



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta, diseño, desarrollo y
evaluación de un prototipo de Equipo
de Asistencia para Movilidad para
personas con debilidad visual**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Emmanuel González Mendoza

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Antonio Silva Rico



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

*Con todo mi cariño,
a mi mamá, a mi papá y a mi madrina.*

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por brindarme la oportunidad y las herramientas para desarrollarme personal y académicamente.

Al Dr. José Antonio Silva Rico por su invaluable apoyo, dirección y contribución al desarrollo de este proyecto.

A mis sinodales, compañeras, compañeros, y a todas las personas que de alguna u otra manera se interesaron e involucraron en este proyecto. Sus comentarios, recomendaciones y participación permitieron enriquecer y concretar este trabajo.

A todos los profesores y profesoras que han compartido conmigo sus conocimientos en el transcurso de mi formación académica.

A mi mamá, a mi papá y a mi madrina, porque sus enseñanzas y su cariño y apoyo incondicionales me han permitido recorrer y completar esta etapa de mi vida.

A mi familia, amigas y amigos, por compartir conmigo durante mi etapa como estudiante experiencias, aprendizajes y, sobre todo, buenos momentos.

A Dios, por darme la oportunidad de crecer rodeado de personas maravillosas y ejemplares, ya que sin ellas yo no sería el mismo.

Índice general

Índice general	1
Índice de figuras	5
Índice de tablas	7
Lista de abreviaturas	9
Introducción	11
Objetivos	13
1. Marco teórico	15
1.1. Discapacidad visual y tecnología de asistencia	15
1.1.1. Modelos de discapacidad	15
Modelo de prescindencia	15
Modelo médico	15
Modelo social	16
1.1.2. Debilidad visual	16
1.1.3. Discapacidad visual y accesibilidad	16
1.1.4. Tecnología de asistencia para movilidad	17
Perros guía	17
Dispositivos guía	18
Bastón largo	18
Bastones inteligentes	19
Dispositivos de asistencia <i>wearables</i>	20
Asistencia basada en visión por computadora	21
1.2. Visión por computadora	24
1.2.1. Aplicaciones	24
1.2.2. Biblioteca OpenCV	24
1.2.3. Visión estéreo	25
Geometría	25
1.3. Cuaterniones	28
1.3.1. Rotación de vectores	28
2. Diseño conceptual	29
2.1. Necesidades	29
2.1.1. Necesidades del usuario	29

2.1.2.	Jerarquía e importancia relativa de las necesidades	30
2.2.	Especificaciones	31
2.3.	Generación de conceptos	31
2.3.1.	Aclarar y simplificar el problema	31
2.3.2.	Organización de conceptos	32
2.4.	Selección del concepto	36
2.4.1.	Filtrado de conceptos	36
2.4.2.	Evaluación de conceptos	36
2.5.	Concepto seleccionado	38
3.	Dispositivo para Captura de Imágenes Estéreo	41
3.1.	Selección de componentes	41
3.1.1.	Cámaras	42
3.1.2.	IMU	43
3.1.3.	Energía	43
Batería	43	
Regulador de voltaje	44	
Nivel de batería	44	
3.2.	Hardware	45
3.3.	Software	47
3.3.1.	Inicialización del DCIE y conexión inalámbrica con el teléfono inteligente	47
3.3.2.	Sincronización de la captura de imágenes	48
3.3.3.	Programa para determinar el nivel de voltaje en la batería del DCIE	48
3.4.	Carcasa y soporte para el dispositivo de captura de imágenes	49
4.	Aplicación móvil	51
4.1.	Conexión inalámbrica del EAM	51
4.1.1.	Conexión con el DCIE	51
4.1.2.	Conexión con los brazaletes	52
4.2.	Intercambio de información con el DCIE	52
4.2.1.	Establecimiento de la comunicación con el DCIE	52
4.2.2.	Recepción e interpretación de la información obtenida por el DCIE	52
4.2.3.	Frecuencia de actualización de la información	53
4.3.	Preprocesamiento de las imágenes	54
4.3.1.	Rectificación y corrección de distorsión	54
4.3.2.	Reducción de ruido	55
4.3.3.	Corrección gamma	58
4.3.4.	Análisis de textura	59
4.4.	Obtención de mapas de disparidad	60
4.4.1.	Algoritmo SGBM	62
4.5.	Detección de obstáculos y señal de retroalimentación	64
4.5.1.	Cálculo de nube de puntos	64
4.5.2.	Detección de obstáculos sin desplazamiento	66
Modo global	67	
Modo escáner	70	
4.5.3.	Detección de obstáculos en movimiento	72
4.5.4.	Transmisión de datos	75

5. Brazaletes	77
5.1. Selección de componentes	77
5.1.1. Módulo de vibración	77
5.1.2. Módulo Bluetooth	78
5.1.3. Microcontrolador	78
5.1.4. Energía	79
5.2. Hardware	80
5.3. Software	80
5.4. Carcasa para los brazaletes	81
5.5. Cargador	82
5.5.1. Selección de componentes	83
Módulo de carga de baterías Li-Po	83
Microcontrolador	83
Módulo de comunicación inalámbrica	84
Energía	84
5.5.2. Hardware	84
5.5.3. Software	85
5.5.4. Carcasa	86
6. Pruebas de funcionamiento de los algoritmos de detección de obstáculos	87
6.1. Detección de puntos 3D en diferentes entornos y condiciones de iluminación	87
6.1.1. Luz natural	87
6.1.2. Sombra	89
6.1.3. Luz artificial	89
6.1.4. Noche	92
6.1.5. Contraluz	92
6.1.6. Desbalance en la iluminación	92
6.2. Detección de obstáculos sin desplazamiento	94
6.2.1. Modo global	94
6.2.2. Modo escáner	96
6.3. Detección de obstáculos en movimiento	96
6.3.1. Obstáculos al frente	96
6.3.2. Detección de paredes	99
6.3.3. Seguimiento de obstáculos	99
6.3.4. Selección del obstáculo principal	102
7. Pruebas de uso del EAM	105
7.1. Interpretación de las señales de retroalimentación sin desplazamiento	105
7.1.1. Modo escáner	106
7.1.2. Modo global	106
7.2. Interpretación de las señales de retroalimentación en movimiento	108
7.3. Experiencia del usuario	109
7.3.1. Equipamiento y comodidad del EAM	109
7.3.2. Desempeño del EAM en la detección de obstáculos	109
7.3.3. Interpretación de la retroalimentación	109
7.3.4. Trabajo a futuro	110

Conclusiones	111
Referencias	113
A. Lista de precios	117
B. Diagramas de flujo	119
B.1. Diagrama de flujo del programa de control del DCIE	120
B.2. Diagrama de flujo del programa para determinar el voltaje de la batería del DCIE	122
B.3. Diagrama de flujo del programa de control de la aplicación móvil	123
B.4. Diagrama de flujo del programa de control de los brazaletes	128
B.5. Diagrama de flujo del programa de control del centro de carga	129
C. Placas PCB	131
C.1. PCB del DCIE	132
C.2. PCB de la batería del DCIE	133
C.3. PCB del brazalete	134
C.4. PCB del Centro de carga	135
D. Planos de las carcasas	137
D.1. Carcasa del DCIE	138
D.2. Tapa de la carcasa del DCIE	139
D.3. Bisagra derecha 1	140
D.4. Bisagra derecha 2	141
D.5. Varilla derecha	142
D.6. Soporte del DCIE para la nariz	143
D.7. Soporte del DCIE para lentes	144
D.8. Ensamble del DCIE	145
D.9. Carcasa de la batería del DCIE	146
D.10. Tapa de carcasa de la batería del DCIE	147
D.11. Carcasa de brazalete	148
D.12. Tapa de carcasa de brazalete	149
D.13. Carcasa del cargador	150
D.14. Tapa de la carcasa del cargador	151
E. Cuestionario sobre experiencia de uso del EAM	153

