



UNIVERSIDAD UTE

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL
TRAZADOR DE LÍNEAS**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERA EN MECATRÓNICA**

CRISTINA NATASHA ANDRADE RAMIREZ

DIRECTOR: PHD. DANIEL ALEJANDRO MIDEROS MORA

Quito, febrero 2021

© Universidad UTE 2021.

Reservados todos los derechos de reproducción

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1722741442
APELLIDO Y NOMBRES:	ANDRADE CRISTINA NATASHA
DIRECCIÓN:	LUIS CALISTO E6-95 Y GONZALO ZALDUMBIDE
EMAIL:	cristinandrade03@hotmail.com
TELÉFONO FIJO:	2407115
TELÉFONO MOVIL:	0992619985

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL TRAZADOR DE LÍNEAS
AUTOR O AUTORES:	ANDRADE RAMIREZ CRISTINA NATASHA
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	FEBRERO 2021
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	MIDEROS MORA DANIEL
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERA MECATRÓNICA
RESUMEN: Mínimo 250 palabras	Este trabajo de investigación presenta el proceso de diseño y construcción de un robot móvil omnidireccional. La idea surge de buscar herramientas con una determinada autonomía que permitan reparar los daños evitando intermitencia en las líneas de producción, así como máquinas similares a las de un taladro magnético, ya que permite llevar la herramienta al trabajo, en lugar de trasladar la pieza que se necesita modificar al

área de trabajo de la herramienta. El robot se lo realizó con base en la metodología mecatrónica, el área de trabajo de este robot es de forma horizontal, y está compuesto de una computadora embebida donde el usuario tendrá acceso de forma remota al robot. En la computadora existen programas para transformar la imagen seleccionada a código G, visualizar la trayectoria de la figura además de enlazarse con el controlador, con todo este proceso los 3 motores a pasos del robot inician su movimiento, haciendo que se desplace en los ejes de coordenadas X & Y y gracias a la cinemática se demostró este comportamiento. Al finalizar se puede determinar que gracias a la consecución de cada uno de los objetivos específicos se ha alcanzado el objetivo general planteado al inicio. Se realizaron pruebas de funcionamiento donde se pudo observar los errores relativos y absolutos; en la prueba de la recta vertical se obtuvo una precisión de 100 ± 0.44 mm con un error de 0.44% y en la recta horizontal el error absoluto es 1.11mm por lo que la precisión fue de 100 ± 1.11 mm con un error de 1.06%. Con estas pruebas de posicionamiento que, si bien se puede evidenciar la falta de precisión logra hacer la figura deseada.

PALABRAS CLAVES:

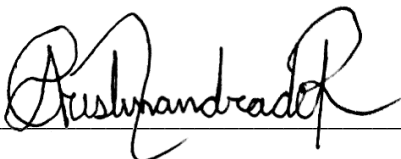
robot móvil, robot omnidireccional, robot CNC, código G.

ABSTRACT:

This research work presents the process of designing and building an omnidirectional mobile robot. The idea arises from looking for tools with a certain autonomy that allow to repair the damage avoiding intermittency on the production lines, as well as similar machines to those of a magnetic drill, since it allows to take the tool to work, instead of moving the part that needs to be modified to the work area of the tool. The robot made it based on the mechatronic methodology, the work area of this robot is horizontally, and is composed of an embedded computer where the user will have remote access to the robot. On the computer there are programs to transform the selected image to G code and then it must be sent for the robot's engines to run causing it to move on the X&Y axes and thanks to kinematics, this behavior was

	<p>demonstrated. At the end, it can be determined that the overall objective set at the outset has been achieved through the achievement of each of the specific objectives. Operational tests were carried out where relative and absolute errors could be observed; In the vertical straight test an accuracy of 100 ± 0.44 mm was obtained with an error of 0.44% and in the horizontal line the absolute error is 1.11mm so the accuracy was 100 ± 1.11 mm with an error of 1.06%. With these positioning tests which, although it can be evident that the lack of precision manages to make the desired figure.</p>
KEYWORDS	mobile robot, omnidirectional robot, CNC robot, G code.

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f: 

ANDRADE RAMIREZ CRISTINA NATASHA

C.I.: 1722741442

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **ANDRADE RAMIREZ CRISTINA NATASHA**, CI: 1722741442 autora del proyecto titulado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL TRAZADOR DE LÍNEAS”** previo a la obtención del título de **INGENIERA MECATRÓNICA** en la Universidad UTE.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad UTE a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

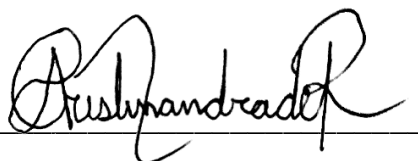
Quito, 11 de febrero del 2021.

f: 
ANDARDE RAMIREZ CRISTINA NATASHA
C.I.: 1722741442

DECLARACIÓN

Yo **CRISTINA NATASHA ANDRADE RAMIREZ**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad UTE puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

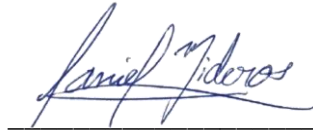
A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Cristina Andrade Ramirez', written over a horizontal line.

Cristina Natasha Andrade Ramirez

C.I.: 1722741442

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL TRAZADOR DE LÍNEAS**”, que, para aspirar al título de **Ingeniera en Mecatrónica** fue desarrollado por **Cristina Natasha Andrade Ramirez**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 19, 27 y 28.



MIDEROS MORA DANIEL ALEJANDRO

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I.: 1713177325

DEDICATORIA

A mis padres que siempre han sido mi mayor apoyo durante mis años de estudio, a mi hermano que siempre me ha dado consejos para seguir adelante y a mis dos abuelas que siempre estuvieron de acuerdo en que persiga mis sueños.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por inculcarme los valores que hoy en día me han formado como persona, además de depositar siempre la confianza sobre mí y enseñarme a que logre siempre lo que me propongo.

A mi hermano por ser ese apoyo incondicional que me ha dado fuerzas en las situaciones difíciles

A mi mejor amigo que siempre estuvo ayudándome en estos años de carrera.

Y a mis profesores que me han dado el conocimiento, conocimiento que han ayudado para el desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	PÁGINA
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. METODOLOGÍA.....	9
2.1. DIAGRAMA DE REQUERIMIENTOS	9
2.2. DISEÑO CONCEPTUAL	10
2.2.1. COMPONENTES DEL ROBOT MÓVIL.....	11
2.2.2. ENSAMBLE DEL ROBOT	12
2.2.3. CÁLCULO PARA LA SELECCIÓN DEL MOTOR A PASOS	14
2.2.4. CÁLCULO PARA LA SELECCIÓN DE RODAMIENTOS.....	15
2.3. FUNCIONALIDAD DEL ROBOT.....	16
2.4. DISEÑO ESPECÍFICO	16
2.4.1. DISEÑO DE ESTRUCTURA	16
2.4.2. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS	18
2.4.3. SELECCIÓN DE LLANTAS.....	19
2.4.4. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA BASE	20
2.4.5. DISEÑO DE LA BASE DE LOS MOTORES.....	20
2.4.6. DISEÑO DEL PORTA HERRAMIENTAS	21
2.4.7. DISEÑO DE LOS SOPORTE DE LAS GUÍAS	21
2.4.8. SELECCIÓN DE MOTORES.....	22
2.4.9. SELECCIÓN DE MICROCONTROLADOR PARA LOS MOTORES	23
2.4.10. SELECCIÓN DE DRIVERS PARA MOTORES	23
2.4.11. SELECCIÓN DE MICRO-COMPUTADOR PARA EL SOFTWARE	24
2.4.12. SELECCIÓN DE LA BATERÍA	25
2.4.13. IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ	26
2.4.14. DISEÑO DE CONTROL.....	28
2.5. MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT	30
2.6. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA	32
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
3.1. COSTO DEL ROBOT	35
3.2. USO DE LOS PROGRAMAS	35
3.3. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	37

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
CONCLUSIONES.....	46
RECOMENDACIONES	48
BIBLIOGRAFÍA.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1. Componentes mecánicos	17
Tabla 2. Dimensiones y características del rodamiento	19
Tabla 3. Características básicas de los motores a pasos seleccionados	23
Tabla 4. Características básicas de los drivers	24
Tabla 5. Voltajes, amperajes y potencias de los dispositivos	25
Tabla 6. Características de la batería Lipo	26
Tabla 7. Elementos del robot móvil	32
Tabla 8. Costo materia prima.	35
Tabla 9. Costo total del dispositivo	35
Tabla 10. Errores individuales de la línea vertical.....	38
Tabla 11. Errores individuales de la línea horizontal.....	39
Tabla 12. Errores individuales de los diámetros	41
Tabla 13. Errores individuales de los lados del triangulo	42
Tabla 14. Errores individuales de los lados de la estrella	44

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Clasificación de los robots según el libro Robótica: Análisis, modelado, control e implementación	5
Figura 2. Robot móvil Robotnačka	6
Figura 3. Robot 3DOF	6
Figura 4. Hardware del Robot LSP-Bot	7
Figura 5. Robot móvil Goliath CNC	7
Figura 6. Diagrama de requerimientos para el diseño del robot móvil	10
Figura 7. Diagrama funcional del robot móvil.	11
Figura 8. Estructura general del robot móvil	12
Figura 9. Mecanismo general del control del porta herramientas.	12
Figura 10. Ensamblaje de la parte electrónica del robot móvil	13
Figura 11. Ensamblaje de la parte mecánica	13
Figura 12. Fórmulas para el cálculo del torque del motor.....	14
Figura 13. Diagrama paramétrico del cálculo del torque para la selección de motores.....	14
Figura 14. Fórmulas correspondientes para el cálculo de rodamiento	15
Figura 15. Diagrama paramétrico del cálculo para la selección de rodamiento.....	15
Figura 16. Diagrama de caso de uso de los usuarios.....	16
Figura 17. Vista isométrica y explosionada respectivamente del diseño mecánico	17
Figura 18. Rueda Omnidireccional también llamada rueda sueca. La opción A) es una rueda mecanum y la opción B) es una rueda omnidireccional doble.....	19
Figura 19. Modelo de la estructura base	20
Figura 20. Diseño de los soportes de los motores a pasos	21
Figura 21. Diseño final del porta herramientas	21
Figura 22. Diseño de los soportes para las guías	22
Figura 23. Interfaz del Software Pronterface	27
Figura 24. Interfaz de Inkscape	28
Figura 25. Diagrama de flujo de la programación.....	29
Figura 26. Geometría del robot omnidireccional.....	30
Figura 27. Componentes en XY del vector.....	31
Figura 28. Vista isométrica y explosionada respectivamente del robot final	32
Figura 29. Conexiones de la sección electrónica	33
Figura 30. Proceso para ejecutar los motores	33
Figura 31. Prototipo del robot omnidireccional.	33

Figura 32. Diseño de la placa PCB y modelo 3D	34
Figura 33. Configuración de las llantas	34
Figura 34. Programa Inkscape para generar código de una figura.....	36
Figura 35. Inkscape para generar el código de una imagen.....	36
Figura 36. Funcionamiento del programa PronterFace	37
Figura 37. Prueba línea vertical	37
Figura 38. Prueba línea horizontal	39
Figura 39. Prueba figura cuadrada.....	40
Figura 40. Prueba figura circular	40
Figura 41. Prueba figura triangular.....	42
Figura 42. Prueba figura estrella	43

RESUMEN

Este trabajo de investigación presenta el proceso de diseño y construcción de un robot móvil omnidireccional. La idea surge de buscar herramientas con una determinada autonomía que permitan reparar los daños evitando intermitencia en las líneas de producción, así como máquinas similares a las de un taladro magnético, ya que permite llevar la herramienta al trabajo, en lugar de trasladar la pieza que se necesita modificar al área de trabajo de la herramienta. El robot se lo realizó con base en la metodología mecatrónica, el área de trabajo de este robot es de forma horizontal, y está compuesto de una computadora embebida donde el usuario tendrá acceso de forma remota al robot. En la computadora existen programas para transformar la imagen seleccionada a código G, visualizar la trayectoria de la figura además de enlazarse con el controlador, con todo este proceso los 3 motores a pasos del robot inicien su movimiento, haciendo que se desplace en los ejes de coordenadas X & Y y gracias a la cinemática se demostró este comportamiento. Al finalizar se puede determinar que gracias a la consecución de cada uno de los objetivos específicos se ha alcanzado el objetivo general planteado al inicio. Se realizaron pruebas de funcionamiento donde se pudo observar los errores relativos y absolutos; en la prueba de la recta vertical se obtuvo una precisión de $100 \pm 0.44 \text{ mm}$ con un error de 0.44% y en la recta horizontal el error absoluto es 1.11mm por lo que la precisión fue de $100 \pm 1.11 \text{ mm}$ con un error de 1.06%. Con estas pruebas de posicionamiento que, si bien se puede evidenciar la falta de precisión logra hacer la figura deseada.

Palabras claves: robot omnidireccional, robot CNC, robot trazador

ABSTRACT

This research work presents the process of designing and building an omnidirectional mobile robot. The idea arises from looking for tools with a certain autonomy that allow to repair the damage avoiding intermittency on the production lines, as well as similar machines to those of a magnetic drill, since it allows to take the tool to work, instead of moving the part that needs to be modified to the work area of the tool. The robot made it based on the mechatronic methodology, the work area of this robot is horizontally, and is composed of an embedded computer where the user will have remote access to the robot. On the computer there are programs to transform the selected image to G code and then it must be sent for the robot's engines to run causing it to move on the X&Y axes and thanks to kinematics, this behavior was demonstrated. At the end, it can be determined that the overall objective set at the outset has been achieved through the achievement of each of the specific objectives. Operational tests were carried out where relative and absolute errors could be observed; In the vertical straight test an accuracy of 100 ± 0.44 mm was obtained with an error of 0.44% and in the horizontal line the absolute error is 1.11mm so the accuracy was 100 ± 1.11 mm with an error of 1.06%. With these positioning tests which, although it can be evident that the lack of precision manages to make the desired figure.

Key words: mobile robot, omnidirectional robot, CNC robot, G code.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo en el área de la robótica ha experimentado cambios elevados debido a su capacidad de realizar tareas repetitivas con precisión y alta velocidad. Los sistemas robóticos poseen varios parámetros tales como cinemática, dinámica, sistemas de control y comunicación en áreas que poseen una investigación constante lo que permite el desarrollo y avance de robots para entornos tanto industriales como robots utilizados en la cirugía médica y hasta robots móviles autónomos con aplicaciones para operar en entornos definidos como en lugares de poco acceso y no estructurados. (Chamba, Sánchez, Moya, Noroña, & Franco, 2019).

Los equipos robóticos son máquinas que se han ido desarrollando en áreas asistenciales, industriales, ambientales, aplicaciones domésticas, agricultura de precisión, medicina, deporte e incluso el arte, buscando la complementariedad y en muchos casos creando nuevas necesidades tecnológicas en la sociedad.

Como por ejemplo en la industria de agricultura existe un robot móvil sembrador de maíz autónomo capaz de recorrer los surcos, está dotado de algoritmos de control y sensores que le ayudan a recorrer los surcos, sembrar las semillas a una profundidad específica y a una distancia correcta entre semilla y semilla (Castro Blacio , Mosquera Canchingre , & Bonilla Venegas , 2017).

En el área asistencial está el robot móvil para búsqueda y mitigación de incendios a baja escala con el objetivo de salvaguardar la vida del personal de rescate, disminuir el tiempo de búsqueda y la asistencia de personas heridas (Sánchez M., Bonilla V., Moya C., & Mosquera C., 2017).

Se puede observar que ambos robots se han adecuado para el beneficio de los seres humanos dando mayor comodidad y productividad para las diferentes áreas.

En la industria moderna el desarrollo de productos y procesos eficientes es la base, para ello se requiere innovar en los procesos productivos para mejorar la competencia entre las industrias. La manufactura integrada por computador (CIM) ayuda a que los procesos se realicen con rapidez, exactitud y calidad evitando generar errores. Existen varios ejemplos de procesos de manufactura industrializados que en su mayoría se puede observar en la industria automotriz, procesamiento de alimentos y en el desarrollo de equipos tecnológicos (Correa, 2017).

En el área industrial como ya se había mencionado antes el factor más importante en su desarrollo es la productividad, la cual está vinculada de forma directa con el costo de la materia prima, la energía eléctrica o térmica, la disponibilidad de la

maquinaria y el costo de la mano de obra. En este caso la disponibilidad de la maquinaria interfiere de forma directa incrementando los costos y el índice de productividad de una industria debido a esto, cuando una maquinaria o una parte de ella sufre un desperfecto la producción se detiene hasta que sea solucionado el inconveniente. La solución en estos casos es buscar maquinarias o herramientas con una determinada autonomía y movilidad que permitan reparar los daños y prevenir el desgaste de los elementos mecánicos evitando intermitencia en las líneas de producción (Bonilla V. , 2018).

Un ejemplo de este tipo de herramientas es el taladro magnético o también llamado taladro de base portátil; es una herramienta móvil que permite maniobrar en espacios de cualquier tamaño y forma, de manera independiente de la posición sea vertical, horizontal o desde abajo hacia arriba, se lo utiliza para perforar orificios en materiales metálicos incluido el acero (Hougen, 2017).

De acuerdo a W. Adrewy Miño Rubiano (2017), la robótica se clasifica según su aplicación, locomoción, arquitectura y posicionamiento. Este último se refiere al lugar de sujeción de la base del robot, es decir, si posee una base sujeta a una superficie, éste será denominado robot fijo o industrial; por el otro lado si tiene la capacidad de desplazarse de un punto a otro en su espacio de trabajo se llamará robot móvil.

