

1. **TIPO DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO MECATRÓNICO.
2. **TÍTULO:** Desarrollo de una herramienta tecnológica-educativa que permita enseñar a programar a niños de cuatro años en adelante.
3. **AUTOR:** Vincent Fabricio Mancera Hernández.
4. **FECHA:** Febrero 2023.
5. **PALABRAS CLAVES:** Herramienta, tecnología, enseñanza, programación niños, interfaz de usuario, plataforma móvil, locomoción diferencial.
6. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo general de este proyecto de grado es desarrollar una plataforma móvil como herramienta tecnológica-educativa que permita enseñar a programar a niños de cuatro a diez años.
7. **LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Las líneas de investigación de la universidad de San Buenaventura se dirigen a tecnologías de vanguardia e innovación. En la subdivisión de la facultad de Ingeniería y en especial en el programa de ingeniería mecatrónica se destacan Diseño Mecatrónico, Control y robótica.
8. **METODOLOGÍA:** Esta investigación se enfoca en una metodología teórico-analítica donde se diseña mediante uso de software CAD e implementa y valida el prototipo.
9. **CONCLUSIONES:** Las conclusiones se centran en el desarrollo del diseño Mecatrónico e implementación del prototipo de la herramienta tecnológica-educativa.

Desarrollo de una herramienta tecnológica-educativa que permita enseñar a programar a niños de cuatro años en adelante

Vincent Fabricio Mancera Hernández

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero
Mecatrónico

Director del trabajo de grado:
Morian Nair Calderón Díaz, M.Sc.



**UNIVERSIDAD DE
SAN BUENAVENTURA**

Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Mecatrónica
Bogotá D.C., Colombia
2023

Citar/How to cite (Mancera Hernández., 2023)

Referencia/Reference Mancera Hernández, V. F.(2023). *Desarrollo de una herramienta tecnológica-educativa que permita enseñar a programar a niños de cuatro años en adelante* [Trabajo de grado profesional] Universidad de San Buenaventura Bogotá.

Estilo/Style:
APA 7ma ed. (2020)



Grupo de Investigación Solsytec (Bogotá)
Línea de investigación robótica, tecnologías de la información y la comunicación (Bogotá)



Repository Institucional
www.bibliotecadigital.usb.edu.co

Bibliotecas Universidad de San Buenaventura

Biblioteca Fray Alberto Montealegre O.F.M. - Bogotá.

Biblioteca Fray Arturo Calle Restrepo O.F.M. - Medellín, Bello, Armenia, Ibagué.

Departamento de Biblioteca - Cali.

Biblioteca Central Fray Antonio de Marchena – Cartagena.

Universidad de San Buenaventura Colombia - www.usb.edu.co

Bogotá - www.usbbog.edu.co

Medellín - www.usbmed.edu.co

Cali - www.usbcali.edu.co

Cartagena - www.usbctg.edu.co

Editorial Bonaventuriana - www.editorialbonaventuriana.usb.edu.co

Revistas científicas – www.revistas.usb.edu.co

Dedicatoria

Mi trabajo de grado lo dedico a Jaqueline Hernández Vergara, la mujer que con tanto esfuerzo y cariño me motivo a seguir adelante, a no desistir, a confiar en mis capacidades a pesar de lo que otras personas dijeron o pensarán. Mi madre siempre ha estado ahí dándome fuerza para que nunca dejara de creer en mí.

Agradecimientos

Agradezco a mi hermana Jhuliana Paola Mancera Hernández, a mi novia Estefania Segura Cagiao, a mi tía Mireya Hernández, tía Deifa Hernández, tío Roberth, su esposa Ángela, tío José Santos Hernández y su esposa Aida Buitrago, y a prima Katherine Hernández por a su apoyo incondicional y moral, porque gracias a ello logre terminar esta etapa de mi vida.

Contenido

1 Planteamiento del problema	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 LEGO Mindstorms	1
1.1.2 ROBOTIS Dream II Level 1	1
1.1.3 FischerTechnik Robotics	3
1.1.4 VEX IQ	5
1.1.5 Cubetto	5
1.1.6 Kibo	7
1.1.7 MODEBOTS: Environment for Programming Robots for Children Between the Ages of 4 and 6	8
1.1.8 Empresa de robótica educativa ROVOFIC SAS	11
1.2 Descripción y formulación del problema	14
1.3 Justificación	14
1.4 Objetivos	15
1.4.1 Objetivo General	15
1.4.2 Objetivos Específicos	15
1.4.3 Alcances y limitaciones del proyecto	16
2 Marco teórico	17
2.1 Robótica	17
2.1.1 Tipos de robots	17
2.2 Modelamiento cinemático del robot diferencial	18
2.2.1 Cinemática directa	18
2.2.2 Cinemática inversa	22
2.2.3 Control de robots móviles	23
3 Desarrollo ingenieril	25
3.1 Legislación colombiana para la restricción de juguetes para niños	25
3.2 Descripción del funcionamiento de la herramienta tecnológico- educativa	26
3.2.1 Funcionamiento de la herramienta tecnológico-educativa	27
3.2.2 Parámetros iniciales para el diseño de la herramienta tecnológico- educativa	31

Contenido

3.2.3	Requerimientos y selección del hardware para la interfaz de usuario, bloques y la plataforma móvil	31
3.2.4	Selección del hardware para la interfaz de usuario y la plataforma móvil	32
3.3	Diseño de la interfaz de usuario	39
3.3.1	Diseño electrónico de la interfaz de usuario (IU)	39
3.3.2	Diseño mecánico e implementación de la interfaz de usuario	48
3.4	Diseño de la plataforma móvil (PM)	63
3.4.1	Diseño electrónico de la plataforma móvil	63
3.4.2	Diseño mecánico e implementación de la plataforma móvil (PM)	67
3.5	Control de la plataforma móvil (PM)	81
3.5.1	Identificación de la plataforma móvil	81
3.5.2	Generación de trayectorias deseadas	89
3.5.3	Diseño e implementación del controlador para la plataforma móvil	94
4	Análisis y resultados	107
5	Conclusiones	108
5.1	Trabajo futuro	108
	Bibliografía	109

Lista de Tablas

1.1	Entornos de programación por edades	9
1.2	Entornos de programación por edades	10
3.1	Tabla de verdad de las acciones que tendría la PM	33
3.2	Tabla de características de elementos electrónicos para la lectura de los bloques	34
3.3	Tabla de características de elementos electrónicos para la salida del Led bipolar	34
3.4	Tabla de características de dispositivos de comunicación inalámbrica revisados	35
3.5	Tabla de características los drivers para los motores seleccionados	35
3.6	Tabla de características de los motores DC seleccionados.	36
3.7	Tabla de características de dispositivos de comunicación inalámbrica seleccionados.	37
3.8	Resumen de los requerimientos del hardware.	37
3.9	Resistencias para la lectura de los bloques físicos	41
3.10	Resultado de divisores de voltaje	42
3.11	Resultado resistencias en paralelo y divisor de voltaje para esos resultados de resistencias	42
3.12	Tabla de consumo de corriente de la interfaz	45
3.13	Tabla de consumo de corriente de la plataforma móvil	65
3.14	Tabla de consumo de corriente de la plataforma móvil	67
3.15	Tabla de la variación del voltaje de PWM vs velocidades de cada motor	82
3.16	Puntos para hallar la ecuación de la recta	84
3.17	Distancias de recorriendo de las ruedas	90

Lista de Figuras

1.1	Caja de LEGO Mindstorms	1
1.2	Modelos de LEGO Mindstorms.	2
1.3	ROBOTIS Dream II Level 1	2
1.4	Caja del kit FischerTechnik ROBOTICS BT Smart Beginner Set	3
1.5	Modelos de FischerTechnik ROBOTICS BT Smart Beginner Set	4
1.6	Caja de FischerTechnik Robotics TXT Discovery Set	4
1.7	Modelo de FischerTechnik Robotics TXT Discovery Set	4
1.8	Kit VEX IQ	5
1.9	Aplicación del VEX IQ	5
1.10	Caja y contenido de Cubetto	6
1.11	Imagen de aplicación de Cubetto	6
1.12	Componentes de Kibo de Kinder Lab Robotics	7
1.13	Aplicación de Kibo de Kinder Lab Robotics	7
1.14	Fotos de ROVOFIC KIDS	12
1.15	Fotos de ROVOFIC MAKERS	13
2.1	Condiciones de la rueda	18
2.2	Variables físicas del robot diferencial	19
2.3	Variables velocidades lineales y angular del robot diferencial	19
2.4	Velocidades de las ruedas y velocidad lineal del robot: dirección hacia adelante y hacia atrás	20
2.5	Velocidades de las ruedas y velocidad lineal del robot: giro a la izquierda y a la derecha	21
2.6	Triángulo de componentes de la velocidad lineal	22
3.1	Descripción del funcionamiento de la interfaz de usuario y la plataforma móvil	27
3.2	Diagrama de flujo del funcionamiento del interfaz usuario.	28
3.3	Diagrama de flujo del funcionamiento de la plataforma móvil	30
3.4	Teclado matricial 4x4 con una entrada	33
3.5	Resultado obtenido en Microchip Advance Part Selector para la IU	38
3.6	Resultado obtenido en Microchip Advance Part Selector para la PM	38
3.7	Esquemático del circuito del sensor de efecto HALL.	39
3.8	Circuito impreso del sensor de efecto HALL	40
3.9	Esquemático de lectura de los bloques	41

Lista de Figuras

3.10 Esquemático del LED bicolor indicadores	43
3.11 Esquemático del pulsador	44
3.12 Esquemático del módulo Bluetooth	45
3.13 Foto del convertidor DC-DC Buck MP23070N	46
3.14 Esquemático del circuito básico del microcontrolador	46
3.15 Render del circuito impreso de la interfaz	47
3.16 Parte superior del bloque físico: flechas de dirección	48
3.17 Parte intermedia del bloque físico	49
3.18 Parte inferior del bloque físico	49
3.19 Explosión de los bloques físicos	50
3.20 Diseño de la interfaz parte superior	51
3.21 Diseño de la tapa inferior de la interfaz	52
3.22 Explosión de la caja de la batería	52
3.23 Caja de la batería	53
3.24 Tapa de la caja de batería de la interfaz	53
3.25 Explosión botón completo	54
3.26 Cabeza del botón	54
3.27 Botón parte inferior o cuello del botón	55
3.28 Ensamble del contacto para los bloques	56
3.29 Explosión del contacto para los bloques	56
3.30 Explosión de la interfaz y los contactos para los bloques	57
3.31 Vista superior de la interfaz y los contactos para los bloques	58
3.32 Vista superior de la interfaz y los contactos para los bloques	58
3.33 Ensamble del pulsador	59
3.34 Implementación del pulsador y el botón en la interfaz	59
3.35 Ensamble de la tapa superior de interfaz de usuario con los contactos, pulsador, botón y bloques	60
3.36 Ensamble de la tapa superior de interfaz con los contactos, pulsador, botón y bloques	60
3.37 Implementación de la tapa inferior del tablero, el circuito impreso del tablero y la caja para la batería sin la tapa inferior	61
3.38 Implementación de la tapa inferior del tablero, el circuito impreso de la IU y la caja para la batería sin la tapa inferior	62
3.39 Esquemático electrónico del driver IFX9201	63
3.40 Circuito electrónico del microcontrolador dsPIC33FJ128MC802	64

Lista de Figuras

3.41	Render del circuito impreso microcontrolador dsPIC33FJ128MC802	64
3.42	Esquemático del circuito de potencia de la PM para 3.3V y 5V	66
3.43	Render del circuito electrónico de potencia de la PM	66
3.44	Diseño del soporte de los micro motores DC	68
3.45	Diseño del porta batería	69
3.46	Diseño de la tapa del porta baterías de la PM	69
3.47	Diseño de la base principal de la PM	70
3.48	Diseño de la rueda	71
3.49	Diseño del neumático	71
3.50	Diseño base exterior de la PM	72
3.51	Diseño base de los circuitos impresos de la PM	73
3.52	Diseño tapa superior de la PM	74
3.53	Diseño del ojo exterior de la PM	74
3.54	Diseño del iris de ojo de la PM	75
3.55	Explosionado del ensamble del motor DC, el encoder, el soporte, rueda y neumático de la PM	76
3.56	Explosionado del ensamble de la base principal, el porta batería, tapa de porta batería, las dos ruedas locas, tornillos M3x6 y ensamble del motor DC de la PM	77
3.57	Explosionado del ensamble anterior con la base exterior, base de los circuitos impresos, circuito impreso del microcontrolador con drivers, etapa de potencia y indicadores de la PM	78
3.58	Ensamble anterior con la base exterior, base de los circuitos impresos, circuito impreso del microcontrolador con drivers, etapa de potencia y indicadores de la PM	79
3.59	Explosionado del ensamble de la tapa superior con los ojos exteriores, iris y sus respectivos tornillos M3x4 de la PM	79
3.60	Ensamble de la plataforma móvil	80
3.61	Gráfica de velocidad versus el voltaje suministrado al motor A y B	83
3.62	Gráfica de posición en el tiempo del motor A y B	83
3.63	Gráfica de posición del motor A (izquierda) y B (derecha) con la recta calculada	85
3.64	Gráfica de un paso de la función de transferencia del motor A y B	86
3.65	Gráfica de trayectoria de 18cm, velocidad, aceleración simulación y microcontrolador	91
3.66	Gráfica de trayectoria de -18cm, velocidad, aceleración simulación y microcontrolador	91

Lista de Figuras

3.67 Gráfica de trayectoria de 10cm, velocidad, aceleración simulación y microcontrolador	92
3.68 Gráfica de trayectoria de -10cm, velocidad, aceleración simulación y microcontrolador	93
3.69 Diagrama de bloques del control ADRC con Observador	100
3.70 Gráfica de seguimiento del controlador ADRC con Observador extendido	100
3.71 Gráfica de error obtenido del ADRC con Observador extendido	101
3.72 Diagrama de bloques de la implementación del control ADRC	102
3.73 Generación de la primera prueba de trayectorias de implementación del controlador ADRC	104
3.74 Gráfica del error y señal de control de la primera prueba de trayectorias de implementación del controlador ADRC	104
3.75 Generación de la segunda prueba de trayectorias de implementación del controlador ADRC	105
3.76 Gráfica del error y señal de control de la segunda prueba de trayectorias de implementación del controlador ADRC	106

1. Planteamiento del problema

1.1. Antecedentes

La robótica ha tenido una gran trascendencia en la educación, desarrollando en los niños habilidades como el pensamiento lógico, resolución de problemas y creatividad (Voronina et al., 2016; Lieto et al., 2017; Elkin et al., 2016; Geist, 2016), por esta razón se analizarán cinco kits de robótica enfocados a edades a partir de los seis años en adelante, dos para las edades de tres años en adelante, un estudio sobre los entornos de programación para niños entre cuatro a seis años y una empresa de robótica educativa llamada ROVOFIC SAS.

Figura 1.1

Caja de LEGO Mindstorms



Fuente. (Lego, 2022)

1.1.1. *LEGO Mindstorms*

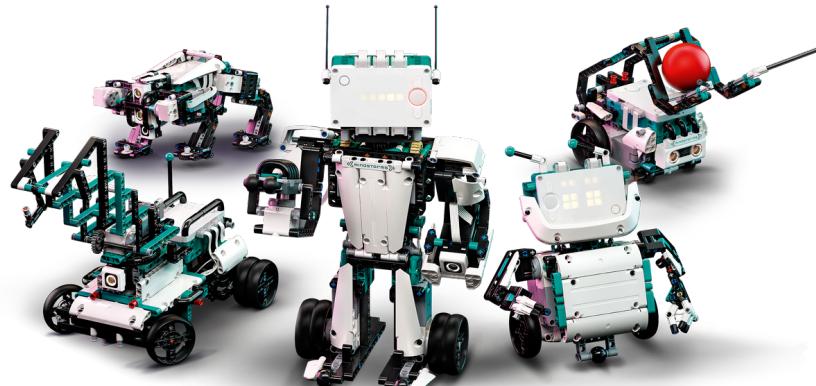
Es un kit de robótica recomendado para edades de 10 años en adelante, incluye instructivos para armar dos opciones de robot estilo humanoide, un robot cuadrúpedo, y dos opciones de robot móvil con ruedas(Lego, 2022). El entorno de programación de bloques virtuales que se encuentra disponible para computador y Tablet. El kit contiene: el bloque principal, cuatro motores, sensor giróscopo de 6 ejes, un altavoz, y sensor de distancia. A continuación, puede apreciar el kit de robótica en las Figura 1.1 y Figura 1.2.

1.1.2. *ROBOTIS Dream II Level 1*

Es un kit de robótica recomendado para edades de 8 años en adelante, incluye instructivos para armar 12 modelos diferentes y cada uno de estos tiene una lección de clase con temáticas

Figura 1.2

Modelos de LEGO Mindstorms.



Fuente. (Lego, 2022)

Figura 1.3

ROBOTIS Dream II Level 1



Fuente.(Robotis, 2022)

introductiones a la robótica (Robotis, 2022). En el contenido de la caja vienen además de las fichas para armar, un motor DC, una batería recargable de 4.5V y un cable USB, con este kit los niños aprenden las nociones básicas de la robótica y mecanismo mientras arman las diferentes prototipos. Cabe resaltar que ROBOTIS cuenta con cinco niveles de kits de robótica y cada uno tiene un currículo con actividades diferentes, y a partir del segundo nivel enseñan a programar. A continuación se puede apreciar la imagen del kit nivel uno de ROBOTIS en la Figura 1.3.

1.1.3. *FischerTechnik Robotics*

La empresa alemana FischerTechnik cuenta con una variedad de kits de física, ingeniería y robótica, y a continuación se mostrarán dos de ellos.

Figura 1.4

Caja del kit FischerTechnik ROBOTICS BT Smart Beginner Set



Fuente.(FischerTechnik, 2022a)

1.1.3.1. BT Smart Beginner Set. Es un kit de robótica recomendado para edades de ocho años en adelante, se pueden armar doce diferentes modelos como un secador de manos, carrusel, cinta transportadora con estampadora y máquina móvil de la oruga, también permite armar otras opciones o cumplir con otros retos según la creatividad del niño, niña o adolescente. El entorno de programación de bloques virtuales que está disponible para una computadora o una Tablet. La unidad principal de procesamiento permite conectar cuatro sensores, dos salidas para motores, dos salidas para lámparas y un puerto bluetooth (FischerTechnik, 2022a). A continuación, puede apreciar el kit de robótica en las Figura 1.4 y Figura 1.5.

1.1.3.2. TXT Discovery Set. Es un kit de robótica recomendado para edades de 10 años en adelante, se pueden armar catorce diferentes modelos. El entorno de programación también está disponible para una computadora o una Tablet. El bloque principal permite conectar ocho sensores, cuatro salidas para motores, un puerto wifi y bluetooth, una ranura para conectar una SD y un display touch (FischerTechnik, 2022b). Es posible apreciarlo en las Figura 1.6 y Figura 1.7.

Figura 1.5

Modelos de FischerTechnik ROBOTICS BT Smart Beginner Set



Fuente.(FischerTechnik, 2022a)

Figura 1.6

Caja de FischerTechnik Robotics TXT Discovery Set



Fuente.(FischerTechnik, 2022b)

Figura 1.7

Modelo de FischerTechnik Robotics TXT Discovery Set



Fuente.(FischerTechnik, 2022b)

1.1.4. VEX IQ

Es un kit de robótica recomendado para edades de ocho años en adelante. El entorno de programación está disponible para una computadora o Tablet, y cuentan con un entorno de programación de bloques virtuales (VEXRobotics, 2022). La unidad de procesamiento permite conectar doce sensores o motores, un módulo para radio frecuencia, una ranura para conectar una SD y una LCD. A continuación, puede apreciar el kit de robótica en las Figura 1.8 y Figura 1.9.

Figura 1.8

Kit VEX IQ



Fuente.(VEXRobotics, 2022)

Figura 1.9

Aplicación del VEX IQ



Fuente.(VEXRobotics, 2022)

1.1.5. Cubetto

Es un robot recomendado para edades de tres años en adelante. Cubetto está acompañado de un tablero, unos bloques, un mapa y una cartilla. Este tablero permite mediante la ubicación de

unos bloques tangibles que sirven para la programación del desplazamiento del robot (PRIMO, 2022a). Cubetto puede ser apreciado en las Figura 1.10 y Figura 1.11.

Figura 1.10

Caja y contenido de Cubetto



Fuente.(PRIMO, 2022a)

Figura 1.11

Imagen de aplicación de Cubetto



Fuente.(PRIMO, 2022a)

En un Maker Scape en el 2013 nació la idea de crear a Cubetto e inició la empresa Primo Toys, y lograron sacar adelante el proyecto por medio de la plataforma de financiamiento Kickstarter. En el 2014 y 2015 se unieron nuevos integrantes al equipo de trabajo que aportaron en la parte metodológica, creando un tapete de aprendizaje y cuentos para la enseñanza de la programación. En el 2015 trabajaron en el prototipo que aún sigue vigente y en 2016 volvieron

a financiar el proyecto en Kickstarter. (PRIMO, 2022b)

1.1.6. *Kibo*

Es un robot recomendado para edades de tres años en adelante. Kibo está acompañado de unos bloques tangibles, dos motores y cuatro sensores. Estos bloques al encajarse y al ser escaneado el código de cada uno, permiten el control del desplazamiento del robot (KinderLabRobotics, 2022b). Kibo puede ser visto en las Figura 1.12 y Figura 1.13.

Figura 1.12

Componentes de Kibo de Kinder Lab Robotics



Fuente.(KinderLabRobotics, 2022b)

Figura 1.13

Aplicación de Kibo de Kinder Lab Robotics



Fuente.(KinderLabRobotics, 2022b)

Kibo nació como fruto de las investigaciones en educación en STEM en niños de tres años

de KinderLab Robotics, y es usado con el objetivo de potencializar habilidades en ciencia, tecnología, ingeniería, arte y matemáticas (STEAM) (KinderLabRobotics, 2022a).

1.1.7. MODEBOTS: Environment for Programming Robots for Children Between the Ages of 4 and 6

Traduce “MODEBOTS: entornos de programación para niños entre las edades de 4 y 6” (Ramírez-Benavides and Guerrero, 2015). Este proyecto de investigación describe el primer prototipo de implementación curricular en entornos de programación para robots que usan computadora o dispositivos móviles, para niños y niñas de cuatro a 12 años, realizando un análisis de qué entornos de programación o kits de robótica son más recomendables para cada edad (Ramírez-Benavides and Guerrero, 2015). A continuación, se puede apreciar los resultados de esta investigación en las Tabla 1.1 y Tabla 1.2.

En la Tabla 1.1 se muestran 22 entornos de para la enseñanza de programación distribuidos en los siguientes rango de edades:

- Cuatro enfocados a la edad de cuatro años
- Diez enfocados a la edad de cinco a siete años
- Doce enfocados a la edad de siete a 12 años
- Dos enfocados a la edad de ocho a 12 años

Tabla 1.1*Entornos de programación por edades*

Enviroment	Age(years)								
	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Robot Turtles	X	X	X	X	X				
PRIMO	X	X	X	X					
Hello Ruby	X	X	X	X					
KIBO (KIWI y CHERP)	X	X	X	X					
MicroMundos JR		X	X	X					
Kodable		X	X	X					
ScratchJR		X	X	X					
Play-i		X	X	X					
Move the Turtle	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Software LEGO WeDo		X	X	X	X	X	X	X	X
LEGO Logo		X	X	X	X	X	X	X	X
LEGO RoboLab RCX		X	X	X	X	X	X	X	X
Logo		X	X	X	X	X	X	X	X
LogoBlocks		X	X	X	X	X	X	X	X
LogoWrite		X	X	X	X	X	X	X	X
PicoCrickets y PicoBlocks		X	X	X	X	X	X	X	X
Software LEGO Mindstorms NXT		X	X	X	X	X	X	X	X
Software LEGO Mindstorms EV3		X	X	X	X	X	X	X	X
Software MoWay		X	X	X	X	X	X	X	X
StartLogo		X	X	X	X	X	X	X	X
Scratch		X	X	X	X	X	X	X	X
miniBloq		X	X	X	X	X	X	X	X

Fuente. (Ramírez-Benavides and Guerrero, 2015)

Tabla 1.2*Entornos de programación por edades*

Year	Enviroment	Programming based on	Controls robots	Open source	Link source
1970	Logo	Commands (writing instruction)	Yes	No	PC
1985	LogoWrite	Commands (writing instruction)	No	No	PC
1988	LEGO Logo	Commands (writing instruction)	Yes	No	PC
1993	MicroMundos EX	Commands (writing instruction)	No	No	PC
1994	LEGO RoboLab RCX	Iconos	Yes	No	PC
1994	LogoBlocks	Blocks/Pluzze	Yes	No	PC
1994	StartLogo	Blocks/Pluzze	No	Yes	PC
2000	MicroMundos JR	Iconos	No	No	PC
2005	Software LEGO WeDo	Iconos	Yes	No	PC
2006	PicoCrickets y PicoBlocks	Blocks/Pluzze	Yes	Yes	PC
2006	Software LEGO Mindstorms NXT	Iconos	Yes	No	PC
2007	Scratch	Blocks/Pluzze	No	Yes	PC
2008	miniBlo	Blocks	No	Yes	PC
2012	Move the Turtle	Iconos	No	No	Mobile (iPhone y iPad)
2012	Software MoWay	Commands/Flowcharts	Yes	No	PC
2012	Kodable	Iconos	No	No	Mobile (iPad)
2013	ScratchJR	Blocks/Pluzze	No	Yes	PC - Mobile (iPad)
2013	Software LEGO Mindstorms EV3	Iconos	Yes	No	PC
2013	Robot Turtles	Board and cards	No	No	Board game
2013	Play-i	Iconos	Yes	No	Mobile
2013	PRIMO	Electronics circuit (ARDUINO)	Yes	No	Tangible interface
2014	Hello Ruby	Iconos	No	No	PC - Mobile
2014	KIBO (KIWI y CHERP)	Blocks and barcode	Yes	No	PC - Tangible interface

Fuente. (Ramírez-Benavides and Guerrero, 2015)

En la Tabla 1.2 se observa que de los veintidós entornos de programación:

- 15 son los entornos gráficos de programación que usan bloques o iconos, además de estos solo siete permiten programar un robot
- Cuatro son los entornos de programación escritos y solo dos permiten programar un robot
- Nueve son los entornos de programación de código abierto y de estos solo tres permiten programar un robot
- 18 se pueden programar por medio de un computador, además de estos solo están disponibles para usar desde un dispositivo móvil (smartphone o Tablet) y uno tiene una interfaz programable tangible
- Cinco se pueden programar por medio un dispositivo móvil (smartphone o Tablet)
- Solo dos se puede programar por medio de una interfaz tangible, además de estos solo uno se puede programar utilizando la computadora

1.1.8. Empresa de robótica educativa ROVOFIC SAS

ROVOFIC es una empresa Colombiana que cuenta con un modelo de enseñanza STEM que por medio de un método constructivista potencializa las habilidades digitales, cognitivas, sociales y emocionales en niños, niñas y adolescente mediante el trabajo colaborativo basado en proyectos y lecciones dirigidas en las áreas de las industrias 4.0 como robótica y mecatrónica.

ROVOFIC cuenta con dos ambientes de aprendizaje: ROVOFIC KIDS esta orientado para niños y niñas desde los cuatro hasta los ocho años y el objetivo es preparar a las nuevas generaciones para enfrentar un entorno en constante cambio mediante actividades didácticas, lúdicas y pedagógicas enfocados en las áreas de robótica, electrónica, programación y diseño e impresión 3D para el fortalecimiento de las habilidades del siglo XXI, mientras que ROVOFIC MAKERS esta orientado para niños y niñas desde los nueve hasta adolescentes de 16 años y su objetivo es potencializar las habilidades del siglo XXI mediante un modelo de aprendizaje basado en proyectos, donde los asistentes aprenden a diseñar y construir robots, dispositivos y máquinas según sus intereses o sueños, mediante la apropiación en el uso de software para la solución de problemas cotidianos del entorno. (Rovofic, 2023) A continuación se muestran fotos de cada ambiente de aprendizaje en las Figura 1.14 y 1.15.

Figura 1.14*Fotos de ROVOFIC KIDS**Fuente.(Rovofic, 2023)*

En el ambiente de ROVOFIC KIDS como se muestra en la Figura 1.14 se cuentan con Kits de robótica, electrónica y tablets para el desarrollo de las actividades de aprendizaje en robótica, electrónica y programación para niños y niñas de cuatro a ocho años.

Figura 1.15*Fotos de ROVOFIC MAKERS**Fuente.(Rovofic, 2023)*

En el ambiente de ROVOFIC MAKERS como se muestra en la Figura 1.14 se cuenta con computadores, Kit de robótica desarrollado por la empresa, componentes electrónicos, herramientas e impresoras 3D para desarrollo de las actividades de aprendizaje basado en proyectos en las áreas afines a las industrias 4.0 como la robótica, el diseño de piezas en 3D en software CAD, electrónica y programación para niños y niñas mayores de nueve años.

A partir de los antecedentes se puede deducir que los kits con una gran variedad de fichas como el Lego LEGO Mindstorms, ROBOTIS Dream II Level 1, FischerTechnik Robotics: BT Smart Beginner Set y el TXT Discovery Set, y el VEX IQ, son más recomendados para niños y niñas de más de 7 años de edad, y los kits de robótica más recomendables para niños de cuatro años son Kibo y Cubetto porque que permiten una interacción física o tangible a los niños y niñas.

1.2. Descripción y formulación del problema

La robótica se aplica en la educación a temprana edad desde el año 1970 (Ramírez-Benavides and Guerrero, 2015), estudios han demostrado que desarrolla y potencializa habilidades en los niños como el pensamiento lógico, resolución de problemas y creatividad (Voronina et al., 2016; Lieto et al., 2017; Elkin et al., 2016; Ramírez-Benavides and Guerrero, 2015; Geist, 2016), además la robótica también se usa para la enseñanza de la ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas utilizando el enfoque metodológico llamado STEM (science, technology, engineering y mathematics) (Stoeckelmayr et al., 2011) y (ChanMin et al., 2015).

