celdas	3 s
	Capacidad de descarga	30 C
Especificaciones Físicas	Dimensiones	135x45x24 mm
	Peso	273,3 g

2.4.6 SUBSISTEMA INTERFAZ HUMANO – ROBOT

2.4.6.1 LABVIEW

Según José Lajara LabVIEW “es el acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench que en español quiere decir Laboratorio de Ingeniería de Instrumentos Virtuales de Laboratorio. Es un lenguaje y a la vez un entorno de programación gráfica en la que se puede crear aplicaciones de una forma rápida y sencilla” [20].

Aplicaciones de LabVIEW

A continuación se presenta algunas aplicaciones.

- Diseños de sistema embebidos de control y monitoreo.
- Automatización de sistemas de pruebas y validación.
- En la robótica es utilizada para monitorear y dar movimiento a brazos robóticos.
- El campo aeroespacial es utilizado para su instrumentación.

2.4.6.2 DESARROLLO DEL SISTEMA EN LABVIEW

La etapa de visualización interfaz humano robot se realiza en el software “LabVIEW de National Instruments” versión 2015 y como requisito se requiere tener instalado los módulos de robótica, tiempo real, fpga, control y supervisión, todos en versión sp1 para Windows 10.

La interfaz gráfica consta de diferentes secciones mediante el cual la persona puede manipular de manera simple y sencilla así:

- a) **Sección de visualización del estado de las baterías:** una sección del hmi en donde se encuentra una gráfica del estado actual del voltaje de las baterías y unos indicadores teniendo como lectura máxima 10v cada una que significa que está a carga máxima. Es importante mencionar que si el estado de carga de las baterías es menor a 6v el hmi genera un mensaje de advertencia que indica que el estado de la batería es baja y para el funcionamiento del sistema. Fig. 2.13 sección a.

- b) **Sección de visualización de la velocidad de los motores:** en esta sección se muestra una gráfica de las velocidades de cada uno de los motores además existen indicadores numéricos que muestran el valor de la velocidad en rpm. Fig. 2.13 sección b.
- c) **Sección de maniobrabilidad del robot:** una sección en donde se encuentra los controles para poder tener maniobrabilidad sobre el robot en donde a través de cuatro botones damos movilidad al robot, cabe mencionar que el control de navegación también se lo puede tener por teclado a través de las teclas F2, END, F1, F3 y un puntero de deslizamiento horizontal el cual sirve para controlar la velocidad de los motores. Fig. 2.13 sección c.
- d) **Sección de visualización del sensor ping:** en esta sección se puede observar mediante un indicador la posición del servomotor con un rango de 90° y -90° y la lectura del sensor ping interpretando la distancia en una gráfica. Fig. 2.13 sección d.
- e) **Sección de visualización de sensor IMU:** en esta sección se puede apreciar la lectura del sensor de medición inercial IMU en donde a través de una gráfica podemos observar las señales de todos sus ejes tanto del acelerómetro, giroscopio y magnetómetro seguido de unos indicadores numéricos en el que se visualiza los valores de los ángulos de Euler cabeceo, alabeo y guiñada. Fig. 2.13 sección e.
- f) **Sección de lectura de codificadores:** unos indicadores gráficos visualizan el estado lógico de cada uno de los codificadores de sus ruedas y además un indicador numérico muestra el conteo incremental de los pulsos de cada rueda del robot. Fig. 2.13 sección f.
- g) **Sección del análisis odométrico:** donde se estima la localización del robot móvil en una gráfica “x” e “y” con unos indicadores, además se muestra la distancia

recorrida total, ángulo de posición y distancia recorrida por cada rueda derecha e izquierda igualmente se tiene un indicador del compás en donde indica la orientación del robot móvil. Fig. 2.13 sección g.

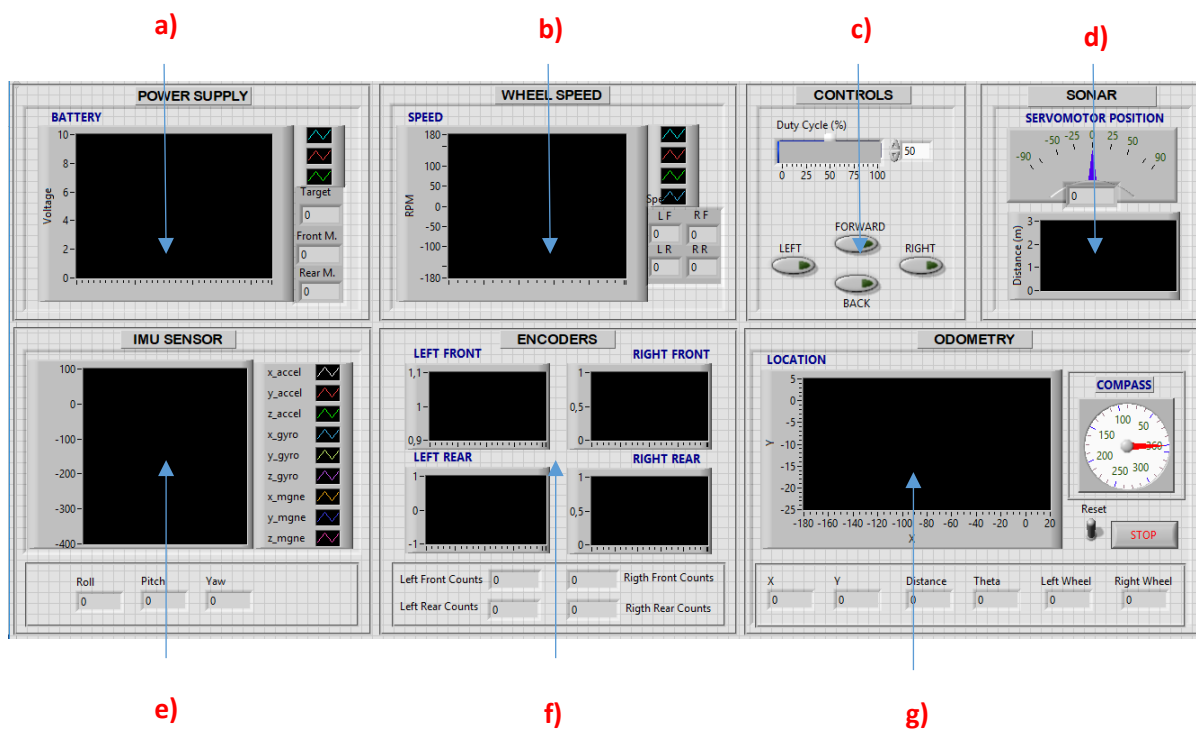


Figura 2.13. Interfaz Humano-Robot

2.5 MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT MÓVIL

Un robot móvil de tracción diferencial cuenta con ruedas que vienen acoplados motores dc con codificadores incrementales los mismos que proporcionan un número de pulsos proporcional al número de vueltas que ha dado la rueda.

Para sacar el modelo cinemático es necesario conocer las condiciones físicas del robot móvil en especial las dimensiones del mismo es decir conocer la distancia entre las ruedas (L) y el radio (R) como se indica en la Fig. 2.14, además se ha considerado ciertas limitaciones las cuales se detallan a continuación:

- El robot se mueve sobre una superficie plana.
- Los ejes de guiado son perpendiculares al suelo.

- No existen elementos flexibles en la estructura del robot.
- Las ruedas no poseen ningún eje de direccionamiento.

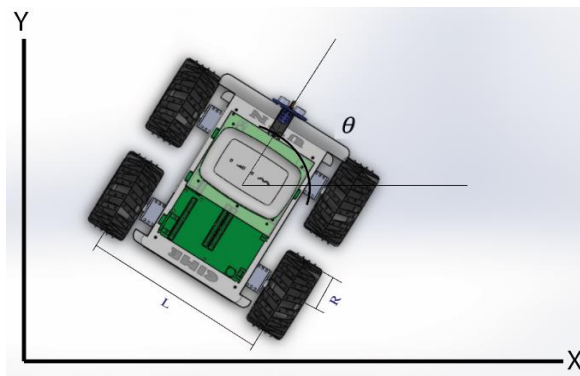


Figura 2. 14. Variables físicas del robot

Con la ecuación (1) anteriormente detallada en el capítulo 2 se puede definir el movimiento y la rotación del robot por el movimiento independiente de cada una de las ruedas y así poder encontrar una relación directa de cómo afecta las entradas a los estados del sistema x , y , θ . El robot se puede trasladar con una velocidad lineal $v(t)$ y rotar con una velocidad angular $w(t)$ ver Fig. 2.15.

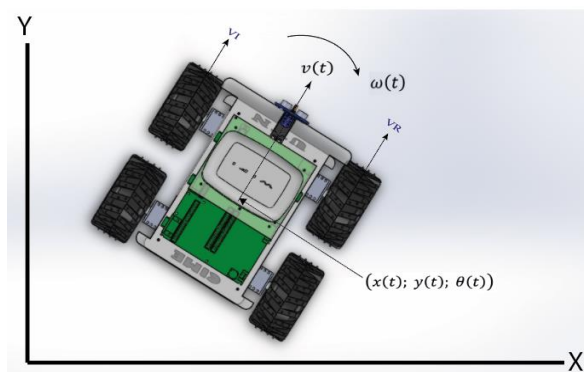


Figura 2.15. Variables cinemáticas globales del robot móvil

Las ecuaciones cinemáticas del punto medio del eje entre las ruedas, referidas a un sistema de referencia global son

$$\dot{x}(t) = v(t) \cos \theta(t) \quad (12)$$

$$\dot{y}(t) = v(t) \sin \theta(t)$$

$$\dot{\theta}(t) = w(t)$$

donde $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}$ se refieren a la derivada respecto al tiempo es decir la velocidad lineal en la dirección de x e y , y a la velocidad angular del robot respectivamente.

Para que el robot se traslade en línea recta la velocidad de sus ruedas deben ser iguales, por tanto, la ecuación (2) denota la velocidad lineal del robot como el promedio de las velocidades de las ruedas, siendo proporcional al radio como, así

$$V(t) = \frac{V_R(t) + V_L(t)}{2} = \frac{(W_R(t) + W_L(t)) \times r}{2}$$

y para que el robot tenga un movimiento de rotación sobre su mismo centro de masa, las velocidades de sus ruedas deben tener la misma magnitud pero signo diferente, por tanto la ecuación (3) denota velocidad angular como la diferencia de la velocidad de sus ruedas sobre la longitud que hay entre ellas siendo también proporcional al radio, así

$$W(t) = \frac{V_R(t) - V_L(t)}{L} = \frac{(W_R(t) - W_L(t)) \times r}{L}$$

de tal manera que para definir el modelo del robot, se reemplazan las velocidades lineales y angulares que se obtuvieron anteriormente. Adicionalmente de las condiciones de velocidad, se plantea una matriz de rotación, ya que no en todo momento el robot se encuentra alineado con el eje global. Con esto se obtiene el modelo del robot en configuración diferencial con el cual se va a trabajar.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(t) & 1 \\ \sin(t) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ w(t) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \frac{V_R(t) + V_L(t)}{2} \times \cos \theta(t) \\ \dot{y}(t) &= \frac{V_R(t) + V_L(t)}{2} \times \sin \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) &= \frac{V_R(t) - V_L(t)}{L}\end{aligned}\quad (13)$$

2.5.1 SIMULACIÓN DEL MODELO EN MATLAB

Para simular el modelo cinemático se utilizó Simulink de Matlab (ver Fig. 2.16), que permite comprobar el comportamiento del modelo, en el cual se hicieron pruebas que se detallan a continuación:

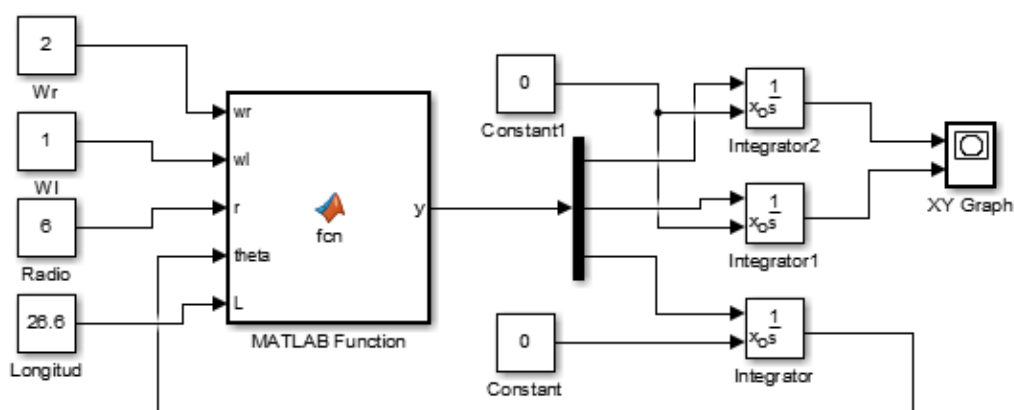


Figura 2.16. Modelo cinemático robot móvil en simulink de Matlab

- Misma velocidad en cada una de las ruedas (velocidades iguales) se obtiene como resultado una trayectoria rectilínea a lo largo del eje “x”. Ver Fig. 2.17.