Como se muestra en la Figura 1, los robots se pueden clasificar en dos grupos: manipuladores y móviles. Los robots manipuladores se los puede definir como una máquina manipuladora que tiene varios grados de libertad controlada automáticamente, reprogramables y de múltiples usos, su base está fija y su uso más común es en aplicaciones industriales. Se encuentran compuestos por un sistema mecánico, actuadores (eléctricos, neumáticos o hidráulicos), controladores y una interfaz de comunicación. Los robots móviles por lo general han sido más utilizados en labores de exploración y reconocimiento ya que se distinguen por su autonomía de navegación; al mismo tiempo los robots móviles con ruedas han facilitado en la industria manufacturera el almacenaje, distribución de materia prima y reducción de tiempos de entrega (Hernández Ordoñez, Ortiz Moctezuma, Calles Arriaga, & Rodríguez Portillo, 2015).

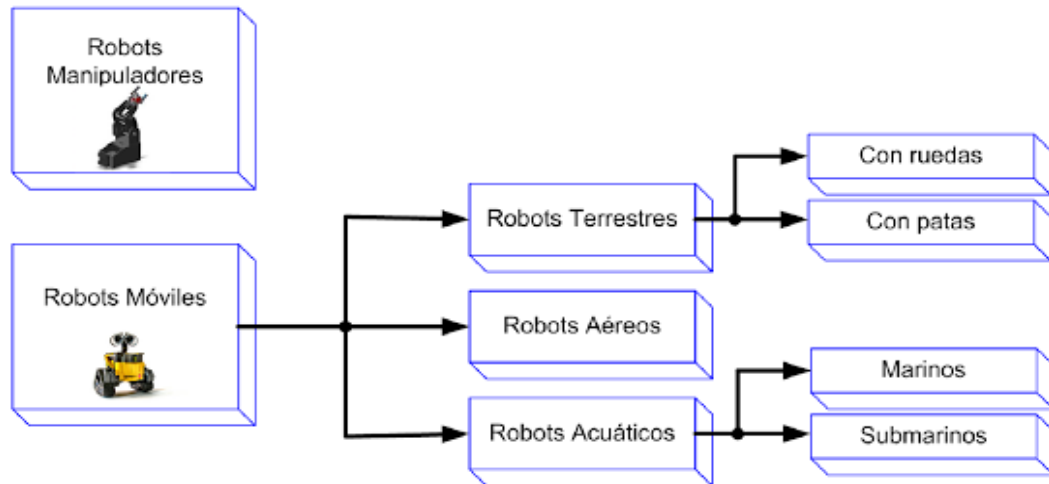


Figura 1. Clasificación de los robots según el libro Robótica: Análisis, modelado, control e implementación (Hernández Ordoñez, Ortiz Moctezuma, Calles Arriaga, & Rodríguez Portillo, 2015)

Los robots móviles se caracterizan debido a sus sistemas electromecánicos que tienen la capacidad de desplazarse de forma autónoma en un determinado entorno. Sus campos de aplicación son muy variados, entre las cuales se incluyen terrestres, acuáticos y aéreos (Gutiérrez, 2017).

Si un entorno de trabajo es complicado, se requiere de herramientas que ayuden a adaptarse a estas áreas. Si bien, instrumentos como los taladros magnéticos ayudan a solventar los problemas que pueden presentar, desde este punto de vista con la clasificación presentada, los robots móviles empiezan a tomar más demanda para realizar este tipo de tareas. Siendo máquinas autónomas se puede elevar los beneficios en la compostura de dichas averías. Entonces los robots móviles deben ser flexibles, adaptables y seguros.

Existen varios tipos de robots desarrollados para aplicaciones similares, a continuación, se muestran sus características.

Robotnačka (Figura 2) es un robot móvil autónomo compuesto de 2 ruedas diferenciales, tienen una forma circular que mide 210 mm de diámetro, el alto es de 90 mm y pesa 2 kg. En la placa base tienen 2 motores a pasos, un mecanismo de solenoide para el control de la pluma y la placa electrónica. Cuenta con 6 sensores IR para reconocer las marcas guías que contiene la superficie de trabajo. Tiene un microcontrolador Atmel AT89S8252 de 8 bits que funciona a 11 MHz. Contiene un cargador interno de 6v/3.2 Ah Pb. Puede ser controlado remotamente por bluetooth y la interfaz de comunicación controla el flujo de datos, los datos se originan en el computador. Todo el software para Robotnačka es de código abierto (Balogh, 2006).

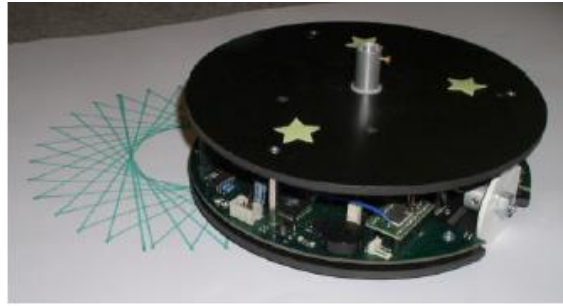


Figura 2. Robot móvil Robotnačka
(Balogh, 2006)

3DOF (Figura 3) es un brazo robótico que usa LEGO-NXT, contiene un computador integrado con 4 entradas y 3 salidas. Su principal procesador es Atmel ARM de 32-bit y 48 MHz y tienen un segundo procesador Atmel AVR de 8-bit y 8 MHz. Las tres salidas sirven para conectar los motores mientras que las 4 entradas sirven para los sensores además cuenta con un puerto de USB para descargar programas desde la computadora al NXT. Para este robot crearon un programa con una biblioteca programada en C# que habilita las aplicaciones para controlar el LEGO NXT desde un código administrador que se conecta a través de bluetooth con un computador que contiene una biblioteca móvil (Hámori, Lengyel, & Reskó, 2011).

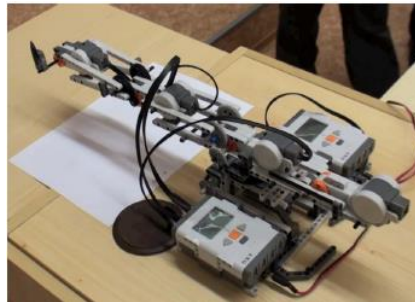


Figura 3. Robot 3DOF
(Hámori, Lengyel, & Reskó, 2011)

LSP-Bot (Figura 4) es un robot móvil de pintura que puede dibujar aumentando el tamaño de la imagen con una compensación visual de errores. El chasis de este robot se basa en 3 platos y marcos de aluminio. Para su movilidad utiliza 2 servomotores con llantas. Tienen un sistema de marcadores para realizar los dibujos que se ubica en la mitad de las 2 llantas además de que es controlado por un servomotor para que se desplace hacia arriba o abajo. Utiliza una raspberry PI Cámara Module en la parte de abajo del robot e incluye 3 cámaras Genius F100TL que ayudan a la trayectoria del robot. Está compuesto por 3 procesadores; un procesador en tiempo real OpenCR, un Raspberry PI para la compensación visual local y un Intel NUC como procesador principal. El software

general de este robot tiene una comunicación TCP/IP (Kim, Ko, Jung, Lee, & Lee, 2018).

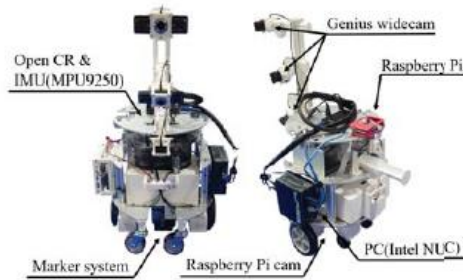


Figura 4. Hardware del Robot LSP-Bot (Kim, Ko, Jung, Lee, & Lee, 2018)

Goliath CNC (Figura 5) es un robot autónomo portátil que corta, perfora y graba sobre el material de trabajo. Este robot se caracteriza por tener ruedas omnidireccionales que le permite moverse en cualquier dirección, sus dimensiones son de 400 mm de longitud, 400 mm de ancho, 300 mm de alto y su peso es de 15 kg. Cuenta con un husillo que tiene un motor universal de 27.000 rpm. Su fuente de poder es compatible con 120/240 AC y su consumo total de energía es 1 kW. Este robot tiene un sistema de posicionamiento patentado que utiliza 2 sensores que se comunica a través de radiofrecuencia de 2.4 GHz que envía la señal cada 100 veces por segundo, haciendo que este robot tenga una precisión de 0.1 mm, estos sensores tienen un alcance máximo de 3 x 2.5 m. en la parte electrónica cuenta con un microcontrolador STM32 y tiene una conexión wifi b/g/n. Los desarrolladores de Goliath CNC se encuentran programando una aplicación web que se comunica con el usuario y el robot, el robot trabaja con formatos estándares de dibujo CAD (dwg, dxf, svg, ai), este software transforma estos archivos en código G (Moze, 2018).



Figura 5. Robot móvil Goliath CNC (Moze, 2018)

En este el presente trabajo de titulación se centra en diseñar y desarrollar un prototipo de robot móvil omnidireccional que permite dibujar figuras mediante código G, con la idea de realizar una máquina similar a las de un taladro

magnético. Que permite llevar la instrumento al trabajo, en lugar de trasladar la pieza que se necesita modificar, al área de trabajo de la herramienta. Implementando un programa capaz de convertir el dibujo deseado al código, para luego ser cargado y ejecutado.; teniendo como resultados una máquina robótica transportable que se adapte a las condiciones de los trabajos requeridos. Este robot será muy similar al robot anteriores con las características de Goliath CNC que tendrá una formación de 3 ruedas omnidireccionales, su herramienta será un marcador como Robotnačka y 3DOF, su peso debe ser oscilar entre los 2 Kg, la diferencia del robot en este proyecto variará por las dimensiones y el diseño del sistema de accionamiento de la herramienta totalmente diferente a los anteriores robots.

El objetivo general del presente proyecto es diseñar y construir un robot que dibuje trazos utilizando coordenadas para su desplazamiento en el plano XY, para lo cual se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar y construir el robot móvil.
- Determinar el modelo cinemático del robot móvil y sistema de control de movimiento.
- Implementar un interfaz humano máquina para la planificación de las trayectorias.
- Realizar pruebas de posicionamiento y de seguimiento de trayectorias.

El alcance del proyecto de titulación es desarrollar un robot móvil didáctico capaz de dibujar figuras básicas en una superficie horizontal seleccionando las siguientes dimensiones en una superficie horizontal de dimensiones 841 x 594 mm en vista que se adquirió un tablero con estas dimensiones; pero se puede trabajar en otras dimensiones, que a través de una interfaz permite él envió las coordenadas procesadas por software. El programa debe ser capaz interpretar el dibujo deseado en una matriz de coordenadas, para luego ser transmitidas al sistema y ejecutadas

2. METODOLOGÍA

En la etapa del diseño e implementación del robot móvil se aplicó la metodología del “Modelo en V” para el desarrollo de sistemas mecatrónicos, cubriendo los campos de diseño mecánico, diseño electrónico, diseño de control automático y las pruebas de funcionamiento y validación del sistema.

Esta metodología permitió establecer los requerimientos básicos para la construcción; se consideraron los siguientes requisitos: las dimensiones de la base, el peso, el tipo de ruedas, el sistema de movilidad para la herramienta, el tiempo de uso máximo; dando las características físicas del robot.

En el diseño específico se planteó elaborar los diferentes elementos que está compuesto esta máquina. En el sistema de control se seleccionó los motores y los microcontroladores; uno para el control de los motores y el segundo como una computadora embebida que se conectó de manera inalámbrica para que se use de manera externa. En el sistema eléctrico se dimensionó la alimentación DC para el tiempo de uso requerido. Y por último en el sistema mecánico se diseñó un modelo capaz de soportar los motores y los microcontroladores, además se seleccionó el material adecuado que soporte todos sus elementos.

Para la etapa de integración se unieron los sistemas; mecánico, electrónico y de control ya previamente analizados y diseñados. En esta fase se observó las incompatibilidades y errores entre los diseños de los diferentes sistemas y se realizaron correcciones y verificaciones durante el desarrollo del proyecto tomando en cuenta cada uno de los requerimientos y pasos del modelo en V.

La etapa de pruebas contó con la validación de software, hardware, modelo cinemático y sistema físico utilizando pruebas de posicionamiento y de seguimiento de trayectorias. Con todos los sistemas implementados se obtuvo un robot móvil capaz de dibujar en el plano cartesiano

2.1. DIAGRAMA DE REQUERIMIENTOS

Se consideraron los requerimientos tomando en cuenta lo siguiente:

- Las dimensiones serán de 120x200x200 mm ya que el robot requiere de una cómoda transportación.
- El robot móvil debe ser capaz de estar en funcionamiento durante el tiempo mínimo de 1 hora.
- Se debe conectar al robot de manera remota para evitar el uso de cables, además permitir la implementación de un software capaz de transformar el dibujo que se desea a código G.
- El robot únicamente trabajará en superficie horizontal y el área de trabajo no debe exceder de 841 x 594 mm (DIN A1).

A continuación, en la Figura 6, se presenta el diagrama de requerimientos del robot móvil planteados para el diseño y funcionamiento del sistema.

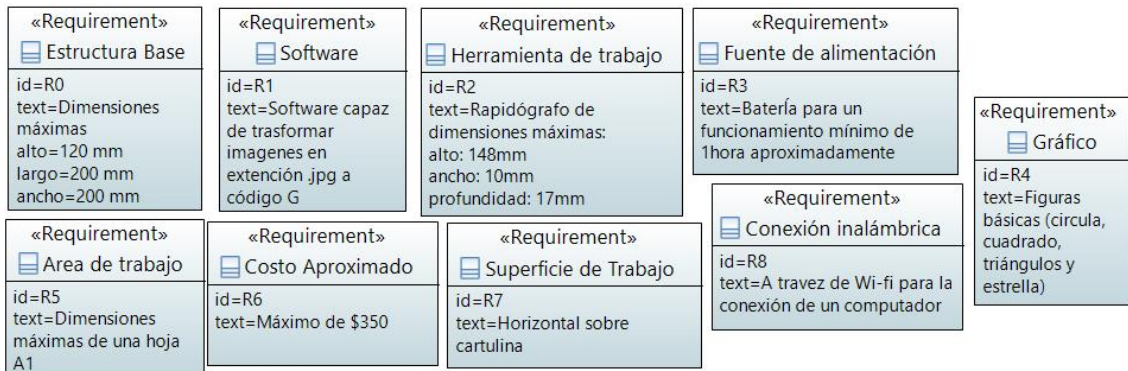
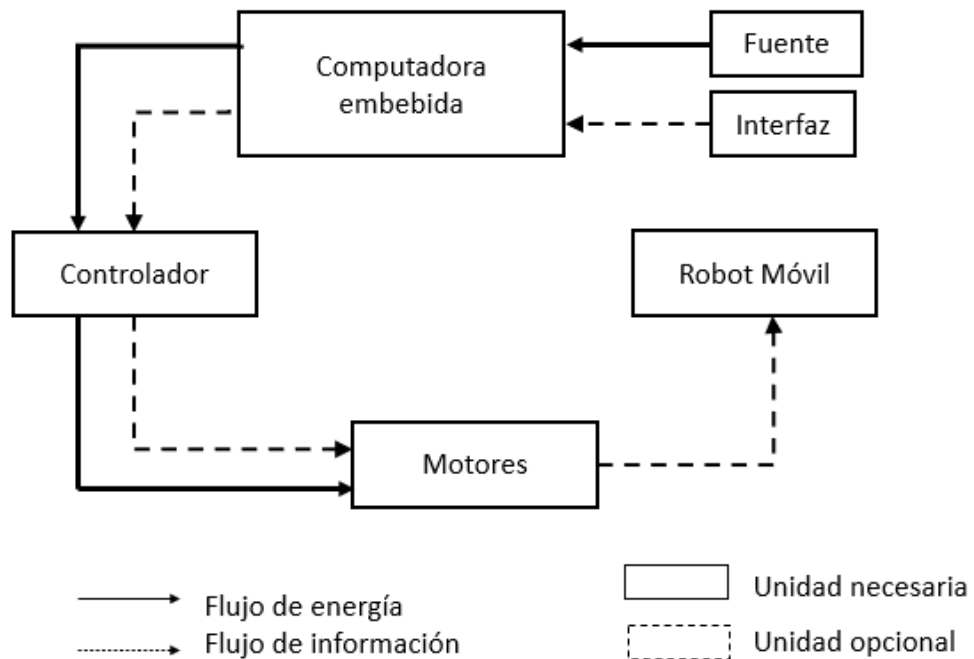


Figura 6. Diagrama de requerimientos para el diseño del robot móvil

Estos requerimientos se analizaron y tomaron en cuenta para el diseño físico del robot, tratando de hacer una herramienta intuitiva para el usuario y que sea fácil de transportar.

2.2. DISEÑO CONCEPTUAL



En la

Figura 7, se muestra el diagrama funcional del robot móvil, este diagrama permitió establecer las relaciones que existen entre los sistemas.