Índice de figuras

1.1.	Perro guía de raza Labrador [11].	17
1.2.	<i>GuideCane</i> [12].	18
1.3.	Bastón blanco [13].	19
1.4.	Bastón inteligente [15].	20
1.5.	Equipo de asistencia para movilidad <i>wearable</i> [19].	21
1.6.	Equipo de asistencia para movilidad basado en visión por computadora [20].	21
1.7.	Detección del punto de fuga de una escena [21].	22
1.8.	Equipo de asistencia para movilidad con retroalimentación auditiva [24].	22
1.9.	Dispositivo de retroalimentación háptica [23].	23
1.10.	Componentes de un equipo de asistencia basado en visión estéreo [20].	23
1.11.	Geometría del sistema de visión estéreo.	26
1.12.	Definición del sistema de referencia de las imágenes.	27
2.1.	Representación de <i>caja negra</i> de un equipo de asistencia para movilidad para personas con debilidad visual.	32
2.2.	Diagrama funcional de un equipo de asistencia para movilidad para personas con debilidad visual.	33
3.1.	Diagrama de conexiones del DCIE.	46
3.2.	Carcasas del DCIE.	49
4.1.	Estructura del paquete de datos enviado por la cámara izquierda.	53
4.2.	Estructura del paquete de datos enviado por la cámara derecha.	53
4.3.	Patrón de calibración para el sistema de cámaras estéreo.	55
4.4.	Corrección de distorsión y rectificación de un par de imágenes estéreo.	56
4.5.	Difuminado de una imagen con diferentes filtros.	57
4.6.	Efecto del parámetro γ en la corrección de la iluminación de una imagen. [43]	58
4.7.	Balanceo de la iluminación de una imagen empleando corrección gamma.	59
4.8.	Análisis de dos escenas con diferente <i>nivel de textura</i>	60
4.9.	Ejemplo de disparidad.	61
4.10.	Procesamiento del mapa de disparidad obtenido con SGBM.	62
4.11.	Efecto del parámetro <i>numDisparities</i> en la distancia mínima detectada.	63
4.12.	Mapas de disparidad complementarios.	64
4.13.	Sistemas de referencia.	65
4.14.	Filtrado de la información de profundidad obtenida con SGBM.	65
4.15.	Nube de puntos para la búsqueda de obstáculos.	68
4.16.	Discretización de la nube de puntos para el análisis sin desplazamiento.	68
4.17.	Selección del obstáculo principal en el análisis sin desplazamiento.	69

4.18. Región de análisis para el modo escáner.	71
4.19. Obstáculo principal en el modo escáner.	71
4.20. Discretización de la nube de puntos para el análisis en movimiento.	73
4.21. Estimación de la ubicación de una pared detectada.	73
4.22. Detección de obstáculos de interés.	74
4.23. Estimación de la posición de los obstáculos de interés detectados.	74
4.24. Representación gráfica del valor de importancia relativa.	75
5.1. Módulo de vibración.	78
5.2. Comparación de los microcontroladores ATtiny85 y ATmega328P.	79
5.3. Batería seleccionada para los brazaletes.	79
5.4. Diagrama de conexiones de los brazaletes.	80
5.5. Carcasas de los brazaletes.	82
5.6. Primer prototipo de los brazaletes.	82
5.7. Diagrama de conexiones del Centro de Carga.	85
5.8. Conexión de los brazaletes y la batería del DCIE al Centro de Carga.	86
6.1. Información de profundidad obtenida en entornos con luz natural.	88
6.2. Información de profundidad obtenida en entornos con sombra.	90
6.3. Información de profundidad obtenida en entornos con luz artificial.	91
6.4. Información de profundidad obtenida de noche en entornos con luz artificial.	93
6.5. Información de profundidad obtenida con imágenes capturadas a contraluz.	94
6.6. Información de profundidad obtenida con imágenes que presentan desbalance en la iluminación.	94
6.7. Detección de obstáculos en el modo global.	95
6.8. Imagen panorámica de un espacio de evaluación para el modo escáner.	96
6.9. Detección de obstáculos en el modo escáner.	97
6.10. Detección de obstáculos al frente.	98
6.11. Detección de paredes.	100
6.12. Seguimiento de obstáculos.	101
6.13. Detección de obstáculos en movimiento.	104
7.1. Espacio de pruebas.	106
7.2. Evaluación del modo escáner.	107
7.3. Evaluación del modo global.	107
7.4. Evaluación del análisis en movimiento.	108

Índice de tablas

2.1.	Jerarquía de necesidades e importancia relativa.	30
2.2.	Necesidades y especificaciones.	31
2.3.	Tabla de combinación de conceptos para el equipo de asistencia para movilidad.	34
2.4.	Tabla de combinación de conceptos simplificada.	35
2.5.	Tabla de conceptos.	35
2.6.	Matriz de filtrado.	37
2.7.	Tabla de calificación de desempeño relativo. [30]	38
2.8.	Matriz de evaluación.	39
3.1.	Cámaras [32].	42
3.2.	Módulos IMU [33][32].	43
3.3.	Elevadores de voltaje [32].	44
5.1.	Módulos Bluetooth [32].	78
5.2.	Módulos cargadores de baterías [32].	83
A.1.	Lista de precios.	117

Lista de abreviaturas

EAM	Equipo de Asistencia para Movilidad	11
DCIE	Dispositivo para Captura de Imágenes Estéreo	11
OMS	Organización Mundial de la Salud	16
CNDH	Comisión Nacional de los Derechos Humanos	16
GPS	Global Positioning System	19
Li-Ion	Lithium-Ion	34
Li-Po	Lithium Polymer	34
IMU	Inertial Measurement Unit	34
IA	Inteligencia Artificial	34
Wi-Fi	Wireless Fidelity	41
MXN	Peso Mexicano	42
microSD	micro Secure Digital	42
LED	Light-Emitting Diode	42
I²C	(I ² C) Inter-Integrated Circuit	43
ADC	Analog-to-Digital Converter	44
GPIO	General Purpose Input/Output	45
DC	Direct Current	45
IDE	Integrated Development Environment	47
TCP	Transmission Control Protocol	47
PLA	Polylactic Acid	49
CAD	Computer-Aided Design	49
STL	Stereolithography	49
RAM	Random Access Memory	51
OpenCV	Open Source Computer Vision Library	51
P2P	Peer-to-peer	51
BLE	Bluetooth Low Energy	52
GATT	Generic Attribute Profile	52
ATT	Attribute Protocol	52
UUID	Universally Unique Identifier	52
MAC	Media Access Control	52
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol	52
IP	Internet Protocol address	52
JPEG	Joint Photographic Experts Group	52
QQVGA	Quarter-Quarter Video Graphics Array	54
RGB	Red, Green, Blue	54

BM	Block Matching	61
SGM	Semi-Global Matching	61
SGBM	Semi-Global Block Matching	61
WLS	Weighted Least Squares	62
ERM	Eccentric Rotating Mass	77
PWM	Pulse-Width Modulation	77
EDR	Enhanced Data Rate	78
USB	Universal Serial Bus	82
MOSFET	Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor	84
AWG	American Wire Gauge	117
BJT	Bipolar Junction Transistor	117
PCB	Printed Circuit Board	117

Introducción

Todos los seres humanos tenemos características y capacidades físicas diferentes. Las personas que tienen una capacidad visual limitada, en especial cuando tienen ceguera, frecuentemente se enfrentan a diversos retos que dificultan la realización de sus actividades cotidianas. La limitación de acciones tan básicas como caminar por la vía pública o tomar el transporte correcto puede causar que las personas con debilidad visual no puedan realizar sus actividades con plena autonomía. En el caso de la movilidad, pueden enfrentar barreras físicas en su entorno que no les permitan desplazarse sin restricciones.

La tecnología de asistencia consiste en herramientas que permiten a las personas que tienen alguna limitación sensorial o funcional llevar a cabo actividades de la vida diaria con mayor independencia. Esto promueve su completa integración y participación en actividades sociales como la educación, el trabajo y el esparcimiento.

En el presente trabajo, con el objetivo de proporcionar a las personas con debilidad visual información relevante sobre su entorno que les ayude a tomar decisiones que faciliten su movilidad, se propone, desarrolla y evalúa un Equipo de Asistencia para Movilidad (EAM) que emplea técnicas de visión por computadora para determinar la presencia de obstáculos en el entorno y comunica la información al usuario mediante retroalimentación háptica.

