CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD ZACATENCO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

SECCIÓN DE BIOELECTRÓNICA

Sistema de orientación utilizando procesamiento de imágenes para personas con discapacidad visual que practican actividad física

Tesis que presenta

Ing. Ramon Eduardo Cortina

Para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias

en la Especialidad de

Ingeniería Eléctrica

Director de la Tesis:

Dr. Arturo Minor Martínez

Ciudad de México Enero 2023

Este trabajo está dedicado especialmente a mi madre Marina Cortina, quien se esmeró y puso toda su fuerza, valor, trabajo, tiempo y amor en darme todo lo necesario para ser quien soy ahora, te amo mami.

A mi hermana Sandra Cortina, quien siempre me apoya y está ahí cerca o desde lejos, porque tú también sacrificaste parte de tu tiempo para impulsar mis estudios, eso no lo olvido hermana mía, te amo hermanita.

A mi padre Daniel Romero G., quien me formo con valores ya olvidados, quien dio parte de su vida en cuidarnos y velar por nosotros, quien me mostro que el trabajo, la dedicación y la perseverancia forman seres humanos. Aunque ya no estes, siempre te recuerdo.

Agradecimientos

A mi madre Marina Cortina, por apoyarme incondicionalmente en esta etapa de mi vida, porque siempre estuvo ahí y estará sin importar la distancia. A mi hermana Sandra Cortina, porque al igual que mi ama, nunca perdió su fe, confianza y esperanza en que finalizara mis estudios.

Al Dr. Arturo Minor Martínez mi asesor y director de tesis, que me brindo su confianza y me acepto en su laboratorio, porque a pesar de las circunstancias de la pandemia y la distancia, tuvo paciencia, compartió su conocimiento y su experiencia para lograr en conjunto este objetivo.

A mis compañeros Janette Magaña, Aaron Santana, Abraham Hernandez y Jose Rebollar, por ayudarme en la realización de este proyecto compartiendo su tiempo durante las pruebas, conocimiento de otras áreas, brindándome consejos y puntos de vista.

Al Dr. Iván Tlacaélel por su apoyo brindado a distancia durante la pandemia, gracias por sus consejos y guiarme durante este proceso. A mis compañeros del laboratorio 5, futuros doctores Perla, Dalia, Salvador, Juan, Erick y Michel, por sus consejos y apoyo para cursar de mejor forma los estudios de maestría.

A todos mis compañeros de generación Daniela, Laura, Zayra, David y Oscar, que a pesar de la distancia todos hicimos un gran esfuerzo por pasar esta etapa.

A la bióloga y Doctora Karla Daniela Hernandez por su amistad y apoyo durante mi búsqueda para continuar mis estudios de posgrado.

A los auxiliares técnicos de investigación del laboratorio 5 Ing. Irwin Rosales García y el Ing. José Rodolfo Rojas Ortiz por su apoyo brindado durante mi estancia.

Al Centro De Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV- IPN) por recibirme en sus instalaciones y bridar toda la infraestructura necesaria para poder realizar mis estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la oportunidad brindad de ser beneficiario de una beca para poder continuar mis estudios profesionales durante los dos años de duración.

Resumen

La discapacidad visual es una condición congénita o desarrollada por un individuo, tiende afectar en edades avanzadas y su tratamiento puede ir desde una mínima corrección con lentes, costosas operaciones o hasta la pérdida total del sentido de la vista. Se estima que en México hay 8,974,853 personas con discapacidad visual o ceguera. Estudios realizados encontraron una disminución de la actividad física a causa de esta condición, un aumento de comportamientos sedentarios y con ello la probabilidad del desarrollo de enfermedades como obesidad y sobrepeso en individuos de todas las edades. Es recomendable para las personas con discapacidad visual o ceguera realizar actividad física para mantener una buena condición de salud.

El perder el sentido de la vista o nacer sin él, es un gran reto tanto para los individuos como la para la sociedad, pues su entorno requerirá una mayor adaptación para su desarrollo y una debida señalización especial para poder identificar lo que hay a su alrededor. En este trabajo se propone el desarrollo de un dispositivo electrónico que ayude en la corrección de la orientación de las personas con alguna discapacidad visual grave o ceguera, mientras realizan caminata como actividad física y además tenga la capacidad de reconocer e interpretar códigos en etiquetas en forma de circulo colocadas en el piso, utilizando el procesamiento de imágenes y la implementación de la visión por computadora.

El dispositivo genera una retroalimentación al usuario para corregir su trayectoria al realizar actividad física y lo auxiliara para conocer su alrededor interpretando los códigos en las etiquetas detectados mientras camina. Esto permitirá la inclusión de las personas con discapacidad visual o ceguera en la práctica de actividades físicas o la posibilidad de acudir a lugares con señalización que pueda ser detectada por el dispositivo, lo anterior utilizando tecnologías ya existentes y que se adaptaron para este grupo social.

Abstract

Visual impairment is a congenital condition developed by an individual, it tends to affect in advanced ages and its treatment can range from a minimal correction with glasses, costly operations or even the total loss of the sense of sight. It is estimated that in Mexico there are 8,974,853 people with visual impairment or blindness. Studies has found a decrease in physical activity due to this condition, an increase in sedentary behaviors and thus the likelihood of developing diseases such as obesity and overweight in individuals of all ages. It is advisable for people with visual impairment or blindness to engage in physical activity to maintain good health.

Losing the sense of sight or being born without it, is a great challenge for both individuals and society, because their environment will require a greater adaptation for their development and a special signaling to identify what is around them. In this work we propose the development of an electronic device that helps in the correction of the orientation of people with severe visual impairment or blindness, while walking as a physical activity and also it has the ability to recognize and interpret codes in circle-shaped labels placed on the floor, using image processing and the implementation of computer vision.

The device generates feedback to the user to correct his trajectory when performing physical activity and will help him to know his surroundings by interpreting the codes on the labels detected while walking. This will allow the inclusion of people with visual impairment or blindness in the practice of physical activities or the possibility that they are to going to places with signage that can be detected by the device, using existing technologies that were adapted for this social group.

Índice de contenido

Capítulo 1. Introducción 1

1.1 Planteamiento del problema 2

1.2 Objetivo general 3
1.2.1 Objetivo Particular 3

1.3 Estructura de la tesis 4
1.3.1 Capítulo 1 4
1.3.2 Capítulo 2 4
1.3.3 Capítulo 3 4
1.3.4 Capítulo 4 5
1.3.5 Capítulo 5 5
1.3.6 Capítulo 6 5
1.3.7 Capítulo 7 5

Capítulo 2. Antecedentes 6

2.1 Discapacidad 6

2.2 Deficiencia Visual 6

2.3 Discapacidad y Deporte 6

2.4 Beneficios de la actividad física 7

2.5 Problemas de salud 8

2.6 Atletismo para invidentes 9

2.7 Pista de atletismo 10

2.8 Procesamiento de imágenes 12

2.9 Visión por computadora 13

2.10 Detección de bordes 13

2.11 Detector de bordes Canny 15

2.12 Transformada de Hough 16
2.12.1 Detección de líneas 17
2.12.2 Detección de círculos 20
2.12.3 Histograma de una imagen 23
2.12.4 Correlación 26

2.13 Estado del arte 27
2.13.1 OrCam 27
2.13.2 Eyesynth 28
2.13.3 WeWalk 29

2.13.4 RFIWS 30
2.13.5 PF belt 31

Capítulo 3. Desarrollo 33

3.1 Descripción del dispositivo 33
3.1.2 Materiales 34
3.1.2.1 Raspberry Pi Model B (Pi4B) 34
3.1.2.2 Microcontrolador ATmega328 36
3.1.2.3 Modulo Conversor USB-Serie TTL 36
3.1.2.4 Modulo ITG/MPU-6050 37
3.1.2.5 Servo motor 38
3.1.2.5 Motor vibrador 40
3.1.2.6 Banco de energía 40
3.1.2.7 Módulo de la cámara de 5MP 42
3.1.3 Software 43
3.1.3.1 OpenCV 43
3.1.3.2 Arduino IDE 44
3.1.3.3 Impresión 3D 45
3.1.3.4 Inventor 45
3.1.3.5 Ultimaker Cura 46
3.1.3.6 Pigpio 47
3.1.3.7 VNC Connect 48

3.2 Metodología 49
3.2.1 Subsistema de soporte de postura modificado 49
3.2.2 Subsistema de control de motores y buzzer 51
3.2.3 Subsistema de control de botones 59
3.2.4 Subsistema de control de ángulo de la cámara 61
3.2.4.1 Circuito de control de la cámara 62
3.2.5 Subsistema de algoritmos de detección y control 63
3.2.5.1 Algoritmo de prueba de componentes 64
3.2.5.2 Algoritmo de detección de líneas 66
3.2.5.3 Detección de líneas de pista de atletismo 67
3.2.5.4 Algoritmo de detección de círculos 83
3.2.5.5 Seguimiento de trayectoria de usuario 93

Capítulo 4. Pruebas 95

4.1 Pruebas funcionales 96

4.2 Pruebas experimentales 103
4.2.1 Prueba experimental uno 104
4.2.2 Prueba experimental dos 106

4.2.3 Prueba experimental tres 108
4.2.4 Prueba experimental cuatro 109
Capítulo 5. Resultados 111
Capítulo 6. Discusión 117
Capítulo 7. Conclusiones y trabajo a futuro 118
Referencias 121
Anexos 124
Anexo A: Circuitos Electrónicos 124

Índice de figuras

Fig. 1 Características de la cuerda guía-corredor. 10
Fig. 2 Dimensiones interiores de una pista de atletismo. 11
Fig. 3 Dimensiones exteriores de una pista de atletismo. 11
Fig. 4 Tipos de bordes en las imágenes, a) step edge, b) ramp edge, c) roof edge, modificado de [17]. 15
Fig. 5 Plano (x, y), Plano (a, b), representación de la ecuación de la recta. 18
Fig. 6 Conjunto de curvas senoidales generadas para distintos puntos. 19
Fig. 7 Representación de una celda acumuladora. 20
Fig. 8 Cono formado por los parametros (a,b,r). 21
Fig. 9 Espacio de coordenadas (x, y), espacio de parámetros (a, b). 22
Fig. 10 Generación de celdas acumuladoras (cuadrados), para n círculos en (x, y) que se interceptan en el centro de los círculos en el espacio (a, b). 23
Fig. 11 Valores de intensidades en los pixeles de una imagen en escala de grises. 24
Fig. 12 Representación de un histograma con n número de bins de una imagen. 26
Fig. 13 Dispositivos OrCam [26]. 28
Fig. 14 Sistema Eyesynth [27]. 29
Fig. 15 Dispositivo WeWalk [28]. 30
Fig. 16 Funcionamiento de Bastón RFIWS. 31
Fig. 17 Dispositivo PF Belt funcionamiento del equipo. 32
Fig. 18 . Propuesta de sistema de orientación, motores vibradores en color rojo, botones en verde y cámara en color café. 34
Fig. 19 Raspberry Pi 4 Modelo B. 35
Fig. 20 ATMega328 TQFP. 36
Fig. 21 Convertidor FTDI, FT232RL. 37
Fig. 22 Modulo ITG/MPU60-50. 38
Fig. 23 Control de servomotor PWM. 39
Fig. 24 Servomotor TOWER PROTM Micro Servo 9G SG90. 39
Fig. 25 Motor vibrador. 40
Fig. 26 Diagrama eléctrico interno de una Power Bank. 41
Fig. 27 Power Bank Belkin 10000 mAh. 42
Fig. 28 Cámara Raspberry Pi 4 1080p 720p 5MP. 43
Fig. 29 Open Computer Vision, OpenCV. 43
Fig. 30 Arduino IDE, interfaz de la ventana. 44
Fig. 31 Impresora 3D ENDER 5. 45
Fig. 32 Autodesk Inventor. 46
Fig. 33 Ultimaker Cura. 47
Fig. 34 Sección de Código G, comandos utilizados. 47
Fig. 35 Biblioteca Pigpio. 48

Fig. 36 Corrector de postura y ayuda lumbar. 50
Fig. 37 Secciones adicionadas al soporte de postura para la instalación de los subsistemas restantes. 51
Fig. 38 Pines de alimentación y GPIO Raspberry Pi 4 [25]. 52
Fig. 39 Circuito de alimentación a motores vibradores. 52
Fig. 40 Circuito de prueba motores armado en protoboard. 53
Fig. 41 Ventilador disipador de calor interior. 57
Fig. 42 Circuito de alimentación buzzer. 57
Fig. 43 Maquina CNC 3018 (a), Plancha para soldar (b) y PCB soldada (c). 58
Fig. 44 Señalización de botones en Braille. 59
Fig. 45 Circuito de conexión botón POWER (a), circuito de conexión botones SOP, LINES y CIRCLES. 60
Fig. 46. Botoneras terminadas alojadas en sus contenedores. 61
Fig. 47 Subsistema de control de cámara, ATMega328, MPU6050 y SG90. 61
Fig. 48 Movimientos realizados por la cámara montada sobre su base. 62
Fig. 49 Zócalo programador QFP32/D3. 63
Fig. 50 Diagrama de bloques de algoritmo de prueba de componentes. 65
Fig. 51 Transforma de Hough Estándar (a) y Transforma de Hough Probabilística (b). 67
Fig. 52 Preprocesamiento de la imagen, (a) imagen adquirida, (b) escala de grises, (c) detección de bordes, (d) aplicación de TPH. 67
Fig. 53 Diagrama de bloques de preprocesamiento de imágenes para detección de líneas. 68
Fig. 54 Detección de líneas con TPH, imagen (a), detector de bordes (b), detección de líneas (c). 69
Fig. 55 Plano de coordenadas (x,y) (a), plano de una imagen (b). 71
Fig. 56 Región de Interés (ROI) utilizada para detección de lineas. 72
Fig. 57 Punto de referencia rosa (a), puntos medios de las líneas detectadas por TPH verde (b). 73
Fig. 58 Detección de ambas líneas (a), detección de una sola línea (b), uso de punto medio anterior para generar LC (c). 73
Fig. 59 Punto medio PM con detección de PM1-PM2 (a), detección de PM con PM1 anterior y PM2 actual (b). 74
Fig. 60 Comportamiento de la coordenada x en la orientación. 75
Fig. 61 Umbralizado de la distancia para determinación de cambio de orientación. 76
Fig. 62 Detección de una sola línea de acotamiento (a), uso de PM1 o PM2 anterior (b). 77
Fig. 63 Detección de una sola línea y análisis de distancias sin detección previa anterior. 78
Fig. 64 Corrección de ángulo presente en línea LC, errores presentados (a) (b), corrección (c). 79

Fig. 65 Condiciones de detección de salida de carril o acotamiento, (a) salida hacia la izquierda, (b) salida hacia la derecha. 80
Fig. 66 Detección de salida de carril o acera..... 81
Fig. 67 Condiciones de activación de los periféricos, verde dirección correcta, amarillo cambio de orientación y rojo salida de carril. 82
Fig. 68 Diagrama de bloques de activación de los periféricos. 83
Fig. 69 Diagrama de bloques de preprocesamiento de imágenes para detección de círculos. 84
Fig. 70 Variables obtenidas de THC, radio y coordenadas del centro. 85
Fig. 71 Detección de circulo en etiquetas colocadas a nivel de piso. 86
Fig. 72 Obtención de coordenadas de ROI mediante valor de radio del círculo. 87
Fig. 73 Cálculo de coordenadas de ROI usando valores de radio. 88
Fig. 74 Detección de círculos más pequeños dentro de etiqueta. 88
Fig. 75 Ventanas (ROI) de los diferentes códigos implementados. 89
Fig. 76 Comparación de histogramas, frame actual (a), histogramas (b), ROI detectada con código (c), interpretación del código (d). 90
Fig. 77 Diagrama de proceso de detección de círculos. 91
Fig. 78 Círculos con códigos utilizados. 92
Fig. 79 Conexión Pi4B, Router y Laptop para seguimiento de usuario. 93
Fig. 80 Seguimiento de usuario remotamente. 94
Fig. 81 Pruebas a dispositivo finalizado utilizado por usuario. 96
Fig. 82 Mediciones de consumo de corriente y voltaje del dispositivo. 97
Fig. 83 Pruebas en laboratorio. 100
Fig. 84 Prueba con diferentes diámetros de círculos. 101
Fig. 85 Detección de círculos. 102
Fig. 86 Detección de circulo con 7 interiores. 102
Fig. 87 Medición de frames por segundo (FPS). 103
Fig. 88 Postura al caminar..... 104
Fig. 89 Recorrido realizado durante la prueba 1, CINVESTAV. 105
Fig. 90 Participante usando dispositivo (a), detección de líneas (b). 105
Fig. 91 Recorrido realizado durante la prueba 2, Deportivo Miguel Alemán. 107
Fig. 92 Participante usando dispositivo (a), detección de líneas (b). 107
Fig. 93 Recorrido realizado durante la prueba 3, Estadio Wilfrido Massieu. 108
Fig. 94 Comportamiento de algoritmo con cruce de líneas. 109
Fig. 95 Pruebas algoritmo de detección de círculos, espaciamiento de etiquetas. . 110
Fig. 96 Detección de circulo (a) y Código (b). 110
Fig. 97 Datos de usuarios graficados con Matlab, cambios de orientación (a) (b). . 111
Fig. 98 Datos de usuario uno graficados con Matlab, cambios de orientación (a) (b). 112
Fig. 99 Datos de usuario dos graficados con Matlab, cambios de orientación (a) (b). 113

Fig. 100 Datos de usuario tres graficados con Matlab, cambios de orientación (a) (b). 113
Fig. 101 Datos de usuario cuatro graficados con Matlab, cambios de orientación (a) (b). 114
Fig. 102 Detección de código uno. 114
Fig. 103 Detección de código dos. 115
Fig. 104 Detección de código tres. 115
Fig. 105 Detección de código cuatro. 116
Fig. 106. Circuito control de motores. 124
Fig. 107 . Circuito control de cámara. 125
Fig. 108 . Circuito control de botones. 126

Índice de tablas

Tabla 1. Consumo de corriente de periféricos del dispositivo. 98

Capítulo 1. Introducción

El concepto de discapacidad es considerado dinámico, constantemente tiende a cambiar al intervenir factores ambientales, sociales o culturales. La Organización Mundial de la Salud (OMS) reconoce el dinamismo del término a través de la Clasificación Internacional del Funcionamiento (CIF), que utiliza tres categorías con las cuales se puede definir una discapacidad. Las cuales son deficiencia, limitaciones de la actividad y restricciones de participación. Una persona puede considerarse discapacitada si presenta dificultad en alguna de las categorías anteriores y puede acentuarse aún más, si su ambiente no se encuentra debidamente adaptado para desarrollarse plenamente [1]. Contando con las herramientas necesarias o desarrollándolas, estas barreras pueden ser superadas, permitiendo la inclusión de este grupo social.

Muchos dispositivos desarrollados actualmente tienden a enfocarse en actividades que solo se practican de forma estática y no atienden aquellas otras dinámicas, que involucran el acondicionamiento físico o la condición de salud de las personas con discapacidad visual o ceguera. Algunos dispositivos en el mercado tienden a ser relativamente costosos debido a las características que ofrecen y por ello de difícil acceso para la mayoría de las personas. Tanto en México como en el resto del mundo, el número de personas con discapacidad visual o ceguera a tendido aumentar, debido al gran número de enfermedades asociadas con la perdida de este sentido [2] [3]. A pesar de esto, la falta de adaptación de infraestructuras para el desarrollo de este grupo social se convirtió en una barrera de inclusión, a la que se enfrentan día a día, no solo en actividades cotidianas si no también en actividades recreativas.

Existen varias formas de atender cada una de las necesidades para las personas con discapacidad visual o ceguera, una de ellas es implementando herramientas tecnológicas ya existentes como la visión por computadora, en combinación con la electrónica, las cuales siguen desarrollándose. La investigación en

estas áreas ha brindado grandes desarrollos en aplicaciones y avances tecnológicos que pueden ser adaptados en beneficio de este grupo social.

1.1 Planteamiento del problema

Alrededor del mundo existen al menos cerca de 2.200 millones de personas que padecen alguna deficiencia visual o ceguera [3]. En México la cifra de individuos que padecen limitaciones para ver, se incrementó en cerca de 7 veces en 10 años, pasando de 1,292,201 en 2010 a 8,974,853 personas en 2020 [2]. Esta tendencia al alza, supone un incremento en el desarrollo y adaptación de dispositivos que cubran las necesidades de este grupo de social y que aún no ha sido abordada completamente.

Una de las necesidades principales de este grupo social es la práctica de actividad física. La OMS menciona que el ejercicio puede mejorar funciones del organismo, por el contrario, la baja actividad física se convirtió en el cuarto factor de riesgo de mortalidad en el mundo. Es por ello que se recomienda la práctica de actividad física anaeróbica moderada de 150 minutos o 75 minutos de actividad vigorosa por semana [4]. Sin embargo, las personas con discapacidad visual presentan problemas para cumplir con estas recomendaciones, tendiendo a desarrollar problemas de salud adicionales, relacionados con la falta de actividad física. Actualmente la mayoría de las opciones tecnológicas desarrolladas no están destinadas a la práctica de actividades deportivas, muchas de estas contemplan solo la movilización en espacios interiores o exteriores, siendo de gran ayuda en la vida cotidiana, pero dejando a un lado la práctica de actividad o el acondicionamiento físico de las personas invidentes. Como consecuencia de la falta o baja actividad física, se desarrollan problemas de salud que pueden agregar más impedimentos a los individuos de este grupo social, además de que se pone en riesgo su salud de acuerdo con las recomendaciones realizadas por la OMS.

Adicional a este problema, también se debe considerar la falta de accesibilidad a espacios o áreas comunes, debido a la ausencia de señalización con aditamentos

especiales que puedan ser utilizados para ubicarse y orientarse. La señalización de puertas, entradas o salidas en edificios o espacios públicos es escasa en muchos lugares y representa un gran obstáculo para la inclusión social de las personas invidentes.

1. 2 Objetivo general

Desarrollar un sistema de orientación con procesamiento de imágenes para personas con discapacidad visual que practican actividad física anaeróbica moderada, realizada en una pista de atletismo y que pueda reconocer códigos colocados a nivel de piso mientras es utilizado al caminar. Con la capacidad de retroalimentar al usuario mediante vibraciones y de forma auditiva en tiempo real durante todo su recorrido, almacenar los datos de las correcciones de orientación realizadas, interpretar los códigos detectados para el usuario y transmitir la señal de video a un ordenador para dar seguimiento a su trayectoria.

1.2.1 Objetivo Particular

1. Adaptar y reacondicionar un soporte de postura para la colocación de todos los componentes electrónicos.
2. Desarrollo y programación de un algoritmo de reconocimiento de líneas para pistas de atletismo.
3. Desarrollo y programación de un algoritmo de reconocimiento de patrones y códigos en círculos.
4. Diseño y programación de un algoritmo de control de la inclinación de una cámara de video.
5. Diseño de electrónica para alimentación y control de periféricos del sistema.
6. Diseño y programación de un algoritmo de prueba de periféricos para la seguridad del usuario.
7. Análisis y registro de los datos de corrección de trayectoria y códigos detectados.

1.3 Estructura de la tesis

1.3.1 Capítulo 1

Se presenta una introducción sobre aspectos importantes pertenecientes a la discapacidad visual, las características observadas que se abordaron y que dieron origen al planteamiento del problema. Se realiza el planteamiento del problema como origen de los objetivos que se requieren alcanzar para el desarrollo de este trabajo. Se definen el objetivo general que busca alcanzar el estudiante, como su aportación en el área estudiada y los objetivos particulares por medio de los cuales se llegara a cumplir.

1.3.2 Capítulo 2

Este capítulo aborda el estado del arte del área estudiada, se incluyen las bases teóricas y prácticas estudiadas, con lo cual el estudiante abordo la problemática observada y como mediante la combinación de estas herramientas se hace una aportación al área estudiada. Se presentan desarrollos tecnológicos comerciales y en investigación que abordan problemáticas similares o distintas y que representa un ejemplo de trabajos realizados en la misma área de estudio.

1.3.3 Capítulo 3

Se aborda el desarrollo y la metodología usada por el estudiante durante el desarrollo del proyecto, para alcanzar el objetivo general y específicos mediante las bases teóricas y prácticas estudiadas. También se presentan los materiales y software utilizados en el desarrollo del sistema y subsistemas para generar un prototipo funcional que pueda ser sometido a pruebas y evaluación.

1.3.4 Capítulo 4

Se introduce el dispositivo desarrollado y las pruebas realizadas a las que se sometió, la preparación y requerimientos necesitados para su ejecución. También se presenta las instrucciones de funcionamiento para operar el dispositivo a los participantes de las pruebas, finalizando con la adquisición de datos para la evaluación del desempeño y análisis de su uso.

1.3.5 Capítulo 5

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas en campo, se procede analizarlos e interpretarlos para evaluar el desempeño del dispositivo. También se muestran de forma gráfica los datos obtenidos mediante el uso del software de análisis de datos.

1.3.6 Capítulo 6

En el capítulo 6 presenta la discusión del desarrollo del dispositivo y como se atendieron las barreras a las que se enfrentó durante su implementación, así como un comparativo con los dispositivos desarrollados y comercializados actualmente.

1.3.7 Capítulo 7

Se presentan las conclusiones a las que se llegaron desarrollando este trabajo y su utilidad para las personas con discapacidad visual o ceguera, asi como las perspectivas y recomendaciones de trabajo a futuro que pueden ser abordadas para la mejora del prototipo tanto en software, como hardware y que por limitaciones de tiempo no pudieron ser abordadas.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1 Discapacidad

El termino discapacidad es definido por la Real Academia Española como aquellas situaciones donde las personas enfrentan limitaciones en su participación social, debido a que presentan condiciones físicas o mentales excepcionales [5]. Si bien es un término que otorga un panorama sobre el tema, no incluye cuestiones importantes sobre el entendimiento de sus orígenes. Por su parte la OMS define la discapacidad como un término dinámico, multidimensional, complejo y objeto de discrepancia, debido a que las personas son consideradas discapacitadas por la sociedad más que por sus cuerpos. Es por ello que este término puede referirse también a los aspectos negativos entre una persona con una condición de salud y factores personales o ambientales a su alrededor [1].

2.2 Deficiencia Visual

Alrededor del mundo existen cerca de 2,200 millones de personas que padecen alguna discapacidad visual [3], en México se tienen registrados 8,974,853 personas con limitaciones en la capacidad visual [2]. La discapacidad visual y ceguera puede generarse debido a daños en el sistema visual o en alguna de sus principales funciones, entre los principales factores de riesgo en el padecimiento de afecciones oculares que conducen a una deficiencia o perdida visual se encuentran el envejecimiento, la genética, estilos de vida, infecciones y problemas de salud [3]. En este trabajo nos referiremos a la discapacidad visual y ceguera con la abreviación DV.

2.3 Discapacidad y Deporte

La inclusión de las personas con DV en la sociedad se ha dado de manera paulatina en varios sectores de la sociedad, siempre y cuando se cuente con las

instalaciones y requerimientos necesarios para su seguridad, desempeño laboral y personal. Uno de estos ha sido el desarrollo de actividades deportivas, tanto de manera recreativa como profesional en instalaciones ya existentes, hoy en día existen atletas de alto rendimiento que padecen alguna discapacidad, específicamente DV. En la mayoría de estas actividades tienden a seguir los mismos requerimientos de entrenamiento y utilizan las mismas instalaciones, realizando ciertas adecuaciones, que una persona vidente. Las diciplinas en las que compiten se han incrementado e incluso se han creado deportes exclusivos que solo pueden ser practicados por personas con ciertos tipos de discapacidad. Un claro ejemplo son los juegos paralímpicos, que gozan de la acreditación del Comité Olímpico Internacional y son validados mundialmente, tanto por organizaciones deportivas como por países. Esto brinda la oportunidad a las personas discapacitadas en general, y a las personas con DV en particular, de agregar nuevas actividades a su vida cotidiana y con ello practicar actividad física por medio del deporte.

2.4 Beneficios de la actividad física

La OMS menciona que el ejercicio puede mejorar funciones del organismo, el mantener una baja actividad física se ha convertido en el cuarto factor de riesgo de mortalidad más importante en el mundo, por lo tanto recomienda realizar actividad física anaeróbica moderada de 150 minutos o 75 minutos de actividad vigorosa por semana [4]. También reporta que los infantes con DV tienden a sufrir graves retrasos en su desarrollo físico y mental, que afecta gravemente su calidad de vida, en los adultos se llegan a presentar mayores tasas de depresión y ansiedad que puede contribuir al aislamiento social [3]. La práctica de actividad física permite que las personas con DV puedan aumentar su desarrollo físico y emocional, permitiéndoles la inclusión en la sociedad por otro medio.

Estudios demuestran que la práctica de actividad física regular tiene efecto sobre varios sistemas en el organismo, aportando beneficios a la salud. Se ha asociado a un impacto positivo ante el desarrollo de enfermedades como diabetes

mellitus, insuficiencia respiratoria crónica, deterioro cognitivo y algunos canceres, así como una disminución de la morbilidad y desarrollo de enfermedades crónicas en los últimos periodos de la vida [6]. Si bien estos estudios se realizan en muestras de poblaciones donde las discapacidades no son predominantes, aportan información general sobre el efecto positivo o negativo que tiene la practica o no de actividad física y como esta puede afectar a las personas con DV.

2.5 Problemas de salud

En estudios se ha encontrado que los niños con DV presentan una menor participación en actividades físicas y un mayor desarrollo de sobrepeso y obesidad [7]. El sedentarismo aumenta en este grupo poblacional cuando se presenta una DV mayor, junto con una disminución de las capacidades locomotoras en comparación con niños con una menor DV [8]. La práctica de actividad física rutinaria es importante, se ha demostrado que tiene un impacto positivo en el control de la estabilidad postural, la marcha y la navegación en espacios de uso habitual, en niños y adolescentes [9]. Cuando no es rutinaria, se ha probado una relación entre la falta de actividad física con la disminución de la capacidad aeróbica entre adolescentes con DV y aquellos sin DV, en ambos grupos existe la necesidad de desarrollar periodos de actividad mínimos para mantener una capacidad aeróbica acorde a su edad [10], es claro que el desarrollo de actividades deportivas se ve limitado en el grupo con DV.

Similares resultados se obtuvieron en la población adulta con DV, un estudio realizado por medio del seguimiento de la actividad física diaria con el uso de acelerómetros, encontró índices de baja actividad física en adultos [11]. La probabilidad de caídas en personas con DV aumenta con nula actividad deportiva, debido a la limitación de movimiento en articulaciones, la reducción del rango de movimiento se incrementa debido a la rigidez de músculos y tejidos alrededor de estas, afectando directamente el equilibrio [12].

Tanto individuos que practican deporte como aquellos que no lo hacen, consideran la DV como una barrera personal, en conjunto con la dependencia de otras personas para poder desarrollar estas actividades. Factores ambientales como el transporte o la falta de compañeros con quien practicar un deporte, son también considerados como barreras por las personas con DV. Por otra parte, las personas con DV que practican deporte consideran un motivador importante la interacción social, la diversión y los beneficios para la salud que esto conlleva [13]. Estudios han demostrado la relación favorable que existe entre la práctica de actividad física con la percepción de calidad de vida y con la salud de las personas con DV que la practican [14] [15].

2.6 Atletismo para invidentes

Entre algunas actividades físicas que se pueden practicar sin la necesidad de equipo deportivo adicional se encuentra el atletismo, que puede ser desarrollado en espacios exteriores, interiores o adaptados para cualquier persona o deportista profesional. Un ejemplo de estos espacios son las pistas de atletismo, entre las actividades que se pueden practicar se encuentra las competencias de carreras de 100, 200 o 400 metros planos o también se puede utilizar para la práctica de caminata como actividad física rutinaria y de entrenamiento.

Tanto en competencias, entrenamiento o actividad rutinaria, las persona con DV deberá competir o practicar con el apoyo de un guía-corredor, la función de este es acompañar al competidor durante todo su trayecto, desde inicio y hasta el final de la prueba para evitar que sean impactados por otro guía o atleta, además de mantener y corregir su trayectoria de ser necesario. Para lograr esto, ambos se apoyan de una cuerda o correa diseñada especialmente para estas competiciones figura 1, cuya longitud variara dependiendo del evento para el que se use. Ambos se sostienen de los extremos y deben permanecer en constante comunicación, la coordinación también es muy importante, debido a que cambios en los ritmos de movimiento de

extremidades pueden desbalancear a la persona invidente y hacerla caer, el uso de este dispositivo requiere de entrenamiento y practica constante [16].

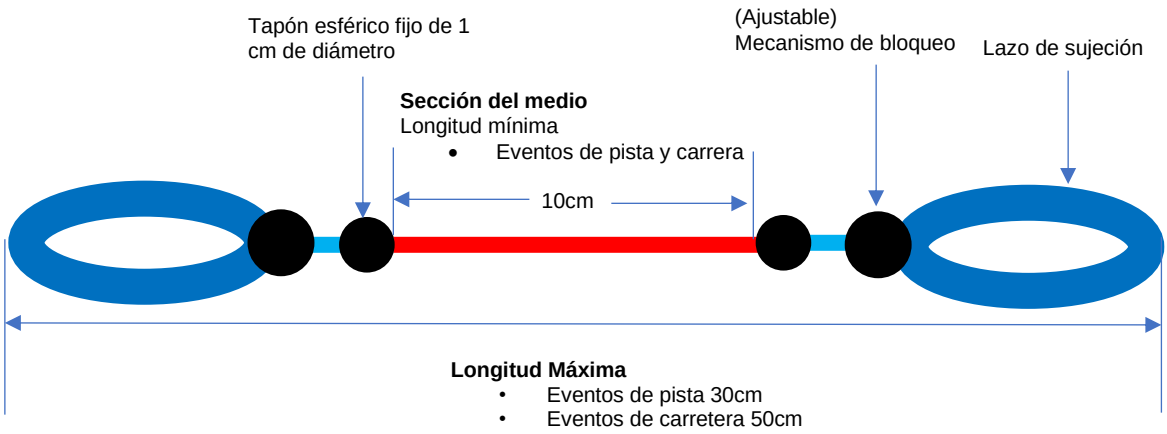

Fig. 1 Características de la cuerda guía-corredor.

2.7 Pista de atletismo

Las pistas de atletismo deben diseñarse y construirse de acuerdo con estándares y normas oficiales, sin embargo, el dispositivo a desarrollar deberá ser adaptado para trabajar en aquellas que no cumplan la mayoría de estos requerimientos. Una pista de atletismo oficial sigue las normas de la Asociación Internacional de Federaciones de Atletismo, IAAF por sus siglas en ingles. En los documentos Reglas Técnicas y Manual de Instalaciones de Atletismo IAAF sección 14, Seguimiento de medidas y Capitulo 1 Aspectos generales de la planificación respectivamente, se especifican las dimensiones y requerimientos necesarios de una pista de atletismo figura 2, figura 3. A continuación, se enlistas los principales y más importantes considerados para este trabajo [16].

- Longitud mínima de 400m.
- Dos rectas paralelas y dos curvas de mismo radio.
- El interior de la pista deberá estar delimitado por una línea blanca de 50 mm de ancho.

- Separación entre atletas con líneas blancas de 50mm de ancho.
- Carriles independientes de 1.22m ±0.01m.
- La inclinación lateral de la pista hacia el interior o frente, no debe exceder el 1% del nivel de piso terminado.

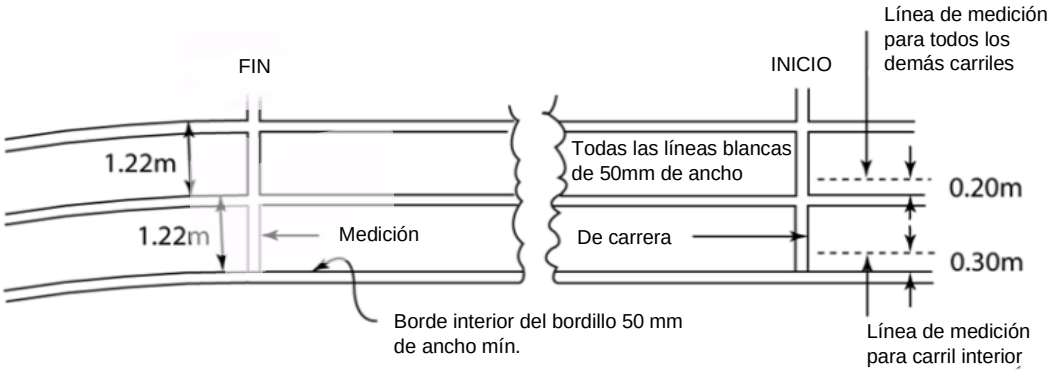

Fig. 2 Dimensiones interiores de una pista de atletismo.