Existen una gran variedad de kits de robótica como por ejemplo el LEGO Mindstorms (Lego, 2022), ROBOTIS Dream II Level 1 (Robotis, 2022), FischerTechnik ROBOTICS BT Smart Beginner Set (FischerTechnik, 2022a), el FischerTechnik Robotics TXT Discovery Set (FischerTechnik, 2022b) y el VEX IQ (VEXRobotics, 2022) enfocados a niños con edades a partir de los seis años en adelante, igualmente en la empresa Colombiana de robótica educativa ROVOFIC SAS cuenta con herramientas tecnológicas para enseñar de la programación para mayores a seis años, además en el proyecto de investigación sobre los entornos de programación para niños entre las edades de cuatro y seis (Ramírez-Benavides and Guerrero, 2015) expuesto anteriormente, refleja que hay sólo cuatro entornos de programación para los niños de edades de cuatro años como Cubetto (PRIMO, 2022a), Kibo (KinderLabRobotics, 2022b), Robot Turtles (Turtles, 2022) y Hello Ruby (Ruby, 2022), dos de ellos se pueden programar por medio de una interfaz tangible y uno usando el PC, por esta razón se formula la pregunta de investigación: ¿Qué herramienta tecnológica-educativa le permitiría a la empresa ROVOFIC SAS enseñar a programar a niños de cuatro años en adelante?.

1.3. Justificación

La robótica ha empezado a tener una trascendencia en la educación, aportando al desarrollo de habilidades como tolerancia al fracaso, solución e identificación de problemas, pensamiento lógico y creatividad e innovación además de acercar a trabajar de una manera fácil y dinámica, con ciencia, tecnología, ingeniería, matemática, como interacción social en niños con edades desde los tres años en adelante (Voronina et al., 2016; Lieto et al., 2017; Elkin et al., 2016; Geist, 2016; Gwen et al., 2016; Stoeckelmayr et al., 2011).

En estudios realizados con niños de tres a seis años se refleja que también la robótica además de aportar el desarrollo de las habilidades antes mencionadas aporta las cognitivas y motoras

(Voronina et al., 2016; Lieto et al., 2017; Elkin et al., 2016; Geist, 2016; Gwen et al., 2016), también Piaget con su teoría de las etapas del desarrollo intelectual (Liberty and Ayala, 2007), habla de que los niños y niñas de dos a seis o siete años se encuentran en una etapa preoperacional, etapa en la que desarrollan un estadio que llama Piaget como “el juego simbólico” que se caracteriza por cuatro fases que se describen en (Liberty and Ayala, 2007) y se muestran continuación:

- Fase de juego de repetición: el niño o niña es capaz de relacionar la repetición de una acción que le resulta placentera, por ejemplo: golpear un juguete que reproduce un sonido o movimiento característico, acción que repetirá por placer funcional.
- Fase es juego simbólico: otorga un significado a las acciones lúdicas como por ejemplo una niña jugando a la casita desarrolla una situación y unos diálogos que van más allá de lo inmediato y crean una situación imaginaria- simbólica.
- Fase de juego por reglas: consisten en actividades lúdicas que están reguladas por normas o reglas que, de no respetarse, le quitan el placer al juego como por ejemplo las canicas o el fútbol.
- Fase de juego de construcción: se manifiesta cuando los niños realizan construcciones mecánicas, creaciones inteligentes o solución de problemas como por ejemplo un Lego o el Mecano.

La razón para desarrollar esta herramienta tecnológica-educativa es fortalecer en la etapa preoperacional, que corresponde al estadio del juego simbólico que se mencionó anteriormente en sus cuatro fases.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo General*

Desarrollar una plataforma móvil como herramienta tecnológica-educativa que permita enseñar a programar a niños de cuatro a diez años.

1.4.2. *Objetivos Específicos*

- Diseñar una interfaz de usuario para el control de la plataforma móvil
- Diseñar la plataforma móvil de locomoción diferencial

- Implementar un sistema electrónico para la comunicación, programación y control de la plataforma móvil con la interfaz de usuario

1.4.3. Alcances y limitaciones del proyecto

1.4.3.1. Alcances.

- La plataforma móvil se desplazará hacia adelante y atrás, girará hacia la izquierda y derecha
- La interfaz de usuario permitirá controlar el robot de manera inalámbricamente

1.4.3.2. Limitaciones.

- La plataforma se desplazará en un plano XY
- El tamaño del robot no se excederá de 20x20cm
- El tamaño de la interfaz de usuario no se excederá de 35x35cm
- En la interfaz de usuario no se podrán programar estructuras complejas, sólo permitirá estructuras de programación predeterminadas.
- En la interfaz de usuario solo se podrán usar máximo nueve bloques tangibles y solo tendrá cuatro instrucciones
- La interfaz de usuario solo se podrá programar de manera tangible usando fichas

2. Marco teórico

2.1. Robótica

El término robot hace referencia a máquinas que realizan trabajos productivos y de imitación de movimientos y comportamientos de seres vivos (Angeles, 2014). En la actualidad los robots son obras de ingeniería que tiene como objetivo la amplificación de la potencia muscular del hombre, sustituyéndolo en su trabajo físico, a máquinas o instrumentos que son capaces de procesar información, complementando, o incluso sustituyendo, al hombre en algunas actividades intelectuales (Angeles, 2014).

La palabra robot nació de la obra teatral llamada Robots Universales Rossum (R.U.R) de Karel Capek en 1921. Robot viene de la palabra checa “robota” que significa trabajo forzado o servidumbre (Angeles, 2014).

2.1.1. *Tipos de robots*

Según (Angeles, 2014) los tipos de robots se dividen por su función, tamaño y aplicación.

2.1.1.1. Por su función.

- Manipuladores: brazos y manos robóticas.
- Generadores de movimiento: simuladores de vuelo, SCARA y plataformas que se desplazan hacia lo largo.
- Robots móviles: mediante patas, ruedas incluyendo los rovers, robots acuáticos o robots aéreos.
 - Robots con ruedas: Ackerman, triciclo, skid steer, omnidireccional y direccionamiento diferencial. Este último viene dado por la diferencia de velocidades de las ruedas laterales, al igual que la tracción y adicionalmente existen una o más ruedas para soporte (Ángeles, 2013).

2.1.1.2. Por su tamaño.

- Macro-robots o robots que midan más de un metro.
- Micro-robots son los que miden fracciones de milímetros.

2.1.1.3. Por su aplicación.

- Vigilancia
- Operaciones quirúrgicas
- Rehabilitación
- Entretenimiento

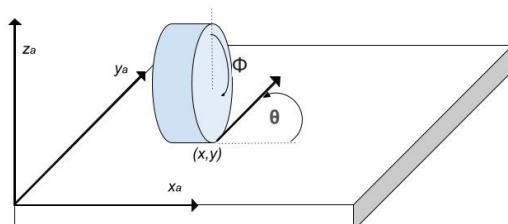
2.2. Modelamiento cinemático del robot diferencial

2.2.1. Cinemática directa

Para realizar el modelamiento del robot es necesario conocer las condiciones de la rueda, esta solo girará en su eje un ángulo “ Φ ”, “ θ ” es la dirección de rumbo y tendrá una posición (x, y) en el plano global “ a ” como se aprecia en la Figura 2.1.

Figura 2.1

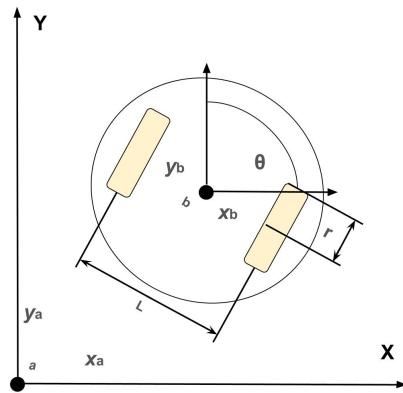
Condiciones de la rueda



Fuente. Creada por el autor basada en (Tzafestas, 2013)

Ahora se conocerán las condiciones físicas y las dimensiones del robot. La distancia que hay entre los centros de las ruedas se denomina “ L ”, el radio de las ruedas “ r ”, el sistema de referencia local es representado por “ x_b ”, “ y_b ” y “ θ ” y el sistema de referencia global “ x_a ”, “ y_a ”. Como se puede observar en la Figura 2.2.

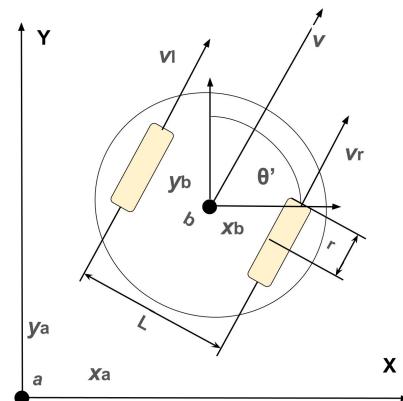
Es necesario saber la posición y orientación del robot con respecto al sistema global a , debido a que esas son las incógnitas. Las variables que se pueden conocer para controlar el movimiento del robot, es la velocidad de la rueda derecha v_r y la velocidad de la rueda izquierda v_l , que se pueden ver en la Figura 2.3 y representar por medio de las ecuaciones 2.1.

Figura 2.2*Variables físicas del robot diferencial**Fuente.* Creada por el autor basada en (Solaque Guzmán et al., 2016)

$$v_l = w_l \cdot r \quad (2.1)$$

$$v_r = w_r \cdot r$$

Donde w_l es la velocidad angular izquierda y w_r es la velocidad angular derecha. Las velocidades lineales y angulares se pueden obtener a partir de la velocidad lineal promedio “ v ” que le permitirá al robot desplazarse y girar como se apreciaría en la Ecuación 2.2 y la Figura 2.3.

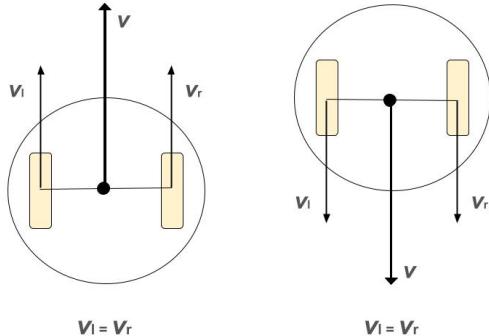
Figura 2.3*Variables velocidades lineales y angular del robot diferencial**Fuente.* Creada por el autor basada en (Solaque Guzmán et al., 2016)

$$\begin{aligned} v &= \frac{v_r + v_l}{2} = r \frac{\omega_r + \omega_l}{2} \\ w &= \frac{v_r - v_l}{l} = r \frac{\omega_r - \omega_l}{l} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Si se necesita que el robot se desplace en línea recta (adelante o atrás), las velocidades de las ruedas deben ser iguales $v_r = v_l$, con lo anterior se puede afirmar que la velocidad lineal del robot es el promedio de las velocidades de las ruedas, como se aprecia en la Figura 2.4 y en la Ecuación 2.2.

Figura 2.4

Velocidades de las ruedas y velocidad lineal del robot: dirección hacia adelante y hacia atrás



Fuente. Creada por el autor basada en (Solaque Guzmán et al., 2016)

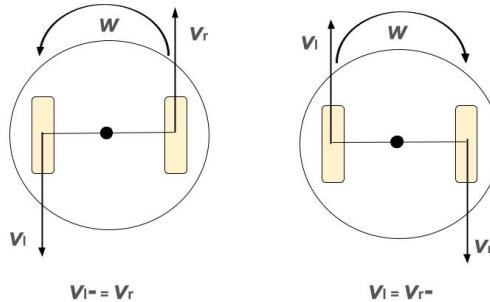
Para que el robot pueda rotar sobre su centro de masa, las magnitudes de las velocidades de sus ruedas deben ser iguales, pero una de ellas con signo contrario. Entonces se podría decir que la velocidad angular es igual a la diferencia de la velocidad de sus ruedas sobre la longitud que hay entre centro y centro de cada una de las ruedas, como se muestra en la Figura 2.5.

Después de haber obtenido la velocidad lineal y angular que se presentan en el desplazamiento del robot, se plantearán las ecuaciones que definen la dinámica del movimiento de un robot en cada eje como se puede ver en la Figura 2.6.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v * \cos \theta, \\ \dot{y} &= v * \sin \theta, \\ \dot{\theta} &= w \end{aligned} \quad (2.3)$$

Figura 2.5

Velocidades de las ruedas y velocidad lineal del robot: giro a la izquierda y a la derecha



Fuente. Creada por el autor basada en (Solaque Guzmán et al., 2016)

Definiendo que el robot se desplazará sobre una superficie plana, sin deslizamiento y que los ejes de las ruedas son perpendiculares a la superficie plana, se puede mostrar que el vector de coordenadas del punto guía del robot:

$$P = \begin{bmatrix} x & y & \theta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

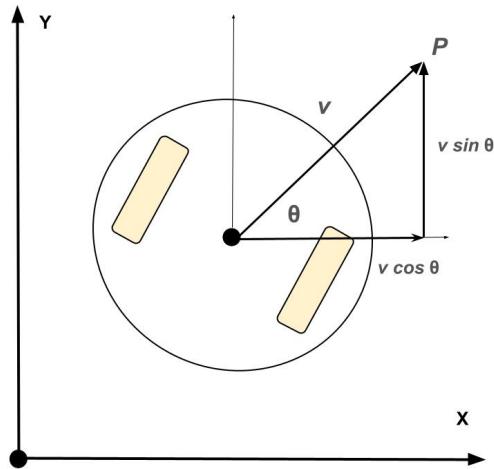
y la orientación del mismo es el vector de la velocidad lineal y la velocidad angular:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} v & w \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

De esa manera se puede escribir la siguiente ecuación a partir de la Ecuación 2.4 y Ecuación 2.5:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Ahora, después de haber obtenido el modelo de la cinemática directa es posible obtener las ecuaciones que determinen el movimiento del robot. Para esto se deben multiplicar las matrices de rotación de la Ecuación 2.4 y de velocidades del robot expresadas por las ecuaciones 2.2, y como resultado se tiene una ecuación matricial que representa las velocidades en X y Y del robot en el sistema global, obteniendo el modelo cinemático directo del robot diferencial con el cual se desarrolla un componente para el sistema de control como se aprecia en la siguientes

Figura 2.6*Triángulo de componentes de la velocidad lineal*

Fuente. Creada por el autor basada en (Solaque Guzmán et al., 2016)

ecuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta}{2} & \frac{\cos \theta}{2} \\ \frac{\sin \theta}{2} & \frac{\sin \theta}{2} \\ \frac{1}{l} & -\frac{1}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.2.2. Cinemática inversa

Para controlar el desplazamiento del robot se debe tener como entrada las velocidades de las ruedas, por ende se debe buscar una representación matemática en la que se determinen, partiendo de las velocidades angulares deseadas, por ende se obtiene la cinemática inversa del robot, la cual entrega una expresión matricial que nos permite determinar las velocidades que se deben aplicar en cada rueda para lograr el comportamiento deseado.

La cinemática inversa permitirá determinar las velocidades de las ruedas a partir de la velocidad en X , Y y angular del robot y para conocer la ecuación, es necesario despejar el vector de velocidades lineales, obteniendo de la ecuación como se menciona en (Ollero Baturone, 2005)

que se representa de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta}{2} & \frac{\cos \theta}{2} \\ \frac{\sin \theta}{2} & \frac{\sin \theta}{2} \\ \frac{1}{l} & -\frac{1}{l} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Para poder realizar la inversa de una matriz no cuadrada es necesario encontrar la pseudoinversa de dicha matriz llamada A , se obtiene la siguiente ecuación para la realización de la inversa:

$$A^+ = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \quad (2.9)$$

Asumiendo que la matriz A es la matriz a la que se necesita hacerle la pseudoinversa obtenemos:

$$A^+ = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{l}{2} \\ \cos \theta & \sin \theta & -\frac{l}{2} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

A continuación, la cinemática inversa del robot diferencial es:

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{l}{2} \\ \cos \theta & \sin \theta & -\frac{l}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

2.2.3. Control de robots móviles

Un robot móvil puede realizar una acción específica según su tarea o entorno. El robot puede actuar de manera programada según su tarea específica como por ejemplo mover objetos de un lugar a otro o seguir una trayectoria deseada, actuando con un desplazamiento de posición, velocidad y aceleración para la realización de la misma. En actividades como el seguimiento de trayectorias se debe controlar el desplazamiento, velocidad y aceleración para una mayor exactitud.(Lynch and Park, 2017)

El trabajo del controlador es convertir las especificaciones deseadas en posición, velocidad o aceleración en los actuadores. Las estrategias de control que logran los comportamientos deseado se conocen como control de movimiento, control de fuerza, control híbrido de movimiento-

fuerza o control de impedancia, y cuál de estos controladores es el apropiado, depende tanto de la tarea como del entorno (Lynch and Park, 2017), o también se puede tener restricciones impuestas por la mecánica del robot, independientemente del entorno: el robot no se puede controlar de forma independiente el movimiento y la fuerza en la misma dirección. Si el robot impone un movimiento, el entorno determinará la fuerza, y si el robot impone una fuerza, el entorno determinará el movimiento. (Lynch and Park, 2017)

Una vez se ha elegido un objetivo de control que sea coherente con la tarea y el entorno, podemos usar el control de retroalimentación para lograrlo. El control de retroalimentación utiliza sensores de posición, velocidad y fuerza para medir el comportamiento actual del robot, lo compara con la señal deseada y modula las señales de control enviadas a los actuadores. La retroalimentación se utiliza en casi todos los sistemas de robots. (Lynch and Park, 2017)

3. Desarrollo ingenieril

Para el diseño de la herramienta tecnológico-educativa se consideró necesario iniciar indagando sobre las restricciones o limitaciones de las leyes colombinas que rigen esta clase de herramientas y que pueden usar los niños y se encontró lo siguiente:

3.1. Legislación colombiana para la restricción de juguetes para niños

En Colombia no hay leyes para la restricción de dispositivos o herramientas tecnológico-educativas para los niños, pero si hay resoluciones, normas y reglamentos enfocadas hacia los juguetes y estas fueron las que se adoptaron para plantear los requerimientos iniciales para el diseño de la herramienta.

El Ministerio de la Protección Social expidió el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios de los juguetes, sus componentes y accesorios, que se comercialicen en el territorio nacional, con el fin de eliminar o prevenir adecuadamente un riesgo para la salud y la seguridad humana por medio de la Resolución 3388 de 2008 en el Capítulo 2 (de Bogotá, 2022b), donde también se apoya la Superintendencia de Industria y Comercio (de Bogotá, 2022a) para su regulación. También la Norma Técnica Colombiana NTC- EN 71- 1 (ICONTEC, 2016), habla sobre la Seguridad de Juguetes, en su tercer capítulo en Términos y Definiciones dice que la rigidez de los materiales en un juguete es la dureza de un material que excede de siete en la escala de dureza Shore A, medida de acuerdo con lo especificado en la norma ISO 868.

Al igual, en esta norma se contempla en el capítulo cuarto, los requisitos generales que deben tener los juguetes además deben estar visualmente limpios y exentos de infecciones. El material se examinará visualmente, mejor sin ayuda de aumentos. También, hace referencia a que los bordes de vidrio y metal se consideran potencialmente peligrosos, pero estos pueden ser plegados, doblados o enrollados en espiral para que no sean accesibles o protegerlos mediante un revestimiento de plástico o un material similar.

En el capítulo séptimo se hace referencia a los juguetes no destinados a niños menores de 36 meses: Estos juguetes deben de tener una advertencia que haga referencia que no son aptos para los niños menores de tres años, aplicando el peligro específico que existe, sea uno o varios, dando ejemplos como “Contiene piezas pequeñas. Peligro de ahogamiento”.

Teniendo en cuenta lo anterior, se inicia el análisis para la selección de los materiales y forma que se usarían en la construcción de la herramienta:

- *Acrílico*: según la ficha técnica suministrada por (Limatambo, 2022) cumple con la bio-disponibilidad porque no contiene ninguno de los elementos mencionados en la (de Bogotá, 2022b), también según la definición de dureza la escala aproximada es de 82 a 85 Shore D en (Struers, 2022) o del 84 a 87 Shore D en (RGPballs, 2022) y en la equivalencia con respecto a la Shore A, es de más de 100 Shore A en (CPIprodysol, 2022), todas estas excediendo en siete la escala de dureza.
- *PLA*: se fabrica a partir de recursos renovables al 100 %, como son el maíz, la remolacha, el trigo y otros productos ricos en almidón (it matters, 2022). Con lo anterior igual que el acrílico, cumple con la biodisponibilidad. También según la definición de dureza la escala aproximada es de 79 a 85 Shore D según el estudio realizado en (Teymoorzadeh and Rodrigue, 2015) o de 83 Shore D según el distribuidor Ultimaker en (Ultimaker, 2022a) y al igual que el anterior sobre pasa la escala mínima.
- *Certificación RoHS*: es la prueba de calidad que certifica los circuitos impresos y circuitos integrados que no contengan plomo, mercurio y otros elementos tóxicos para el ser humano (EUROcircuits, 2022) y los componentes que se seleccionen, ya deben estar certificados con esta prueba.
- *Forma*: si la forma del diseño de la herramienta termina en una arista viva, se pulirá y/o se hará un redondeado de mínimo 10 mm.
- *Voltaje*: el voltaje de entrada no excederá los 12V y los conectores exteriores tendrá un recubrimiento para evitar el contacto directo con los dedos del niño.
- *Batería*: la batería debe estar completamente sellada para evitar la contaminación en los niños y debe estar limpia de impurezas en su parte exterior, sin embargo, para los diseños se va a contemplar que ésta no sea de fácil acceso para el niño y que requiera la ayuda de un adulto para retirarla, hacer un cambio o recargarla, como también deberá contar con su respectiva protección electrónica.

Ahora bien, teniendo en cuenta la selección de los materiales y la forma descritos anteriormente, se procede a realizar la descripción del funcionamiento de todo el conjunto con el fin de seleccionar los componentes electrónicos y/o mecánicos faltantes.

3.2. Descripción del funcionamiento de la herramienta tecnológico- educativa

Para el diseño de la herramienta tecnológico-educativa, es necesario empezar con la definición del funcionamiento de la interfaz de usuario y la plataforma móvil para así poder continuar

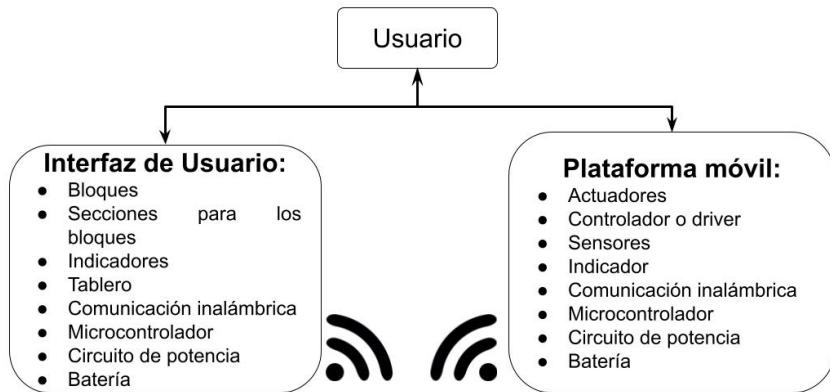
con los criterios iniciales de cada uno de ellos.

3.2.1. Funcionamiento de la herramienta tecnológico-educativa

La herramienta se dividirá en dos partes principales, la primera es la interfaz de usuario (IU) y la plataforma móvil (PM). Estás dos se comunicarán de forma inalámbrica; con el fin de evitar cableado externo adicional. La IU, en su parte exterior tendrá secciones para la ubicación de los diferentes bloques físicos que programará la rutina o secuencia que deberá ejecutar la PM y cada parte tendrá su respectivo circuito controlador, sistema de comunicación, circuito de potencia, leds indicadores de estados, entre otros, esta descripción se pueden ver en la Figura 3.1.

Figura 3.1

Descripción del funcionamiento de la interfaz de usuario y la plataforma móvil



Fuente. Creada por el autor

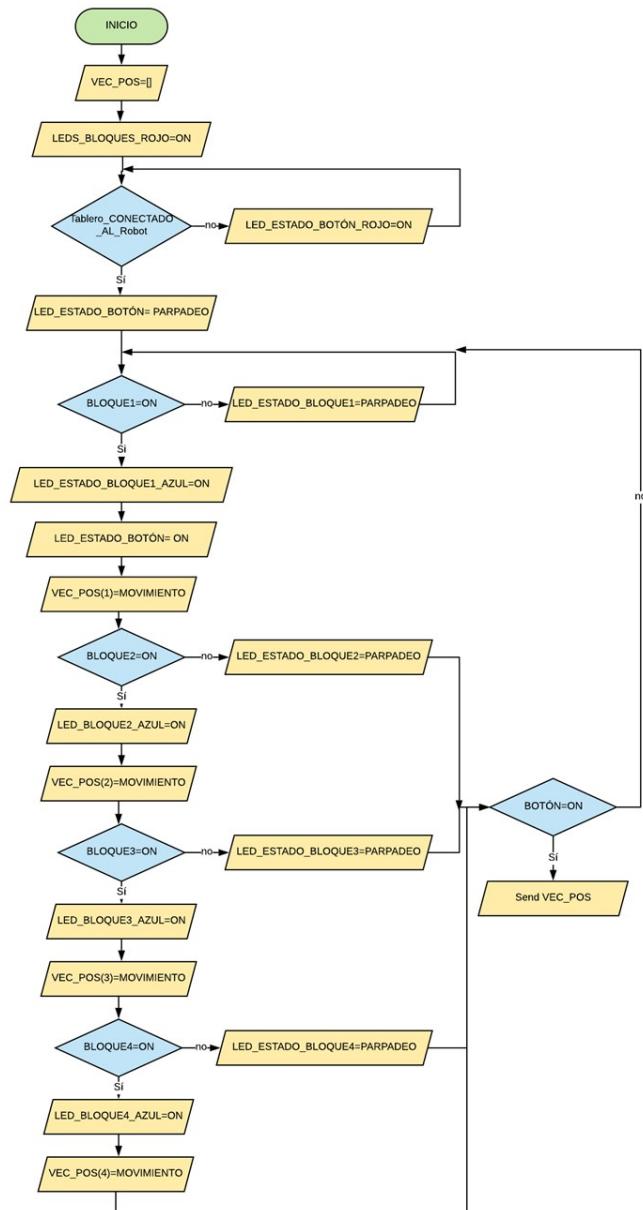
Cuando sea encendida la IU por medio del interruptor, se inicializará un vector que va a almacenar los futuros movimientos que le darán los bloques a la PM, en las secciones para ubicar los bloques se encuentran unos LED indicadores bicolor e inicialmente estarán de color rojo. Posteriormente la interfaz se conectará de manera inalámbrica a la plataforma y de no ser así, el indicador de estado del botón estará de color rojo. Al establecer la comunicación entre las dos partes, el indicador de estado del pulsador que envía la señal a la plataforma estará de color azul, iniciando a verificar si están ubicados los bloques en el orden y la manera correcta en las secciones del tablero, para así, cambiar su estado del indicador a azul, indicando que todo se encuentra bien y se podría enviar el vector de secuencias de movimientos a la PM.

Las secciones de los bloques en el tablero están condicionadas a un orden lógico secuencial y solo se permitirá el envío del vector de desplazamiento cuando se ubica una ficha en la primera

posición, debido a que sería el mínimo movimiento que realizaría la PM y se visualizará en el indicador del pulsador con el color azul. El diagrama de flujo del funcionamiento del tablero puede ser apreciado en la Figura 3.2.

Figura 3.2

Diagrama de flujo del funcionamiento del interfaz usuario.

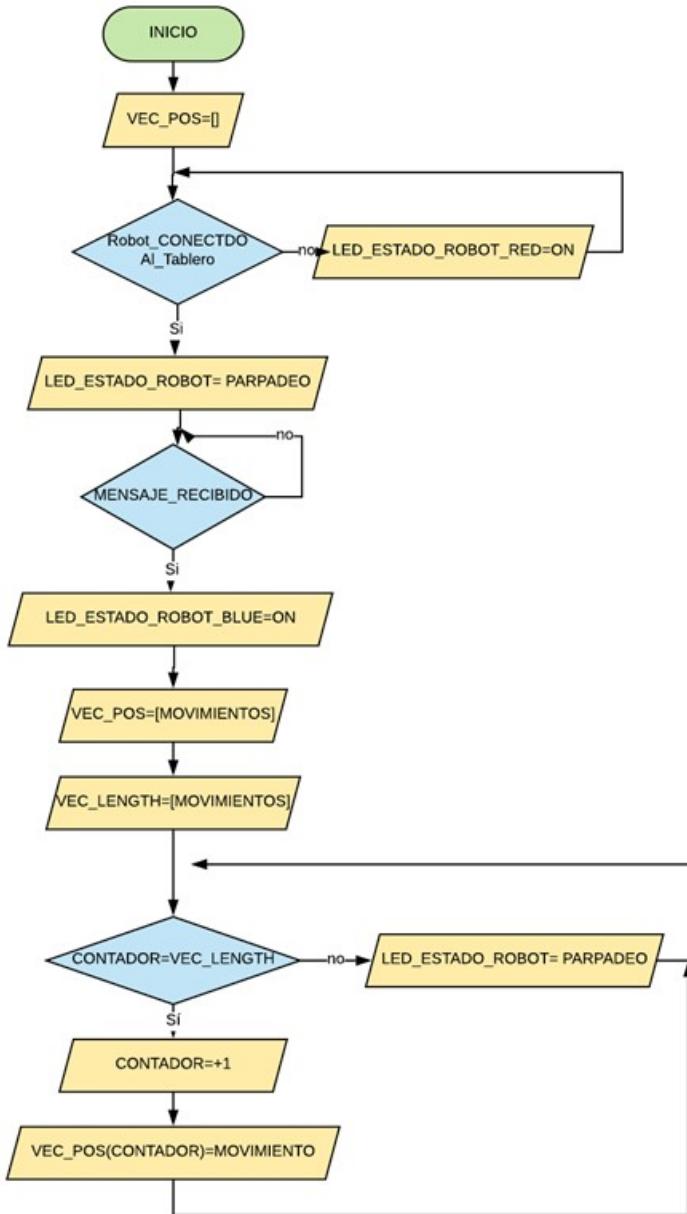


Fuente. Creada por el autor

Luego de verificar el funcionamiento del tablero, se procedará a conocer cómo será el funcionamiento de la plataforma móvil. Al encenderse la PM se inicializa el vector que almacenará los desplazamientos del mismo que son enviados por el tablero. Si la PM se conecta a la IU, el LED bicolor indicará su estado por medio de un parpadeo de color azul, de lo contrario estaría parpadeando de color rojo esperando a conectarse a la interfaz de usuario, después de estar conectado, verificará hasta que llegue el vector de desplazamiento para cambiar a color azul el indicador de la PM e iniciar la ejecución del vector de desplazamiento recibido. El diagrama de flujo del funcionamiento de la plataforma puede ser observar en la Figura 3.3.