En el primer capítulo de este trabajo se analiza el concepto de discapacidad visual desde una perspectiva social. Se comprende la importancia que tiene la autonomía en la movilidad de las personas con debilidad visual y se describe el estado del arte de la tecnología de asistencia desarrollada para este fin.

De acuerdo con las necesidades de movilidad identificadas en la investigación realizada, en el segundo capítulo se lleva a cabo un proceso de diseño en el cual se establecen requerimientos, se proponen diversas soluciones, se generan conceptos y se selecciona uno de ellos para proceder con su desarrollo y evaluación.

En los capítulos 3 a 5 se describe el proceso de desarrollo y los principios de funcionamiento de los elementos que componen el EAM. El capítulo 3 se enfoca en el desarrollo de un Dispositivo para Captura de Imágenes Estéreo (DCIE) que permita obtener información del entorno para llevar a cabo análisis de profundidad mediante técnicas de visión estéreo. En el cuarto capítulo se describen los diferentes procedimientos y algoritmos implementados en una aplicación móvil desarrollada para dispositivos con sistema operativo Android que se encarga de realizar el análisis estéreo, llevar a cabo la búsqueda de obstáculos y determinar la información de retroalimentación al usuario. El quinto capítulo describe el desarrollo de un par de brazaletes que comunican al usuario la información determinada por la aplicación móvil a través del cambio en la intensidad y la distribución de la vibración producida en cada uno de ellos.

Después de realizar la construcción de un prototipo del EAM, en el sexto capítulo se llevan a cabo diversas pruebas de funcionamiento de los algoritmos de detección de obstáculos implementados en la aplicación móvil y se evalúa su desempeño en diferentes entornos y condiciones de iluminación.

Finalmente, en el séptimo capítulo se describen los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento del EAM realizadas con la participación de usuarios y se describe la experiencia de uso que las personas tuvieron con el Equipo. De acuerdo con los resultados obtenidos, se determina si se cumplieron los objetivos establecidos para el proyecto y se identifican posibles oportunidades de mejora para el EAM propuesto.

Objetivos

Objetivo principal

- Diseñar, construir y evaluar el funcionamiento de un prototipo de Equipo de Asistencia para Movilidad para personas con debilidad visual.

Objetivos específicos

- Verificar el correcto funcionamiento del algoritmo de detección de obstáculos desarrollado.
- Comprobar que el algoritmo de detección de obstáculos puede ser ejecutado en tiempo real en un dispositivo móvil.
- Comprobar que la retroalimentación proporcionada mediante vibración en brazaletes ayuda al usuario a tomar decisiones que facilitan su movilidad.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1. Discapacidad visual y tecnología de asistencia

1.1.1. Modelos de discapacidad

La manera en que entendemos o definimos la discapacidad de una persona está relacionada con el enfoque que empleemos para describir su situación. Los modelos de discapacidad son, básicamente, diferentes formas de determinar por qué a una persona se le considera discapacitada y qué acciones se toman respecto a esa condición.

Aunque pueden existir múltiples enfoques al tratar de analizar el estado de discapacidad de una persona, hay tres modelos que se distinguen por mostrar características propias de los periodos históricos en los que se han empleado. Estos modelos son; el modelo de la prescindencia, asociado a la Antigüedad y la Edad Media; el modelo médico o de rehabilitación, empleado en la primera mitad del siglo XX; y el modelo social, nacido alrededor de la década de 1960. [1]

Modelo de prescindencia

El modelo de prescindencia explica las causas de la discapacidad de una persona a partir de razones de origen religioso. Bajo este modelo, la persona discapacitada era considerada como una carga ya que no contribuía a las necesidades de su comunidad, por lo que era sujeta a prácticas eugenésicas (culturas griega y romana) o sufría de marginación (Edad Media). [2]

Modelo médico

El modelo médico emplea una visión científica para definir y tratar la condición de discapacidad de una persona. El modelo considera que la discapacidad es un problema del individuo, producto de su condición de salud. Esta condición puede ser afectada por enfermedades, accidentes o alteraciones en las funciones fisiológicas o estructuras anatómicas del cuerpo. [3]

Con el modelo médico, el tratamiento de la discapacidad tiene como objetivo curar a la persona o rehabilitarla de tal manera que pueda ser reincorporada a la sociedad. Aunque para lograr esto, las personas discapacitadas pueden requerir tratamiento en instituciones especializadas llevando así nuevamente a condiciones de marginación. [1]

Modelo social

El modelo social descarta las razones religiosas y científicas como causas de la discapacidad de una persona. Las principales ideas del modelo explican que las causas por las que una persona es discapacitada no están relacionadas con las limitaciones del individuo, sino con las limitaciones que la organización social y el entorno presentan al momento de cubrir las necesidades de todas las personas de la comunidad. En este modelo se plantea que las personas discapacitadas tienen la posibilidad de contribuir a la comunidad en la misma medida que lo harían las personas sin discapacidad, lo cual estará estrechamente relacionado con el grado de inclusión que la sociedad sea capaz de adoptar. [4]

Dado que el modelo social descarta la discapacidad como un problema individual, plantea soluciones que involucran a la sociedad. Estas acciones están estrechamente relacionadas con los Derechos Humanos ya que, considerando la dignidad humana, buscan la igualdad de oportunidades, la inclusión en la mayor cantidad de actividades sociales y el derecho a la accesibilidad para todas las personas sin importar limitaciones en su condición física o de salud.

1.1.2. Debilidad visual

La debilidad visual es una condición de salud que limita la capacidad visual de una persona al presentarse alguno de los siguientes problemas visuales: la ceguera y la baja visión. La ceguera involucra una pérdida prácticamente total de la capacidad de percepción visual, mientras que la baja visión es un estado en el que la capacidad visual de una persona se ve afectada en diferentes niveles limitando la capacidad de percibir correctamente, por ejemplo, el color, la forma o el tamaño de los objetos. [5]

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), hasta octubre de 2022, aproximadamente 1000 millones de personas en todo el mundo padecían de ceguera o de algún tipo de deterioro moderado o grave de la visión distante. La prevalencia de problemas visuales en la población frecuentemente es mayor en regiones de bajos recursos y está relacionada principalmente con la poca disponibilidad de servicios médicos adecuados o de personal capacitado para el oportuno tratamiento de los padecimientos. [6]

1.1.3. Discapacidad visual y accesibilidad

El Derecho Humano a la accesibilidad, como lo define la Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH), toma en cuenta la dignidad y diversidad del ser humano e indica que las personas con algún tipo de *discapacidad* (limitación funcional) tienen el derecho humano a disfrutar de igualdad de condiciones en el acceso al espacio público, a la información y a las comunicaciones con el fin de que puedan participar de manera autónoma e independiente en todos los ámbitos sociales de la vida. [7]

De acuerdo con el modelo social y de Derechos Humanos, una persona con debilidad visual puede padecer de discapacidad cuando el entorno y la sociedad en la que se desarrolla no le permiten gozar de las mismas oportunidades y facilidades que personas sin problemas de visión podrían tener.

El Derecho a la accesibilidad ha tomado cada vez más relevancia en las políticas públicas ya que es posible observar el incremento en la implementación de infraestructura y tecnología que facilita la movilidad de personas con alguna limitación funcional. De manera específica, las guías táctiles en el suelo, las placas de información en sistema Braille o las indicaciones auditivas en

medios de transporte son elementos que pueden mejorar la movilidad de personas con debilidad visual en la vía pública.

A pesar de los avances en esta materia, muchas veces la disponibilidad e implementación de este tipo de infraestructura se encuentra limitada a grandes centros urbanos y en ocasiones puede no estar disponible de manera integral. Además, algunas conductas de la sociedad como obstruir las banquetas, pararse sobre las señalizaciones táctiles en el suelo o negar el acceso con perros guía [8], limitan aún más la movilidad de las personas con debilidad visual, por lo que no pueden desplazarse de manera libre y autónoma completamente, previniéndolas así de integrarse y participar sin restricciones en actividades sociales.