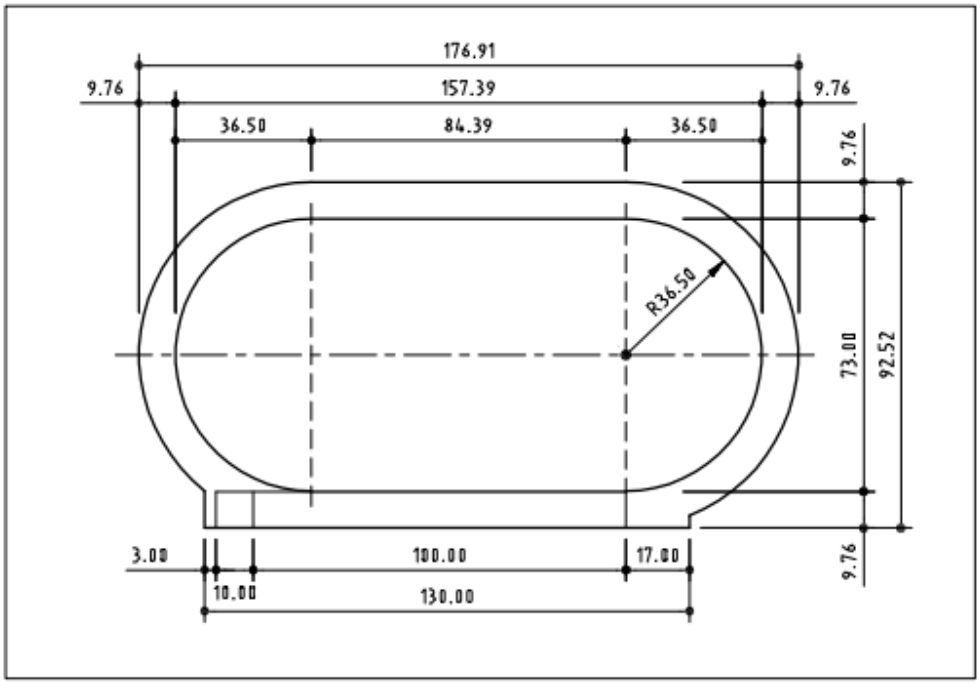

Fig. 3 Dimensiones exteriores de una pista de atletismo.

Las normas y dimensiones oficiales no son impedimento para el desarrollo de este trabajo, pero si delimitan aspectos físicos de diseño muy importantes, que pueden ser aprovechados en beneficio de las personas con DV que practican actividad física en estas instalaciones ya existentes y con los que se trabajara en el desarrollo del sistema propuesto para alcanzar los objetivos planteados. No se busca sustituir el apoyo de los guías-corredores entrenados, si no demostrar que ellos podrían acompañar a los actuales o futuros competidores utilizando medios tecnológicos ya existentes en la actualidad. Una de las principales características que se busca en este trabajo es que las pistas de atletismos presenten las líneas que delimitan de los carriles de los competidores, así como condiciones óptimas en sus superficies para la seguridad de las personas con DV.

2.8 Procesamiento de imágenes

Las imágenes pueden ser definidas como una función de dos dimensiones $f(x, y)$, siendo (x, y) las coordenadas espaciales de la ubicación de cada uno de los mínimos elementos que la conforman. El valor de amplitud de f, es la intensidad o nivel de gris en imágenes monocromáticas, en el punto originado por las coordenadas (x, y). El nivel de gris también es conocido como intensidad monocromática, cuyo rango intermedio, que va desde el negro hasta el blanco, se denomina escala de grises y dependiendo de la aplicación que se le dé, puede tomar valores desde 0, negro, hasta 255, blanco.

El procesamiento de imágenes se puede realizar utilizando imágenes cromáticas, a color, pero se pueden transforman en escala de grises para su procesamiento, monocromáticas. Una imagen digital es aquella que posee valores finitos o cantidades discretas en $f(x, y)$, esta conformada por elementos conocidos en inglés como *picture elements*, *image elements*, *pels*, o *píxel*, píxel será usado en este documento para referirse a la mínima unidad que constituye una imagen. Las imágenes generadas o transformadas en escala de grises utilizan 8 bits para asignar una intensidad a un pixel, que puede tomar un valor entre 256 tonos. Por lo tanto el

procesamiento de imágenes digital es el estudio de un conjunto de pixeles, de una región en específico de una imagen o de toda ella, utilizando diversas herramientas o técnicas de análisis con ayuda de una computadora [17]. Al ser un campo de estudio muy amplio, los métodos de análisis poseen diversas aplicaciones en varias áreas ya sea teóricas o prácticas, como se abordará en este trabajo.

2.9 Visión por computadora

La visión por computadora puede definirse como la extracción de la información más importante de un proceso, proveniente de un conjunto de imágenes o video, que son analizados para generar una respuesta *a priori* (antes) o *posteriori* (después), por medio de la ejecución de complejos algoritmos de reconocimiento [18]. Transforma datos provenientes de sensores externos contenidos en cámaras, utilizando una unidad central de procesamiento como una computadora. Los datos pueden provenir ya sea de imágenes o videos en dos o tres dimensiones (2D/3D), su finalidad es interpretarlos o tomar decisiones sobre lo que se presenta en ellos, buscando un objetivo en particular [19]. Definido lo anterior, el mundo real representa un problema en el análisis de los datos obtenidos, debido a que la mayoría de los sensores utilizados solo pueden trabajar en dos dimensiones. Un entorno real representa un conjunto de datos en 3D difícil de analizar sin equipo especializado, esto puede ser resuelto usando métodos como cámaras estereoscópicas, sensores adicionales de apoyo o algoritmos especiales de procesamiento. Lo anterior puede representar un coste computacional mayor, por ello estos procesos deben ser balanceados con la finalidad de obtener respuestas en cortos periodos de tiempo o de necesitarse, obtener una aplicación en tiempo real lo más rápida posible.

2.10 Detección de bordes

La detección de bordes es una de las metodologías de segmentación utilizadas para la extracción de características de objetos de estudio presentes en imágenes, su funcionamiento se sustenta en el análisis de los cambios en los valores de intensidad

de los pixeles que conforman una imagen. El modelo de clasificación basado en el perfil de intensidad de los pixeles, que conforman un borde de un objeto en una imagen los clasifica de tres formas, como *step edge, ramp edge* o *roof edge,* figura 4. Donde *K* toma valores entre 0 y 255 para imágenes en escala de grises.

Los bordes *step edge* figura 4 *(a),* son ideales y aparecen como un cambio de intensidad entre pixeles, con una distancia entre ellos no mayor a uno, no presentan perturbaciones como ruido o transiciones mayores y son generados principalmente por software de computación. Generalmente las imágenes con bordes del tipo *step edge,* no requieren la aplicación de un preprocesamiento robusto antes de ser analizadas, esto significa que no requieren operaciones morfológicas como la erosión o el suavizado.

Los bordes *ramp edge* figura 4 *(b),* presentan una pendiente que es inversamente proporcional al desenfoque de este, *K* toma diferentes valores de acuerdo con el grado de difuminado de los pixeles. Este tipo de bordes se presentan debido a artefactos producido en la imagen por restricciones en los mecanismos de enfoque de la cámara, como las lentes o componentes electrónicos internos, que provocan imágenes borrosas y ruidosas. Los bordes ahora están representados por un conjunto de pixeles conectados entre sí. por diferentes valores o cualquier punto de este conjunto.

Los bordes *roof edge* figura 4 *(c),* son semejantes a una línea que atraviesa una región y son determinados por el detalle y grosor de esta, presentan cambios de intensidad en los pixeles adyacentes y representan una línea en una imagen [17].

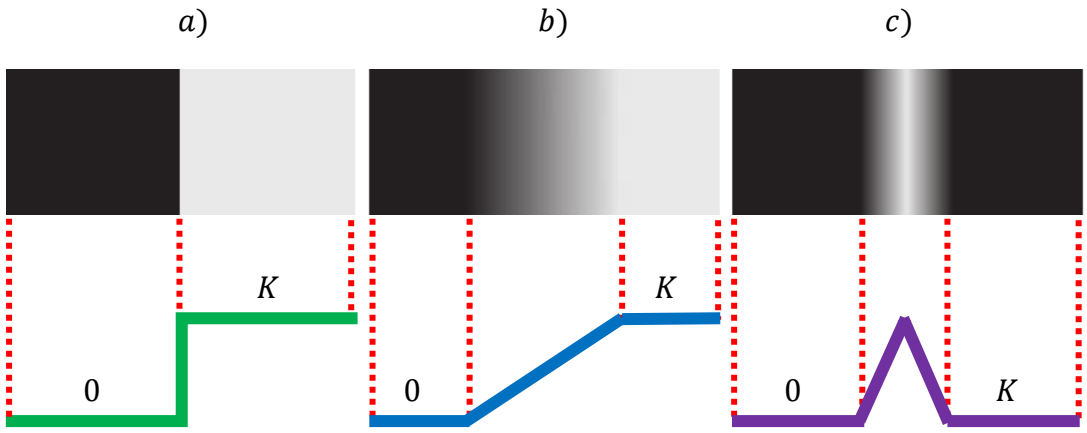

Fig. 4 Tipos de bordes en las imágenes, a) *step edge*, b) *ramp edge*, c) *roof edge*, modificado de [17].

2.11 Detector de bordes Canny

Existen métodos para la detección de bordes en imágenes en escala de grises implementados en algoritmos computacionales, uno de los más utilizados y extendido por su desempeño en la detección de bordes es el detector Canny. Es un algoritmo de múltiples etapas que ha sido mejorado a través del tiempo, permitiendo detectar distintos tipos de bordes de acuerdo con los parámetros utilizados. Utiliza un filtro gaussiano basado su primera derivada lo que genera un difuminado produciendo una imagen borrosa, esto permite que la detección de bordes no sea afectada por la aparición de pixeles con altas frecuencias, cambios de intensidad abruptos que generen bordes falsos debido al ruido en la imagen.

Los filtros gaussianos son matrices que de dimensiones impares que básicamente realizan un recorrido por toda la imagen operando con los valores de los pixeles existentes. Canny utiliza varios filtros dependiendo de la dirección del borde, horizontal, vertical y diagonal en sentidos contrarios, con los cuales calcula la primera derivada para determinando el gradiente del borde y su respectiva dirección [20]. El algoritmo consta de cuatro etapas principales:

- Reducción del ruido: utiliza un filtro gaussiano para reducir el ruido generado en la imagen por diferentes causas.
- Gradiente de intensidad: calcula el gradiente para encontrar en qué dirección hay cambios de intensidad de los pixeles, actúa como un filtro que descarta falsas detecciones de bordes.
- Supresión de falsos máximos: elimina pixeles que no pertenecen a los bordes detectados comparando los valores máximos de intensidad de los pixeles con los más cercanos y descartando aquellos que no sean máximos locales.
- Umbral de histéresis: este es definido en algunas implementaciones de algoritmos por el usuario, filtra los pixeles de los bordes con valores que no se encuentren entre un rango definido por el umbral y dependiendo su conectividad con otros pixeles.

El algoritmo es aún más complejo y su implementación o desarrollo desde cero, no está considerado en el alcance de este trabajo. Sin embargo, se buscó software con librerías optimizadas que reduzcan el tiempo de procesamiento requerido para su aplicación junto con otros programas.

2.12 Transformada de Hough

En los métodos de detección de bordes mencionados el proceso se realiza de forma global, no discernimos entre figuras, líneas o curvas, para hacerlo de forma específica se debe de tomar en cuenta las formas u objetos que se buscan en una imagen, mediante la aplicación de condiciones, parámetros o características definidas por el usuario y desarrollando o utilizando métodos descritos y probados en el análisis de imágenes. Un ejemplo de esto es que para encontrar m puntos pertenecientes a una línea se requeriría el análisis del subconjunto de puntos adyacentes que la conforman y pertenecen a esta. Utilizar un método estándar desarrollado por sí mismo podría plantear un mayor coste computacional en el número de operaciones a realizar sobre cada píxel o conjunto de pixeles, en aplicaciones en tiempo real se requerirían

equipos computacionales capaces de realizar complejas o múltiples operaciones en el menor tiempo posible. Para resolver estos problemas han surgido diversos métodos de análisis y algoritmos que permiten encontrar características específicas en imágenes, con un tratamiento previo antes de su aplicación, uno de ellos es la Transformada de Hough.

2.12.1 Detección de líneas

El método desarrollado y patentado en 1962 para el reconocimiento de formas complejas por Paul Hough *"Method and Means for Recognizing Complex Patterns"* [21], es conocido popularmente como la Transformada Hough. Este método es utilizado sobre el resultado obtenido de la aplicación de un detector de bordes y su finalidad es encontrar líneas, círculos o elipses principalmente. Una de las aplicaciones más utilizada de este método es la detección de líneas rectas, que pueden ser descritas por su ecuación pendiente intersección, dada por la ecuación *(1)*:

$$y_i = ax_i + b \qquad (1)$$

Donde (x_i, y_i) es un punto en el plano cartesiano (x, y) por el cual pueden pasar n número de líneas satisfaciendo la ecuación anterior, así como valores distintos de a y b, pendiente e intersección de la recta respectivamente. Una forma de limitar el número de rectas que coincidan con el punto (x_i, y_i) es reescribiendo la ecuación *(1)* sobre el plano (a, b) ecuación *(2),* obteniendo una sola línea asociada a estos valores (x_i, y_i):

$$b = -ax_i + y_i \qquad (2)$$

La siguiente figura 5 muestra la interpretación de la ecuación de la recta en el plano cartesiano (x, y) y en el plano de parámetros (a, b).

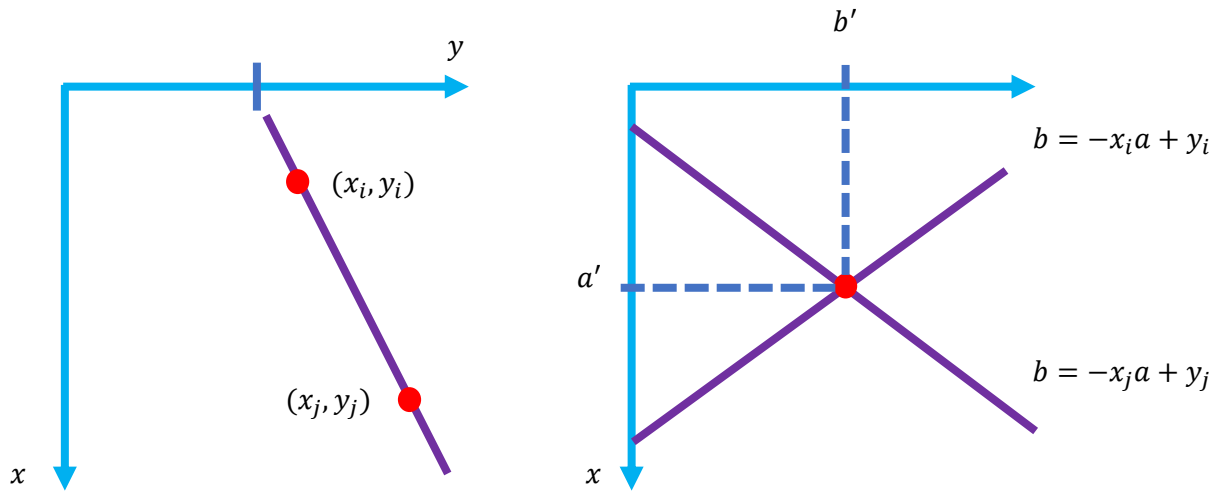

Fig. 5 Plano (x, y), Plano (a, b), representación de la ecuación de la recta.

Incluso en el espacio de parámetros (a, b), un segundo punto (x_j, y_j) tendrá asociada una línea en (a, b), que intersecará en algún punto de (x_i, y_i). Esto significa que cuantas más líneas en el espacio de parámetros (a, b), formadas por (x_k, y_k) puntos adyacentes, se intercepten con un punto (x_i, y_i), pertenecerán a una línea en el plano (x, y). Sin embargo, utilizar el espacio de parámetros (a, b), genera un problema, la pendiente a tiende a infinito cuando la línea se vuelve vertical, para resolver este problema se determinó utilizar la forma polar o normal de la recta, ecuación *(3)*:

$$x \cos\theta + \sin\theta = \rho \qquad (3)$$

Esta representación retira las restricciones para el valor de la pendiente que puede tomar la recta, en su lugar el valor del ángulo θ de 0° y ρ toma un valor igual al de su intersección en x con una recta horizontal, θ toma el valor de 90° y ρ un valor

igual a su intersección en y con una recta vertical. Para valores negativos θ toma valor $-90°$ y ρ el valor con su intersección negativo en y. Esto genera un conjunto de curvas senoidales que cruzan en un mismo punto para iguales valores de θ y ρ, para n puntos adyacentes de una recta en un mapa de bordes del plano (x, y). El punto de intersección (θ, ρ) corresponderá a una línea en el plano (x, y) para los puntos (x_i, y_i) y (x_j, y_j), como se muestra en la figura 6.

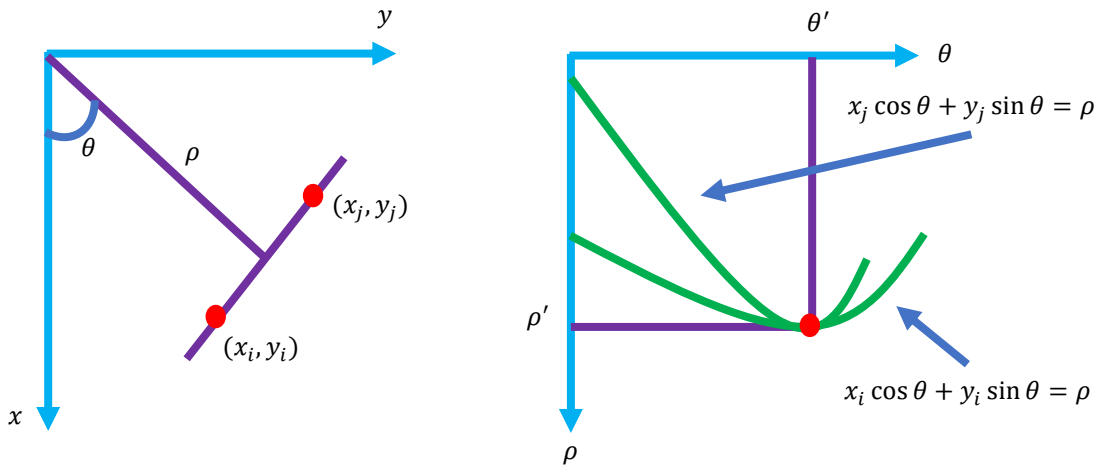

Fig. 6 Conjunto de curvas senoidales generadas para distintos puntos.

Una imagen de $m * n$ pixeles es subdividida en el espacio de parámetros (θ, ρ) con valores máximos y mínimos, formando celdas de $g * h$ dimensión llamadas acumuladores. Las celdas corresponden con valores de coordenadas (x, y) asociadas a valores de (θ, ρ), después de hacer el cambio de parámetros. Para un conjunto de puntos pertenecientes a una recta en el plano (x, y), se obtiene θ así como ρ con el uso de la siguiente ecuación:

$$\rho = x_k \cos\theta + y_k \sin\theta \qquad (4)$$

El valor obtenido de ρ es redondeado y asignado a la celda acumuladora correspondiente de parámetros (θ, ρ) figura 7, este procedimiento es repetido para los puntos adyacentes a la línea pertenecientes a un detector de bordes, hasta obtener la celda con más número de votos. Los puntos que cumplen con los mismos valores de (θ, ρ) corresponderán a una línea recta en el espacio (x, y). El método se ve limitado por el número de subdivisiones para las celdas acumuladoras de parámetros, determinando la precisión de la colinealidad de los puntos adyacentes de una línea recta [17]. El tamaño de la celda acumuladora también determinara el número de operaciones a realizar y con esto un aumento del tiempo de procesamiento, por ello es importante elegir un tamaño de celda que mejor se ajuste a las necesidades de la detección.

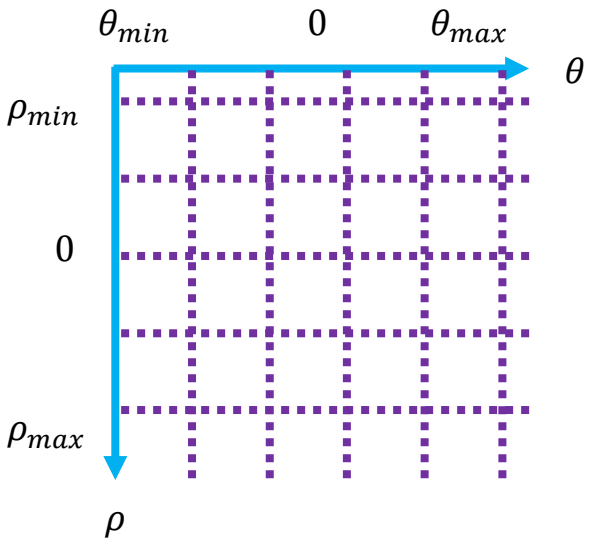

Fig. 7 Representación de una celda acumuladora.

2.12.2 Detección de círculos

Existe una versión de la transformada de Hough para la detección de círculos, implementa un algoritmo parecido al usado en la detección de líneas y tiene una eficiencia computacional similar. Al igual que el método de detección de líneas, existen

versiones optimizadas de este, capaces de ser ejecutados en tiempo real. Para encontrar un círculo en una imagen, tiene que poder ser descrito por una ecuación que cumpla con los parámetros de un círculo y que se puedan encontrar en la imagen. La ecuación *(5)* estándar que describe un círculo en un plano de coordenadas (x, y), un espacio bidimensional, como el formado por una imagen de $m * n$ filas y columnas, está dada por:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \qquad (5)$$

Donde (a, b) son las coordenadas del centro de un círculo y r es su radio. Si se busca ubicar un punto del borde de la circunferencia en una imagen, las coordenadas de los pixeles que la conforman estarán dadas por el punto denotado por (x, y). Por lo tanto, un punto arbitrario (x_i, y_i) en la línea del borde de la circunferencia de un círculo, puede ser transformado en un cono circular en el espacio de parámetros (a, b, r) figura 8, un espacio tridimensional.

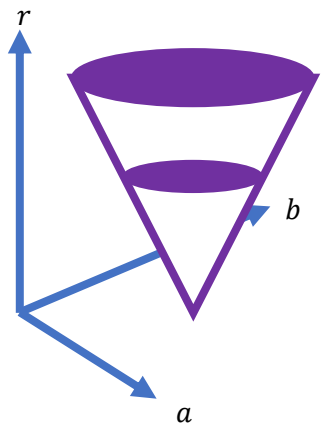

Fig. 8 Cono formado por los parametros (a,b,r).

Una imagen que posee un objeto en forma de un círculo y cuya circunferencia ha sido detectada por medio de un detector de bordes, tendrá n número de puntos

(x_i, y_i) que yacen sobre la circunferencia. Estos puntos se interceptarán en las mismas coordenadas del cono formado por el espacio de parámetros (a, b, r) y que también están definidas en el espacio bidimensional (x, y).

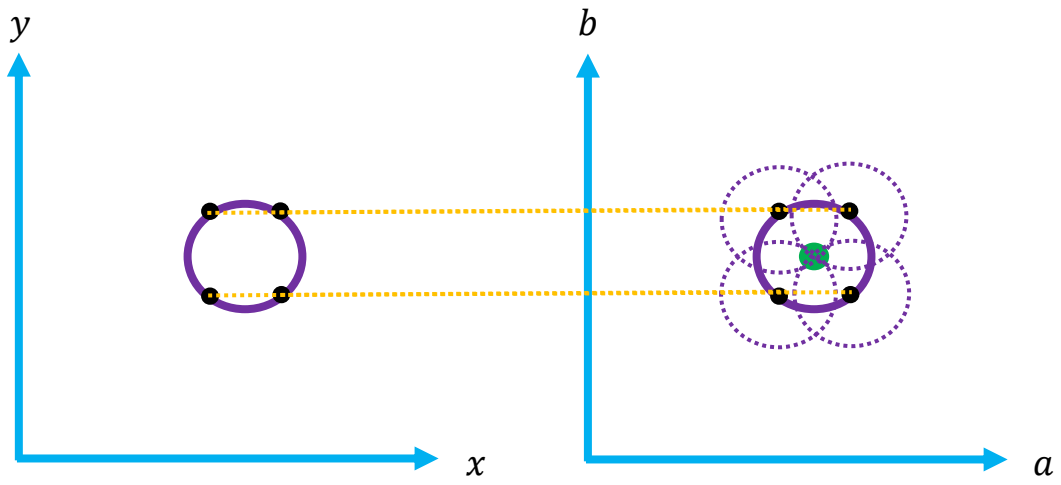

Fig. 9 Espacio de coordenadas (x, y), espacio de parámetros (a, b).

El proceso de detección de círculos posee varias etapas que se deben de tener en cuenta, las que mejor describen el método principalmente son dos y se basan en el análisis de parámetros conocidos o no del círculo, como el radio. La primera de ellas considera un radio conocido del círculo, para encontrar las coordenadas centrales en el plano (x, y) que puedan describir más satisfactoriamente el punto central de este. La segunda etapa se basa en concentrar el punto que describa el centro del círculo a partir de valores generados en una dimensión, como lo es el de una celda acumuladora figura 9, similar a las utilizadas en la detección de líneas. El punto con más votos será el que mejor describa el centro del círculo detectado en una imagen.

Los puntos del borde de la circunferencia de un círculo pueden ser representados por un conjunto de circunferencias en el espacio de parámetros *(a, b),* el punto donde se interceptan estas circunferencias será el radio optimo del círculo y

la celda acumuladora donde ocurra esto recibirá un mayor número de votos indicando las coordenadas en el plano cartesiano *(x, y)* del círculo detectado figura 9.

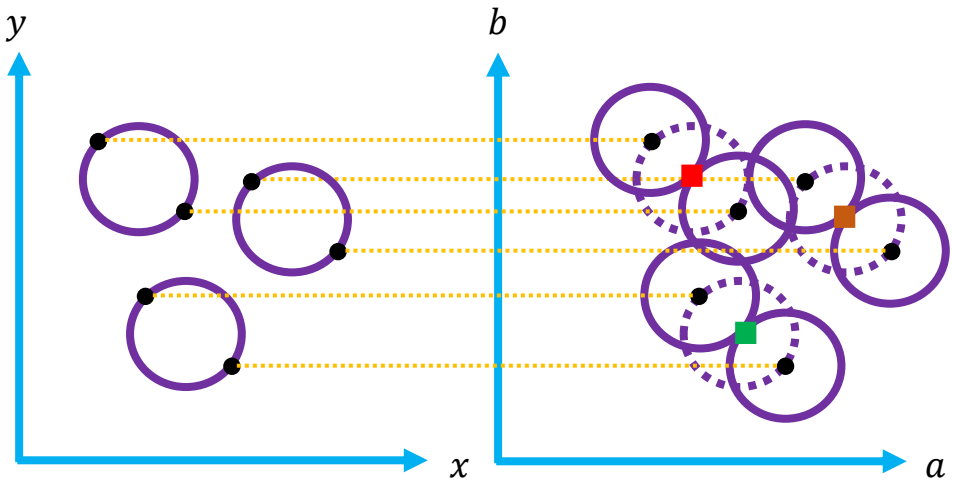

Fig. 10 Generación de celdas acumuladoras (cuadrados), para n círculos en (x, y) que se interceptan en el centro de los círculos en el espacio (a, b).

Por otro lado, si se busca detectar n numero de círculos de radio no definido en una imagen, el método puede utilizar los valores más votados de las celdas acumuladoras para presentar n posibles círculos en ella, lo cual no significa que estos en realidad pertenezcan a una figura con estas características en su geometría. Se debe recordar que el método se combina con la detección de bordes, lo que puede ocasionar que los bordes detectados den origen a posibles figuras con características similares a las de una circunferencia, además de que se incremente el número de cálculos realizados y el tiempo que estos demoran, aumentando el coste computacional al implementarse [17, 19] .

2.12.3 Histograma de una imagen

Una imagen de tamaño $m * n$ filas y columnas, donde la intensidad de los valores de cada píxel, figura 11, estará denotada en una escala dependiente del

número de bits de la imagen, puede ser representada en función de los valores de intensidad de sus pixeles. El histograma es una representación visual y grafica de cómo están distribuidos los valores de intensidades de los pixeles que forman una imagen, cuantificando de forma independiente el número de pixeles que poseen el mismo valor de intensidad. Lo que permite observar de una imagen la distribución de la frecuencia de los pixeles para los diferentes valores de intensidades.

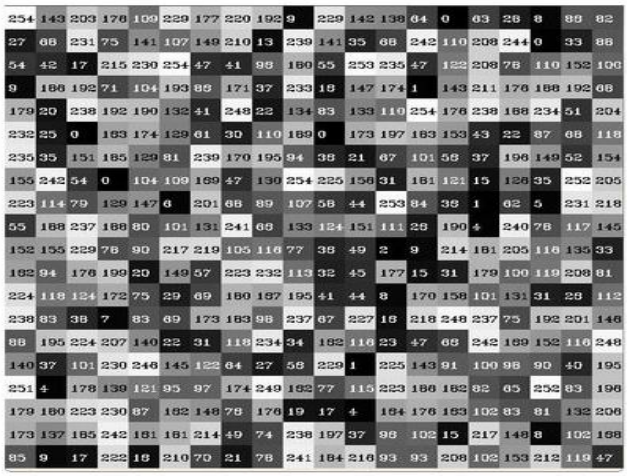

Fig. 11 Valores de intensidades en los pixeles de una imagen en escala de grises.

El histograma de una imagen puede contener la recopilación de los datos de cualquier característica que describa una imagen, en este caso utilizamos lo valores de intensidad de los pixeles. Una imagen contiene información en forma de una matriz con valores de intensidad del rango de 0 a 255, un total de 256 valores de intensidad. Los pixeles pueden ser agrupados de acuerdo con el valor tomado de este rango para presentar la información de forma organizada o incluso este rango se puede segmentar en subpartes que representen mejor el agrupamiento de los datos, también conocidos como *bins,* ecuaciones *(6)(7)*.

$$[0,255] = [0,15]\mathrm{U}[16,31]\mathrm{U} \dots \mathrm{U}[240,255] \qquad (6)$$

$$range = bin_1 \cup bin_2 \cup \ldots \cup bin_{n=15} \quad (7)$$

Si para r_k, donde $k = 0,1,\ldots,L-1$ representa el valor del nivel de intensidad de una imagen, $f(x,y)$, el histograma de f se define como, ecuación *(8)*:

$$h(r_k) = n_k \; para \; k = 0,1,\ldots,L-1 \quad (8)$$

El número de pixeles de f con valor de intensidad r_k esta dado por n_k y la subdivisión de las intensidades determinara el número de *bins* del histograma. Un histograma normalizado se define como:

$$p(r_k) = \frac{h(r_k)}{mn} = \frac{n_k}{mn} \quad (9)$$

La suma de todos los valores de $p(r_k)$, para todo k es siempre uno, ecuación *(9)*. Los valores de $p(r_k)$ serán las probabilidades de ocurrencia de los diferentes niveles de intensidad que conforman una imagen.

En el análisis de características de las imágenes un histograma representa la forma de agruparse de los valores de intensidades de los pixeles, figura 12. Puede utilizarse con otros métodos para la extracción de características más específicas, mejorar aspectos de las imágenes como el contraste y complementa técnicas de reconocimiento de patrones más robustas [17, 19].

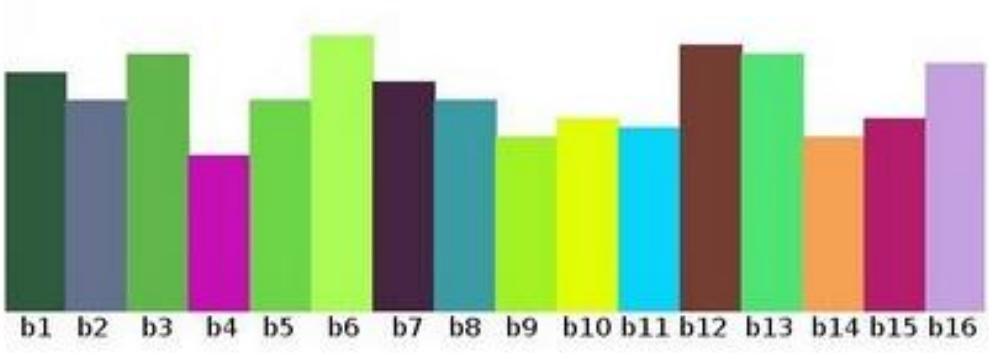

Fig. 12 Representación de un histograma con n número de *bins* de una imagen.

2.12.4 Correlación

La correlación es una medida entre dos variables que nos indica la relación lineal o proporción que existe entre ellas. Se dice que estas variables están correlacionadas cuando los valores o datos que las conforman tienden a variar de forma proporcional, al tener una tendencia a disminuir una de ellas, habrá correlación si la segunda presenta también el mismo comportamiento en cierta medida [22].

Esta medida de comportamiento de los datos de una variable también es aplicable en imágenes, un método que lo utiliza es el *template matching*, que usa la correlación para encontrar objetos en una imagen a partir de una plantilla que, expresado de forma simple, recorre la imagen en busca de un valor máximo de correlación para identificar un objeto. Otra aplicación que no está directamente relacionada con la imagen, pero si con los valores de intensidad de sus pixeles, es la correlación de histogramas. Los cuales se comparan para obtener un parámetro que defina el grado de coincidencia entre histogramas. En función de sus intensidades la correlación se define por las ecuaciones *(10)(11) [19, 22]*.

$$d(H_1, H_2) = \frac{\sum_I (H_1(I) - \bar{H}_1)(H_2(I) - \bar{H}_2)}{\sqrt{\sum_I (H_1(I) - \bar{H}_1)^2 \sum_I (H_2(I) - \bar{H}_2)^2}} \quad (10)$$

Donde:

$$\bar{H}_K = \frac{1}{N} \sum_J H_K(J) \quad (11)$$

2.13 Estado del arte

2.13.1 OrCam

Es un dispositivo portátil destinado a personas invidentes o con diferentes grados de DV, el fabricante posee dos principales modelos comerciales, *OrCam MyEye* y *OrCam MyReader*. Ambos poseen la función de lectura de textos en varios idiomas y detección de número páginas, diferenciándose en que *MyEye,* figura 13, ofrece más funciones de procesamiento de imágenes (reconocimiento facial, identificación de productos, entre otras) en comparación con MyReader, que está enfocado a la lectura de textos [26]. En esencia el dispositivo está diseñado para usarse en actividades estáticas donde el individuo permanezca sentado o en una posición con poco movimiento.

Fig. 13 Dispositivos OrCam [26].

2.13.2 Eyesynth

Es un sistema que utiliza el procesamiento de imágenes para brindar una comprensión auditiva del entorno de una persona. Posee anteojos con dos cámaras de alta velocidad 60fps (*frames* por segundo), audio coclear, un microordenador con procesador *Dual Core* y *chip* FPGA, batería portátil recargable y un *software* especifico desarrollado por el fabricante, figura 14. El sistema registra por medio de las cámaras las imágenes del espacio que rodea al individuo en tres dimensiones, las procesa como audio que se puede escuchar en tiempo real, ofreciendo profundidad del espacio y la posibilidad de interpretación de formas y obstáculos. Posee dos funciones, modo rastreo y panorámico, modo rastreo permite al individuo hacer un barrido de su entorno de izquierda a derecha y en modo panorámico el dispositivo hace captura de todo el escenario frente a este, ofreciendo un audio panorama para su interpretación. El sistema ofrece tres distancias de visión seleccionables 6m, 2m y 0.7m, permite que el usuario pueda explorar, de manera estática o activa, recorriendo su entorno [27].

Fig. 14 Sistema Eyesynth [27].

2.13.3 WeWalk

Este dispositivo es un bastón blanco inteligente para personas invidentes, utilizado como guía en su desplazamiento autónomo, con características tecnológicas agregadas, figura 15. Utiliza un sensor ultrasónico capaz de detectar obstáculos e informar de ellos al usuario mediante vibraciones, tiene la posibilidad de conectarse a un smartphone y utilizarse en simultaneo con aplicaciones de navegación, posee un panel *touch* incorporado que permite controlar un *smartphone*. También integra un asistente de voz capaz de reconocer comandos del usuario, brinda soporte multilenguaje y posee batería recargable. El dispositivo usa una aplicación móvil descargable con la cual se conecta a través de *Bluetooth* 4.2 y un altavoz integrado para dar instrucciones o alertas durante el recorrido [28].

Fig. 15 Dispositivo WeWalk [28].

2.13.4 RFIWS

Es un bastón de identificación por radiofrecuencias (RFIWS), que tiene como objetivo auxiliar en el traslado por las aceras a las personas con DV, figura 16. Utiliza la tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID), basada en el uso de una onda de radio para enviar y recibir información a un dispositivo especifico, como etiquetas colocadas en superficies u objetos. RFID es considerada una tecnología sin contacto y de baja energía, pero requiere un lector para la adquisición de los datos, una etiqueta especial que los almacene y un software que permita la interpretación de la información.