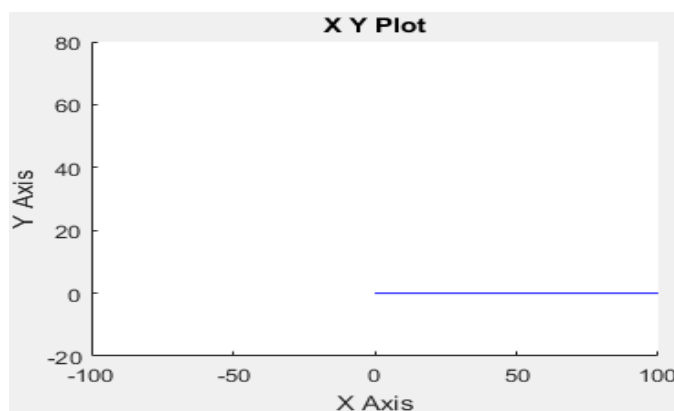


Figura 2.17. Respuesta del modelo a velocidades iguales

- Una velocidad mayor que la otra (velocidades distintas) esto permite tener una trayectoria rotacional con desplazamiento circular. Ver Fig. 2.18.

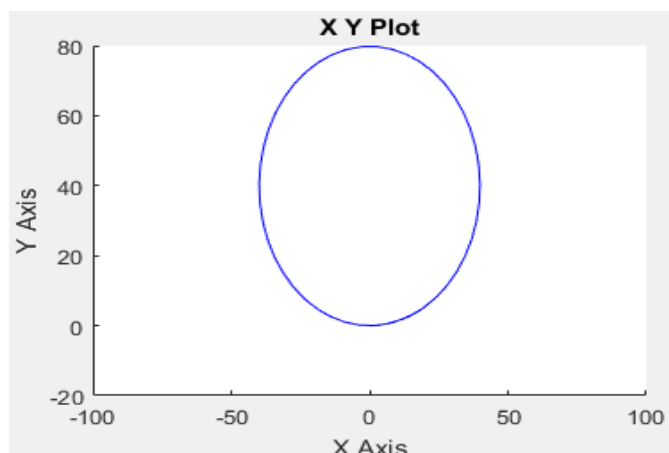


Figura 2.18. Respuesta del modelo a velocidades distintas en mismo sentido

2.5.2 MEDICIÓN DEL DESPLAZAMINETO

Se supone que en un intervalo de tiempo Δt el codificador de la rueda izquierda genera un determinado número de cuentas, de la misma manera el codificador de la rueda derecha. Aplicando la ecuación (7) y (8) estudiada en el capítulo 2 se determina la distancia de desplazamiento incremental en metros de cada una de las ruedas. Con la ecuación (9) se obtiene el desplazamiento lineal del robot denotado por

$$\Delta S = \frac{(SL + SR)}{2}$$

donde ΔS es la desplazamiento lineal, SL desplazamiento incremental rueda izquierda y SR desplazamiento incremental rueda derecha, de la misma manera para calcular el cambio incremental de dirección del robot se utiliza la ecuación (13) capítulo 2

$$\Delta\theta = \frac{(SR - SL)}{D}$$

donde D es la distancia entre ejes del robot móvil, medida como la distancia entre los dos puntos de contacto entre las ruedas y el suelo en consecuencia si $x(0), y(0), \theta(0)$ eran las coordenadas previas del robot, los valores de posición luego del tiempo t son

$$\begin{aligned}
 x(t) &= x(0) + \Delta S(t) \\
 y(t) &= y(0) + \Delta S \sin \theta(t) \\
 \theta(t) &= \theta(0) + \Delta \theta
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

2.5.2.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ANÁLISIS ODOMÉTRICO

En el diagrama de la Fig. 2.19 se aprecia un bucle que no dará fin hasta que no haya procesado todas las medidas obtenidas dentro del cual se realiza los cálculos matemáticos necesarios para estimar el desplazamiento y orientación del robot móvil. No obstante, hay que recalcar que los valores se obtienen del incremento que hay desde el último valor tomado hasta el valor actual. Esto es así ya que el valor de los codificadores es uniformemente incremental a lo largo del tiempo es decir solo necesita la distancia recorrida desde el punto final al inicial, siendo el final de este el inicial del siguiente.

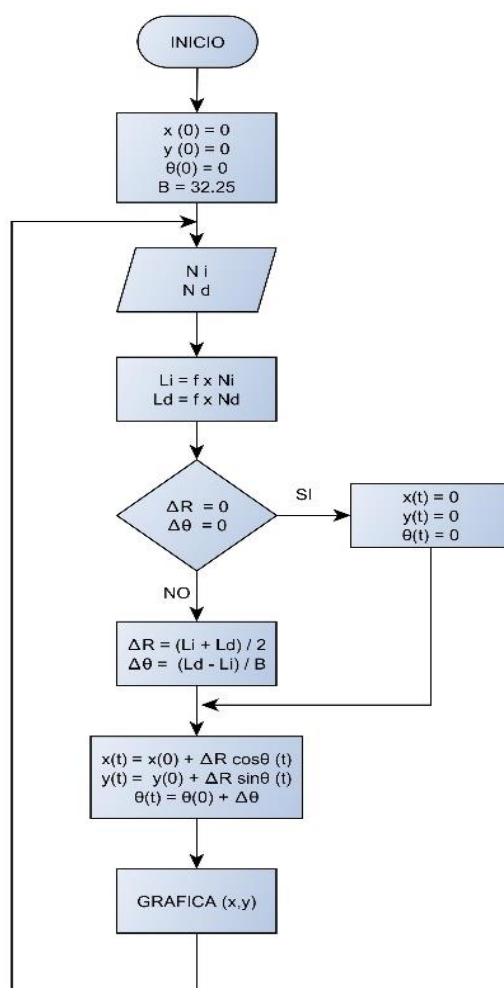


Figura 2.19. Diagrama de flujo del análisis odométrico

2.5.2.2 IMPLEMENTACIÓN DEL ANÁLISIS ODOMÉTRICO EN LABVIEW

Se demuestra el análisis odométrico implementado en el robot móvil mediante un subVi programado en el RT de la tarjeta de código embebido donde realiza el cálculo en tiempo real, nótese que en primera instancia se tiene la lectura de los codificadores que aplicando las ecuaciones (7) y (8) traducimos los pulsos leídos en desplazamiento lineal con relación al suelo, de tal manera que al aplicar la ecuación (9) anteriormente vista en el capítulo 2 se obtiene ΔS como se observa en la Fig. 2.20 a). Por otra parte para obtener el cambio de ángulo en el robot se aplica la ecuación (13) tal como se observa en la Fig. 2.20 b). Y una vez obtenidos los valores de distancia y ángulo se realiza el cálculo de la posición final del robot implementando las ecuaciones de posición del robot móvil. Ver Fig. 2.20 c)

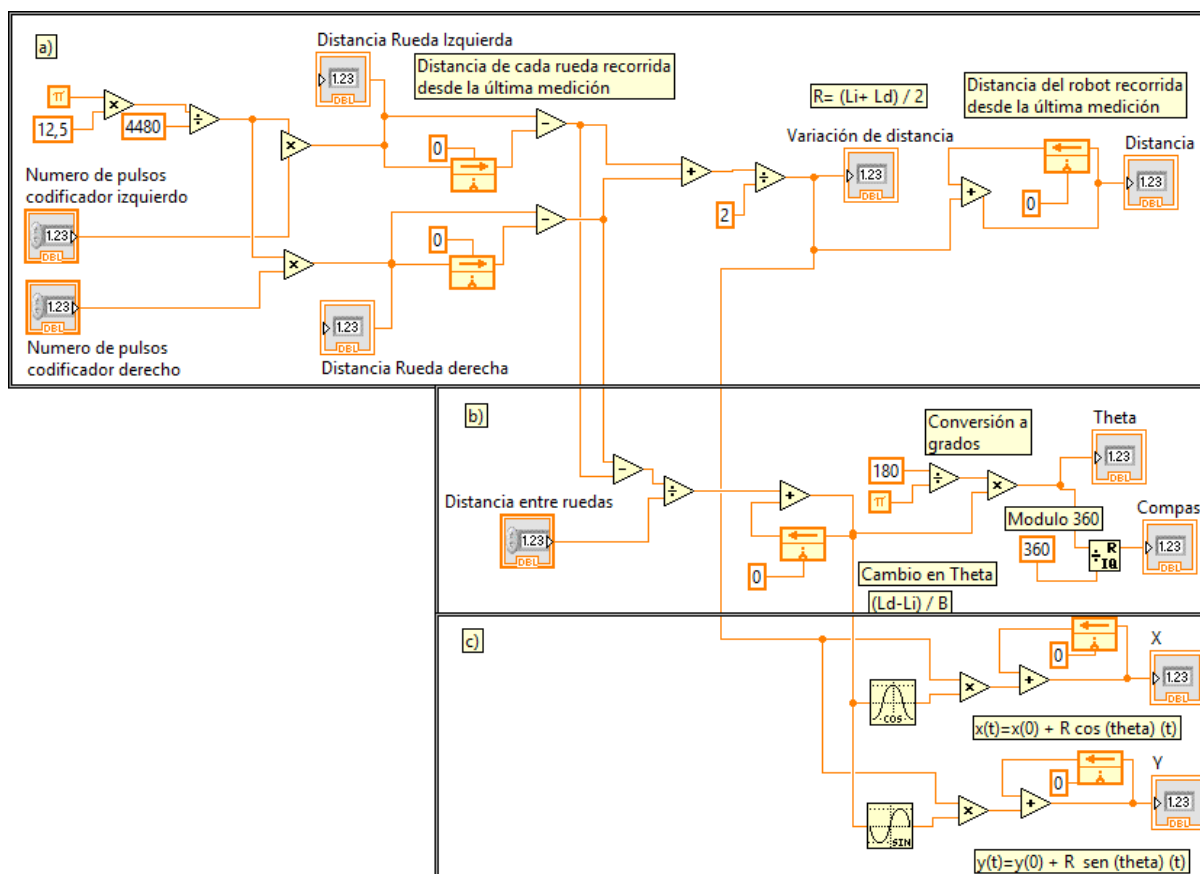


Figura 2.20. Sub Vi análisis odométrico

2.6 DIAGRAMA DE FLUJO DE FUNCIONAMIENTO

En la Fig. 2.21 se observa el flujograma de funcionamiento de la plataforma en donde como primer paso para la puesta en marcha del robot móvil es la comunicación entre la tarjeta que mediante enrutador establece conexión inalámbrica a la pc, una vez ejecutado el programa de interfaz se ingresa el ciclo de trabajo al que se quiere que se mueva el robot y se selecciona hacia donde se va a mover teniendo disponible cuatro movimientos adelante, atrás izquierda y derecha de tal forma que si el usuario selecciona cualquiera de estas opciones el robot ejecuta la trayectoria que a través de la interfaz se visualiza la lectura de los sensores.