Esta disparidad de condiciones en el acceso a lugares públicos lleva a las personas con discapacidad visual a desarrollar métodos y estrategias apoyándose de los sentidos del tacto, oído u olfato, así como de la memoria, para facilitar su movilidad y compensar las barreras físicas a las que se enfrentan en el espacio público. [9]

1.1.4. Tecnología de asistencia para movilidad

Tomando como referencia nuevamente el modelo social de discapacidad, la tecnología de asistencia consiste en equipamiento, dispositivos y sistemas que pueden ser empleados por personas con discapacidad para hacer frente y superar las barreras físicas, de infraestructura o sociales que no les permiten integrarse y participar de forma equitativa en la sociedad. [10]

A continuación, en el estado del arte presentado se describirán los principales enfoques empleados en el desarrollo de tecnología de asistencia para movilidad de personas con debilidad visual y se presentarán algunos ejemplos.

Perros guía

Los perros guía (Fig. 1.1) son una opción de movilidad surgida en Austria que se ha empleado aproximadamente desde la década de 1920 [10]. Son entrenados profesionalmente para asistir principalmente a personas con ceguera al desplazarse proporcionando movilidad y libertad. Los perros guía pueden ser tan buenos y eficientes asistiendo a una persona con debilidad visual como lo haría una persona con vista.



Figura 1.1: Perro guía de raza Labrador [11].

La razas más comunes de perros guía son Labrador retriever, Golden retriever y Pastor alemán. Los perros de estas razas son seleccionados debido a su obediencia, inteligencia, valentía, confianza y amistad con los humanos. El entrenamiento de los perros guía les permite conducir a su acompañante por espacios públicos evitando obstáculos, encontrando puertas y escaleras, subiendo al transporte público y encontrando asientos [11]. La inteligencia de los perros guía también les permite aprender las rutas utilizadas frecuentemente o disminuir la velocidad cuando camina sobre superficies peligrosas, así como responder a órdenes.

El empleo de un perro guía como opción de movilidad depende frecuentemente de la disposición y capacidad de la persona a dar cuidado, aseo y alimentación a otro ser vivo. La manutención de un perro guía puede requerir de diversos gastos económicos, afortunadamente existen organizaciones que ayudan a las personas con debilidad visual a solventar dichos gastos por medio de donaciones y contribuciones.

Dispositivos guía

Este tipo de dispositivos cumplen la función de guiar a la persona con debilidad visual por caminos libres de obstáculos, similar a como lo haría un perro guía. El *GuideCane* [12] desarrollado por Borenstein y Ulrich (Fig. 1.2) es un ejemplo de este tipo de dispositivos.



Figura 1.2: *GuideCane* [12].

Los dispositivos guía son equipos que se apoyan en el suelo sobre unas pequeñas ruedas. El usuario avanza con el dispositivo empujándolo, generalmente a través de un bastón acoplado a la base móvil. La base del dispositivo cuenta con sensores que detectan la ubicación de obstáculos, de manera que si el dispositivo detecta que el usuario se acerca hacia algún objeto el controlador planea una ruta para rodear el obstáculo y manda esa señal de control a las ruedas. El usuario sigue la trayectoria libre de obstáculos que planeó el dispositivo guía a través de la información del movimiento de la base del bastón.

Bastón largo

Durante mucho tiempo, las personas con debilidad visual se han apoyado de diferentes tipos de bastones para tratar de reconocer algunas de las características de su entorno cuando se desplazan. El bastón largo (Fig. 1.3) es un dispositivo de asistencia frecuentemente usado ya que permite al usuario obtener información muy útil sobre las características del suelo y del entorno frente a él, además de que es un dispositivo fácil de usar, resistente a las condiciones de uso y no requiere de mantenimiento frecuente o complejo [10].



Figura 1.3: Bastón blanco [13].

El bastón largo es un tipo de bastón de asistencia para movilidad que podría considerarse como estándar ya que posee ciertas características que son reconocidas en prácticamente todo el mundo. El rasgo distintivo más notable es el color; el color blanco es usado por personas con ceguera, mientras que en algunos lugares el color verde es usado por personas con baja visión. La longitud del bastón normalmente comprende la distancia desde el suelo hasta la altura del pecho de la persona, la estructura puede doblarse en varias secciones para facilitar su traslado. La base del bastón puede disponer de una pequeña esfera que facilite su desplazamiento por el suelo.

El bastón blanco (bastón largo) es útil en muchas situaciones ya que, al proporcionar una extensión del sentido del tacto, permite al usuario saber si frente a él existen cambios en el suelo como desniveles o escalones. La vibración que se puede transmitir a través del cuerpo del bastón y los sonidos que este produce al recorrer el suelo también proporcionan información importante al usuario sobre las características y el estado del suelo sobre el cual camina. Además, esta información auditiva y táctil puede ayudar a la persona a recordar lugares o trayectorias.

Dado que el bastón blanco está constantemente en contacto con el suelo (o cerca de él), objetos que se encuentren a un nivel por encima de la cadera de la persona pueden pasar desapercibidos lo cual puede provocar que el usuario choque con ellos, ejemplo de estos obstáculos pueden ser ramas de árboles pequeños o de arbustos. En algunos casos, el constante balanceo de un lado al otro del bastón que se requiere para escanear el camino al frente puede provocar cansancio a la persona, especialmente si el suelo no permite que el bastón se deslice libremente, provocando que el usuario tenga que elevar el bastón un poco y realice toques en el suelo en diferentes puntos del balanceo.

Bastones inteligentes

Los bastones inteligentes son dispositivos de asistencia para movilidad que tienen como objetivo ampliar la capacidad de detección de obstáculos de un bastón blanco al integrar diferentes tipos de sensores de distancia, de esta manera el usuario está consciente de la presencia de algún objeto en su camino antes de que pueda detectarlo con el bastón. En ocasiones, estos dispositivos también pueden realizar llamadas de emergencia [14] u obtener información de su ubicación por medio de GPS para guiar al usuario a su destino [15].

Algunos de los sensores de distancia empleados con más frecuencia en los bastones inteligentes son los del tipo ultrasónico, ejemplos del uso de este tipo de dispositivos se pueden observar en los bastones inteligentes propuestos por Khan et al. [15] (Fig. 1.4) y Sujatha Kumari et al. [16]. Otros bastones, como el desarrollado por Rahman et al. [17], emplean métodos basados en triangulación

empleando luz láser para llevar a cabo la detección de objetos. La cantidad y arreglo de los sensores dependerá del rango espacial que se desea cubrir, la configuración más sencilla consiste en un solo sensor dirigido hacia el frente. En cualquier caso, los sensores permitirán detectar la presencia de un objeto cercano a la persona y, de acuerdo a su distancia, la unidad de procesamiento generará algún tipo de alerta. Por lo general, la retroalimentación al usuario es háptica o auditiva.

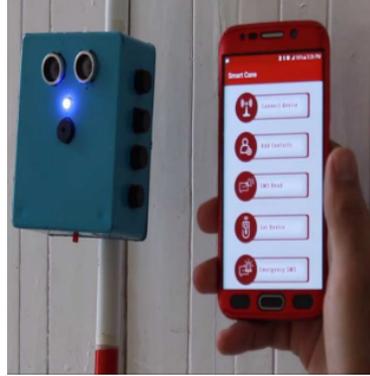


Figura 1.4: Bastón inteligente [15].

La retroalimentación háptica se lleva a cabo a través de vibración. Cuando el dispositivo de asistencia detecta la presencia de algún obstáculo genera una señal de vibración que el usuario puede sentir a través del mango del bastón. La información sobre la distancia estimada del obstáculo encontrado puede ser interpretada de acuerdo a la intensidad de la vibración o de patrones específicos. Cuando la retroalimentación se lleva a cabo de manera auditiva el dispositivo puede generar tonos de alerta o incluso proporcionar indicaciones exactas sobre la ubicación y distancia del obstáculo detectado a través de audífonos.

Dispositivos de asistencia *wearables*

La tecnología *wearable* o tecnología vestible consiste en dispositivos que pueden ser usados como parte de la vestimenta, normalmente en forma de accesorios. Estos dispositivos, al estar en constante interacción con el usuario, pueden recopilar información de la persona que los usa y su entorno para llevar a cabo sus funciones, esta información puede incluir la ubicación, el estado de movimiento, la temperatura o el ritmo cardiaco del usuario, por mencionar algunos. Esta información permite a los dispositivos *wearables* realizar tareas enfocadas al usuario como supervisar su estado de salud, monitorear su actividad física o simplemente ser una extensión de su teléfono inteligente [18].