Este sistema detecta la distancia existente entre el bastón de la persona (lector RFID) y etiquetas (RFID) colocadas sobre la acera, lo que permite calcular la distancia física entre los límites de la acera y la persona con discapacidad visual. Esto requiere la colocación previa de varias etiquetas a la misma distancia en todo el recorrido de la persona o toda la longitud de la acera. Utiliza retroalimentación basada en sonido y vibraciones que cambian de intensidad, incrementándose proporcionalmente al aumentar la distancia entre la persona y el borde de la acera [23].

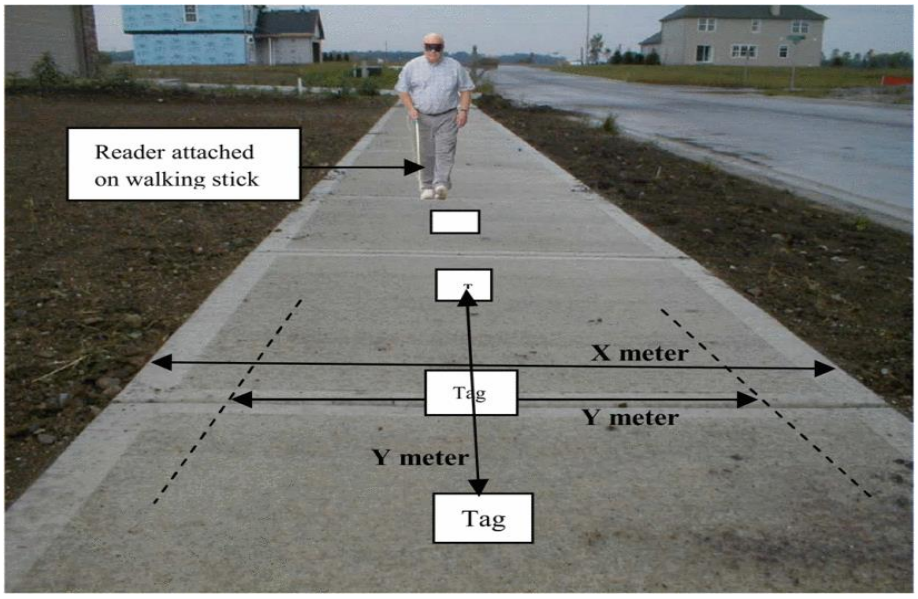

Fig. 16 Funcionamiento de Bastón RFIWS.

2.13.5 PF belt

También llamado *Path Force Feedback belt figura 17*, es un dispositivo desarrollado para personas invidentes que busca apoyar en la navegación de espacios exteriores. Utiliza dos cámaras ubicadas en un teléfono móvil para generar un modelo en tres dimensiones del área donde el usuario se encuentra desplazándose, una fuente de alimentación que le provee de la energía necesaria y un cinturón con celdas vibratorias que le brindan retroalimentación al usuario en 360º alrededor de la cintura.

El procesamiento del video se basa en la extracción de características de las imágenes, principalmente bordes de las aceras y paredes. Estas características detectadas sirven para identificar los objetos y la distancia a la que se encuentran de él y con esta información es posible hacer vibrar las celdas del cinturón. De acuerdo con la orientación a la cual estén los objetos, se proporciona al usuario información sobre su trayectoria y distancia a la que se encuentran de él. El dispositivo implementa un algoritmo que posee diversos patrones de vibración para la identificación especifica

de los objetos detectados en las imágenes, variando la frecuencia e intensidad de las vibraciones de las celdas [24].

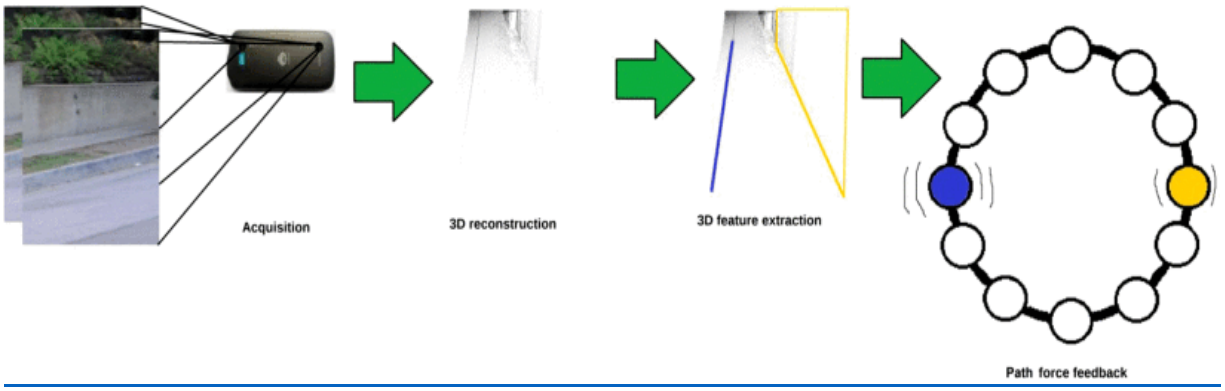

Fig. 17 Dispositivo PF Belt funcionamiento del equipo.

Capítulo 3. Desarrollo

En esta sección se presenta el diseño y desarrollo de los subsistemas que conforman el sistema final, así como los materiales y *software* utilizados de acuerdo con las necesidades abordadas anteriormente. El sistema se comprende de 6 subsistemas:

1. Subsistema de soporte de postura modificado.
2. Subsistema de control de motores y buzzer.
3. Subsistema de control de botones.
4. Subsistema de control de ángulo de la cámara.
5. Subsistema de algoritmos de detección y control.

3.1 Descripción del dispositivo

El dispositivo propuesto para la orientación de personas con DV que practican actividad física en pistas de atletismo, se compone del desarrollo de cinco subsistemas. Todos ellos estarán montados sobre un soporte de postura modificado, la selección de este modelo fue basada en las ventajas que brinda en la colocación de los demás subsistemas. El soporte brinda mayor flexibilidad para el usuario al permitir repartir el peso de los componentes en toda la sección del tórax-espalda. El sistema deberá ser capaz de trabajar en espacios exteriores, con diferentes condiciones de iluminación durante el día y brindar retroalimentación en tiempo real al usuario, para mantener una correcta trayectoria y corregir desviaciones de orientación en ella. La figura 18 representa una propuesta del sistema a implementarse y los periféricos que se utilizaran en su instalación.

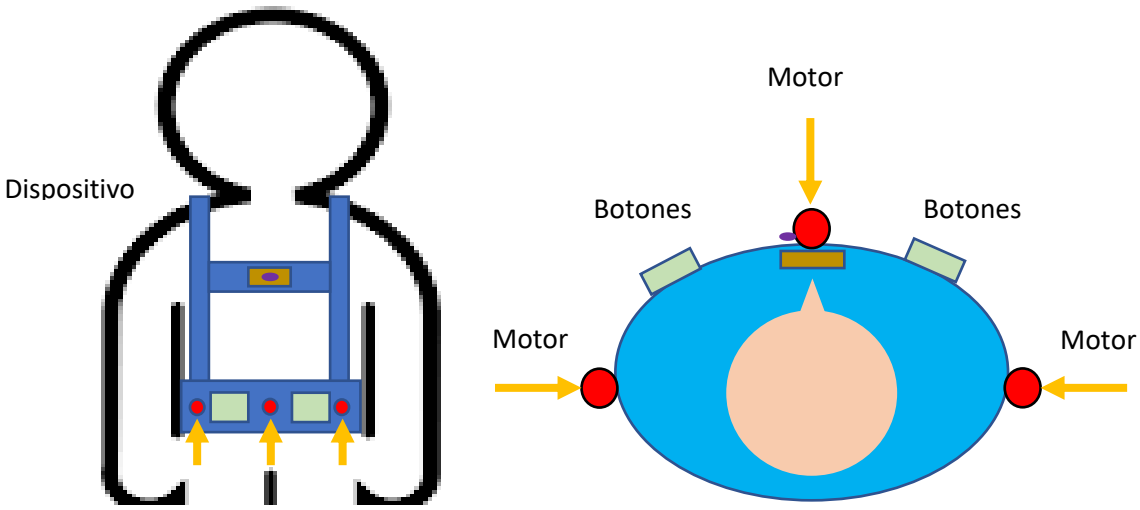

Fig. 18 . Propuesta de sistema de orientación, motores vibradores en color rojo, botones en verde y cámara en color café.

3.1.2 Materiales

3.1.2.1 Raspberry Pi Model B (Pi4B)

La fundación Raspberry es una organización benéfica con sede en el Reino Unido, tiene como objetivos la promoción de la educación en niños y adultos, a través de la informática y las computadoras. Fabrica y distribuye varios modelos de computadoras de bajo costo, reducidas en tamaño y con capacidad de ejecutar los mismos procesos que una computadora de escritorio o laptop [25]. Permiten el diseño y construcción de dispositivos portables, conexión de periféricos, capacidad de ejecutar múltiples distribuciones basadas en el sistema operativo de código abierto Linux y la programación en varios lenguajes informáticos como Python, C++, Java, entre otros. Debido a lo anterior, para este trabajo se seleccionó uno de los modelos existentes comercialmente para el desarrollo del dispositivo a implementar.

El Pi4B fue anunciado en 2019 figura 19, es la tarjeta que actualmente se encuentra en desarrollo, recibe soporte y actualizaciones constantemente por la

fundación. En comparación con los modelos anteriores, posee mayor capacidad de procesamiento, memoria RAM, conectividad y entre otras mejoras añadidas.

Fig. 19 Raspberry Pi 4 Modelo B.

Principales características:

- Procesador ARM-Cortex A72 de cuatro núcleos y 64 bits a 1,5 GHz.
- Bluetooth 5.0 de baja energía (BLE).
- Opción de 1, 2 y 4 Gigabyte de memoria RAM.
- Tecnología WI-Fi 802.11 b/g/n/ac.
- 2 puertos USB 3.0 a 600MB/s
- 28 entradas y salidas de propósito general (GPIO)
- Varias interfaces de comunicación (UART, I2C, SPI)
- Sistema operativo basado en LINUX

El Pi4B posee un puerto USB-C para su alimentación, requiere una fuente de voltaje de 5V y un amperaje de 3A. El Pi4B trabaja con un voltaje lógico de 3.3V, los pines GPIO pueden suministrar hasta 16mA como máximo. La temperatura ambiente de operación debe estar entre 0ºC y 50ºC, la unidad central de procesamiento (CPU)

no debe exceder los 85ºC durante su operación, recomendándose enfriamiento externo cuando se esté por alcanzar esta temperatura [25].

3.1.2.2 Microcontrolador ATmega328

ATmega328 es una familia de microcontroladores AVR de 8-bit con 32K bytes de memoria *flash* programable, tiene un alto desempeño en ciertas aplicaciones, es de bajo consumo de energía, posee una arquitectura RISC (*Reduced Instruction Set Computing*), 23 pines GPIO (*General Porpuse Input Output*) de propósito general programables, seis canales PWM (*Pulse Width Modulation*), interfaz serie I^2C (*Inter Integrated Circuits*), entre otras características. Comercialmente se presenta en diferentes empaquetados, para el desarrollo de este trabajo se seleccionó un encapsulado tipo TQFP (*Type Quad Flat Package*) de 32 terminales figura 20.

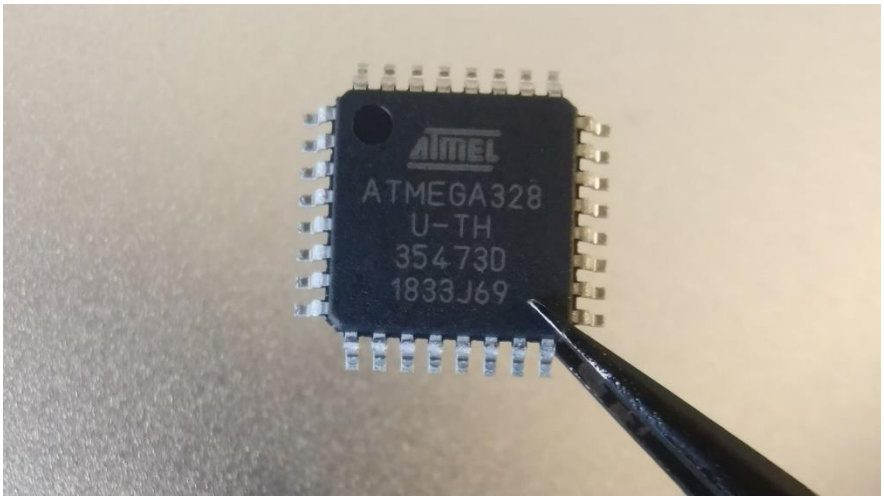

Fig. 20 ATMega328 TQFP.

3.1.2.3 Modulo Conversor USB-Serie TTL

Es un convertidor que posee un chip FTDI (*Future Technology Devices International*) FT232RL convertidor de lógica TTL (*Transistor-Transistor Logic*) a UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), convierte el protocoló de transmisión

de datos USB (*Universal Serial Bus*) a UART y viceversa, permitiendo la comunicación entre dispositivos microcontroladores y computadoras de manera alámbrica. A través del módulo se realiza el envío de códigos escritos en lenguaje de programación a microcontroladores mediante sus pines, utiliza una fuente de alimentación de 5V y puede trabajar con dos niveles de voltaje lógicos dependiendo del dispositivo al cual se pretenda conectar, 5V o 3.3V. En la figura 21 se presenta una PCB (*Printed Circuit Board*) con el chip integrado, lo que facilita el uso de sus diferentes pines, así como la conexión entre computadora y microcontrolador, previa instalación de los controladores correctos para su uso.

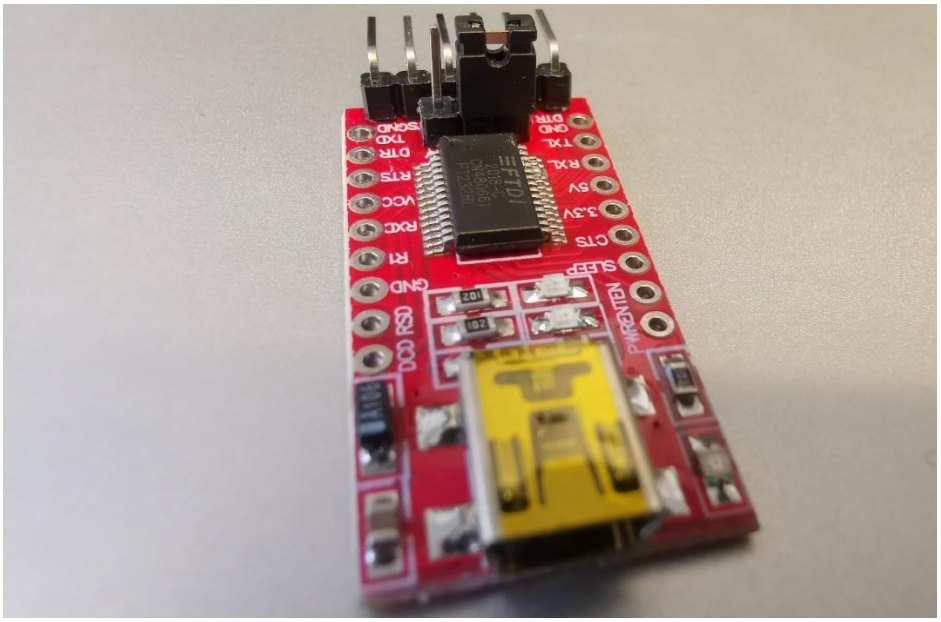

Fig. 21 Convertidor FTDI, FT232RL.

3.1.2.4 Modulo ITG/MPU-6050

Es un dispositivo que posee un chip INVENSENSE MPU-6050 figura 23, en el cual se incorpora un acelerometro y giroscopio, ambos de 3 ejes, permitiendo 6 grados de libertad, posee también un sensor de temperatura interno integrado. El modulo permite detectar orientacion, desplazamiento y posición espacial de movimientos rápidos y lentos. El giroscopio cuenta con una escala de ±250°/seg, ±500°/seg,

±1000°/seg y ±2000°/seg y el acelerómetro una escala de ±2g, ±4g, ±8g y ±16g, ambos programables por el usuario. Trabaja con un voltaje de alimentacion de 2.3V a 3.4V y se comunica mediante el protocolo I^2C, lo que permite enviar datos a microcontroladores de forma rapida [26].

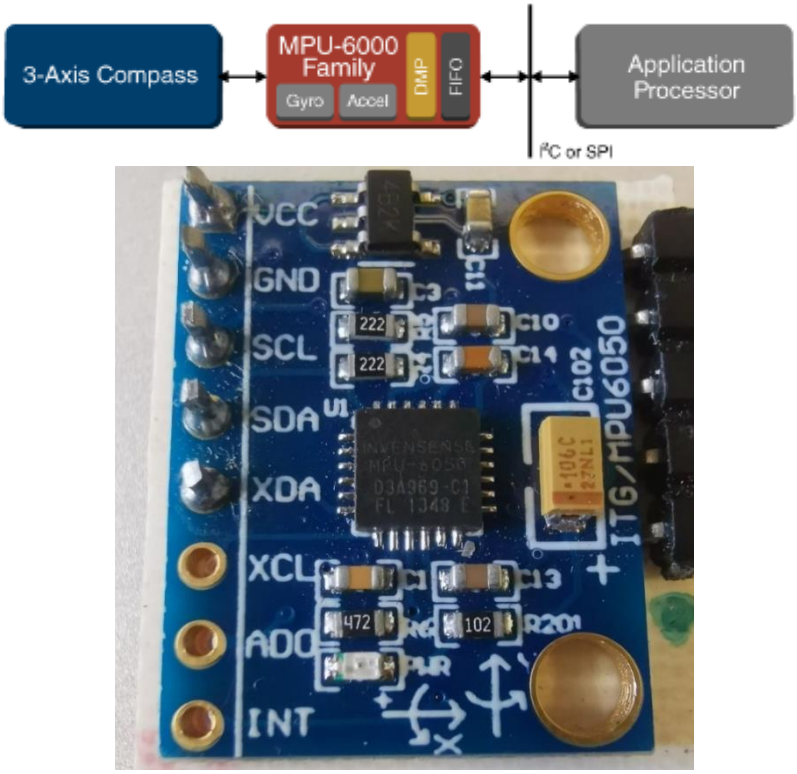

Fig. 22 Modulo ITG/MPU60-50.

3.1.2.5 Servo motor

Un servomotor es un dispositivo con la capacidad de controlar y mantener su posición dentro de un rango de operación, permitiendo controlar su velocidad de operación y posición. El consumo de voltaje y corriente depende del tamaño del servomotor y de la aplicación para la cual sea requerido, está conformado por un sistema de control electrónico, un potenciómetro y un sistema de engranes. Tiene la capacidad de controlar su posición en 360º, pero algunos solo permiten una rotación de 180º. Su dirección, sentido horario, antihorario y posición se controlan por medio

de la modulación por ancho de pulsos (PWM) figura 24, generada por microcontroladores con este tipo de salidas en sus pines.

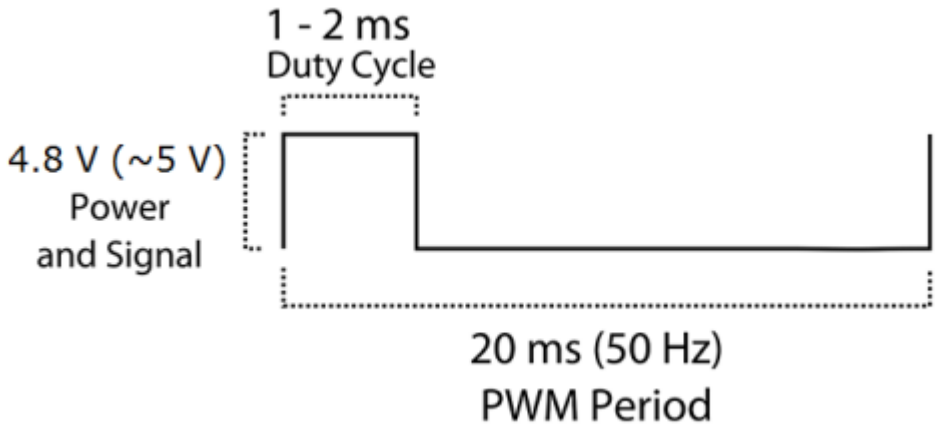

Fig. 23 Control de servomotor PWM.

El modelo utilizado para este trabajo es un TOWER PROTM Micro Servo 9G SG90 figura 25, fue seleccionado porque sus características físicas, eléctricas y mecánicas, se adaptan al diseño propuesto de este trabajo. Opera con un voltaje de 4.8V a 5V, tiene un par de torsión de 2.5 kg/cm, velocidad de 0.1 s/60º, rotación de 0º a 180º y un peso de 9 gramos.

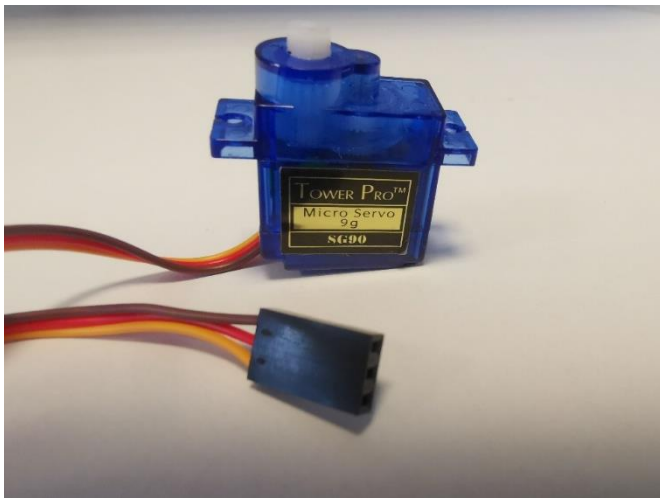

Fig. 24 Servomotor TOWER PROTM Micro Servo 9G SG90.

3.1.2.5 Motor vibrador

Es un pequeño motor de corriente directa que vibra cuando se le aplica un voltaje entre sus terminales figura 26. Es utilizado en varias aplicaciones y se puede encontrar en diferentes dimensiones, el que se usa para el desarrollo de este proyecto trabaja en un rango de voltaje de alimentación de 3V a 5V. El consumo de corriente es de entre 75 mA a 130 mA, dependiendo del voltaje aplicado. Tiene un diámetro de 8mm, un grosor de 3.2mm y pesa alrededor de 1 gramo. Se puede alimentar directamente desde los pines de salida GPIO de algunos microcontroladores, pero se recomienda utilizar un transistor para poder ser usado a su máxima capacidad de voltaje y corriente, como se hace en este trabajo.

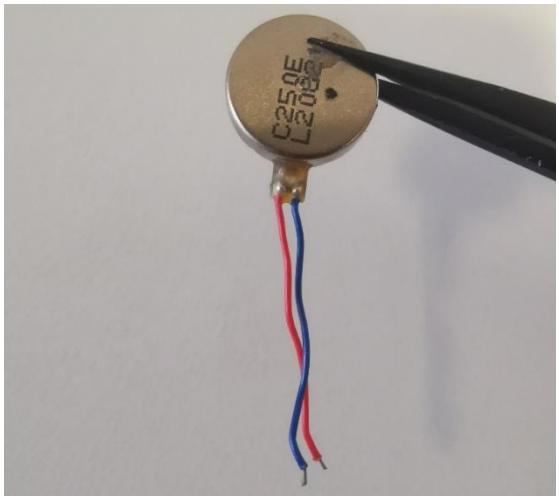

Fig. 25 Motor vibrador.

3.1.2.6 Banco de energía

Un banco de energía (*Power Bank*) es un dispositivo que contiene un conjunto de baterías, es portátil y proporciona energía por un determinado tiempo a diversos dispositivos portables como celulares y laptops, convirtiéndose en una fuente de energía de respaldo. Un banco de energía consta principalmente de un conjunto de celdas de baterías y un circuito de protección de voltaje y corriente. Estas celdas son

fabricadas generalmente a base de ion de Litio (Li-ion), están conectadas en serie o paralelo de acuerdo con las necesidades de voltaje o corriente, son controladas por medio de convertidores DC-DC (Corriente Directa) que regulan la carga y descarga del dispositivo. Analysis_of_Specified_Capacity_in_Power_Banks.pdf

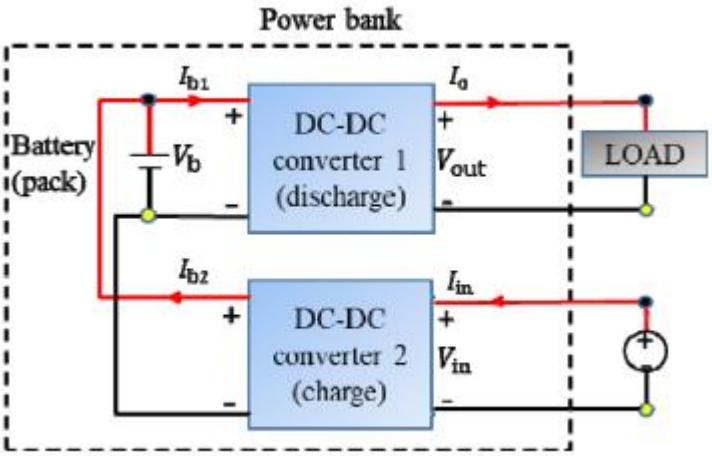

FIGURE 1. Simplified schematic of a typical power bank circuit

Fig. 26 Diagrama eléctrico interno de una Power Bank.

En el desarrollo de este trabajo se utiliza una *Power Bank* marca Belkin figura 27, de 10,000 mAh, puerto USB-A de 2.4 amperios que brinda hasta 5V como salida y una entrada de 5V a 2 amperios para recargar el banco. Posee dos puertos de salida USB universal para cargar dispositivos, indicador de nivel de carga y descarga, peso de 222 gramos, 14 cm de largo, 7.5 cm de ancho y 1 cm de alto.

Fig. 27 Power Bank Belkin 10000 mAh.

3.1.2.7 Módulo de la cámara de 5MP

La tarjeta Raspberry Pi posee un conector con Interfaz de Procesador Industrial Móvil (MIPI) Interfaz Cámara Serial tipo 2 (CSI-2), que permite la conexión de un módulo de cámara directamente al procesador principal. El conector permite la comunicación entre los dos dispositivos, cámara, tarjeta y la transferencia de grandez cantidades de datos al procesador provenientes del sensor de la cámara. También permite un ancho de banda en uno de sus pines de hasta 1Gbps, la comunicación de los datos se da en una sola dirección, cámara a procesador. El conector que posee la Pi4B es de 15 pines, para este modelo se utiliza un cable plano flexible para la conexión entre modulo y tarjeta. El módulo Cámara Raspberry Pi 4 1080p 720p 5MP figura 29, posee las siguientes características principales:

- Sensor OV5647 CMOS QSXGA de 5 megapíxeles
- Tamaño del señor 3.67mm por 2.74mm
- Recuento de pixeles 2592 x 1944
- Grabación de video a 1080 pixeles hasta 30 FPS y 480 pixeles hasta 60-90 FPS

Al ofrecer una mayor tasa de frames por segundo en resoluciones menores, permite ser utilizada para aplicaciones que requieran respuestas rápidas por parte de

los sensores utilizados en algoritmos que procesen determinadas características de imágenes, como lo son las aplicaciones en tiempo real. (citar documentación Raspberry Pi)

Fig. 28 Cámara Raspberry Pi 4 1080p 720p 5MP.

3.1.3 Software

3.1.3.1 OpenCV

OpenCV (*Open Computer Vision*) figura 29, es una librería de visión por computadora de código abierto, escrita en lenguaje C y C++, es capaz de ejecutarse en los principales sistemas operativos como Windows, Linux, Mac OS, entre otros. También es compatible con varios lenguajes de programación como C++ o Python y está diseñada para trabajar con la mayor eficiencia computacional posible desarrollada por el dispositivo en el que se programe, está destinada principalmente para la ejecución de aplicaciones en tiempo real. La librería contiene funciones para trabajar en áreas desde la medicina, seguridad, robótica, entre otras [19].

Fig. 29 Open Computer Vision, OpenCV.

3.1.3.2 Arduino IDE

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) figura 30, es una plataforma de código abierto creada para facilitar el uso combinado de software y hardware, puede utilizarse con distintos tipos de microcontroladores para leer entradas y salidas, provistas por sensores o actuadores que interactúan a través del IDE, mediante el envío y recepción de instrucciones, esto por medio de lenguaje de programación y diferentes protocolos de comunicación. Arduino IDE permite al usuario escribir código en un lenguaje C++ simplificado, incluye funciones, variables y estructuras de programación que permiten al usuario reducir el número de líneas de código, adicionando más características que permiten la comunicación con los microcontroladores y su compilación en un lenguaje o código máquina. Estas funciones también permiten utilizar los protocolos de comunicación más comunes como UART, SPI (*Serial Peripheral Interface*) e I^2C con otros sensores.

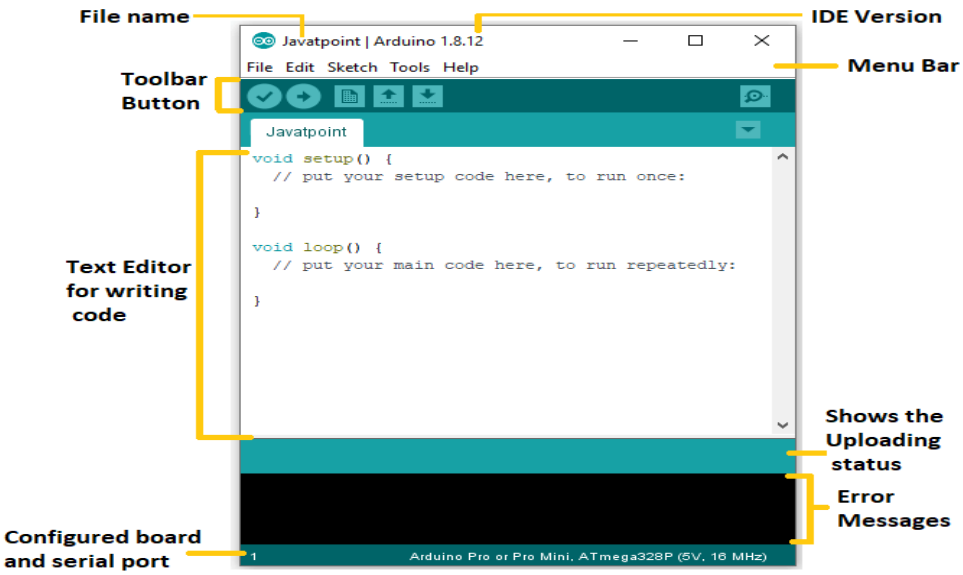

Fig. 30 Arduino IDE, interfaz de la ventana.

Adicional a lo que incluye el Arduino IDE, también permite la instalación de librerías que simplifican el uso de diversos componentes como sensores o actuadores, reduciendo líneas de código complejo a solo algunos renglones mediante el uso de

funciones preprogramadas en las librerías. Al ser de código abierto, permite la contribución de la comunidad y de cualquier persona [27].

3.1.3.3 Impresión 3D

También conocida como manufactura por adición, es un conjunto de procesos por medio de los cuales se generan diversos productos físicos de geometrías complejas y únicas a partir de un modelo digital. Estos consisten en la adición de material en varias capas sucesivas para formar el diseño requerido, se realiza con materiales diversos como termoplásticos o aleaciones de metal principalmente. Los termoplásticos son de los más utilizados debido a su costo y versatilidad, brindan texturas y acabados diversos de acuerdo con las necesidades del usuario. Entre los principales termoplásticos usados encontramos el ácido poliláctico (PLA), poliamida, plástico de alcohol polivinílico (PVA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), entre otros.

Fig. 31 Impresora 3D ENDER 5.

3.1.3.4 Inventor

La impresión 3D debe de auxiliarse en software de diseño 3D, que permite construir modelos digitales y que pueden ser inspeccionados antes de ser impresos.

Actualmente en el mercado existen muchas ofertas de este tipo de software libre o de paga y cualquiera puede acceder a él, dependiendo de sus requerimientos y necesidades. En este trabajo se hizo uso del software de diseño asistido por computadora (CAD) 3D Inventor figura 31, este proporciona herramientas de diseño mecánico 3D, documentación y simulación. También permite la colaboración entre usuarios, diseño paramétrico, formas libres, estructuras, tuberías, entre otras. Una de las cualidades por las cuales se decidió trabajar con este software es que permite el exportado de las piezas diseñadas en formato STL (*STereoLitography*). Este es un formato de transmisión de datos CAD que define geometrías de objetos 3D que excluye color, textura y propiedades físicas. Fue creado para uso exclusivo de la industria de prototipos rápidos CAD de las impresoras 3D [28] [29, 30].

Fig. 32 Autodesk Inventor.

3.1.3.5 Ultimaker Cura

Es un software de código abierto utilizado por las impresoras 3D figura 32, permite modificar diversos parámetros de impresión y transformar todas estas instrucciones en código G (*G-Code*), figura33. Su funcionamiento se basa en tomar un archivo de diseño de software, como el creado por Inventor en formato STL, lo divide en varias capas generando *G-Code* que pueda ser leído por la impresora 3D. Este código es transmitido a la impresora por algún dispositivo de almacenamiento masivo USB o alguna conexión entre ordenador e impresora. Como otros softwares, utiliza un lenguaje de programación que pueda interpretar la impresora 3D. *G-Code* es un lenguaje de control numérico por computadora (CNC), que comunica los comandos de desplazamiento en los 3 ejes (x, y, z) y acciones que deberá ejecutar como el calentamiento de la boquilla, cama de impresión o control del ventilador.

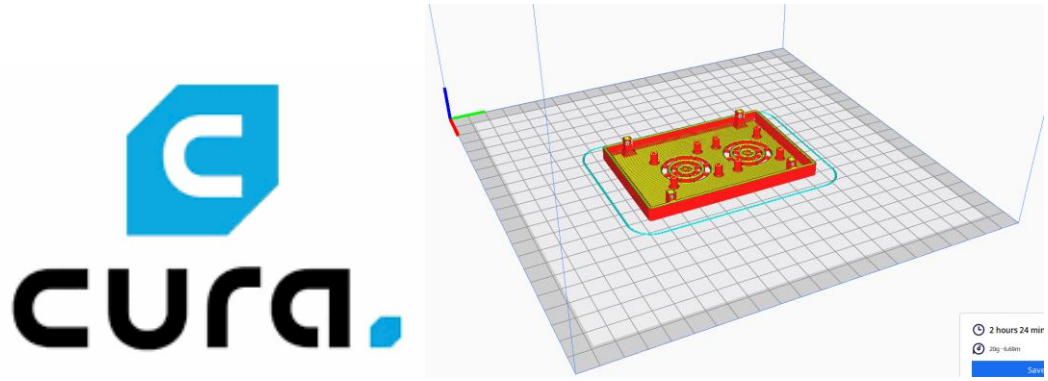

Fig. 33 Ultimaker Cura.

```
M82 ;absolute extrusion mode
M201 X500.00 Y500.00 Z100.00 E5000.00 ;Setup machine max acceleration
M203 X500.00 Y500.00 Z10.00 E50.00 ;Setup machine max feedrate
M204 P500.00 R1000.00 T500.00 ;Setup Print/Retract/Travel acceleration
M205 X8.00 Y8.00 Z0.40 E5.00 ;Setup Jerk
M220 S100 ;Reset Feedrate
M221 S100 ;Reset Flowrate

G28 ;Home

G92 E0 ;Reset Extruder
G1 Z2.0 F3000 ;Move Z Axis up
G1 X10.1 Y20 Z0.28 F5000.0 ;Move to start position
G1 X10.1 Y200.0 Z0.28 F1500.0 E15 ;Draw the first line
G1 X10.4 Y200.0 Z0.28 F5000.0 ;Move to side a little
G1 X10.4 Y20 Z0.28 F1500.0 E30 ;Draw the second line
G92 E0 ;Reset Extruder
G1 Z2.0 F3000 ;Move Z Axis up
```

Fig. 34 Sección de Código G, comandos utilizados.

3.1.3.6 Pigpio

Es una biblioteca diseñada y programada para el control de las entradas y salidas de los pines GPIO figura 34, así como características de comunicación de las tarjetas de desarrollo Raspberry Pi, está escrita en lenguaje de programación C y puede ser utilizada con otros lenguajes de programación como C++ o Python. Trabaja directamente con la identificación de cada uno de los pines GPIO de las diferentes

placas de Raspberry Pi, como PI4B, sin la necesidad de realizar adecuaciones. Puede instalarse directamente en el sistema operativo Raspbian desde la línea de comandos y es compatible con el IDE de Code::Blocks realizando algunos ajustes.