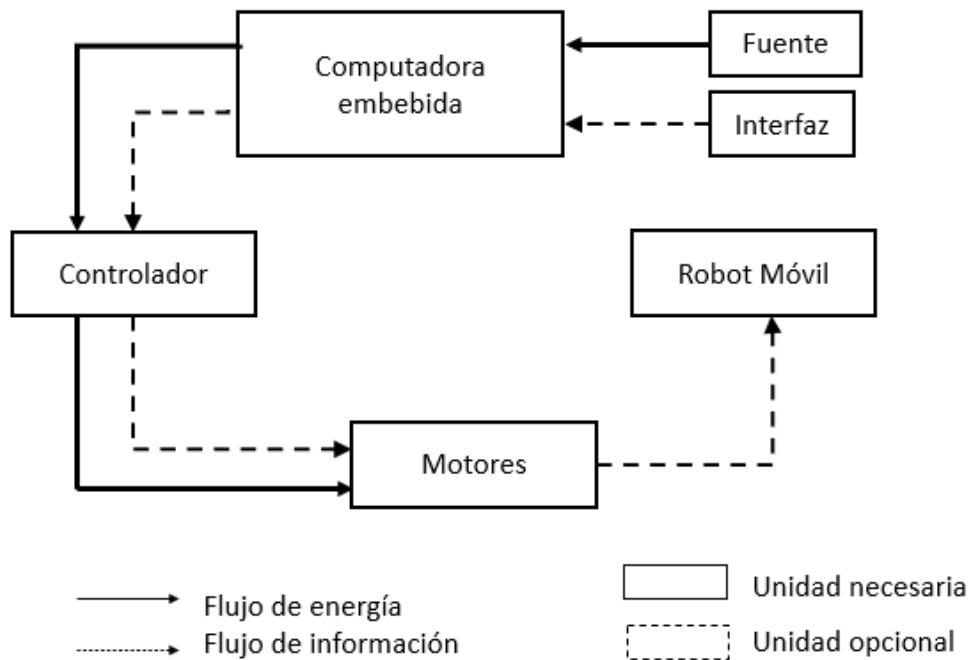


Figura 7. Diagrama funcional del robot móvil.

A continuación, se presenta la descripción de la cada uno de los elementos que se utilizaron:

- Fuente de alimentación: consta de fuente DC de 12voltios que alimenta a los motores, el microcontrolador y a la computadora embebida.
- Motores: se usó motores a pasos que están encargados del movimiento del robot.
- Controlador: está compuesto de un microcontrolador programado con un algoritmo donde se encarga del conteo de pasos.
- Computadora embebida: es un microcomputador que permitirá ingresar de forma remota a la interfaz y comunicarse con el controlador.
- Interfaz: es el software que ayudará a que el dibujo seleccionado se transforme en código G para graficarlo.
- Robot móvil: es el sistema que está conformado por una estructura base donde se sujetan los motores, el microcontrolador y la computadora embebida.

2.2.1. COMPONENTES DEL ROBOT MÓVIL

La Figura 8, describe las características generales y las relaciones existentes con el sistema del robot móvil.

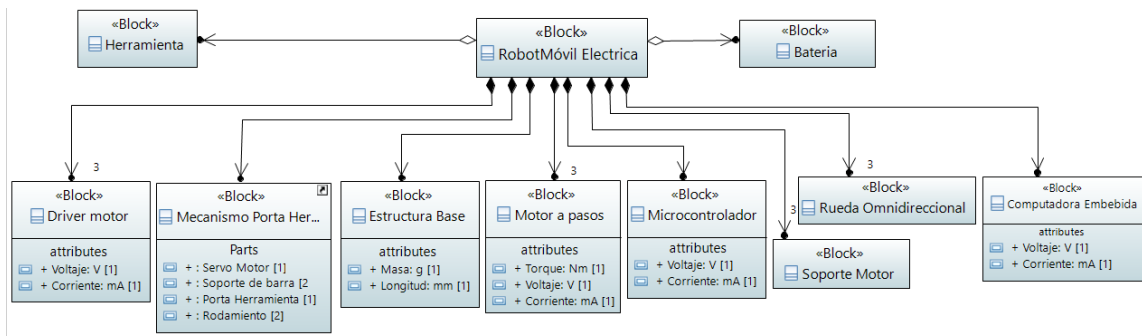


Figura 8. Estructura general del robot móvil

El robot se compone de una estructura base que soportó 3 motores a pasos. En un microcontrolador se encuentra conectado los drivers de cada motor, y en cada una de estos su respectiva rueda omnidireccional o rueda sueca, además tiene un mecanismo para el control del portaherramientas.

En la Figura 9, se muestra cómo está conformado el sistema del porta herramientas. Contiene dos ejes por donde se desplazan los rodamientos, los soportes de estas barras para que se sujeten a la estructura base y el porta herramientas donde irá colocado la herramienta de dibujo.

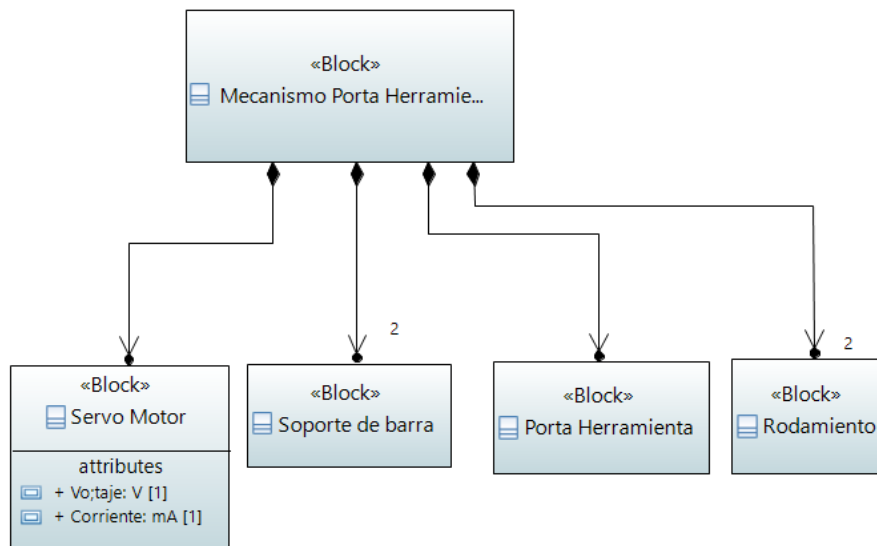


Figura 9. Mecanismo general del control del porta herramientas.

Ambas estructuras hacen posible el movimiento total del robot.

2.2.2. ENSAMBLE DEL ROBOT

En la Figura 10, se especifica la parte electrónica donde se puede observar los elementos requeridos, como la fuente de alimentación que se conectó con los microcontroladores. Para el primer microcontrolador se conectaron los drivers y a su vez fueron conectados los motores a pasos. Y en el segundo microcontrolador está el software.

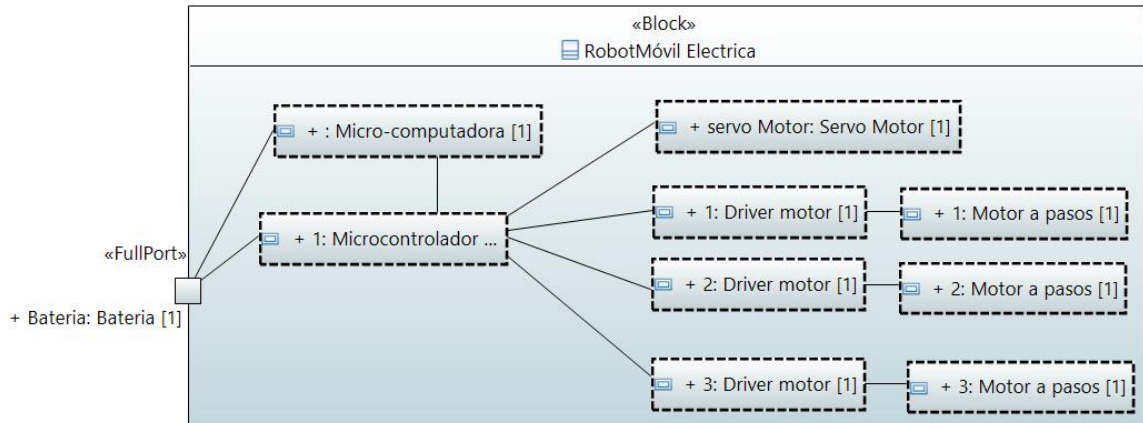


Figura 10. Ensamblaje de la parte electrónica del robot móvil

En la Figura 11, se presenta la parte mecánica la cual está conformada por la estructura, donde se colocaron los soportes para los motores junto con el porta herramientas. Una vez que se aseguraron los motores a pasos en los soportes se instalaron las ruedas omnidireccionales en los 3 motores.

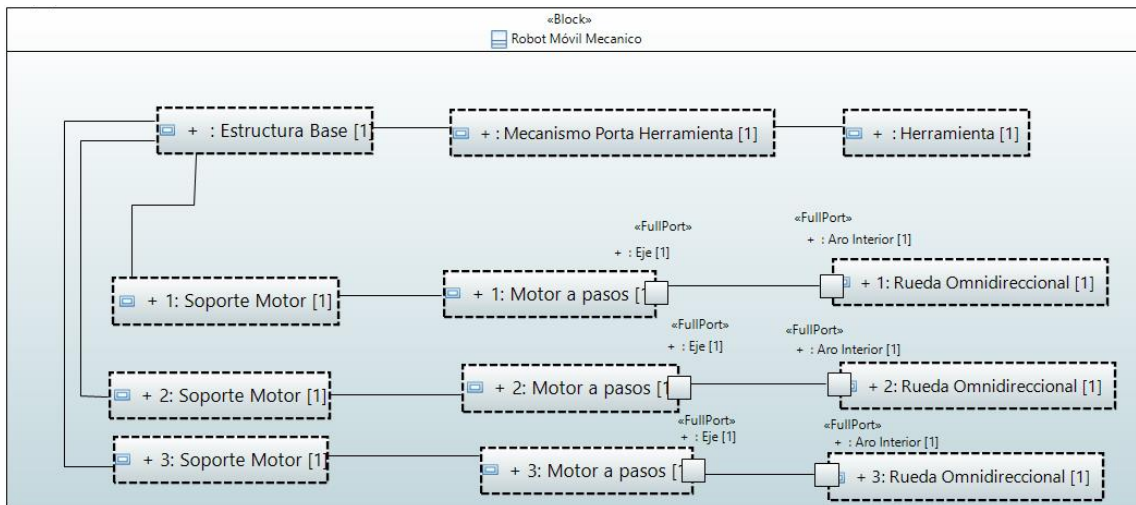


Figura 11. Ensamblaje de la parte mecánica

En ambas figuras se puede observar cuales son los elementos que interactúan entre sí, haciendo una guía para entender cómo ambos sistemas encajan.

2.2.3. CÁLCULO PARA LA SELECCIÓN DEL MOTOR A PASOS

El parámetro que se consideró para la selección fue el torque debido que los motores tiene que mover el peso de los componentes más el peso de sí mismos. A continuación, en la Figura 12 se observa la fórmula del torque utilizada.

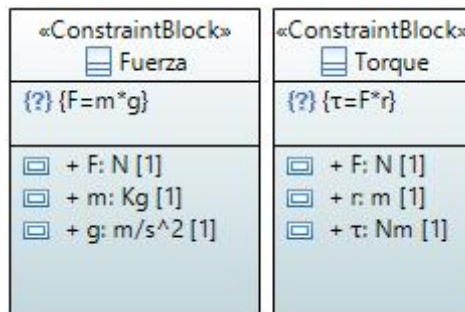


Figura 12. Fórmulas para el cálculo del torque del motor.

Para la fórmula del torque se necesitó de la fuerza total, esto se calculó haciendo la sumatoria de todas las masas de los componentes que están en la base y debe estar en newton, multiplicado por el radio de las llantas. En la Figura 13 se analiza el proceso del cálculo para la selección.

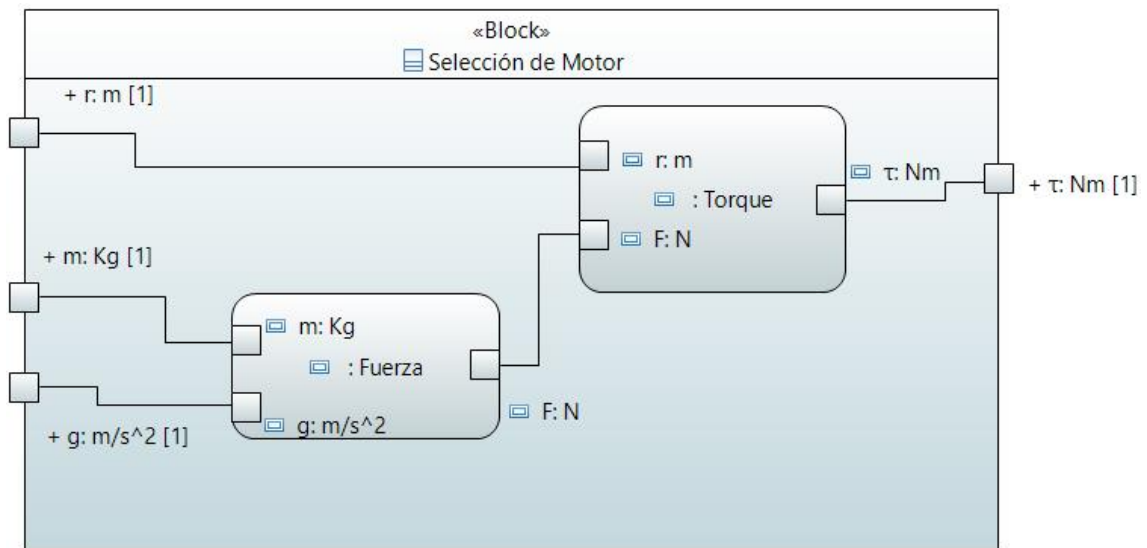


Figura 13. Diagrama paramétrico del cálculo del torque para la selección de motores

Debido a que el robot funciona con 3 motores es necesario tener en cuenta que la fuerza debe ser dividida para hacer el cálculo de un solo motor.

2.2.4. CÁLCULO PARA LA SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Se basó de acuerdo al peso que necesita para mover la herramienta y el espacio que ocuparía en la estructura base. Como es necesario economizar espacio los rodamientos no deben exceder de los 12 mm y el peso que necesitan mover será únicamente el del porta herramientas más el peso del marcador o lápiz por lo cual no es necesario un rodamiento capaz de resistir grandes cargas.

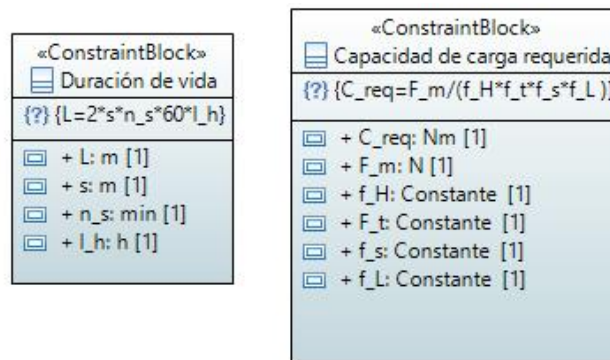


Figura 14. Fórmulas correspondientes para el cálculo de rodamiento

Estas dos fórmulas están relacionadas; primero se calculó la duración de la vida (L) con este dato en el diagrama de influencia de la duración obtenida del manual de Rexroth Bosch Group se obtuvo el valor del factor de duración (f_L) haciéndolo necesario para el cálculo de la capacidad de carga requerida (C_{req}). En la Figura 15 se puede observar todo el proceso que se realizó para la obtención del valor que ayudó a seleccionar el rodamiento.

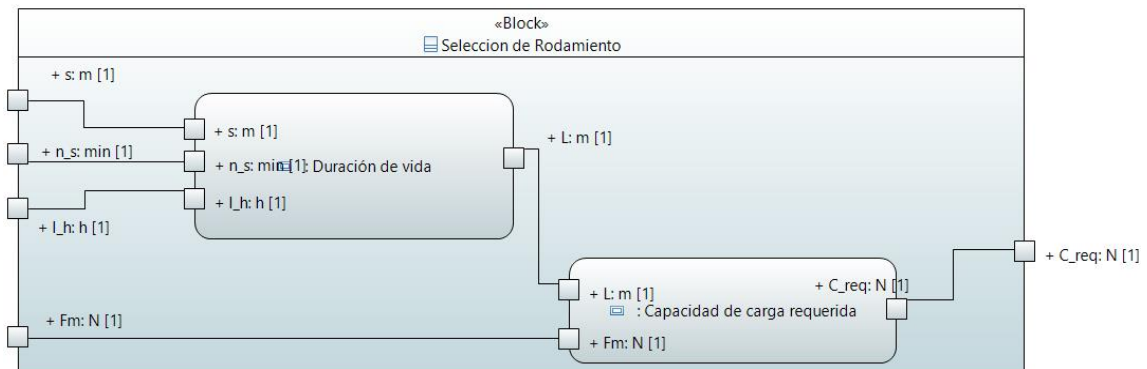


Figura 15. Diagrama paramétrico del cálculo para la selección de rodamiento

Para la fórmula de C_{req} se necesitó las constantes de factor de dureza (f_H) y factor de temperatura (f_t) obtenidas del diagrama de Factor de dureza y la constante f_s al ser carreras cortas las que se realizó esta se la obtuvo del diagrama de reducción de capacidad para obtener su valor.

2.3. FUNCIONALIDAD DEL ROBOT

En la Figura 16 se puede observar las interacciones que existe entre el usuario y el sistema. Se detalla las actividades que puede realizar el usuario al tener este robot móvil.