La constante evolución tecnológica ha permitido el desarrollo de sensores y actuadores cada vez más pequeños, de manera que es posible integrar este tipo de componentes electrónicos en dispositivos *wearables*. Los equipos de asistencia para movilidad que incorporan tecnología *wearable* pueden aprovechar el hecho de que el usuario los puede vestir de manera poco intrusiva para proporcionar una experiencia más cómoda. De esta manera, la información requerida por los dispositivos de asistencia puede ser obtenida con poco o nulo trabajo hecho por el usuario, además de que la retroalimentación puede proporcionarse por los mismos dispositivos.

Un ejemplo de un dispositivo de asistencia que emplea tecnología *wearable* es el sistema propuesto por Katschmann et al. [19] (Fig. 1.5). En este sistema se emplean sensores de distancia infrarrojos tipo tiempo de vuelo colocados en un cinturón, los sensores están dispuestos en un arreglo que permite la detección de objetos en diferentes direcciones hacia el frente de la persona.

La retroalimentación en este equipo se lleva a cabo a través de una cinta colocada alrededor de la parte alta del abdomen. Esta cinta tiene un arreglo de motores que vibran los cuales proporcionan retroalimentación háptica al usuario. La ubicación y naturaleza de los obstáculos detectados se comunican mediante patrones de vibración y cambios en la intensidad y frecuencia de la misma.

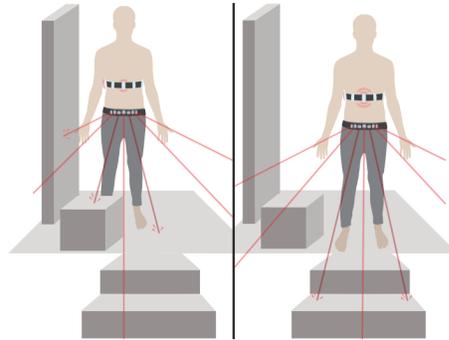


Figura 1.5: Equipo de asistencia para movilidad *wearable* [19].

Asistencia basada en visión por computadora

La visión por computadora consiste en el análisis de imágenes para obtener información que nos permita tomar una decisión. En el campo de los dispositivos de asistencia para movilidad de personas con debilidad visual, la visión por computadora ha tomado cada vez más relevancia ya que la información del entorno que se puede obtener permite no solo saber la presencia de obstáculos frente a la persona, sino también el tipo de obstáculo y su ubicación. Además, es posible tomar en cuenta más información del entorno para proporcionar al usuario una descripción más completa del espacio en el que se encuentra.

La capacidad de *observar* la escena frente al usuario abre la posibilidad de desarrollar más técnicas para asistir a una persona con debilidad visual. El uso de inteligencia artificial y el análisis de datos para la búsqueda de objetos en imágenes puede ayudar a que en lugar de evitar un objeto, el usuario sea dirigido hacia él. Por ejemplo, Wang et al. [20] presentan un equipo de asistencia que, entre otras cosas, es capaz de detectar sillas en el entorno y proporcionar al usuario retroalimentación para dirigirlo hacia ellas (Fig. 1.6). Esta característica puede ser de utilidad para guiar al usuario hacia objetos de uso frecuente en la vida diaria como lo son puertas o asientos.



Figura 1.6: Equipo de asistencia para movilidad basado en visión por computadora [20].

Con otro enfoque en la movilidad, Marzullo et al. [21] propusieron un algoritmo que analiza imágenes de interiores en búsqueda de líneas o características que permitan determinar lo que en dibujo técnico se llama *punto de fuga* (Fig. 1.7). Con esta información, la manera de guiar a una persona consiste en dirigirla en la dirección del punto detectado. El algoritmo propuesto también es capaz de detectar estructuras de interés como lo son el suelo, paredes o puertas.

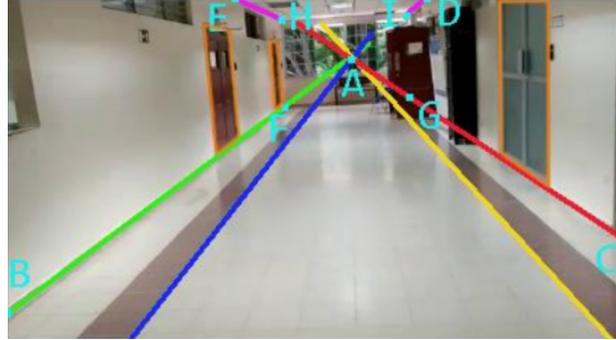


Figura 1.7: Detección del punto de fuga de una escena [21].

La detección y evasión de obstáculos es una característica muy importante para la movilidad de las personas con debilidad visual. El enfoque de visión por computadora permite llevar a cabo esta tarea empleando sistemas de cámaras estéreo con los cuales se puede obtener información de profundidad de las escenas capturadas. Los equipos de asistencia desarrollados por Caraiman et al. [22] y Barontini et al. [23] son ejemplos de dispositivos que usan esta tecnología.

Algunos equipos de asistencia proporcionan retroalimentación al usuario de forma auditiva. Este enfoque no necesariamente implica la comunicación verbal de una advertencia, también puede llevarse a cabo a través de la generación de sonidos en diferentes frecuencias o intensidades. Simões et al. [24] propusieron un método basado en sonido para indicar la ubicación espacial aproximada de algún obstáculo detectado, el método consiste en la generación de las notas musicales La y Do en diferentes octavas y canales de audio (izquierdo, derecho, centro) para indicar la región del espacio estimada donde se encuentra un obstáculo (Fig. 1.8).

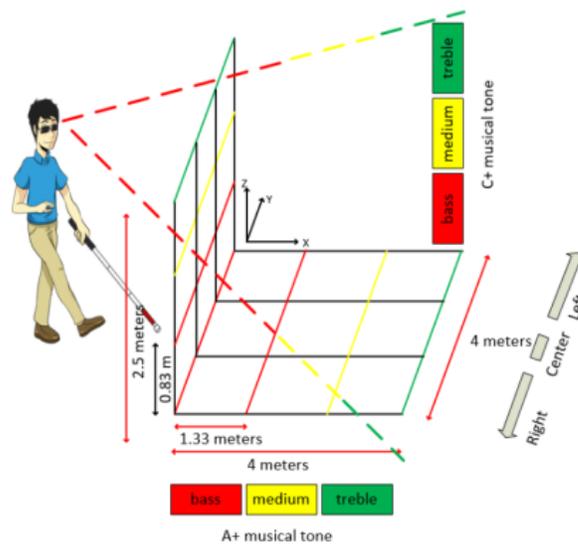


Figura 1.8: Equipo de asistencia para movilidad con retroalimentación auditiva [24].

La retroalimentación háptica es frecuentemente empleada en los equipos de asistencia basados en visión por computadora. En el equipo desarrollado por Barontini et al. [23], la retroalimentación al usuario se lleva a cabo empleando un dispositivo que se coloca alrededor del brazo (Fig. 1.9). El dispositivo consta de una banda que puede ser ajustada o desplazada alrededor del brazo a través de dos motores. La motivación del uso de este aparato consiste en simular la asistencia de una persona guía a través de los gestos que el dispositivo puede realizar, los cuales consisten en soltar o apretar la banda para indicar si es o no seguro avanzar, o desplazar la banda en una dirección para indicar un giro.

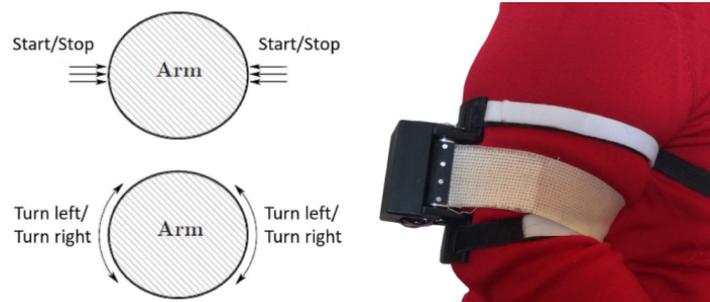


Figura 1.9: Dispositivo de retroalimentación háptica [23].