La biblioteca posee una versión *pigpiod,* que permite utilizarla como un *Daemon*, un programa especial que se corre en segundo plano, permitiendo realizar la ejecución de la biblioteca junto con algoritmos o programas desarrollados que la utilicen, sin la necesidad de tener que controlarlos desde la línea de comandos o interfaz usuario. Posee funciones similares a las utilizadas en el IDE Arduino para activar motores o leer sensores, lo que hace intuitiva su implementación, fue seleccionada debido a que se encuentra actualmente activa, recibe soporte y retroalimentación por parte de la comunidad, además de que es de código abierto [31].

Fig. 35 Biblioteca Pigpio.

3.1.3.7 VNC *Connect*

VNC proviene de la abreviación en ingles *Virtual Network Computing*, Computación de red virtual, es un software de tipo cliente-servidor con el que un usuario puede mostrar y controlar el sistema operativo de un dispositivo, a través de la pantalla del sistema operado. En este caso Raspbian de Raspberry (servidor) es el dispositivo para controlar, en el sistema operativo de Windows instalado en una computadora portátil (cliente). Es de fácil uso una vez instalado, principalmente para la visualización del entorno del dispositivo a controlar, debido a que los comandos del teclado y del ratón del cliente se transmiten a través del cable de red o una conexión inalámbrica Wifi directamente al ordenador remoto, la Raspberry Pi. En el caso de tener una conexión inalámbrica, la velocidad de transmisión de los datos variara

dependiendo del equipo que se utilice para redireccionar la conexión. Este tipo de conexiones nos permiten visualizar remotamente la operación de la Raspberry Pi y permite la transmisión de señal de video, con un retraso debido al tamaño de los datos de video, permitiendo dar seguimiento a programas en ejecución que utilizan cámaras de video. Viene instalado por defecto en el sistema operativo de la Raspberry Pi Model 4 y se necesita conocer la dirección IP (*Internet Protocol*) asignada de la conexión del dispositivo, asi como usuario y contraseña asignados para poder usarse.

3.2 Metodología

En esta sección se describen los pasos seguidos en la construcción del sistema propuesto, utilizando el hardware y software introducidos anteriormente. También se presenta el desarrollo de los algoritmos utilizados, aplicando las bases teóricas presentadas en los capítulos anteriores, así como la metodología utilizada para el desarrollo de los subsistemas antes mencionados.

3.2.1 Subsistema de soporte de postura modificado

El sistema de soporte de postura modificado está basado en un corrector de postura figura 35, este es un dispositivo comercial de uso libre utilizado por algunas personas que tienen problemas de postura durante la realización de actividades cotidianas, diarias o repetitivas y que les provocan molestias. Generalmente ayuda en la corrección de una mala postura en espalda y hombros, proporciona un apoyo en el área central de la espalda y es de uso general, tanto para hombres y mujeres. Específicamente este modelo fue seleccionado debido a que permite ser ajustable dependiendo de la complexión del individuo, los materiales son de buena calidad, resistentes y pueden ser modificados para agregar o retirar accesorios sin sufrir un daño significativo.

Fig. 36 Corrector de postura y ayuda lumbar.

Para este trabajo se requirió agregar varias secciones de material que fuesen capaz de soportar el peso de los componentes de los subsistemas restantes y que no provocaran malestar en los usuarios figura 36. Las secciones utilizadas fueron de velcro y se colocaron en la parte posterior del soporte de postura. Estas secciones soportan el peso de la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi, *Power Bank*, tarjeta de control de motores y botones selectores del usuario. Adicional a lo anterior se colocaron secciones de cinta de polipropileno, confeccionadas utilizando hilo de algodón, estas secciones protegen los cables de control, motores vibradores, *buzzer* y alimentación de los subsistemas. Una sección importante de este material fue utilizada para colocar el soporte de la cámara y cuya posición es de suma importancia en la adquisición de imágenes como se verá más adelante.

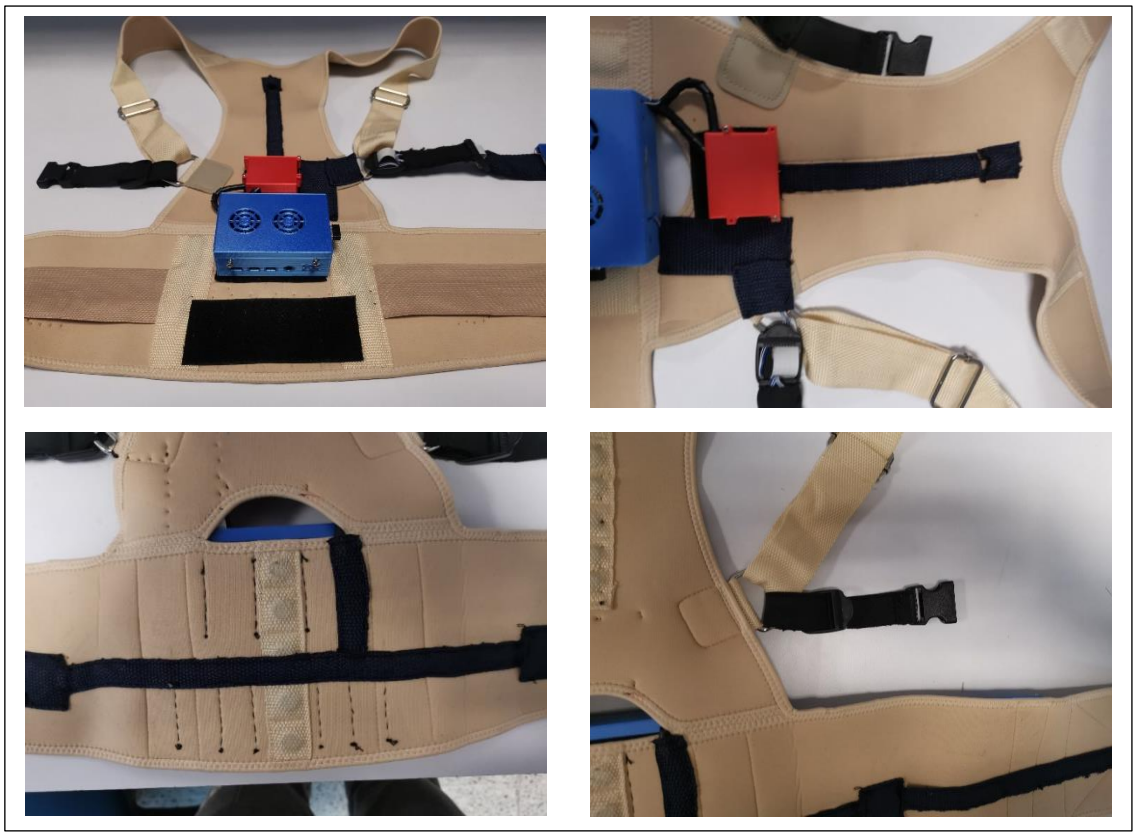

Fig. 37 Secciones adicionadas al soporte de postura para la instalación de los subsistemas restantes.

3.2.2 Subsistema de control de motores y buzzer

Este sistema está conformado por varios componentes electrónicos de tipo *SMD*, lo que permite reducir el tamaño y peso de la placa electrónica, que requiere controlar y alimentar 6 motores vibradores, 1 buzzer y 4 botones pulsadores. Como se mencionó en el capítulo 3, la Raspberry Pi no puede suministrar la corriente requerida para los componentes, directamente desde los pines GPIO. Para realizar esto, entre sus pines posee exclusivamente de alimentación, dos a 5V y dos a 3.3V figura 37, ambos pueden suministrar la corriente necesaria a los periféricos antes mencionados, al estar conectados directamente a la fuente de alimentación, que en este caso es la *Power Bank*.

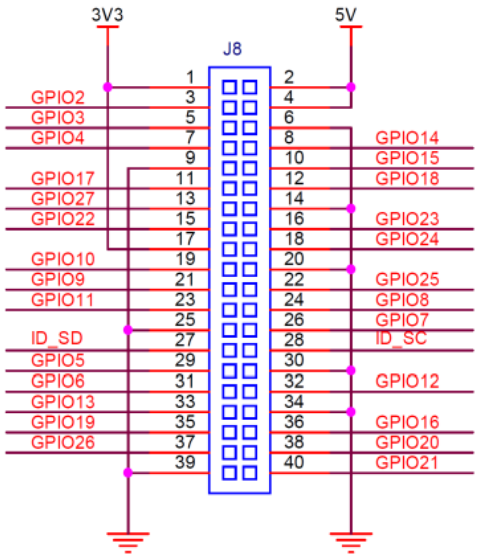

Fig. 38 Pines de alimentación y GPIO Raspberry Pi 4 [25].

Para usar los pines GPIO en el control de los periféricos se utilizaron transistores MMBT2222ALT1G tipo NPN como interruptores, capaz de soportar hasta 600 mA entre sus terminales, asegurándose de sustraer solo el mínimo de corriente necesaria del pin de la tarjeta para activarlo. El circuito de prueba utilizado se muestra en la siguiente figura 38 y su implementación en *protoboard* figura 39.

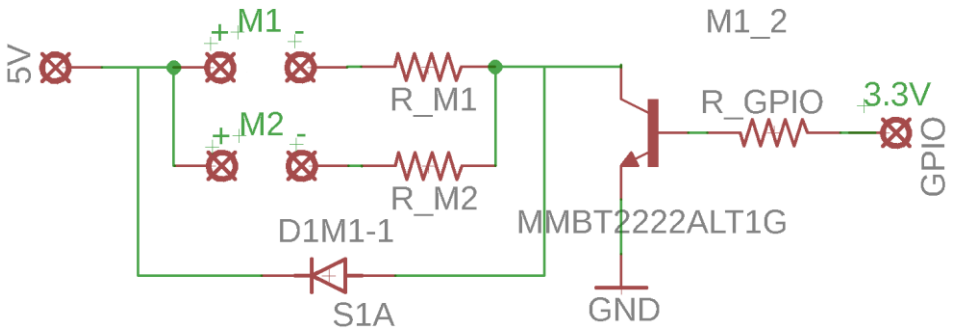

Fig. 39 Circuito de alimentación a motores vibradores.

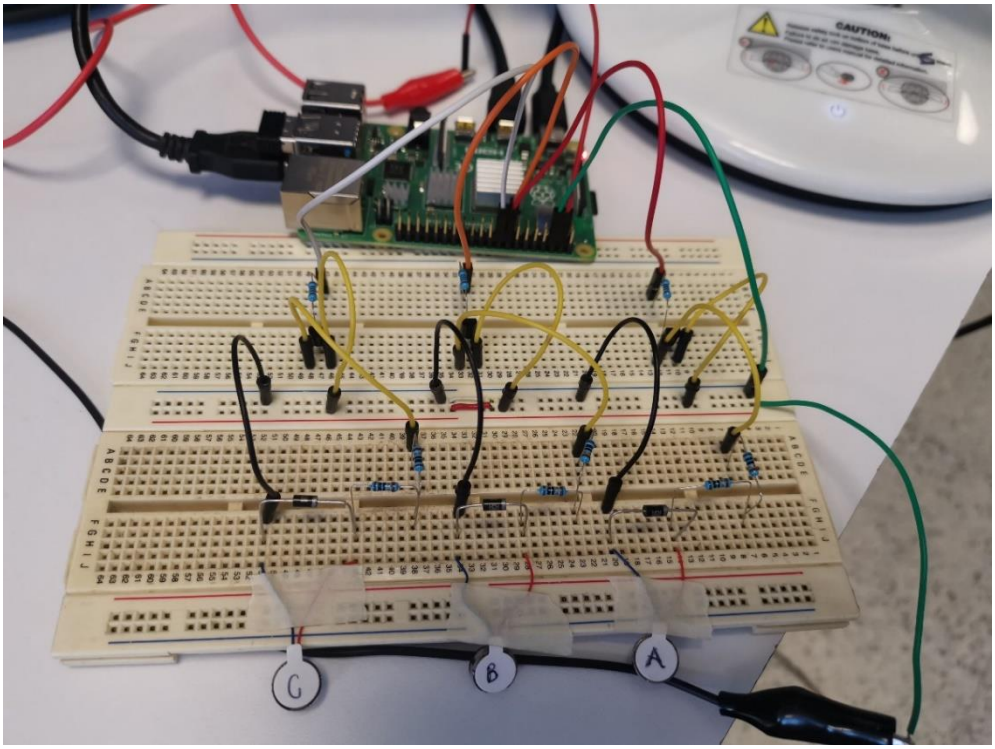

Fig. 40 Circuito de prueba motores armado en protoboard.

Al utilizar el transistor como interruptor se debe calcular la corriente de base (I_B), que debe suministrar el pin de la Raspberry Pi sin dañase, para obtener una corriente de colector (I_c) de 200mA. Se considera una $h_{FE}(\beta)$ promedio de la hoja de datos del transistor y se calcula el valor de la resistencia R1_GPIO utilizando la siguiente formula.

$$I_c = \beta I_B \qquad (12)$$

Donde:

$I_c =$ corriente de colector.

$I_B =$ corriente de base.

$\beta =$ Beta promedio del transistor, de la hoja de datos $h_{FE} = 100$ minima y $h_{FE} = 300$ maxima.

Se busca un suministro de corriente máximo de 200 mA a 5V para los motores vibradores, de la ecuación 1 se despeja I_B y se sustituyen los valores conocidos.

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{200mA}{\left(\frac{300 + 100}{2}\right)} = 1mA \qquad (13)$$

La corriente que requiere el transistor para hacer circular 200mA por el colector es de 1mA, que no rebasa el valor máximo requerido del pin y en conjunto con los demás periféricos no deberá de rebasar el valor máximo permitido. Para calcular la resistencia R_GPIO que limitara la corriente sustraída del pin, se debe tener en cuenta que se trabaja con dos niveles de voltaje distintos, la alimentación de los motores y el nivel lógico de los pines de la Raspberry Pi, 5V y 3.3V respectivamente. Se calcula de la siguiente manera.

$$V = R * I_B \qquad (14)$$

Donde:

$V = V_F - V_{BE}$, V_F es el voltaje de la fuente, menos la caída de tensión V_{BE} en el transistor (unión base-emisor).

$R =$ Valor de la resistencia que limitara la corriente suministrada del pin GPIO.

$I_B =$ Corriente de base que circulara del pin GPIO a través de la resistencia.

Despejando de la ecuación y sustituyendo valores obtenemos.

$$R = \left(\frac{V_F - V_{BE}}{I_B}\right) = \left(\frac{3.3V - 1.2V}{1mA}\right) = 2100\ \Omega \qquad (15)$$

La resistencia más cercana de valor comercial al calculado es de $2.2\ k\Omega$, que fue utilizada en la elaboración de la placa. Para limitar la corriente máxima consumida por los motores vibradores a un total de 100 mA máximos por motor, se calcula la resistencia R_M1 y R_M2, con el voltaje máximo de la fuente. Ambas limitaran el consumo de los motores, asegurando una circulación de corriente de no más de 100mA para cada uno y evitando posibles picos de esta. El valor de ambas resistencias, que es el mismo, se obtiene al calcular la resistencia interna del motor, alimentándose directamente al voltaje de la fuente 5V y midiendo el máximo consumo de corriente del motor, en este caso a 130 mA, obtenemos que:

$$V = R_{int} * I_{max} \qquad (16)$$

$V = 5V$, voltaje de la fuente.

$I_{max} = 130\ mA$, corriente máxima al voltaje de la fuente.

R_{int}, resistencia interna calculada del motor.

Despejando de la formula *(15)* y sustituyendo obtenemos:

$$R_{int} = \frac{V}{I_{max}} = \frac{5V}{130mA} = 38.46\ \Omega \qquad (17)$$

Con el valor de resistencia interna ahora podemos saber cuál es la requerida para limitar la corriente a 100 mA, repitiendo de nuevo el mismo calculo con el nuevo valor de resistencia R_{lim} obtenemos:

$$R_{lim} = \frac{V}{I_{max}} = \frac{5V}{100mA} = 50\ \Omega \qquad (18)$$

Realizando la diferencia entre R_{int} y R_{lim}, obtenemos el valor de resistencia R_{ser} requerido para colocarse en serie con el motor:

$$R_{ser} = R_{lim} - R_{int} = 50\Omega - 38.56\Omega = 11.44\Omega \qquad (19)$$

El valor de resistencia comercial más cercano es de 10Ω, que será utilizado para limitar la corriente que circule a través del motor. Adicional a esto se coloca un diodo SMA (DO-214AC) de 1A a 50V, que protege al transistor contra cambios de polaridad y retrocesos de corriente provocados por la inercia de los motores, evitando la degradación de la unión emisor-base.

Adicionalmente, la placa también incluye el circuito de control del ventilador de enfriamiento. Siguiendo las observaciones realizadas por la fundación Raspberry Pi en la hoja de datos de la tarjeta, se instaló un ventilador para remover el calor generado a través de los disipadores de calor colocados en los microchips durante el funcionamiento, figura 40. El ventilador es controlado por un programa ejecutado como subproceso en el sistema operativo, censando la temperatura del CPU y activándose en caso de alcanzar un límite establecido. También utiliza un transistor para suministrar la corriente requerida y PWM para variar la velocidad de giro del ventilador, a través de la corriente suministrada por el pin GPIO_26. El circuito utilizado se presenta a continuación, los cálculos realizados para los componentes mostrados son

similares a los de los motores vibradores, a excepción de la resistencia limitadora de corriente de consumo del ventilador.

Fig. 41 Ventilador disipador de calor interior.

El circuito de alimentación del buzzer figura 42, es similar al de los motores, utiliza el mismo modelo de transistor para limitar la corriente máxima de consumo, 30 mA a 5V, y no sustraerla directamente del pin de la placa. A diferencia de los motores no requiere una resistencia para limitar el consumo máximo de corriente, esta dependerá de la corriente suministrada por el pin GPIO de la placa a la base del transistor.

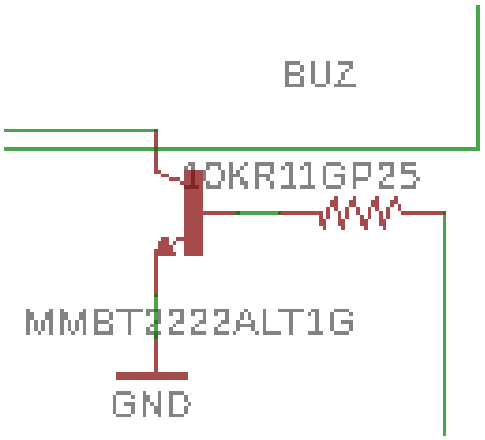

Fig. 42 Circuito de alimentación buzzer.

La placa de circuito impreso PCB (*Printed Circuit Board*) se realizó en una Maquina CNC 3018, un equipo de grabado de circuitos impresos que utiliza puntas cortadoras, brocas y fresas, para desgastar la superficie de la placa y retirar el exceso de cobre, generando las pistas del circuito impreso. Este equipo utiliza *G-Code*, al igual que las impresoras 3D. Una vez maquinada la PCB se procedió a soldar los componentes en una plancha para soldar, debido a que todos son tipo SMD, figura 42. El diagrama del circuito de control de motores se puede revisar en la sección de anexo A.

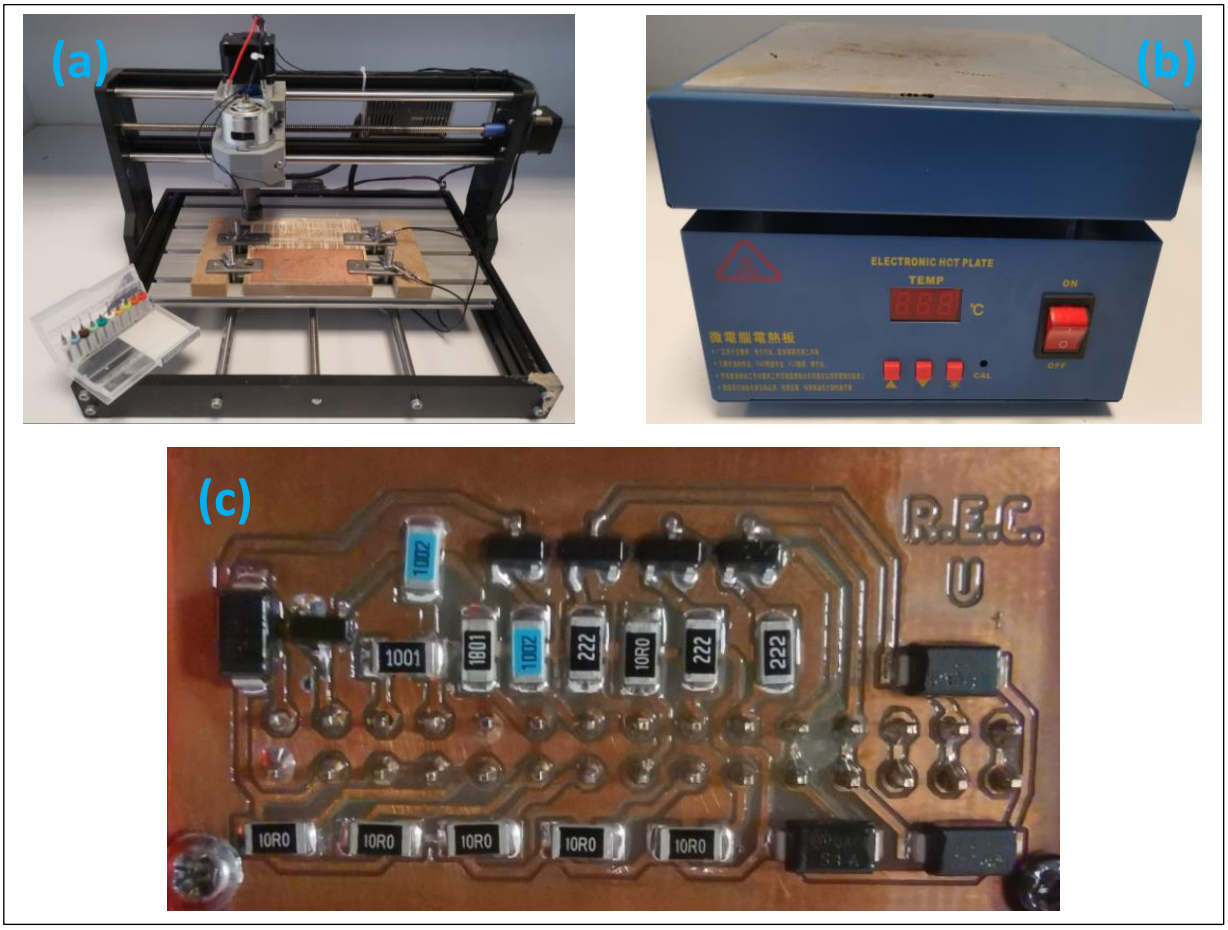

Fig. 43 Maquina CNC 3018 (a), Plancha para soldar (b) y PCB soldada (c).

3.2.3 Subsistema de control de botones

El control del equipó requiere una interfaz física entre el usuario y el sistema, para llegar a esto se propone usar dos botoneras. Estas tendrán funciones distintas y activarán diferentes opciones para que el usuario pueda hacer uso del dispositivo de forma más simple. Las botoneras tendrán dos *push button* cada una y estarán alojados, junto con su PCB, en contenedores diseñados específicamente mediante impresión 3D. Los cuatro botones tendrán las siguientes funciones principales:

1. *POWER*: Apagado y encendido del dispositivo.
2. *STOP*: Finalización o paro del programa.
3. *LINES*: Selección de programa de detección de líneas.
4. *CIRCLES*: Selección de programa de detección de círculos.

Adicional a las funciones de los botones, estos fueron señalizados con simbología Braille para que las personas con DV puedan reconocer el funcionamiento de cada uno figura 44. Para lograr esto fue grabado sobre la cubierta del botón un carácter Braille, la letra inicial de cada función asignada. Esto permitirá que, una vez identificada la posición de la botonera sobre el dispositivo, el usuario pueda palpar cada botón para seleccionar la opción deseada. Los caracteres utilizados son los siguientes:

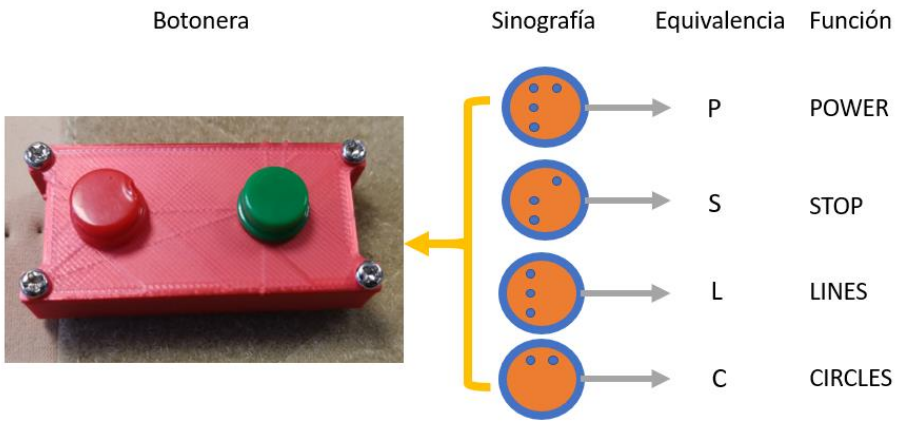

Fig. 44 Señalización de botones en Braille.

El botón POWER se encuentra directamente conectado a masa (GND) y al pin GPIO 3 (SDL) figura 45 (a), uno de los pines que se utilizan para la comunicación I2C. Su funcionamiento permite que se pueda leer, ya sea que la Raspberry Pi este apagada o encendida, como un subproceso en segundo plano utilizando interrupciones. Para ser utilizado se activa una resistencia *pull-up* por software, la placa posee varias resistencias que pueden ser configuradas como *pull-up* o *pull-down*. Cuando el usuario presiona el botón de POWER, inmediatamente se ejecuta el programa de apagado del equipo, independientemente del proceso que se esté ejecutando. Si se presiona de nuevo, el equipo se vuelve a encender. Está configurado así debido a que la *power bank* siempre está conectada y se tienen 3.3V en los pines de alimentación, a pesar de que se apague el dispositivo, lo que permite volver a encenderse de la misma manera.

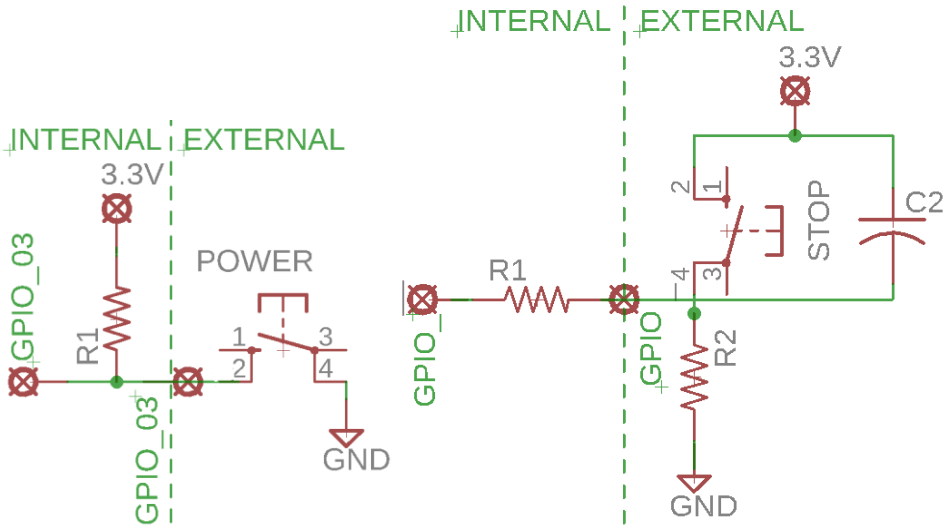

Fig. 45 Circuito de conexión botón POWER (a), circuito de conexión botones SOP, LINES y CIRCLES.

Los botones *STOP*, *LINES* y *CIRCLES*, están conectados a los pines GPIO_27, GPIO_18, GPIO_16 respectivamente. Se configuraron con resistencias *pull-down* para ser leídos en estado alto (3.3V) y mantenerse siempre en estado bajo (0V) figura 45 *(b)*. El circuito de los botones considera la resistencia R1, para limitar la corriente que circula hacia el pin GPIO y evitar algún daño. Adicionalmente se colocó un capacitor que ayuda a evitar los rebotes causados por las partes mecánicas del botón y con ello

evitar falsos positivos en las lecturas del estado del pin C2. Las botoneras terminadas fueron alojadas en sus respectivos contenedores figura 46.

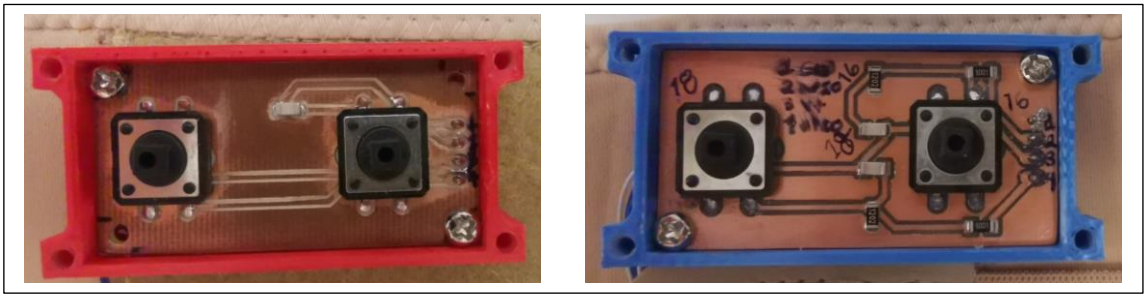

Fig. 46. Botoneras terminadas alojadas en sus contenedores.

3.2.4 Subsistema de control de ángulo de la cámara

Este sistema controla el ángulo de la cámara en tiempo real, de acuerdo con el programa de detección que se esté ejecutando. Está conformado por el circuito de control, basado en el microcontrolador ATMega328, el módulo de la cámara de 5MP, modulo MPU6050 y servomotor SG90 figura 47. El circuito está alimentado a 5V desde la Raspberry Pi y solo se energiza si es encendida.

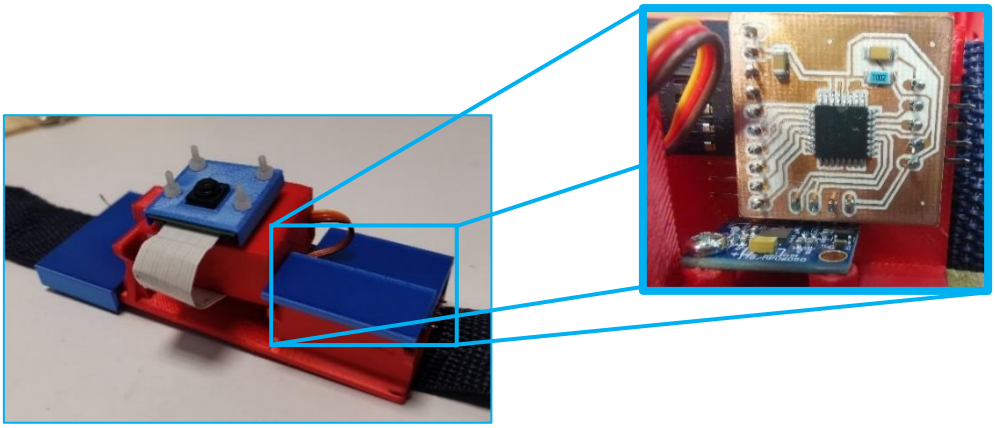

Fig. 47 Subsistema de control de cámara, ATMega328, MPU6050 y SG90.

Todos los componentes se montaron sobre una base diseñada y fabricada por medio de impresión 3D, para permitir movimientos de la cámara en ángulos de entre 0 a 90º con respecto del eje y dependiendo del programa que se esté ejecutando figura 48.

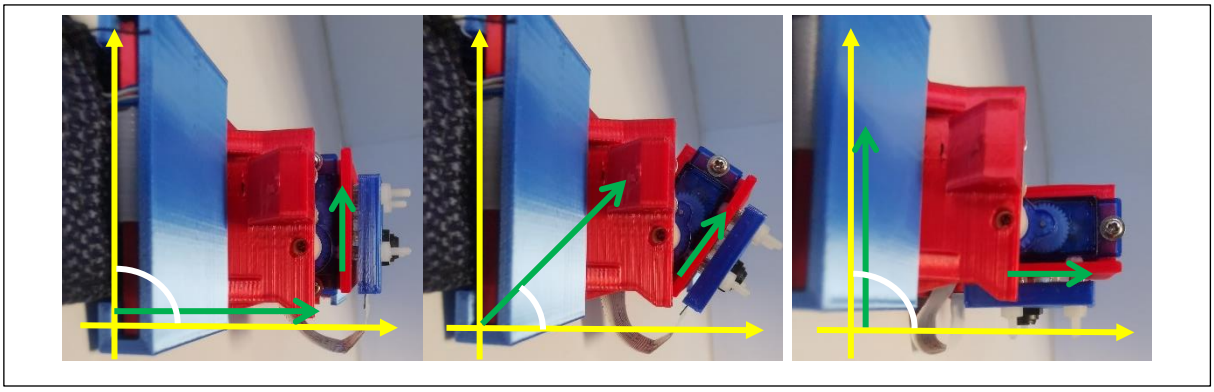

Fig. 48 Movimientos realizados por la cámara montada sobre su base.

El funcionamiento se basa en un algoritmo que controla el ángulo de la cámara dependiendo el programa que se ejecute, para la detección de líneas se determino experimentalmente que un ángulo entre 70° y 80° permite visualizar la sección del carril de la pista sin captar secciones del fondo que provoquen ruido o falsas detecciones en el procesamiento. El programa recibe el ángulo censado por el modulo MPU6050 y lo compara con el umbral establecido en el algoritmo, la respuesta es la corrección del ángulo de la cámara con la activación del servomotor que modifica su posición.

3.2.4.1 Circuito de control de la cámara

El circuito de control de la cámara está conformado por un microcontrolador ATMega328 y componentes electrónicos de montaje de superficie soldados en una PCB. Para usar el microcontrolador es necesario cargar un programa de arranque, o también llamado *bootloader*, al microcontrolador. El *bootloader* permite transferir y escribir nuestro programa o algoritmo ya compilado en la memoria del microcontrolador

a través del protocolo UART y USB. UART es un protocolo o conjunto de reglas para intercambiar datos en serie entre dos dispositivos, utilizando dos cables entre el transmisor y receptor para transmitir y recibir en ambas direcciones.

Para la instalación del *bootloader* en el microcontrolador se debe utilizar un zócalo programador de chips donde se coloca y conecta al módulo FTDI, que permite la conexión vía USB con la computadora. Para este proyecto se utilizó el QFP32/D3 figura 48 y el IDE de Arduino. El IDE de Arduino permite cargar el *bootloader* a través de su interfaz. Una vez cargado es posible borrar y reescribir nuestros programas a través del módulo conversor USB-Serie TTL y sus respectivas conexiones.

Fig. 49 Zócalo programador QFP32/D3.

3.2.5 Subsistema de algoritmos de detección y control

Este subsistema se encarga del control e implementación de los algoritmos de detección de líneas y círculos, activando o desactivando cualquiera de ambas opciones de detección. También se encarga de la prueba de seguridad de los periféricos o componentes con la finalidad de verificar que el dispositivo está funcionando en óptimas condiciones antes de ejecutar cualquiera de las opciones ofrecidas al usuario.

3.2.5.1 Algoritmo de prueba de componentes

Este algoritmo se encarga de verificar el funcionamiento de los componentes utilizados en la retroalimentación al usuario como lo son motores vibradores y buzzer, además también se encarga de verificar el estado de la cámara. En la figura 49 se presenta el diagrama de bloques de funcionamiento del algoritmo, su finalidad es detener todo el proceso si un componente falla o permitir al usuario usar el dispositivo. Para lograr lo anterior el algoritmo requiere de la retroalimentación del usuario, quien deberá de percibir físicamente con sus sentidos tacto y oído, los componentes de retroalimentación instalados que se activan por un determinado tiempo y en caso de no percibirlo presionar el botón de stop.

Por otra parte, la prueba de la cámara no requiere la intervención del usuario, al ser uno de los principales componentes la revisión de hace por software mediante la detección de esta con las herramientas ya provistas por la librería de OpenCV, que en el caso de no poderla iniciarla procede a detener todo el proceso. En ambos casos, falla de componentes o cámara, el sistema genera un archivo de texto con extensión .txt que se almacena en el escritorio del equipo apara ser revisado posteriormente por un especialista.