Figura 2.21. Diagrama de flujo de funcionamiento de la plataforma

2.7 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA EN EL ROBOT

El Vi que actúa sobre el robot móvil está realizado sobre el FPGA de la tarjeta de código embebido empleando funciones del módulo LabVIEW FPGA para el procesamiento de señales

y el control a alta velocidad. En la Fig 2.22 se tiene la programación que se ejecuta en el robot móvil. Hay que tener presente que cada bucle de programación se ejecuta en forma paralela dentro de la FPGA es decir ejecuta las instrucciones al mismo tiempo a alta velocidad. Nótese que en primera instancia se hizo la adquisición de señales de los codificadores que mediante el bucle codificador sumamos de manera incremental dichos pulsos para obtener el conteo desde que el robot parte de un estado inicial hasta un final.

También se tiene cuatro bucles en donde se genera una modulación por ancho de pulso para controlar la cantidad de energía que se envía a los motores y mantener un par motor constante para que estos se muevan. Para habilitación de los motores mediante el puente h se programan salidas digitales para realizar las conmutaciones de giro del robot, un bucle en donde se lee la señal del sensor ultrasónico y se traduce en distancia de la misma manera un bucle en donde se genera un pwm para poder mover al servomotor y un ciclo repetitivo para que tenga un movimiento de 180° y por último un bucle para adquisición de señales analógicas de lectura del estado de las baterías.

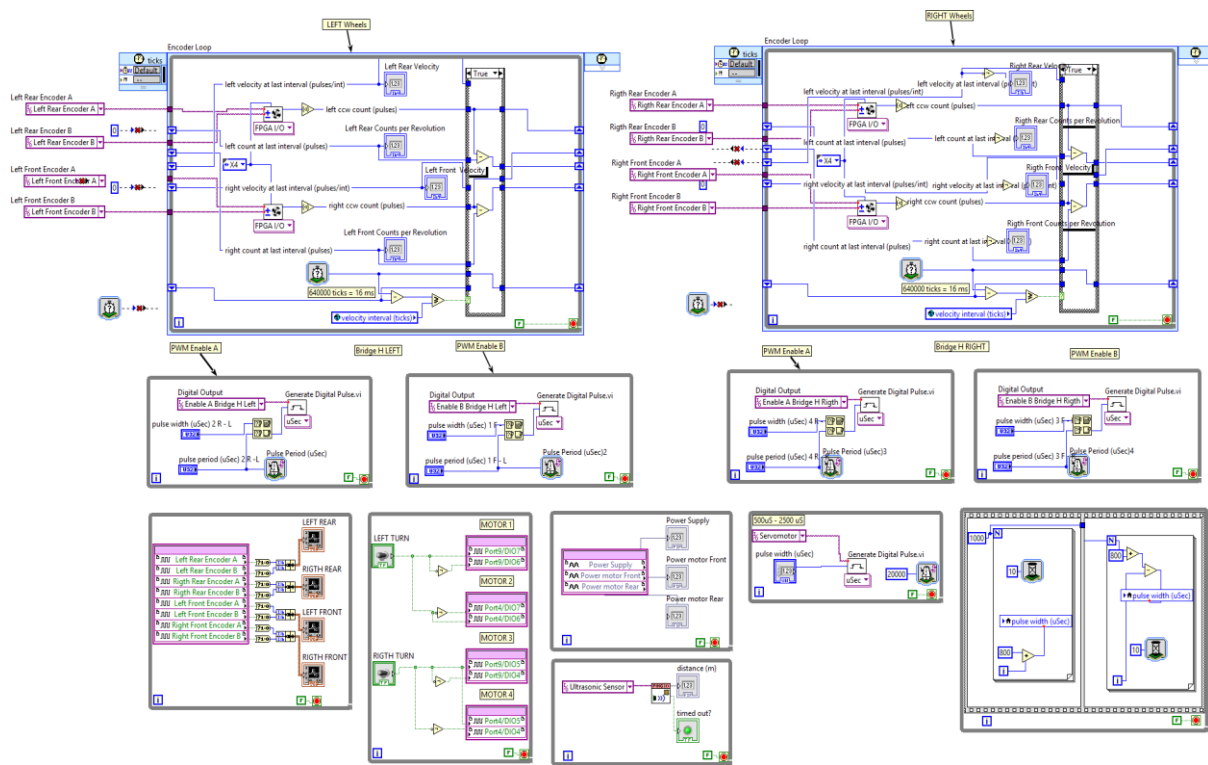


Figura 2.22. Implementación del programa en el robot

2.8 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA EN EL COMPUTADOR

El programa a bordo se lo realizó en el RT de la tarjeta haciendo uso de un elemento para abrir la referencia a un FPGA.vi de tal manera que a través de un bloque de lectura/escritura se tiene todas las entradas y salidas de la FPGA actuando sobre el robot como se ve en la Fig. 2.23. Además se utilizó la configuración del puerto serial para la lectura del sensor IMU, un sub vi en donde están las condicionantes para darle la dirección al robot móvil y un sub vi de análisis de odometría que con las señales de los codificadores se tiene el cálculo de la posición y dirección del robot en el plano x e y.

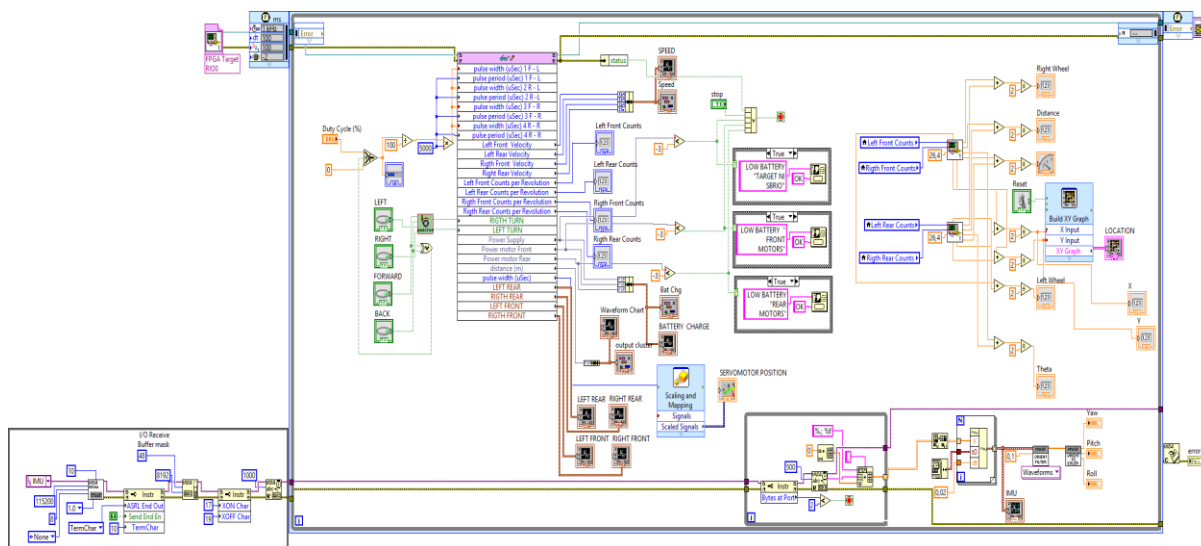
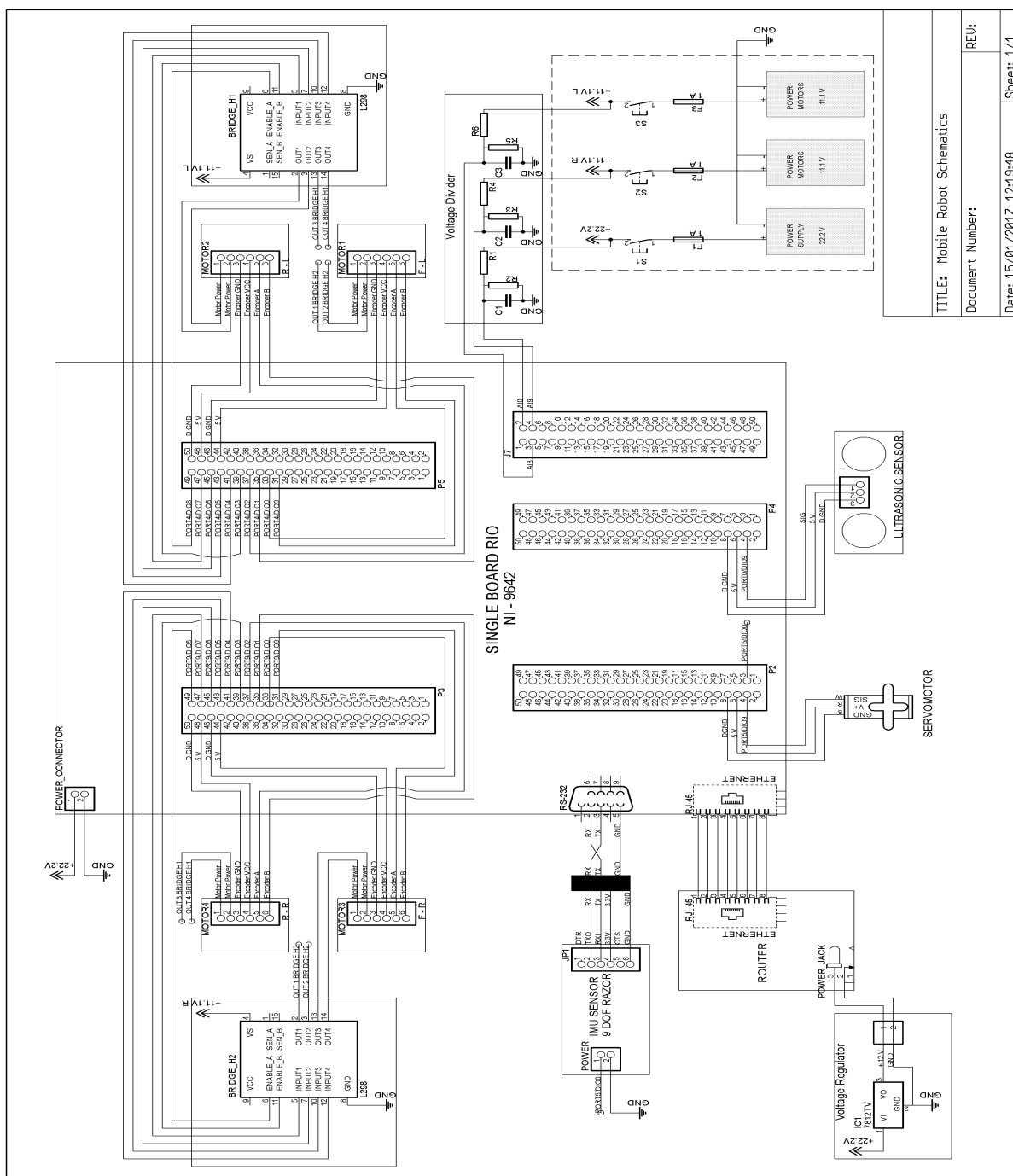


Figura 2.23. Implementación del programa en el computador

2.9 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO GENERAL

En el siguiente diagrama se muestra el conexionado de todos los subsistemas que conforman el robot móvil nótese que la etapa de potencia se da a través de dos puente h que van conectados directamente a dos baterías independientes para suplir de voltaje a los motores de tal forma que una batería dota de voltaje a los dos motores ubicados en la parte trasera y otra a los motores de la parte delantera, la etapa de control va directamente de la tarjeta hacia a los pines de habilitación del puente h. Se puede ver que el sensor IMU está conectado en puerto serial que integra la sbRIO 9642 a través de un convertidor de señales ttl – rs232. Además se

observa la conexión de las señales de los codificadores hacia los puertos de E/S de la tarjeta siendo el puerto 9 y el puerto 4 los elegidos para la adquisición de dichas señales. El servomotor y el sensor ultrasónico ubicados en la parte frontal del robot móvil están conectados al puerto 5 y puerto 0 respectivamente. Para la adquisición de los valores de voltaje de las baterías se implementa un divisor de voltaje que van conectados a las entradas analógicas 8, 9, 0 de la tarjeta tal como se observa en la Fig. 2.24.



TITLE: Mobile Robot Schematics	
Document Number:	REV:
Date: 15/01/2017 12:19:48	Sheet: 1/1

Figura 2.24. Diagrama esquemático

CAPITULO III

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento del robot móvil para cada uno de sus sensores y actuadores; se realiza además el análisis odométrico. Todo esto bajo ciertos parámetros y condiciones los cuales están orientados a determinar y comprobar el correcto funcionamiento de la plataforma.