Figura 3.3

Diagrama de flujo del funcionamiento de la plataforma móvil



Fuente. Creada por el autor

3.2.2. Parámetros iniciales para el diseño de la herramienta tecnológico-educativa

Es necesario tener en cuenta unos parámetros iniciales para el desarrollo de la herramienta tecnológico- educativa debido a que debe ser apropiada para niños de cuatro años o más y para esto se define que la IU será un tablero al cual se le podrán ubicar fichas o bloques físicos para programar la plataforma móvil.

Para el diseño de la interfaz o tablero se tendrá en cuenta el tamaño del bloque, que a su vez dependerá de la longitud promedio de la palma de la mano de un niño o niña de cuatro años como punto inicial, según consultado en (Avila-Chaurand et al., 2007) el promedio de la palma de una mano de un niño o niña es de 59 a 66 mm, con lo anterior se definirá el tamaño máximo de cada bloque físico en 60 mm. Se utilizarán cuatro bloques que le darían los comandos básicos a la plataforma móvil o robot diferencial para moverse hacia adelante, girar a la izquierda, girar a la derecha e ir hacia atrás. Cada uno de estos bloques tendrá un color primario: rojo, azul verde y amarillo, y se tomará como base la figura geométrica del triángulo para hacer referencia del sentido al que se dirigiría la plataforma móvil.

Para determinar la dimensión del tablero, este dependerá del tamaño de los bloques ya definido previamente, y para este prototipo se estima que se podrán poner hasta nueve bloques físicos; teniendo en cuenta que el área de cada bloque sería de 3,600 mm², el área de los nueve bloques sumaría 32,400 mm², manteniendo entre ellos una distancia prudente con el fin de evitar colisiones físicas entre ellos y tener un aspecto estético, para ello se podría contemplar un área entre 50,000 mm² y 100,000 mm², además de tener en cuenta la investigación realizada sobre las restricciones en la legislación colombiana para su diseño. La altura de la IU dependerá de los componentes electrónicos internos como: tarjeta controladora, sensores, conectores, cables y batería.

Después de haber conocido el funcionamiento de la IU y la PM, y los parámetros iniciales, se continuará hacer un listado de requerimientos para el funcionamiento de la interfaz y la plataforma.

3.2.3. Requerimientos y selección del hardware para la interfaz de usuario, bloques y la plataforma móvil

Según lo descrito en la anterior sección se procederá a en listar los requerimientos del hardware de la IU y PM.

3.2.3.1. Requerimientos del hardware para la interfaz de usuario. Para el funcionamiento de la interfaz es necesario que cuente con los siguientes requerimientos mínimos para su funcionamiento:

- Veintiocho entradas digitales para la lectura de los bloques físicos y una digital para el pulsador
- Veinte salidas digitales para los indicadores (LED bicolor) de los bloques y el pulsador
- Un protocolo de comunicación inalámbrico

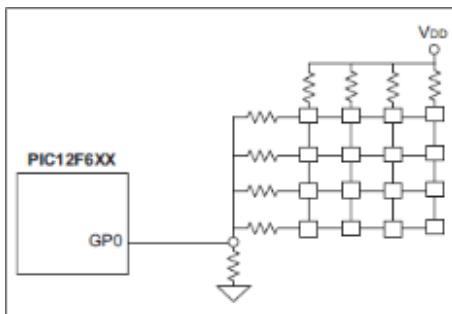
3.2.3.2. Requerimientos del hardware para la plataforma móvil. Para el funcionamiento de la plataforma es necesario que cuente con los siguientes requerimientos mínimos de funcionamiento:

- Cuatro entradas digitales con interrupciones externas o QEI para la lectura de encoder
- Dos salidas digitales y dos análogas para el control de velocidad, y sentido de giro de dos motores DC
- Dos salidas digitales para el indicador del estado de la plataforma móvil
- Un protocolo de comunicación inalámbrico

3.2.4. Selección del hardware para la interfaz de usuario y la plataforma móvil

Según los requerimientos mencionados anteriormente del diseño de la IU, se debería contemplar un microcontrolador con veintiocho entradas y veinte salidas digitales, para un total de cuarenta y ocho pines, lo que indica que se debería usar un microcontrolador de 64 pines, por ende es necesario realizar un análisis con el objetivo de reducir la cantidad de pines, según (Microchip, 2022b) se puede realizar la lectura de un teclado matricial 4x4 con un solo pin analógico como se muestra en la Figura 3.4. Aplicando este método mencionado, se reduciría la cantidad de pines a nueve entradas analógicas.

Este método consiste en divisores de voltaje, el cual hace que cada tecla al presionarse tenga un voltaje diferente, por ende es necesario realizar la selección adecuada de las resistencias, además de esto se optaría por hacerlo 3x3 debido a que se desarrolló un sistema de codificación binaria de tres bits para la lectura de los bloques como se verá en la Tabla 3.1. De esa manera solo se necesitarían nueve pines con conversión ADC para la lectura de las nueve secciones en

Figura 3.4*Teclado matricial 4x4 con una entrada**Fuente.* (Microchip, 2022b)

las que se pondrían los bloques.

Tabla 3.1*Tabla de verdad de las acciones que tendría la PM*

A	B	C	Acciones de la plataforma móvil
0	0	0	Nada
1	0	0	Hacia adelante
0	1	0	Hacia atrás
1	1	0	Giro hacia la derecha
0	0	1	Giro hacia la izquierda

Fuente. Creada por el autor

En la Tabla 3.1, cada variable (A, B y C) corresponde a un bit para identificar entre cada bloque físico por medio de los sensores de efecto HALL y esta codificación le permitirá a la IU saber cuál es la acción que debería realizar la PM.

Para la lectura de la información anterior es necesario tener un elemento electrónico encargado de la decodificación de este código binario mostrado en la Tabla 3.1, por esa razón se obtiene la Tabla 3.2. De esta tabla se opta por utilizar el sensor de efecto HALL porque no requiere un contacto directo para la lectura del dato, debido a que los bloques físicos serán puestos por los niños, podrían haber errores en la medición si el bloque se pone un poco torcido

o inclinado.

Tabla 3.2

Tabla de características de elementos electrónicos para la lectura de los bloques

REFERENCIA	FUNCIÓN	VOLTAJE DE OPERACIÓN (V)	CORRIENTE DE SALIDA (mA)	ENCAPSULADO	COSTO
Switch	Cerrar circuito	5	50	TRUE HOLE	-
Pulsador	Cerrar circuito	12	50	SMD	133,28
A3144 efecto HALL	Cerrar circuito	28	25	SOT89	1.332,80

Fuente. Creada por el autor

Después de haber realizado la simplificación de la lectura de las secciones de los bloques se simplificarán las salidas para los LED bicolor de los indicadores de las nueve secciones y el pulsador, se contempló la idea de usar un solo pin de salida digital para encender y apagar el LED bicolor, empleando un negador con un transistor para habilitar el color azul o el color rojo. Con esta negadora se simplificaría el uso de 20 a 10 salidas digitales para los indicadores de las nueve secciones y el pulsador.

Ahora se analizarán dos elementos electrónicos para realizar esta simplificación que se podrá ver en la Tabla 3.3. En la selección del componente electrónico de la tabla es necesario saber la corriente de consumo del Led bicolor, por ende con base a la información del proveedor (Arrow, 2022b), se conoce que la corriente de consumo del Led es 20mA, por ende se usará el transistor de referencia MMBT2907ALT1.

Tabla 3.3

Tabla de características de elementos electrónicos para la salida del Led bipolar

REFERENCIA	FUNCIÓN	VOLTAJE DE OPERACIÓN (V)	CORRIENTE DE SALIDA (mA)	ENCAPSULADO	COSTO (\$)
74LS04	Compuesta lógica NOT	4.75 a 5.25	8	SMD SOP-14	1.232
MMBT2907ALT1	Transistor PNP	5	500	SMD SOT-23	102

Fuente. Creada por el autor

Teniendo la lectura de las entradas para los bloques físicos y las salidas de los indicadores,

ahora es necesario conocer el dispositivo de comunicación inalámbrica que se implementaría para comunicar la IU y la PM, para ello se muestra en la Tabla 3.4. Con base en la información de la tabla y teniendo en cuenta que los niños manipularán la interfaz a una distancia máxima de cinco metros; porque los niños deben estar cerca al robot para visualizar los movimientos que realizaría en el tapete, y además por su bajo consumo en corriente se seleccionará el módulo bluetooth HC- 05.

Tabla 3.4

Tabla de características de dispositivos de comunicación inalámbrica revisados

DISPOSITIVO INALÁMBRICO	TIPO DE COMUNICACIÓN	RANGO EN INTERIOR (m)	ALIMENTACIÓN (V)	CORRIENTE (mA)	TAMAÑO (mm)	COSTO (\$)
Módulo bluetooth HC-05	Serial UART	10	3.3 a 6	25	34x15x3.2	20.658
Xbee 2MW serie 2	Serial UART	40	3.3	40	25x28x5	193.256
Módulo wifi- ESP8266	Serial UART	3	3.3	215	11.5x11.5x5	9.063
Modulo RF 315MHz	Serial UART	20	3.5 a 12	40	19x21x5	9.758

Fuente. Creada por el autor

Tabla 3.5

Tabla de características los drivers para los motores seleccionados

DRIVER	ENTRADAS DIGITALES	PWM	MOTORES	RANGO DE VOLTAJE (V)	SALIDA DE CORRIENTE (A)	ENCAPSULADO	COSTOS (\$)
L293D	4	2	2	4.5- 36	1	PDIP- 16	0.0377,97
IFX9201	0	2	1	0- 40	6	PG-DSO	28.000
DRV8872	0	2	1	0- 50	3.5	HSOP	30.000

Fuente. Creada por el autor

Seguidamente, se analizarán tres drivers para el manejo de la velocidad y sentido de giro de los dos motores DC que tendrá la plataforma móvil en la Tabla 3.5. En esta tabla se describen: número de entradas digitales y de PWM, cantidad de motores que se pueden conectar en el driver, rango de voltaje de operación, corriente soportada, encapsulado y distribuidor.

Posteriormente con base a los drivers, se analizaron las siguientes tres referencias de motores DC con encoder en la Tabla 3.6. En esta tabla se pueden apreciar tres motores DC con encoder que tienen: una velocidad de giro; un rango de operación de voltaje; consumo de corriente sin carga y con carga; el tamaño y peso del motor DC y su distribuidor.

Tabla 3.6

Tabla de características de los motores DC seleccionados.

MOTOR DC	VELOCIDAD A 6V (RPM)	REDUCCIÓN	RANGO DE VOLTAJE (V)	CONSUMO SIN CARGA (A)	CONSUMO CON CARGA (A)	TAMAÑO (mm)	PASOS POR VUELTA	PESO (G)	COSTOS (\$)
Micromotor HP 100:1 con encoder	300	100:1	3 a 6	0.1	1.7	24x10x12	1200	9.5	150.000
Micromotor HP 250:1 con encoder	160	250:1	5 a 12	0.08	0.75	26x10x12	3000	9.5	150.000
Maxon motor 344515	500	16:1	3 a 9	0.01	0.25	53x10x10	760	15	50.000

Fuente. Creada por el autor

Con la información de las tablas 3.5 y 3.6 se optará por seleccionar el motor Micromotor HP 250:1 con encoder por el rango de voltaje, corriente de consumo, además la cantidad de pasos por vuelta, así mismo el driver IFX9201 por su tamaño, voltaje de salida y corriente que es capaz de soportar.

Por último, solo faltaría realizar un análisis de las baterías que usarían la IU y la PM en la Tabla 3.7. En esta tabla se pueden apreciar tres baterías que tienen: capacidad de carga en amperios hora; celdas y voltaje; capacidad de descarga, peso, dimensiones de la batería y su distribuidor. La selección de la batería se realizará en el diseño electrónico de la IU y la PM.

Después de haber realizado todo el análisis pertinente de los componentes y elementos que tendrán la interfaz de usuario y la plataforma móvil, se realiza un cuadro de resumiendo las características del hardware Tabla 3.8.

Con los datos finales de las características de la IU representados en la Tabla 3.8 y con la ayuda del Microchip Advance Part Selector (Microchip, 2022d) se ingresan estos requerimientos definidos en la tabla, y el resultado de este filtro se puede apreciar en la Figura 3.5. Como conclusión se seleccionará el microcontrolador ATMEGA32U4.

Tabla 3.7

Tabla de características de dispositivos de comunicación inalámbrica seleccionados.

BATERÍAS	CAPACIDAD (Ah)	CELDAS	VOLTAJE (V)	CAPACIDAD DE DESCARGA (C)	PESO (g)	DIMENSIONES (mm)	COSTO
Lipo 1200mAh 3.7V	1.2	1	3.7	1	20.5	48x33x6	40.000
Lipo 500mAh 7.4V	0.5	2	7.4	20	36	55x30x14	42.000
Lipo 1000mAh 7.4V	1	2	7.4	20	59	72x34x14	63.000

Fuente. Creada por el autor

Tabla 3.8

Resumen de los requerimientos del hardware.

HERRAMIENTA	ADC	SALIDAS DIGITALES	PWM	INTERRUPCIONES INTERNAS Y EXTERNAS O QEI		SERIAL UART
				Y EXTERNAS O QEI		
Interfaz de usuario	9	10	0	0	0	1
Plataforma móvil	0	4	2	4	4	1

Fuente. Creada por el autor

Figura 3.5

Resultado obtenido en Microchip Advance Part Selector para la IU

Fuente. (Microchip, 2022d)

Este mismo procedimiento se realizó para la selección del microcontrolador que se implementará en la plataforma móvil, y esta búsqueda se observa en la Figura 3.6, arrojando como sugerencia el dsPIC33FJ128MC802 entre otros.

Figura 3.6

Resultado obtenido en Microchip Advance Part Selector para la PM

Fuente. (Microchip, 2022d)

3.3. Diseño de la interfaz de usuario

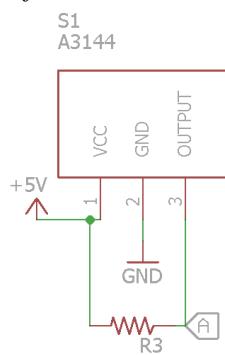
Como se mencionó con anterioridad en el Subsección 3.2.2, el diseño del tablero depende del tamaño que se había definido para los bloques físicos y se iniciará con la descripción del diseño electrónico seguido del diseño mecánico.

3.3.1. Diseño electrónico de la interfaz de usuario (IU)

La IU debe tener la posibilidad de identificar la codificación binaria de los bloques físicos por la ayuda del sensor de efecto HALL A3144. Este es un sensor unipolar que actúa como interruptor cambiando su estado al estar en contacto de un campo magnético. El sensor requiere una alimentación de 5V (VCC), un pin a tierra (GND), y un pin digital para la lectura del estado (OUTPUT), sin embargo para mantener su salida mientras no haya un campo magnético, es necesario usar una resistencia pull-up de 10K ohmios (Allegro, 2022) como se muestra en la Figura 3.7. En este esquema se aprecia una etiqueta *A* que representaría el primer Bit binario mostrado en la Tabla 3.1, y para *B* y *C* se repetiría el mismo circuito.

Figura 3.7

Esquemático del circuito del sensor de efecto HALL.



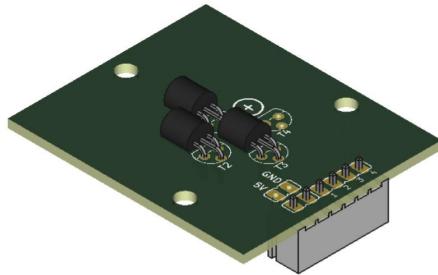
Fuente. Creada por el autor

El circuito impreso del sensor de efecto HALL se puede observar en la Figura 3.8, y este estará conectado al esquemático general por medio de un conector JST XH vertical de seis pines. Se realiza esta separación de circuitos impresos con el objetivo de reducir el tamaño entre estos, además que quedarían espacios sin utilizar adicionalmente elevarían el costo de su

fabricación.

Figura 3.8

Circuito impreso del sensor de efecto HALL

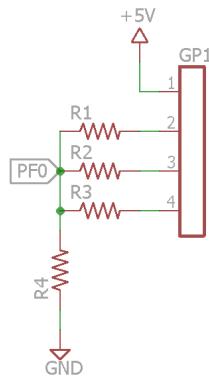


Fuente. Creada por el autor

Después de tener el circuito esquemático e impreso del decodificador del bloque físico, se procederá con el diseño electrónico para la lectura de los datos utilizando el microcontrolador ATMEGA32U4, anteriormente se había mencionado que se realizaría el sistema de lectura como si fuera un teclado matricial 3x3 (Microchip, 2022b), por ende es necesario calcular las resistencias del divisor de voltaje para que la lectura de los valores binarios de la Tabla 3.1 no se cruce entre si al hacer la conversión ADC, y el diagrama del circuito se muestra en la Figura 3.9. En esta figura se puede apreciar que el esquema de resistencias que se aplicará también para las nueve entradas ADC del microcontrolador, por ende, solo será necesario hacer una vez el cálculo del divisor de voltaje.

En la Figura 3.9 se ve el conector representado por *GP1* que permite la conexión de; VCC, A, B y C, estos últimos tres son los valores binarios de la Tabla 3.1. Las resistencias $R1$, $R2$ y $R3$ deben calcularse por medio de divisor de voltaje con el objetivo de realizar la conversión ADC y $R4$ se selecciona con el objetivo de obtener un valor umbral superior a 2,5V, por ende se toma el valor de $R4 = 1,2K\Omega$, por esa razón el valor de $R1$, $R2$ y $R3$ no debe ser mayor al de $R4$, además que debe haber una diferencia entre cada voltaje de mínimo 50mV. La etiqueta *PF0* representa el canal de conversión ADC del micrcontrolador y se usará también del *PF1* al *PF7*, y el *PB6* con la misma configuración representada en la Figura 3.9, para un total de nueve canales análogos.

Primero se iniciará evaluando los siguientes tres valores binarios de la Tabla 3.1 de manera

Figura 3.9*Esquemático de lectura de los bloques**Fuente.* Creada por el autor

independiente para cada resistencia $R1$, $R2$, y $R3$ que representan los valores binarios: 001, 010 y 100 por medio de un divisor de voltaje, y para este cálculo se asumen los valores de las resistencias que se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9*Resistencias para la lectura de los bloques físicos*

RESISTENCIAS	VALOR (Ω)
$R1$	100
$R2$	240
$R3$	604

Fuente. Creada por el autor

Teniendo en cuenta que el valor $R4 = 1,2K\Omega$ y que el voltaje es de $V = 5V$ se realizará el divisor de voltaje para cada valor de resistencia propuesto, se plantean las ecuaciones mostradas en 3.1, y los resultados se listan en la Tabla 3.10.

$$V_{div1} = \frac{1,2K\Omega}{1,2K\Omega + 100\Omega} \cdot 5V ; V_{div2} = \frac{1,2K\Omega}{1,2K\Omega + 240\Omega} \cdot 5V ; V_{div3} = \frac{1,2K\Omega}{1,2K\Omega + 604\Omega} \cdot 5V \quad (3.1)$$

Luego de haber identificado que los voltajes obtenidos tienen una diferencia mayor a $50mV$, se procede a realizar un paralelo entre las resistencias $R1$ y $R2$, $R2$ y $R3$, y $R1$ y $R3$ para conocer el voltaje medido entre los datos binarios 011, 101 y 110 que representarían estos voltajes. De-

Tabla 3.10*Resultado de divisores de voltaje*

VOLTAJE (V)	
V_{div1}	4,615
V_{div2}	4,167
V_{div3}	3,326

Fuente. Creada por el autor

sarrollando las ecuaciones en 3.2, y luego el divisor de voltaje para estos valores de resistencias en la ecuación 3.3, lo resultados se listan en la Tabla 3.11.

$$R_{par1} = \frac{100\Omega \cdot 240\Omega}{100\Omega + 240\Omega}; R_{par2} = \frac{604\Omega \cdot 240\Omega}{604\Omega + 240\Omega}; R_{par3} = \frac{100\Omega \cdot 604\Omega}{100\Omega + 604\Omega} \quad (3.2)$$

$$V_{div4} = \frac{1,2K\Omega}{1,2K\Omega + R_{par1}} \cdot 5V; V_{div5} = \frac{1,2K\Omega}{1,2K\Omega + R_{par2}} \cdot 5V; V_{div6} = \frac{1,2K\Omega}{1,2K\Omega + R_{par3}} \cdot 5V \quad (3.3)$$

Tabla 3.11*Resultado resistencias en paralelo y divisor de voltaje para esos resultados de resistencias*

RESISTENCIA (Ω)	VOLTAJE (V)
$R_{par1} = 70,588$	$V_{div4} = 4,722$
$R_{par2} = 171,753$	$V_{div5} = 4,373$
$R_{par3} = 85,795$	$V_{div6} = 4,666$

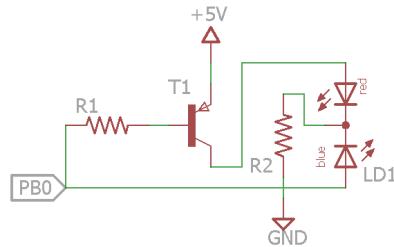
Fuente. Creada por el autor

Analizando los divisores de voltaje de la tabla 3.10 y 3.11 se demuestra que la diferencia de voltajes es mayor a 50mV, por ende no se tendrán cruces en la conversión del ADC del microcontrolador en caso de hacer uso de los cuatro valores de la tabla de verdad mostrada en 3.1. Como conclusión se tomaran los valores usados en la Tabla 3.9 haciendo uso de resistencias de tolerancia de 1 % de error.

Ahora se realizará el esquemático de la simplificación de los LED bicolor indicadores a una sola salida digital, el objetivo es encender el color azul y luego cambie al color rojo, el circuito propuesto se ve en la Figura 3.10.

Figura 3.10

Esquemático del LED bicolor indicadores



Fuente. Creada por el autor

En la Figura 3.10 se muestra: el Transistor tipo PNP de referencia MMBT2907ALT1 con la resistencia de base $R1$, la resistencia $R2$ para disminuir la intensidad lumínica del LED bicolor por su alto brillo, el pin de salida digital del microcontrolador $PB0$, y le LED bicolor. Este mismo esquema se usará para las otras 10 salidas y los otros pines del microcontrolador son: $PC6$, $PC7$, $PD0$, $PD4$ al $PD6$, $PB1$, $PB7$ y $PC7$. Se asumirá un $\beta = 75$ con base a la información suministrada por el distribuidor (Arrow, 2022a).

Se calculará la resistencia de base $R1$ por medio las ecuaciones 3.4, 3.5 y para $R3$ se tendrá en cuenta que según (Arrow, 2022b) la corriente de consumo del LED sería $I_C = 20mA$ y $V_{led} = 2,5v$, obteniendo por medio de las ecuaciones 3.6 y 3.7.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \rightarrow 75 = \frac{20mA}{I_B} \rightarrow I_B = 267\mu A \quad (3.4)$$

$$V_B = R1 \cdot I_B \rightarrow 5v = R1 \cdot 267\mu A \rightarrow R1 = 18,726K\Omega \quad (3.5)$$

Para calcular la corriente de base del transistor y aplicando la ley de Ohm en la Ecuación 3.5 es posible encontrar la resistencia $R1$, como este valor no es comercial se usará $20K\Omega$.

$$V_{cc} = V_{BE} + V_{led} + V_{R2} \rightarrow 5v = 0,7v + 2,5v + V_{R2} \rightarrow V_{R2} = 1,8V \quad (3.6)$$

$$V_{R2} = R1 \cdot I_{R2} \rightarrow 1,8v = R1 \cdot 20mA \rightarrow R2 = 90\Omega \quad (3.7)$$

En la Ecuación 3.6 se realiza la sumatorio de voltajes aplicando la ley de Kirchhoff y con la Ecuación 3.7 por medio de la ley de Ohm se calcula la resistencia $R2$, como este valor no es

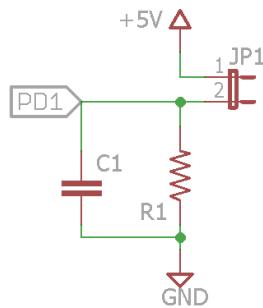
comercial se usará 100Ω .

Después de haber diseñado el circuito que codificará los bloques y el que realizará el encendido de los indicadores luminosos, se procederá la implementación del pulsador en la Figura 3.11; del módulo Bluetooth HC-05 en la Figura 3.12 y el circuito que requiere el microcontrolador para su funcionamiento según su fabricante en la Figura 3.14, además de la etapa de potencia que proporcionará la alimentación a todo el circuito y la selección de la batería para dos horas de uso aproximadamente como muestra en la Tabla 3.12.

En la Figura 3.11 se aprecia el conector de dos pines JP1, para la lectura digital del pulsador se usará un circuito RC con una resistencia $R1 = 100k\Omega$ y un condensador $C1 = 10\mu F$ para garantizar una descarga lenta de un segundo y también una mejor lectura del nivel de voltaje al oprimirse el pulsador, y la lectura la realizará mediante el pin digital *PD1* del microcontrolador.

Figura 3.11

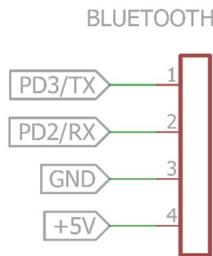
Esquemático del pulsador



Fuente. Creada por el autor

En la Figura 3.12 se observa el conector del Bluetooth con las conexiones a: GND, VCC, RX y TX.

En la Tabla 3.12 se observa la descripción del consumo de corriente máximo que tendrían los componentes electrónicos de la IU: la cantidad de estos elementos, su consumo en corriente individual, el total según la cantidad de cada componente y una sumatoria de todas las corrientes para la selección del regulador de voltaje y la batería.

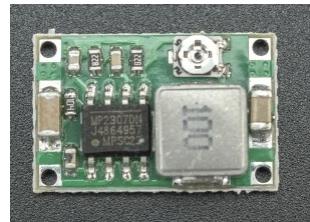
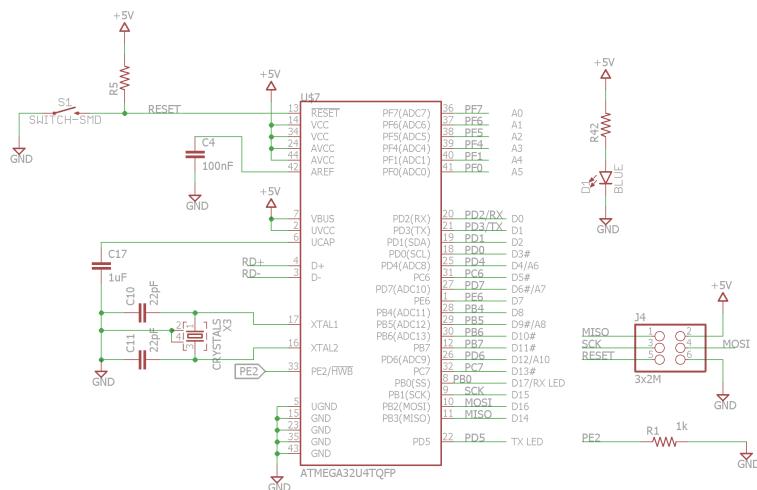
Figura 3.12*Esquemático del módulo Bluetooth**Fuente.* Creada por el autor**Tabla 3.12***Tabla de consumo de corriente de la interfaz*

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	CONSUMO DE CORRIENTE	TOTAL POR COMPONENTE (mA)
		INDIVIDUAL (mA)	
LED bicolor	10	30	300
Entradas ADC	9	20	180
Sensor de efecto	27	25	675
HALL A3144			
Pulsador	1	5	5
Módulo Bluetooth HC-05	1	20	20
Microcontrolador	1	30	30
TOTAL DE TODAS LAS CORRIENTES			1210

Fuente. Creada por el autor

Es necesario emplear un regulador de voltaje para entregar los 5V de alimentación al circuito y que soporte un mínimo de 1210mA, según los requerimientos de la Tabla 3.12, se selecciona el convertidor DC-DC BUCK MP23070N debido a que es capaz de entregar hasta 2A y su tamaño reducido de 17 mm de ancho, 11 mm de largo y 3.8 mm de alto según el distribuidor (Vistrónica, 2022). En la Figura 3.13 se encuentra una foto del convertidor DC-DC proporcionado el fabricante.

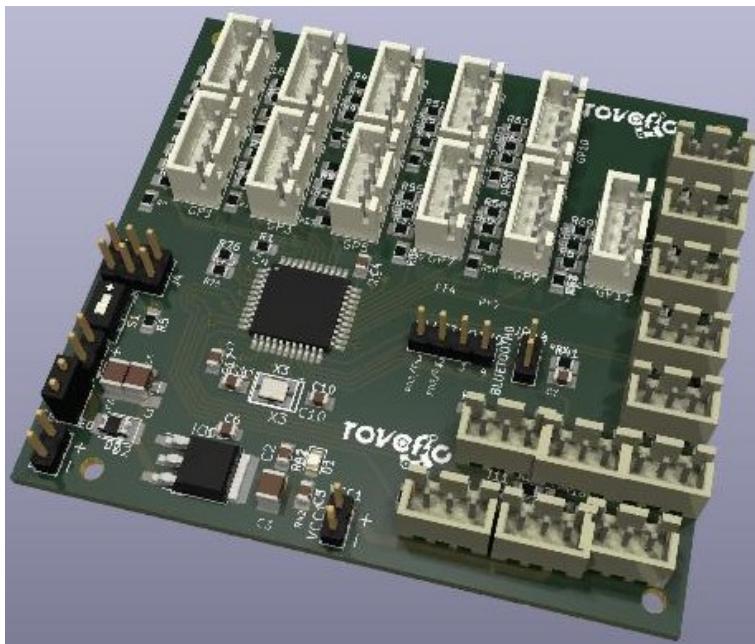
Según el consumo mínimo requerido se seleccionará la batería Lipo de 1000mAh y 7.4V como se describió en la Tabla 3.7 debido a la facilidad de obtención y bajo costo, por ende se contempla uso de la IU de aproximadamente 49 minutos para el consumo de 1210mA.