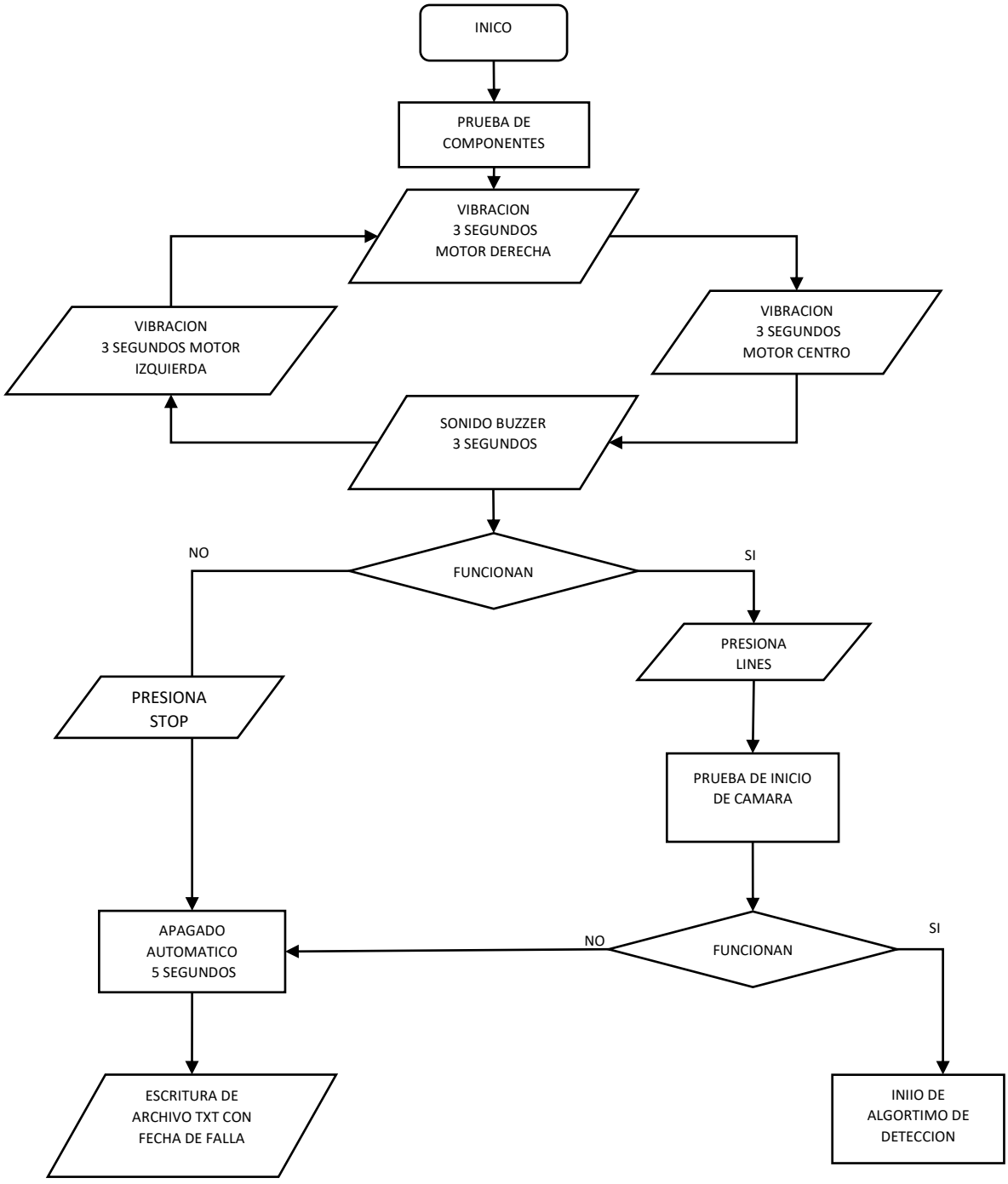

Fig. 50 Diagrama de bloques de algoritmo de prueba de componentes.

3.2.5.2 Algoritmo de detección de líneas

Este algoritmo está basado en la detección de líneas por medio de la Transformada de Hough, presentada en las secciones anteriores, se utiliza la librería de OpenCV y el lenguaje de programación C++ en el entorno de desarrollo integrado de código abierto Code::Blocks. La librería de OpenCV permite utilizar dos implementaciones del algoritmo, la Transformada de Hough Estándar o la Transformada probabilística de Hough.

La Transformada Estándar de Hough calcula el conjunto de curvas sinusoidales, para un grupo de pixeles que forman una línea, y que se interceptan en un punto en el espacio de parámetros (θ, ρ). La característica de esta implementación es que el procedimiento se realiza para cada posible píxel que pueda pertenecer a una línea, aumentando el número de cálculos que se deben realizar para encontrarla, si bien el método es más preciso debido a que considera todos los pixeles, conlleva un tiempo considerable y aumenta aún más si los argumentos que utiliza la función no son bien definidos, como resultado de este algoritmo se obtiene un vector (θ, ρ)

La Transformada Probabilística de Hough (TPH) esta optimizada para la detección de líneas, esto significa que el número de cálculos que realiza es menor comparado con la versión estándar, su salida es un par de coordenadas del inicio y final de una línea. En comparación con el método estándar, requiere parámetros de longitud mínima y máxima, permite descartar aquellas líneas que no cumplan con características que se estén buscando. Una diferencia de este algoritmo es que en lugar de tomar todos los posibles puntos que formen una línea para el análisis, solo toma un subconjunto de puntos y devuelve como salida los extremos de las líneas detectadas $(x_0, y_{0,} x_1, y_{1,})$.

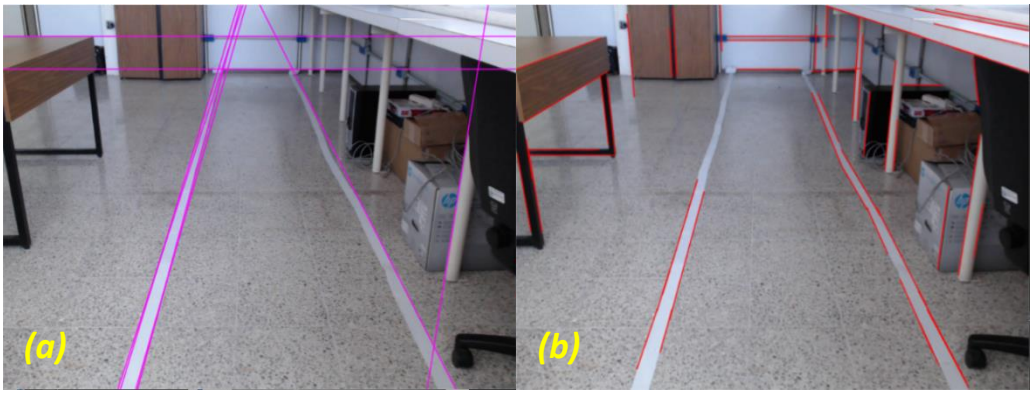

Fig. 51 Transforma de Hough Estándar (a) y Transforma de Hough Probabilística (b).

3.2.5.3 Detección de líneas de pista de atletismo

El dispositivo debe ser capaz de detectar las líneas de la pista de atletismo para mantener al usuario caminando dentro de los límites que se generan entre los carriles y de acercarse a ellos debido a un cambio de trayectoria, brindar una retroalimentación para corregirlo y mantenerlo al centro del carril. Si bien la TPH detecta las líneas de forma más rápida, se requiere de un procesamiento de los frames o imágenes adquiridas por la cámara, antes de aplicar un análisis y clasificación de aquellas líneas que pertenecen o no al carril del usuario. La figura 51 muestra el preprocesamiento requerido en la imagen antes hasta aplicar TPH, el diagrama de bloques de la figura 52 simplifica el procedimiento previo antes de la clasificación de las líneas más importantes presentes en la imagen para el usuario.

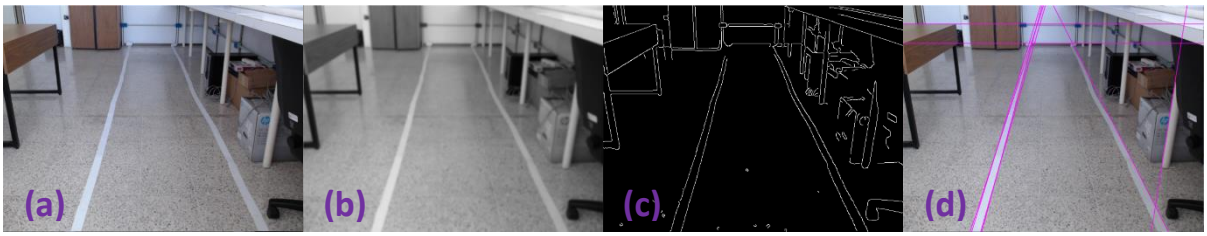

Fig. 52 Preprocesamiento de la imagen, (a) imagen adquirida, (b) escala de grises, (c) detección de bordes, (d) aplicación de TPH.

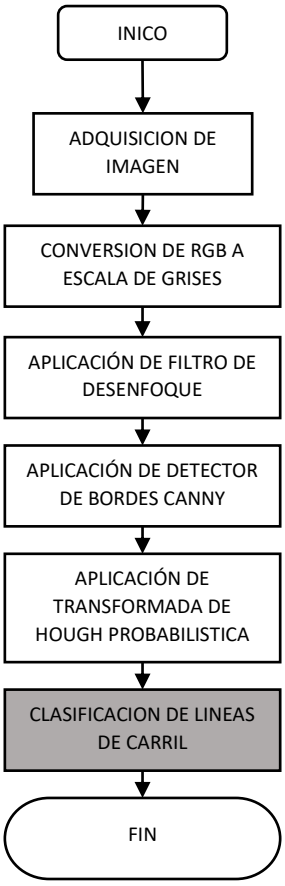

Fig. 53 Diagrama de bloques de preprocesamiento de imágenes para detección de líneas.

La sección del diagrama de bloques que se encuentra sombreada representa el análisis de los datos obtenidos, los puntos de inicio y final de las líneas detectadas por la TPH. Es en esta sección donde se aplican los parámetros que mejor resultado dieron en la clasificación de las líneas de los carriles de la pista de atletismo. La función implementada por la librería de OpenCV da como resultado un conjunto de puntos de inicio y final de las líneas detectadas, un vector que contiene vectores con los puntos pertenecientes a la línea, ecuación *(19)*.

$$u\{v_1[P_{ini}(x,y), P_{fin}(x,y)], v_2[P_{ini}(x,y), P_{fin}(x,y)], \dots v_n[P_{ini}(x,y), P_{fin}(x,y)]\} \quad (20)$$

La TPH admite una longitud máxima y mínima, esto permite tener un filtro inicial de las líneas que son detectadas, al ser líneas continuas se descartan aquellas con una mínima distancia entre puntos inicial y final desde la aplicación de la TPH. Posterior a la aplicación de la TPH, el conjunto de vectores obtenido es nuevamente analizado para obtener aquellas líneas que pertenezcan a las del carril de la pista. En esta etapa se utiliza la fórmula de distancia entre dos puntos

$$d(A,B) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \qquad (21)$$

Aplicamos un umbral de distancia en pixeles para obtener solo las líneas más largas, aquellas que van de un extremo a otro de la imagen, y se procede a dibujarlas sobre esta. El resultado obtenido es el que se muestra en la figura 53, como se aprecia las líneas detectadas más largas en la imagen no son solo aquellas que pertenecen al borde de la pista o en este caso el acotamiento del pasillo.

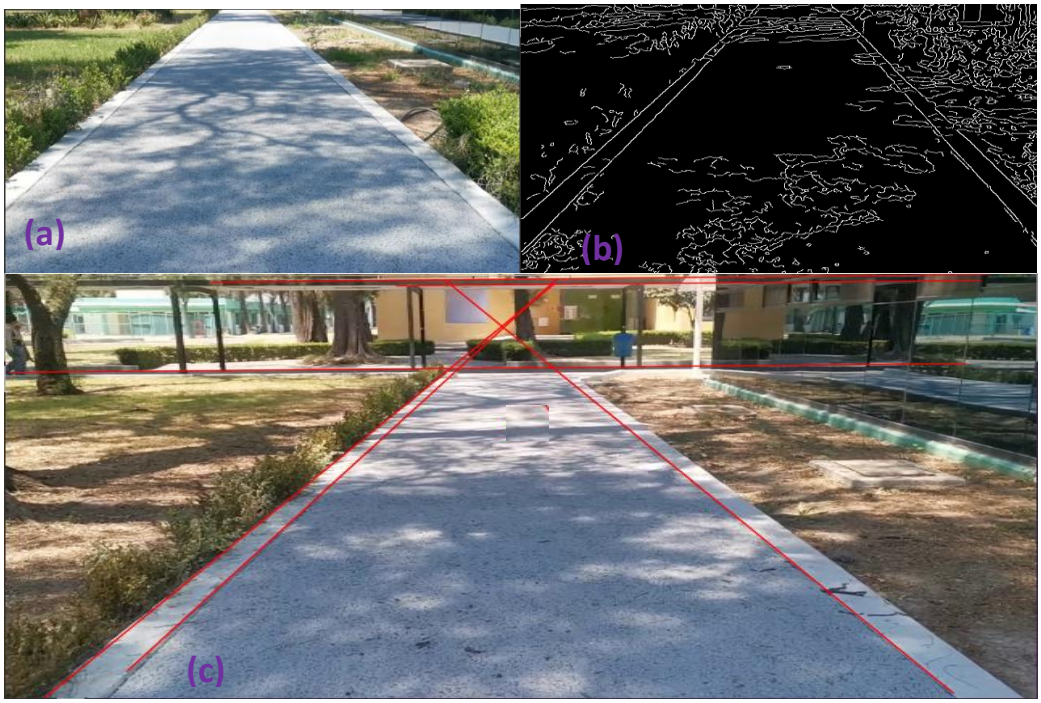

Fig. 54 Detección de líneas con TPH, imagen (a), detector de bordes (b), detección de líneas (c).

Las líneas detectadas pertenecientes a los límites del acotamiento no serán perpendiculares a la línea inferior de la imagen, debido a la perspectiva de toma de la cámara. Todas las líneas detectadas presentan ángulos distintos, es incorrecto asumir que el plano de una imagen con (m,n) filas y columnas es similar al plano de coordenadas (x,y), y por lo tanto el valor y referencia del ángulo con que se mide y presentan. Sabiendo lo anterior es posible utilizar la fórmula de pendiente de una recta con dos puntos para conocer su valor y su correspondiente ángulo. Con esta información se puede umbralizar el parámetro para descartar aquellas líneas que presenten ángulos fuera de este rango.

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x2 - x} \qquad (22)$$

En una imagen el plano de una imagen debe ser analizado de diferente forma que en el plano de coordenadas (x,y) figura 54, el plano de una imagen está constituido por el número de filas i_1 y columnas j_1 de pixeles, los cuales determinan su resolución. Para este caso se utiliza una resolución VGA (*Video Graphics Array*) 640 x 480 pixeles. El ángulo de todas las líneas detectadas se calcula con las ecuaciones de la figura 54 *(a)* y se descartan aquellas líneas que sean horizontales y verticales principalmente.

Experimentalmente determinamos que el mejor rango de detección de las líneas del acotamiento se encontraba entre valores $50 < \theta < 80$ positivos y $-50 > \theta > -80$ negativos figura 24 *(b)*. Con esta información es posible continuar analizando la imagen para determinar con respecto a que se medirá la desviación de la trayectoria del usuario y de las líneas del acotamiento detectadas en la imagen.

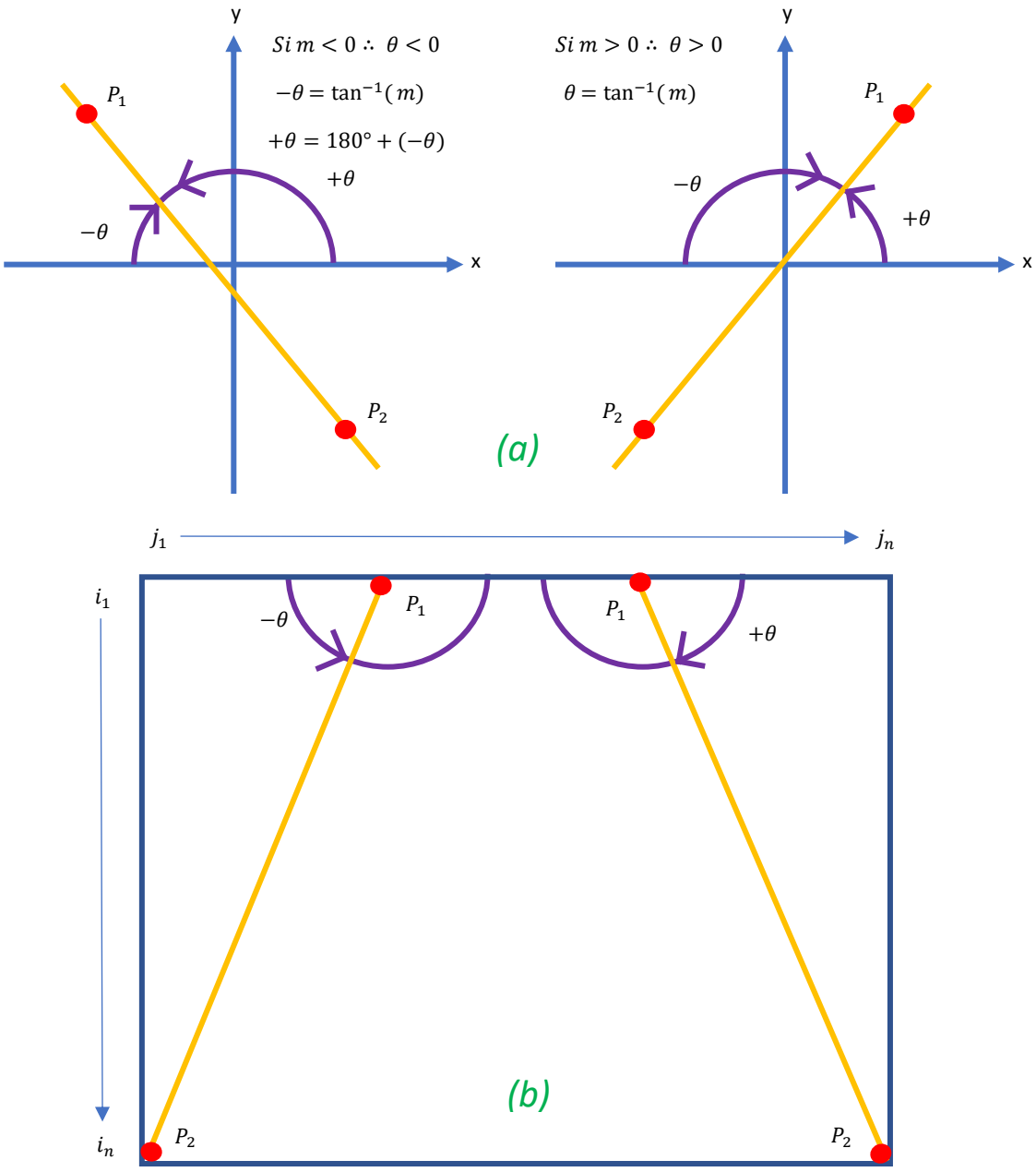

Fig. 55 Plano de coordenadas (x,y) (a), plano de una imagen (b).

Aplicando el análisis anterior obtenemos como resultado la detección de las líneas que pertenecen solo al carril o acotamiento, como ejemplo figura 54 *(b)* color amarillo y aplicado a la imagen figura 55, específicamente los que representan el límite del perímetro de este y debido a esto se presenta una detección doble de líneas. Para corregir esto se determinó aplicar una venta o región de interés (ROI) de 640 x 340 de

color verde en la figura 55, que permite recortar la imagen actual para descartar el fondo superior y detectar solo aquellas líneas más largas y con el ángulo correspondiente perteneciente al límite del perímetro de la acera, también se aplicó un contador para no permitir la detección de más líneas con el mismo signo del ángulo, limitándose solo a un valor y solucionando el problema de la detección doble.

Seguido en el análisis se propone utilizar un punto de referencia (PR) fijo situado al centro del frame actual y representado en color rosado figura 56 *(a)*. Su finalidad es ayudar a detectar los movimientos que realiza la persona tomando como marco de referencia el movimiento de las líneas detectadas en la imagen. Para entender mejor esto se determinó obtener los puntos medios (PM) de las líneas detectadas por la TPH, estos puntos representados en color verde y con su respectivo ángulo forman una línea central (LC) si unimos sus coordenadas figura 56 *(b)*, la línea de color rojo que une los puntos medios es LC.

Fig. 56 Región de Interés (ROI) utilizada para detección de lineas.

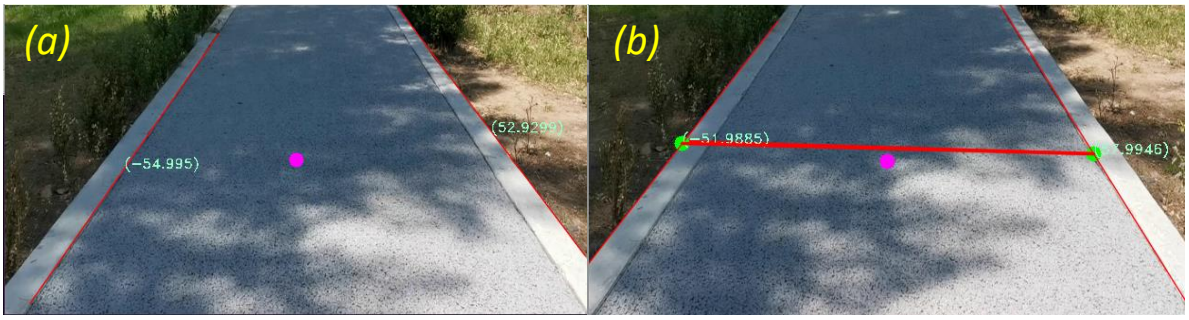

Fig. 57 Punto de referencia rosa (a), puntos medios de las líneas detectadas por TPH verde (b).

Existen ocasiones en las que la detección de líneas llega a fallar y solo se detecta una o ninguna en el frame actual figura 57 *(b)*, para resolver este problema se almacenan los valores anteriores de las líneas detectadas. Esto permite utilizar las coordenadas de las líneas anteriores y también su punto medio (PM) para tener en el frame actual la posibilidad de representar la unión de estos generando LC figura 57 *(c)*.

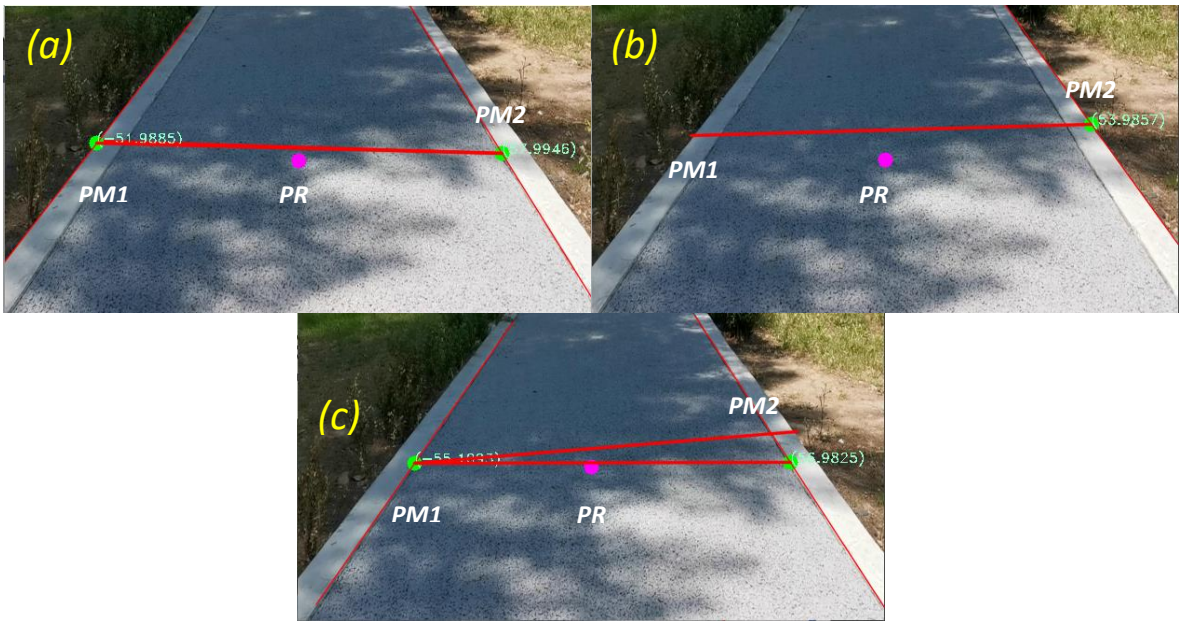

Fig. 58 Detección de ambas líneas (a), detección de una sola línea (b), uso de punto medio anterior para generar LC (c).

Para obtener un punto con el cual comparar PR, se calcula el PM formado por LC, unión de PM1 y PM2. Este punto representado en la figura 58 de color amarillo permite comparar sus desviaciones con respecto al de referencia, en esta sección del análisis ya se puede determinar la orientación que está tomando una persona con respecto a las líneas del acotamiento detectadas.

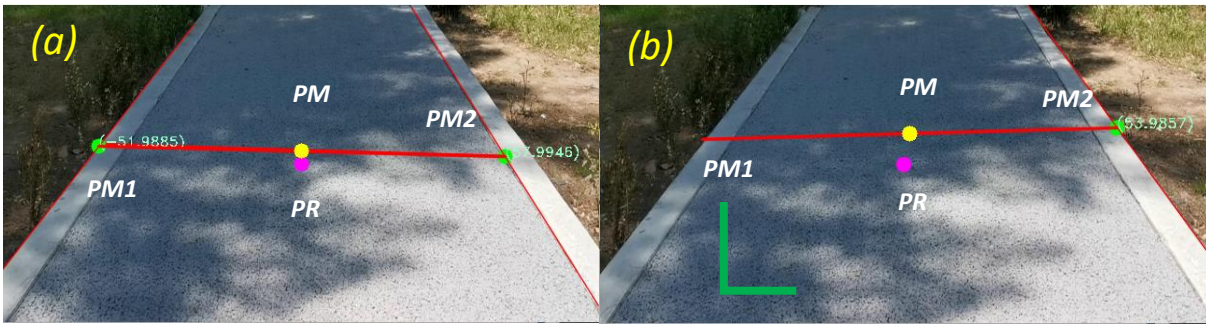

Fig. 59 Punto medio PM con detección de PM1-PM2 (a), detección de PM con PM1 anterior y PM2 actual (b).

El cálculo de distancia entre dos puntos, punto rosa PR y punto amarillo PM nos daría un valor de la variación en pixeles cuando la persona comienza a alejarse del centro y acercarse al borde del acotamiento, pero no considera la orientación que está tomando, debido a que el PM puede ubicarse a 90° (perpendicularmente) con respecto PR y la distancia a la cual se aleje no es indicativo de un cambio de orientación por parte del usuario con respecto a la referencia PR.

Para resolver esto se consideró solo tomar el valor de la coordenada en x, el eje i (filas) en la imagen, del punto PR y PM. Considerando la figura 59 y tomando como referencia el plano de la imagen, más específicamente el acotamiento (líneas moradas detectadas), si la persona cambia su orientación el punto de referencia se mueve con respecto al acotamiento x, aunque este siempre permanezca fijo. Al moverse PM que representa el centro del acotamiento con respecto a PR, el punto de referencia se aleja PM y por lo tanto existe un cambio de orientación izquierda o

derecha, cambio en el valor de x, y un aumento o disminución de la distancia PM a PR (dp) con respecto al centro del acotamiento, PM.

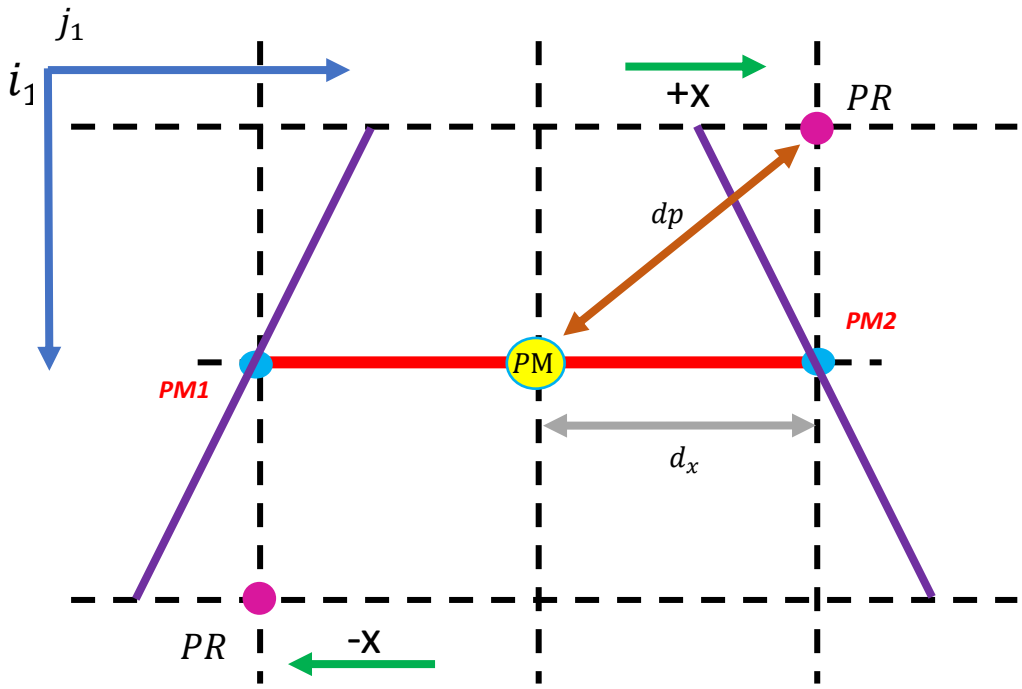

Fig. 60 Comportamiento de la coordenada x en la orientación.

Como se aprecia en la figura 59 cuando PM se mueve, el valor de su coordenada en x cambia de forma positiva o negativa, aumentando o disminuyendo con respecto al valor de la coordenada x de PR, cuyo valor es siempre fijo. Esto nos indica que para valores negativos la persona está modificando su orientación hacia la izquierda y para valores positivos hacia la derecha, la distancia en pixeles o diferencia dp que se calcula, siempre es con respecto al eje x o coordenada i en la imagen y no dependerá del valor de y o j. La operación es simplemente una resta del valor de la coordenada del PM (x) y PR (x), cuyo signo determina la orientación tomada por la persona.

$$d_x = PR(x) - PM(x)$$
$$d_x > 0\ orientacion\ derecha$$

$$d_x < 0 \; orientacion \; izquierda$$

Se aplico un umbral a la distancia entre PR y PM, experimentalmente se determinó que un 30% de la distancia media $(d_x/2) * .30$ de LC, es óptimo para alertar al individuo de un cambio de orientación al superarse este valor, figura 60.

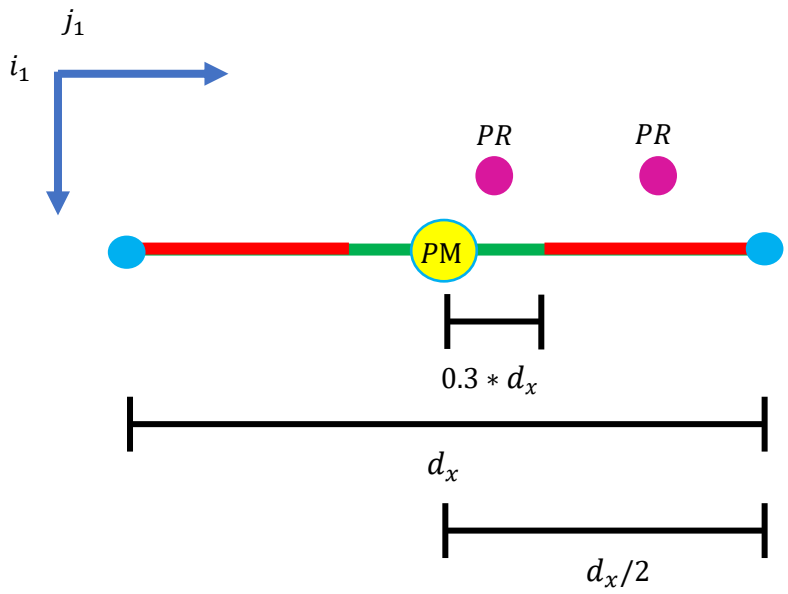

Fig. 61 Umbralizado de la distancia para determinación de cambio de orientación.

Con el análisis realizado ya es posible brindarle una retroalimentación al usuario activando o desactivado los periféricos instalados cuando se detectan las dos líneas pertenecientes al carril actual de la pista de atletismo o de la acera. Al iniciar algunas pruebas con fotogramas de diferentes secciones del acotamiento, se pudo detectar que el algoritmo requiere ser más robusto y capaz de trabajar con la detección de una sola línea, debido a que la TPH no es cien por ciento eficaz y depende de la detección de bordes. Se presentan ocasiones en que la detección solo se realiza para una sola línea del borde de la acera, provocando que el algoritmo programado para dos líneas deje de ser funcional. Para resolver esto se utilizaron los valores y resultados ya obtenidos en el anterior análisis en un nuevo método que permita trabajar en conjunto con la detección de una sola línea en algunos frames. El método de determinación de

la orientación de una persona con una sola línea detectada se basa en dos posibles casos, caso uno cuando en el frame anterior al actual se detectaron dos líneas o caso dos cuando en el frame anterior no se detectó ninguna línea, en ambas condiciones se considera que en el actual frame si se está detectado una sola línea del carril o acotamiento.

Caso 1

El caso uno se presenta cuando en el frame inmediato anterior se detectaron dos líneas y en el actual solo se detecta una figura 61. Como la línea actual no tiene un punto medio PM1 o PM2 adicional para generar la línea que los conecta LC, se determinó almacenar el punto medio anterior de la línea de borde que no se está detectando, considerando el valor de su pendiente y ángulo. Almacenar este punto permite dibujarlo en la imagen y que se tenga una segunda coordenada para generar LC. Esto permite utilizar el mismo algoritmo considerando que se están detectando dos líneas y no modifica su funcionamiento en comparación con el caso dos que requiere otras adecuaciones.

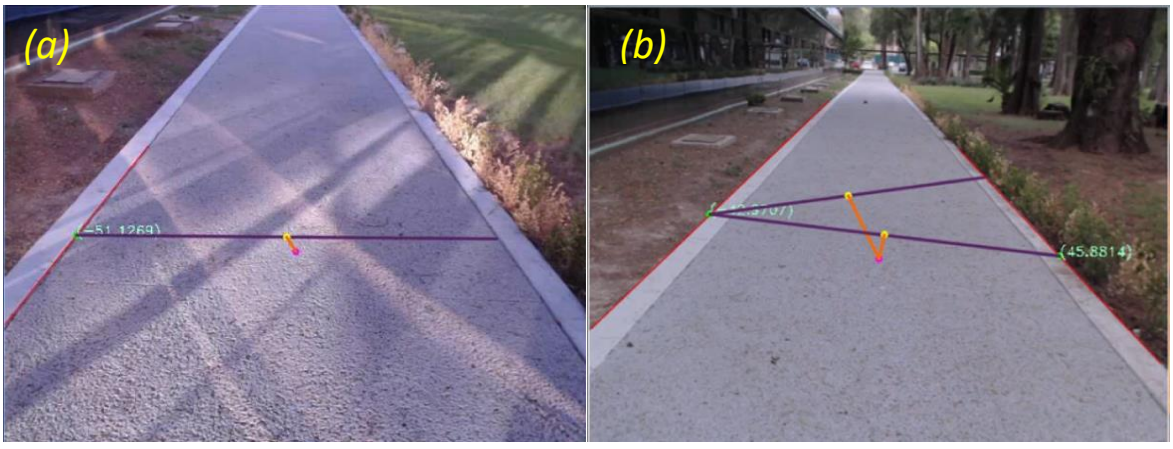

Fig. 62 Detección de una sola línea de acotamiento (a), uso de PM1 o PM2 anterior (b).

Como se aprecia en la figura 61 *(b)*, almacenar las coordenadas del punto medio anterior permite generar la LC y con ello PM, con el cual el algoritmo realiza las comparaciones, simulando la detección de dos líneas en el frame actual.