3.1 PRUEBA DE LECTURA DE CODIFICADORES

Esta prueba demuestra el correcto funcionamiento del algoritmo implementado en la FPGA de la tarjeta a través de conteos de pulsos positivos y negativos. La prueba consiste en hacer girar la rueda que está acoplada al eje del motor como se muestra en la Fig. 3.1. Se puede determinar una revolución completa gracias a cierto marco de referencia (véase círculo rojo).



Figura 3.1. Prueba de lectura de codificadores

Los resultados se expresan en la Tabla 3.1 donde se aprecia la cantidad de pulsos contados en sentido horario y anti-horario. La prueba se realizó para cada uno de los codificadores acoplados a cada motor.

Tabla 3.1. Resultados lectura de codificadores

Numero de vueltas	Pulsos esperados	Pulsos leídos LF	Pulsos leídos RF	Pulsos leídos LR	Pulsos leídos RR
½ rev (sentido horario)	2240	2240	2240	2240	2240
1 rev (sentido horario)	4480	4480	4480	4480	4480
5 rev (sentido horario)	22400	22399	22399	22399	22399
20 rev (sentido horario)	89600	89598	89598	89598	89598
½ rev (sentido anti-horario)	-2240	-2240	-2240	-2240	-2240
1 rev (sentido anti-horario)	-4480	-4480	-4480	-4480	-4480
5 rev (sentido anti-horario)	-22400	-22399	-22399	-22399	-22399
20 rev (sentido anti-horario)	-89600	-89598	-89598	-89598	-89598

En la Fig. 3.2 se observa la gráfica comparativa de la cantidad de pulsos esperados y la cantidad de pulsos medidos a través del panel frontal en donde claramente se ve que presentan un error mínimo tanto en sentido horario como anti horario.

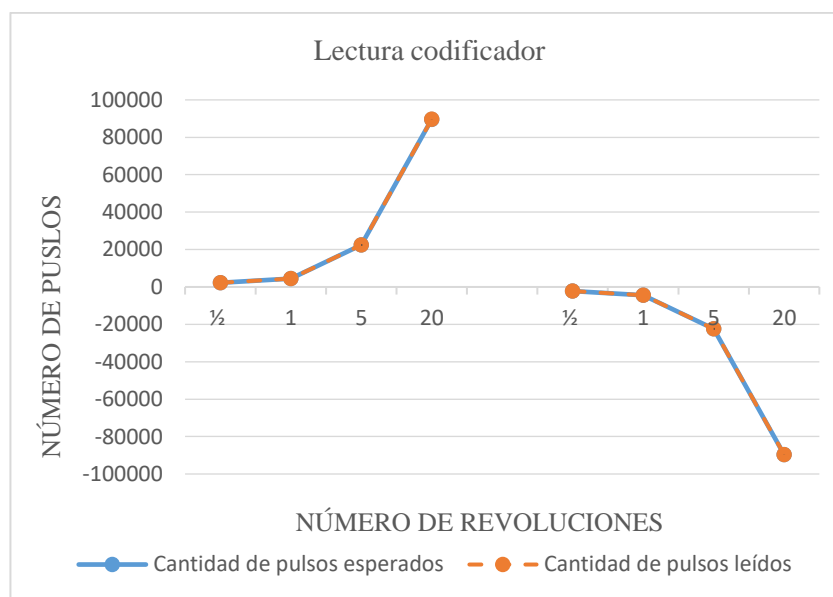


Figura 3.2. Lectura de codificadores

3.2 PRUEBA DE VELOCIDAD DE LOS MOTORES

En esta prueba se demuestra el funcionamiento del algoritmo que mide la velocidad de cada uno de los motores. Dicha prueba consiste en ajustar varias velocidades por medio del panel frontal, regulando el ciclo de trabajo y comparando dichas lecturas con un tacómetro

digital. En la Fig. 3.3. se ve la toma de datos a través del panel frontal y del tacómetro digital proporcionando las velocidades en rpm de los motores girando al 100% de su velocidad.

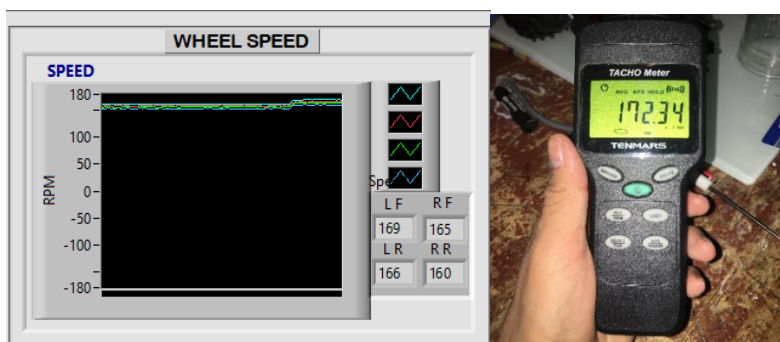


Figura 3.3. Toma de datos de velocidades en rpm

En la Tabla 3.2 se muestra los valores obtenidos de las lecturas de velocidad.

Tabla 3. 2 Velocidades en rpm de cada motor

Ciclo de trabajo	RPM tacómetro	RPM leído LF	RPM leído RF	RPM leído LR	RPM leído RR
10 %	23	20	19	21	18
40 %	129	130	128	127	125
60 %	147	148	146	147	145
80 %	160	162	157	159	156
100 %	172	169	165	166	160

En la Fig. 3.4 se observa la curva de las velocidades leídas por medio del panel frontal de manera que se asemeja a la curva que presenta las lecturas del tacómetro digital.

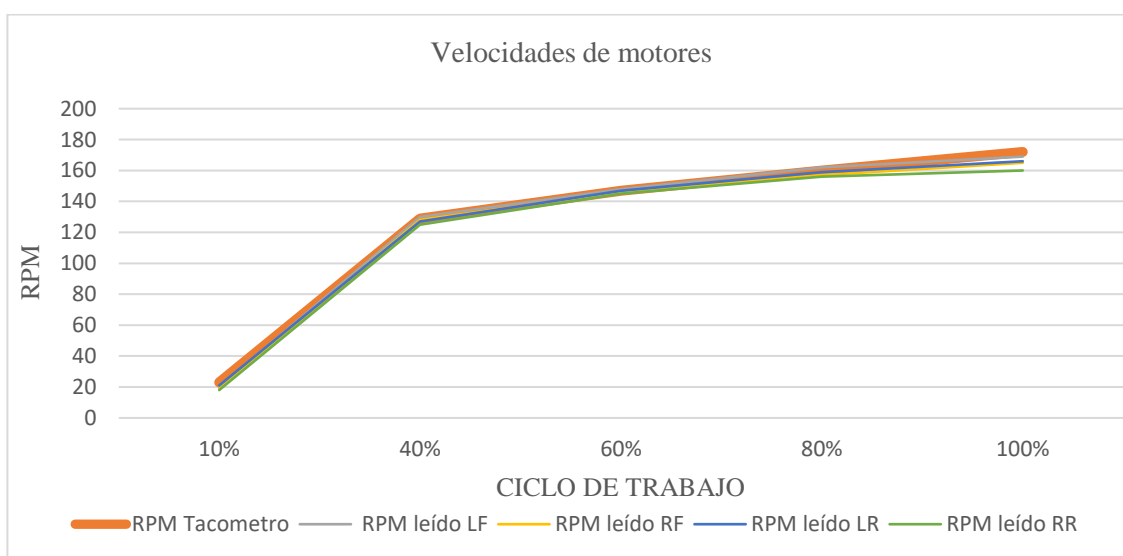


Figura 3.4. Velocidades de motores

3.3 PRUEBA DE LECTURA DE VOLTAJE DE LAS BATERÍAS

En la Tabla 3.3 se muestran los datos obtenidos de la lectura de cada una de las baterías a través del panel frontal comparándolos con un voltímetro digital en donde se aprecia el correcto funcionamiento de la lectura de las entradas analógicas tal como se observa en la Fig.

3.5.

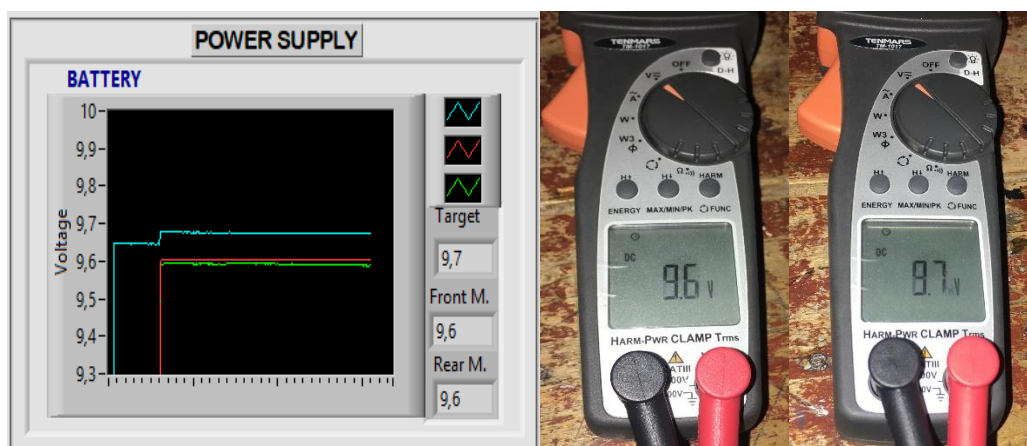


Figura 3.5. Lectura de entradas analógicas de voltaje

Tabla 3.3 Mediciones de voltaje

Batería	Voltaje instrumento de medición	Voltaje panel frontal HMI
Fuente de alimentación	9,7	9,7
Motores delanteros	9,6	9,6
Motores traseros	9,6	9,6

3.4 PRUEBA DE DISTANCIA SENSOR PING

Las pruebas efectuadas consisten en contrastar medidas reales con medidas efectuadas a través del sensor tal como se muestra en la Fig. 3.6 en el que se lleva a cabo pruebas de corta distancia y pruebas de larga distancia con el fin de establecer las distancias de referencia mínimas para el mapeo y navegación del entorno en trabajos futuros.

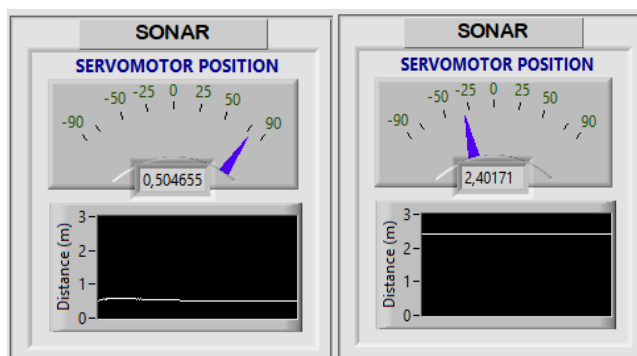


Figura 3.6. Toma de datos de distancia sensor ping

En la Tabla 3.4 se muestran los valores de las mediciones del sensor y las medidas reales comprobadas con un decámetro en donde se puede verificar el correcto funcionamiento del sensor ping sobre la plataforma.

Tabla 3.4. Distancias sensor ping

Tipo distancia	Distancia real	Distancia medida
Distancias cortas	0,15	0,15
	0,35	0,35
	0,505	0,504
Distancias largas	1,005	1,005
	1,60	1,60
	2,41	2,40

La Fig. 3.7 muestra la curva de datos de medición entre la distancia real y distancia medida por el sensor mostrada a través del panel frontal en donde prácticamente son las mismas.