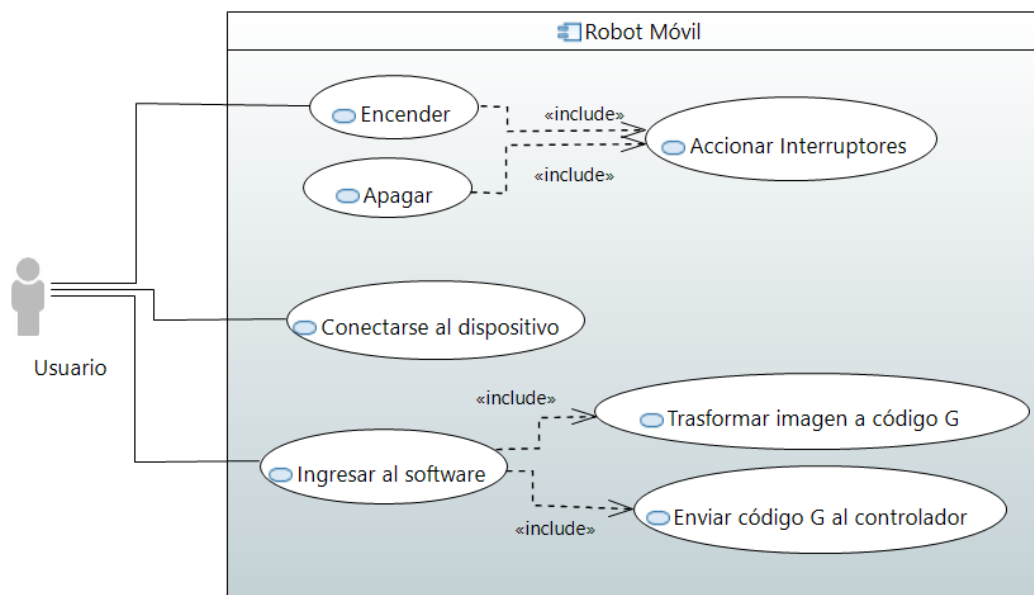


Figura 16. Diagrama de caso de uso de los usuarios.

Las tareas del usuario serán encender, una vez encendido deberán conectarse desde un computador o un celular vía Wi-fi al microcomputador que tendrá instalado el software que será capaz de transformar el dibujo que se desea en código G para que luego dicho código sea enviado al microcontrolador y este se encargue de realizar el funcionamiento de esos motores debidamente.

2.4. DISEÑO ESPECÍFICO

2.4.1. DISEÑO DE ESTRUCTURA

En la Figura 17 se puede observar las piezas que conforman el diseño mecánico. Está compuesto por 3 ruedas omnidireccionales, estructura base, 2 soportes de barras, 3 bases para los motores, 2 barras, 2 rodamientos, el porta herramientas y la pieza que conecta a la porta herramientas con el servomotor.

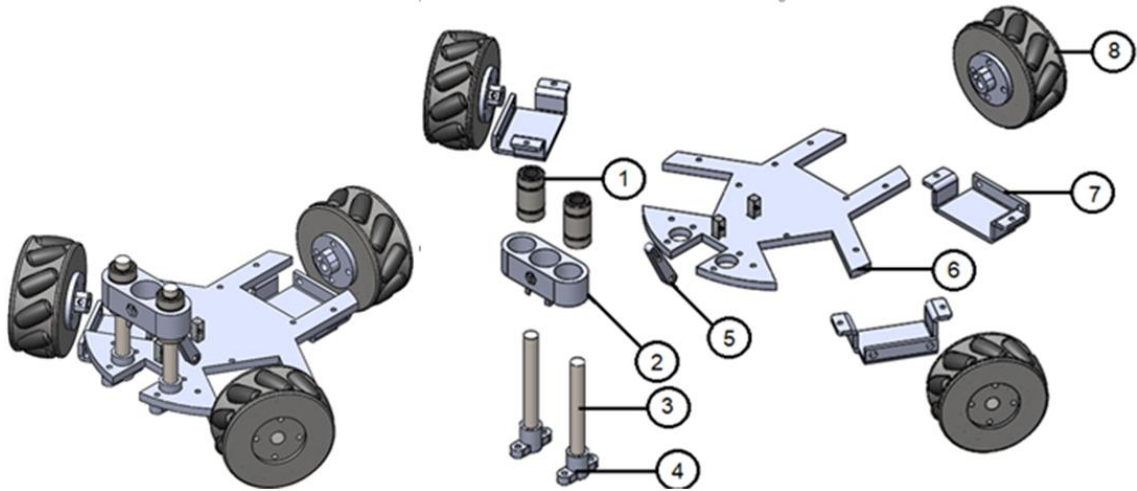


Figura 17. Vista isométrica y explosionada respectivamente del diseño mecánico

En la Tabla 1, se enlista las piezas que compone el diseño mecánico. Los números que se encuentran en paréntesis se refiera a la cantidad de elementos que se repite en el diseño.

Tabla 1.Componentes mecánicos

Ítem	Componente	Ítem	Componente
1	Rodamiento (2)	5	Pieza para servo
2	Porta herramienta	6	Estructura base
3	Barra (2)	7	Soporte de motor (3)
4	Soporte de barras (2)	8	Rueda omnidireccional (3)

2.4.1.1. Selección de materiales

Para la selección de los elementos que constituyen el robot se usó polímeros que cumplan con las siguientes características: deben ser de un abaja densidad y anticorrosivos.

Se buscaron las propiedades de los materiales acordes al robot.

Para la fabricación de la base del robot se seleccionó el acrílico debido a que su densidad de 1.20 g/cm³ y es lo suficientemente fuerte para sostener los componentes, además tiene un costo bajo y resistente a los agentes atmosféricos.

Debido a que el porta herramientas y los soportes de las guías fueron impresos en 3D se decidió elaborarlos con PLA ya que tiene un alto módulo de elasticidad

de 2346.5 MPa haciendo que las piezas fueran rígidas, resistentes a los impactos y tienen una densidad de 1.24 g/cm³, similar a la del acrílico.

2.4.2. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

La carga máxima que debe resistir los 2 rodamientos es de 0.49 N, con una trayectoria de 7.5 cm, la duración de vida mínima debe ser de 300h y la frecuencia de carrera es de 60, por lo tanto, la carga debe ser repartida para los 2 rodamientos se deduce una carga por rodamiento de:

$$F_m = \frac{0.5}{2} = 0.25 \text{ N} \quad (1)$$

Donde:

F_m : es la carga dinámica equivalente

La duración de vida del rodamiento se calcula de la siguiente manera.

$$L = 2 * s * n_s * 60 * l_h \quad (2)$$

Donde:

L: duración de vida (m)

l_h : duración de vida nominal (h)

s: longitud de carrera (m)

n_s : frecuencia de Carrera (min)

$$L = 2 * 0.075 * 60 * 90 * 300 = 2,43 \times 10^5 \text{ m}$$

Del diagrama de Factor de duración de vida (f_L) se deduce, para la duración de vida calculada de $L=2,43 \times 10^5 \text{ m}$., un factor de duración de vida de $f_L = 0.7$ (Rexroth, 2015).

Para una dureza de eje de HRC 60 como sus condiciones máximas, del Diagrama para factor de dureza f_H se deriva un factor de dureza de $f_H = 1$.

El factor de temperatura $f_t = 1$

El factor de carrera corta es $f_s = 1$ (Rexroth, 2015).

Con estos datos se obtiene la capacidad de carga requerida

$$C_{req} = \frac{F_m}{f_H * f_t * f_s * f_L} \quad (3)$$

$$C_{req} = \frac{0.25}{1 * 1 * 0.76 * 0.7} = 0.47 \text{ N}$$

El rodamiento seleccionado tiene las características señaladas en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones y características del rodamiento

Especificaciones	
Dimensiones	24mm de largo x 15 mm diámetro exterior x 8mm diámetro interior
Carga dinámica	260 N
Carga estática	400N

(Rexroth, 2015)

Como la carga es muy pequeña se utilizó un rodamiento de 8mm cuyas dimensiones ayudaron para que el mecanismo de sujeción de la herramienta no ocupará demasiado espacio en la base.

2.4.3. SELECCIÓN DE LLANTAS

El robot debe tener completa movilidad por el plano XY, las ruedas más óptimas fueron las ruedas omnidireccionales o también llamadas ruedas suecas como se puede analizar en la Figura 18, lo peculiar de estas ruedas es la incorporación de los rodillos que están orientados de tal manera que el avance sea en cualquier dirección. Se buscó en el mercado nacional dichas llantas teniendo como resultados dos ruedas, una con diámetro de 50 mm y otra de 30 mm haciendo que las ruedas fueran descartadas por su tamaño a causa de que las dimensiones promedio de un motor nema 17 son de 45 mm de lado.

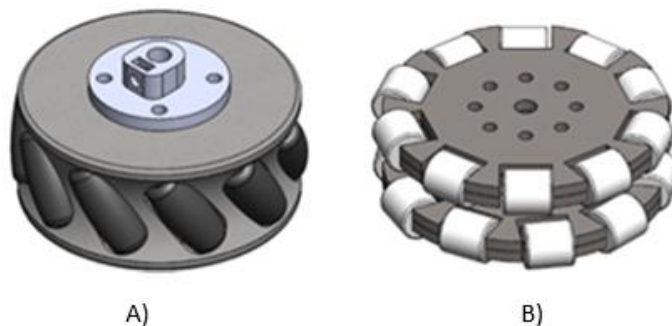


Figura 18. Rueda Omnidireccional también llamada rueda sueca. La opción A) es una rueda mecanum y la opción B) es una rueda omnidireccional doble

Como solución se decidió imprimir en 3D las llantas ahorrando el tiempo y costos. Las dimensiones y materiales utilizados fueron de 70 mm de diámetro para las

bases del aro exterior con PLA y los rodillos tiene una longitud de 30 mm con TPU.

2.4.4. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA BASE

Esta estructura se encargó de unir todas las piezas teniendo como resultado el sistema total. Sobre esta estructura se montaron los microcontroladores con la fuente de alimentación, los motores a pasos y el mecanismo del porta herramientas. En la Figura 19 se puede observar el diseño de la base que fue modelado en CAD.

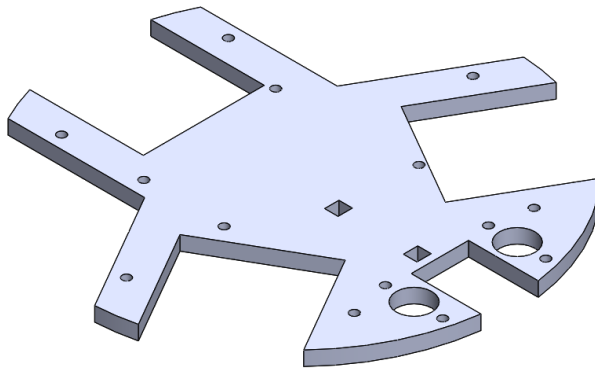


Figura 19. Modelo de la estructura base

Su diseño se basa en un círculo con un diámetro de 150 mm, donde se posicionó y recortó los espacios para los motores y el mecanismo del porta herramientas, además se realizaron los agujeros para sujetar los demás elementos y cortes en la superficie que no tenía utilidad.

2.4.5. DISEÑO DE LA BASE DE LOS MOTORES

En la Figura 20 se muestra los soportes que son los encargados de sostener los motores a pasos uniéndose fijamente a la estructura base.

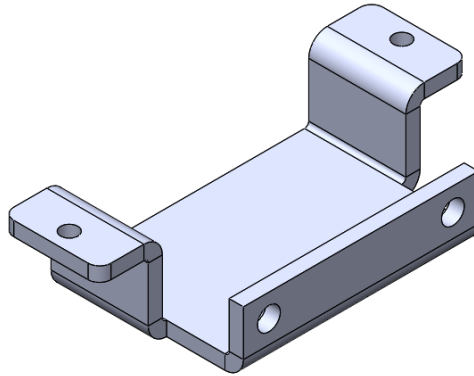


Figura 20. Diseño de los soportes de los motores a pasos

Las dimensiones de estos soportes se tomaron en cuenta según los motores que se utilizó. Su forma es cuadrada con una pequeña ceja con dos agujeros para unir esta pieza a la estructura base.

2.4.6. DISEÑO DEL PORTA HERRAMIENTAS

Se utilizaron rodamientos lineales para el desplazamiento del mismo. Este objeto fue el encargado de llevar el marcador que se desea utilizar. En la Figura 21 se puede observar el diseño de la pieza.

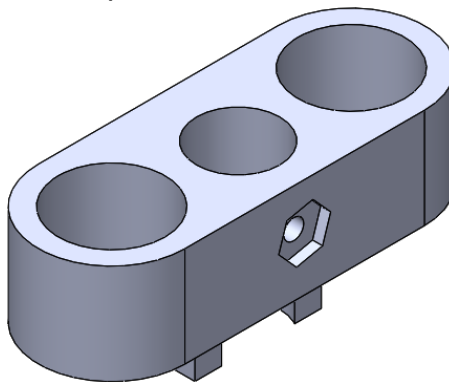


Figura 21. Diseño final del porta herramientas

Las dimensiones se realizaron de acuerdo a los rodamientos y un marcador de punta fina, este último no debe exceder de un diámetro de 12.5 mm.

2.4.7. DISEÑO DE LOS SOPORTE DE LAS GUÍAS

En la Figura 22 se puede observar el soporte de las guías. Para que el porta herramientas se desplace verticalmente es necesario un eje guía por lo que se necesitó un objeto que lo sujete. Esta pieza se realizó del mismo modo que la pieza anterior.

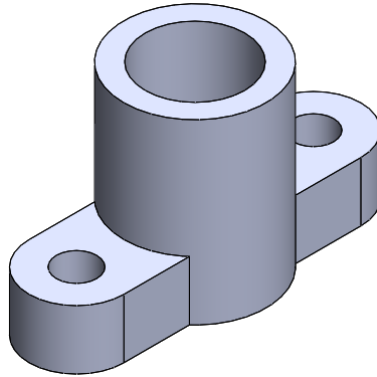


Figura 22. Diseño de los soportes para las guías

Se diseñó el soporte de acuerdo a las dimensiones de la barra para que sirva de eje. Tienen una forma cilíndrica y se hizo para que la barra entre a presión.

2.4.8. SELECCIÓN DE MOTORES

Como se estableció antes el motor debe ser capaz de mover toda la carga, por lo cual se seleccionó el peso máximo establecido en los requerimientos que fue de 19.6N. Ya que la carga se distribuye en 3 motores, cada motor mueve 6.5 N.

Ecuación de torque:

$$\tau = F * r \quad (4)$$

Donde:

F: La fuerza requerida para que el motor mueva el sistema

r: El radio de la llanta

Por lo tanto, el torque fue de:

$$\tau = 6.5 \text{ N} * 0.035\text{m} = 0.228 \text{ Nm}$$

Con este cálculo los factores que se tomaron en cuenta fueron:

- Costo
- Voltaje y amperaje utilizado
- Torque

En la Tabla 3, se encuentran las características del motor NEMA 17 seleccionado:

Tabla 3. Características básicas de los motores a pasos seleccionados

Especificaciones	
Tipo	NEMA 17 - Bipolar
Resistencia de fase	2.5 Ohm
Holding Torque	0.314 N.m
Grados por paso	1.8
Voltaje de referencia	4.59 V
Corriente	0,85 A/Fase

(SERVO, 2019)

El torque que proporciona el motor fue de 0.314 N.m, con esta fuerza se movió el peso total del robot.

2.4.9. SELECCIÓN DE MICROCONTROLADOR PARA LOS MOTORES

Se seleccionó un arduino ya que es una placa con controlador de bajo costo, tienen un entorno de programación intuitivo, su software es libre y es compatible con varios sistemas operativos. El arduino nano se caracteriza por tener un microcontrolador ATmega328P, voltaje de operación es de 5 V, 20 pines de entrada/salida; de los cuales 6 pines son de entrada analógica y 6 pines con PWM; la corriente por pin es de 40mA, la velocidad de reloj es de 16MHz y sus dimensiones con de 45 x 18 mm. Se optó por esta placa debido al voltaje de operación es bajo ayudando a que el consumo de corriente en la batería no aumente, tiene las suficientes entradas y salidas digitales para la conexión de los otros componentes electrónicos. Además, las dimensiones son esenciales porque uno de los requerimientos del robot es que sea compacto y este arduino es una placa pequeña. El costo es bajo en comparación del arduino uno o del mega.

2.4.10. SELECCIÓN DE DRIVERS PARA MOTORES

Los drivers ayudaron a controlar los pulsos. Para el criterio de selección de los drivers se consideró el consumo de corriente de los motores a pasos. Al tener un sistema de tres motores bipolares se necesita limitar la corriente; los DRV8825 tienen límite de corriente ajustable, protección contra sobrecorriente y sobretensión, y seis resoluciones de micropasos (hasta 1/32), además funciona de 8,2 hasta 45 V y puede entregar hasta aproximadamente 1,5 A por

fase sin disipador de calor o flujo de aire forzado. Se seleccionó el drivers DRV8825 que es compatible con los motores a pasos ya escogidos anteriormente, las especificaciones se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4. Características básicas de los drivers

Características	
Intensidad máxima	2.5A
Tensión máxima	45V
Micropasos	32

(Instruments, 2014)

Estos drivers ayudaron a separar la corriente que alimenta al Arduino, de la corriente que circula por las bobinas de los motores. Para hacer el uso correcto se necesitó calcular el voltaje de referencia necesaria para que los motores a pasos, esta fórmula se la obtuvo del datasheet.

$$I_{max} = \frac{V_{ref}}{(5 * R_{sensado})} \quad (5)$$

$$V_{ref} = I_{max} * (5 * R_{sens}) \quad (6)$$

$$V_{ref} = 1.7 * (5 * 0.1) = 0,85V$$

2.4.11. SELECCIÓN DE MICRO-COMPUTADOR PARA EL SOFTWARE

Se tomó en cuenta un dispositivo que maneje un sistema operativo libre por lo que se escogió una Raspberry Pi.