Figura 3.13*Foto del convertidor DC-DC Buck MP23070N**Fuente.* (Vistrónica, 2022)**Figura 3.14***Esquemático del circuito básico del microcontrolador**Fuente.* Creada por el autor

En la Figura 3.14 se muestra el esquemático del circuito básico del microcontrolador que se encargará de controlar la interfaz de usuario (Microchip, 2022a), y para terminar la parte de diseño electrónico de la IU se mostrará el render del circuito completo impreso en la Figura 3.15, cabe aclarar que del circuito impreso solo se usaran nueve secciones para lectura y 10 indicadores Led.

Figura 3.15

Render del circuito impreso de la interfaz



Fuente. Creada por el autor

3.3.1.1. Análisis y resultados del diseño electrónico. En la primera versión de la IU se había contemplado hacer la lectura de los bloques mediante un circuito cerrado que permitía el flujo de electrones al contacto directo del bloque físico con el sistema de lectura de la IU pero en la validación en el aula con los niños y niñas se presentaron inconvenientes con la herramienta tecnológica, debido a que los usuarios no obtenían el resultado esperado al presentarse una mala lectura del bloque físico por parte de la IU, generando sentimientos como frustración y estrés, permitiendo así el análisis de esta problemática con más detalle desde el hardware y se identificó que se estaba relacionado a una tolerancia de $+/- 5$ micras de centímetro debido a la perdida de foco en el corte láser por falta de mantenimiento y esta misma tolerancia también la tiene la impresión 3D, por estas razones el bloque físico no podría realizar un buen contacto, por ende se contempló implementar un sensor de efecto HALL, debido a que no requiere de un contacto directo y que permite una tolerancia mayor a $+/- 5$ micras de centímetro (Allegro, 2022).

3.3.2. Diseño mecánico e implementación de la interfaz de usuario

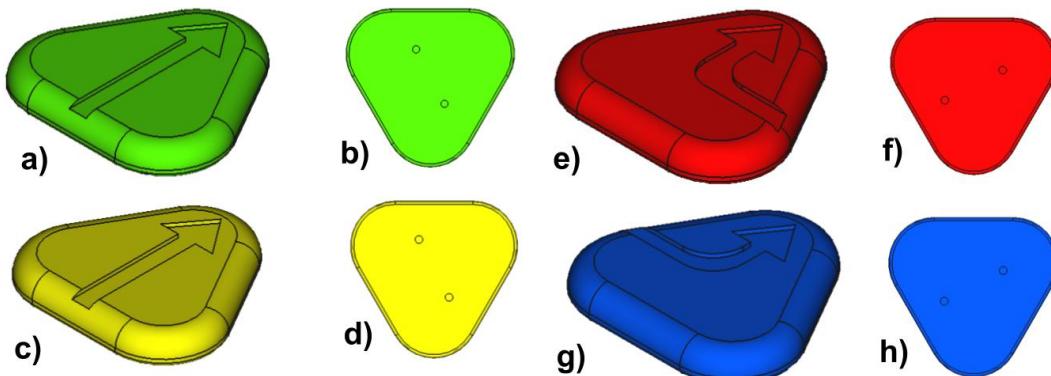
Inicialmente se realizará el diseño mecánico de la interfaz de usuario para posteriormente acoplarlo con la parte electrónica.

3.3.2.1. Diseño mecánico de la interfaz de usuario. Teniendo en cuenta que cada bloque debe tener una decodificación diferente se procederá a realizar el diseño del bloque físico en forma de un triángulo equilátero, y con base a la legislación colombiana para los juguetes, las esquinas deben de estar redondeadas, además, a cada bloque se le hará una flecha en bajo relieve que indique su sentido o dirección. El bloque se dividirá en tres partes: flecha, parte intermedia, y parte inferior, además estará ajustado con dos tornillos comerciales M3 cabeza avellanada de 10mm y tres M3x6. Para su implementación y pruebas iniciales será impresa en 3D usando material PLA.

En la Figura 3.16 se muestra la flecha en bajo relieve de cada bloque físico en vista axonométrica e inferior con las perforaciones para los tornillos.

Figura 3.16

Parte superior del bloque físico: flechas de dirección



a) y b): bloque hacia adelante; c) y d): bloque hacia atrás; e) y f): bloque giro hacia la derecha; g) y h); bloque giro hacia la izquierda.

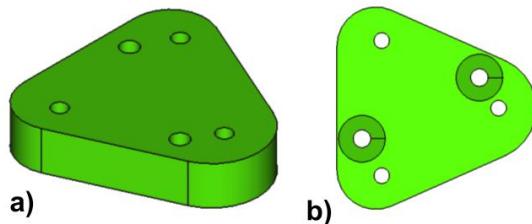
Fuente. Creada por el autor

En la Figura 3.17 se puede observar la parte intermedia entre la flecha e inferior con una vista axonométrica, e inferior donde se pueden apreciar las perforaciones pasantes para los

tornillos, dos chaflanes para la cabeza de los tornillo avellanado que sujetan esta pieza con el bloque. Esta parte es la misma para los cuatro bloques físicos.

Figura 3.17

Parte intermedia del bloque físico



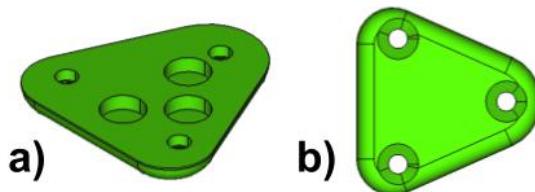
a) vista axonométrica; b) vista inferior; c) vista axonométrica posterior.

Fuente. Creada por el autor

En la Figura 3.18 se observa la parte inferior del bloque físico con una vista axonométrica e inferior con tres perforaciones pasantes para los tornillos con chaflán para la cabeza, y las perforaciones para la ubicación de los imanes. Por la fuerza magnética se usarán imanes de Neodimio para mejorar la lectura de la señal que realizaría el sensor de efecto HALL.

Figura 3.18

Parte inferior del bloque físico

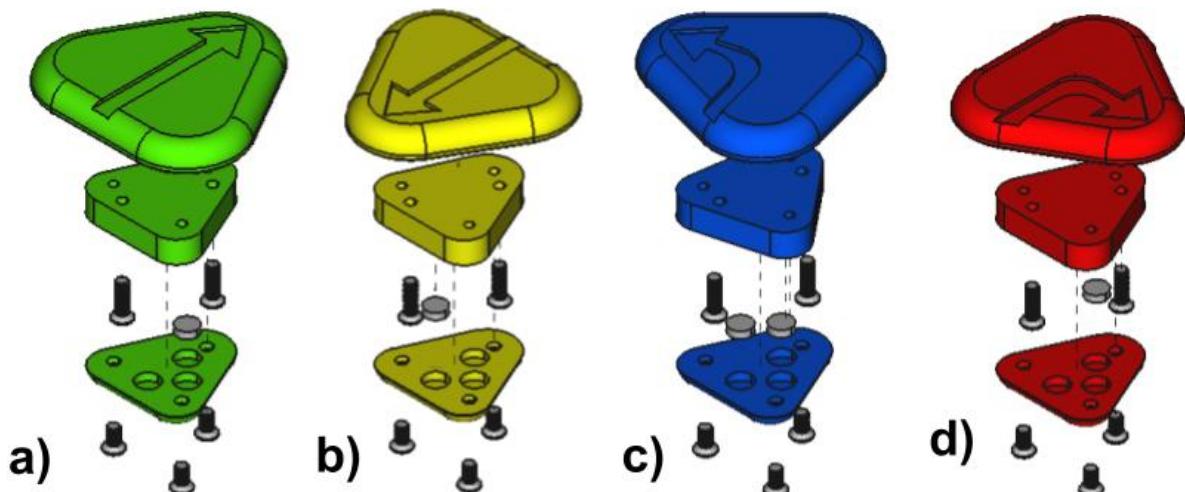


a) vista axonométrica; b) vista inferior.

Fuente. Creada por el autor

El explosionado de los cuatro bloques se muestra en la Figura 3.19.

En esta Figura 3.19 se aprecian los imanes de neodimio entre la parte intermedia del bloque e inferior, adicionalmente se muestra que el bloque hacia adelante en la sección a) tendría el

Figura 3.19*Explosionado de los bloques físicos*

a) bloque hacia adelante; b) bloque hacia atrás; c) bloque de giro hacia la izquierda y d) bloque de giro hacia la derecha.

Fuente. Creada por el autor

dato lógico 001, el bloque hacia atrás en la sección b) tendría el dato lógico 010, el bloque de giro hacia la izquierda en la sección c) tendría el dato lógico 011, y el bloque de giro hacia la derecha en la sección d) tendría el dato lógico 100.

Como se mencionó en la Subsección 3.2.2 el tamaño de la interfaz de usuario dependerá del tamaño del bloque físico y de la cantidad de estos, por esta razón y con el objetivo que los bloques físicos tengan una distancia prudente para que no colacionen y se mantenga una estética, se definió que el ancho es de 280 mm, largo de 280 mm y para la altura de la IU se tuvo en cuenta las siguientes alturas:

- Acrílico de la tapa superior de 3 mm
- Acrílico que iría pegada a la tapa superior para soportar los tornillos del circuito impreso del contacto para los bloques de 5 mm
- Circuito impreso del contacto para los bloques de 2 mm
- Batería seleccionada es de 14 mm
- Caja de la batería en acrílico es de 3 mm

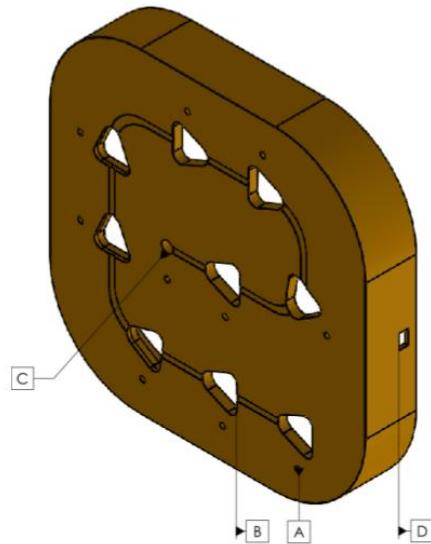
- Altura del acrílico que sería la tapa inferior de 3 mm

el total de las alturas sería de 30 mm y se contempla que la altura total entre tapa superior e inferior sea de 43 mm para que no hayan interferencias con el cableado internamente.

En la Figura 3.20 se ve la parte tapa superior de la IU con los vaciados de: las secciones de lectura de los bloques físicos, los indicadores y el pulsador con sus respectivas descripciones. La IU en la parte interna cuenta con soporte para la sujeción de los tornillos del separador y el circuito impreso de lectura de la IU.

Figura 3.20

Diseño de la interfaz parte superior



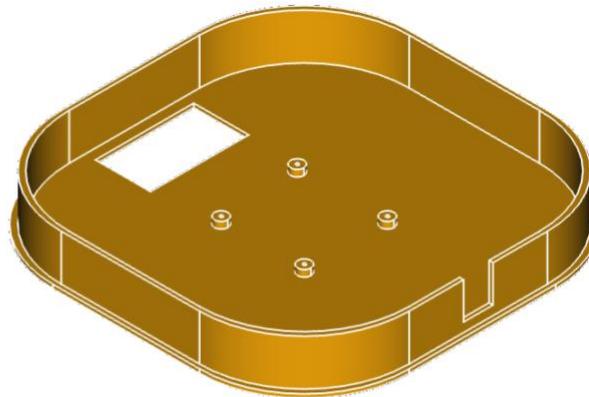
A) diez perforaciones de los indicadores; B) nueve perforaciones de secciones; C) perforación del pulsador; D) perforación de pulsador.

Fuente. Creada por el autor

Ahora en la Figura 3.21 se podrá ver el modelo en 3D del diseño de la tapa inferior de la interfaz. Se observa que el diseño de la tapa inferior de la interfaz cuenta con soportes laterales para ajuste de tapa superior, con el objetivo de darle más resistencia en caso de caída al suelo, además se ve la perforación de la caja que almacenaría la batería, y unos soportes que sobre salen con agujeros para el circuito impreso de la IU que serán en acrílico de 5mm para los tornillos.

Figura 3.21

Diseño de la tapa inferior de la interfaz



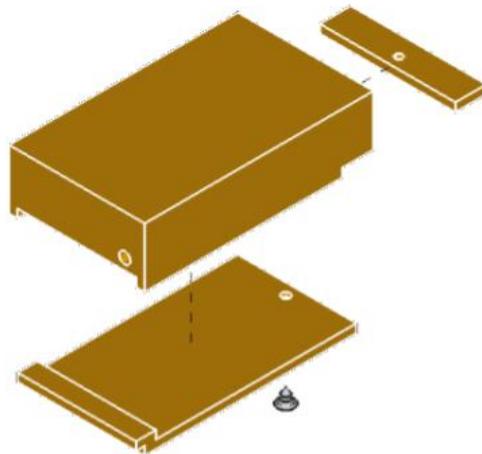
a) vista axonométrica; b) vista inferior.

Fuente. Creada por el autor

Seguidamente la caja de la batería se dividirá en cuatro partes: contenedor de batería, soporte de tapa, tapa de la caja y un tornillo M3 cabeza avellanada de 6mm, y para su diseño se contempló el uso de acrílico de 3mm. El explosionado de estas tres piezas se mostrará en la Figura 3.22, mientras que el contenedor se verá en la Figura 3.23 y la tapa en la Figura 3.24.

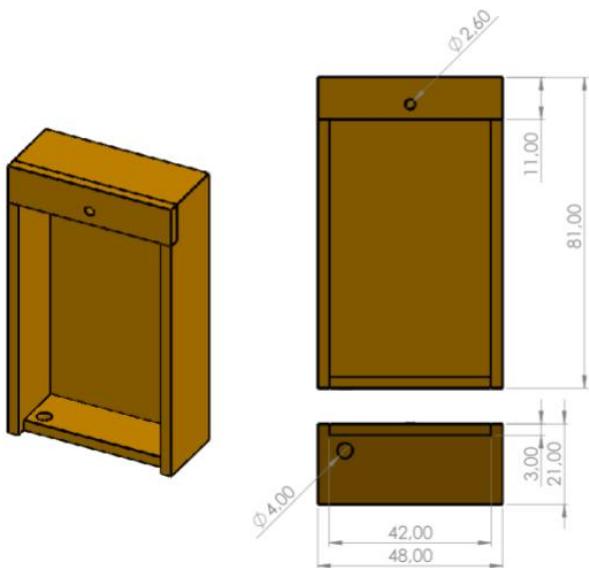
Figura 3.22

Explosionado de la caja de la batería



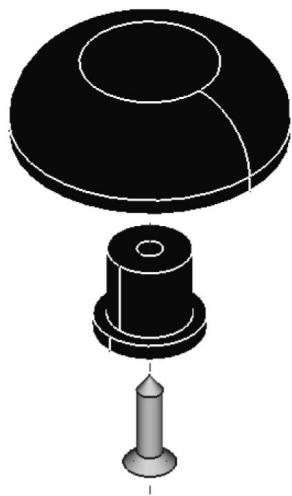
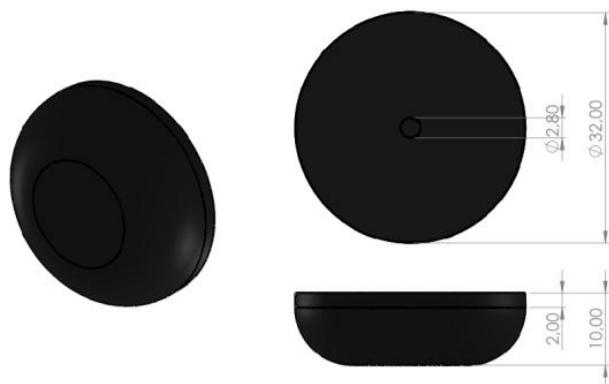
Fuente. Creada por el autor

El botón que enviará la señal al robot se dividirá en dos partes: cabeza y cuello, que se unirán

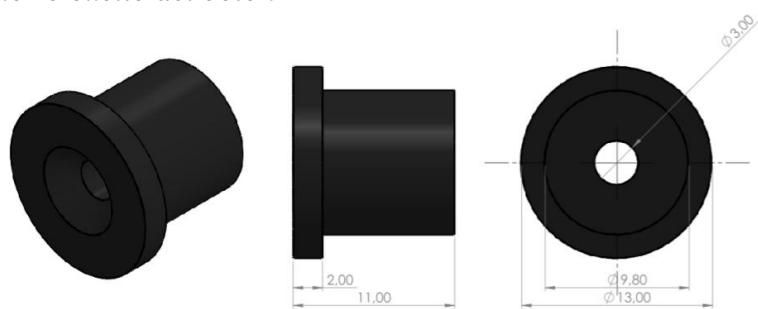
Figura 3.23*Caja de la batería**Fuente.* Creada por el autor**Figura 3.24***Tapa de la caja de batería de la interfaz**Fuente.* Creada por el autor

con un tornillo M3 cabeza avellanada de 8 mm. El explosionado se muestra en la Figura 3.25 y cada pieza se verá en la Figura 3.26 y 3.27.

Después de haber descrito los diseños mecánico y electrónico de la interfaz de usuario se

Figura 3.25*Explosionado botón completo**Fuente.* Creada por el autor**Figura 3.26***Cabeza del botón**Fuente.* Creada por el autor

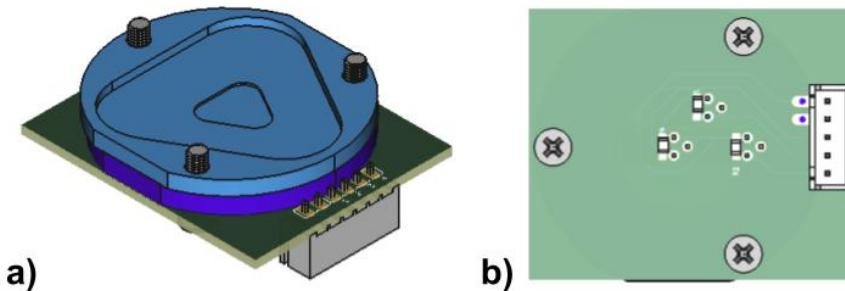
procederá a su implementación.

Figura 3.27*Botón parte inferior o cuello del botón**Fuente.* Creada por el autor

3.3.2.2. Implementación del diseño mecánico y electrónico de la IU. En la Figura 3.28 se muestra el ensamble en vista axonométrica e inferior y en la Figura 3.29 se aprecia el explosionado.

Figura 3.28

Ensamble del contacto para los bloques

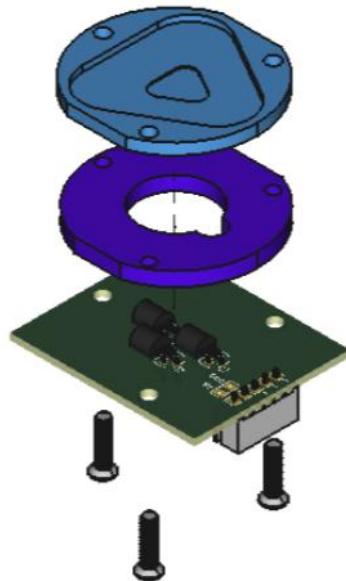


a) vista axonométrica; b) vista inferior.

Fuente. Creada por el autor

Figura 3.29

Explosionado del contacto para los bloques



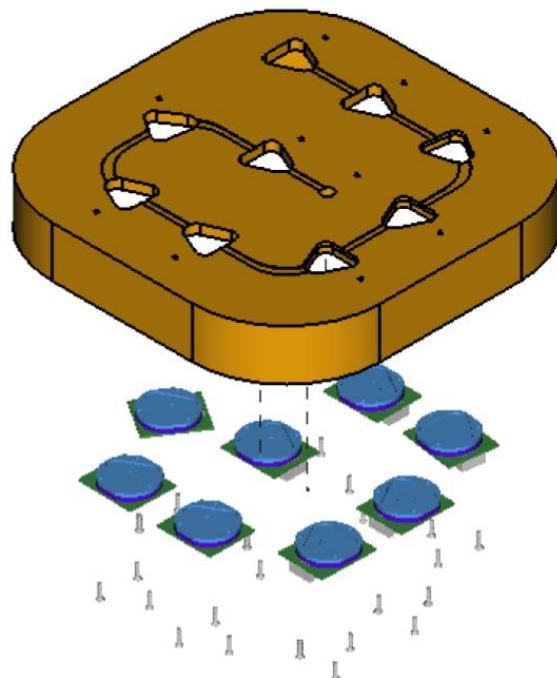
Fuente. Creada por el autor

Continuando con la implementación de la tapa superior del tablero con los contactos para

los bloques físicos, viendo el explosionado en la Figura 3.30, en la Figura 3.31 la implementación desde una vista superior y en la Figura 3.32 una vista inferior.

Figura 3.30

Explosionado de la interfaz y los contactos para los bloques



Fuente. Creada por el autor

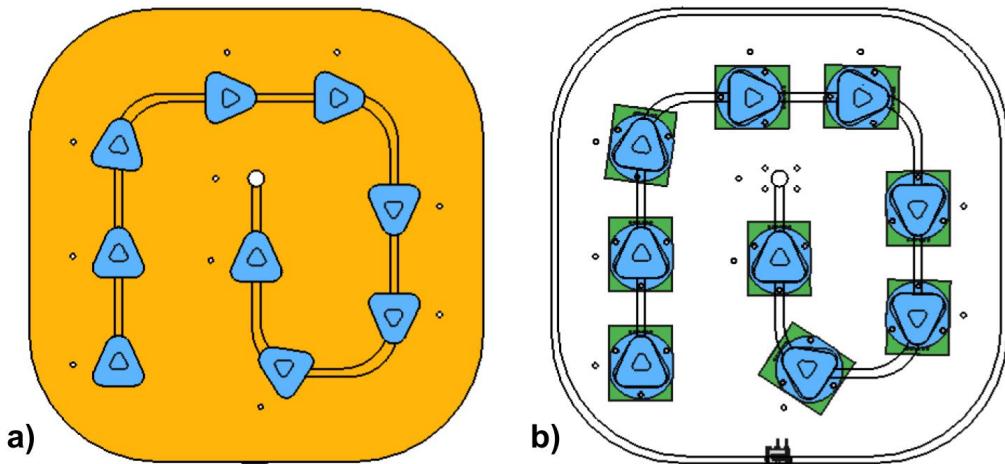
En la Figura 3.31 se aprecia la interfaz y los contactos para los bloques desde la vista superior, en a) se ve la interfaz real y en b) la interfaz de usuario está en modo solo alambres para verificar que todas las perforaciones coinciden. También en esta imagen es posible apreciar el switch de encendido y apagado de la IU.

En la Figura 3.32 también se aprecia la interfaz y los contactos para los bloques físicos pero en ésta se ve desde la vista inferior, en a) se ve la interfaz real y en b) la tapa de la interfaz esta en modo alambres para verificar la coincidencia y no colisión de los elementos.

El botón o el pulsador de la IU que será el encargado de enviar la información a la PM, ver la Figura 3.33. En esta imagen se aprecia una base para el circuito impreso del pulsador que se

Figura 3.31

Vista superior de la interfaz y los contactos para los bloques

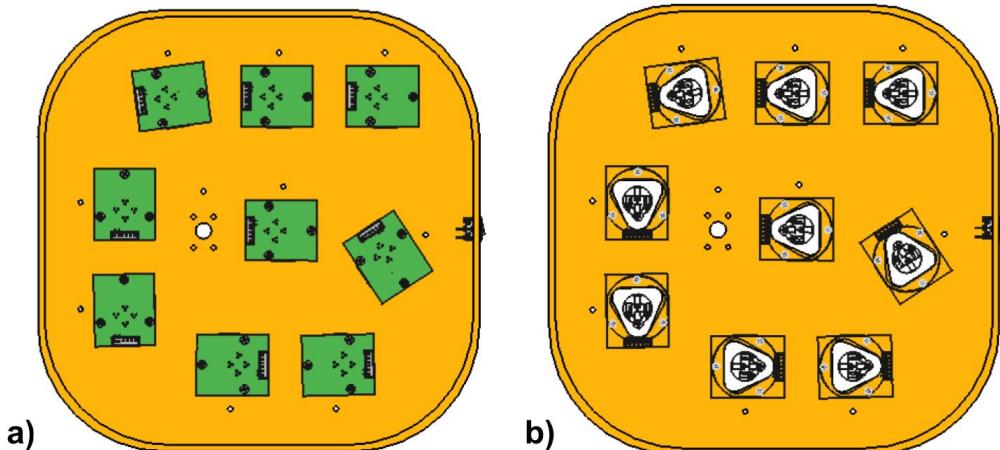


a) vista modelo real; b) vista modelo solo alambres de la interfaz de usuario.

Fuente. Creada por el autor

Figura 3.32

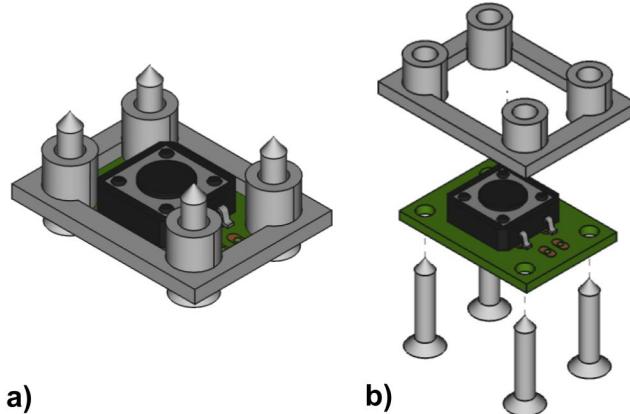
Vista superior de la interfaz y los contactos para los bloques



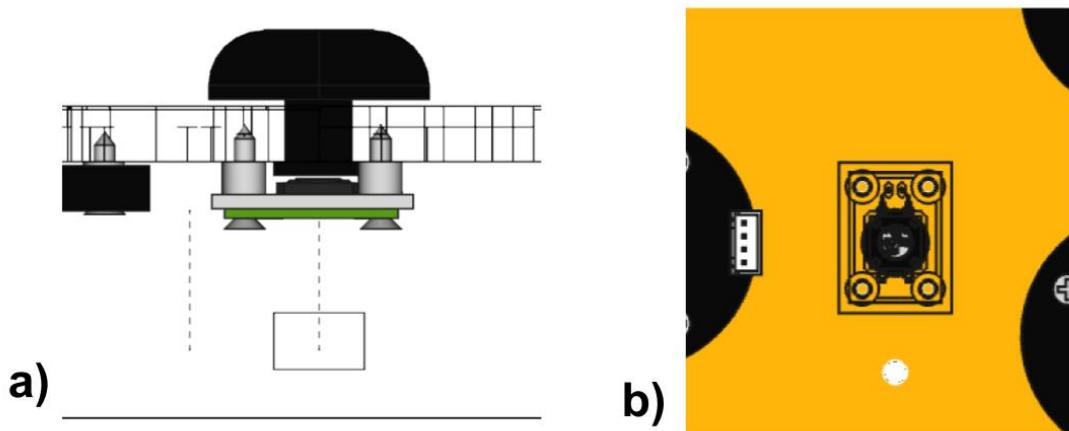
a) vista modelo real; b) vista modelo solo alambres de la interfaz de usuario.

Fuente. Creada por el autor

imprime en 3D, el circuito impreso con el pulsador y cuatro tornillos avellanados M3 de 12mm, y la implementación de la IU se muestra en la Figura 3.34.

Figura 3.33*Ensamble del pulsador*

a) vista axonométrica; b) explosionado.

Fuente. Creada por el autor**Figura 3.34***Implementación del pulsador y el botón en la interfaz*

a) vista lateral con la interfaz en modo solo alambres; b) vista inferior con el pulsador en modo solo alambres.

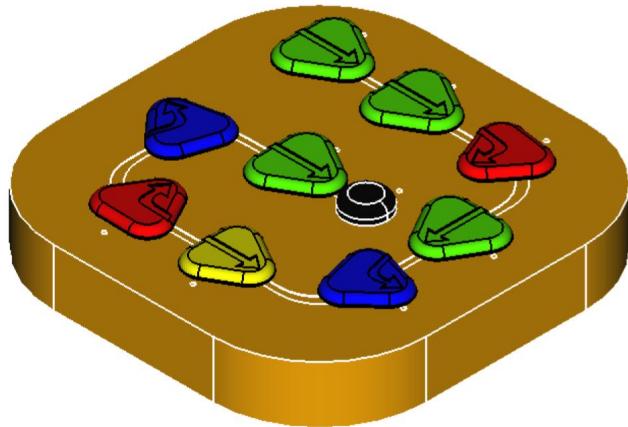
Fuente. Creada por el autor

En la Figura 3.34 se ve la implementación de la plataforma de usuario y el pulsador. En a) se observa desde la vista lateral y la interfaz en modo alambre para verificar que efectivamente se puede pulsar. En b) se observa el pulsador en solo alambres, corroborando que coinciden las perforaciones.

Ahora se verificará que los contactos en el tablero coincidan con los bloques como se aprecia en la Figura 3.35 y 3.36.