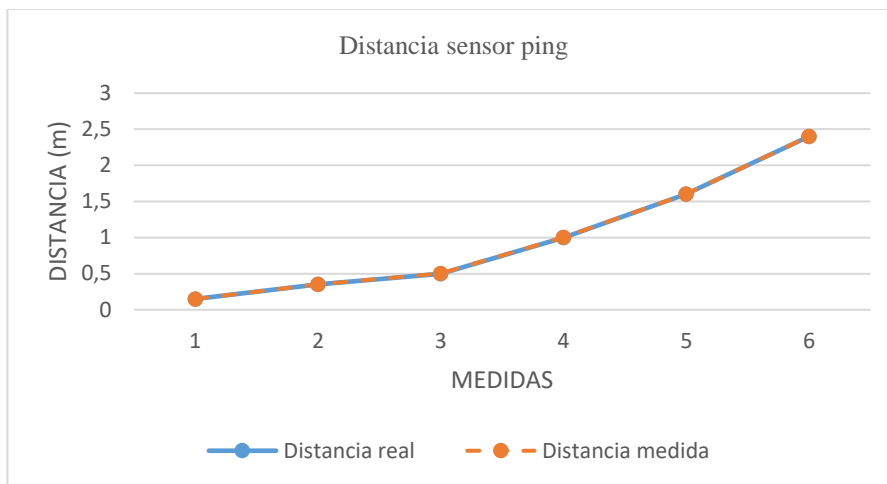


Figura 3.7. Distancia sensor ping.

3.5 PRUEBA DEL SENSOR IMU

En esta prueba se demuestra la adquisición de señales del sensor IMU que a través del puerto serial recibe la trama de datos siendo interpretados en el entorno de LabVIEW. La prueba consiste en hacer girar en el espacio el robot y verificar a través del hmi la variación de todos sus sensores acelerómetro, giroscopio, magnetómetro.

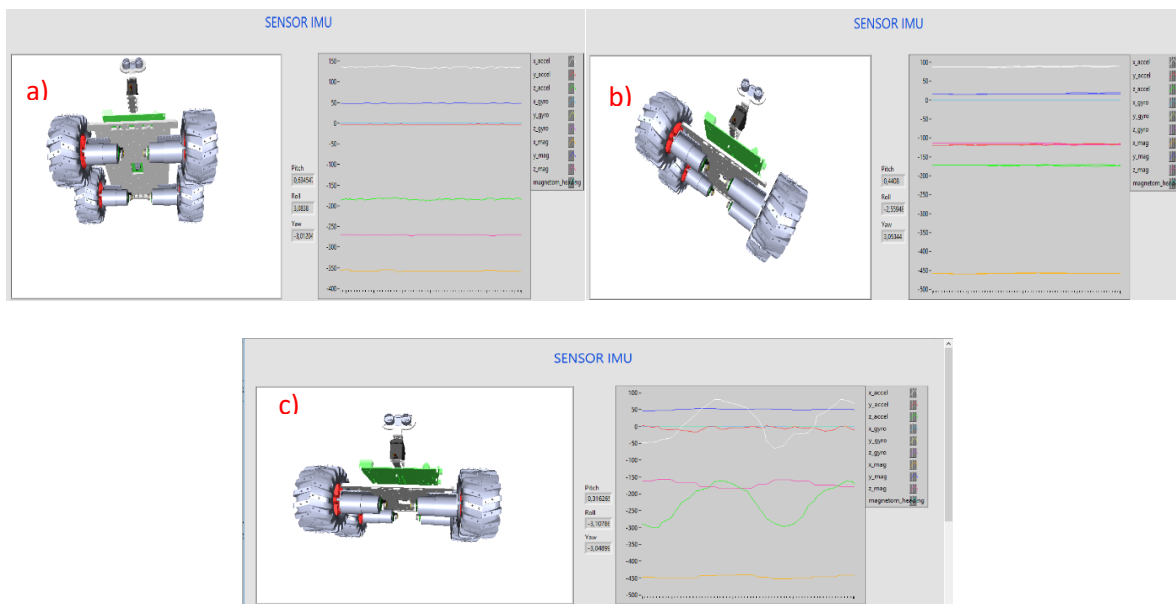


Figura 3.8. Funcionamiento sensor IMU.

En la Fig. 3.8 se ve como varía la posición del robot móvil, en primera instancia al robot se lo mueve hacia arriba y a través del hmi se observa el mismo movimiento tal como la Fig.

3.8 a), al robot se lo mueve hacia la izquierda como en la Fig. 3.8 b) y al robot se lo ha sacudido de manera brusca como se aprecia en la Fig. 3.8 c) comprobando así que existe variación de todos los ejes del sensor IMU.

3.6 PRUEBA DEL ANÁLISIS ODOMÉTRICO

En esta prueba demuestra el funcionamiento del algoritmo de la odometría del robot en donde se obtiene la distancia recorrida y la orientación angular del robot. La prueba consiste en desplazar el robot 200 cm y medir con el decámetro con la finalidad de verificar que la posición y orientación real correspondan con la obtenida a través de las ecuaciones del análisis odométrico.

Los resultados de las pruebas para determinar la posición se muestran en la Tabla 3.5 teniendo en cuenta que la posición inicial del robot es (0,0).

Tabla 3.5. Datos de la posición del robot móvil

Nº PRUEBA	DISTANCIA RRECORRIDA cm	ANGULO DE DESVIACIÓN grados
1	197	5
2	198,2	8
3	200	7
4	199,4	9
5	198,9	8
6	199,3	5
7	200	8
8	198,7	6
9	199,6	10
10	199,71	8
PROMEDIO	199	7,4

Según estos resultados los valores calculados son muy cercanos al valor real con un error mínimo de 0,5 % y un promedio de 7,4° de desviación que se puede corregir al implementar un controlador en lazo cerrado a los motores.

3.7 PRUEBA FINAL DE LA PLATAFORMA

Las pruebas fueron realizadas en dos tipos de superficies planas libre de obstáculos, antes de poner en marcha el robot móvil se configuró el ciclo de trabajo con el que van a funcionar los motores. Además los niveles de voltaje de las baterías tanto delantera como trasera están a carga máxima, la prueba consiste en hacer mover el robot una cierta distancia en línea recta y hacerlo rotar sobre su eje, de tal manera que para observar el comportamiento del robot se mantienen los mismos parámetros de funcionamiento en ambos casos. Para observar la trayectoria del robot en campo se colocó un marcador en el centro geométrico de giro de tal forma que grafique en la superficie y se pueda visualizar el recorrido del robot.

3.7.1 PRUEBA DE RECORRIDO EN SUPERFICIE LISA

3.7.1.1 PRUEBA DE TRAYECTORIA RECTILÍNEA

Tomando en cuenta las condiciones mencionadas anteriormente el robot parte de una posición inicial (0,0).

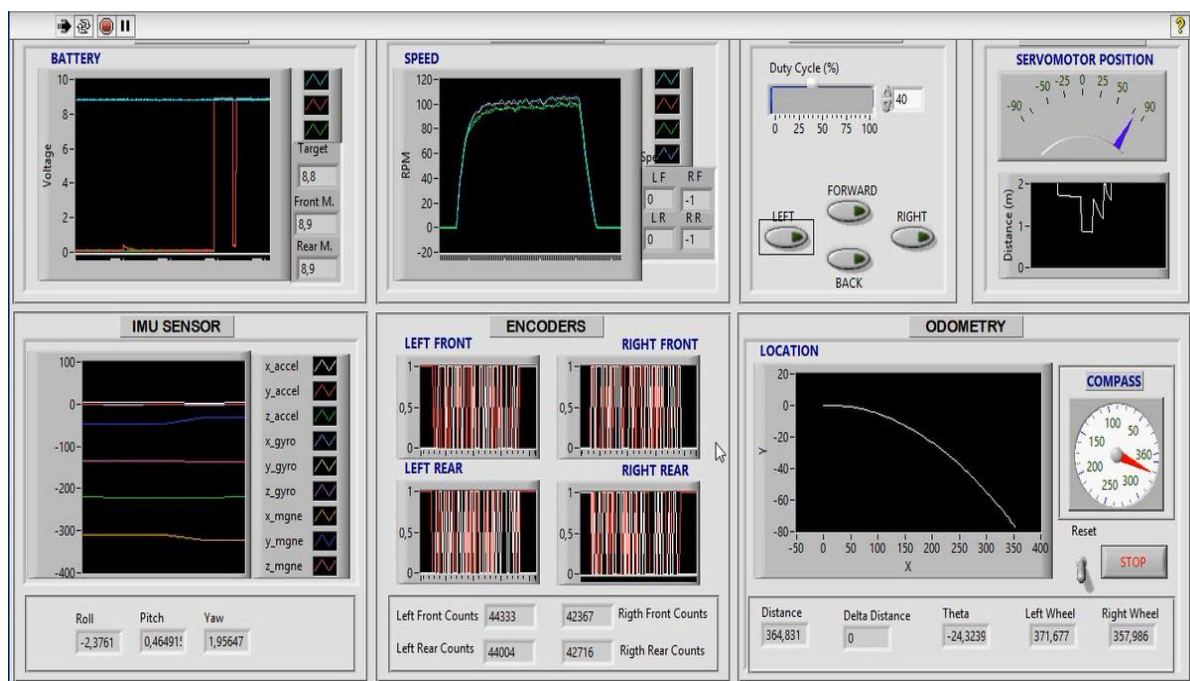


Figura 3.9. Interfaz gráfica de trayectoria rectilínea en superficie lisa.

En la Fig. 3.9 se muestra los resultados obtenidos de la información adquirida de los sensores nótese que durante el periodo de prueba a pesar que el ciclo de trabajo enviado a los

motores son los mismos, las velocidades no son iguales como se aprecia en la gráfica de velocidades existe una pequeña variación en cada uno, esto se da debido a que no existe un control en lazo cerrado y un análisis dinámico del robot de tal forma que al tratarse de un control en lazo abierto todos los factores tales como las masas, inercia, fricción, deformación de las ruedas, resbalamiento, etc., conllevan a que no se tenga una trayectoria rectilínea sino una trayectoria tipo parabólica tal como se observa en la Fig. 3.9.

La distancia total recorrida del robot móvil es calculada por la odometría a bordo y se puede apreciar en la Fig. 3.10 que la distancia recorrida total es de 364,83 cm, y el ángulo de desviación es de 24° desde el origen y haciendo la comprobación de campo se pudo verificar con un decámetro que la distancia total recorrida fue de 363 cm y el ángulo de desviación 23° es decir el margen de error es considerablemente aceptable. Además se observa que los datos leídos de todos los sensores están funcionando correctamente



Figura 3.10. Prueba de campo de trayectoria rectilínea en superficie lisa

En la Fig. 3.11 se observa el polinomio de la trayectoria que realiza el robot en donde se supone que no debería haber un error en “y” mientras en “x” va cambiando de manera incremental en el mismo eje, lo que no sucede debido a los puntos antes mencionados.

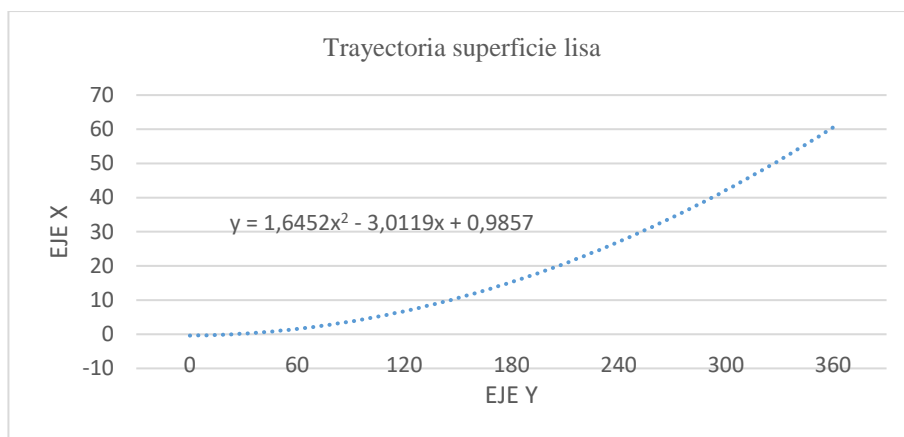


Figura 3.11. Polinomio de trayectoria rectilínea en superficie lisa

3.7.1.2 TRAYECTORIA EN UN MISMO PUNTO

Si el robot gira sobre su propio eje se deduce que la trayectoria descrita sería un punto suponiendo que gire perfectamente, en la Fig 3.12 se observa los resultados obtenidos y se determinó que debido al tipo de superficie existe resbalamiento en sus ruedas del tal manera que el robot no describe un punto sino una pequeña elipse dentro del rango de 1 y -1.