El equipo de asistencia propuesto por Wang et al. [20] emplea retroalimentación háptica. Este equipo dispone de un cinturón con diferentes motores que vibran dispuestos alrededor del frente de la cintura para indicar la dirección en la que se encuentra algún objeto de interés. Este mismo equipo presenta como alternativa de retroalimentación una pequeña pantalla Braille actualizable que le proporciona al usuario información sobre la ubicación de obstáculos (Fig. 1.10).

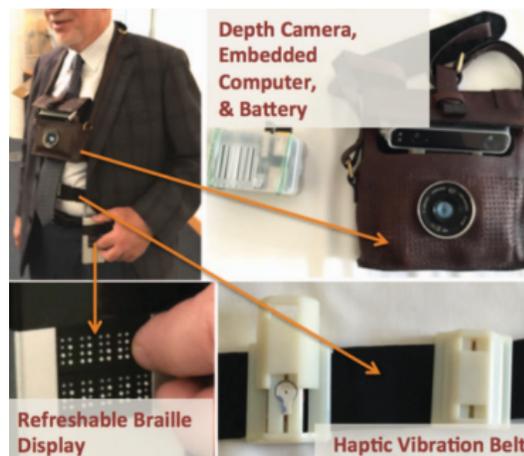


Figura 1.10: Componentes de un equipo de asistencia basado en visión estéreo [20].

Dado que la capacidad de cómputo requerida para llevar a cabo tareas de procesamiento de imágenes es elevada, los dispositivos de asistencia basados en visión por computadora frecuentemente requieren de unidades de cómputo y fuentes de energía voluminosas, lo cual puede ser una limitación en cuanto a portabilidad. Afortunadamente, el constante desarrollo tecnológico nos permite disponer de computadoras más pequeñas con procesadores cada vez más rápidos y baterías con mayor capacidad de almacenamiento de energía, lo cual abre la posibilidad de continuar el desarrollo de dispositivos de asistencia basados en visión por computadora.

1.2. Visión por computadora

La visión por computadora o visión artificial es una disciplina científica que consiste en el procesamiento, análisis y transformación de imágenes con el fin de obtener información o nuevas representaciones que nos permitan tomar una decisión de acuerdo con un objetivo definido [25].

Para la mayoría de los seres humanos, la visión es un proceso que se lleva a cabo casi de forma automática. Sin embargo, la interpretación de la información en imágenes puede llegar a ser una tarea bastante compleja para una computadora. Por esta razón, cuando se emplean métodos de visión artificial para llevar a cabo una tarea es necesario tomar en cuenta la mayor cantidad de información contextual disponible para simplificar el problema que intentamos resolver. Esto incluye, por ejemplo, considerar las características de la cámara, el entorno donde se lleva a cabo la captura de imágenes o el comportamiento de los elementos en la escena.

1.2.1. Aplicaciones

Algunas de las aplicaciones más comunes de la visión por computadora se muestran a continuación [26].

- **Reconocimiento de caracteres.** La detección de caracteres hace posible obtener texto disponible en imágenes.
- **Reconocimiento y seguimiento de objetos.** Es posible encontrar objetos con características específicas y rastrearlos a través de una secuencia de imágenes.
- **Captura de movimiento.** Técnica empleada para registrar el movimiento del cuerpo de una persona para crear animaciones por computadora.
- **Vigilancia.** Es posible analizar imágenes para detectar movimiento o contar el paso de personas o autos por una zona.
- **Estabilización de video.** Reducción del efecto de sacudida en una secuencia de imágenes a causa del movimiento de la cámara.
- **Construcción 3D.** Es posible crear modelos 3D de objetos a través de la captura de imágenes desde diferentes perspectivas.
- **Biometría.** Reconocimiento facial o dactilar para llevar a cabo procesos de autenticación.
- **Diagnósticos médicos.** El análisis de patrones en imágenes médicas puede ayudar a diagnosticar enfermedades.

1.2.2. Biblioteca OpenCV

OpenCV es una biblioteca para visión por computadora de código abierto creada en 1999 por Gary Bradsky dentro de Intel Corporation. La biblioteca tiene como propósito proporcionar las herramientas básicas necesarias para dar solución a problemas de visión por computadora. [25]

OpenCV proporciona una gran variedad de algoritmos y funciones para llevar a cabo procesamiento y análisis de imágenes. Esta diversidad de herramientas da a la comunidad de usuarios de esta biblioteca la oportunidad de crear sus propias soluciones a los problemas de visión por computadora a los que se enfrentan. Esto hace de OpenCV una herramienta muy útil cuando se desarrollan aplicaciones en el campo de la visión por computadora.

1.2.3. Visión estéreo

En el campo de la visión por computadora, la visión estéreo es una técnica que permite obtener información de la ubicación tridimensional de puntos observados desde dos perspectivas diferentes a partir de las correspondencias de estos puntos en las imágenes y la disposición geométrica entre las cámaras. Este proceso consta de una serie de cuatro pasos básicos [25]:

1. Remover la distorsión radial y tangencial de las imágenes causada por los lentes de las cámaras.
2. Rectificar las imágenes tomando en cuenta la disposición geométrica en que se encuentran las cámaras, de manera que las dos imágenes capturadas sean coplanares y las filas correspondientes de las imágenes sean colineares.
3. Encontrar las mismas características en ambas imágenes y calcular la disparidad entre ellas.
4. A partir del arreglo geométrico de las cámaras y de la disparidad entre las imágenes, reproyectar los puntos 2D a coordenadas tridimensionales por medio de triangulación.

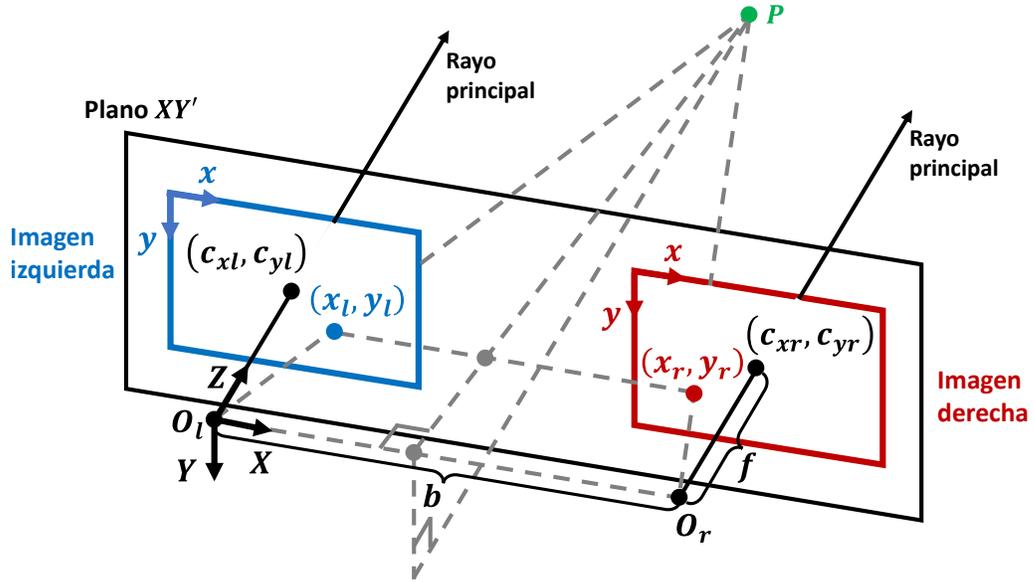
Geometría

En la Figura 1.11 se muestra la disposición geométrica de un sistema de visión estéreo horizontal. En esta representación se describe la relación geométrica que tiene la ubicación de un punto en el espacio con su proyección sobre las imágenes capturadas respecto a un sistema de referencia fijo sobre una de las cámaras.