El Raspberry Pi 3 modelo B+ es una placa reducida desarrollada para dispositivos embebidos que permiten trabajar con sistemas operativos de código abierto, esta tarjeta lleva instaladas distribuciones basadas en Linux Debian y Raspbian Stretch. Tiene un puerto de comunicación Ethernet, 4 puertos de comunicación USB 2.0, cuenta con una conexión Wireless LAN y Bluetooth, un puerto de expansión micro SD para la carga el sistema operativo, además tiene un procesador quad-core-64bits de 1.4GHz con 1GB de RAM,

Con estas características la Raspberry se adecua como la computadora embebida de los requerimientos mencionados al inicio del sistema. Este microcomputador fue el encargado de conectarse con el controlador y de

contener el software que transformará el dibujo deseado en código G. Se escogió el modelo 3b+ porque tiene una conexión inalámbrica.

2.4.12. SELECCIÓN DE LA BATERÍA

Se selección de acuerdo al consumo de cada uno de los dispositivos que componen el sistema electrónico. En la Tabla 5 se detallan: la corriente de consumo, el voltaje y la potencia de cada uno de los elementos. Los dos estados representados son de reposo (R) y de funcionamiento (F).

Tabla 5. Voltajes, amperajes y potencias de los dispositivos.

Elementos	Voltaje(V)	Amperaje(mA)	Amperaje (A)	Potencia (W)	Estado
Arduino	5	47	0,047	0,235	R
		200	0.2	1	F
Raspberry	5	200	0,2	1	R
		330	0,33	1,65	F
Motores (3)	11	198,17	0.2	2,2	R
		567.58	0.57	18.81	F
Drivers (3)	5,25	1	0,001	0,02	F
Servo motor	5	330	0,33	1,65	R
		830	0,83	4,15	F

Por lo tanto, el consumo de potencia total fue de 30.715 W en un tiempo de 30 minutos, tomando en cuenta que el robot estuvo en funcionamiento continuo. Entonces se dimensionó la batería con los valores de 3000 mAh y con un voltaje de 11.1v.

$$P_{bateria} = V * I \quad (7)$$

$$P_{bateria} = 11,1 * 3 = 33,3 W$$

Para calcular el tiempo se divide entre la potencia de la batería y la potencia total.

$$T = \frac{P_{bateria}}{P_{total}} * 60 \quad (8)$$

$$T = \frac{33,3 W}{30.72 W} * 60min = 65.04 min$$

Con este resultado se observó que la batería con dichas dimensiones le dará un funcionamiento de 1 hora y 5 minutos al robot. Por lo cual se seleccionó una batería de litio con las características indicadas en la

Tabla 6.

Tabla 6. Características de la batería Lipo

Especificaciones	
Capacidad	3000mAh
Voltaje	3s/11.1 v
Velocidad de carga	2C(6.0A)
Watt horas	33.30 Wh
Dimensiones	101x34x25.5mm
Peso	181 g

(hexTronik, 2020)

2.4.13. IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ

En la implementación del interfaz se utilizaron dos programas. Uno es el encargado de pasar los dibujos a una extensión de Gcode y el segundo fue el encargado de hacer la comunicación entre la Raspberry y el arduino.

Para la conexión de la raspberry y el arduino se implementó el software Pronterface, que es un programa que ha sido utilizado en una amplia gama de impresoras 3D y máquinas CNC con líneas de comando en código G. Se seleccionó esta plataforma debido que es un sistema abierto gratuito, compatible con sistemas operativos Windows, OSX y Linux. La interfaz de este programa se observa en la Figura 23, tiene un panel de control en el lado izquierdo que permite controlar de forma interactiva, en el medio existe un visualizador donde se puede observar la posición archivo cargado con este cuadro se tiene un control de la trayectoria y en la derecha hay un cuadro de comandos donde se puede ver el estado de lo que realiza la máquina.

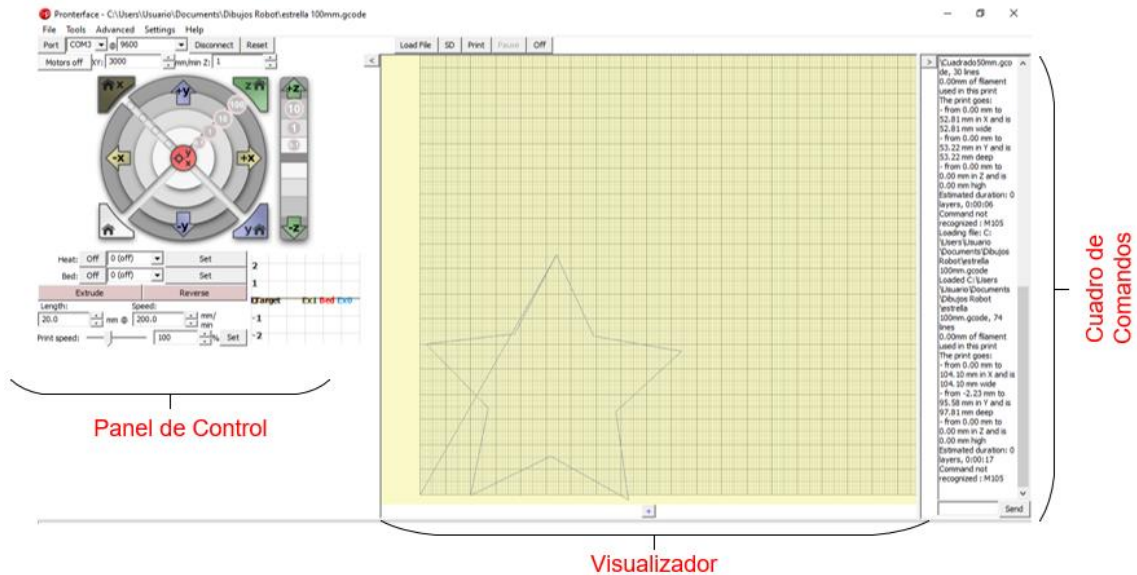


Figura 23. Interfaz del Software Pronteface

Este programa fue instalado sin inconvenientes en la Raspberry, desde la consola a través de los comandos:

- sudo apt-get update
- sudo apt-get install printrun

Para que el dibujo este en una extensión de Gcode se necesitó vectorizar la figura para esto se seleccionó e instaló el programa de Inkscape que es un software editor de gráficos vectoriales de código abierto, es compatible con varios sistemas operativos como GNU/Linux, Windows, Mac OS X, y otros sistemas derivados de Unix. Este programa es intuitivo, genera a partir de un diseño realizado un archivo con código G; entre sus funciones tienen: formas, texto, marcadores, una paleta de colores, transformaciones, gradientes, patrones, etc. En la Figura 24 se puede ver la interfaz

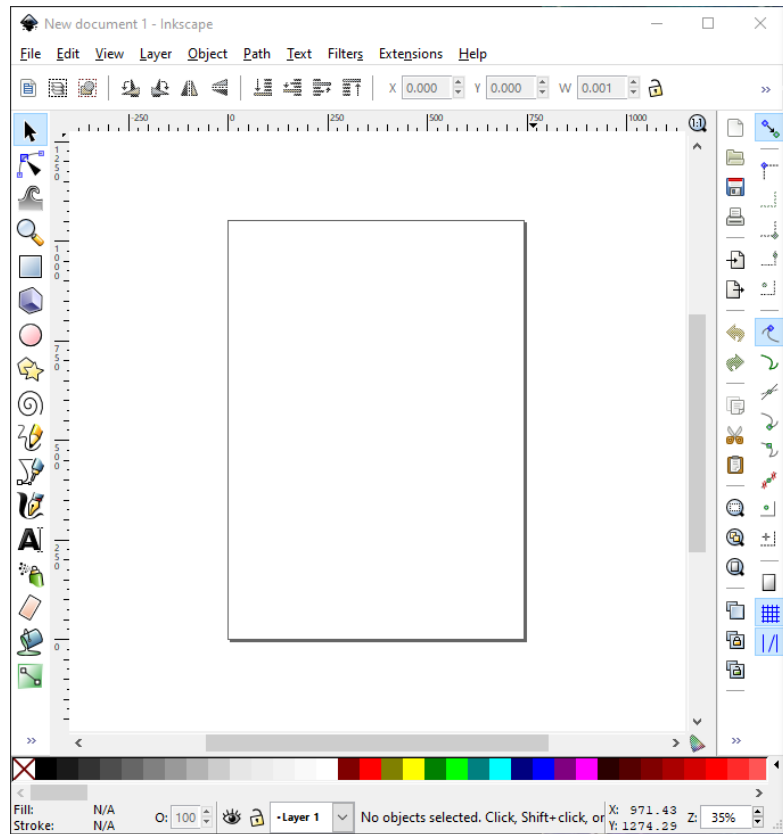


Figura 24. Interfaz de Inkscape

Para la instalación en la computadora embebida se la instaló por la consola de Debian con el comando:

- `sudo apt install inkscape`

2.4.14. DISEÑO DE CONTROL

Para el diseño del control se utilizó el programa arduino, esta plataforma facilitó el trabajo con el microcontrolador en este proyecto, su entorno de programación es simple y dado que es de código abierto y funcionan en varios sistemas operativos no hubo ningún problema ni costo extra en la instalación del software.

En la Figura 25 se puede observar la programación para el accionamiento de motores según el archivo cargado. El programa está diseñado para ir leyendo la línea y para detectar 2 casos.

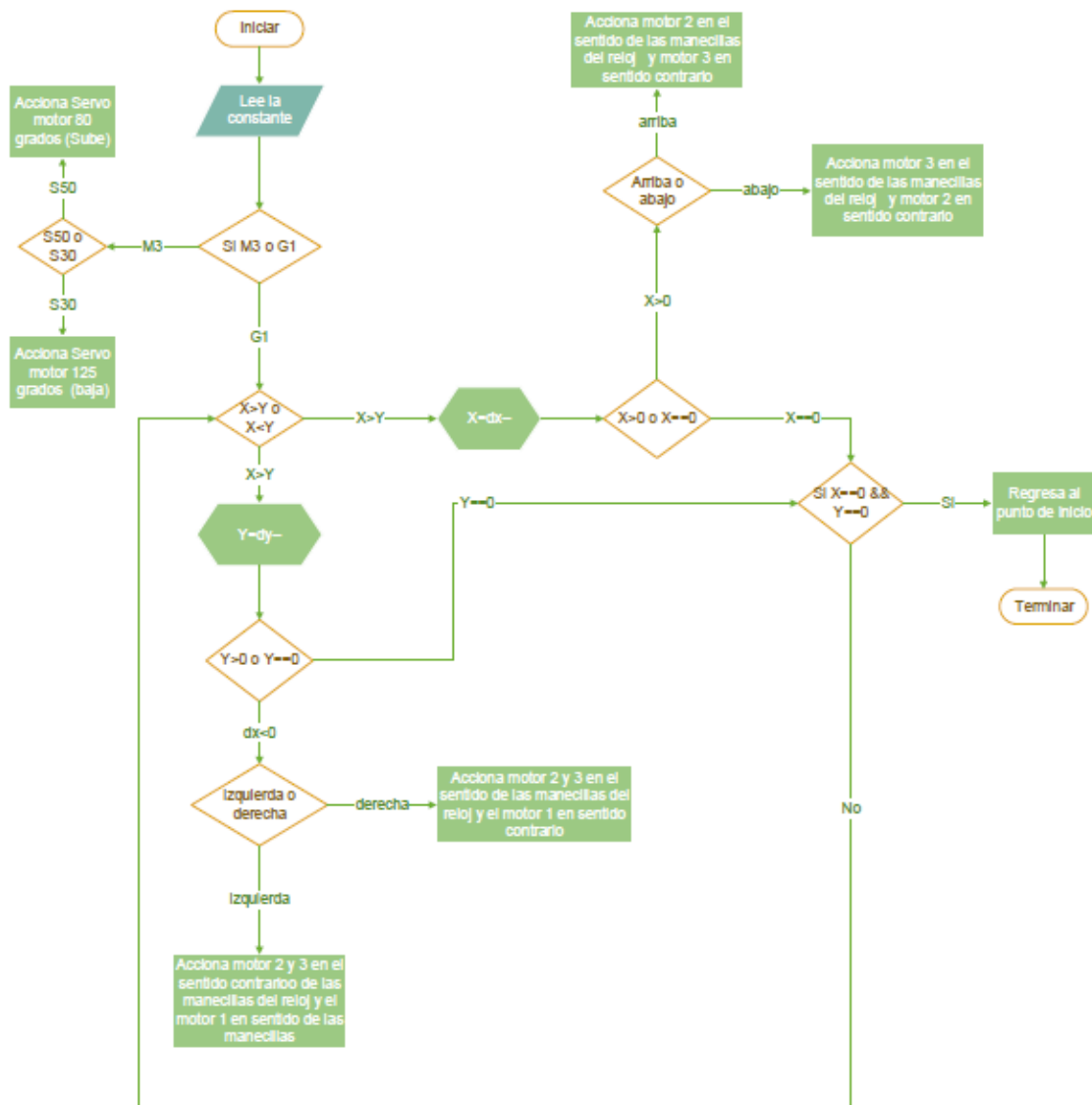


Figura 25. Diagrama de flujo de la programación

El primer caso es G1 que en lenguaje de código G es el movimiento lineal a una velocidad determinada. Cuando entra en este caso luego decide si es X o Y; después transforma la variable string a una variable float para generar el número de pasos y así acciona los motores para moverse en el plano XY.

Para el caso M3 que en lenguaje de código G es el uso del husillo en este robot es el accionamiento del servomotor que sube y baja el marcador; al igual que caso anterior cuando ingresa en M3 se decide si es S50 o S30, si reconoce que es S50 se acciona el servomotor hacia arriba y al contrario si es S30.

2.5. MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT

El robot fue diseñado con 3 llantas omnidireccionales que se ubican en un ángulo de 120° entre una y otra como se muestra en la Figura 26.

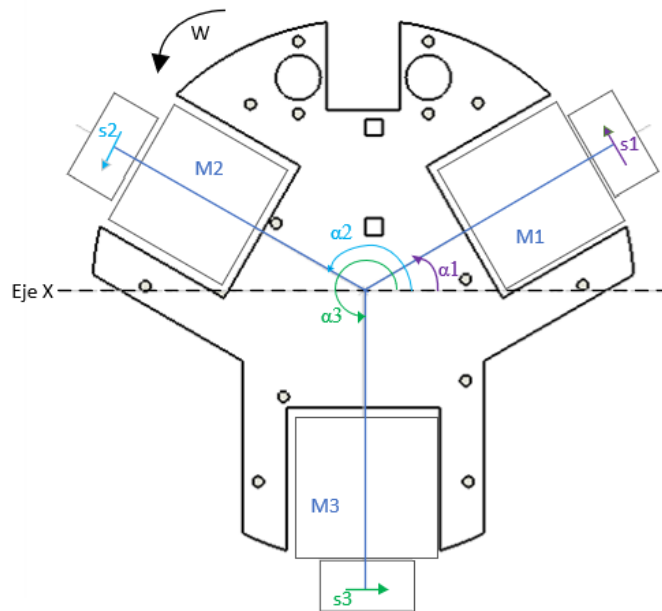


Figura 26. Geometría del robot omnidireccional

El eje de coordenadas del robot se encuentra en el centro y α es el ángulo que se encuentra el eje del motor con respecto al eje de coordenadas del robot

Por lo tanto, se obtuvo:

$$\alpha_1 = 30^\circ, \quad \alpha_2 = 150^\circ, \quad \alpha_3 = 270^\circ$$

Cada rueda tiene un componente en X y un componente en Y por lo cual se necesita resolver el vector asociado con 's' en componentes x e y en el marco de coordenadas del robot como se muestra en la Figura 27.

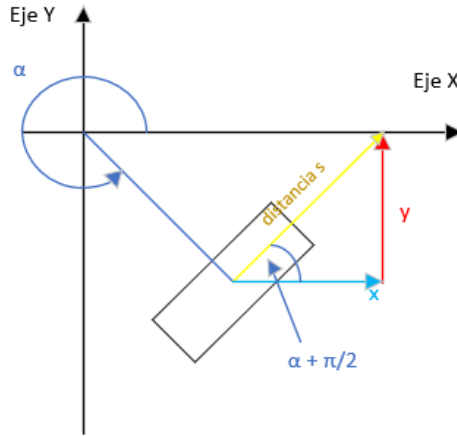


Figura 27. Componentes en XY del vector

Para expresar los componentes del vector se utilizó trigonometría obteniendo lo siguiente

$$x = \cos\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2}\right) \cdot s_1 + \cos\left(\alpha_2 + \frac{\pi}{2}\right) \cdot s_2 + \cos\left(\alpha_3 + \frac{\pi}{2}\right) \cdot s_3 \quad (9)$$

$$y = \sin\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2}\right) \cdot s_1 + \sin\left(\alpha_2 + \frac{\pi}{2}\right) \cdot s_2 + \sin\left(\alpha_3 + \frac{\pi}{2}\right) \cdot s_3 \quad (10)$$

El robot también contiene un componente rotacional ω , que será el giro en el eje z del marco de coordenadas del robot. para hallar este componente únicamente es la sumatoria de las velocidades de cada motor.

$$\omega = s_1 + s_2 + s_3 \quad (11)$$

Estas componentes [9],[10] y [11] se las escribió en una matriz, haciendo una ecuación matricial que relaciona todas las velocidades del motor con el movimiento resultante en x,y & ω .