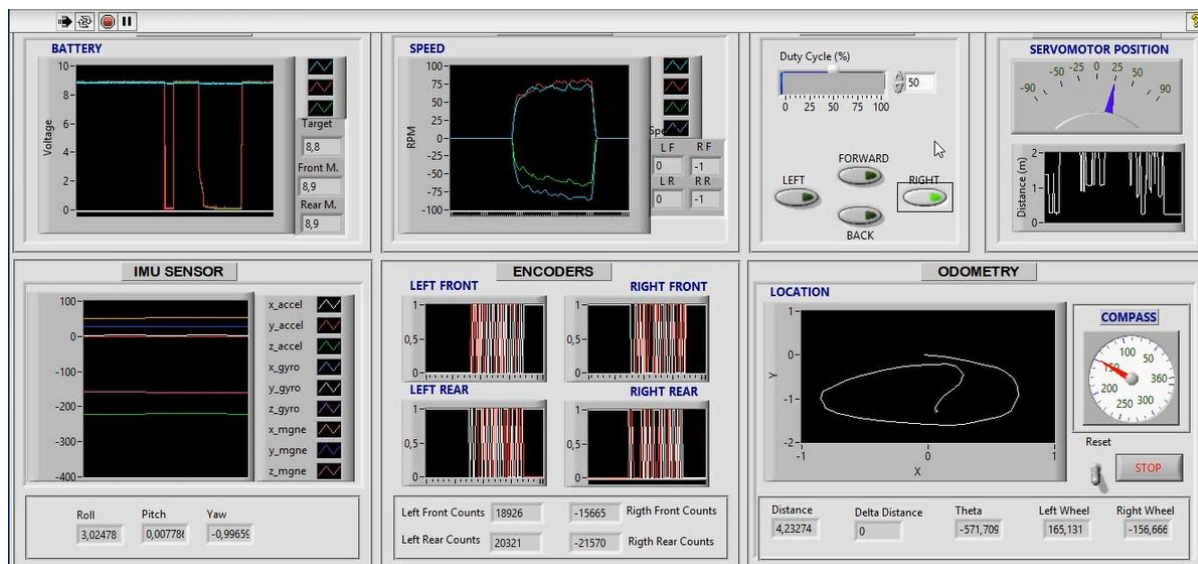


Figura 3.12. Interfaz gráfica de trayectoria en mismo punto superficie lisa

En la Fig 3.13 se muestra la prueba de campo de la trayectoria circular del robot sobre su eje donde se puede apreciar que el robot móvil no permanece sobre su origen debido al resbalamiento de sus ruedas es decir tiende a desplazarse.

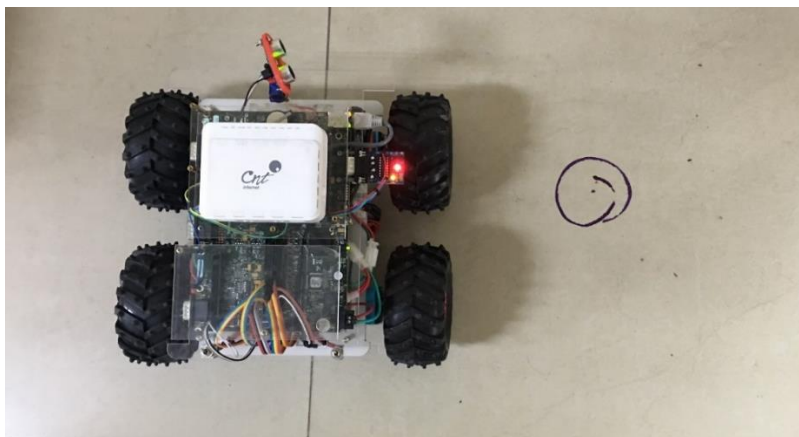


Figura 3.13. Prueba de campo de trayectoria en mismo punto superficie lisa

3.7.2 PRUEBA DE RECORRIDO EN SUPERFICIE RUGOSA.

3.7.2.1 TRAYECTORIA RECTILÍNEA

De la misma manera tomando en cuenta las mismas condiciones de funcionamiento al robot se lo hace desplazar sobre una superficie rugosa, en la Fig. 3.14 se muestra los resultados obtenidos de la información adquirida de los sensores.

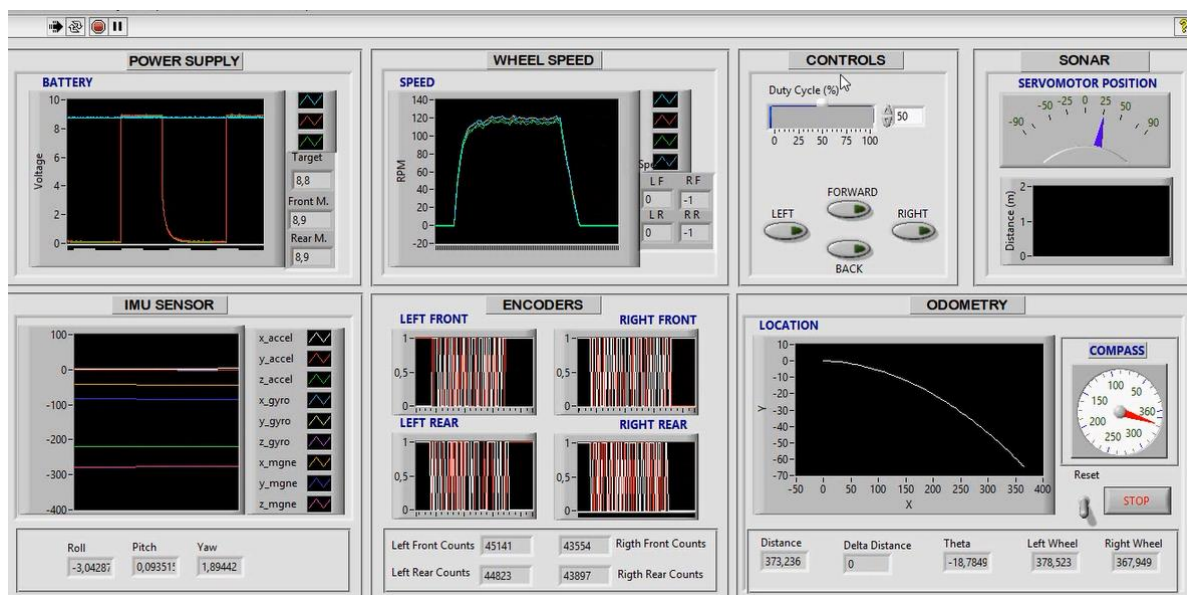


Figura 3.14. Interfaz gráfica de trayectoria rectilínea en superficie rugosa

Al igual que la prueba anterior existe una variación de velocidades debido a los factores mencionados anteriormente pero en este caso por ser la superficie áspera existe más agarre

entre las ruedas y el piso de tal manera que durante la trayectoria del robot el ángulo de desviación es menor en comparación a la prueba anterior.

En la Fig. 3.15 se aprecia la prueba de campo del robot en donde se puede comprobar que la información enviada de los sensores es correcta y la odometría funciona dando como resultado en la interfaz una distancia recorrida de 373.23 cm con un ángulo de desviación de $18,7^\circ$ y que medida con el decámetro se tiene 372 cm con un ángulo de desviación de 19° . Además se observa claramente que en las dos pruebas la trayectoria que describe no es en línea recta pero esto se podrá corregir implementando un control en lazo cerrado en futuros trabajos que se realizarán sobre el robot móvil.

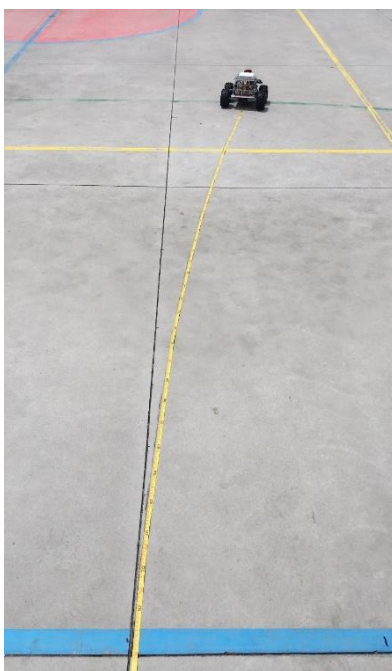


Figura 3.15. Prueba de campo de trayectoria rectilínea en superficie rugosa

En la Fig. 3.16 se observa el polinomio de la trayectoria que realiza el robot en donde se supone que debería haber un error 0 en “y” mientras que en “x” va cambiando lo que no sucede debido a los puntos antes mencionados.

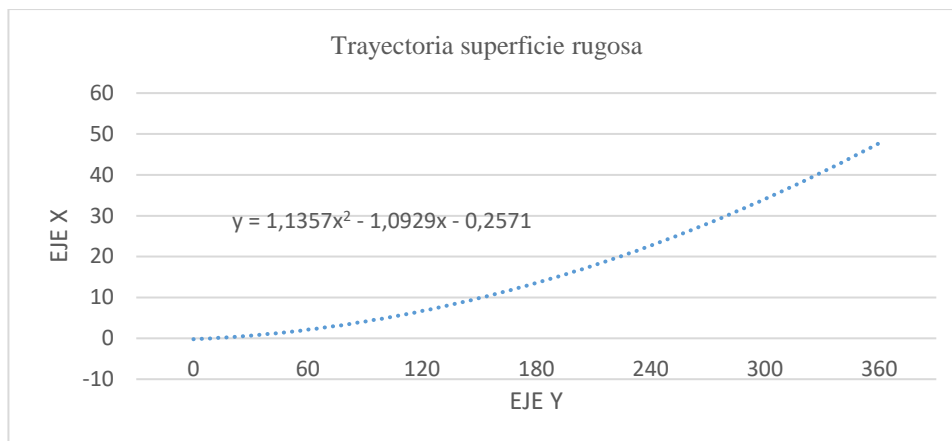


Figura 3.16. Polinomio de trayectoria rectilínea en superficie rugosa

En la Fig. 3.17 se puede observar las gráficas de la trayectoria de las dos superficies en donde se puede apreciar que existe menor grado de desviación sobre la superficie rugosa esto se da debido a que existe más agarre de sus ruedas sobre el piso.

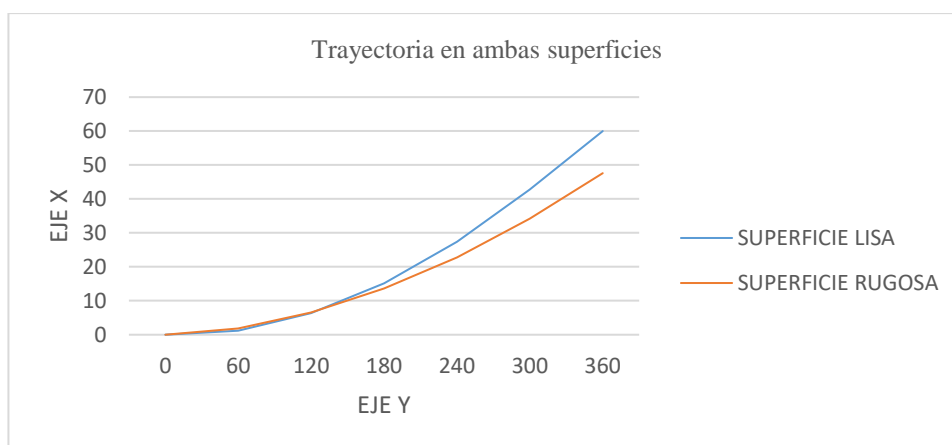


Figura 3.17. Trayectoria recta en ambas superficies

3.7.2.2 TRAYECTORIA EN UN MISMO PUNTO

En esta prueba el robot móvil trata de mantenerse en el origen aunque sus ruedas tengan más agarre con el piso la variación de velocidades en sus ruedas y propiedades dinámicas influyen para que el robot se mueva y no se mantenga en el centro de giro como se puede ver en la Fig. 3.18.