Figura 3.35

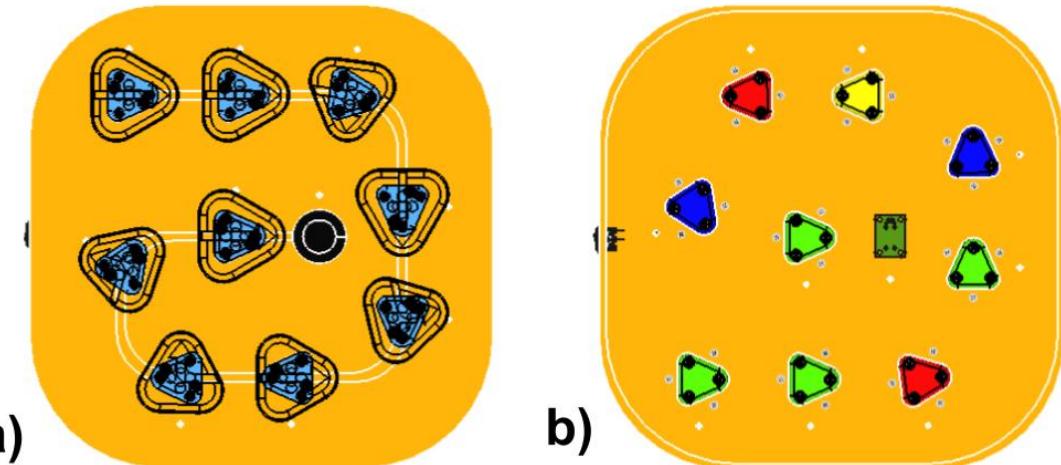
Ensamble de la tapa superior de interfaz de usuario con los contactos, pulsador, botón y bloques



Fuente. Creada por el autor

Figura 3.36

Ensamble de la tapa superior de interfaz con los contactos, pulsador, botón y bloques



a) vista superior y los bloques en modo solo alambre; b) vista .

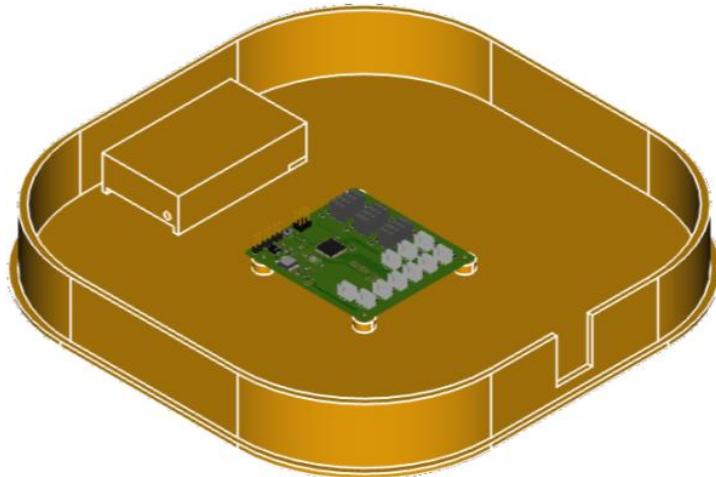
Fuente. Creada por el autor

En la Figura 3.36 es posible evidenciar que el ensamble visto desde la parte superior o inferior coinciden los conectores de los contactos y los bloques.

Seguidamente se continua con la implementación de la tapa inferior de la interfaz, el circuito impreso del tablero se muestra en la Figura 3.37, y el ensamble de la base inferior, la tarjeta electrónica y la caja de la batería en la Figura 3.38.

Figura 3.37

Implementación de la tapa inferior del tablero, el circuito impreso del tablero y la caja para la batería sin la tapa inferior

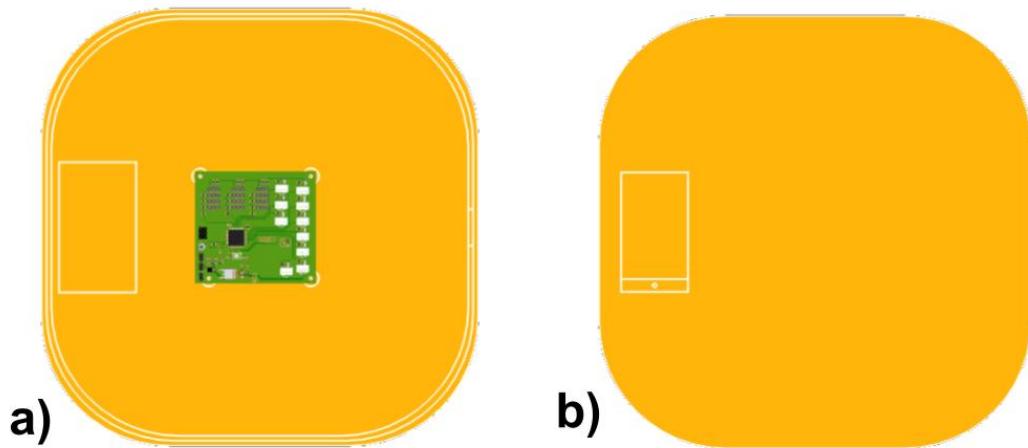


Fuente. Creada por el autor

En la Figura 3.38 se ve el ensamble de la tapa inferior de la IU con el circuito impreso y la caja de la batería desde la vista superior e inferior sin la tapa del porta baterías.

Figura 3.38

Implementación de la tapa inferior del tablero, el circuito impreso de la IU y la caja para la batería sin la tapa inferior



a) vista Superior; b) vista inferior.

Fuente. Creada por el autor

3.4. Diseño de la plataforma móvil (PM)

Para el diseño de la PM hay que tener en cuenta el tamaño de sus componentes interiores y se iniciará con la descripción del diseño electrónico seguido del diseño mecánico y luego su implementación.

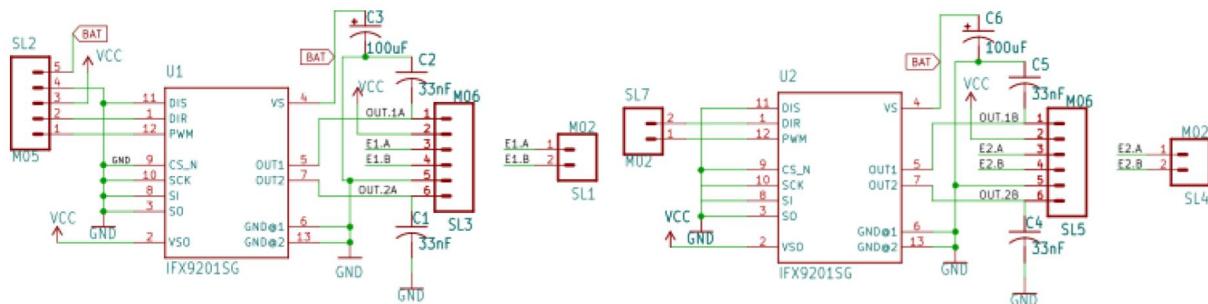
3.4.1. Diseño electrónico de la plataforma móvil

Para la plataforma móvil con anterioridad en la Subsección 3.2.4 se definieron los elementos electrónicos que se van a usar: driver para la variación de velocidad y sentido de giro de los motores DC, y microcontrolador para la recepción de la información de la IU, lectura de los encoder y control de posición de los motores DC.

Para la implementación del driver IFX9201 se sigue el circuito de aplicación H-Bridge con la conexión a tierra de los pines SI, CSN y SCK del protocolo de comunicación SPI y SO debido a que no se va usar ese protocolo de comunicación interfaz de periféricos en serie (SPI), y la bandera de error (SO) porque trabaja con este protocolo, adicionalmente solo genera un alto mientras no esté ningún pin del driver en uso y luego genera un tren de pulsos para corroborar el SCK como lo indica el fabricante (Infeneon, 2022), además, el condensador cerámico y el diodo zener estarán en el esquemático del circuito de potencia de la PM. El esquemático electrónico del driver IFX9201 es mostrado en la Figura 3.39.

Figura 3.39

Esquemático electrónico del driver IFX9201



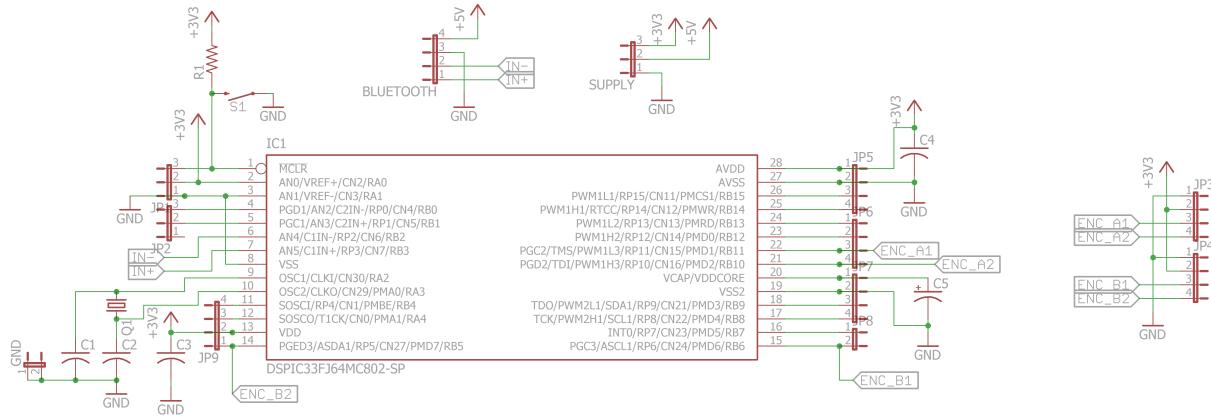
Fuente. Creada por el autor

El circuito general del microcontrolador dsPIC33FJ128MC802 recomendado por el fabricante (Microchip, 2022c) se puede observar en la Figura 3.40. También en la Figura 3.40 se

aprecia la conexión del módulo Bluetooth HC-05, encoders y conexiones de alimentación de voltaje.

Figura 3.40

Circuito electrónico del microcontrolador dsPIC33FJ128MC802



Fuente. Creada por el autor

En la Figura 3.41 se ve el render el circuito impreso del microcontrolador y el driver.

Figura 3.41

Render del circuito impreso microcontrolador dsPIC33FJ128MC802



Fuente. Creada por el autor

Para la implementación de los indicadores de la plataforma móvil se usó el mismo esquema electrónico mostrado en la Figura 3.10 y se adaptaron los cálculos según la aplicación del

microcontrolador.

Seguidamente después de haber conocido todos los esquemáticos y circuitos impresos que usará la plataforma, se analizará el consumo de corriente para la selección de la etapa de potencia y la batería como se verá en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13

Tabla de consumo de corriente de la plataforma móvil

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	CONSUMO DE CORRIENTE	TOTAL POR COMPONENTE (mA)
		INDIVIDUAL (mA)	
LED bicolor	2	30	60
Driver IFX9201	2	30	60
Micromotor HP 250:1	2	750	1500
Encode magnético 12CPR	2	50	100
Módulo Bluetooth HC-05	1	20	20
Microcontrolador	1	30	30
TOTAL DE TODAS LAS CORRIENTES			1770

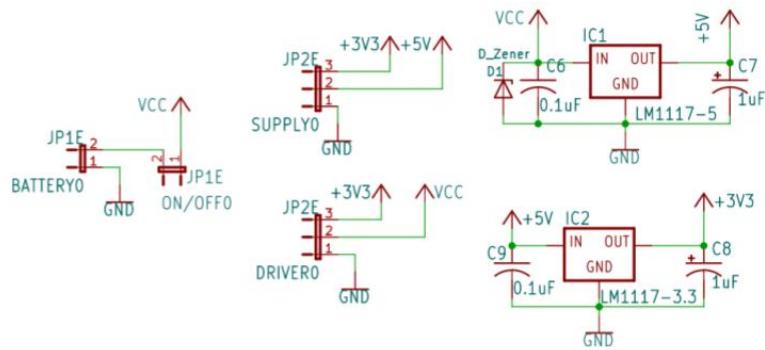
Fuente. Creada por el autor

Según el consumo mínimo requerido se seleccionará la batería Lipo de 1000mAh y 7.4V como se describió en la Tabla 3.13 debido a la facilidad de obtención y bajo costo, por ende se calcula un uso de la PM de aproximadamente 33 minutos para el consumo de 1770mA.

Para la implementación del sistema de potencia se ha tenido en cuenta que se van a manejar tres diferentes voltajes: voltaje de la batería para la operación de los motores, 5V para el módulo Bluetooth y 3.3V para el microcontrolador y encoder. Para la regulación de 5V se usará el regulador LM1117-5.0V con el encapsulado TO-220 en la configuración básica ajustable (Instruments, 2022) sin las resistencias ajustables debido a que la referencia seleccionada viene con un voltaje de salida fijo de 3.3V, y la corriente que soporta es de 800mA para el uso del módulo Bluetooth que consume 20mA. Ahora, con la regulación de los 3.3V del consumo del microcontrolador y encoder de 130mA se opta también por el LM1117-3.3V con el encapsulado TO-220 con la conexión anteriormente mencionada. El esquemático de la etapa de potencia de la PM se podrá ver en la Figura 3.42 y el render en la Figura 3.43.

Figura 3.42

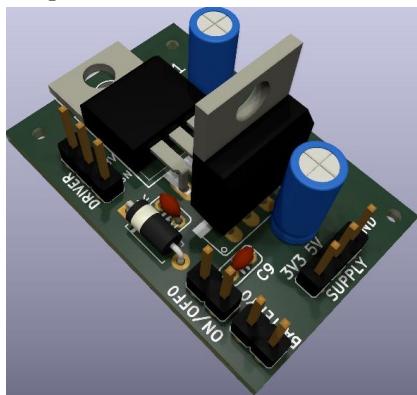
Esquemático del circuito de potencia de la PM para 3.3V y 5V



Fuente. Creada por el autor

Figura 3.43

Render del circuito electrónico de potencia de la PM



Fuente. Creada por el autor

Después de haber terminado el diseño electrónico de la plataforma móvil se continuará con el diseño de la estructura mecánica del robot.

3.4.2. Diseño mecánico e implementación de la plataforma móvil (PM)

Inicialmente se realizará el diseño mecánico de la PM para posteriormente implementarlo junto a la parte electrónica.

3.4.2.1. Diseño mecánico de la plataforma móvil. Inicialmente se realizará una tabla con los componentes electrónicos que tendrá la PM especificando su tamaño y peso para tener en cuenta como punto de partida para la realización del diseño mecánico, y la información se ve en Tabla 3.14.

Tabla 3.14

Tabla de consumo de corriente de la plataforma móvil

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	DIMENSIONES (mm)	PESO	PESO TOTAL
			(g)	(g)
LED bicolor	2	8.6x5x5	1	2
Driver IFX9201	2	7.8x10.3x2.35	1	2
Micromotor HP 250:1	2	26x10x12	9.5	19
Encoder magnético 12CPR	2	14.2x11.6x5	1.5	3
Módulo Bluetooth HC-05	1	34x15x3.2	3	3
Microcontrolador	1	35.5x8x5	3	3
PCB Microcontrolador y driver	1	52.4x51x3	15	15
Batería Lipo 1000mAh 7.4V	1	72x34x14	70	70
PESO TOTAL DE TODOS LOS ELEMENTOS			117	

Fuente. Creada por el autor

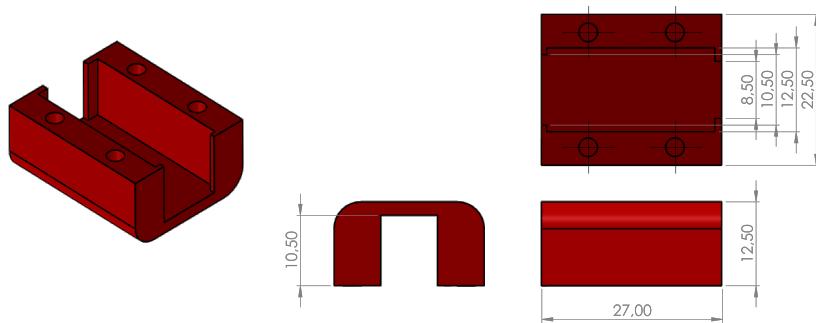
Analizando la Tabla 3.14 se identifica que los elementos más pesados y de mayor dimensión son la batería, los dos motores DC en conjunto con sus encoder y los circuitos impresos, por ende para mantener el centro de gravedad lo más bajo posible se diseñará una base principal para la batería, los dos motores DC y sus encoder para no sobre pasar los límites establecidos, y facilitar la manipulación de la PM para los niños.

Como se mencionó anteriormente los motores DC y la batería definirán el ancho y largo del robot, por ende se debe garantizar que los motores DC y la batería estén ajustados a la base principal para que desplazamiento del robot no se afecte por la tolerancia o desface de

la alineación en la ubicación de los motores DC. Para el diseño del soporte del motor DC se contempla que no debe moverse en ningún sentido y debe tener una tolerancia de $\pm 0,5\text{mm}$ para su ajuste según la tolerancia de la impresora 3D, y también que va ir ajustado a la base principal por medio de cuatro tornillos M3x6 como se ve en la Figura 3.44.

Figura 3.44

Diseño del soporte de los micro motores DC

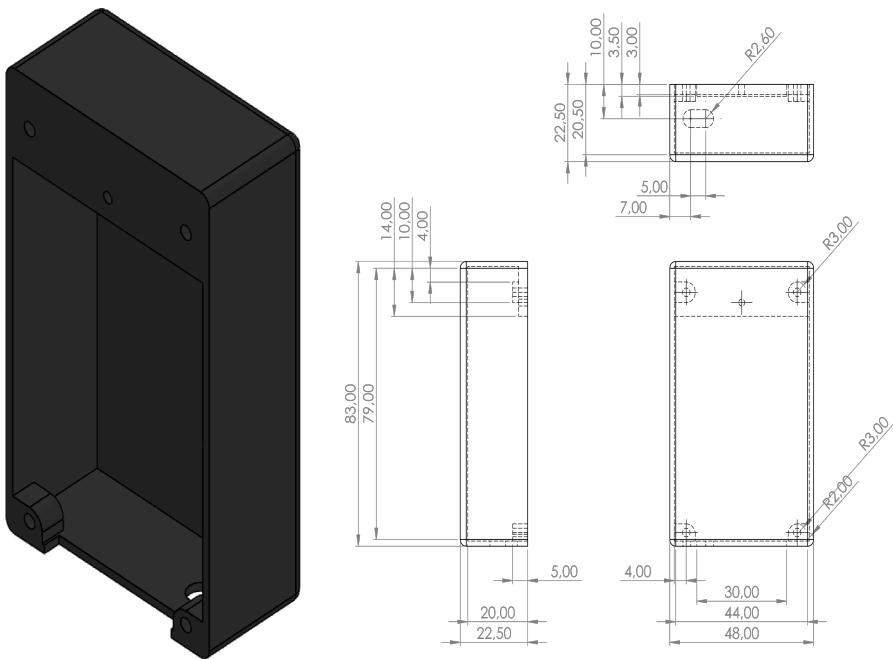
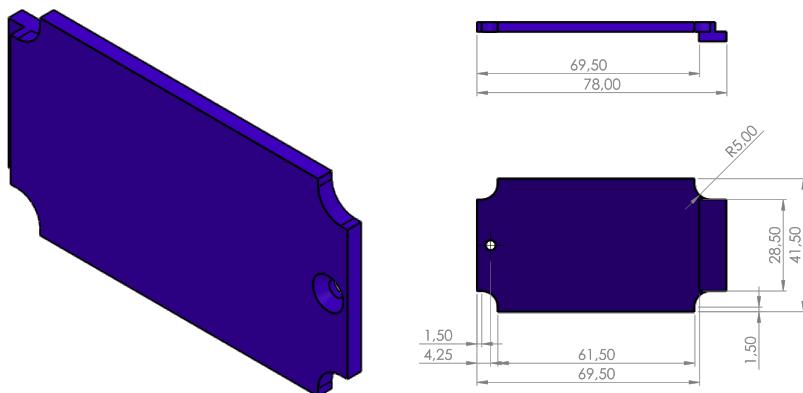


Fuente. Creada por el autor

Para el diseño del porta batería, también se tuvo en cuenta que debe ser fácil acceso de poner y quitar la batería para su respectiva carga, por ende se contempló un diseño independiente de la base principal que también tuviera un soporte para la tapa, y los cables de carga y conexión a la PM de la batería y este diseño se ve en la Figura 3.45 .

Para el diseño de la tapa del porta baterías se contempló un tolerancia de $\pm 0,5\text{mm}$ y un vaciado con chaflán para un tornillo con cabeza avellanada de M3x6, como se ve en la Figura 3.46.

Como la plataforma móvil será una arquitectura de locomoción diferencial, debe tener algo en la parte frontal y posterior que evite que el robot se balancee cuando se dirige hacia adelante o hacia atrás, para ello se utilizará la referencia “mini rueda loca 3PI” del distribuidor (Vistro-nica, 2022).

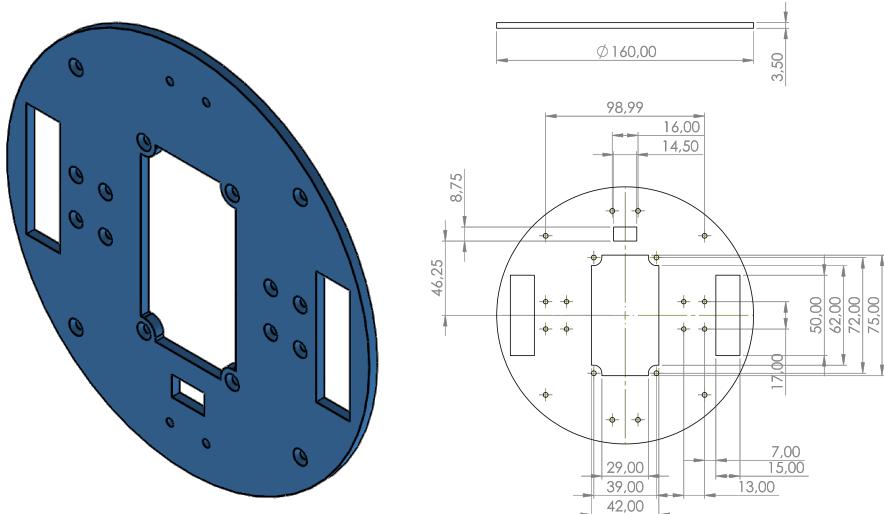
Figura 3.45*Diseño del porta batería**Fuente.* Creada por el autor**Figura 3.46***Diseño de la tapa del porta baterías de la PM**Fuente.* Creada por el autor

Para el diseño de la base principal del robot se contemplan los dos motores DC, batería, las dos ruedas locas el switch principal, y teniendo en cuenta que el tamaño debe ser lo más pequeño posible para facilitar la manipulación de los niños, adicionalmente con el objetivo de

aprovechar el espacio no usado en el robot, se diseñó redondo. El diseño de la base principal se muestra en la Figura 3.47.

Figura 3.47

Diseño de la base principal de la PM

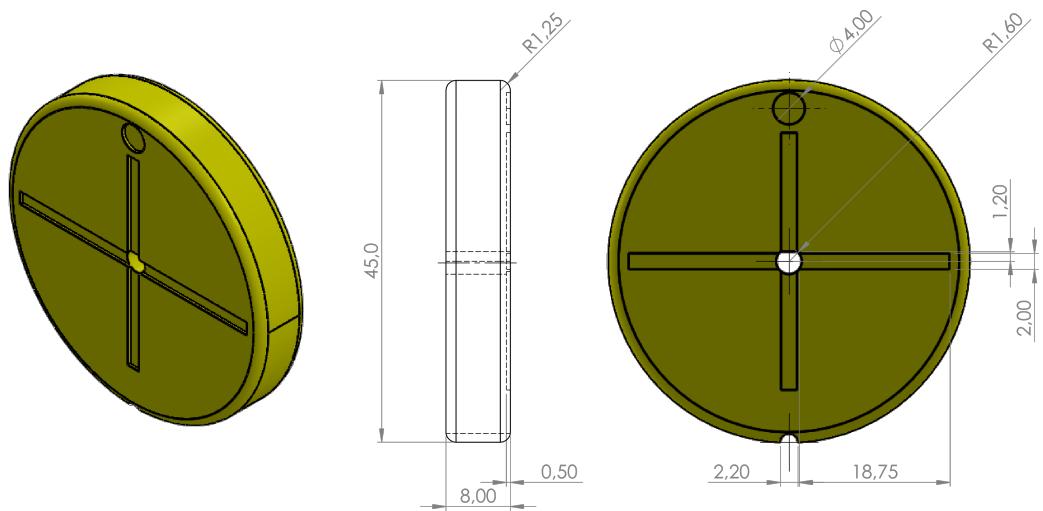
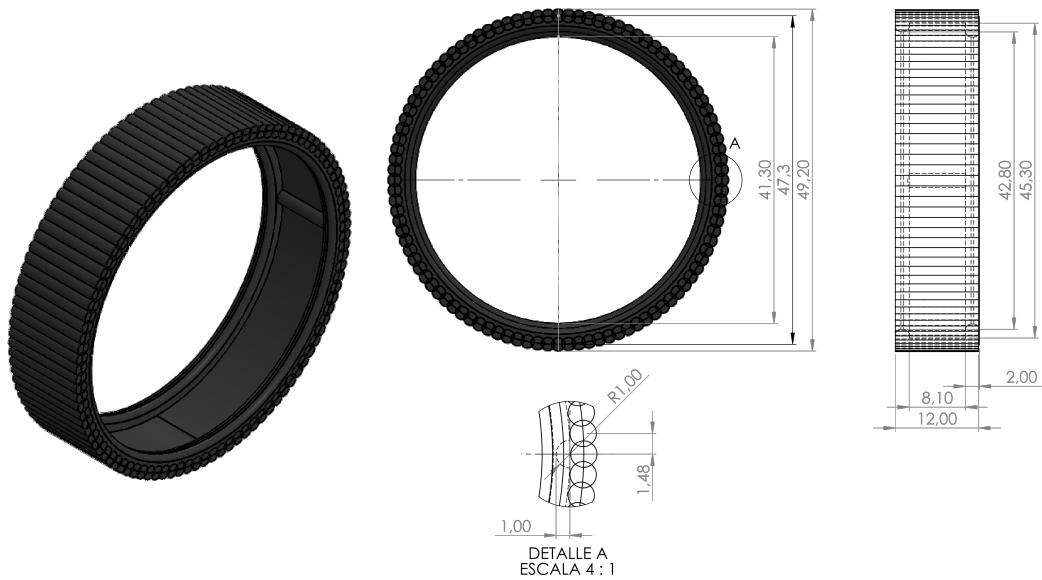


Fuente. Creada por el autor

Teniendo en cuenta que el robot se va mover en una superficie que no es 100% plana, con posibles ondulaciones y para garantizar la tracción de las ruedas o contacto directo con la superficie para su desplazamiento, el radio de la rueda del robot debe tener una diferencia en altura de la rueda loca de 2 a 3, aproximadamente 2,5 milímetros según las mediciones realizadas.

Como la rueda será impresa en 3D se debe tener en cuenta la tolerancia de $\pm 0,5\text{mm}$ no solo en su ajuste sino en la concentricidad del eje, por ende se hará 3mm más delgado del vaciado contemplado para está y sería de 15mm . Adicionalmente se diseñará la rueda en dos partes:rin y neumático.

El rin de la rueda se imprime en PLA y el neumático en el en material flexible TPU de alta resistencia a los impactos, dureza Shore A de 95 para generar tracción a la rueda (Ultimaker, 2022b). En la Figura 3.48 se observa la rueda con la perforación central para encajar al motor DC, mientras que en la Figura 3.49 se ve el neumático y entre los dos tienen un sistema de encaje a presión para que el neumático siempre se mueva al realizar un desplazamiento la rueda.

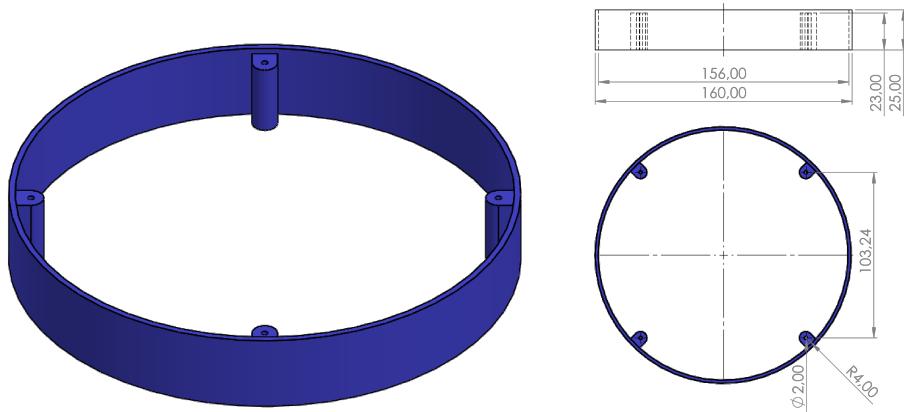
Figura 3.48*Diseño de la rueda**Fuente.* Creada por el autor**Figura 3.49***Diseño del neumático**Fuente.* Creada por el autor

Debido a que el tamaño del circuito impreso del microcontrolador en conjunto con el driver, etapa de potencia y los indicadores no permiten ser ubicados en la base principal, se diseña una base en la parte superior de la batería con una base exterior para soportarlo, y tendrá una tapa con los ojos para indicadores del robot con el objetivo de hacerlo más atractivo visualmente para los niños.

La base exterior tendrá un grosor de 2mm y cuatro soportes con agujeros para atornillar a la base principal y la tapa superior, con unos soportes para ajustar la base del circuito impreso del microcontrolador con los drivers, etapa de potencia y los indicadores. En la Figura 3.50 se muestra la base exterior y en la Figura 3.50 el diseño de la base de los circuitos impresos con extrusiones para fijar con tornillos M3x6 los circuitos impresos y adicionalmente tiene una base para ajustar a presión el módulo Bluetooth.