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\alpha_2 + \frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\alpha_3 + \frac{\pi}{2}\right) \\ \sin\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2}\right) & \sin\left(\alpha_2 + \frac{\pi}{2}\right) & \sin\left(\alpha_3 + \frac{\pi}{2}\right) \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Pero esto únicamente indicó como se movería el robot, con la matriz inversa se calculó las velocidades de los motores

$$M^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -1 & \sqrt{3} & 1 \\ -1 & -\sqrt{3} & 1 \\ 2 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.33 & 0.58 & 0.33 \\ -0.33 & -0.58 & 0.33 \\ 0.67 & 0 & 0.33 \end{pmatrix}$$

El signo negativo indica si el motor debe girar en sentido contrario de las manecillas del reloj.

2.6. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA

La Figura 28 se observa el ensamblaje final, este se realizó con ayuda de un programa CAD para visualizar el resultado de la unión de todas las piezas.

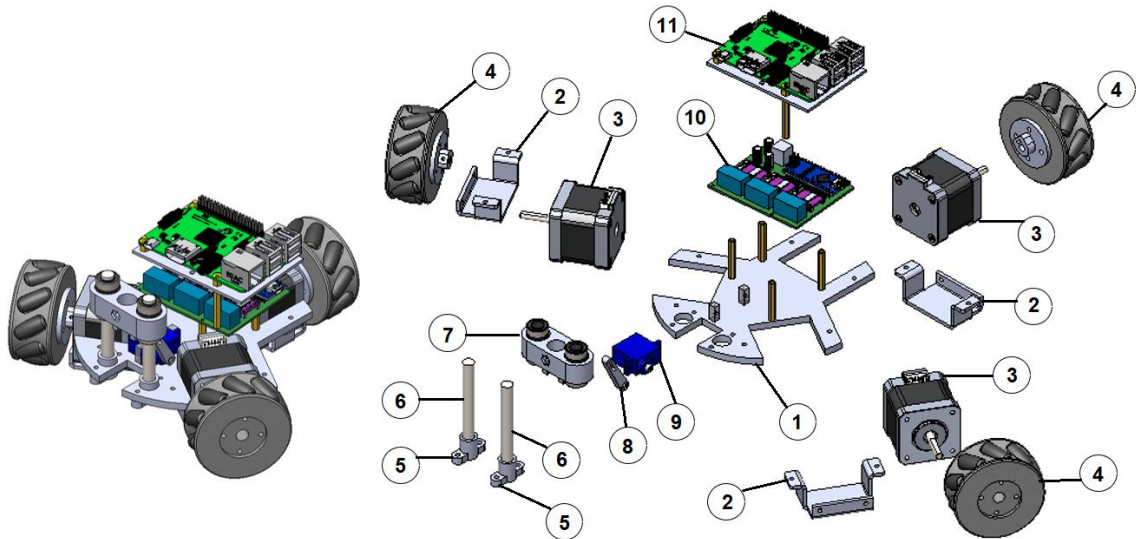


Figura 28. Vista isométrica y explosionada respectivamente del robot final

Para el ensamblaje del robot primero se montó los soportes de los motores junto con los soportes de las barras y el servomotor en la estructura base, se colocaron los motores asegurándose con tornillos, en el eje de los motores se situó las ruedas omnidireccionales dobles, y con ayuda de las bases hexagonales se colocaron el arduino y las raspberry dándoles espacio entre sí; estas hexagonales se apoyan sobre la estructura base y para finalizar se ubicó el porta herramientas en los ejes guías y con ayuda de un pasador se conectó el porta herramientas con la pieza del servomotor. A continuación, en la Tabla 7 se detalla los elementos que componen este sistema.

Tabla 7. Elementos del robot móvil

Ítem	Componente	Ítem	Componente
1	Estructura base	7	Porta herramientas
2	Soporte de motor (3)	8	Pieza del servo
3	Motor a pasos (3)	9	Servomotor
4	Ruedas omnidireccionales (3)	10	Placa de drivers y Arduino
5	Soporte de barra (2)	11	Raspberry
6	Barra o eje guía (2)		

Después de realizar el ensamblaje se realizó las conexiones de la parte electrónica para que se mueva en conjunto el robot. En esta etapa se colocaron los controladores para los motores conectando con cables al arduino, a los motores y al servomotor, el arduino se comunica mediante un cable USB tipo A/B al Raspberry Pi y para energizar todo esto se conectó una batería de 11.1v con un LM2596 para reducir el voltaje. Además, se colocaron dos interruptores uno para los motores y otro para la computadora embebida. En la Figura 29 se puede visualizar las respectivas conexiones.

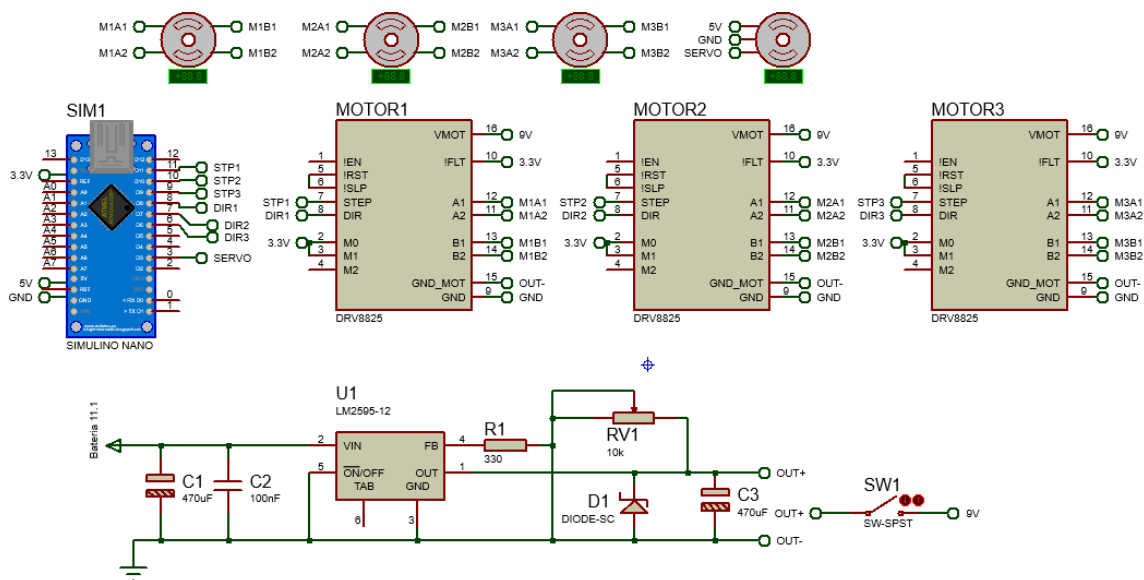


Figura 29. Conexiones de la sección electrónica

Para la computadora embebida primero se descargó el sistema operativo Debian que es propio de Raspberry, que se instaló con una microSD. Se realizaron las configuraciones correspondientes habilitando la aplicación de VNC y se instaló el software Inkscape junto con el programa PronterFace; en la Figura 30 se muestra como es el proceso para el funcionamiento del robot.

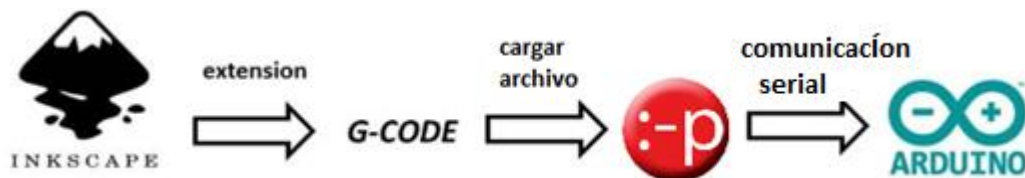


Figura 30. Proceso para ejecutar los motores

3.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la verificación de resultados del robot se realizaron pruebas de posicionamiento y de seguimiento, la cual consistió en colocar al robot en el mismo lugar de inicio sobre una hoja de papel milimetrado, se ejecutaron 6 trazos diferentes y de cada uno de estos se elaboró 3 pruebas tomando en cuenta como referencia el plano XY. Las primeras pruebas se trabajaron sobre las hojas de color tomate, las segundas sobre las de color verde y la tercera sobre el color azul. Asimismo, se hizo el cálculo del error absoluto y relativo en las longitudes y diámetros.

Se utilizó la fórmula 13 para el cálculo del error absoluto y la fórmula 14 para el cálculo del error relativo:

$$Ea = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{X} - X_i|}{n} \quad (13)$$

$$Er = \frac{Ea}{\bar{X}} * 100 \quad (14)$$

Para la prueba de funcionamiento del prototipo del robot se lo realizo con un arduino uno y los drivers ubicados sobre un protoboard como se observa en la Figura 31.

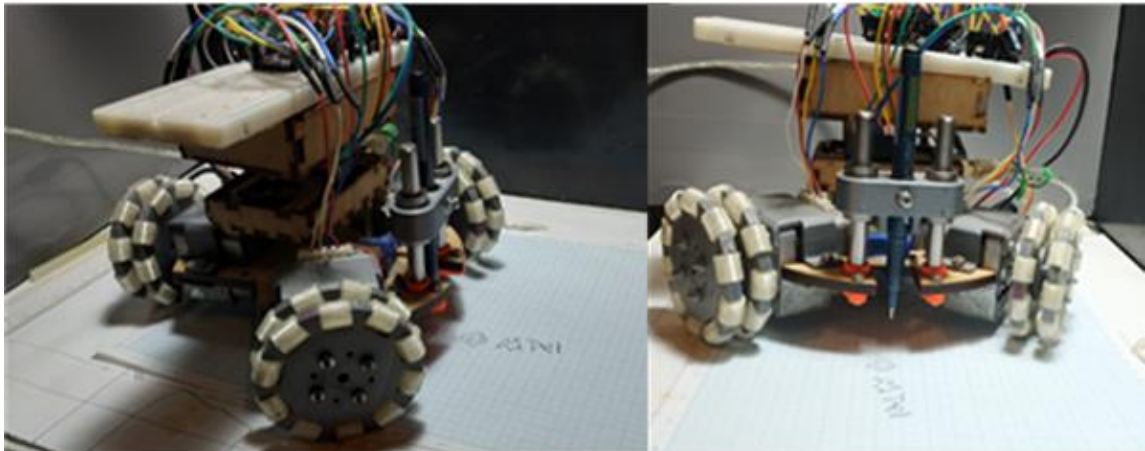


Figura 31. Prototipo del robot omnidireccional.

Se diseñó una placa para que el arduino nano, dimensionándolo de tal modo que sea compacta en la Figura 32 se puede observar la placa resultante.

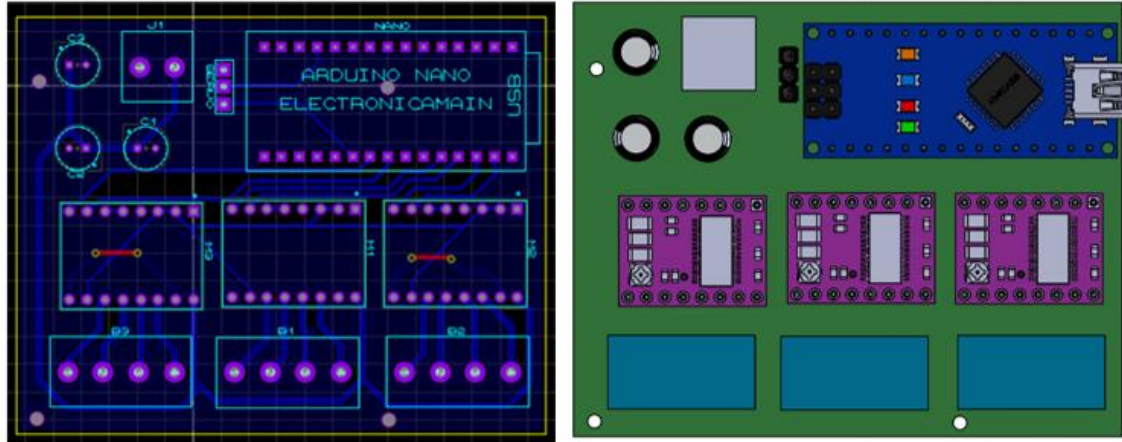


Figura 32. Diseño de la placa PCB y modelo 3D

En la parte izquierda se encuentra la placa PCB diseñada para el robot y en la parte derecha es la vista del modelo 3D de cómo se vería la placa.

Se imprimieron los 2 modelos de ruedas omnidireccionales que se muestran en la Figura 18. Primero se probó el modelo mecanum teniendo resultados negativos; al tener los rodillos diagonales las ruedas tienden a tener un lado favorecedor haciendo que el robot ladeara más a un lado, estas llantas tienen un mejor desempeño con una configuración de un chasis cuadrado con 4 ruedas como la opción A) de la Figura 33.

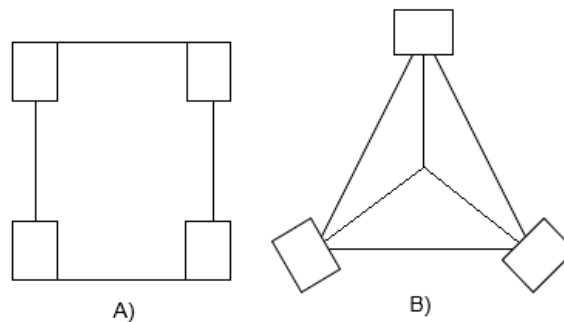


Figura 33. Configuración de las llantas

Se obtuvo mejores resultados con la segunda configuración; se ganó una mejor tracción en el pliego de cartulina y al estar en los bordes hicieron que se muevan completamente perpendiculares a la propia rueda y por ende al centro del robot como se muestra en la opción B) de la Figura 33.

En ambos modelos el TPU fue la mejor opción para imprimir los rodillos, pero de igual modo se observó que se perdían pasos debido a la falta de fricción.

3.1. COSTO DEL ROBOT

Para el costo total del robot se sumó el valor de cada elemento utilizado, el precio unitario de la materia prima está en la Tabla 8,

Tabla 8. Costo materia prima.

Elemento	Costo total (Dólares)
PLA	\$50.00
Raspberry	\$62.50
Motores a pasos	\$30.00
Drivers dvr8825	\$9.38
Tornillos y tuercas	\$6.00
Cables	\$4.72
Acrílico 5mm de ancho	\$5.70
Convertor DC/DC	\$4.80
Arduino	\$7.00
Batería lipo	\$32.10
Servo SG90	\$4.02
Switch	\$1.10
Condensadores	\$0.30
TOTAL	\$ 218.62

Este gasto total de la materia prima, más el monto de la mano de obra, más el margen de imprevistos se obtuvo la Tabla 9 reflejando el total final.

Tabla 9. Costo total del dispositivo

Costo (dólares)	
\$218.62	Costo materia prima
\$15.00	Costo Mano de obra
\$11.63	Imprevistos del 5%
\$48.85	Margen de utilidad del 20%
\$293.90	Costo total del dispositivo

Con estos cálculos realizados se confirma que el precio del robot no supera los 300\$, cumpliendo con los requerimientos solicitados.

3.2. USO DE LOS PROGRAMAS

Para pasar el dibujo deseado a código G hay que ejecutar el programa Inkscape, una vez abierto se debe insertar el dibujo en el cuadrante superior derecho; si es una figura generada desde el programa únicamente se debe guardar con la extensión de MakerBot Unicorn.gcode como se muestra en la Figura 34.

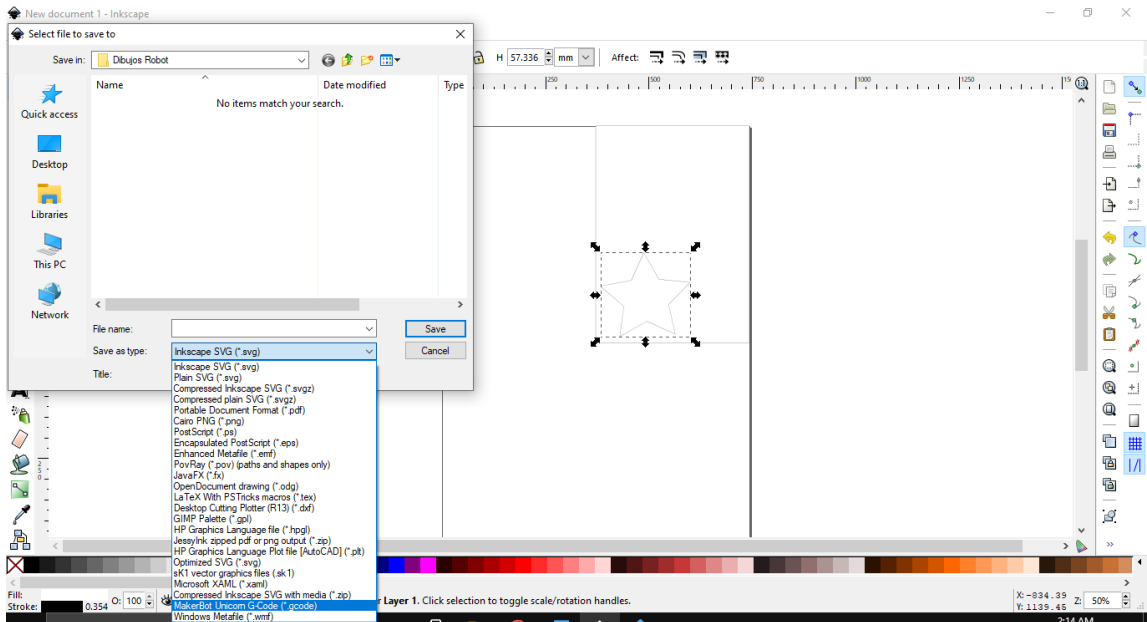


Figura 34. Programa Inkscape para generar código de una figura

Pero si el dibujo es un archivo .jpg se debe crear un objeto de trayectoria, luego un trazo de trayectoria y después guarda con la extensión ya dicha anteriormente como en la Figura 35.