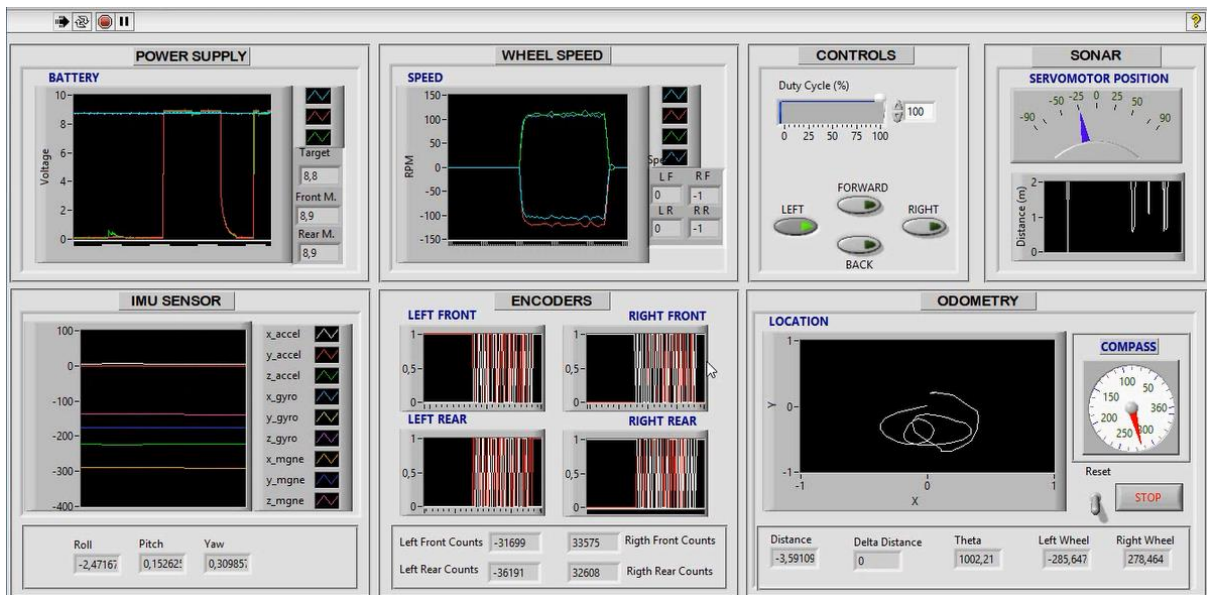


Figura 3.18. Prueba 4 trayectoria en mismo punto superficie rugosa

En la Fig 3.19 se muestra la prueba de campo de la trayectoria del robot sobre su eje donde se ve que el robot se desvia levemente de su origen.

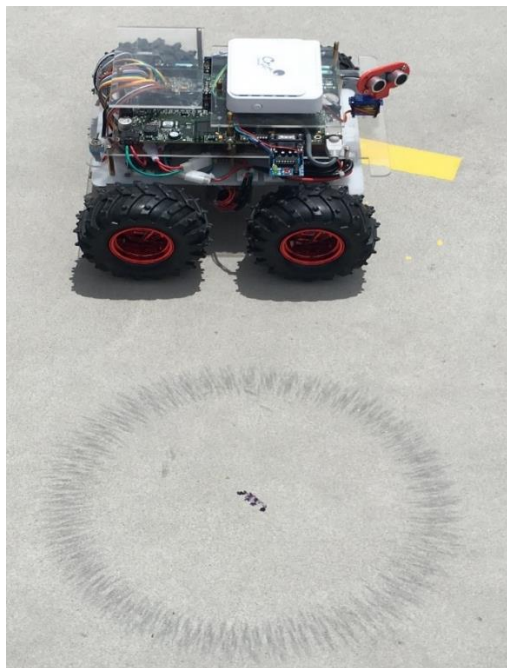


Figura 3.19. Prueba de campo de trayectoria en mismo punto superficie rugosa

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

4.1 CONCLUSIONES

- El punto fundamental para la realización del robot móvil es que la adquisición de los elementos son fáciles de conseguir y muy accesibles para su compra.
- Usando técnicas de odometría se logró estimar la posición y orientación del robot móvil para que se pueda realizar futuros trabajos de investigación en planeamiento de rutas de sistemas robóticos móviles.
- Con el modelo cinemático en configuración diferencial se logra el correcto funcionamiento del robot móvil que mediante ecuaciones matemáticas se ha comprobado la efectividad del modelo con un porcentaje del 0,5% de error.
- La interfaz humano-robot desarrollado en el entorno de LabVIEW permite un mejor desempeño del robot a través de la adquisición de datos en tiempo real manejada directamente desde LabVIEW FPGA y LabVIEW Real Time de fácil interpretación y uso a través del panel frontal.
- Se validó el funcionamiento del robot móvil en el que se pudo comprobar el correcto funcionamiento tanto del hardware como software al 100% ya que no presenta fallas en su funcionamiento.

4.2 TRABAJO FUTURO

A partir de esta tesis se plantean diferentes trabajos para desarrollar en futuras investigaciones:

- Realizar un análisis dinámico y determinar el modelo para establecer estrategias de control que ayudarán a reducir errores en la odometría.
- Implementar controladores en lazo cerrado en cada uno de sus motores.
- Se plantea desarrollar estrategias de navegación con algoritmos capaces de dotar al robot de autonomía en diferentes entornos de trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Arellano, *Diseño e implementación de un robot móvil con control de trayectoria mediante principios odométricos*, Lima, 2015.
- [2] F. Benavides, *Planificación de movimientos aplicada en robótica autónoma móvil*, Montevideo, 2012.
- [3] V. Zambrano, *Implementación de algoritmos de determinación de rutas para el ROBOTINO de Festo*, Quito, 2015.
- [4] A. Yandún, *Planeación y seguimiento de trayectorias para un robot móvil*, Quito, Pichincha, 2011.
- [5] P. O. B. ISO, «ISO,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en:term:2.13>.
- [6] G. Andaluz, *Modelación, identificación y control de robots móviles*, Quito, Pichincha, 2011.
- [7] J. M. Armingol Moreno, *LOCALIZACIÓN GEOMÉTRICA DE ROBOTS MÓVILES AUTÓNOMOS*, Leganés, Madrid, 1997.
- [8] I. R. N. Roland Siegwart, *Introduction to autonomous mobile robots*, London: The MIT Press, 2004.
- [9] G. D. A. Navarro, *Contribución a la autolocalización de robots móviles basada en la fusión de información multisensorial*, Valencia, Valencia, 2009.
- [10] A. O. Baturone, *Robotica: Manipuladores y robots móviles*, Marcombo, 2006, pp. 15-30.

- [11] T. Bräunl, *Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems*, S. B. Heidelberg, Ed., Crawley, Perth, 2008.
- [12] J. A. L. y. G. E. Santillán, *DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE UN ROBOT MOVIL PARA INTEGRAR A UN SISTEMA MPS PARA TRANSPORTE DE MATERIALES*, Riobamba, Chimborazo, 2015, pp. 56-57.
- [13] J. M. Perez, *Mapeo con robot móvil: Caracterización y modelado*, Barcelona, 2012.
- [14] P. R. & Electronics, «Pololu Robotics & Electronics,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.pololu.com/product/2825>.
- [15] Sparkfun, «Sparkfun,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/10736>.
- [16] Parallax, «Parallax,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.parallax.com/product/28015>.
- [17] I. B. Álvarez, *Construcción y control de un robot móvil (Tesis de pregrado)*, Sevilla, Sevilla, 2016.
- [18] N. Instrumets, «National Instruments,» 2017. [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-840/lang/es>.
- [19] Shenzhen, «FLOUREON,» Global Egrow E-Commerce Co., Ltd, 2011. [En línea]. Available: http://www.floureon.com/rc-battery-e_16. [Último acceso: 3 Noviembre 2016].
- [20] J. P. S. José RAfael Lajara Vizcaíno, *LabVIEW Entorno gráfico de programación.*, México D.F: MARCOMBO S.A.2007, 2007.

- [21] C. A. & D. Gabriel, *Diseño y construcción de un robot para mapeo y exploración de minas subterráneas (Tesis de pregrado)*, Cuenca, Azuay, 2014.
- [22] C. A. Montes, *Navegación y control de un robot móvil tolerante a fallos en sensores (Tesis de maestría)*, Sevilla, Sevilla, 2013.
- [23] J. A. VALENCIA V., L. H. RIOS y A. MONTOYA O., «MODELO CINEMÁTICO DE UN ROBOT MÓVIL TIPO DIFERENCIAL Y NAVEGACIÓN A PARTIR DE LA ESTIMACIÓN ODOMÉTRICA,» *Scientia Et Technica 2008 XIV*, pp. 191-196, 2009.
- [24] H. R. E. a. L. F. J. Borenstein, *Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*, Michigan, Michigan, 1996.
- [25] C. F. Caramés, *Técnicas de navegación para un robot móvil utilizando sistemas de razonamiento espacial*, Salamanca, 2012.
- [26] Servodatabase, «Servodatabase,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.servodatabase.com/servo/towerpro/sg90>.
- [27] J. & O. J. Ibanez-Guzman, «Perception management for the guidance of unmanned vehicles,» *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, 2004.

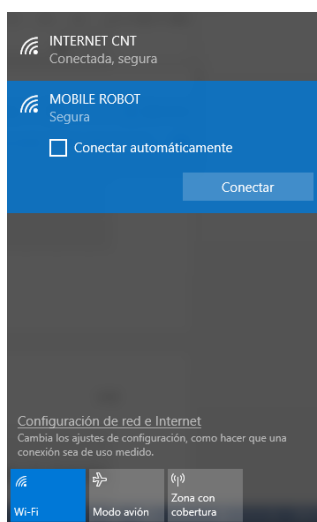
ANEXOS

MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DE LA PLATAFORMA

El manual indica una breve explicación sobre la configuración y funcionamiento de la plataforma así como alertas sobre posibles errores que se pueda presentar.

- **Establecer conexión pc-robot móvil.**

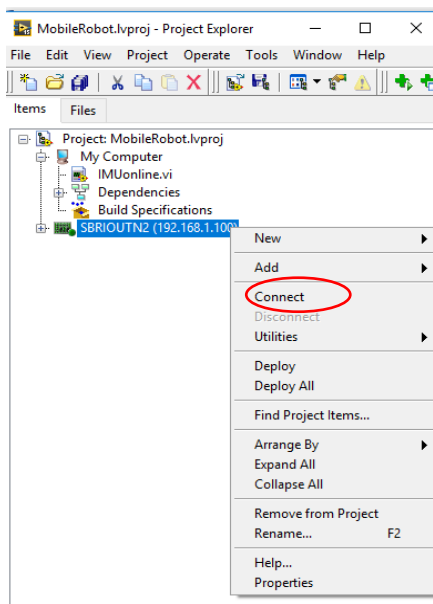
1. Una vez que se ha encendido en robot móvil y se verifique que el wifi del enrutador esta encendido, se establece conexión con la red “MOBILE ROBOT” por medio del pc con la contraseña 12345678.



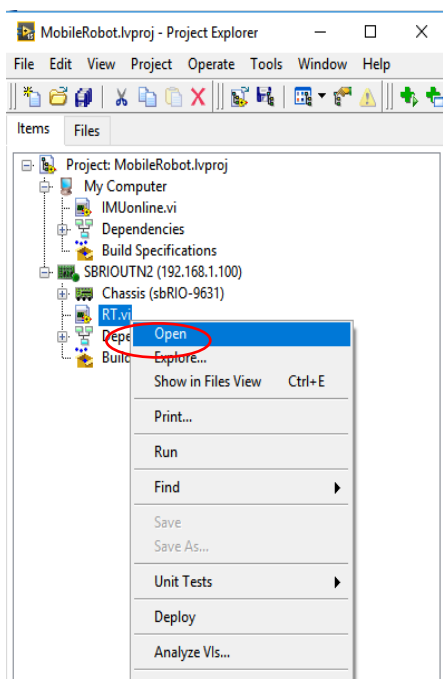
2. Para verificar el envío y recepción de datos utilizar NI MAX.