Figura 3.50

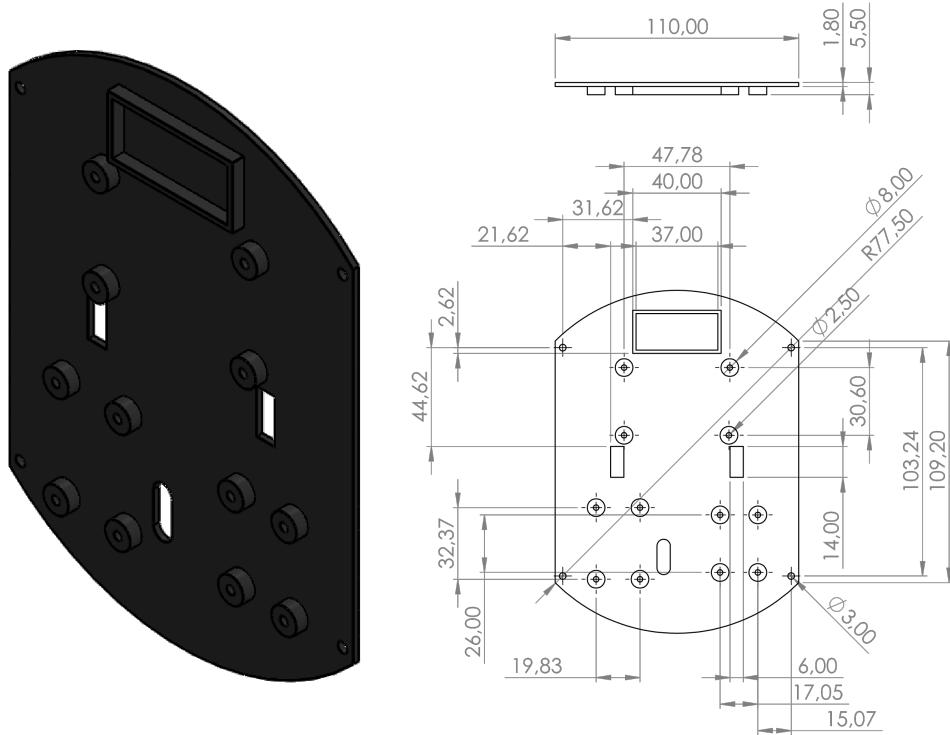
Diseño base exterior de la PM



Fuente. Creada por el autor

Figura 3.51

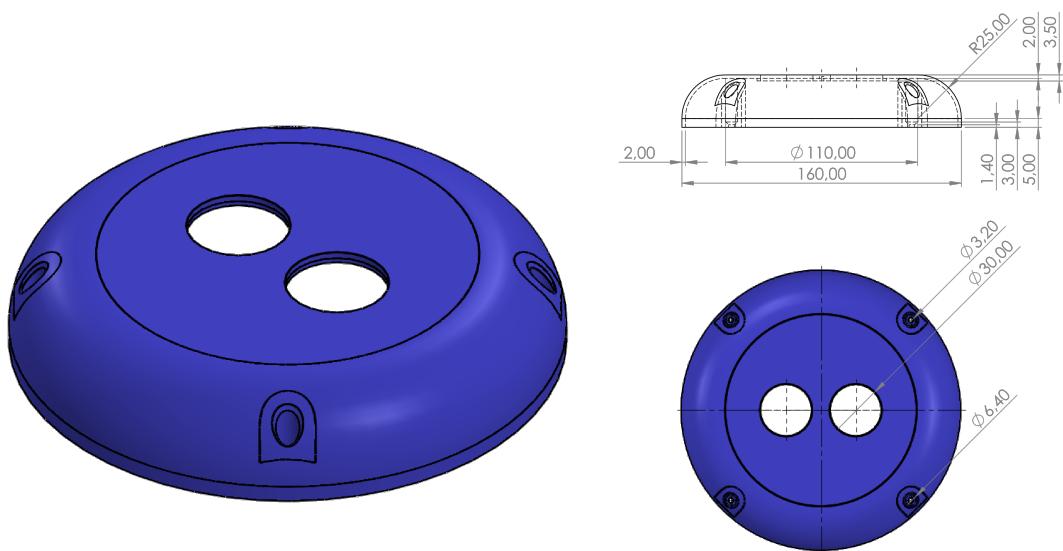
Diseño base de los circuitos impresos de la PM



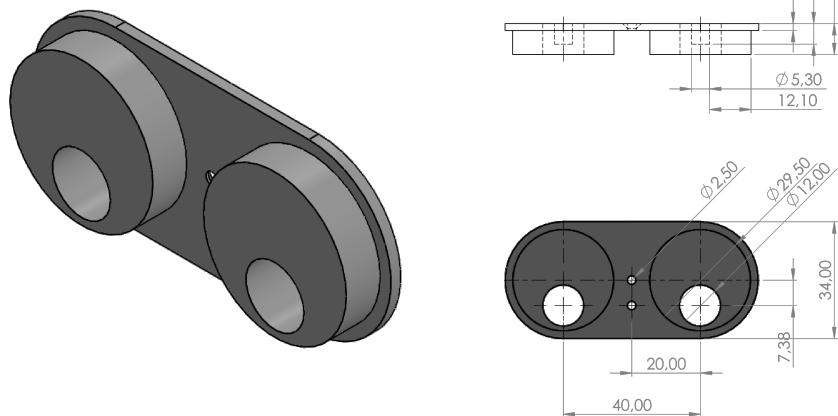
Fuente. Creada por el autor

La tapa tiene un redondeando en la parte superior, también tiene los mismos cuatro soportes para atornillar a la base exterior, y una perforación para los ojos que llevarían los indicadores de estado del robot que irían atornillados por medio de un M3x6.en la Figura 3.52 se ve el diseño de la tapa superior de la PM. La altura de la tapa se definió con base a la medida de la parte superior del componente electrónico más alto (Regulador LM1117-3.3V) hasta la base impresa en 3D con un medida aproximadamente de 25mm y se le sumaron 5mm para que no hubieran obstrucción o colisión con los cables o ojos del robot.

Para el diseño de los ojos que llevarían los dos indicadores de la PM se realizó una actividad con apoyo de la docente de ROVOFIC SAS, que oriento a cuatro estudiantes para realizar una propuesta de como deberían ser los ojos del robot y como fruto a esto, se contempló un diseño de dos partes como si tuviera una iris. El diseño de la parte exterior del ojo se aprecia en la Figura 3.53, cuenta con perforaciones para el iris del ojo, y dos tornillos M3: uno para ajustar

Figura 3.52*Diseño tapa superior de la PM**Fuente.* Creada por el autor

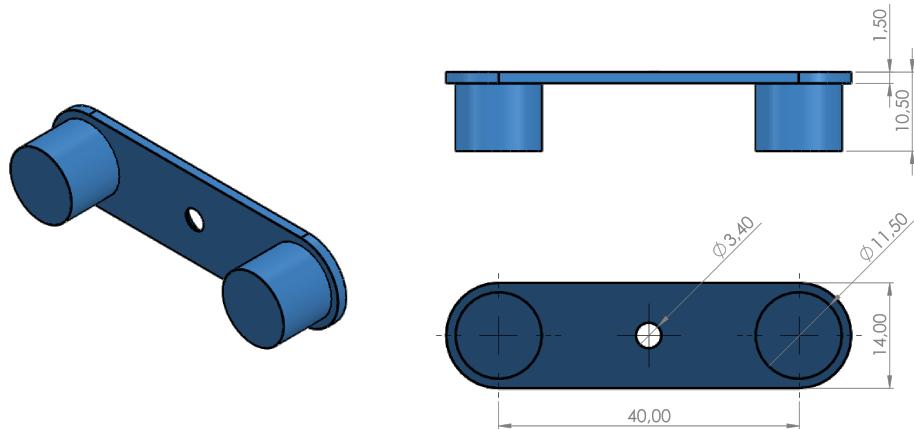
el ojo exterior y/o otro para ajustar el iris, cada uno con un chaflán para la cabeza del tornillo avellanado. El tamaño del ojo exterior e iris se contempló superior para que sobresalga de la tapa de la PM con fines pedagógicos: con el objetivo que los niños le puedan hacer una cara a su gusto al robot.

Figura 3.53*Diseño del ojo exterior de la PM**Fuente.* Creada por el autor

En la Figura 3.54 se muestra el diseño del iris del ojo del robot con un vaciado y chafan para un tornillo M3x6 de cabeza avellanada.

Figura 3.54

Diseño del iris de ojo de la PM



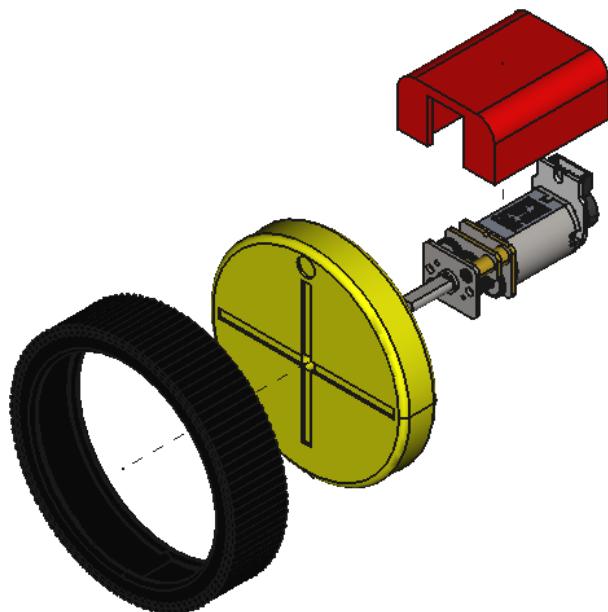
Fuente. Creada por el autor

Después de haber terminado el diseño mecánico se procederá a la implementación de la parte electrónica y mecánica de la PM.

3.4.2.2. Implementación del diseño mecánico y electrónico de la PM. El proceso de ensamble de la plataforma móvil en explosionado se muestre desde la Figura 3.55 hasta la Figura 3.59 y el ensamblaje final en la Figura 3.60.

Figura 3.55

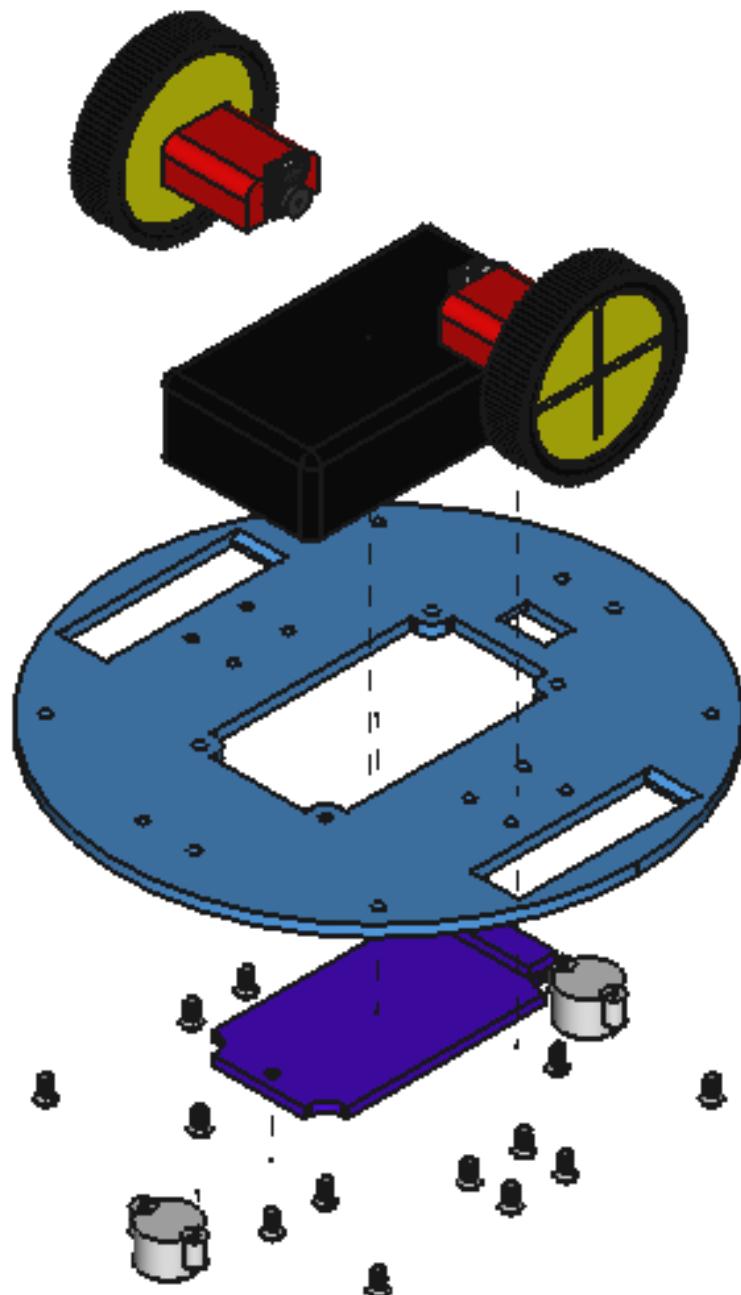
Explosionado del ensamblaje del motor DC, el encoder, el soporte, rueda y neumático de la PM



Fuente. Creada por el autor

Figura 3.56

Explosionado del ensamble de la base principal, el porta batería, tapa de porta batería, las dos ruedas locas, tornillos M3x6 y ensamble del motor DC de la PM



Fuente. Creada por el autor

Después de haber terminado la implementación de la aparte electrónica y mecánica de la

Figura 3.57

Explosionado del ensamblaje anterior con la base exterior, base de los circuitos impresos, circuito impreso del microcontrolador con drivers, etapa de potencia y indicadores de la PM

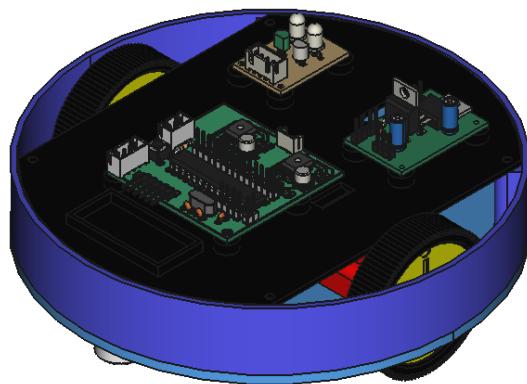


Fuente. Creada por el autor

plataforma móvil se continuará con la implementación del sistema de control para está.

Figura 3.58

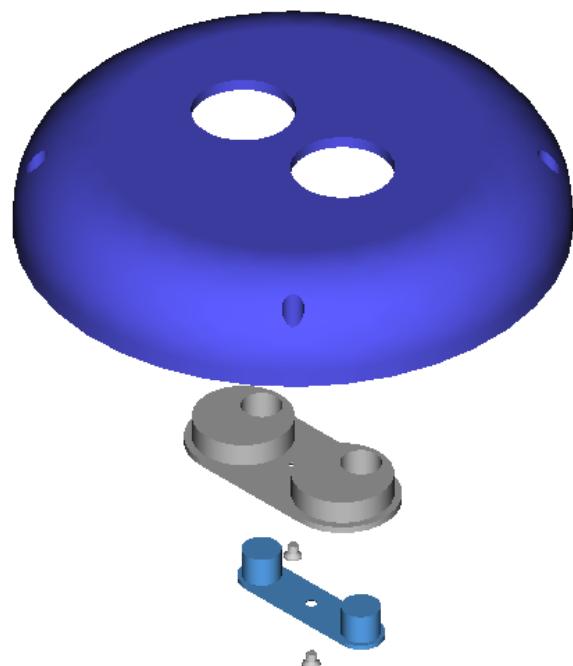
Ensamble anterior con la base exterior, base de los circuitos impresos, circuito impreso del microcontrolador con drivers, etapa de potencia y indicadores de la PM



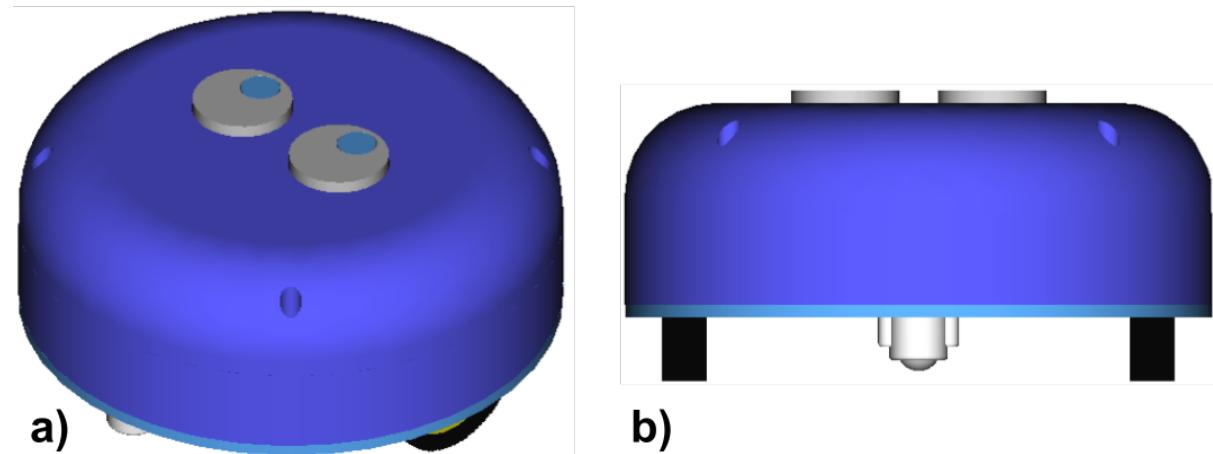
Fuente. Creada por el autor

Figura 3.59

Explosionado del ensamblaje de la tapa superior con los ojos exteriores, iris y sus respectivos tornillos M3x4 de la PM



Fuente. Creada por el autor

Figura 3.60*Ensamble de la plataforma móvil*

a) vista axonométrica; b) vista frontal.

Fuente. Creada por el autor

3.5. Control de la plataforma móvil (PM)

Después de haber terminado la implementación de la PM es necesario aplicarle control para que los movimientos de la plataforma sean los deseados, para lo cual es necesario iniciar con la identificación de la planta (PM), contemplando que la plataforma móvil tiene dos motores DC y cada uno tiene un encoder incremental de dos canales que puede entregar 12 pulsos por vuelta para el cálculo del desplazamiento o la velocidad de la PM, generación de trayectorias deseadas y posteriormente se hará la implementación del control según la necesidad del sistema.

3.5.1. Identificación de la plataforma móvil

Se usará la odometría (Lynch and Park, 2017) para el cálculo del desplazamiento de la plataforma por medio de la y teniendo una posición durante un tiempo determinado es posible calcular la velocidad de cada motor DC.

Para la identificación de cada sistema o motor DC se usará el microcontrolador dsPIC33FJ-128MC802 y el driver IFX9201, se desarrolla un algoritmo para que por medio de la lectura de los encoder se pueda calcular la distancia para cada motor por medio de la Ecuación 3.8 como en (Lynch and Park, 2017). Con la Ecuación 3.8 se obtiene el desplazamiento que realiza cada rueda, y con la variación de esta posición en un tiempo, se hallar la velocidad.

$$\begin{aligned} D_{izq} &= 2\pi r \cdot \frac{N_{ip}}{N_{iT}} \\ D_{der} &= 2\pi r \cdot \frac{N_{dp}}{N_{dT}} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Donde, D_{izq} es la distancia recorrida por la rueda izquierda, mientras que D_{der} es para la derecha, r es el radio de la rueda, N_{ip} es el número de pasos que mide el encoder de la rueda izquierda, N_{dp} del derecho y N_{iT} es el número total de pasos en una vuelta que realiza la rueda izquierda y N_{dT} del derecho.

Para la identificación del sistema es necesario que el microcontrolador genere una variación de voltaje con el módulo de PWM con la ayuda del driver. La señal tendrá un periodo de muestreo de 0,01s y la frecuencia de corte para el PWM es de 20k Hz como se menciona en (Rairán Antolines et al., 2009), con ello se podrá obtener la velocidad de los motores con la variación del ciclo útil de PWM como se muestra en el Capítulo 3 de (Corrales Piñeros, 2018). Para el muestreo se hará una variación de 10 % hasta el 100 %, tomando los datos de las

velocidades de los dos motores DC o planta y la información obtenida se ve en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15

Tabla de la variación del voltaje de PWM vs velocidades de cada motor

VOLTAJE (REF)	CICLO ÚTIL (PWM)	MOTOR A (cm/s)	MOTOR B (cm/s)
0	0	0	0
0.84	10 %	0	0
1.68	20 %	2.43349	0
2.52	30 %	6.40145	5.84729
3.36	40 %	9.62765	9.13719
4.20	50 %	13.06405	12.52900
5.04	60 %	16.13101	15.70106
5.88	70 %	19.70435	19.16931
6.72	80 %	21.38274	20.62157
7.56	90 %	21.32860	20.49100
8.40	100 %	21.32860	20.62794

Fuente. Creada por el autor

Utilizando Matlab es posible tomar toda la información de la Tabla 3.15 y realizar la gráfica de la velocidad con respecto al voltaje para el motor A y B como se muestra en la Figura 3.61.

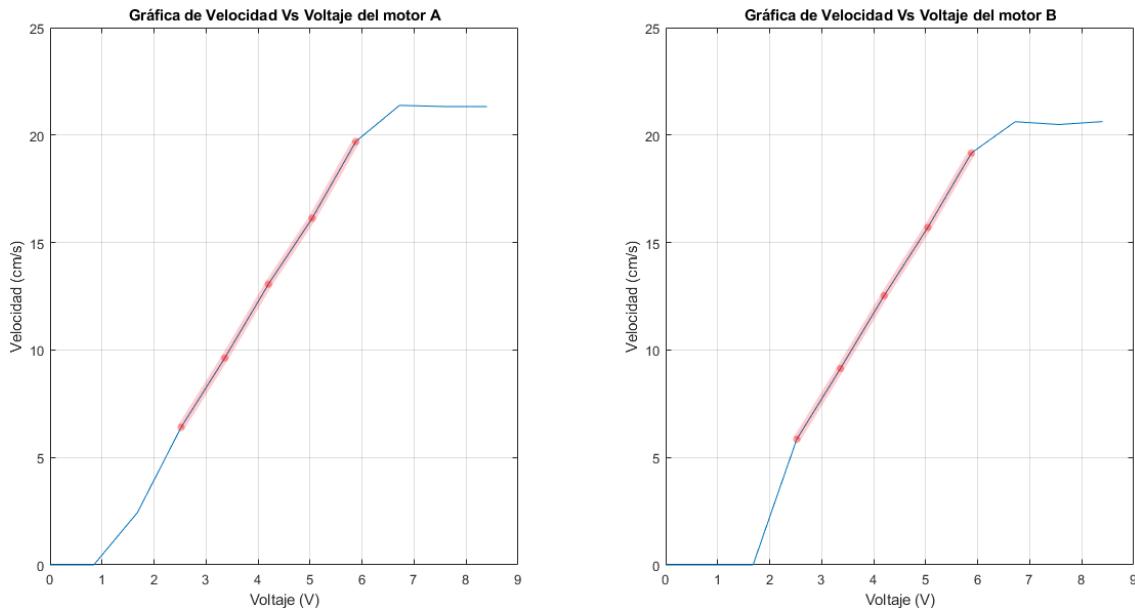
En la Figura 3.61 se aprecia que la región de operación lineal del motor A y B se encuentra entre los valores de PWM de 30 % a 70 % o de 2,52V a 5,88V para los dos motores y con base a esta información se usará como referencia el PWM de 40 % que equivale a 3,36V para realizar la gráfica de la posición para cada motor debido a que es la señal que suministran los encoder, y la gráfica se ve en la Figura 3.62.

Para el método de identificación de los motores DC se usará un método gráfico de primer orden basado en el método de la tangente por medio de la ecuación de la recta como se menciona en (Corrales Piñeros, 2018), (Verdugo et al., 2017) y (Bueno, 2011), teniendo en cuenta que la función de transferencia de un sistema de primer orden es la siguiente:

$$G(s) = \frac{K_p}{\tau \cdot s^2 + s} \quad (3.9)$$

Figura 3.61

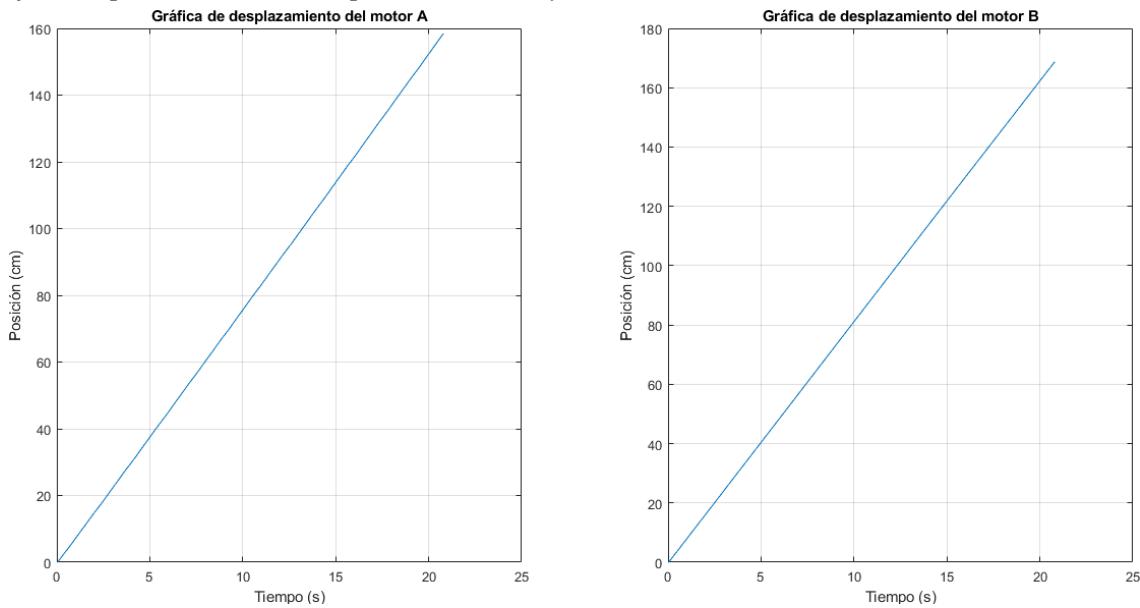
Gráfica de velocidad versus el voltaje suministrado al motor A y B



Fuente. Creada por el autor

Figura 3.62

Gráfica de posición en el tiempo del motor A y B



Fuente. Creada por el autor

,

donde:

$$Kp = \frac{\Delta y}{\Delta u}, \quad (3.10)$$

sabiendo que Δy es la variación de la señal de salida y Δu es la variación de la señal de entrada de la Figura 3.61 y τ del cruce por cero de la ecuación de la recta:

$$\tau = x_{(0)}. \quad (3.11)$$

El calculo del Kp para el motor A:

$$Kp_A = \frac{13,0640 - 6,4014}{4,20 - 2,52} = 3,9658, \quad (3.12)$$

mientras que el Kp para el motor B es:

$$Kp_B = \frac{12,5290 - 5,8473}{4,20 - 2,52} = 3,9772. \quad (3.13)$$

Ahora para calcular el τ como se mencionó, se proyectará un recta según el método gráfico de primer orden basado en el método de la tangente, por ende se tomarán cuatro puntos de cada gráfica de Figura 3.62 y estos se pueden evidenciar en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16

Puntos para hallar la ecuación de la recta

MOTOR	X1	Y1	X2	Y2
A	5.05	37.9151	15.03	114.142
B	4.91	39.7339	15.1	122.705

Fuente. Creada por el autor

Teniendo en cuenta que la ecuación de la recta es:

$$y = m(x) + h, \quad (3.14)$$

se usan los puntos de la Tabla 3.16 se calcula la pendiente para el motor A y B:

$$y_2 - y_1 = m_A (X_2 - X_1) \rightarrow m_A = \frac{114,142 - 37,9151}{15,03 - 5,05} \rightarrow m_A = 7,6380 \quad (3.15)$$

$$y_2 - y_1 = m_B(X_2 - X_1) \rightarrow m_B = \frac{122,705 - 39,7339}{15,1 - 4,91} \rightarrow m_B = 8,1424 \quad (3.16)$$

Con la ecuación de la recta 3.14, el cálculo de las pendientes en 3.17, 3.18, y utilizando el primer punto en X_1 y Y_1 de la Tabla 3.16, se obtiene el desplazamiento en la Ecuación 3.17 para el motor A y en la 3.18 para el motor B.

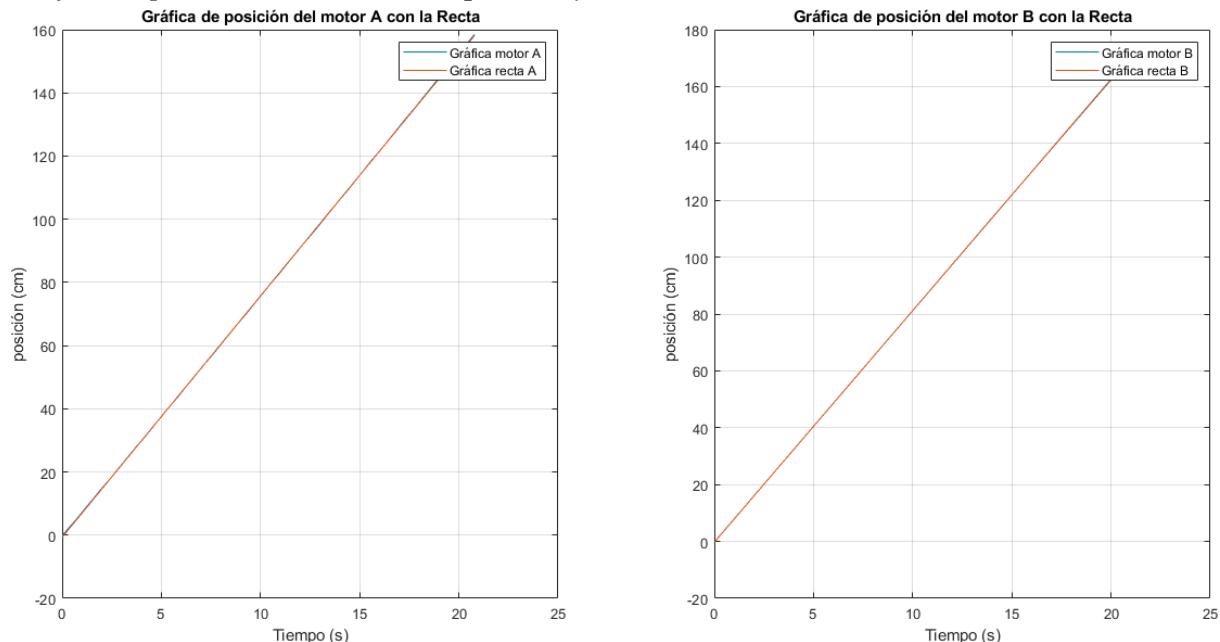
$$37,9151 = 7,6380(5,05) + h_A \rightarrow h_A = -0,6566 \quad (3.17)$$

$$39,7339 = 8,1424(4,91) + h_B \rightarrow h_B = -0,2453 \quad (3.18)$$

Ahora se mostrará la gráfica de la posición de cada motor en junto con las ecuaciones de cada recta en la Figura 3.63.