Caso 2

Para el caso dos se determinó almacenar la distancia $d_x/2$ de todos los frames anteriores donde se detectaron dos líneas y promediarla frame con frame, ecuación *(22)*. Al mantener la cámara fija y en un ángulo determinado, las variaciones de esta distancia promedio d_{pro} son mínimas, alrededor de un 10% a 5%. En este caso se considera que en el frame inmediato anterior la TPH no detecto ninguna línea del borde de la acera, pero en el frame actual solo detecta una sola línea figura 62.

$$d_{pro} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_x/2_i}{2} \qquad (23)$$

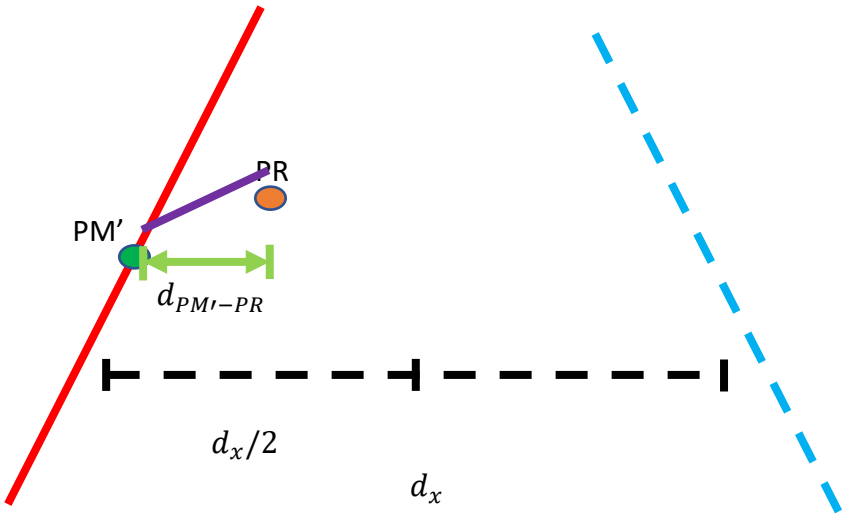

Fig. 63 Detección de una sola línea y análisis de distancias sin detección previa anterior.

Posterior a esto la distancia actual en el eje x detectada desde PR a PM' de la línea del borde de la acera $d_{PM\prime-PR}$ es calculada y se compara con la distancia promedio d_{pro} en el eje x de la siguiente forma, figura 62 y figura 63:

$$Si\ d_{PM'-PR} > 1.3 * d_{pro} \rightarrow orientacion\ a\ la\ derecha$$
$$Si\ d_{PM'-PR} < 0.7 * d_{pro} \rightarrow orientacion\ a\ la\ izquierda$$
$$Si\ 0.7 * d_{pro} < d_{PM\prime-PR} < 1.3 * d_{pro} \rightarrow orientacion\ correcta$$

Para la detección de dos líneas de la acera, como para los casos de solo una detección, se considera el ángulo que presenta LC, esto es debido a que en ocasiones los puntos medios de las líneas detectadas PM1 o PM2 suelen no presentarse con la misma altura con respecto a y o j en la imagen, esto provoca que LC presente un ángulo muy pronunciado y en ocasiones afecta la distancia entre el punto medio y el punto de referencia d_p. Para resolver esto se determinó un umbral para un rango de pendiente y un ángulo determinado, lo que soluciona los problemas ocasionados por líneas con pendientes muy pronunciadas.

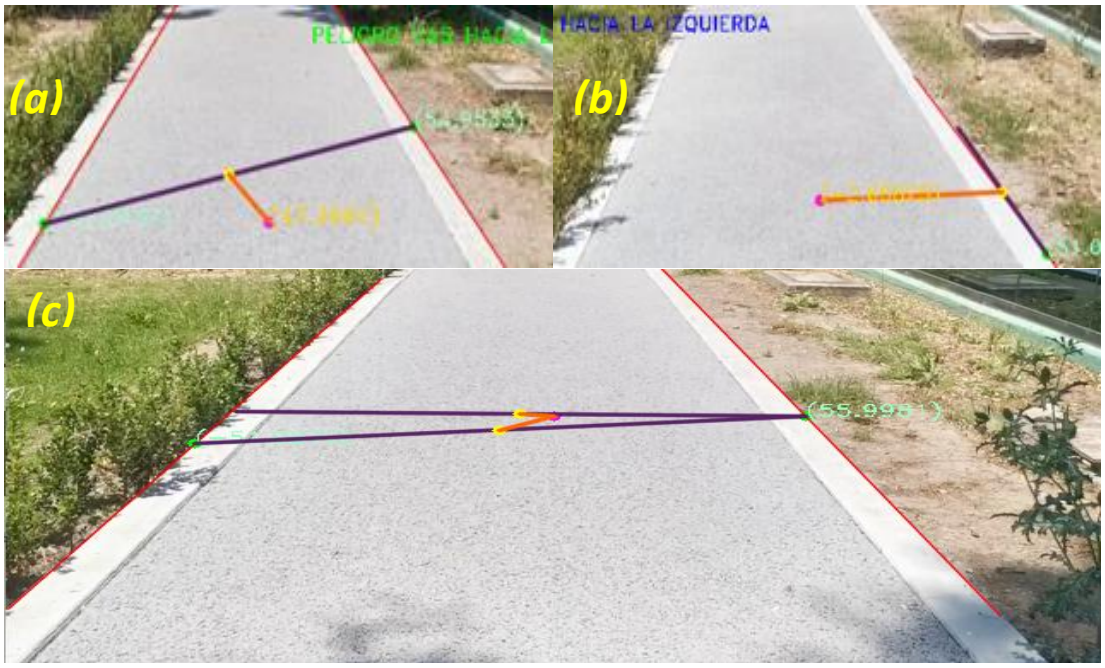

Fig. 64 Corrección de ángulo presente en línea LC, errores presentados (a) (b), corrección (c).

Para detectar si una persona está por salirse del carril de la pista o del acotamiento, se implementa una última condición de comparación entre los valores de distancia $d_{PM'-PR}$ y ángulo θ, para valores negativos o positivos de $d_{PM'-PR}$ y ángulo se indicará al usuario que ha salido del acotamiento. La orientación, izquierda o derecha, queda determinado por el signo resultante de la operación aritmética de resta y ángulo, como se observa en la figura 64 y 65, PR ha salido del acotamiento, esto no significa que también la persona lo haya hecho, lo que permite anticiparse y enviar una señal de retroalimentación más fuerte antes de que se abandone el acotamiento con la finalidad corregir esta desviación de manera inmediata.

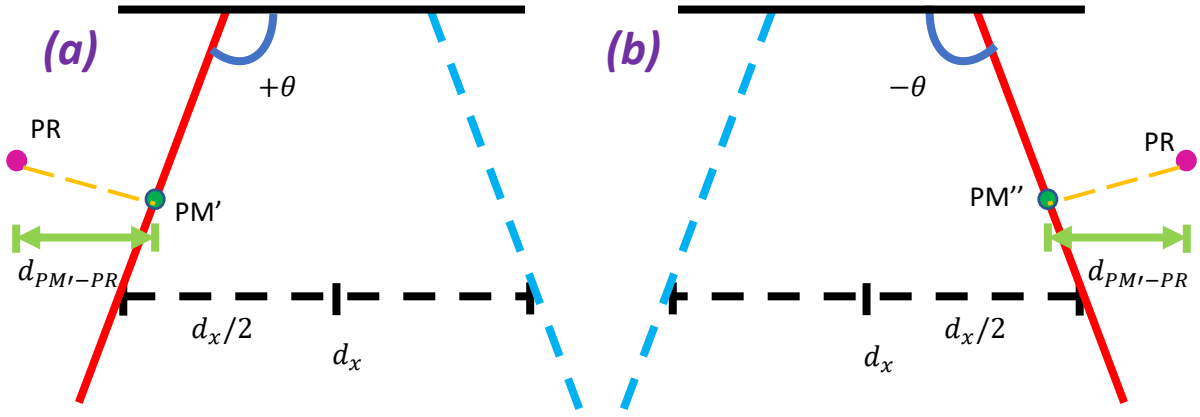

Fig. 65 Condiciones de detección de salida de carril o acotamiento, (a) salida hacia la izquierda, (b) salida hacia la derecha.

Fig. 66 Detección de salida de carril o acera.

Las condiciones utilizadas para alertar al usuario sobre su salida del carril de la pista o el acotamiento son desarrolladas para el caso de una sola línea detectada figura 64, esto se debe a que la orientación tomada por el usuario solo permite detectar un borde del acotamiento como se aprecia en la figura 65. Las condiciones dependerán del valor de la coordenada en el eje x de PR y PM', el signo de la operación aritmética de resta de las distancias y el ángulo de la línea del acotamiento, estas son las siguientes:

$$Para\ \theta > 0, \qquad Si\ d_{PM'-PR} < 0 \ \rightarrow salida\ con\ orientacion\ a\ la\ izquierda$$
$$Para\ \theta < 0, \qquad Si\ d_{PM'-PR} > 0 \ \rightarrow salida\ con\ orientacion\ a\ la\ derecha$$

El algoritmo de detección ahora es capaz de filtrar las líneas detectadas para identificar solo las pertenecientes al carril de la pista de atletismo o la acera y determinar la orientación del usuario, el siguiente paso es integrar este subsistema con los demás para en conjunto brindar una retroalimentación. Para ello se hace uso de la biblioteca *pigpiod*, que permite el control de los pines GPIO de la Pi4B. Como se

mencionó anteriormente se posee 3 motores vibradores y un zumbador piezoeléctrico o buzzer, que serán activados dependiendo de cuatro condiciones que se aprecian en la figura 66, dirección correcta (verde), desviación hacia la derecha (amarillo), desviación hacia la izquierda (amarillo) y salida de la pista (rojo).

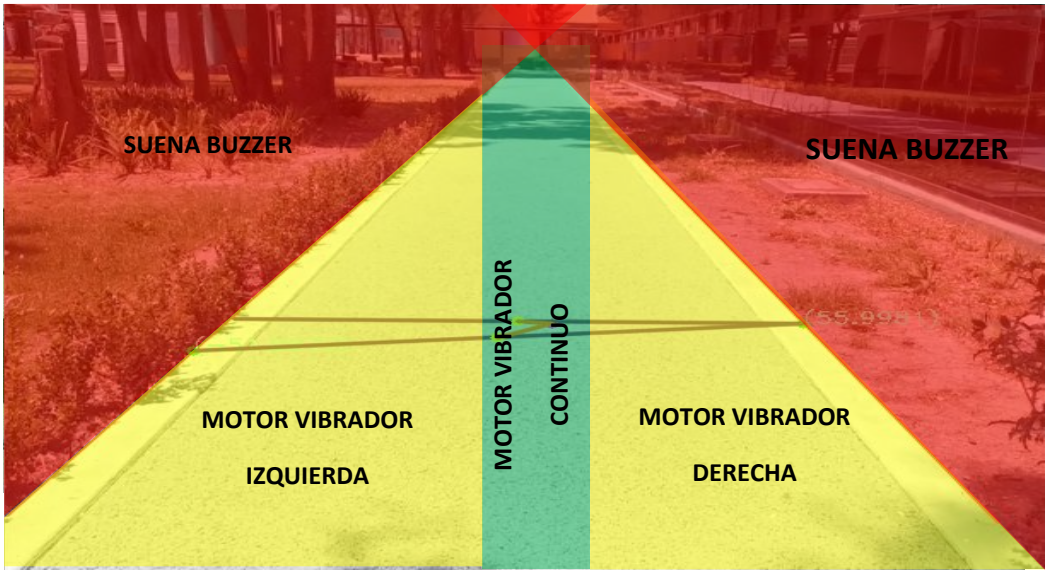

Fig. 67 Condiciones de activación de los periféricos, verde dirección correcta, amarillo cambio de orientación y rojo salida de carril.

La activación de los periféricos para retroalimentar al usuario será de acuerdo con el diagrama de bloques de la figura 68.

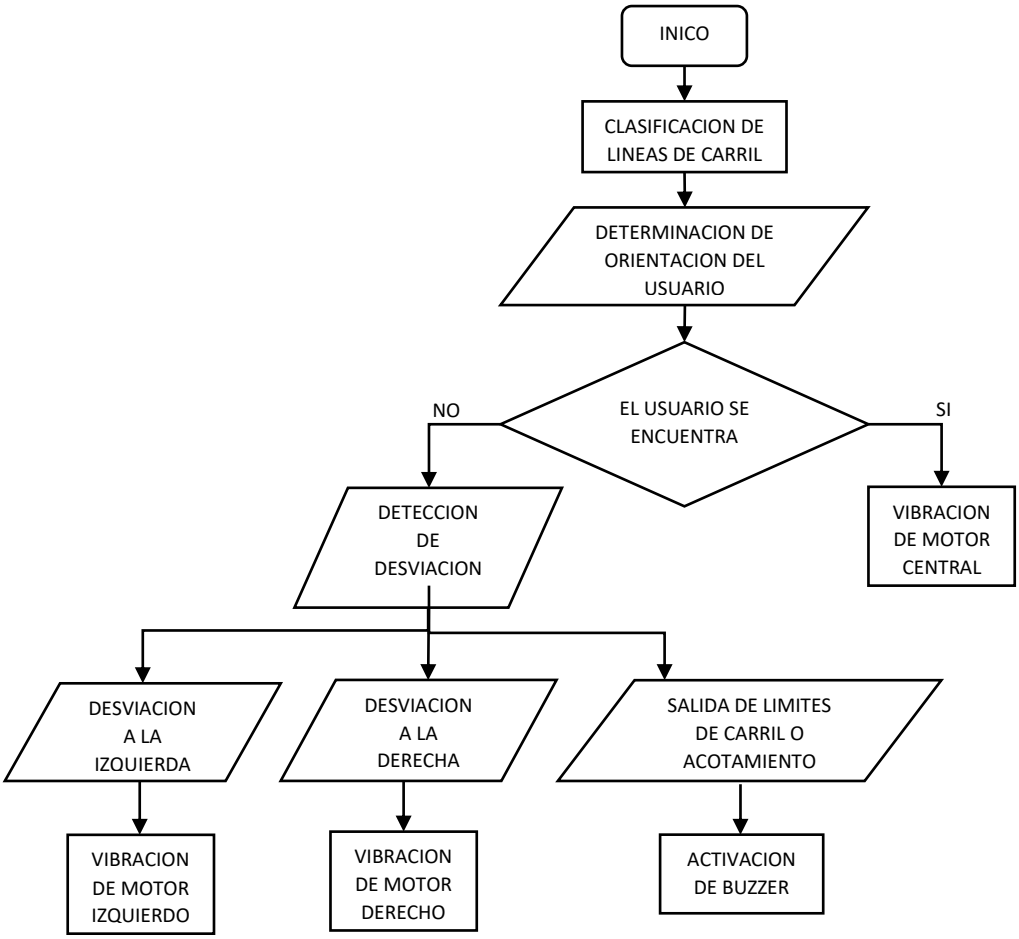

Fig. 68 Diagrama de bloques de activación de los periféricos.

Con los procesos de la figura 67 se logra dar retroalimentación al usuario sobre su orientación mientras realiza actividad física en el carril de la pista de atletismo o acotamiento y se corrige su trayectoria cuando se acerque a las líneas que lo delimitan, manteniendo al usuario caminando al centro del su carril.

3.2.5.4 Algoritmo de detección de círculos

Este algoritmo fue desarrollado para la detección de un código existente en una circunferencia, formado por un número determinado de círculos más pequeños en su interior y que pueden ser identificados, contados e interpretados para determinar su significado. Como se abordó anteriormente, se implementó una variante de la

Transformada de Hough para detectar círculos. Esta opción puede ser seleccionada por el usuario en el dispositivo a través de uno de los botones, específicamente usando el denominado como *CIRCLES*.

De manera similar a la TPH para detección de líneas, se requiere un preprocesamiento de los frames adquiridos por la cámara, antes de aplicar la Transformada de Hough para Círculos (THC). El diagrama de la figura 68 muestra el proceso necesario, a diferencia de TPH no se requiere aplicar un detector de bordes antes del algoritmo debido a que la propia función de OpenCV lo hace utilizando el método del gradiente de Hough.

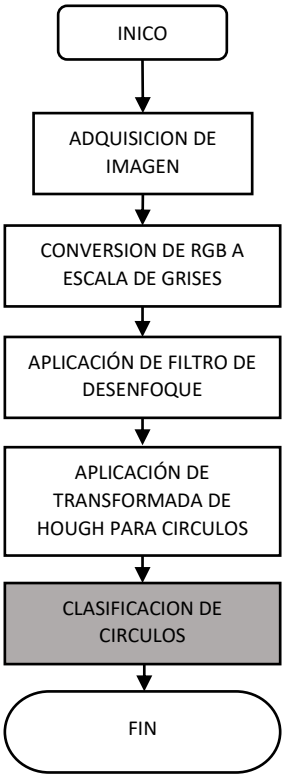

Fig. 69 Diagrama de bloques de preprocesamiento de imágenes para detección de círculos.

La región sombreada representa el análisis y clasificación de los resultados obtenidos al aplicar la función, de manera análoga a la detección de líneas, se debe delimitar el número de datos o variables con los que se está trabajando para conseguir

el menor retraso posible en la implementación de los algoritmos a desarrollar. El resultado de la función es un vector que almacena un conjunto de otros vectores, que contienen dos variables almacenadas en tres datos, las coordenadas del centro del círculo en la imagen $c(x, y)$ y su radio r figura 69, pertenecientes a los diferentes círculos detectados en la imagen.

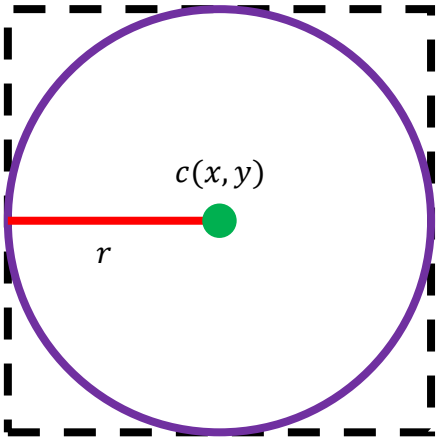

Fig. 70 Variables obtenidas de THC, radio y coordenadas del centro.

La función también permite filtrar los círculos detectados introduciendo un rango de valores para el radio, distancia entre centros de círculos, umbral para el detector de bordes, entre otros. Debido a que a pesar de poder filtrar la mayoría de los círculos detectados en una imagen se presentan falsos positivos, se procedió a implementar un análisis más específico para evitar estos errores.

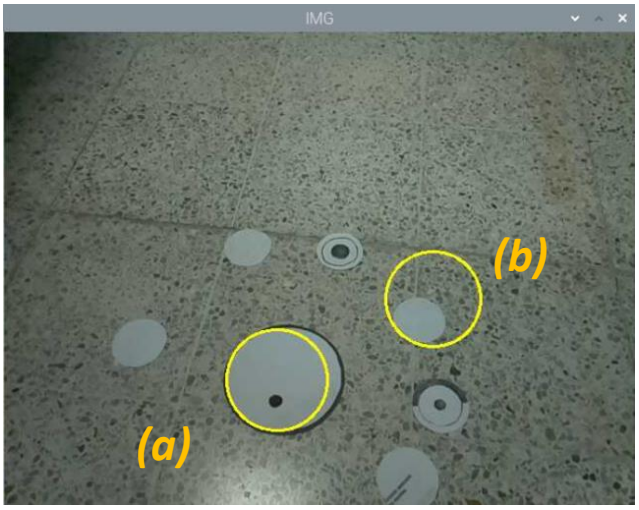

Fig. 71 Detección de circulo en etiquetas colocadas a nivel de piso.

La figura 70 muestra la imagen adquirida y el circulo contenido en ella, como se aprecia se requiere detectar solo el circulo más grande figura 70 *(a)*, pero debido a los parámetros utilizados se presenta una falso positiva figura 70 *(b)*. Una de las características de los círculos a detectar es que contienen en su interior más círculos de menor dimensión y de color negro en su área. Como se implementó en la detección de líneas anterior, una región de interés (ROI) sería una posible solución, el problema que se presenta es que no se sabe si el circulo aparecerá en la misma región si se usa una ROI fija. Para superar lo anterior se propone usar varias ROI móviles para cada circulo detectado y verificar que el contenido en estos pertenezca a un código implementado.

Una ROI móvil es una ventana que depende, en este caso, de las coordenadas del centro del círculo (PC) y el radio del círculo (RC). Utilizando los datos obtenidos de THC podemos obtener las ventanas requeridas de la siguiente manera, figura 71.

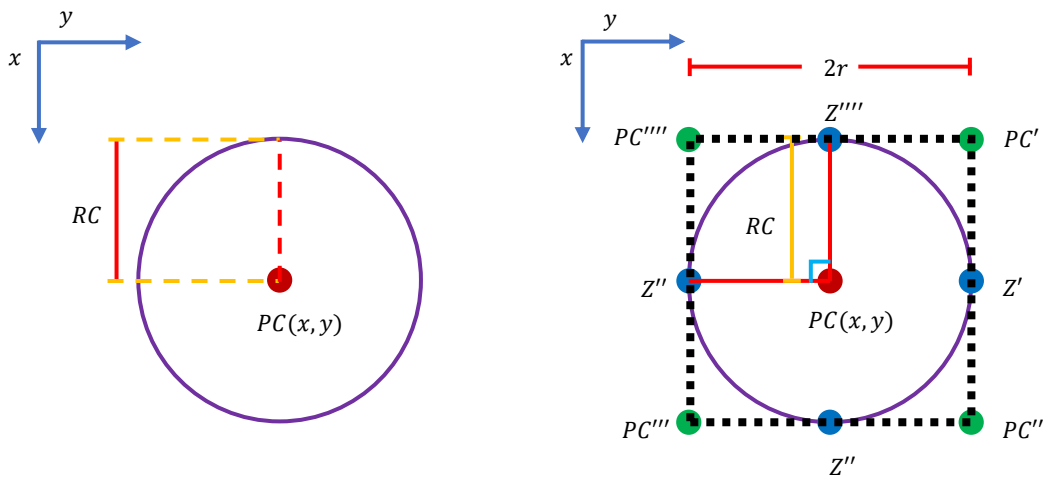

Fig. 72 Obtención de coordenadas de ROI mediante valor de radio del círculo.

Para obtener las coordenadas de los puntos de la ROI utilizamos el valor del radio, sumándose o restándose respectivamente para las coordenadas buscadas.

$$PC(x, y) \qquad (24)$$

$$Z'(x + RC, y), \qquad PC'(x_{Z'}, y_{Z'} - RC) \qquad (25)$$

$$Z''(x, y + RC), \qquad PC''(x_{Z''} + RC, y_{Z''}) \qquad (26)$$

$$Z'''(x - RC, y), \qquad PC'''(x_{Z'''}, y_{Z'''} + RC) \qquad (27)$$

$$Z''''(x, y - RC), \qquad PC''''(x_{Z''''} - RC, y_{Z''''}) \qquad (28)$$

Las ecuaciones (23) hasta (27) permiten calcular los puntos requeridos en la figura 71 y dibujarlos como se observa en la figura 72. Obteniendo la ventana del círculo detectado, es posible volver aplicar la THC para detectar los círculos más

pequeños dentro de la ROI, contabilizarlos y darles un significado, esto se presenta en la figura 73.

Fig. 73 Cálculo de coordenadas de ROI usando valores de radio.

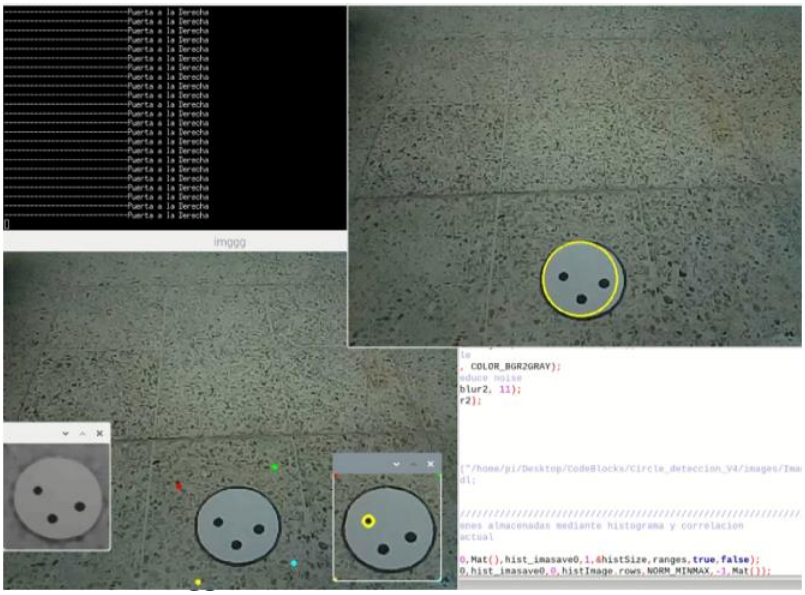

Fig. 74 Detección de círculos más pequeños dentro de etiqueta.

La implementación anterior permite evaluar las ROI para los diferentes círculos detectados y comprobar si existen más círculos de menor tamaño dentro de su área, para ser contabilizados e interpretados. Debido a que la aplicación de una segunda THC puede generar retrasos en el tiempo de procesamiento y no garantiza que el primer círculo detectado contenga las características requeridas para ser analizado en

búsqueda de más círculos, se decidió aplicar otro método de filtrado para las ROI de los círculos detectados en la primera aplicación de la THC. Este consiste en comparar los histogramas normalizados de una base de datos previamente obtenida a partir de varias ROI con círculos en diferentes posiciones, obtener sus histogramas y compararlos con el frame actual figura 74.

Fig. 75 Ventanas (ROI) de los diferentes códigos implementados.

El proceso se obtención de los histogramas de las ROIs almacenadas, se realiza de manera previa para evitar incrementar el tiempo de procesamiento del algoritmo. Los datos se almacenan y se comparan con el histograma calculado de la ROI del frame actual. Como se puede apreciar en la figura 74, las imágenes son convertidas en escala de grises, la figura 75 muestra el histograma de la ROI actual siendo comparado con uno de los almacenados, se utiliza el método de correlación para obtener un valor cuantitativo entre ambas ROIs y se aplica un umbral para determinar si la ROI actual corresponde a una circunferencia que pueda ser analizada en búsqueda de algún código. En la figura 75 *(a)* se presenta el frame actual, *(b)* se calcula la correlación entre ambos histogramas y se grafican, en *(c)* se detectó un posible código en la ROI actual y se procede aplicar THC y *(d)* se interpreta el número de círculos detectados en la ROI y se le da un significado.

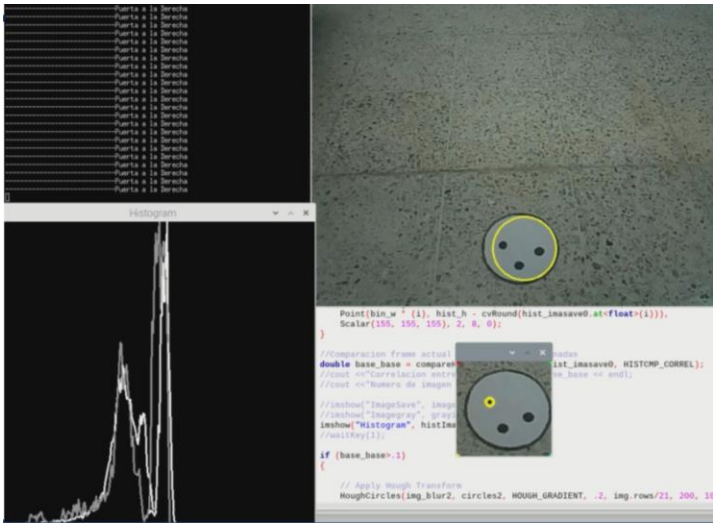

Fig. 76 Comparación de histogramas, frame actual (a), histogramas (b), ROI detectada con código (c), interpretación del código (d).

El proceso anterior no está destinado a identificar si la ROI actual posee un código en ella y a partir de la correlación identificarlo, el proceso solo busca características de semejanza entre los tonos de grises en la ROI actual y los compara con los histogramas almacenados de la base de datos. El principal objetivo de esta sección del proceso es evaluar si se presentan las condiciones adecuadas para analizar la ROI actual en búsqueda de un código, de no obtener estas condiciones se descarta el frame actual y se evalúa el siguiente. Dadas las diversas condiciones de iluminación, fondo de la imagen, ángulo de la cámara con respecto al círculo, puede presentarse falsos positivos, este proceso incrementa la robustes del algoritmo. El diagrama de la figura 76 describe los procesos realizados y las respuestas de acuerdo con la detección realizada por la THC.

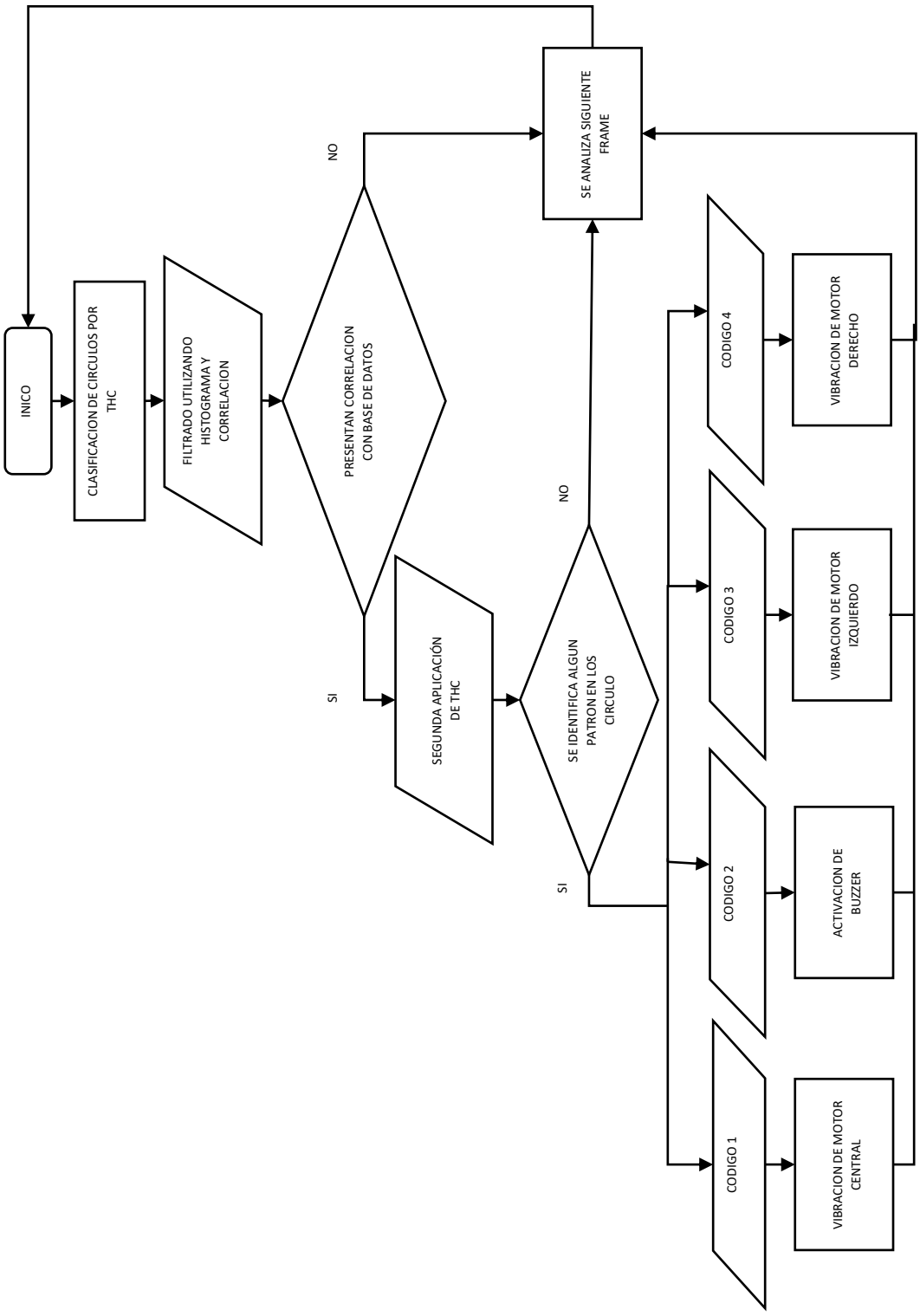

Fig. 77 Diagrama de proceso de detección de círculos.

El algoritmo fue programado en el laboratorio para detectar un total de hasta 8 códigos, esto quiere decir que es capaz de reconocer diferentes patrones colocados dentro de círculos con las características mencionadas al inicio. Estos patrones pueden ser utilizados para asignarles significado, en este trabajo se consideraron solo 4 para generar códigos que activaran los periféricos instalados en el dispositivo, figura 78.

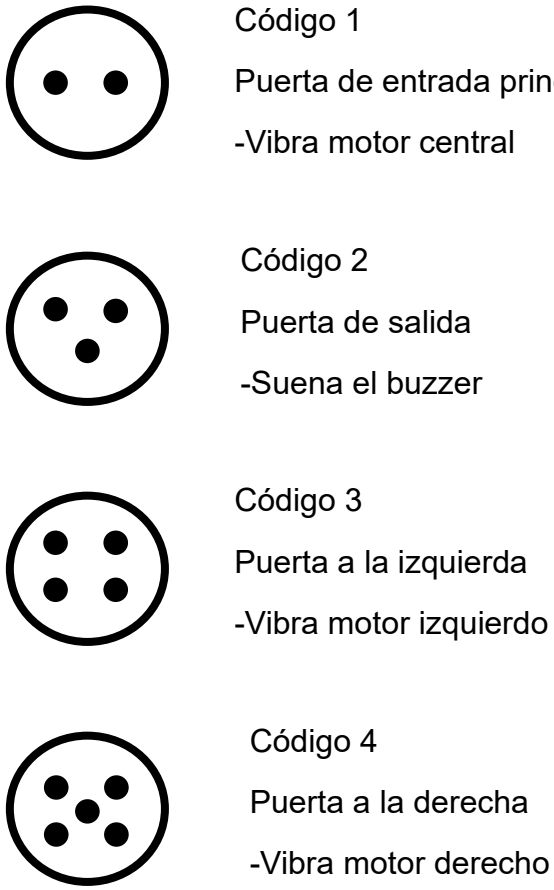

Fig. 78 Círculos con códigos utilizados.

De manera similar a la detección de líneas, la detección de círculos fue programada y desarrollada utilizando círculos de la dimensión mencionada y la cámara de video grabando en tiempo real, todo de manera estática. El dispositivo requiere ser probado siendo utilizado por una persona y de forma dinámica, esto quiere decir que

el usuario deberá encontrarse caminando hasta que el dispositivo detecte el circulo e interprete el código que este posee en forma de patrón y darle retroalimentación al usuario e información sobre lo que se encuentra a su alrededor de acuerdo con la detección realizada.

3.2.5.5 Seguimiento de trayectoria de usuario

El seguimiento de trayectoria se realizado utilizando VNC *Connect*, un software ya instalado en el sistema operativo de Pi4B, que también fue instalado en una computadora portátil con sistema operativo Windows. Se utilizo un dispositivo móvil con la capacidad de funcionar como *router* inalámbrico, realiza funciones de un enrutador e incluye funciones de punto de acceso inalámbrico para otros dispositivos. Se conecto la Pi4B al dispositivo móvil, que no requiere de acceso a internet para funcionar debido a que los algoritmos no lo necesitan, posteriormente se conectó la computadora al dispositivo móvil. VNC *Connect* requiere conocer la dirección IP asignada a la Pi4B por el *router* para realizar la conexión, así como usuario y contraseña que hayan sido asignados a la Pi4B durante su instalación. Adicionalmente se deben activar ciertos permisos y modos de conexión en la Pi4B, principalmente VNC y SSH desde las configuraciones de sistema de la Pi4B. La dirección IP puede verificarse, para este caso desde la interfaz del dispositivo móvil para ser introducida en el software. La figura 79, simplifica el proceso realizado de conexión entre la Pi4B, router y computadora.

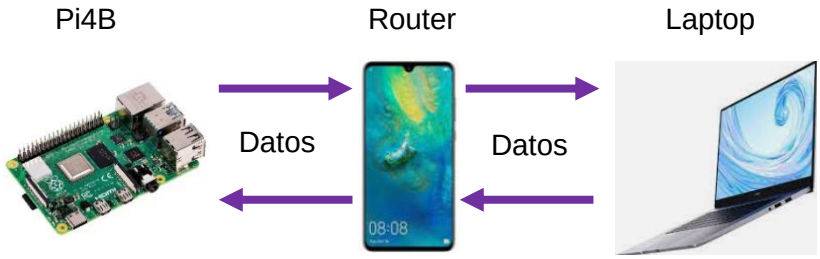

Fig. 79 Conexión Pi4B, Router y Laptop para seguimiento de usuario.

La velocidad de conexión para la banda de 2.4 Ghz, WiFi 802.11g es de hasta 54 Mbps, con lo cual es posible visualizar lo que está capturando la cámara de video con retrasos de entre 0.2 segundo hasta 0.8 segundos con una baja calidad de video, cuando los dispositivos se encuentran a no más de 2 metros de distancia. Conforme los dispositivos se comienzan a alejar el retraso empieza aumentar significativamente. Lo anterior permite realizar el seguimiento del usuario mientras se encuentra avanzando a través del carril de la pista o acera figura 80, incluso permite iniciar el programa independientemente de los botones asignados al usuario. Durante la detección de líneas y círculos nos permite visualizar el desempeño de los algoritmos de manera remota para realizar los ajustes necesarios, asi como ingresar a todas las opciones del sistema operativo de la Pi4B.

Fig. 80 Seguimiento de usuario remotamente.