- **Establecer conexión robot movil-hmi.**

1. Una vez abierto el proyecto en labview se establece conexión con la tarjeta haciendo click derecho sobre SBRIOUTN2, conect como se muestra.



2. Abrir el vi RT que es la interfaz principal del hmi en donde se va a interactuar con el robot.

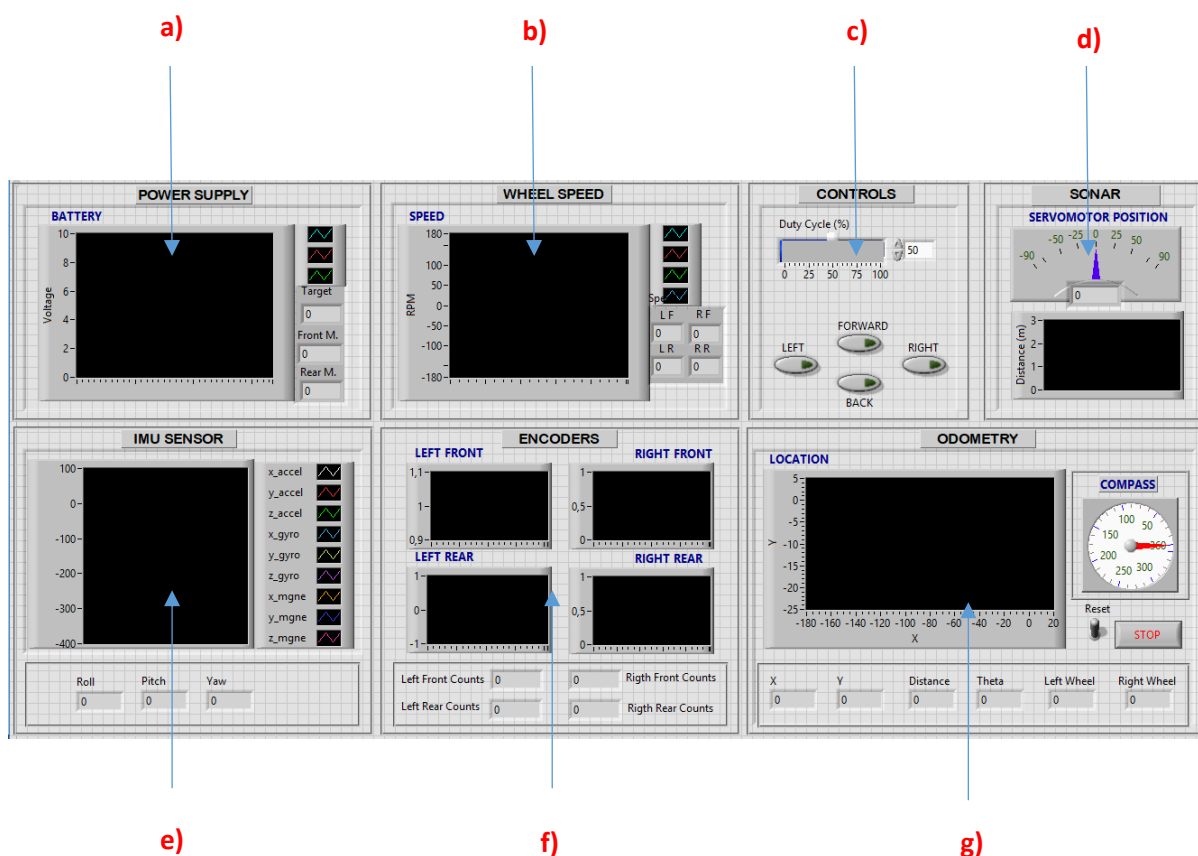


- **Ventana principal del hmi**

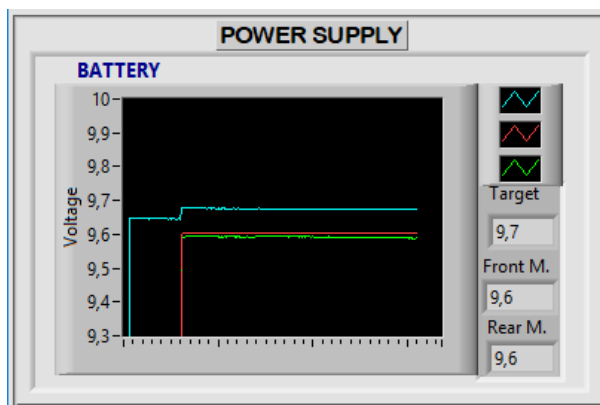
La ventana principal consta de diferentes secciones mediante el cual la persona puede manipular de manera simple y sencilla así:

- a) Sección de visualización del estado de las baterías.

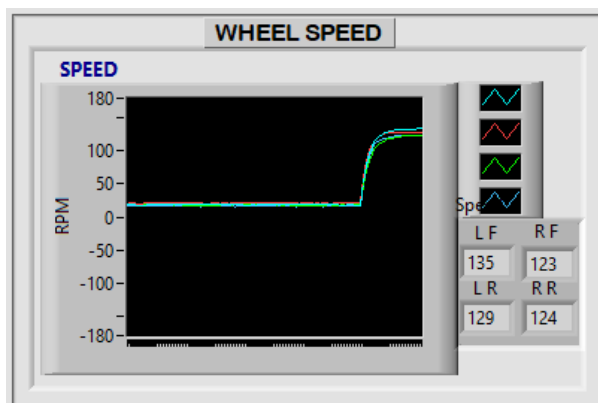
- b) Sección de visualización de la velocidad de los motores.
- c) Sección de maniobrabilidad del robot.
- d) Sección de visualización del sensor ping.
- e) Sección de visualización de sensor IMU.
- f) Sección de lectura de codificadores.
- g) Sección del análisis odométrico.



- a) **Sección de visualización del estado de las baterías:** en esta sección se encuentra una gráfica y unos indicadores que muestran el estado actual del voltaje de las baterías teniendo como lectura máxima 10v cada una que significa que está a carga máxima. Es importante mencionar que si el estado de carga de las baterías es menor a 6v el hmi genera un mensaje de advertencia que indica que el estado de la batería es baja y pone en estado de paro el funcionamiento del sistema.



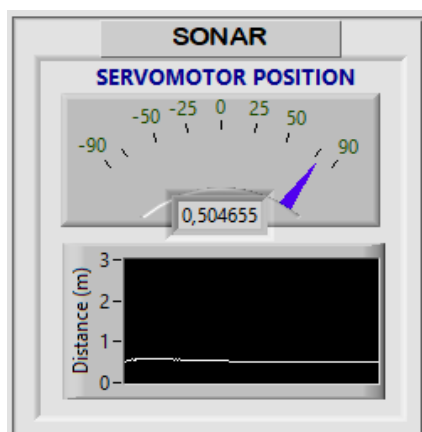
- b) **Sección de visualización de la velocidad de los motores:** en esta sección se muestra una gráfica de las velocidades de cada uno de los motores además existen indicadores numéricos que muestran el valor de la velocidad en rpm.



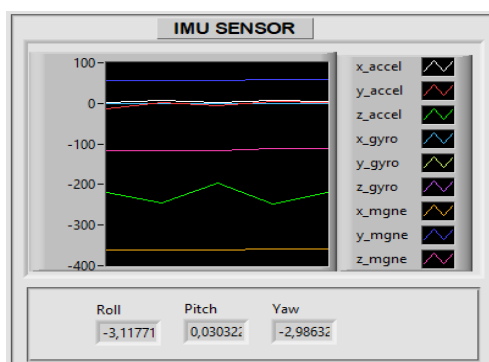
- c) **Sección de maniobrabilidad del robot:** se encuentra los controles para poder tener maniobrabilidad sobre el robot en donde a través de cuatro botones damos movilidad al robot, cabe mencionar que el control de navegación también se lo puede tener por teclado a través de las teclas F2, END, F1, F3 y un puntero de deslizamiento horizontal el cual sirve para controlar la velocidad de los motores.



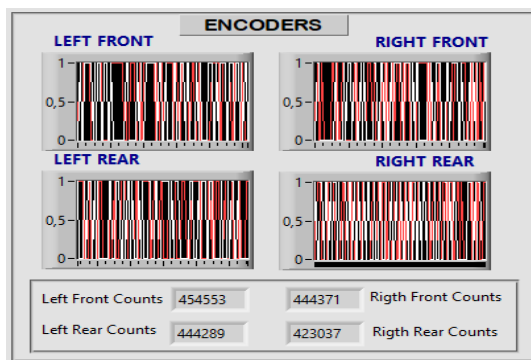
- d) **Sección de visualización del sensor ping:** en esta sección se puede observar mediante un indicador la posición del servomotor con un rango de 90° y -90° y la lectura del sensor ping interpretando la distancia en una gráfica.



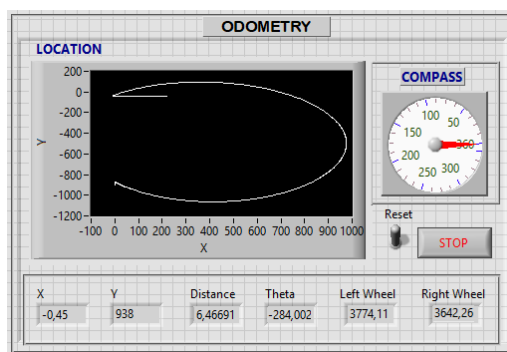
- e) **Sección de visualización de sensor IMU:** en esta sección se puede apreciar la lectura del sensor de medición inercial IMU en donde a través de una gráfica podemos observar las señales de todos sus ejes tanto del acelerómetro, giroscopio y magnetómetro seguido de unos indicadores numéricos en el que se visualiza los valores de los ángulos de Euler cabeceo, alabeo y guiñada.



- f) **Sección de lectura de codificadores:** unos indicadores gráficos visualizan el estado lógico de cada uno de los codificadores de sus ruedas y además un indicador numérico muestra el conteo incremental de cada pulso.

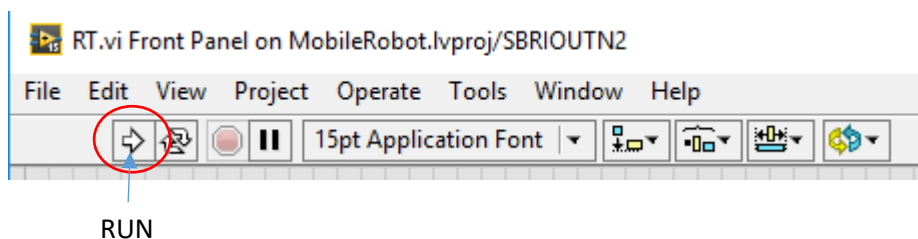


- g) **Sección del análisis odométrico:** donde se estima la localización del robot móvil en una gráfica “x” e “y”, y unos indicadores además se muestra la distancia recorrida total, ángulo de posición y distancia recorrida por cada rueda derecha e izquierda igualmente se tiene un indicador del compás del robot móvil en donde nos indica la orientación del robot móvil en grados.

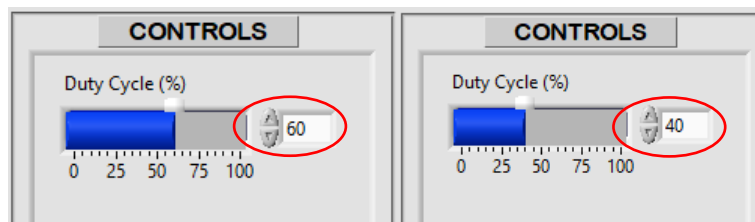


- **Puesta en marcha del robot**

1. Poner en estado de run al programa haciendo clic sobre el la flecha situada en la parte superior de la ventana en el entorno de LabVIEW.



- Una vez ejecutado el programa seleccionar el ciclo de trabajo al que se va a mover el robot.



- Presionar la tecla F2 si se quiere que avance para adelante o FIN si se quiere que el robot se mueva para atrás.



- Para que el robot gire se debe subir previamente el ciclo de trabajo y presionar F3 para que gire a la derecha y la tecla F1 para que gire hacia la izquierda.



- El robot empieza a moverse y se visualizan todos los parámetros a través del hmi en donde se observa las señales de todos los sensores en tiempo real.y para detener el programa se da click en stop.