Figura 3.63

Gráfica de posición del motor A (izquierda) y B (derecha) con la recta calculada



Fuente. Creada por el autor

Para conocer el τ , se iguala la función de cada recta a cero para obtener el valor del cruce por el eje x como se muestra en la Ecuación 3.19 para el motor A y Ecuación 3.20 para el motor B.

$$0 = 7,6380(x) - 0,6566 \rightarrow x_{A(0)} = 0,085968 \quad (3.19)$$

$$0 = 8,1424(x) - 0,2453 \rightarrow x_{B(0)} = 0,030126 \quad (3.20)$$

Como se calculo el K_p para el motor A y B en la Ecuación 3.12, 3.13 y el τ en la Ecuación 3.19, 3.20, es posible obtener la función de transferencia para el motor A en la Ecuación 3.21 y la del motor B en la Ecuación 3.22.

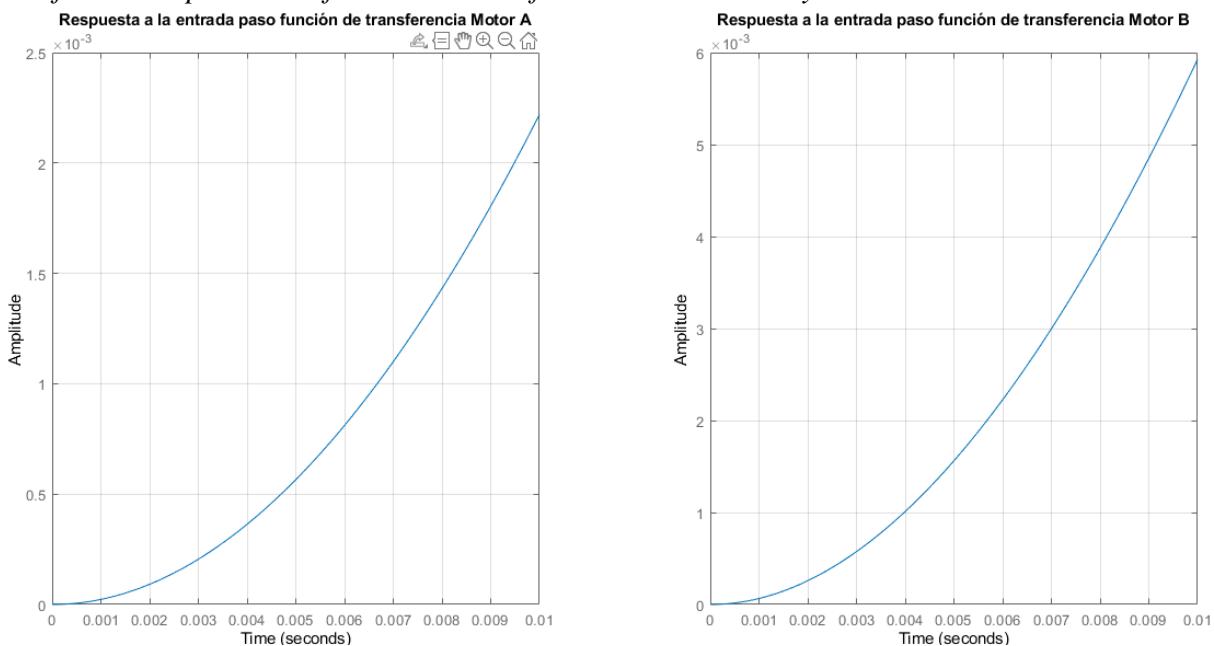
$$G_{MA(s)} = \frac{3,965833}{0,085968 \cdot s^2 + s} \rightarrow G_{MA(s)} = \frac{46,1310}{s \cdot (s + 11,6321)} \quad (3.21)$$

$$G_{MB(s)} = \frac{3,977207}{0,030126 \cdot s^2 + s} \rightarrow G_{MB(s)} = \frac{132,0153}{s \cdot (s + 33,1930)} \quad (3.22)$$

Usando Matlab es posible realizar una respuesta al paso o un step de la planta como se observa en la Figura 3.64 para el motor A y B.

Figura 3.64

Gráfica de un paso de la función de transferencia del motor A y B



Fuente. Creada por el autor

Conociendo que la función de transferencia de cada motor DC representa una salida y una entrada, se contempla convertirlo a variables de estado para permitir controlar y observar la posición, velocidad y aceleración de cada motor DC (Ogata, 2003).

Para realizar esta conversión primero se debe identificar la entrada y la salida de la función de transferencia de cada motor DC, se separan los términos, se convierte del dominio en frecuencia al dominio en el tiempo, obteniendo la ecuación diferencial, y de allí se obtienen las variables de estados como se muestra a continuación para el motor A:

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{46,1310}{s^2 + 11,6321s} = \frac{y(s)}{u(s)} \\ y(s) \cdot (s^2 + 11,6321s) &= 46,1310 \cdot u(s) \\ y(s)s^2 + 11,6321s \cdot y(s) &= 46,1310u(s) \\ \ddot{y}(t) + 11,6321\dot{y}(t) &= 46,1310u(t) \\ x_1(t) &= y \\ x_2(t) &= \dot{y} \end{aligned}$$

Ahora se pueden plantear las ecuaciones de estados y salidas para el motor A en la Ecuación 3.23, y para el motor B se repite el proceso anterior obteniendo el siguiente resultado en la Ecuación 3.24.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= 46,1310 \cdot u(t) - 11,6321 \cdot x_1(t) \end{aligned} \tag{3.23}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= 132,0153 \cdot u(t) - 33,1930 \cdot x_1(t) \end{aligned} \tag{3.24}$$

Ahora teniendo las variables de estado de cada motor se plantea el espacio de estados para cada uno de ellos en las ecuaciones 3.23 y 3.24.

Motor A:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -11,6321 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2(t) \\ x_1(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 46,1310 \end{bmatrix} u(t) \\ y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2(t) \\ x_1(t) \end{bmatrix} + [0] u(t) \end{aligned} \tag{3.25}$$

Motor B:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -33,1930 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2(t) \\ x_1(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 132,0153 \end{bmatrix} u(t) \\ y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2(t) \\ x_1(t) \end{bmatrix} + [0] u(t) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Después de haber terminado la identificación de los dos motores DC, de haber planteado las variables de estados y las ecuaciones de estados, antes de plantear el controlador es necesario conocer la ruta o referencia deseada que debería seguir la plataforma móvil para cumplir con los requerimientos de funcionalidad.

3.5.2. *Generación de trayectorias deseadas*

Para la generación de la trayectoria que debe seguir la plataforma móvil primero se define que el robot realizará movimientos paso a paso según el bloque físico sin generar una trayectoria continua, debido que el objetivo es que el usuario vea de manera clara los movimientos independientes porque los niños y niñas contemplados como usuarios se encuentran en la etapa de desarrollo intelectual de juego simbólico según Piaget (Liberty and Ayala, 2007) que consiste en cuatro fases:

- **Fase de juego de repetición:** son capaces de comprender que una acción podría repetirse según el deseo del usuario que en este caso sería el desplazamiento del robot.
- **Fase de juego simbólico:** comprende que el poner un bloque en la interfaz de usuario generaría una acción en el robot, y que además cada movimiento genera una acción independiente.
- **Fase de juego por reglas:** entendería el usuario que el robot no se desplazaría si la interfaz de usuario no tiene ningún bloque, y sería necesario usar el botón para enviar la información del bloque, además, hay un orden o secuencia de posición de cada bloque físico y ejecución en el robot.
- **Fase de juego de construcción:** confirma que los niños desde los 4 años cuentan con la capacidad de encajar los bloques físicos en la IU.

Cada trayectoria se enviará de manera independiente a cada motor DC para su posterior control por ende se definirá que el robot se desplazará 18 centímetros hacia adelante o atrás, debido a que un tamaño superior al de la PM. El tapete impreso de prueba para el uso robot tendrá separación entre cada cuadrícula de 18x18 centímetros, dimensión que excede el tamaño físico de la PM. Para la realización de los giros de derecha e izquierda, la PM realizará un giro de 90°, y para saber la distancia que debe recorrer cada rueda es necesario conocer la distancia entre cada rueda del robot de 12,8cm y usando la ecuación de perímetro, se divide en cuatro debido a que el robot solo debe hacer una cuarta parte de la vuelta completa como se evidencia en la Ecuación 3.27 que sería de 10cm aproximadamente.

$$D_{giro} = 2\pi r = \frac{2\pi \frac{128}{2}}{4} = 10,05310 \quad (3.27)$$

En la Tabla 3.17 se muestran los desplazamientos que tendrían las ruedas.

Tabla 3.17*Distancias de recorriendo de las ruedas*

Bloque físico	Distancia	Distancia
	motor A (cm)	motor B (cm)
Adelante	18	-18
Atrás	-18	18
Giro derecha	10	10
Giro izquierda	-10	-10

Fuente. Creada por el autor

Para la generación de trayectorias se usará de referencia el capítulo 10 de (Ollero Baturone, 2005) los polinomios de orden superior u orden cinco con el objetivo de hacer las trayectorias suaves en el desplazamiento, velocidad y aceleración de robot diferencia.

El desplazamiento de 18 centímetros que realizaría el motor A o B estaría expresado por la Ecuación 3.28. La gráfica de esta función de desplazamiento con su respectiva velocidad, aceleración y la comparación con la generada por el microcontrolador en la Figura 3.65.

$$D_{18cm} = \left(45t^3 \left(\frac{t}{4-1} \right)^2 \right) / 16 - \left(5t^4 \left(\frac{(9t)}{2} - 18 \right) \right) / 256 + \frac{9t^5}{512} \quad (3.28)$$

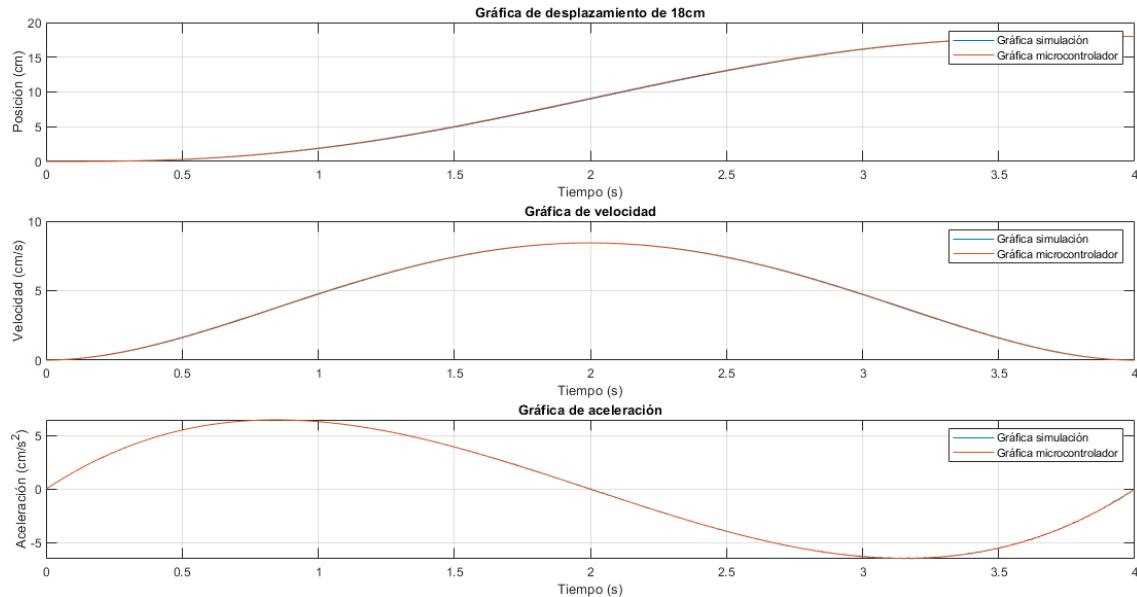
Como se ve en la Figura 3.65, la gráfica inicia desde el punto cero y la trayectoria la realiza durante cuatro segundos hasta llegar a la posición deseada de 18cm, esto también se visualizará para las demás referencias en las figuras 3.66, 3.67 y 3.68.

La gráfica de la trayectoria de menos 18 centímetros que realizaría el motor A o B estaría expresado por la Ecuación 3.29. La gráfica de esta función con su respectiva velocidad, aceleración y la comparación con la generada por el microcontrolador en la Figura 3.66.

$$D_{-18cm} = \left(5t^4 \left(\frac{9t}{2} - 18 \right) \right) / 256 - \left(45t^3 \left(\frac{t}{4} - 1 \right)^2 \right) / 16 - \frac{9t^5}{512} \quad (3.29)$$

Figura 3.65

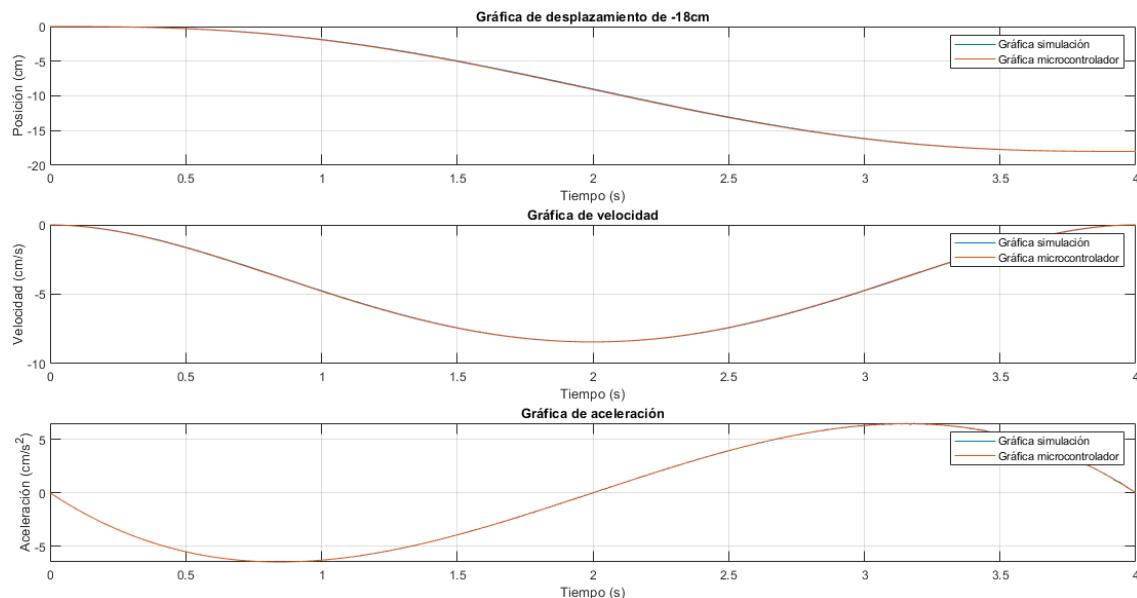
Gráfica de trayectoria de 18cm, velocidad, aceleración simulación y microcontrolador



Fuente. Creada por el autor

Figura 3.66

Gráfica de trayectoria de -18cm, velocidad, aceleración simulación y microcontrolador



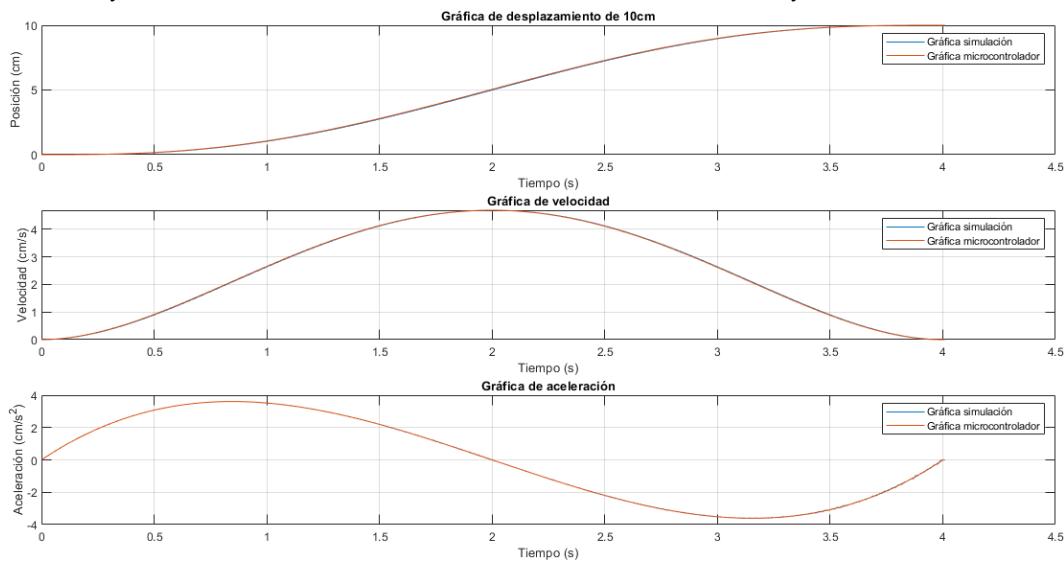
Fuente. Creada por el autor

La ruta de 10 centímetros que realizaría el motor A y B para dar un giro hacia la derecha estaría expresado por la Ecuación 3.30. La gráfica de esta función con su respectiva velocidad, aceleración y la comparación con la generada por el microcontrolador en la Figura 3.67.

$$D_{10cm} = \left(25t^3 \left(\frac{t}{4} - 1 \right)^2 \right) / 16 - \left(5t^4 \left(\frac{5t}{2} - 10 \right) \right) / 256 + \frac{5t^5}{512} \quad (3.30)$$

Figura 3.67

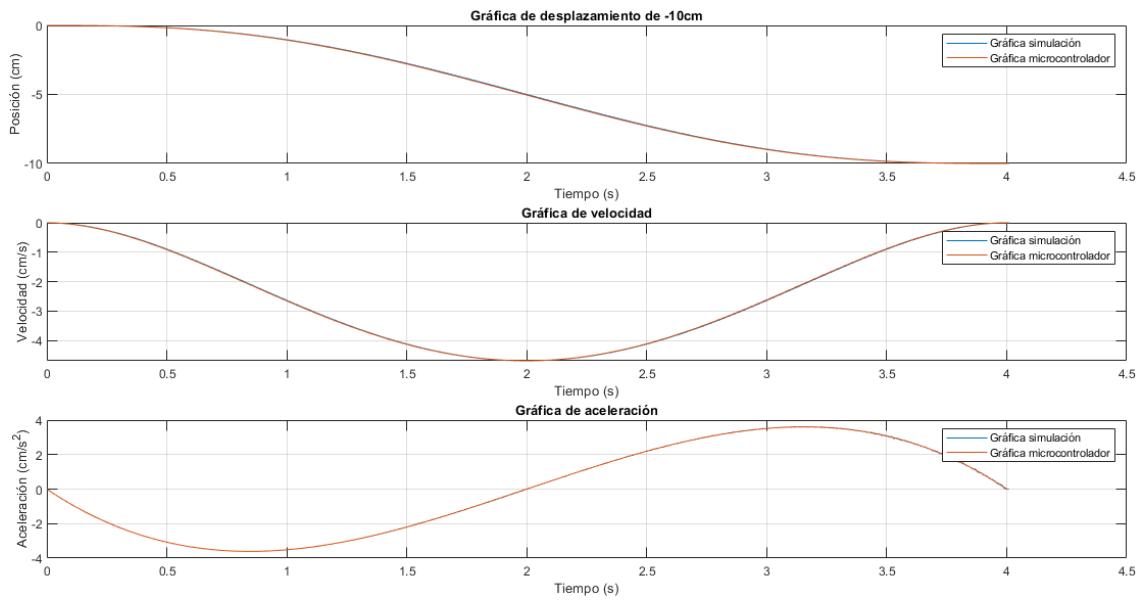
Gráfica de trayectoria de 10cm, velocidad, aceleración simulación y microcontrolador



Fuente. Creada por el autor

Ahora el recorrido de menos 10 centímetros que realizaría el motor A y B para dar un giro hacia la derecha estaría expresado por la Ecuación 3.31. La gráfica de esta función con su respectiva velocidad, aceleración y la comparación con la generada por el microcontrolador en la Figura 3.68.

$$D_{-10cm} = \left(5t^4 \left(\frac{5t}{2} - 10 \right) \right) / 256 - \left(25t^3 \left(\frac{t}{4} - 1 \right)^2 \right) / 16 - \frac{5t^5}{512} \quad (3.31)$$

Figura 3.68*Gráfica de trayectoria de -10cm, velocidad, aceleración simulación y microcontrolador**Fuente.* Creada por el autor

3.5.3. Diseño e implementación del controlador para la plataforma móvil

Inicialmente se recopilará la información de requerimientos y requisitos para el diseño del controlador de la PM que la única variable medida es la posición de cada motor DC y adicionalmente se deben cumplir los siguientes requerimientos en lazo cerrado:

- Error permanente cero ante entradas tipo rampa para que cada motor realice las referencias deseadas en las gráficas 3.66, 3.67 y 3.68.
- Sobre nivel porcentual inferior a 5 %, porque no se desea que el seguimiento tenga sobre amortiguamiento al seguir cada referencia.
- Tiempo de estabilización de 0.5 segundo, para que cada motor se estabilice en el menor tiempo posible para no afectar el seguimiento de la referencia.
- Rechazo de perturbaciones tipo paso en caso de haber deslizamientos en cada rueda o golpes al robot.
- Se verificará el seguimiento del sistema de control usando las trayectorias deseadas

Algoritmos de control robustos son diseñados y aplicados para contrarrestar las no-linealidades presentes en los sistemas de control por medio de distintas técnicas de control no-lineal que han sido estudiadas incluyendo Control por Rechazo Activo de Perturbaciones.^º ADRC, control paso a paso (Backstepping Control) y Control de Modo deslizante (SMC) (Garnica Prada and Marrugo Mercado, 2020).

El controlador ADRC está basado en la posibilidad de estimar mediante un observador las perturbaciones internas y externas o desconocidas que afectan el comportamiento de la planta, procediendo a cancelarla mediante una ley de control de retroalimentación utilizando un estimador de perturbaciones basadas en el error como se menciona en (Sira-Ramirez et al., 2017).

Ahora a continuación se procederá a diseñar, simular e implementar el controlador ADRC para la PM.

3.5.3.1. Diseño y simulación del controlador ADRC. Para que el robot realice el seguimiento de las trayectorias anteriormente descritas, se implementará el controlador ADRC como se menciona en (Sira-Ramirez et al., 2017) y (Cortés-Romero et al., 2014), y se plantea que las perturbaciones internas y externas serán la perturbación total como se muestra a continuación:

$$\ddot{\theta}(t) = ku(t) + \underbrace{\xi_{ext} + \xi_{int}}_{\xi_{total}},$$

donde, $\ddot{\theta}$ es la aceleración, k es la ganancia de la planta, u la señal de control y ξ es la perturbación.

Ahora, es posible simplificar la planta de la siguiente manera:

$$\ddot{\theta}(t) = ku(t) + \xi_{total}, \quad (3.32)$$

donde las perturbaciones son:

$$\begin{aligned}\xi_{total} &= \xi_{ext} + \xi_{int}, \\ \xi_{ext} &= \text{paso}.\end{aligned}$$

Se realiza el análisis de las perturbaciones internas: como se desea el seguimiento de la posición, velocidad y aceleración de cada referencia deseada de la Figura 3.65 hasta la Figura 3.68, se puede afirmar que para este seguimiento se necesita una rampa:

$$\xi_{int} = \text{rampa}.$$

Como la perturbación interna es una rampa y la externa es un paso, la rampa es capaz de rechazar el paso, por ende se tendrá en cuenta que la perturbación total es:

$$\xi_{total} = \text{rampa}.$$

Ahora se plantea el modelo matemático para el sistema aumentado:

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}(t) &= ku(t) + \xi_{total} \\ \ddot{\xi}_{total} &= 0\end{aligned}$$

variables de estado:

$$\begin{aligned}x_1(t) &= \theta(t), \\x_2(t) &= \dot{\theta}(t), \\x_3(t) &= \xi_{total}, \\x_4(t) &= \dot{\xi}_{total},\end{aligned}$$

ecuaciones de estado:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_2(t), \\\dot{x}_2(t) &= ku(t) + x_3(t), \\\dot{x}_3(t) &= x_4(t), \\\dot{x}_4(t) &= 0,\end{aligned}$$

entonces el sistema aumentado es:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t), \\y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix},\end{aligned}$$

donde el sistema aumentado para el observador sería:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= \underbrace{(A_a - \ell C_a)}_{A_{obsA}} \hat{x}(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} B_a & \ell \end{bmatrix}}_{B_{obsA}} \begin{bmatrix} u(t) \\ y(t) \end{bmatrix}, \\ \hat{y}(t) &= C_{obsA} \hat{x}(t).\end{aligned}\tag{3.33}$$

Para obtener la señal de control se despeja en la Ecuación 3.32:

$$u(t) = \frac{1}{k} \{ \ddot{\theta}(t) - \xi_{total} \},$$

y teniendo en cuenta que \ddot{r} es la referencia de la aceleración, \dot{r} de la velocidad y r es la referencia

de la posición, se obteniendo la siguiente ecuación de segundo grado debido al orden de la planta:

$$u(t) = \frac{1}{k} \left\{ \ddot{r}(t) - k_0(y(t) - r(t)) - k_1(\dot{y}(t) - \dot{r}(t)) - \xi_{total} \right\}, \quad (3.34)$$

ahora, remplazando el modelo matemático del sistema de la Ecuación 3.32 en la ley de control de la Ecuación 3.34, se tiene que:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}(t) &= \ddot{r}(t) - k_0(y(t) - r(t)) - k_1(\dot{y}(t) - \dot{r}(t)) - \xi_{total} + \xi_{total}, \\ \underbrace{\ddot{\theta}(t) - \ddot{r}(t)}_{\ddot{e}(t)} + \underbrace{k_0(y(t) - r(t))}_{e(t)} + \underbrace{k_1(\dot{y}(t) - \dot{r}(t))}_{\dot{e}(t)} &= -\xi_{total} + \xi_{total}, \\ \ddot{e}(t) + k_1\dot{e}(t) + k_0e(t) &= 0, \\ (s^2 + k_1s + k_0)e(t) &= 0. \end{aligned}$$

Inicialmente se calcularan los polos deseados teniendo en cuenta que el tiempo de estabilización seleccionado es de 0,5s y con ayuda de la función *poly* de *Matlab* se obtiene que:

$$(s + 8)(s + 80) = s^2 + 88s + 640,$$

luego se calculará por medio de las funciones *poly* y *place* de *Matlab* las constantes para el observador según los siguientes criterios: un tiempo de estabilización más rápido que los polos deseados de 0,2s y entre cada polo una separación diferente para cada motor debido a que uno requiere menor señal de control que otro, con el objetivo de tener un error similar. También se realizará la discretización de las matrices del observador para el motor A y motor B con la función *c2d* de *Matlab*. Se obtienen las constantes del observador ℓ_A para el motor A :

$$\ell_A = \begin{bmatrix} 124,000000002735 \\ 5648,00000016570 \\ 111680,000002481 \\ 806400,000005236 \end{bmatrix},$$

el sistema aumentado del observador,

$$A_{obs} = \begin{bmatrix} -124,000000002735 & 1 & 0 & 0 \\ -5648,00000016570 & 0 & 1 & 0 \\ -111680,000002481 & 0 & 0 & 1 \\ -806400,000005236 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{obs} = \begin{bmatrix} 0 & 124,000000002735 \\ 46,1309922973467 & 5648,00000016570 \\ 0 & 111680,000002481 \\ 0 & 806400,000005236 \end{bmatrix},$$

$$C_{obs} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

y la discretización de las matrices A_{obsA} y B_{obsA} :

$$Adis_{obs} = \begin{bmatrix} 0,15653287 & 0,0051905676 & 3,2916807e-05 & 1,2231347e-07 \\ -33,091110 & 0,80016327 & 0,0092722522 & 4,8083679e-05 \\ -606,22675 & -3,7747827 & 0,98607737 & 0,0099630784 \\ -4185,6738 & -26,544113 & -0,098633580 & 0,99973738 \end{bmatrix},$$

$$Bdis_{obs} = \begin{bmatrix} 0,0015184849 & 0,84346712 \\ 0,42773819 & 33,091110 \\ -0,64226395 & 606,22675 \\ -4,5500650 & 4185,6738 \end{bmatrix},$$

Ahora los resultados obtenidos para el motor B de ℓ_B son:

$$\ell_B = \begin{bmatrix} 240,000000000113 \\ 19600,0000005374 \\ 624000,000033501 \\ 6400000,00045620 \end{bmatrix},$$

el sistema aumentado del observador es:

$$A_{obsB} = \begin{bmatrix} -240,000000000113 & 1 & 0 & 0 \\ -19600,0000005374 & 0 & 1 & 0 \\ -624000,000033501 & 0 & 0 & 1 \\ -6400000,00045620 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{obsB} = \begin{bmatrix} 0 & 240,000000000113 \\ 132,015267302020 & 19600,0000005374 \\ 0 & 624000,000033501 \\ 0 & 6400000,00045620 \end{bmatrix},$$

$$C_{obsB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

y la discretización de las matrices A_{obsB} y B_{obsB} :

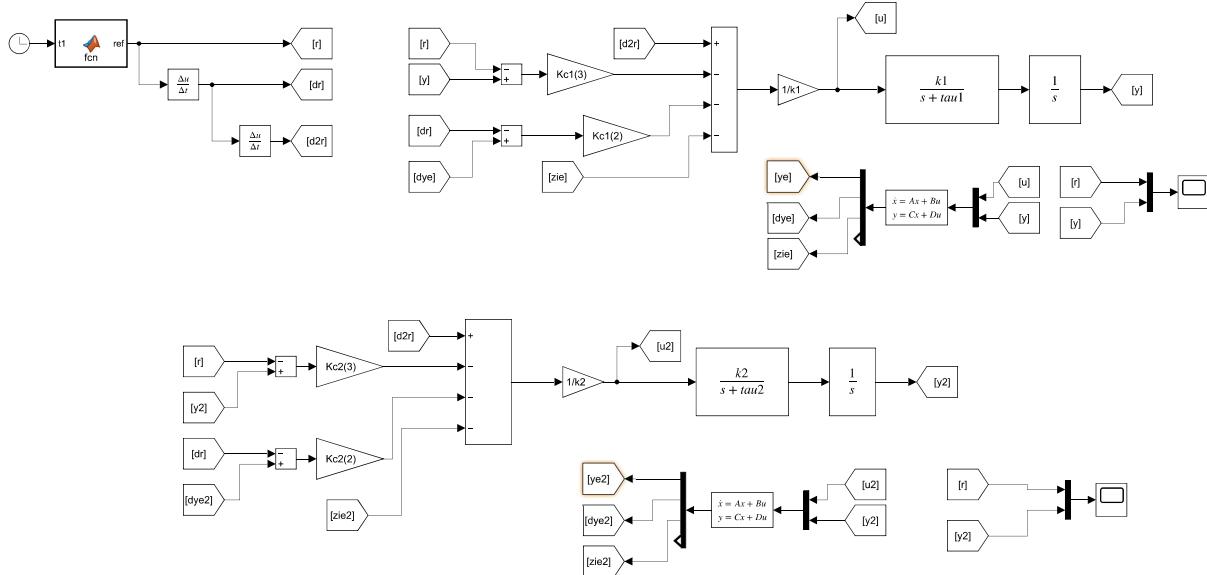
$$Adis_{obsB} = \begin{bmatrix} -0,13523227 & 0,0026571301 & 2,2357275e-05 & 9,2386962e-08 \\ -66,621964 & 0,50247896 & 0,0080228765 & 4,4530145e-05 \\ -1801,1357 & -14,542216 & 0,94068152 & 0,0098336609 \\ -17005,633 & -143,08656 & -0,59127653 & 0,99833101 \end{bmatrix},$$

$$Bdis_{obsB} = \begin{bmatrix} 0,0029515016 & 1,1352323 \\ 1,0591421 & 66,621964 \\ -7,8309422 & 1801,1357 \\ -78,057533 & 17005,633 \end{bmatrix}.$$

Después de haber realizado los cálculos, se simulará por medio del siguiente diagrama de bloques en *Simulink* como se ve en la Figura 3.69, obteniendo las gráficas del seguimiento de la referencia de posición del giro hacia la derecha en la Figura 3.70 y la señal del error generado en la Figura 3.71.