Capítulo 4. Pruebas

En esta sección se presentan las pruebas funcionales y experimentales a las cuales fue sometido el dispositivo generado, así como el comportamiento de los algoritmos programados en condiciones a las que las personas invidentes están expuestas en una pista de atletismo, ambiente similar y el uso de dispositivos de detección de patrones y códigos que les brinden información sobre lo que hay a su alrededor. También se abordan aspectos importantes de la retroalimentación al usuario generada en tiempo real, en conjunto con el seguimiento de la trayectoria del individuo vía inalámbrica. Las pruebas fueron realizadas en las instalaciones del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) Unidad Zacatenco y en las pistas de atletismo del Deportivo Miguel Alemán y el estadio Wilfrido Massieu, todos ellos ubicados en la Ciudad de México, México.

Las pruebas funcionales figura 81, se llevaron a cabo con la finalidad de realizar las correcciones necesarias antes de ejecutar pruebas experimentales y asegurar el funcionamiento de cada componente y algoritmo. En estas pruebas se revisaron conexiones, operación de los motores, buzzer, cámara y botones. Se tomaron mediciones de voltaje y corriente, se calculó la autonomía del dispositivo con la *power bank* utilizada y se validó el funcionamiento de los algoritmos implementados.

Fig. 81 Pruebas a dispositivo finalizado utilizado por usuario.

Para las pruebas experimentales se reunió a un total de 4 participantes, 3 hombres y 1 mujer, edades entre 25 y 28 años, estatura promedio de 1.65 metros, los cuales utilizaron un antifaz para emular las condiciones de ceguera total. Se les dieron indicaciones sobre el funcionamiento del equipo y cada una de las opciones que les permiten interactuar con él a través de los botones que posee.

4.1 Pruebas funcionales

Finalizada la instalación de los componentes del dispositivo, PCB montadas y conectadas, se procedió a su alimentación y toma de mediciones de parámetros eléctricos de consumo figura 82, tanto para cada periférico, como para todo el sistema, con el objetivo de verificar que este no excediera la capacidad de la Power Bank y redujera el tiempo de funcionamiento o autonomía del dispositivo. Con las mediciones también se descartan posibles fallas de las conexiones de los cables, correctos niveles de voltaje para control de botoneras o alimentación de periféricos y la revisión del sentido de giro de los motores vibradores.

Fig. 82 Mediciones de consumo de corriente y voltaje del dispositivo.

En las mediciones realizadas se obtuvieron dos consumos diferentes, uno menor que se mantiene entre 900 mA y 1A cuando los componentes están energizados, pero aún no se detecta líneas o círculos en las imágenes, en consecuencia, los motores vibradores no están trabajando y la temperatura del procesador del PI4B no activa el ventilador de enfriamiento. El segundo consumo y de mayor interés, se obtuvo cuando se realiza la detección de las líneas o círculos, para este caso los motores vibradores entran en funcionamiento, al igual que se presenta un aumento de temperatura en el procesador del Pi4B debido a procesamiento, operaciones y cálculos realizados. Este segundo consumo se mantiene entre el rango de 1A a 1.344A y es el utilizado en la determinación de la autonomía de la batería.

Tabla 1. Consumo de corriente de periféricos del dispositivo.

PERIFÉRICO	VOLTAJE	AMPERAJE
Cámara	5.00V	222 mA
Ventilador	5.00V	200 mA
Motores Vibradores	5.00V	100 mA
Buzzer	5.00V	30 mA
Pi4B	5.00V	700 mA
Servomotor	5.00V	80 mA
ATmega328	5.00V	10 mA
Modulo ITG/MPU5060	5.00V	4.0 mA
Consumo total en miliamperios		1346 mA

Como se presenta en la tabla 1, el consumo de los componentes instalados no supera la capacidad máxima de suministro de corriente por parte de la *power bank*. Con los datos obtenidos es posible calcular la autonomía de la batería y con ello el tiempo estimado de funcionamiento del dispositivo. Se busca que el dispositivo pueda apoyar en el cumplimiento de las recomendaciones de practica de actividad física de la OMS, que va de 75 min de actividad física vigorosa a 150 min de actividad moderada por semana, además de realizar la detección de posibles patrones que le brinden información al usuario de forma continua durante su trayecto en un área determinada. Conociendo la capacidad de la *power bank*, el consumo en conjunto de los periféricos y Raspberry Pi, se obtiene la autonomía de la batería de la ecuación *(28)*:

$$Duracion\ bateria = \left(\frac{Capacidad\ de\ corriente\ en\ mAh}{Corriente\ de\ la\ carga}\right)(Indice\ de\ consumo) \qquad (29)$$

Donde:

$capacidad\ de\ corriente\ en\ mAh =$ es la capacidad de la batería.

$Corriente\ de\ la\ carga =$ corriente consumida por el dispositivo.

$Indice\ de\ consumo =$ es un factor, al considerar que la batería no permanece cargada al 100% todo el tiempo.

Sustituyendo los valores en la ecuación *(24)*.

$$Duracion\ bateria = \left(\frac{10000\ mAh}{1344\ mA}\right)(0.7) = 5.208\ horas = 312.48\ minutos \qquad (30)$$

Del cálculo anterior se determina que el tiempo de funcionamiento del dispositivo es de 312.48 minutos ecuación *(29)*, lo que permite el cumpliendo del tiempo recomendado por la OMS de minutos de practica de actividad física por semana y la detección continua de patrones sobre la trayectoria del usuario. Esto también permite que el dispositivo requiera ser recargado un menor número veces. Debido a que el procedimiento de carga podría conllevar un problema para el usuario, se recomiendo apoyo de una persona vidente.

Los algoritmos fueron probados en las instalaciones de Laboratorio número 5 de la sección de Bioelectrónica, Departamento de Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV. Se utilizaron líneas blancas de las mismas dimensiones y grosores utilizadas en las pistas de atletismo, colocadas a las distancias requeridas por las

normas de la IAAF para simular un carril. Se coloco el equipo sobre un participante vidente y se realizaron recorridos de 10 metros, figura 83. El desempeño del algoritmo de detección de líneas fue satisfactorio, la retroalimentación utilizando los periféricos instalados funciono de acuerdo con el diagrama de la figura 68 y se determinó realizar pruebas en pistas de atletismo o similares.

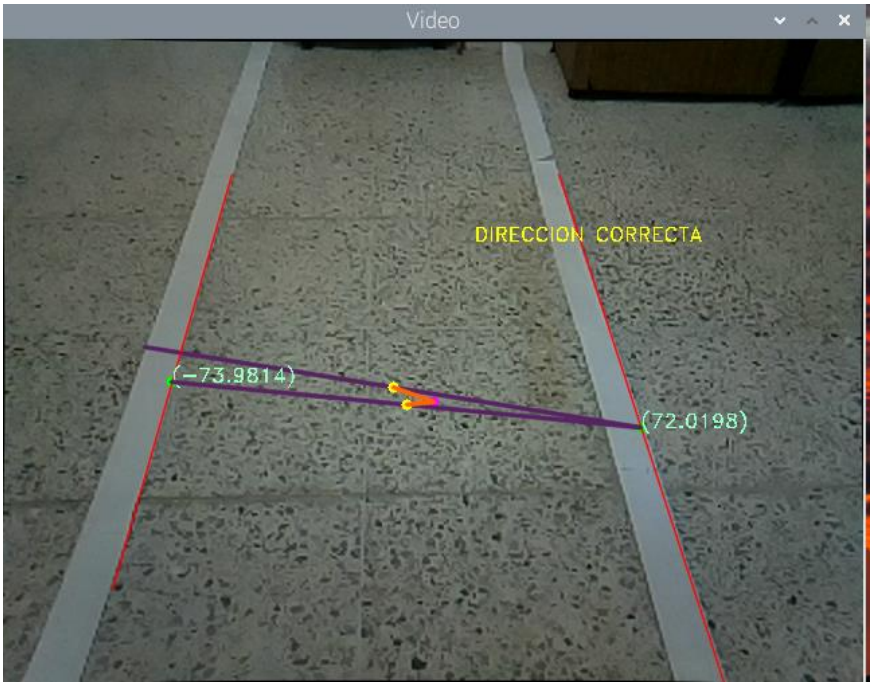

Fig. 83 Pruebas en laboratorio.

El algoritmo de detección de círculos también fue probado en el laboratorio número 5, después de evaluar diferentes tamaños de círculos. Se determino utilizar círculos de diámetros de 25 centímetros fondo blanco, con su circunferencia resaltada en color negro. Estos contienen en su área un número determinado de círculos de 2 cm con fondo negro, que forman un patrón a detectarse y posteriormente analizar el código que contiene, figura 84.

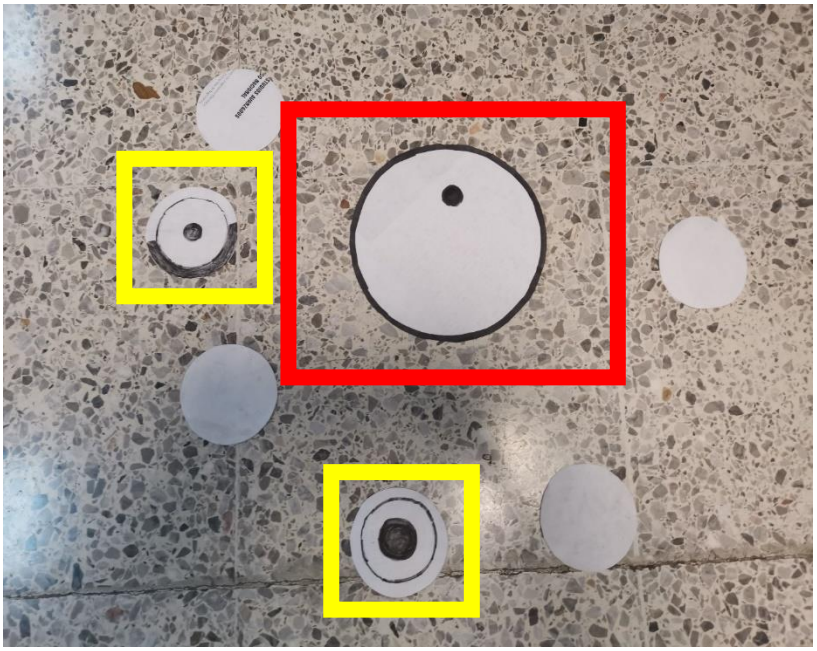

Fig. 84 Prueba con diferentes diámetros de círculos.

La elección del círculo más grande se debe a que la distancia de la cámara al piso es en promedio de 1 metro, dependiendo del usuario que utilice el dispositivo. Esta distancia dificulta la detección de circunferencias menores y presenta un problema para detectar círculos más pequeños contenidos en ellas. En las pruebas realizadas el algoritmo detecto los círculos colocados frente a la cámara, en condiciones de iluminación no controladas figura 85, y fue capaz de detectar los círculos más pequeños contenidos en esta figura 86. Con la detección de los círculos más pequeños se puede dar significado al código que representan el número contenido de estos en la circunferencia y retroalimentar al usuario sobre lo que se está detectando.

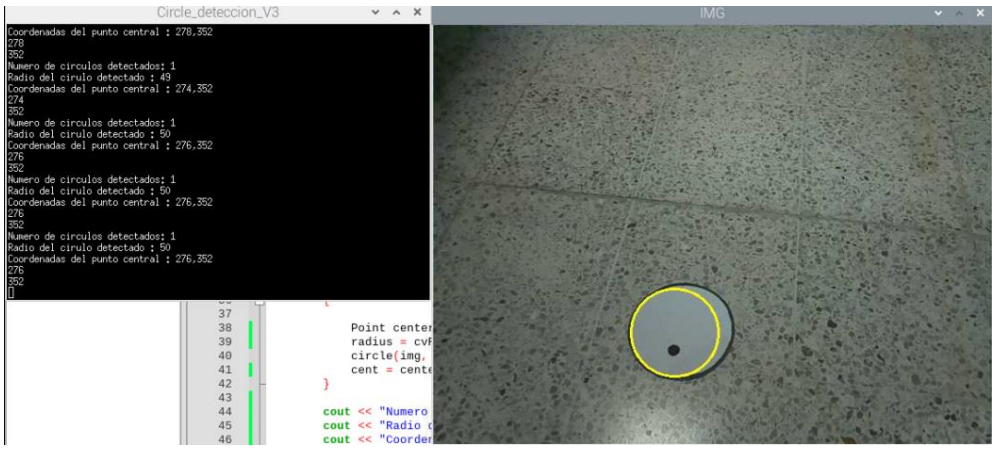

Fig. 85 Detección de círculos.

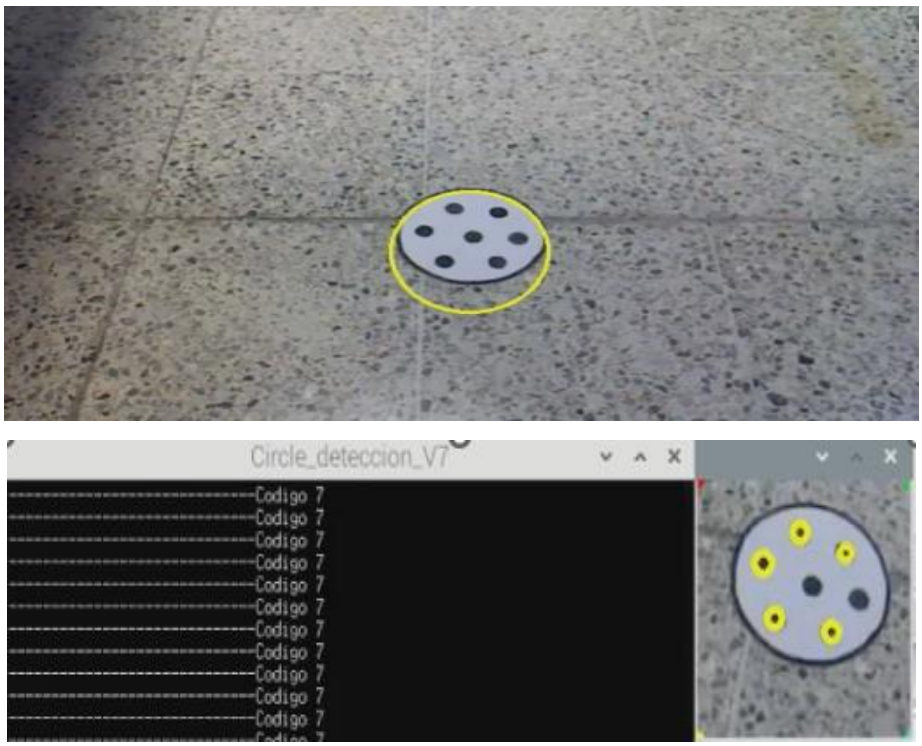

Fig. 86 Detección de circulo con 7 interiores.

También se realizó la medición de los frames por segundo (FPS) a los cuales el dispositivo se está ejecutando después de realizar el procesamiento requerido por los algoritmos figura 87. Obteniendo como resultado que trabaja entre 50 y 80 frames por segundo cuando el dispositivo se encuentra activo, realizando la detección, el análisis y la retroalimentación al usuario.

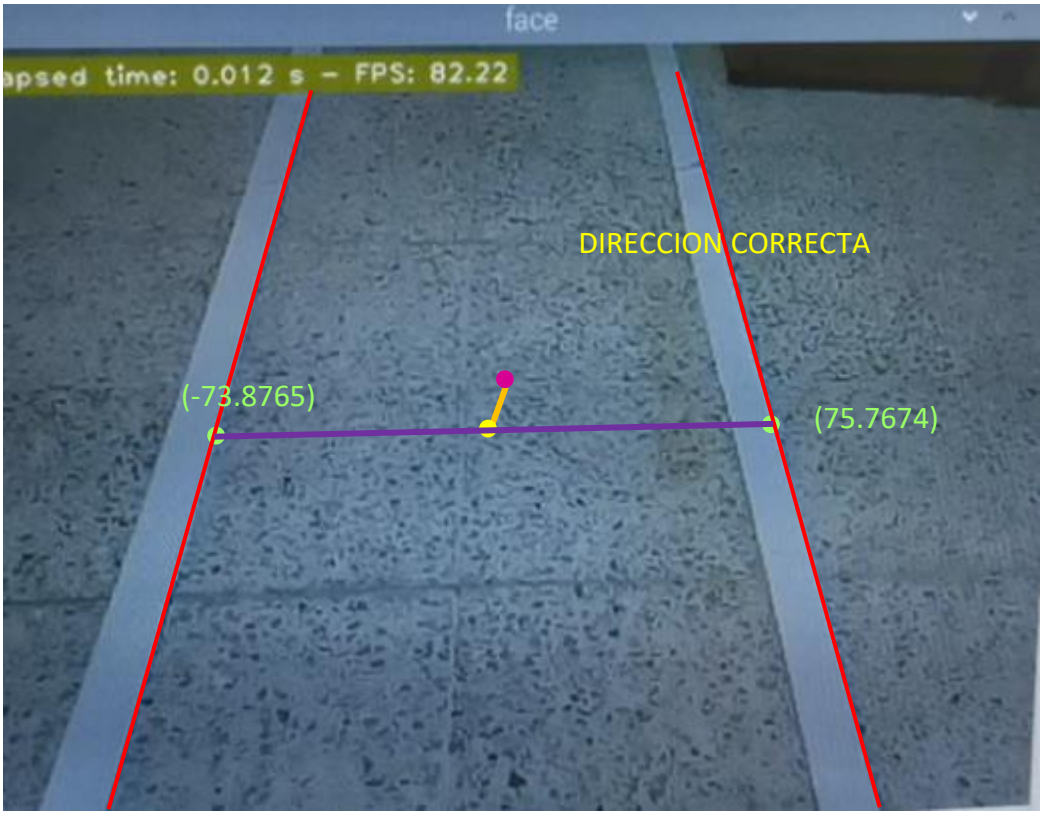

Fig. 87 Medición de frames por segundo (FPS).

4.2 Pruebas experimentales

Se presentan cuatro pruebas realizadas en dos diferentes ambientes, esto con la finalidad de someter el dispositivo a condiciones a las que se pueden enfrentar las personas invidentes antes de llegar a un dispositivo final y funcional en la ejecución de los algoritmos y retroalimentación al usuario. La primera prueba fue en un ambiente con condiciones similares a una pista de atletismo y las dos últimas fueron realizadas en dos pistas de atletismo distintas para el algoritmo de detección de líneas. En la cuarta prueba el algoritmo de detección de círculos fue evaluado en las instalaciones de la sección de Bioelectrónica, específicamente en uno de sus corredores que presenta diferentes condiciones de iluminación y una trayectoria recta con puertas de lado izquierdo y derecho, así como puertas de entrada y salida al inicio y final del pasillo.

En general las pruebas consisten principalmente en realizar una caminada a ritmo continuo, con la espalda y cabeza erguidas, brazos y manos a los costados figura 88. Los usuarios mantendrán los ojos cubiertos con un accesorio durante todo el recorrido para emular las características de ceguera total.

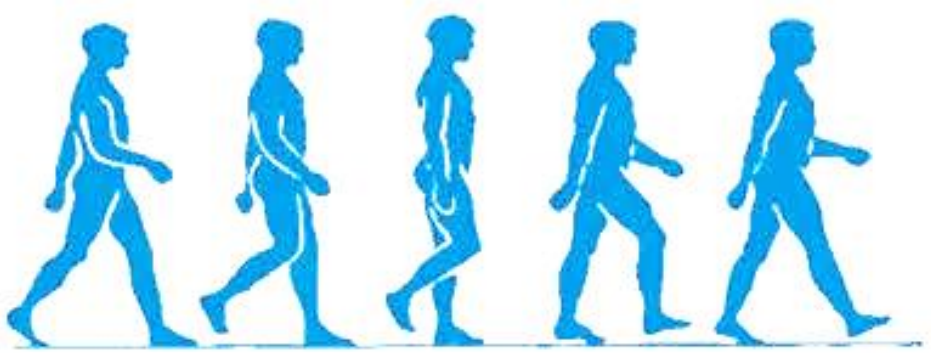

Fig. 88 Postura al caminar.

4.2.1 Prueba experimental uno

Las primeras pruebas con el dispositivo se realizaron en las instalaciones del CINVESTAV, específicamente en un área que emulara las condiciones de un carril de pista de atletismo. El área seleccionada fue un corredor o pasillo expuesto al aire libre entre dos de los edificios ubicados en este centro de investigación, con una longitud total de 70 metros figura 89.

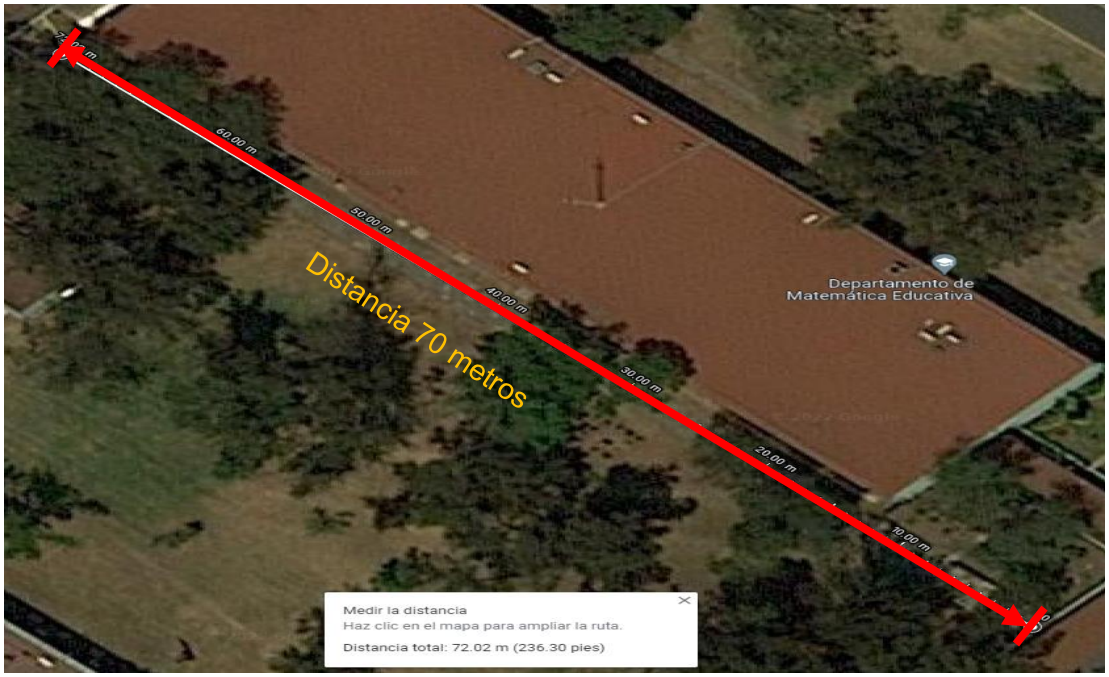

Fig. 89 Recorrido realizado durante la prueba 1, CINVESTAV.

Fig. 90 Participante usando dispositivo (a), detección de líneas (b).

Los participantes se le colocaron el prototipo, un antifaz y se les pidió hacer el recorrido de inicio a fin sin ayuda de un guía, pero siguiéndolos por una persona en el trayecto figura 90. Antes de esto se les solicito encender el dispositivo utilizando los

botones instalados, validar la prueba de funcionamiento de los componentes y de ser satisfactoria, seleccionar la opción de detección de líneas utilizando el botón correspondiente. Durante todo el recorrido, se realizó el registro de la detección de las líneas y correcciones realizadas por el dispositivo, con la finalidad de evaluar la respuesta de los periféricos y el algoritmo durante el uso. Todos los datos quedaron almacenados en un archivo de texto con formato .txt en una carpeta creada específicamente para cada usuario para posteriormente ser analizados.

4.2.2 Prueba experimental dos

Esta prueba se llevó a cabo después de realizar algunas correcciones a problemas observados en la prueba experimental número 1. Se llevo a cabo en la pista de atletismo del Deportivo Miguel Alemán, el complejo alberga una pista de atletismo con sus líneas delimitadoras de carriles trazadas y pintadas de acuerdo con las distancias oficiales. Los usuarios utilizaron de nuevo el antifaz, la prueba de funcionamiento y realizaron el recorrido en línea recta durante una distancia de 100 metros acompañados por una persona, del mismo modo se tomaron registros de las correcciones realizadas por el dispositivo para su posterior análisis. Cabe destacar que la sección donde se realizó la prueba también presentaba sombras generadas por árboles que se encuentran alrededor de la pista, lo que presento una adición de ruido para el algoritmo en el proceso de detección de las líneas, que a pesar de esto logro un comportamiento satisfactorio.

Se recibió retroalimentación sobre el desempeño del dispositivo por parte del usuario y se preparó una tercera prueba para validar el dispositivo en condiciones diferentes a las anteriores figura 91 y figura 92.

Fig. 91 Recorrido realizado durante la prueba 2, Deportivo Miguel Alemán.

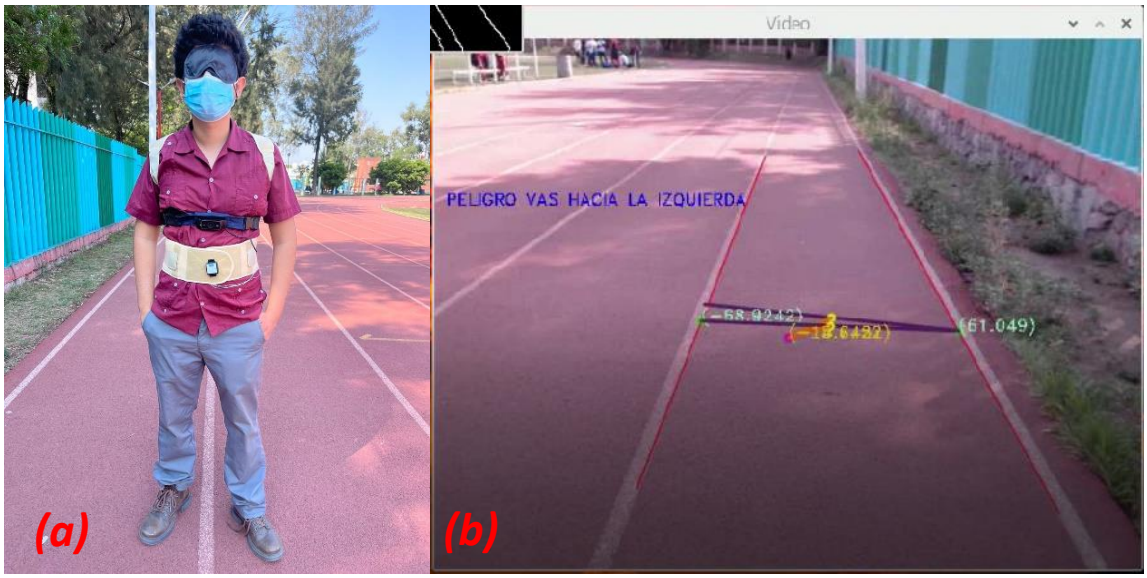

Fig. 92 Participante usando dispositivo (a), detección de líneas (b).

4.2.3 Prueba experimental tres

Se llevo a cabo en el estadio Wilfrido Massieu, a diferencia del Deportivo Miguel Alemán posee dos secciones para competiciones de 100 metros planos, el Deportivo posee una, figura 93. Estas secciones presentan una aproximación de líneas rectas con curvas (figura 3, parte inferior de la pista) y diferentes ángulos generados por el cruce de líneas. La pista también tiene delimitados los carriles de competición con líneas trazadas de acuerdo con las distancias oficiales. En esta ocasión se les pidió a los usuarios continuar el recorrido sobre esos cruces para observar el comportamiento del dispositivo. Los usuarios se colocaron el dispositivo junto con el antifaz, validaron la prueba de funcionamiento de los periféricos e iniciaron el recorrido acompaños a cierta distancia por un guía. Durante el recorrido se almacenaron los mismos datos para revisión del comportamiento del algoritmo figura 94.

Fig. 93 Recorrido realizado durante la prueba 3, Estadio Wilfrido Massieu.

Fig. 94 Comportamiento de algoritmo con cruce de líneas.

4.2.4 Prueba experimental cuatro

Esta prueba se realizó en los pasillos de la sección de Bioelectrónica, se colocaron varias etiquetas con cuatro diferentes códigos a una distancia de 2.5 metros entre cada una de ellas, el pasillo presento condiciones de iluminación no controladas figura 95. Se les solicito a los usuarios nuevamente encender el dispositivo utilizando los botones instalados, validar la prueba de funcionamiento de los componentes y de ser satisfactoria, seleccionar la opción de detección de cirulos utilizando los botones correspondientes. Posteriormente iniciaron el recorrido caminando un poco más lento de lo que acostumbran normalmente, pero de forma continua y en línea recta sin la necesidad de mover el torso para ampliar la búsqueda de la etiqueta en el suelo. La figura 96 *(a)* muestra la detección de la etiqueta en forma de circulo y la figura 96 *(b)* muestra la detección de los círculos dentro de la circunferencia (código), para ser contabilizados y analizando el código dar una retroalimentación al usuario.

Fig. 95 Pruebas algoritmo de detección de círculos, espaciamiento de etiquetas.

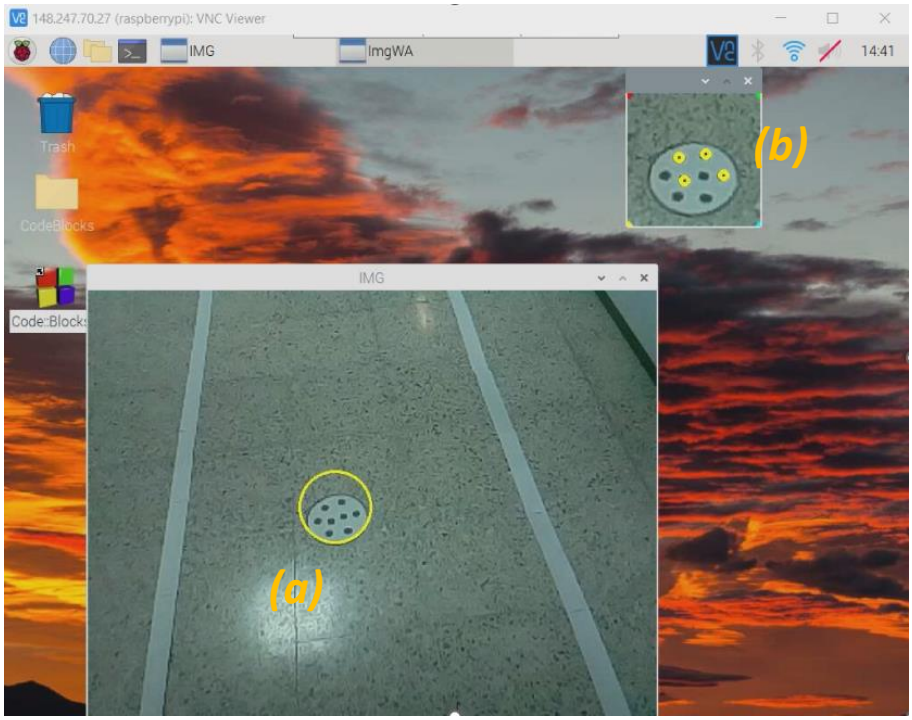

Fig. 96 Detección de circulo (a) y Código (b).

Capítulo 5. Resultados

El algoritmo tiene la capacidad de almacenar las distancias entre el punto de referencia PR y el punto medio PM, la distancia media de la línea LC promediada y el umbral calculado para la distancia media promedio, almacenarlo en un archivo de texto y guardarlo en una ruta especifica. Esto con la finalidad de poder visualizar el comportamiento de la detección de las líneas, cálculo de distancia promedio, actualización del valor del umbral y las correcciones realizadas por el algoritmo al evaluar la distancia entre PR y PM. Para su visualización se utilizó el software de análisis Matlab, con el cual se exportaron los datos obtenidos y se realizaron los siguientes gráficos para su análisis. La figura 97 muestra el comportamiento del algoritmo durante las pruebas realizadas.

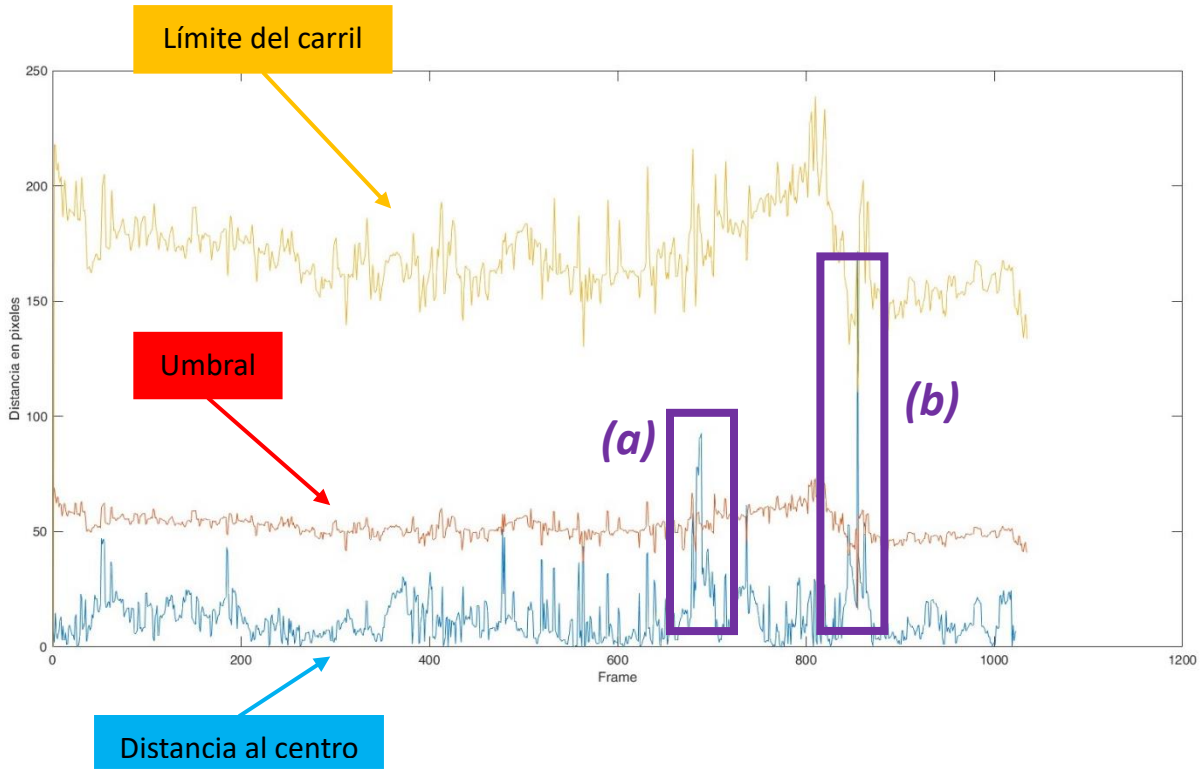

Fig. 97 Datos de usuarios graficados con Matlab, cambios de orientación (a) (b).

Los recuadros *(a)* y *(b)* representan cambios abruptos en los valores de distancia de los pixeles, específicamente en el gráfico de color azul, esto quiere decir que la persona cambio su orientación, pero fue corregida con la retroalimentación generada por los periféricos que se activan al pasar el umbral establecido, grafico de color rojo. El grafico amarillo representa la distancia limite antes de salir del acotamiento o del carril de la pista de atletismo. Como se puede apreciar en la figura 94 la persona no salió del camino debido a la retroalimentación generada por el algoritmo.

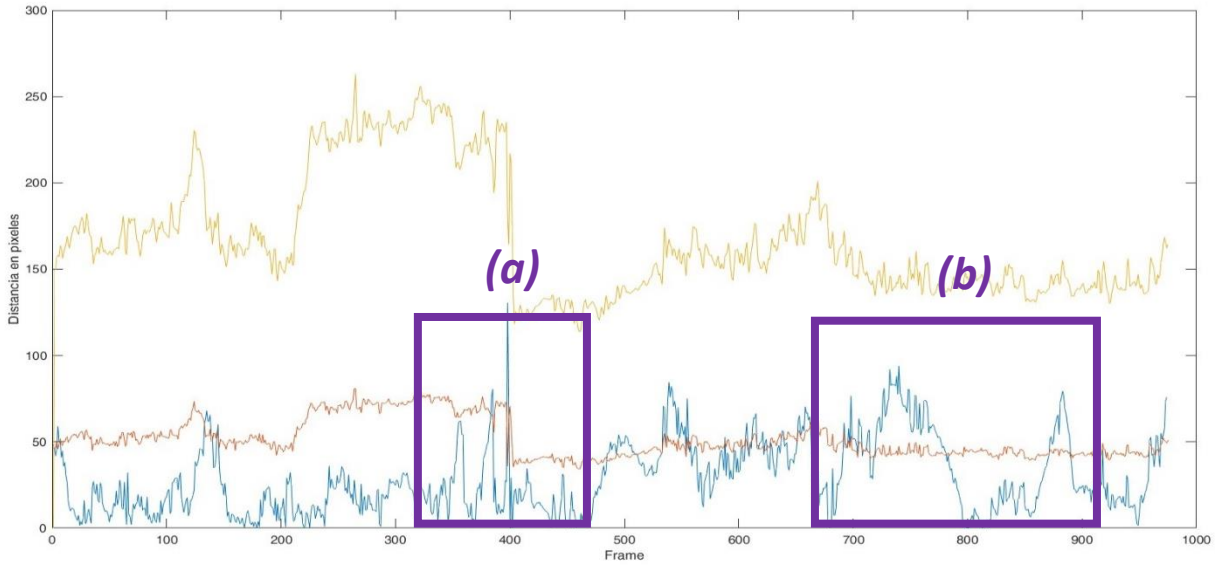

Fig. 98 Datos de usuario uno graficados con Matlab, cambios de orientación (a) (b).