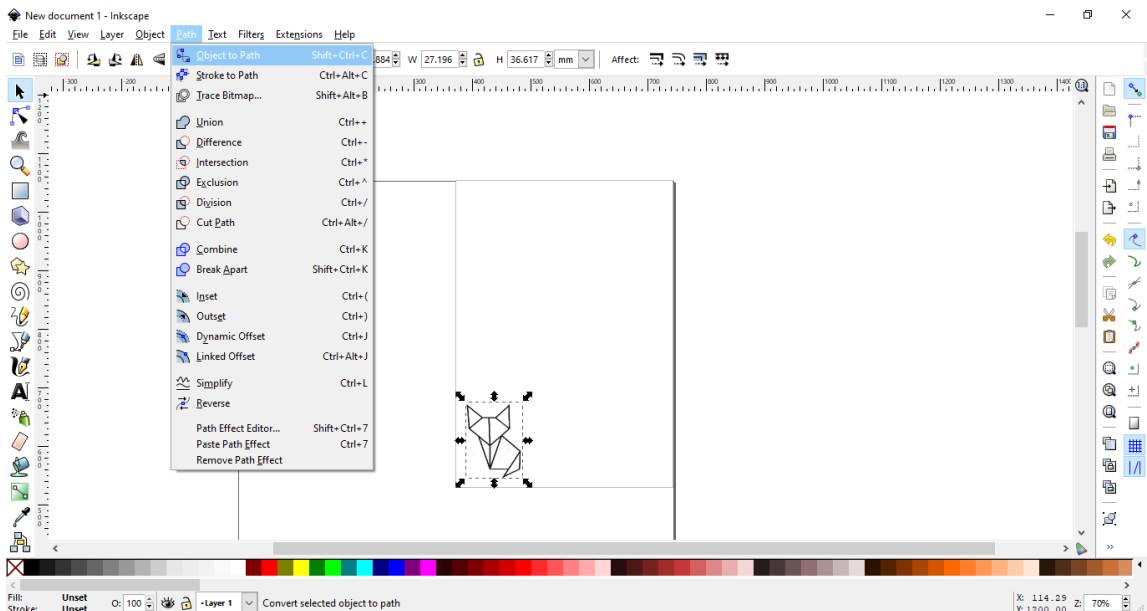


Figura 35. Inkscape para generar el código de una imagen

Para comunicar la Raspberry y el arduino se ejecuta el segundo programa PronterFace. Su interfaz tampoco es complicada como se observa en la Figura

36. Únicamente se da click en conectar y este se enlaza con Arduino, y después se carga archivo con el código previamente realizado en Inkscape y se ejecuta.

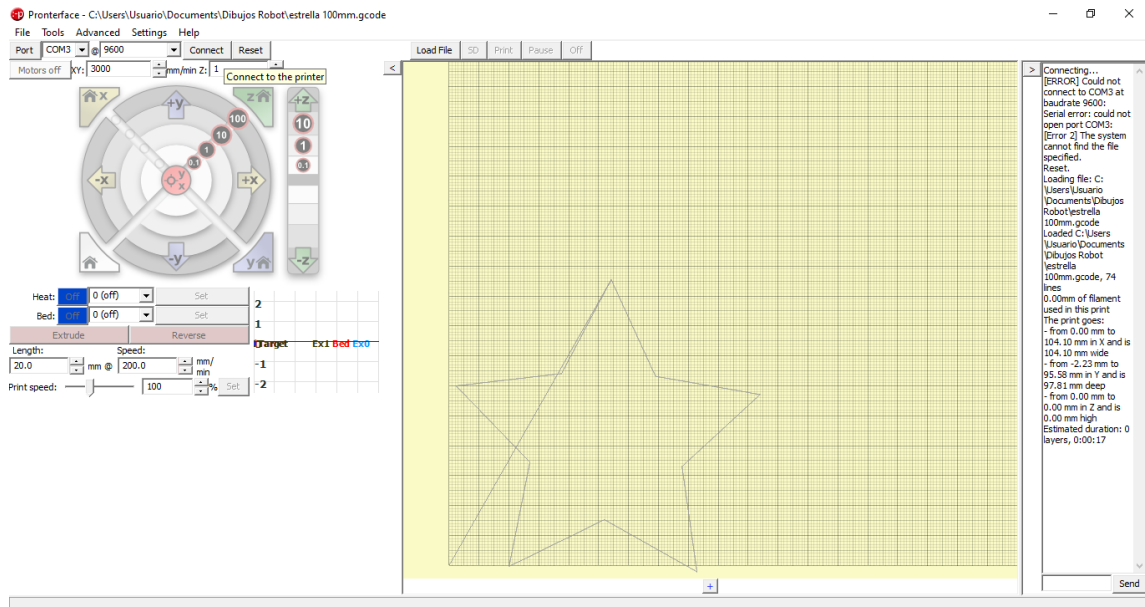


Figura 36. Funcionamiento del programa PronterFace

3.3. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Para el primer dibujo se efectuó una recta vertical de 100 mm, situando al robot con la llanta trasera paralela a la línea 2 en Y y el marcador señalando en sentido de la línea 12 en X. En la Figura 37 se puede observar los resultados obtenidos.

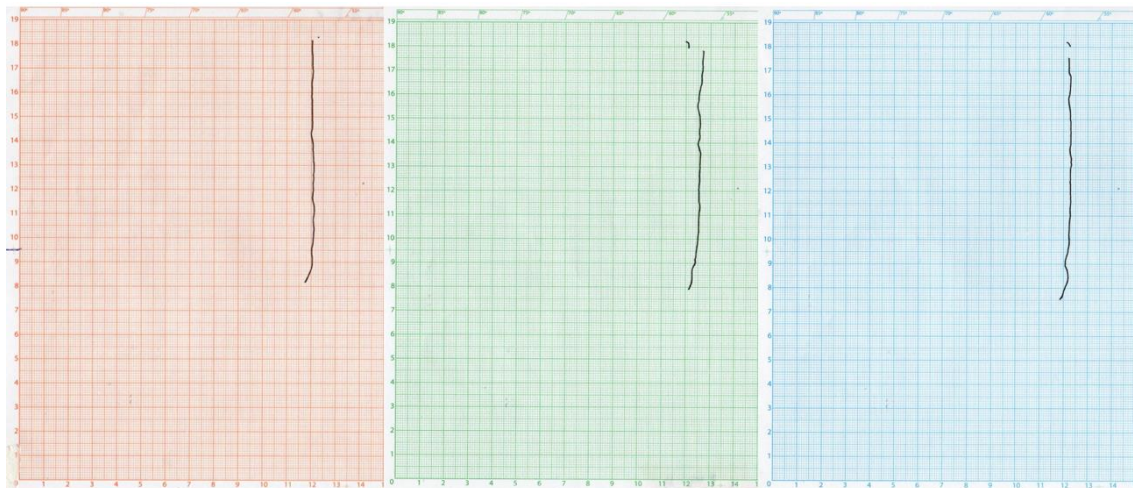


Figura 37. Prueba línea vertical

- En la primera prueba a simple vista se puede observar que la línea vertical dibujada está sobre la línea 12 en X y 18.2 en Y pero tuvo dos desvíos

pequeños; uno en el milímetro 41 con un desvío a lado derecho de 1mm y continúa así hasta el milímetro 87 y el siguiente desvío se encontró en el milímetro 96 con un 26° de inclinación al lado izquierdo hasta el final de la línea.

- En la segunda prueba existió una desviación más visible, la línea trazada inicia en sobre en 12.7 en X y 17.7 en Y, tiene un desvío de 2mm al lado izquierdo a partir del milímetro 9 este tramo se mantiene hasta el milímetro 81 a partir de aquí el desvío aumento hasta llega 12.1 en X.
- En la tercera prueba el rasgo empieza en 12.2 en X y 17.5 en Y, se mantuvo así hasta el milímetro 5 y se desvío 1mm a la derecha todo este tramo se mantuvo hasta el milímetro 80, desde aquí tiene un desvío de 4mm a la derecha hasta acabar.
- La exactitud de las líneas verticales es buena debido al posicionamiento del punto inicial de las 3 pruebas, se puede ver que solo existe milímetros de diferencia en el plano X.

En la Tabla 10 se encuentran los errores absoluto y relativo calculado en la longitud fue los siguientes

Tabla 10. Errores individuales de la línea vertical

Longitud (l_i)	$Ea = \bar{l} - l_i$	$Er = \frac{Ea}{\bar{X}} * 100$
100 mm	-0.33mm	0.33%
99 mm	0.67 mm	0.67%
100 mm	-0.33mm	0.33%

$$\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} = \frac{299}{3} = 99.67 \text{ mm}$$

$$Ea = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{l} - l_i|}{n} = \frac{1.33}{3} = 0.44 \text{ mm}$$

$$Er = \frac{Ea}{\bar{X}} * 100 = \frac{0.44}{99.67} * 100 = 0.44\%$$

La precisión del dibujo sería de $100 \pm 0.44 \text{ mm}$ con un error de 0.44%.

Para el segundo dibujo se realizó una línea horizontal de 100 mm como se muestra teniendo las líneas que se muestran en la Figura 38. Para este trazo se ubicó la llanta trasera en la línea 2 Y y el marcado apuntando en la línea 20 X.

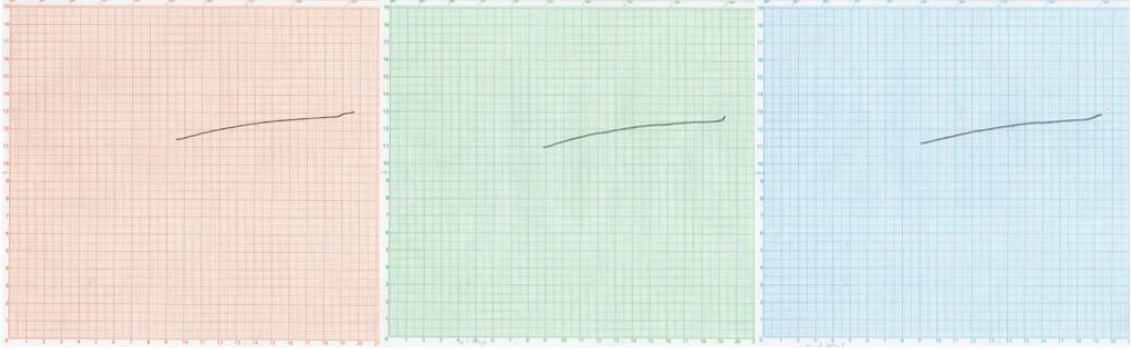


Figura 38. Prueba línea horizontal

- A simple vista se observa que en las 3 pruebas hechas los gráficos obtenidos no son una línea recta. En la primera prueba el dibujo empieza (19.7X;13.1Y) y termina en (9.5X;11.4Y) por lo tanto, existe un desvío de 10.2mm en X y otro de 2.3mm en el plano Y. En la segunda prueba el trazo empieza en (19.3X;12.8Y) y concluye en el punto (8.8X;11Y) se puede decir que el desvió es (10.5mm;1.8mm). Y para la última prueba la línea empieza en (19.4X;12.9Y) y se inclina hasta el punto (9x;11.2Y) teniendo una variante de 10mm en X y 1.7mm en Y.
- Esta línea tiene una buena exactitud debido a que los puntos iniciales y finales son muy semejante en las tres pruebas.

En la Tabla 11 se calcularon los errores de la longitud que fueron:

Tabla 11. Errores individuales de la línea horizontal

Longitud (l_i)	$Ea = \bar{l} - l_i$	$Er = \frac{Ea}{\bar{X}} * 100$
103 mm	1.66mm	1.6%
106 mm	-1.34mm	1.3%
105 mm	-0.34mm	0.3%

$$\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} = \frac{314}{3} = 104.66 \text{ mm}$$

$$Ea = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{l} - l_i|}{n} = \frac{3.34}{3} = 1.11 \text{ mm}$$

$$Er = \frac{Ea}{\bar{X}} * 100 = \frac{1.11}{104.66} * 100 = 1.06\%$$

El error absoluto es 1.11mm por lo que la precisión de la línea horizontal es de $100 \pm 1.11 \text{ mm}$ con un error de 1.06%.

Para el tercero se dibujó una figura, se ejecutó un cuadrado de 50mm de lado, se posicionó la llanta trasera del robot sobre la línea 0 en Y en paralelo y el

marcador rotulando a la línea 20 en X. En la Figura 39 se encuentran los resultados.

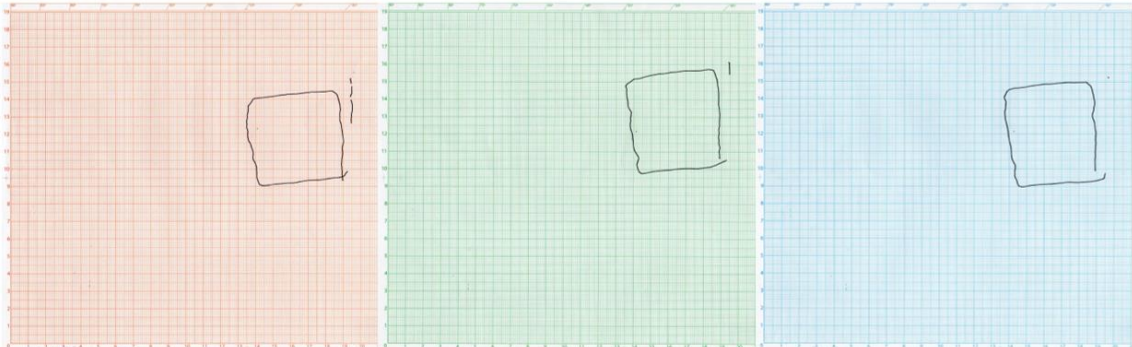


Figura 39. Prueba figura cuadrada

- Debido a que las líneas horizontales no son líneas rectas se nota claramente que el cuadrado se encuentra inclinado. En la prueba uno el robot inicia la línea en el punto (19 ; 9.4) y no termina en el mismo punto; el trazo concluyó en el punto (19.3 ; 9.9) por lo cual el posicionamiento varía por 3mm en el plano X y 4mm en el plano Y. En la segunda prueba se inició en (18.9 ; 10.6) y terminó en (19.3 ; 10.5), esta prueba el cuadrado no logra cerrar por 4mm de diferencia. En la última prueba al igual que la segunda el cuadro no logra cerrar su figura por 6mm debido a que comienza en el punto (18.9 ; 9.9) y finaliza en (19.5 ; 9.7).
- Todo esto se debe a los errores calculados en las líneas verticales y horizontales.

Para el tercero se trazó un círculo de 80mm de diámetro colocando el marcador señalando a la línea 20 en X y la llanta trasera en paralelo a la línea 0 en X, en la Figura 40 se encuentran los dibujos obtenidos.

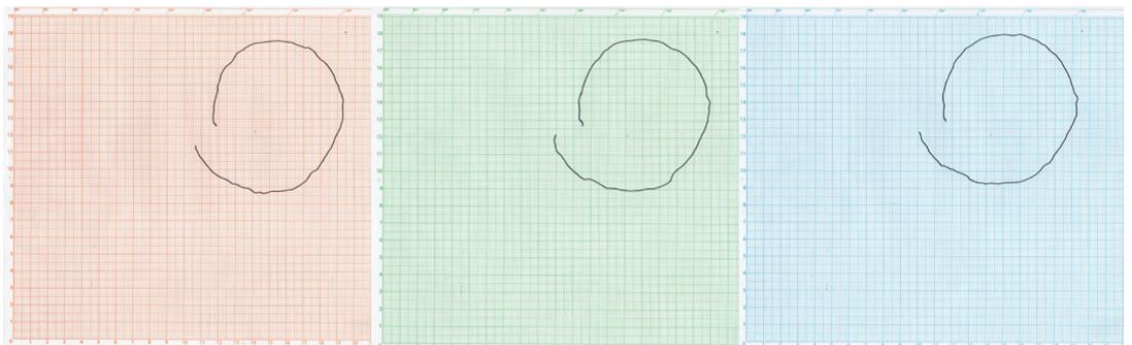


Figura 40. Prueba figura circular

- En las 3 pruebas se ve que la ninguna se cierra por completo la figura, debido al posicionamiento de las llantas y al error existente en la línea horizontal. En la prueba uno el robot empezó dibujando en el punto (11.9 ; 12.6) y finaliza en el punto (10.6 ; 11.4). En la segunda prueba el trazo empieza en (11.5 ; 12.7) y termina en (10 ; 12.2). Y en la tercera prueba los puntos de partida y final son (11.6; 12.9) y (10.1 ; 12.3) respectivamente.
- Al igual que las pruebas de las líneas verticales y horizontales, se puede resaltar que la exactitud también es buena en cuanto al seguimiento.

Para el cálculo de los errores se tomaron en cuenta las medidas de 2 diámetros de uno seleccionado desde el punto inicial y el segundo intersectando el centro del primer diámetro de las 3 pruebas, los errores calculados se encuentran en Tabla 12.