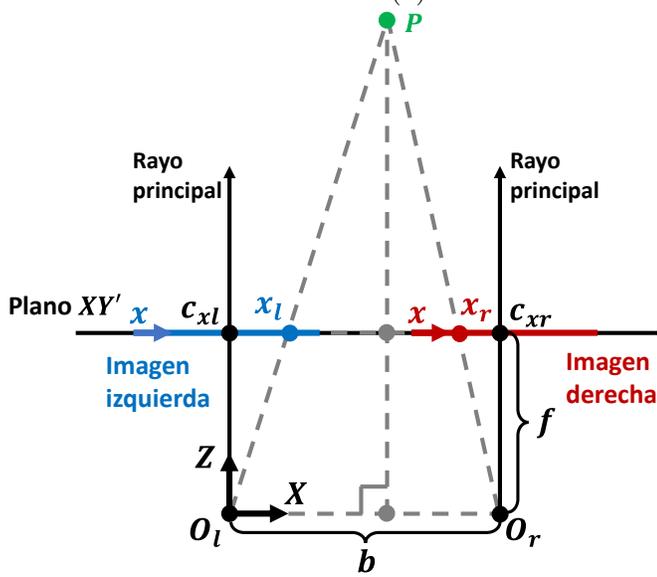
El origen del sistema de referencia empleado se encuentra ubicado sobre la cámara izquierda en el punto O_l . El eje Z sigue la dirección hacia la cual la cámara apunta (hacia el frente). El eje X tiene una dirección horizontal de izquierda a derecha, mientras que el eje Y sigue una dirección vertical de arriba hacia abajo. La definición de los ejes X y Y del sistema de referencia se selecciona de esta manera para que puedan utilizarse coordenadas similares al indicar puntos en las imágenes capturadas. La cámara derecha está situada en el punto O_r , el cual se encuentra a una distancia de base b a lo largo del eje X desde el origen del sistema de referencia, la cámara derecha apunta en la misma dirección que la cámara izquierda.

Las imágenes capturadas por las cámaras son representadas como regiones rectangulares de un plano XY' que se encuentra a una distancia focal f a lo largo del eje Z desde el plano XY' del sistema de referencia. Los puntos (c_{xl}, c_{yl}) y (c_{xr}, c_{yr}) indican la intersección con el plano XY' de los rayos principales de las cámaras, estos puntos se encuentran prácticamente en el centro de las imágenes. Para describir coordenadas de puntos (píxeles) de las imágenes se emplean sistemas de referencia ubicados en la esquina superior izquierda de las imágenes. Los ejes x y y de estos sistemas tienen la misma dirección que los ejes correspondientes X y Y definidos en el sistema de referencia del sistema estéreo (Fig. 1.12). Con el fin de facilitar el proceso de análisis estéreo se considera que cada píxel en las imágenes tiene el área de una unidad cuadrada. De esta manera, si empleamos milímetros como unidad de medida en el sistema estéreo y capturamos imágenes con una resolución de 160 x 120 píxeles, las regiones rectangulares en el plano XY' que representan las imágenes capturadas tendrán una dimensión de 160 x 120 milímetros.

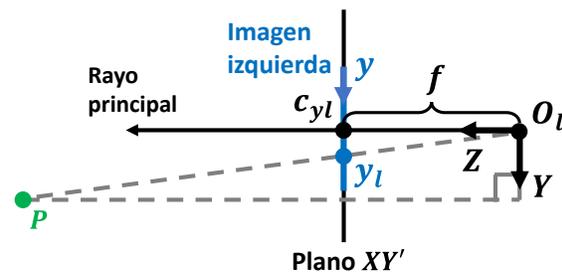
Si dibujamos líneas rectas desde los puntos O_l y O_r hacia un punto en el espacio P que pueda ser visto desde las dos cámaras, ambas líneas intersecarán el plano XY' dentro de las regiones establecidas para cada imagen. Estas intersecciones estarán definidas por los puntos (x_l, y_l) y (x_r, y_r) en el sistema de referencia de la imagen correspondiente.



(a) Geometría del sistema de visión estéreo.



(b) Vista superior.



(c) Vista lateral izquierda.

Figura 1.11: Geometría del sistema de visión estéreo.



Figura 1.12: Definición del sistema de referencia de las imágenes.

Cuando las imágenes no presenten ningún tipo de distorsión y estén perfectamente alineadas horizontalmente las coordenadas y_l y y_r tendrán el mismo valor para cualquier punto P . En el caso de las coordenadas x_l y x_r , de acuerdo con la disposición geométrica mostrada en la Figura 1.11, siempre se cumplirá que $x_l \geq x_r$. El caso $x_l = x_r$ solo se dará cuando la coordenada Z del punto P sea demasiado grande, teóricamente cuando $P_z \rightarrow \infty$.

La diferencia $d = x_l - x_r$ se conoce como disparidad y es un valor que, junto con las coordenadas (x_l, y_l) , (x_r, y_r) , (c_{xl}, c_{yl}) y (c_{xr}, c_{yr}) , nos permitirá determinar las coordenadas del punto P respecto al sistema de referencia ubicado en O_l . Por ejemplo, podemos obtener el valor de la coordenada z del punto P mediante la siguiente relación de triángulos semejantes que se puede obtener de la Figura 1.11b:

$$\frac{P_z - f}{b - (x_l - x_r)} = \frac{P_z}{b}$$

Tomando en cuenta la definición de disparidad $d = x_l - x_r$, desarrollamos y simplificamos:

$$\begin{aligned} \frac{P_z}{b - d} - \frac{f}{b - d} &= \frac{P_z}{b} \\ \frac{P_z}{b - d} - \frac{P_z}{b} &= \frac{f}{b - d} \\ P_z \left(\frac{1}{b - d} - \frac{1}{b} \right) &= \frac{f}{b - d} \\ P_z \left(\frac{b - (b - d)}{(b - d)b} \right) &= \frac{f}{b - d} \\ \frac{P_z d}{b} &= f \\ P_z &= \frac{bf}{d} \end{aligned} \tag{1.1}$$

De forma análoga, podemos obtener las ecuaciones que nos permiten calcular las coordenadas x y y del punto P :

$$P_x = \frac{b(x_l - c_{xl})}{d} \tag{1.2}$$

$$P_y = \frac{b(y_l - c_{yl})}{d} \tag{1.3}$$

1.3. Cuaterniones

Los equipos de asistencia que basan su funcionamiento en la búsqueda de objetos a partir de una nube de puntos generada mediante un análisis de visión estéreo normalmente acompañan el movimiento del usuario ya que el sistema de cámaras se apoya sobre el cuerpo de la persona. Si bien es posible encontrar obstáculos a partir de los puntos tridimensionales detectados respecto al sistema de referencia local del sistema de cámaras estéreo (ver Fig. 1.11), puede resultar de mayor interés para el usuario conocer la ubicación de los objetos detectados respecto a un sistema de referencia que indique direcciones más familiares (izquierda, derecha, adelante, atrás).

Una manera de transformar las coordenadas de los puntos detectados por el sistema estéreo a un nuevo sistema de referencia consiste en emplear matrices de rotación determinadas a partir de métodos de descripción de orientación como lo son los ángulos de Euler. Aunque este método suele ser sencillo, puede presentar problemas cuando ocurre una situación llamada *bloqueo de cardán*, la cual consiste en la pérdida de un grado de libertad cuando dos de los tres ejes de rotación se alinean [27]. Para prevenir esta limitación al realizar la transformación de coordenadas se puede recurrir al uso de cuaterniones.