Figura 3.69

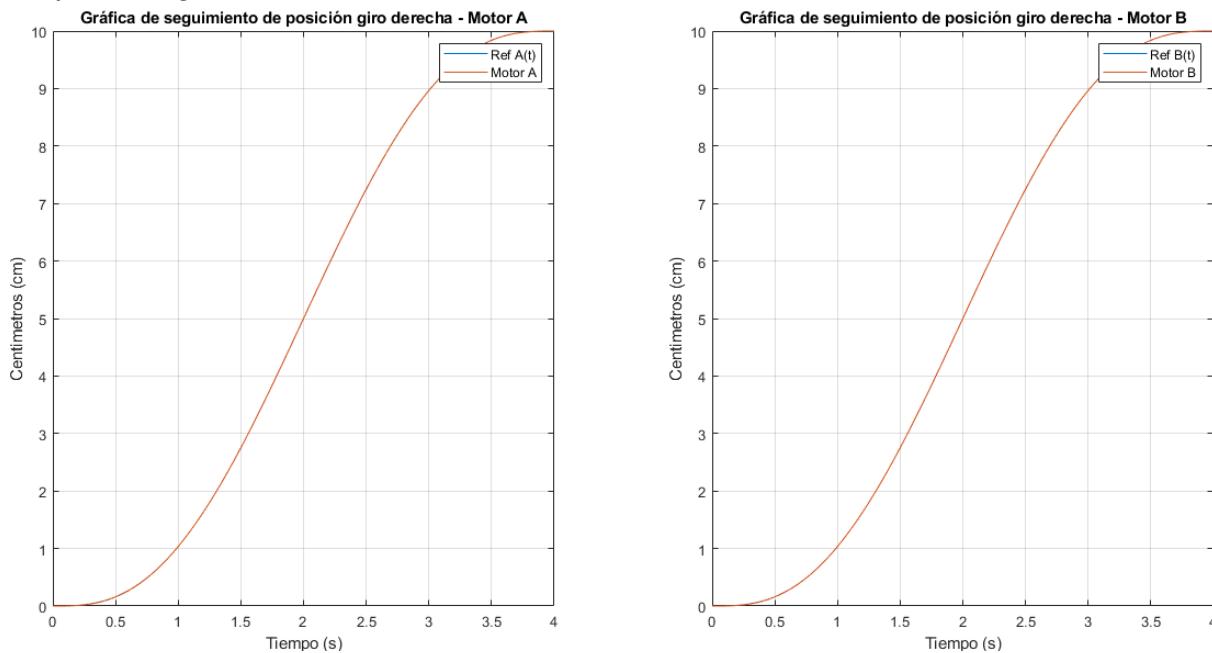
Diagrama de bloques del control ADRC con Observador



Fuente. Creada por el autor

Figura 3.70

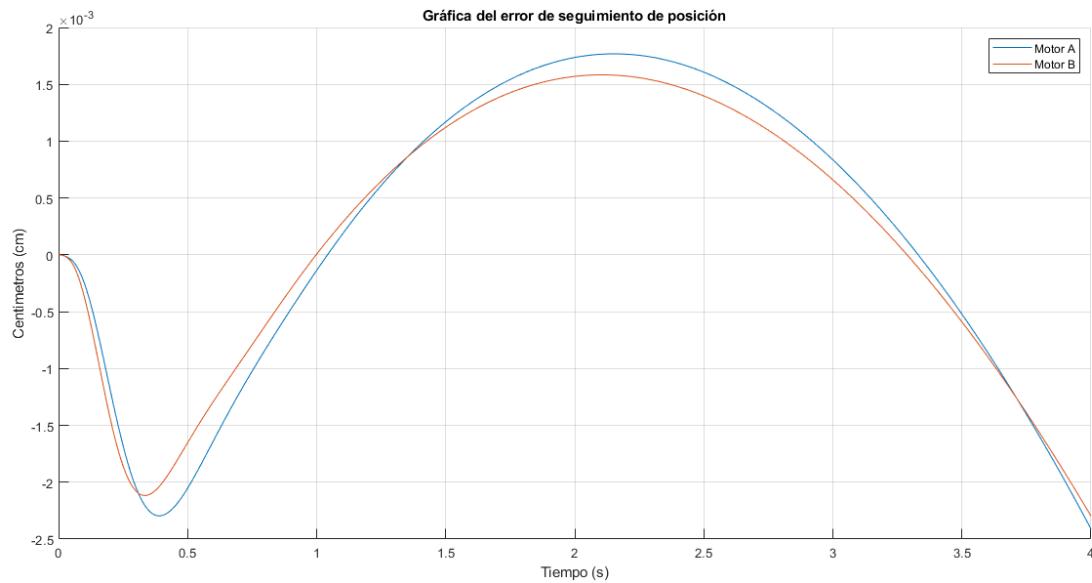
Gráfica de seguimiento del controlador ADRC con Observador extendido



Fuente. Creada por el autor

Figura 3.71

Gráfica de error obtenido del ADRC con Observador extendido



Fuente. Creada por el autor

Ahora se procederá a realizar la implementación del ADRC en el microcontrolador.

3.5.3.2. Implementación del controlador ADRC. Para la implementación en el microcontrolador es necesario primero discretizar las ecuaciones de estados y de salida del observador planteadas en Ecuación 3.33 como se menciona en (Ogata, 1996), obteniendo la Ecuación 3.35,

$$\dot{\hat{x}}(k) = A_{obs}\hat{x}(k) + B_{obs} \begin{bmatrix} u(k) \\ y(k) \end{bmatrix}, \quad (3.35)$$

$$\hat{y}(k) = C_{obs}\hat{x}(k),$$

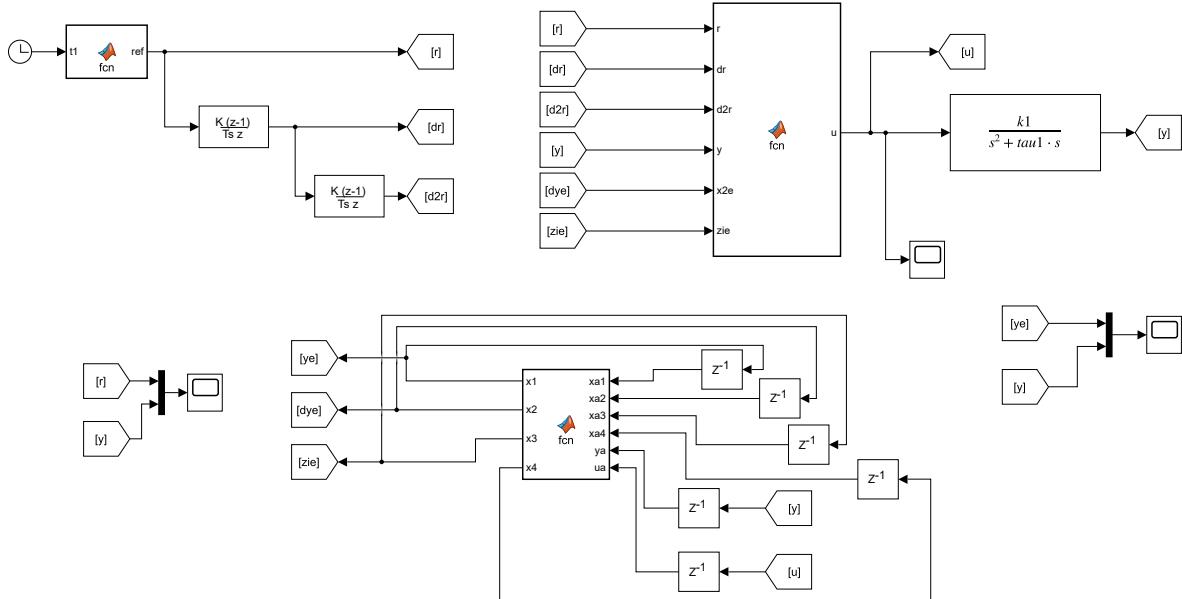
posteriormente la discretización de la ley de control de la Ecuación 3.34 se muestra en la Ecuación 3.36,

$$u(k) = \frac{1}{k} \{d2r(k) - k_0(y(k) - r(k)) - k_1(dye(t) - dr(t)) - zie\}, \quad (3.36)$$

y la implementación en simulink de Matlab del controlador ADRC se muestra en el diagrama de bloques en la Figura 3.72 para un motor y se repetirá el proceso para el segundo.

Figura 3.72

Diagrama de bloques de la implementación del control ADRC



Fuente. Creada por el autor

En la Figura 3.72 se observan tres *Matlab Function* que contienen las funciones que complementarán el algoritmo del microcontrolador: el primero es la ruta o la referencia para cada

motor, el segundo es la ley de control y el tercero es el observador extendido, ahora a continuación se mostrará el código del ejemplo de los movimientos como se mencionó en la Tabla 3.17:

```
ref =(1825*t1^3*(t1/4 - 1)^2)/32 - (5*t1^4*((365*t1)/4 - 365))/256 + (365*t1^5)/1024;
```

la función de la ley de control es:

```
k1=46.1309922973467;
Kc = poly([-8 -16])
u = (1/k1)*(-zie-Kc(2)*(x2e-dr)-Kc(3)*(y-r)+d2r)
```

y la función del observador extendido es:

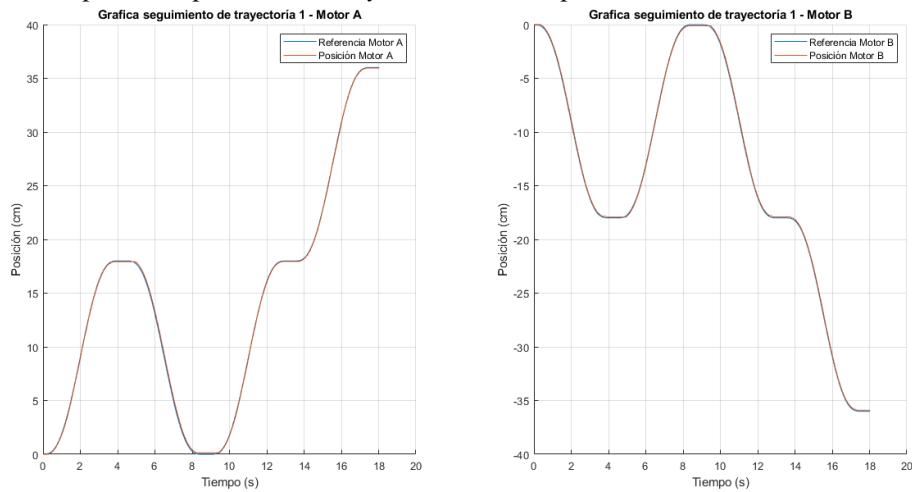
```
Aobs_d = [0.156532862384624,0.00519056774020876,
3.29168067669075e-05,1.22313470968268e-07;
-33.0911091603585,0.800163262184705,0.00927225177939531,
4.80836771673072e-05;-606.226718216398,-3.77478256279935,
0.986077386809653,0.00996307826344436;-4185.67382573152,
-26.5441129770065,-0.0986335829894518,0.999737355247692];
Bobs_d = [0.00151848495941746,0.843467137615377;
0.427738175414344,33.0911091603585;
-0.642263961842857,606.226718216399;
-4.55006505714611,4185.67382573152];
x = Aobs_d*[xa1; xa2; xa3; xa4] +Bobs_d*[ua; ya];
x1 = x(1);
x2 = x(2);
x3 = x(3);
x4 = x(4);
```

Después de haber visto las funciones que se implementarán el microcontrolador, se mostrarán dos pruebas realizadas con carga y en condiciones de ambiente normal para la PM, donde se generan las trayectorias para cada motor.

Para la primera prueba se muestra el seguimiento de cada trayectoria de cada motor en la Figura 3.73: primero va el robot hacia adelante, hacia atrás y por ultimo va dos veces hacia adelante, mientras que el error y la señal de control generado para esta trayectoria para cada motor se observa en la Figura 3.74.

Figura 3.73

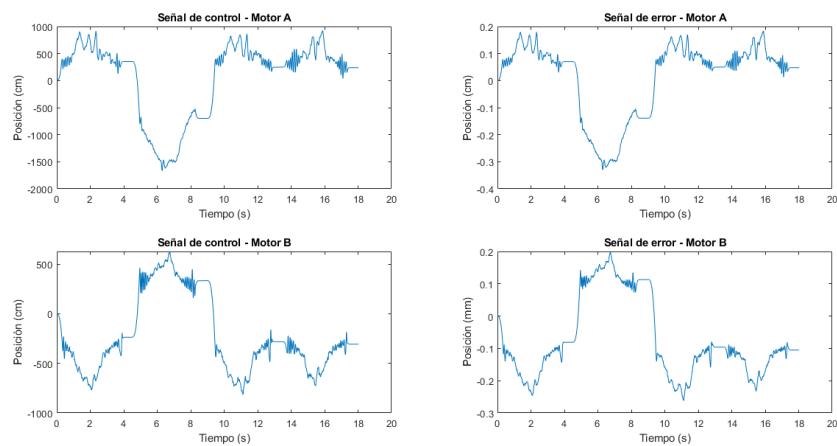
Generación de la primera prueba de trayectorias de implementación del controlador ADRC



Fuente. Creada por el autor

Figura 3.74

Gráfica del error y señal de control de la primera prueba de trayectorias de implementación del controlador ADRC

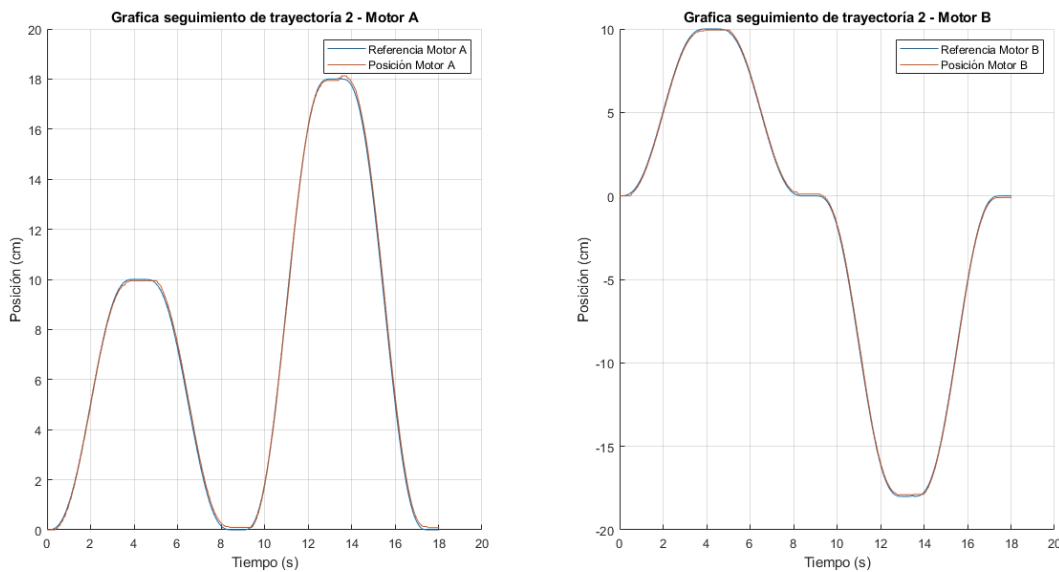


Fuente. Creada por el autor

De igual manera como se mostró anteriormente, en la Figura 3.75 se muestra el seguimiento de la PM: giro hacia la derecha, giro izquierda, hacia adelante y hacia atrás, adicionalmente se observa que al realizar la trayectoria se recibió una perturbación que el controlador pudo rechazar para continuar con su recorrido, también en la Figura 3.76 se ve error y la señal de control para cada motor.

Figura 3.75

Generación de la segunda prueba de trayectorias de implementación del controlador ADRC

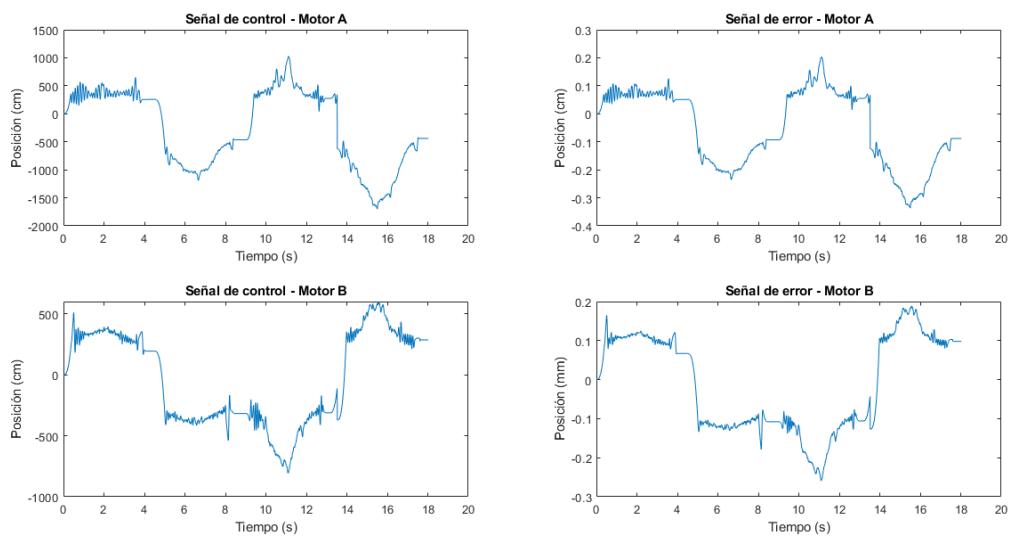


Fuente. Creada por el autor

Analizando los recorridos realizados por cada motor se evidenció que hay un error que en algunos trayectos no le permitieron al controlador realizar el seguimiento con error igual a cero, debido a la caja reductora de los motores DC porque tienen un Backlash o juego entre piñones que no le permiten llegar a la posición deseada y se calcula que el error promedio del motor A es de $0,0316\text{cm}$ y el motor B de $0,0422\text{cm}$, esta información se corrobora con información del fabricante que afirma que sus motores tiene Backlash pero no lo tiene caracterizado para cada motor y que de manera experimental los usuarios haciendo uso de otra referencia de motor DC encontraron que es de aproximadamente de 1° como se menciona en (randomvibe, 2022), y gracias al controlador se pudo reducir ese error.

Figura 3.76

Gráfica del error y señal de control de la segunda prueba de trayectorias de implementación del controlador ADRC



Fuente. Creada por el autor

4. Análisis y resultados

En la implementación de la IU y PM se evidenció que:

- El uso del sensor de efecto Hall en la decodificación de los bloques mejoró la usabilidad de la IU por parte de los niño y niñas, debido a que no requiere de un contacto directo para su lectura, permitiendo que los niños y niñas puedan poner el bloque una tolerancia superior al $\pm 5\text{mm}$.
- Usando la IU en el aula de clases se corroboró que los requerimientos fueron acordes a lo planteado inicialmente, sin embargo se puede disminuir su tamaño.
- El diseño e implementación de la PM fue acorde a las necesidades planteadas en el proyecto.
- Haber seleccionado un micro moto reductor con la reducción de 250 : 1 en conjunto con el encoder de 12 CPR permitió tener 3000 pasos con una resolución $0,12^\circ$, favoreciendo tener un Backlash de aproximadamente 0,0369 como se evidencio en la gráfica del error en la implementación del controlador ADRC.
- El uso del neumático y haber sido impreso en TPU ayudó considerablemente a evitar el deslizamiento de las ruedas de la PM y la tolerancia contemplada para el balanceo con el objetivo permitir el desplazamiento del robot en el tapete impreso y cabe destacar que el controlador implementado es capaz de rechazar ese tipo de perturbaciones debido que no se afecta el robot en su desplazamiento.
- En la integración de la IU con la PM se generó una comunicación bidireccional por medio de unas banderas programadas para la IU y PM que permiten la validación de la autenticación de cada dispositivo.

5. Conclusiones

- Los criterios de diseño electrónico, mecánico y programación de la interfaz de usuario están acordes a las edades de cuatro a ocho años según los usuarios que la usaron en la empresa ROVOFIC SAS.
- Los criterios de diseño electrónico, mecánico y el control de posición de la plataforma móvil fueron acordes debido a que satisfacen los problemas que se contemplaron para su diseño.
- Para la integración en la comunicación de la IU y PM no se tuvieron problemas apesar de haber usado dos microcontroladores de fabricantes diferentes debido a que se uso el código ASCII, y la selección de los componentes electrónicos cumplió con las necesidades planteadas.

5.1. Trabajo futuro

Como trabajo a futuro para mejorar en la herramienta tecnológica-educativa se contempla:

- Hacer cambio de las baterías buscando un mayor tiempo de uso y mejorar opción de carga, que sea fácil para el usuario o docente que hace uso de ella.
- Reducir el tamaño y peso en la interfaz de usuario para facilitar la usabilidad de la misma, sin embargo se deberá tener en cuenta que deberá ser capaz de soportar colisiones por caídas.
- Realizar una investigación sobre otros métodos de control que logren reducir al mínimo el efecto del Backlash en el micro motor usado.
- Permitir que la interfaz de usuario pueda hacer uso de otras plataformas diferentes al robot diferencial para el uso en el aula.
- Integración de más bloques para la interfaz de usuario con el objetivo de poder dar más ordenes a la plataforma móvil incluyéndole sensores.

Referencias

- Allegro (2022). 3141 thru 3144. *Allegro*.
- Angeles, J. (2014). *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms*. Springer Cham.
- Arrow (2022a). Mmbt2907alt1. *Arrow*.
- Arrow (2022b). Nte30107. *Arrow*.
- Avila-Chaurand, R., Prado-León, L. R., and González-Muñoz, E. L. (2007). *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana*. Universidad de Guadalajara.
- Bueno, A. M. (2011). Sistemas de control automático: Identificación experimental de sistemas. *Universidad de Alicante*.
- ChanMin, K., Dongho, K., Jiangmei, Y., Roger, B. H., Prashant, D., and Chi, N. T. (2015). Robotics to promote elementary education pre-service teachers' stem engagement, learning, and teaching. *Computers & Education*, 91:14–31.
- Corrales Piñeros, D. (2018). Diseño e implementación de sistemas de control para plataformas quanser. *Universidad de San Buenaventura*, pages 25–67.
- Cortés-Romero, J., Ramos, G. A., and Coral-Enriquez, H. (2014). Generalized proportional integral control for periodic signals under active disturbance rejection approach. *ISA Transactions*, 53(6):1901–1909.
- CPIprodysol (2022). Dureza shores a/d. *CPIprodysol*.
- de Bogotá, A. (2022a). Documentos para juguetes, componentes y accesorios :: Reglamento técnico sobre requisitos sanitarios que deben cumplir. *Alcaldía de Bogotá*.
- de Bogotá, A. (2022b). ResoluciÓn 003388 de 2008. *Alcaldía de Bogotá*.
- Elkin, M., Sullivan, A., and Bers, M. U. (2016). Programming with the kibo robotics kit in preschool classrooms. *Computers in the Schools*, 33:169–186.
- EUROcircuits (2022). Rohs and lead-free compliance. *EUROcircuits*.
- FischerTechnik (2022a). 540586-bt smart beginner set. *FischerTechnik*.

FischerTechnik (2022b). Robotics txt discovery set. *FischerTechnik*.

Garnica Prada, J. R. and Marrugo Mercado, J. E. (2020). Estudio exploratorio de algoritmos de control de posicionamiento en un sistema con backlash. Master's thesis, Universidad de San Buenaventura sede Bogotá.

Geist, E. (2016). Robots, programming and coding, oh my! *Childhood Education*, 92:298–304.

Gwen, N., Bradley, B., Neal, G., and Greg, W. (2016). Robotics camps, clubs, and competitions: Results from a us robotics project. *Robotics and Autonomous Systems*, 75:686–691.

ICONTEC (2016). *SEGURIDAD DE LOS JUGUETES. PARTE 1. PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS*. ICONTEC.

Infeneon (2022). Ifx9201sg. *Infeneon*.

Instruments, T. (2022). Lm1117 800-ma low-dropout linear regulator. *Texas Instruments*.

it matters (2022). Filamento de pla premium de alta calidad para impresoras 3d fdm. *it matters*.

KinderLabRobotics (2022a). About kinderlab robotics. *Kinder Lab Robotics*.

KinderLabRobotics (2022b). Meet kibo! the playful and creative screen-free steam coding robot! *Kinder Lab Robotics*.

Lego (2022). Robot inventor. *Lego*.

Liberty, A. and Ayala, L. (2007). *Pensamiento y lenguaje, Enfoques Constructivistas*. McGrawHill Interamericana.

Lieto, M. C. D., Inguaggiato, E., Castro, E., Cecchi, F., Cioni, G., Dell'Omo, M., Cecilia Laschi, C. P., Santerini, G., Sgandurra, G., and Dario, P. (2017). Educational robotics intervention on executive functions in preschool children: A pilot study. *Computers in Human Behavior*, 71:16–23.

Limatambo, C. (2022). Ficha tÉcnica, hoja de acrÍlico. *Corporación Limatambo*.

Lynch, K. M. and Park, F. C. (2017). *MODERN ROBOTICS MECHANICS, PLANNING, AND CONTROL*. Cambridge University Press.

Microchip (2022a). Atmega32u4. *Microchip Technology Inc.*

- Microchip (2022b). Compiled tips ‘n tricks guide. *Microchip Technology Inc.*
- Microchip (2022c). dspic33fj128mc802. *Microchip Technology Inc.*
- Microchip (2022d). Microchip advanced part selector. *Microchip Technology Inc.*
- Ogata, K. (1996). *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*. Prentice Hall.
- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.
- Ollero Baturone, A. (2005). *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*. ACCESO RÁPIDO. Marcombo.
- PRIMO (2022a). Meet cubetto. *PRIMO*.
- PRIMO (2022b). We’re builders, designers, and dreamers. this is our story. *PRIMO*.
- Rairán Antolines, J. D., Sierra Niño, Y. P., and Moreno Roballo, N. I. (2009). Implementación de dos estrategias de control para la velocidad de un motor DC. *Ingeniería e Investigación*, 29:100 – 106.
- Ramírez-Benavides, K. and Guerrero, L. A. (2015). Modebots: Environment for programming robots for children between the ages of 4 and 6. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, 10:152–159.
- randomvibe (2022). Backlash 37d gear motor with 19:1 ratio. *Pololu Forum*.
- RGPballs (2022). Bolas de acrílico (pmma). *RGPballs*.
- Robotis (2022). Dream ii series. *Robotis*.
- Rovofic (2023). Rovofic. *Rovofic*.
- Ruby, H. (2022). Hello ruby for homeschoolers - computer science in one minute! *Hello Ruby*.
- Sira-Ramirez, H., Luviano-Juárez, A., Ramírez-Neria, M., and Zurita-Bustamante, E. (2017). *Active Disturbance Rejection Control of Dynamic Systems: A Flatness Based Approach*. Elsevier Science.
- Solaque Guzmán, L. E., Molina Villa, M. A., and Rodríguez Vásquez, E. L. (2016). Seguimiento de trayectorias con un robot móvil de configuración diferencial. *Ing. USBMed*, 5(1):26–34.

Stoeckelmayr, K., Tesar, M., and Hofmann, A. (2011). Kindergarten children programming robots : A first attempt. *Department of Computer Science, University of Applied Sciences Technikum Wien*.

Struers (2022). Acrílicos. *Struers*.

Teymoorzadeh, H. and Rodrigue, D. (2015). Biocomposites of wood flour and polylactic acid: Processing and properties. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 9(2):1–6.

Turtles, R. (2022). So, what is robot turtles? *Robot Turtles*.

Tzafestas, S. (2013). *Introduction to Mobile Robot Control*. Elsevier insights. Elsevier Science.

Ultimaker (2022a). Ficha de datos técnicos pla. *Ultimaker*.

Ultimaker (2022b). Ficha de datos técnicos tpu 95a. *Ultimaker*.

Verdugo, D., Mata, P., Coronel, A., and González, J. (2017). Identificación del modelo de un motor de dc mediante métodos gráficos y métodos paramétricos. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, IV(2):68–77.

VEXRobotics (2022). Vex iq. *VexRobotics*.

Vistronica (2022). Mini rueda loca 3pi. *Vistronica*.

Vistrónica (2022). Convertidor dc-dc buck mp23070n. *Vistrónica*.

Voronina, L. V., Sergeeva, N. N., and Utyumova, E. A. (2016). Development of algorithm skills in preschool children. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 233:155–159.