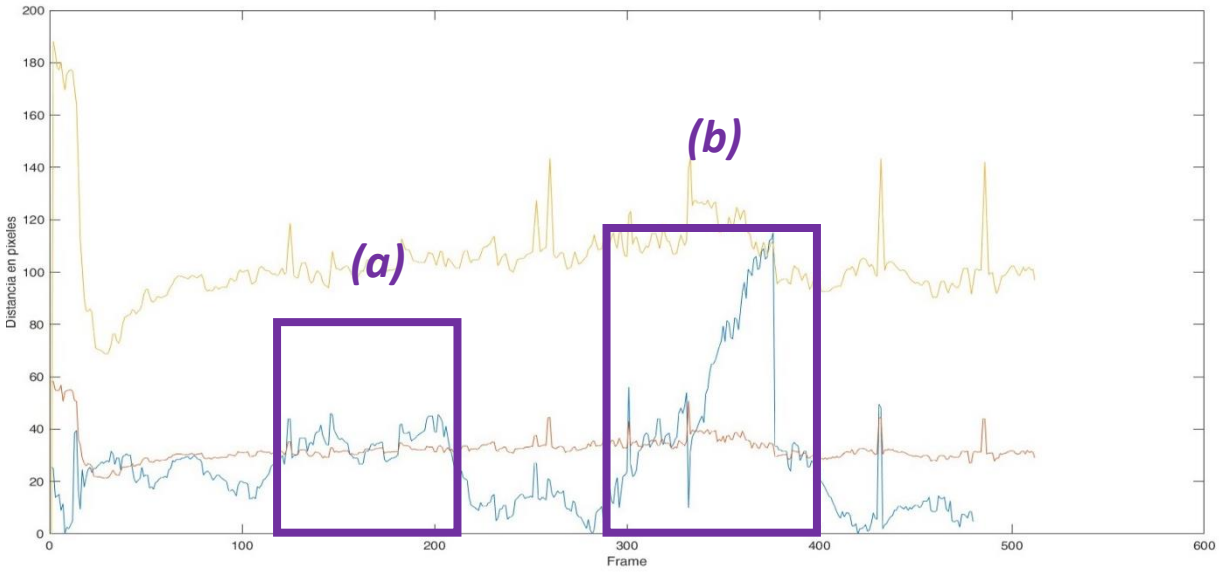

Fig. 99 Datos de usuario dos graficados con Matlab, cambios de orientación (a) (b).

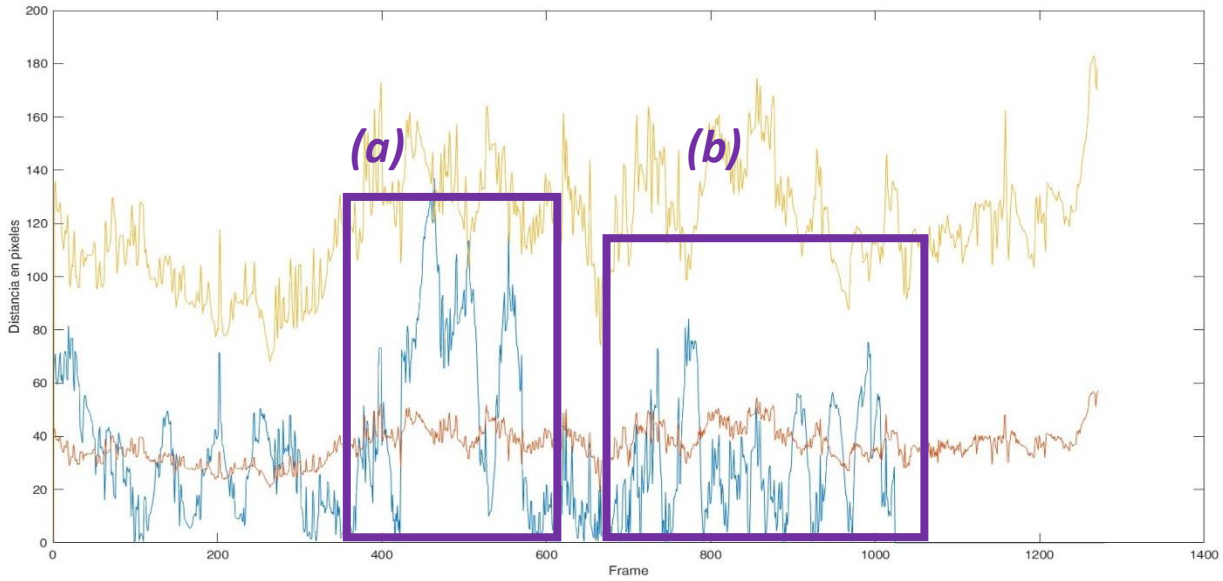

Fig. 100 Datos de usuario tres graficados con Matlab, cambios de orientación (a) (b).

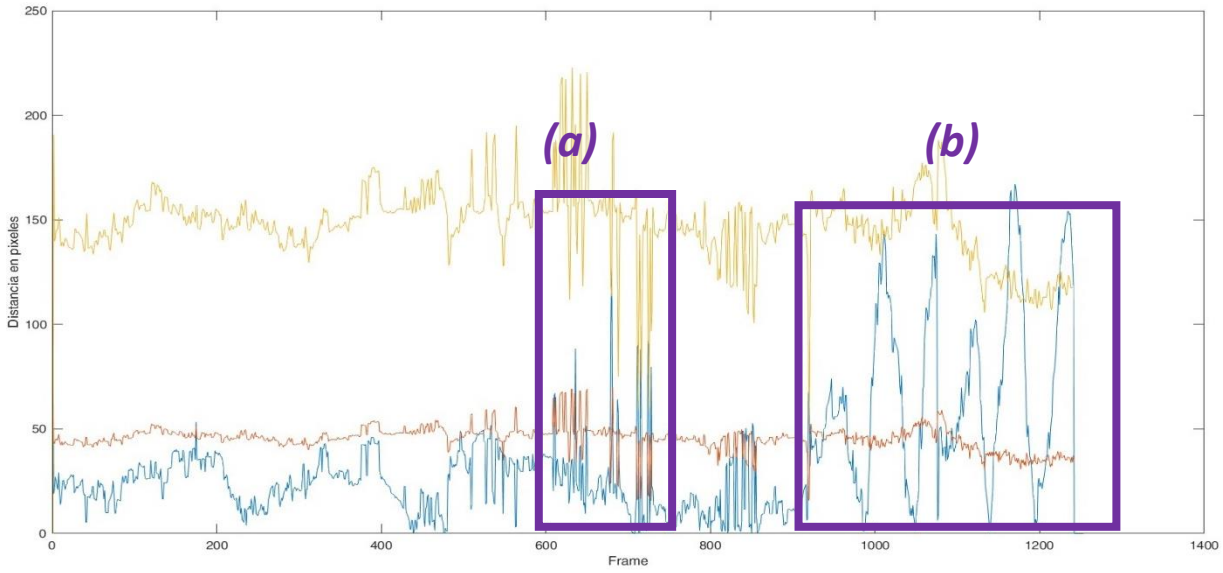

Fig. 101 Datos de usuario cuatro graficados con Matlab, cambios de orientación (a) (b).

Los resultados del algoritmo de detección de círculos se presentan de acuerdo con las imágenes recopiladas mientras el usuario camina por el pasillo de la sección de bioelectrónica, a diferencia de los resultados del algoritmo de detención de líneas, no se presentan gráficos comparativos, pero si las imágenes de video tomadas por la cámara mientras se realizaba el recorrido y en ellas la interpretación del código dentro del círculo detectado, figura 102 a 105.

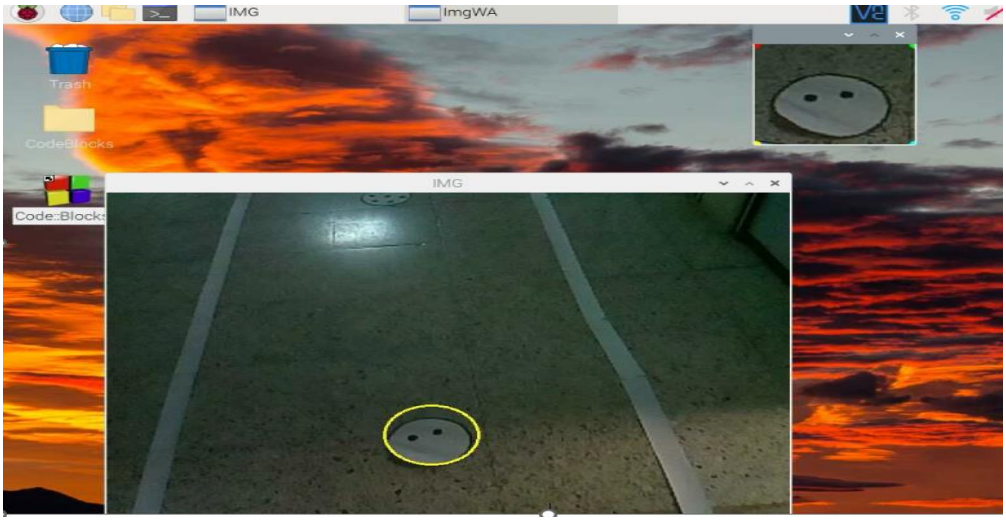

Fig. 102 Detección de código uno.

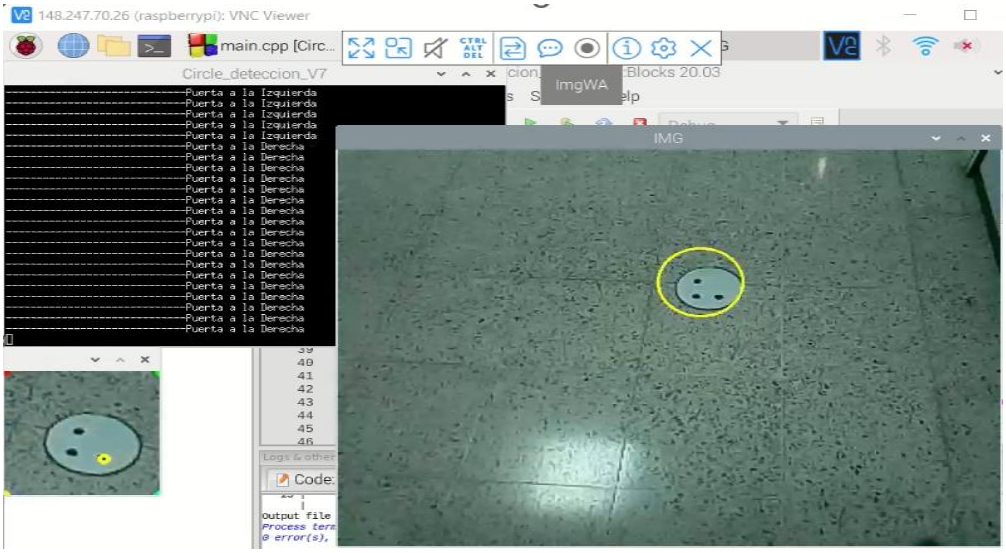

Fig. 103 Detección de código dos.

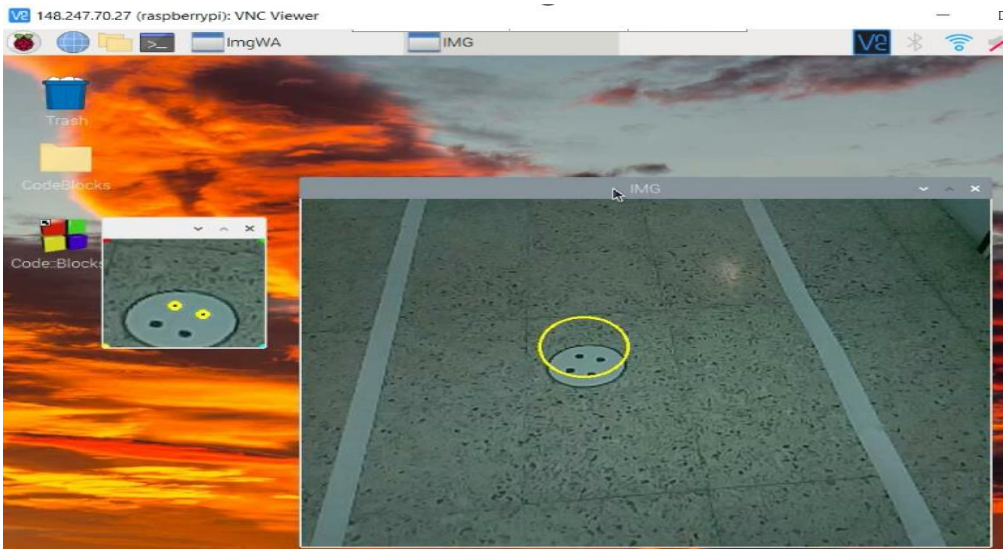

Fig. 104 Detección de código tres.

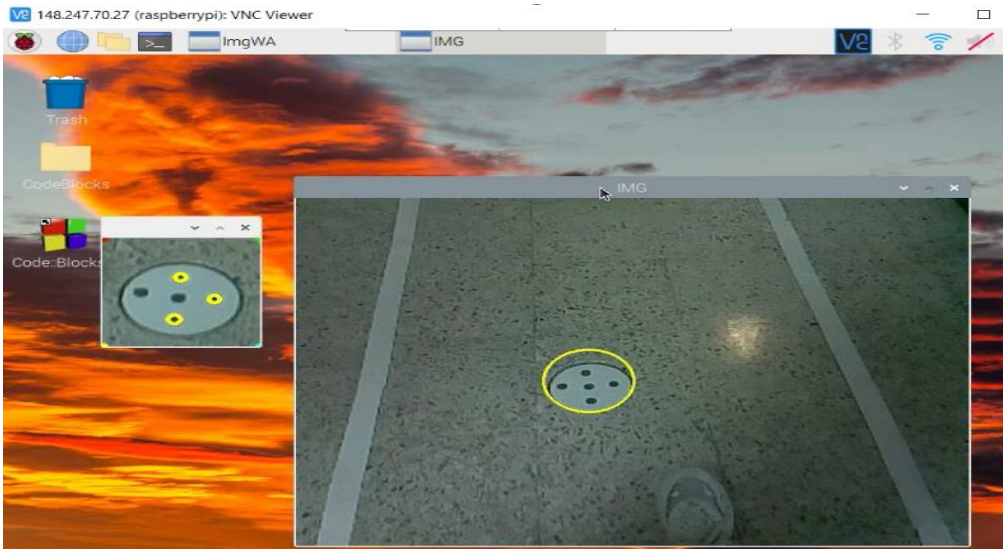

Fig. 105 Detección de código cuatro.

Capítulo 6. Discusión

El dispositivo desarrollado utiliza algoritmos de reconocimiento de patrones ampliamente estudiados, pero su aplicación ha sido más enfocada a otro tipo de investigaciones, a pesar de la extensa literatura encontrada sobre la implementación de la Transformada de Hough para diversas aplicaciones, se ha encontrada poco desarrollo hacia el área de rehabilitación y menos información en las aplicaciones destinadas a apersonas con discapacidades como la discapacidad visual o ceguera.

La implementación de estos algoritmos fue difícil debido a que su aplicación es general y se debió de clasificar los resultados obtenidos para enfocarse en la propuesta de funcionamiento para el dispositivo. Un problema presentado fue que para la aplicación buscada no se pueden tener condiciones controladas y el dispositivo debió de adaptarse para poder trabajar en ciertos tipos de ambientes con distintos tipos de iluminación, pero con la posibilidad y capacidad de mejorar los algoritmos implementados aún más. En comparación con los dispositivos presentados que ya están desarrollados e incluso comercializados, este dispositivo utiliza componentes aún más económicos y software de código abierto, lo que permite la adición de nuevas características y funcionalidades que permitan ser complementado de acuerdo con las necesidades de los usuarios. Otro inconveniente presentado fue que no se pudieron realizar pruebas con personas con discapacidad visual o ceguera, participando personas videntes con condiciones que emularan la ceguera y brindando cierta retroalimentación para la realización de este trabajo. Lo ideal es obtener retroalimentación de personas pertenecientes a este grupo social para atender sus necesidades directamente y una evaluación más asertiva del diseño del dispositivo, pero dejando la opción como trabajo a futuro.

Los resultados obtenidos y su análisis permiten evaluar el desempeño del equipo durante su funcionamiento, las correcciones realizadas y la retroalimentación implementado para mejorar la respuesta de los periféricos en base a las observaciones de los participantes.

Capítulo 7. Conclusiones y trabajo a futuro

Conclusión

El comportamiento de los algoritmos desarrollados junto con la retroalimentación generada por el dispositivo fue satisfactorio, el tiempo de reacción del dispositivo permitió a los participantes corregir su orientación durante la práctica de actividad física con el algoritmo de detección de líneas y conocer que es lo que hay a su alrededor en un pasillo con la detección de círculos y la interpretación de los códigos en ellos. Los componentes utilizados son relativamente económicos en comparación con dispositivos que están actualmente en el mercado, además de ello, poseer una Raspberry Pi integrada en este sistema permite la implementación de más aplicaciones, limitadas por la capacidad de procesamiento de la pi4b, pero lo suficientemente capaz de ejecutar más algoritmos que permitan la inclusión de las personas invidentes.

El dispositivo presento un comportamiento satisfactorio en la detección de líneas de pistas de atletismo, la retroalimentación generada permitió al usuario corregir su trayectoria al caminar y mantenerlo al centro de esta, evitan que invadiera otros carriles o se saliera de la pista. El reconocimiento de círculos permite la detección de códigos previamente colocados en ellos, el dispositivo fue capaz de detectar los círculos que se colocaron en la trayectoria del usuario y brindar una retroalimentación al usuario para conocer que hay a su alrededor. El dispositivo logro cumplir con los objetivos planteados en el inicio de este trabajo, además de que brinda oportunidades de mejora y la implementación de más y mejores algoritmos de reconocimiento de objetos o patrones sobre una base de un dispositivo ya desarrollado e implementado.

Trabajo a futuro

El dispositivo desarrollado no deja de ser aun un prototipo, esto permite la adición de más características que mejoren la interfaz usuario dispositivo, reduzcan el tiempo de procesamiento del algoritmo, la implementación de nuevos métodos de detección de objetos o la medición de distancia en metros entre objetos y usuario. Entre las mejoras que se pueden implementar se encuentran:

- Modificar el soporte de postura para permitir el uso del dispositivo en personas con una complexión más amplia en la sección de espalda hombros y pecho.
- Mejorar el mecanismo de retracción del cable que conecta la cámara y la Raspberry Pi para aumentar su tiempo de funcionamiento.
- Remplazar los materiales utilizados en la fijación de la cámara que permitan una mayor flexibilidad y adaptabilidad en la sección del tórax.
- Permitir la movilidad de las botoneras a lugares más cómodos para los usuarios debido a que la complexión del tórax hace que se modifique la posición de las botoneras.
- Adición de nuevos patrones para detección de códigos en etiquetas en formas de círculos o alguna otra figura geométrica.
- Realizar pruebas con personas invidentes para recibir una mejor retroalimentación sobre sus necesidades.
- Utilizar retroalimentación audible mediante un sintetizador de voz que mejore la interfaz usuario dispositivo y sea más amigable.
- Implementar un sistema de carga de la batería que sea de fácil acceso y uso para el usuario invidente.
- Utilizar el algoritmo de detección de líneas para aplicación en aceras o pasillos que permita una mejor movilidad al usuario.
- Mejorar el dispositivo para ser implementado en actividades físicas que involucre un aumento de velocidad, pasando de caminar a trotar.

- Implementar un algoritmo con la combinación de inteligencia artificial para aumentar la eficiencia del sistema.
- Diseñar una rutina de actividad física que permita el uso del dispositivo de forma específica y fácil para el usuario.
- Implementar un algoritmo que permita que el guía pueda enviar retroalimentación al usuario por medio de la computadora además de la que implementa el dispositivo.
- Implementar un sistema de GPS para almacenar y dar seguimiento a la trayectoria del usuario.

Referencias

[1] O. World Health and B. World, "World report on disability 2011," ed. Geneva: World Health Organization, 2011.

[2] INEGI, "Población con limitación en la actividad para ver," ed. México, 2020.

[3] O. World Health, *World report on vision*. Geneva: World Health Organization, 2019.

[4] O. World Health, "Global recommendations on physical activity for health," ed. Geneva: World Health Organization, 2010.

[5] R. A. ESPAÑOLA. (2022, 26/07/2022). *Diccionario de la lengua española (23.ª ed.)*. Available: https://dle.rae.es

[6] M. Cuesta Hernández and A. L. Calle Pascual, "[Benefits of exercise in healthy population and impact on disease occurrence]," (in spa), *Endocrinol Nutr,* vol. 60, no. 6, pp. 283-6, Jun-Jul 2013. Beneficios del ejercicio físico en población sana e impacto sobre la aparición de enfermedad.

[7] L. B. Augestad and L. Jiang, "Physical activity, physical fitness, and body composition among children and young adults with visual impairments: A systematic review," vol. 33, no. 3, pp. 167-182, 2015.

[8] S. Houwen, E. Hartman, and C. Visscher, "Physical activity and motor skills in children with and without visual impairments," (in eng), *Med Sci Sports Exerc,* vol. 41, no. 1, pp. 103-9, Jan 2009.

[9] A. K. Rogge *et al.*, "Balance, gait, and navigation performance are related to physical exercise in blind and visually impaired children and adolescents," (in eng), *Exp Brain Res,* vol. 239, no. 4, pp. 1111-1123, Apr 2021.

[10] G. Kobberling, L. W. Jankowski, and L. Léger, "The Relationship between Aerobic Capacity and Physical Activity in Blind and Sighted Adolescents," vol. 85, no. 9, pp. 382-384, 1991.

[11] J. Marmeleira, L. Laranjo, O. Marques, and C. Pereira, "Physical activity patterns in adults who are blind as assessed by accelerometry," (in eng), *Adapt Phys Activ Q,* vol. 31, no. 3, pp. 283-96, Jul 2014.

[12] K. Mohammad Khani, M. Karimizadeh Ardakani, and M. H. Mansori, "Investigating the Relationship Between Lower Limb Flexibility With Motor Function and Risk of Falling in Visually Impaired Individuals %J Physical Treatments - Specific Physical Therapy," (in eng), Research vol. 11, no. 2, pp. 93-102, 2021.

[13] E. A. Jaarsma, R. Dekker, S. A. Koopmans, P. U. Dijkstra, and J. H. Geertzen, "Barriers to and facilitators of sports participation in people with visual impairments," (in eng), *Adapt Phys Activ Q,* vol. 31, no. 3, pp. 240-64, Jul 2014.

[14] J. A. Haegele, R. Famelia, and J. Lee, "Health-related quality of life, physical activity, and sedentary behavior of adults with visual impairments," (in eng), *Disabil Rehabil,* vol. 39, no. 22, pp. 2269-2276, Nov 2017.

[15] A. M. Kamelska and K. Mazurek, "The Assessment of the Quality of Life in Visually Impaired People with Different Level of Physical Activity," *Physical Culture and Sport. Studies and Research,* vol. 67, no. 1, pp. 31-41, 2015.

[16] A. I. d. F. d. Atletismo. (2022, Noviembre 10). *World Para Athletics Rules and Regulations*. Available: https://www.paralympic.org/athletics

[17] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital image processing*, 4th ed., global ed. ed. Harlow (Essex): Pearson Education, 2018.

[18] F. Brill, V. Erukhimov, R. Giduthuri, and S. Ramm, "Chapter 1 - Introduction," in *OpenVX Programming Guide*, F. Brill, V. Erukhimov, R. Giduthuri, and S. Ramm, Eds.: Academic Press, 2020, pp. 1-13.

[19] G. Bradski and A. Kaehler, *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, 2008.

[20] J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679-698, 1986.

[21] P. V. Hough, "Method and means for recognizing complex patterns," ed: Google Patents, 1962.

[22] J. F. a. K. Kenny, E. S., *Mathematics of Statistics*. Van Nostrand, 1951.

[23] M. F. Saaid, I. Ismail, and N. Mohd Zikrul Hakim, "Radio Frequency Identification Walking Stick (RFIWS): A device for the blind," in *2009 5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications*, 2009, pp. 250-253.

[24] J. F. Oliveira, "The path force feedback belt," in *2013 8th International Conference on Information Technology in Asia (CITA)*, 2013, pp. 1-6.

[25] R. P. Foundation. (2022, 26/07/2022). *What is a Raspberry Pi?* Available: https://www.raspberrypi.org/

[26] T. IvenSense. (2022, Noviembre 10). *IvenSense MPU-6050*. Available: https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/

[27] Arduino.cc. (2022, Noviebre). *Arduino Documentation*. Available: https://docs.arduino.cc/

[28] Autodesk. (Noviembre 10). *Impresion 3D*. Available: https://www.autodesk.mx/solutions/3d-printing

[29] D. Systems. (1988, Noviembre 10). *StereoLithography Interface Specification*. Available: https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000504.shtml

[30] C. C. Kai, G. G. K. Jacob, and T. Mei, "Interface between CAD and Rapid Prototyping systems. Part 2: LMI — An improved interface," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 13, no. 8, pp. 571-576, 1997/08/01 1997.

[31] Pigpio. (Noviembre 10). *Pigpio library*. Available: https://abyz.me.uk/rpi/pigpio/index.html

Anexos

Anexo A: Circuitos Electrónicos

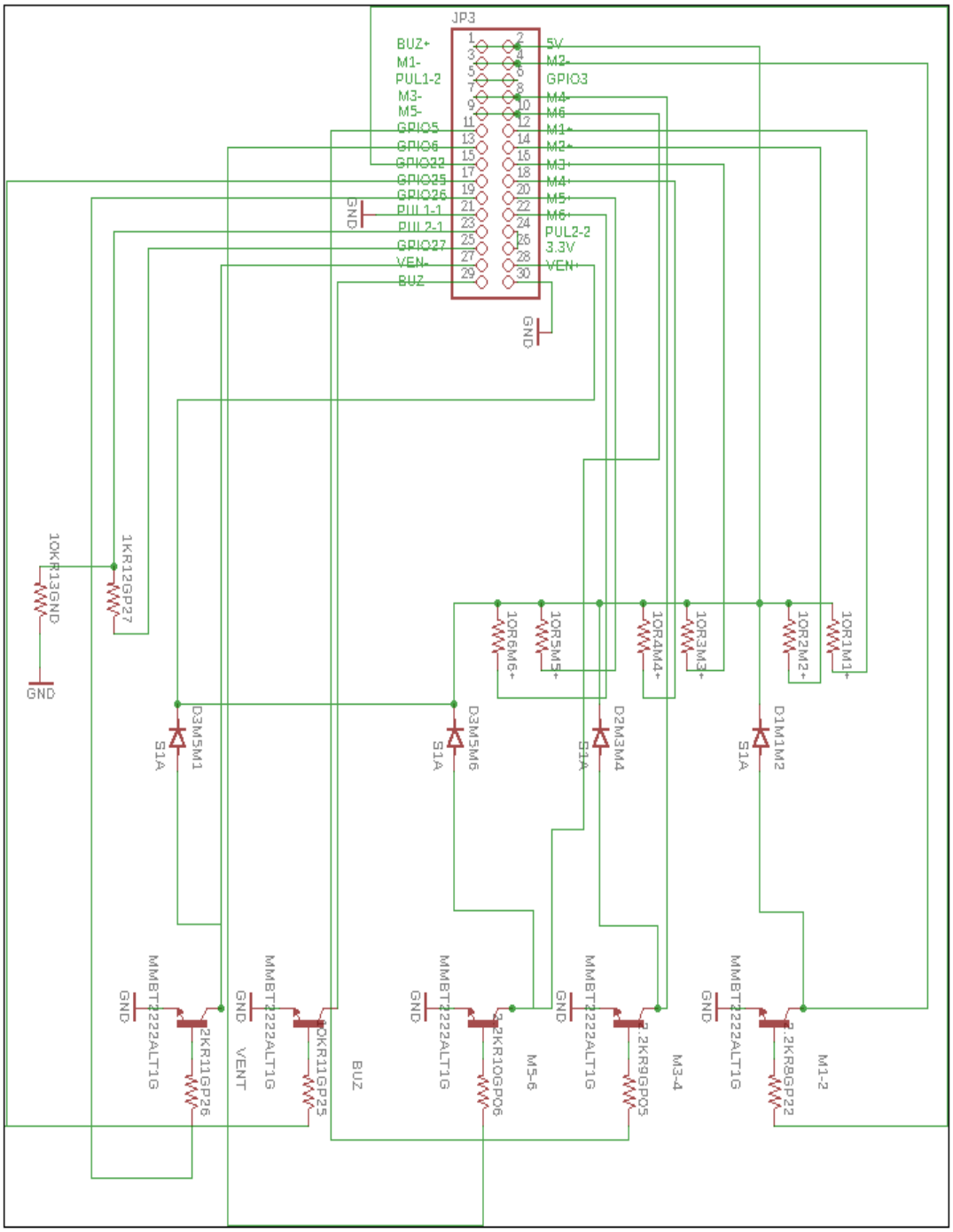

Fig. 106. Circuito control de motores.

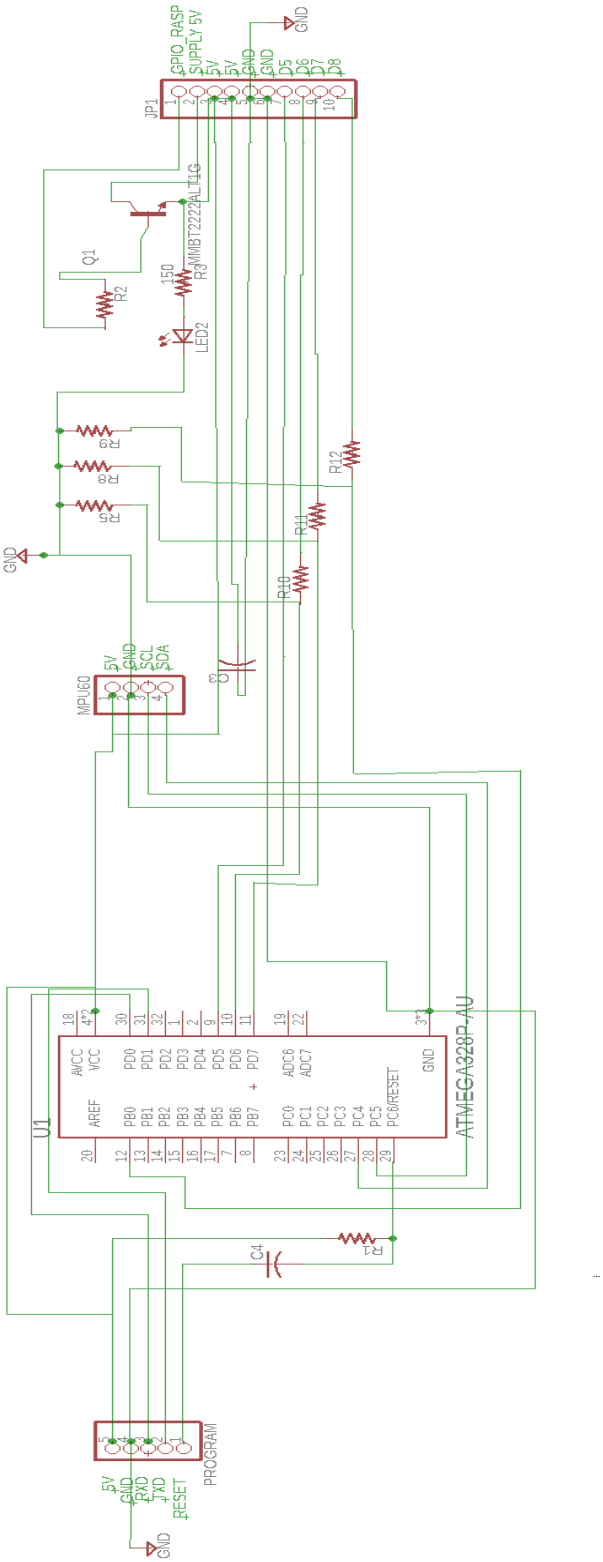

Fig. 107 . Circuito control de cámara.

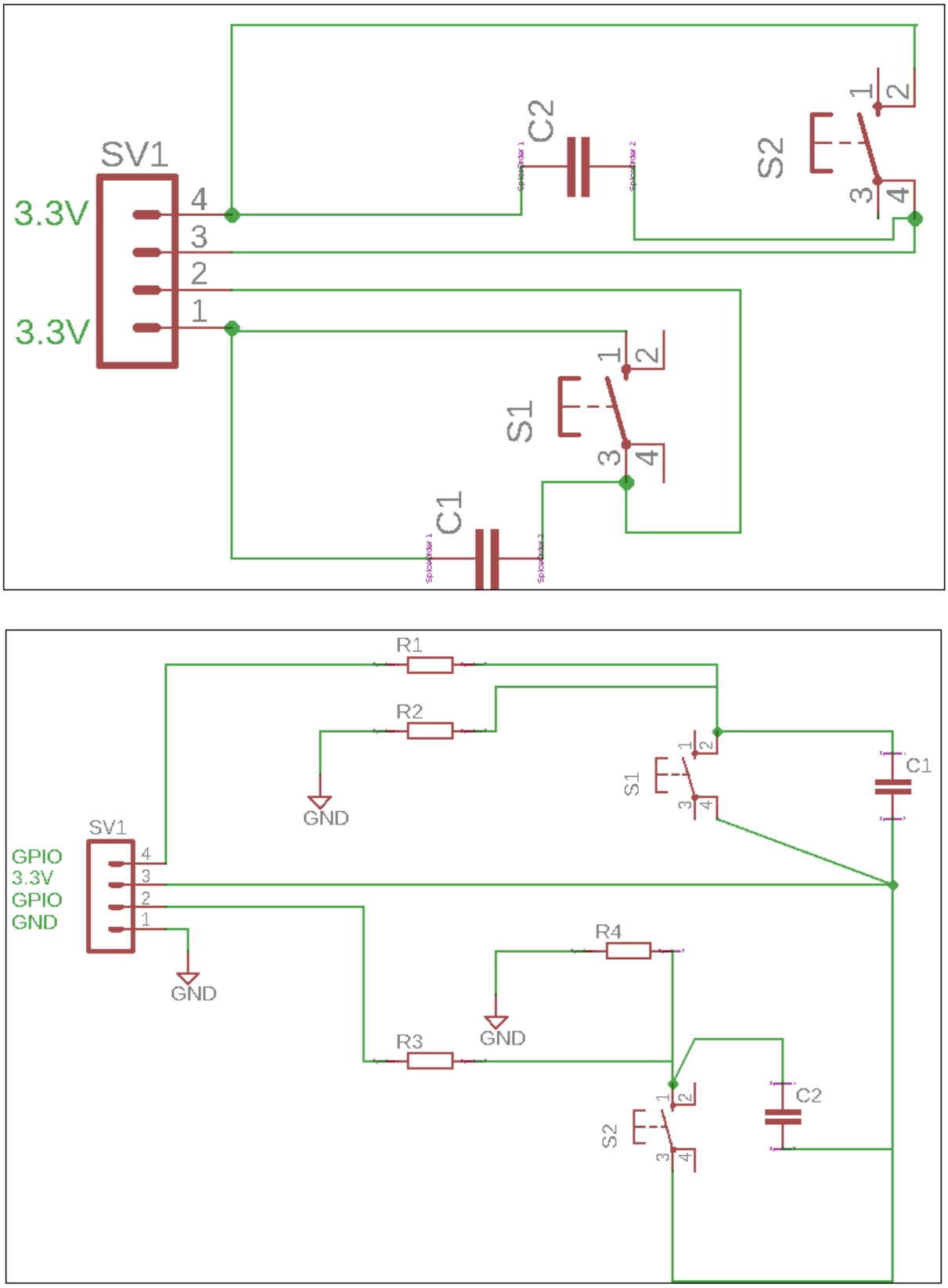

Fig. 108 . Circuito control de botones.