Tabla 12. Errores individuales de los diámetros

Diámetro (di)	$Ea = \bar{d} - di$	$Er = \frac{Ea}{\bar{X}} * 100$
73 mm	7.33 mm	9.1%
89 mm	-8.67 mm	10.7%
72 mm	8.33 mm	10.3%
87 mm	-6.67 mm	8.3%
75 mm	5.33 mm	6.6%
86 mm	-5.67 mm	7.1%

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} = \frac{482}{6} = 80.33 \text{ mm}$$

$$Ea = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{d} - d_i|}{n} = \frac{42}{6} = 7 \text{ mm}$$

$$Er = \frac{Ea}{\bar{X}} * 100 = \frac{7}{80.33} * 100 = 8.71\%$$

Con estos cálculos la precisión de la del diámetro es de $80 \pm 7 \text{ mm}$ con un error de 8.71%.

Para este dibujo se realizó un triángulo, sus lados miden 80 mm, se colocó al robot con la llanta trasera paralela a la línea 2 en Y y el marcador señalando en la línea 20 en X. En la Figura 41 se puede observar los 3 resultados.

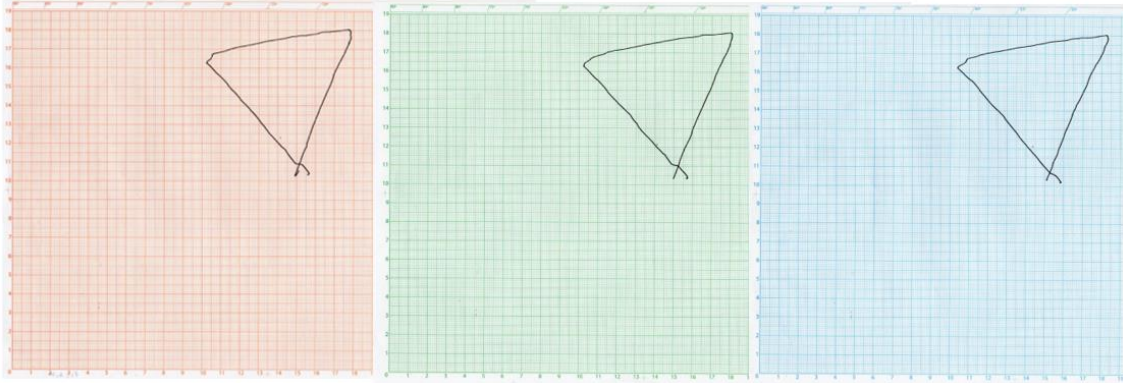


Figura 41. Prueba figura triangular

- En las 3 pruebas las figuras logran cerrar, pero en este caso no terminan en el mismo punto, esto debido al posicionamiento de las llantas. En la prueba uno el dibujo empezó en el punto (15.6 ; 10.4) y finaliza en el punto (14.9 ; 10.2). En la segunda prueba el trazo empieza en (15.7 ; 10.3) y termina en (15 ; 10.3). Y en la tercera prueba los puntos de partida y final son (15.9; 10.2) y (15.1 ; 10.3) respectivamente.
- En la prueba uno y tres la punta izquierda del triángulo no se formó bien esto es debido a que hubo pérdida de pasos en ese momento.
- La exactitud también es buena en cuanto al seguimiento al igual que las otras pruebas anteriores.

El cálculo de los errores se tomó midiendo los 3 lados que conforman las 3 pruebas, las 3 primeras muestras es de la prueba uno, las 3 siguientes son de la prueba dos y las 3 últimas son de la prueba 3, los errores calculados se encuentran en Tabla 13.

Tabla 13. Errores individuales de los lados del triangulo

Diámetro (d_i)	$Ea = \bar{d} - d_i$	$Er = \frac{Ea}{\bar{X}} * 100$
80 mm	0.44 mm	0.5 %
72 mm	8.44 mm	10.49%
83 mm	-2.56 mm	3.2%
80 mm	0.44 mm	0.5 %
80 mm	0.44 mm	0.5 %
83 mm	-2.56 mm	3.2%
82 mm	-1.56 mm	1.9%
81 mm	-0.56 mm	0.7%
83 mm	-2.56 mm	3.2%

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} = \frac{724}{9} = 80.44 \text{ mm}$$

$$Ea = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{d} - d_i|}{n} = \frac{19.56}{9} = 2.17mm$$

$$Er = \frac{Ea}{\bar{X}} * 100 = \frac{2.17}{80.44} * 100 = 2.7\%$$

Con estos cálculos la precisión de la los lados es de $80 \pm 2.17 mm$ con un error de 2.7%.

Para la última figura, se dibujó una estrella cada lado de la estrella es de 35mm, el posicionamiento de la llanta trasera del robot estuvo sobre la línea 2 en Y en paralelo y el marcador rotulando a la línea 15 en X. En la Figura 42 se encuentran los resultados.

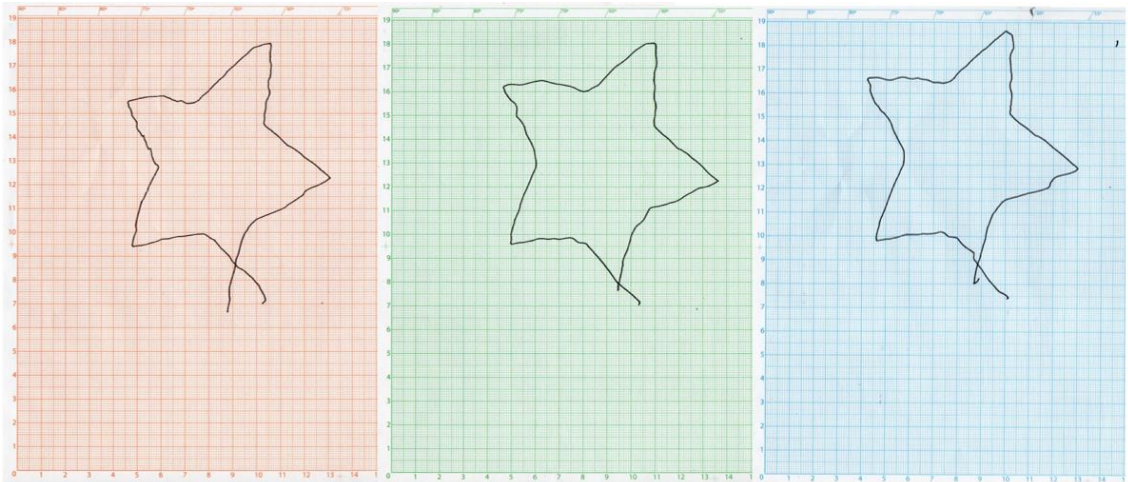


Figura 42. Prueba figura estrella

- Debido a que las líneas horizontales tienen desvíos notorios, la estrella también tiene inclinaciones, al igual que el triángulo la figura se cerró, pero no en el mismo punto. En la prueba uno la figura inició en el punto (10.2 ; 7); el trazo concluyó en el punto (8.8 ; 6.7) por lo cual el posicionamiento varía por 1.4mm en el plano X y 3mm en el plano Y. En la segunda prueba se inició en el punto de coordenadas (10.3 ; 7) y terminó en (9.4 ; 7.7). En la última prueba los puntos de inicio de la figura fueron (10.1 ; 7.4) y el punto final (9.7 ; 8), al igual que en el triángulo en esta última prueba hubo pérdida de pasos en la esquina derecha del dibujo.

El cálculo de los errores se tomó midiendo los lados de la figura, las 10 primeras muestras es de la prueba uno, las 10 siguientes son de la prueba dos y las 10 últimas son de la prueba 3, los errores calculados se encuentran en Tabla 14.

Tabla 14. Errores individuales de los lados de la estrella

Diámetro (d_i)	$Ea = \bar{d} - d_i$	$Er = \frac{Ea}{\bar{X}} * 100$
38 mm	-3.3 mm	9.51 %
30 mm	4.7 mm	13.5%
35 mm	-0.3 mm	0.86%
29 mm	5.7 mm	16.4 %
27 mm	7.7 mm	22.2%
39 mm	-4.3 mm	12.4%
35 mm	-4.3 mm	0.86%
35 mm	-0.3 mm	0.86%
35 mm	-0.3 mm	0.86%
35 mm	-0.3 mm	0.86%
40 mm	-5.3 mm	15.3%
35 mm	-0.3 mm	0.86%
28 mm	6.7 mm	3.74%
35 mm	-0.3 mm	0.86%
35 mm	-0.3 mm	0.86%
33 mm	1.7 mm	19.3%
36 mm	-1.3 mm	3.74%
35 mm	-0.3 mm	0.86%
36 mm	-1.3 mm	3.74%
31 mm	3.7 mm	10.7%
32 mm	2.7 mm	7.78%
39 mm	-4.3 mm	12.4%
27 mm	7.7 mm	22.2%
37 mm	-2.3 mm	6.63%
36 mm	-1.3 mm	3.74%
37 mm	-2.3 mm	6.63%
39 mm	-4.3 mm	12.4%
35 mm	-0.3mm	0.86%
37 mm	-2.3 mm	6.63%
37 mm	-2.3 mm	6.63%
34 mm	0.7 mm	2.02%

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} = \frac{1041}{30} = 34.7 \text{ mm}$$

$$Ea = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{d} - d_i|}{n} = \frac{82.6}{30} = 2.75 \text{ mm}$$

$$Er = \frac{Ea}{\bar{X}} * 100 = \frac{2.75}{34.7} * 100 = 7.93\%$$

Con estos cálculos la precisión de la los lados de la estrella es de $35 \pm 2.17 \text{ mm}$ con un error de 2.75%.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Al diseñar un robot con una configuración de 3 ruedas y con las dimensiones requeridas la ventaja fue que permitió mayor libertad de movimiento, pero se tuvo un error del 1.06% que fue el error más alto en la precisión de las rectas; este error se debió al a este posicionamiento. Otro de los inconvenientes fue que la programación se la hizo sin una retroalimentación haciendo que no se pueda corregir el desvío que se produce en su totalidad.
- Se seleccionó ruedas omnidireccionales ya que tienen rodillos que permiten que su movimiento sea perpendicular y esto ayuda a que no haya restricción en el robot, esto quiere decir que tuvo movilidad libre sobre el plano XY. Cabe recalcar que se limitó el área de trabajo debido a que estas llantas tenían mayor o menor tracción en diferentes superficies, seleccionando las dimensiones A1 como área de trabajo.
- Se seleccionó la opción b) que son ruedas omnidireccionales dobles dándole mayor estabilidad y aumentando el contacto de los rodillos con la superficie.
- Si bien el TPU es un material flexible que ayudó y favoreció para la construcción de las llantas hay que analizar que debido a las configuraciones hechas antes de imprimir los rodillos y teniendo en cuenta que la impresión 3D es un proceso aditivo que se montan por capas el resultado de los rodillos tuvo desperfectos y no se obtuvo homogeneidad en su estructura, esto tuvo como consecuencia que estos no tuvieron una buena tracción ocasionando que los motores tuvieran pérdida de pasos.
- Con la cinemática se logró observar el movimiento y las trayectorias del robot móvil que debe tener en la superficie horizontal. Para que se desplace de forma vertical la rueda W1 no gira, W2 y W3 giran en sentidos opuestos. Mientras que para el movimiento horizontal las ruedas W2,W3 giran en el mismo sentido y W1 en el sentido contrario de las dos y con mayor velocidad.
- Cabe resaltar que a lo largo del desarrollo del proyecto se han realizado innumerables análisis, estudios comparativos y de prueba en cuanto a la programación lo que ha permitido que se realicen las figuras básicas.
- La Raspberry es considerada una computadora de bajo costo y del tamaño de una tarjeta de crédito. En este trabajo de investigación se utilizó como una computadora embebida, que se la configuro para tener acceso a su escritorio remotamente, haciendo que su uso sea atreves desde cualquier dispositivo con acceso a la aplicación VNC. Esto ayudo a que el usuario no se restringiera únicamente al computador.
- Se seleccionó estos dos softwares para el código g debido a que son de libre acceso sin costo y su instalación puede ser en sistemas operativos de Linux

por lo que es compatible con Debian .El uso de estos programas es intuitivo y se puede encontrar tutoriales en caso de no entender su uso.

- Comparando las 3 pruebas en cada uno de los 6 dibujos hechos, se refleja la exactitud en los dibujos debido a que los puntos iniciales y finales son muy semejantes, pero debido a la desviación en la línea horizontal la precisión del dibujo es inexacta teniendo errores altos, y estos se ven evidenciados en las pruebas.

RECOMENDACIONES

- Para que el movimiento del robot sea más preciso se puede implementar un giroscopio o encoder para realizar medidas mientras el robot se mueve e ir ajustando el movimiento de los motores, mejorando así la calidad del dibujo.
- Para mejorar el movimiento del robot se recomienda utilizar otro tipo de material para las llantas que proporcione una mejor tracción en diferentes superficies, con esto se elimina la limitación de la superficie en la cual el robot puede dibujar.
- Para futuros trabajos, el mecanismo del porta herramientas se puede modificar para acoplar un cortador laser o un dremel para usarlo como una maquina cnc de corte o grabado.
- Se podría minimizar el tamaño del robot si se utilizan motores más pequeños para utilizar llantas omnidireccionales de 6mm existentes en el mercado.
- Para minimizar costos en vez de un Raspberry se podría utilizar un módulo bluetooth para enviar el código G al Arduino, pero esto se podría hacer únicamente a través de un computador.

BIBLIOGRAFÍA

- A Simple Introduction to Omni Roller Robots. (2015). 1-11.
- Balogh, R. (2006). Robotnačka – The Drawing Robot. *Acta Mechanica Slovaca*, 121-126.
- Bonilla V. , V. (2018). Modelado y simulación del Robot Mitsubishi RV-2JA controlado mediante señales electromiográficas. *Enfoque UTE*, 208-222.
- Castro Blacio , C. B., Mosquera Canchingre , G. A., & Bonilla Venegas , F. V. (2017). Diseño y Simulación de un Robot Sembrador de Maíz por Surcos. *INCISCOS 2017*. Quito.
- Chamba, J., Sánchez, M., Moya, M., Noroña, J., & Franco, R. (2019). Simulación de movimiento de un robot hexápodo. *Enfoque UTE*, 173-184.
- Correa, J. C. (2017). Aproximaciones al futuro de la robótica en Colombia. *Lámpsakos*, 9-12.
- Del Valle Alanso, T. (2018). Arquitectura y Fabricación Robotizada. *Universidad Politécnica de Madrid*, 1-51.
- Espitia Becerra, D. E. (2016). Diseño, construcción, programación y evaluación de un robot móvil omnidireccional. *SENNOVA*, 71-91.
- García, V. (2020, Marzo 5). *EPA Electronica Pratica Aplicada*. Retrieved from <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/descripcion-del-driver-a4988>
- Gutierrez, R. S. (2017). Estrategias de Control Basadas en Eventos Aplicadas a Robots Móviles. *Universidad Nacional de Educación a Distancia*, 2-259.
- Hámori, Á., Lengyel, J., & Reskó, B. (2011). 3DOF drawing robot using LEGO-NXT. *INES*, 293-295.
- Hernández Ordoñez, M., Ortiz Moctezuma, M. B., Calles Arriaga, C. A., & Rodríguez Portillo, J. C. (2015). *Robótica: Análisis, modelado, control e implementación*. Victoria: OmniaScience.
- hexTronik. (2020). *TURNIGY power system*. Retrieved from TURNIGY power system: <http://www.turnigy.com/batteries/turnigy-blue/>
- Hougen. (2017). *GUÍA BÁSICA DE TALADROS MAGNÉTICOS Y CORTADORES ANULARES*.
- Instruments, T. (2014). *DRV8825 Stepper Motor Controller IC*.
- Kim, H., Ko, D., Jung, B., Lee, M., & Lee, S. (2018). Large Size Painting with Infraless Vision-aided Mobile Robot. *ICCAS*, 325-330.
- Miño Rubiano, W. A. (2017). Simulación e implementación de sistemas robótico en arquitectura tipo rueda utilizando robótica modular. *Universidad Militar Nueva Granada*, 1-73.

- Moze. (2018). *goliath CNC OUT OF THE BOX*. Retrieved from goliath CNC OUT OF THE BOX: <https://www.goliathcnc.com/tech-specs>
- Qian, J., Zi, B., Wang, D., Ma, Y., & Zhang, D. (2017). The Design and Development of an Omni-Directional Mobile Robot Oriented to an Intelligent Manufacturing System. *sensors*, 1-15.
- Rexroth, B. (2015). *Sistemas de guiado con rodamientos lineales*. The Driver&Control Company.
- Sánchez M., M., Bonilla V., V., Moya C., M., & Mosquera C., G. (2017). ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL PARA BÚSQUEDA Y MITIGACIÓN DE INCENDIOS DE BAJA ESCALA. *International Conference on Information Systems and Computer Science*, 100-107.
- Sánchez Muyulema, L. M., & Peña Chauvin, C. M. (2013). Diseño e implementación de un robot móvil publicitario para la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. *ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO*.
- SERVO. (2019). *HYBRID STRPPING MOTORS & DRIVERS*.
- Tapia García , M. R., & López Hernández, J. M. (2017). ROBÓTICA MÓVIL. *Verano de la Investigación Científica*, 2526-2530.
- Ultimaker. (2017, Mayo 16). Ficha de datos técnicos ABS.
- Ultimaker. (2017, Mayo 16). Ficha de datos técnicos PLA.