Los cuaterniones son un sistema numérico que extiende el concepto de los números complejos a cuatro dimensiones. Una de las principales aplicaciones que tienen consiste en describir orientaciones en el espacio [28]. El concepto de cuaternión fue descrito por William Rowan Hamilton, un matemático irlandés, en 1843 tras idear la siguiente ecuación que después definiría la multiplicación de cuaterniones [29]:

$$\mathbf{i}^2 = \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = \mathbf{ijk} = -1 \quad (1.4)$$

1.3.1. Rotación de vectores

Es posible ver a un cuaternión \mathbf{q} como la representación de la orientación de un sistema de referencia local móvil respecto a un sistema de referencia global estático. De acuerdo con esta idea, si definimos un vector \mathbf{p} en el sistema de referencia local, podemos conocer las componentes \mathbf{p}' del mismo vector en el sistema de referencia global aplicando la siguiente operación de rotación:

$$\mathbf{p}' = \mathbf{qpq}^{-1} \quad (1.5)$$

La forma extendida de la Ecuación 1.5 es:

$$p'_x \mathbf{i} + p'_y \mathbf{j} + p'_z \mathbf{k} = (q_w + q_x \mathbf{i} + q_y \mathbf{j} + q_z \mathbf{k})(p_x \mathbf{i} + p_y \mathbf{j} + p_z \mathbf{k})(q_w - q_x \mathbf{i} - q_y \mathbf{j} - q_z \mathbf{k}) \quad (1.6)$$

Desarrollando la Ecuación 1.6, llevando a cabo los productos de acuerdo con la multiplicación de cuaterniones (Ecuación 1.4) y simplificando, obtenemos las componentes del vector \mathbf{p}' en el sistema de referencia global.

$$p'_x = (q_w^2 + q_x^2 - q_y^2 - q_z^2)p_x + (2q_x q_y - 2q_w q_z)p_y + (2q_w q_y + 2q_x q_z)p_z \quad (1.7)$$

$$p'_y = (2q_w q_z + 2q_x q_y)p_x + (q_w^2 - q_x^2 + q_y^2 - q_z^2)p_y + (2q_y q_z - 2q_w q_x)p_z \quad (1.8)$$

$$p'_z = (2q_x q_z - 2q_w q_y)p_x + (2q_w q_x + 2q_y q_z)p_y + (q_w^2 - q_x^2 - q_y^2 + q_z^2)p_z \quad (1.9)$$

Capítulo 2

Diseño conceptual

2.1. Necesidades

En el ámbito del diseño de productos se emplea el término *necesidad* para referirse a cualquier característica o cualidad de un producto que el usuario desea o necesita [30]. De acuerdo con la información recopilada durante la etapa de revisión del estado del arte de la tecnología de asistencia disponible para apoyar la movilidad de personas con algún tipo de debilidad visual, así como con información de testimonios de personas con ceguera sobre su experiencia de movilidad en la Ciudad de México en un trabajo de investigación desarrollado por Hernández [8], es posible determinar e interpretar algunas de las principales necesidades que las personas con debilidad visual tienen respecto a la tecnología de asistencia para movilidad. A continuación, se enlistan estas necesidades.

2.1.1. Necesidades del usuario

- El EAM detecta obstáculos que se encuentran frente al usuario.
- El EAM detecta obstáculos que se encuentran por encima del nivel de la cintura del usuario.
- El EAM determina la distancia en la que se encuentra un obstáculo.
- El EAM determina la dirección en la que se encuentra un obstáculo.
- La batería del EAM permite una jornada de uso completa.
- La batería del EAM es recargable.
- El proceso de encendido del EAM es simple.
- El EAM es fácil de equipar.
- El EAM proporciona retroalimentación en tiempo real.
- El EAM actualiza la información de retroalimentación continuamente.
- El EAM es fácil de transportar.
- El EAM es ligero.
- El EAM no limita la movilidad del usuario.
- El EAM comunica al usuario si se acerca a algún obstáculo.
- La información que proporciona el EAM es fácil de entender.

2.1.2. Jerarquía e importancia relativa de las necesidades

La organización de las necesidades del usuario a través de una jerarquía permitirá conocer cuáles son las necesidades generales (necesidades primarias) y las necesidades específicas asociadas (necesidades secundarias) que las personas con debilidad visual buscarían en un equipo de asistencia para movilidad. Esta clasificación permitirá, en conjunto con la información de importancia relativa de las necesidades, tomar decisiones sobre cómo buscar satisfacer las necesidades del usuario a través de la definición de especificaciones y de la propuesta del concepto.

La jerarquización de necesidades es un proceso que se lleva a cabo agrupando necesidades similares y asignando al grupo una definición que describe de manera general las necesidades que lo componen [30]. La clasificación por jerarquía de las necesidades del usuario respecto a equipos de asistencia para movilidad, así como la asignación de valores de importancia relativa para las necesidades se muestran en la Tabla 2.1.

Necesidades	Importancia relativa
El EAM detecta obstáculos que se encuentran en el entorno frente al usuario.	Alta
El EAM detecta obstáculos que se encuentran frente al usuario.	
El EAM detecta obstáculos que se encuentran por encima del nivel de la cintura del usuario.	
El EAM determina la ubicación de los obstáculos.	Alta
El EAM determina la distancia en la que se encuentra un obstáculo.	
El EAM determina la dirección en la que se encuentra un obstáculo.	
Una carga completa de la batería del EAM permite una jornada de uso.	Media
La batería del EAM permite una jornada de uso completa.	
La batería del EAM es recargable.	
El proceso de preparación previo al uso del equipo es simple.	Media
El proceso de encendido del EAM es simple.	
El EAM es fácil de equipar.	
El equipo trabaja en tiempo real.	Alta
El EAM proporciona retroalimentación en tiempo real.	
El EAM actualiza la información de retroalimentación continuamente.	
El equipo emplea tecnología <i>wearable</i>.	Alta
El EAM es fácil de transportar.	
El EAM es ligero.	
El EAM no limita la movilidad del usuario.	
El EAM proporciona al usuario información clara para evitar obstáculos.	Alta
El EAM comunica al usuario si se acerca a algún obstáculo.	
La información que proporciona el EAM es fácil de entender.	

Tabla 2.1: Jerarquía de necesidades e importancia relativa.

2.2. Especificaciones

Una especificación de un producto es una característica que describe a través de una métrica y un valor medible lo que el producto tiene que hacer. Los valores asociados a las métricas pueden consistir en números exactos, rangos o desigualdades. Cuando no es posible asignar un valor numérico a una métrica se puede definir una lista de elementos que puedan cumplirla. Las especificaciones dan un punto de partida para proponer conceptos que puedan satisfacer las necesidades del cliente. [30]

De acuerdo con la lista de necesidades primarias determinadas en la sección previa, se determinaron una serie de especificaciones objetivo para el diseño de un equipo de asistencia para movilidad de personas con debilidad visual (Tabla 2.2). El cumplimiento de las especificaciones definidas para el equipo de asistencia representará la satisfacción de las necesidades del usuario correspondientes.

Necesidad	Especificación
1 El EAM detecta obstáculos que se encuentran en el entorno frente al usuario.	Rango de detección horizontal de obstáculos de por lo menos 60°.
2 El EAM determina la ubicación de los obstáculos.	Distancia máxima para determinar la ubicación de obstáculos de 6 m.
3 Una carga completa de la batería del EAM permite una jornada de uso.	Carga de la batería suficiente para una jornada de al menos 6 horas.
4 El proceso de preparación previo al uso del equipo es simple.	Tiempo de encendido y preparación menor a 60 s.
5 El equipo trabaja en tiempo real.	Tiempo de procesamiento máximo de 100 ms.
6 El equipo emplea tecnología <i>wearable</i> .	Dispositivos: Lentes, brazaletes, bandas, cinturón.
7 El EAM proporciona al usuario información clara para evitar obstáculos.	Retroalimentación: háptica, auditiva.

Tabla 2.2: Necesidades y especificaciones.

2.3. Generación de conceptos

Ulrich y Eppinger definen el concepto de un producto como una descripción de la tecnología, principios de funcionamiento y forma del producto. Esta descripción explica la manera en la que el producto puede satisfacer las necesidades del cliente. [30]

2.3.1. Aclarar y simplificar el problema

Al diseñar productos es común encontrarse con problemas que pueden ser demasiado complejos para encontrar una solución general. En estos casos, una alternativa que puede ayudar a simplificar el proceso de diseño consiste en descomponer el problema complejo en subproblemas más sencillos. [30]

La primera parte del proceso de descomposición funcional consiste en representar el problema de diseño a través de un modelo de *caja negra*. En esta descripción sabemos qué entradas y salidas de energía, materiales o señales tiene el sistema, pero no nos enfocamos en los procesos internos del mismo.

La Figura 2.1 muestra el diagrama de *caja negra* para el EAM. En color rojo se indica flujo de energía, en color morado el flujo de material o recursos con los que el sistema trabaja, y en azul señales de control. En esta primera etapa sabemos que las entradas del equipo de asistencia son energía eléctrica, información del entorno e información sobre el estado de movimiento de la persona. La salida que obtenemos consiste en información para navegación que la persona con debilidad visual puede utilizar para desplazarse y evitar obstáculos.



Figura 2.1: Representación de *caja negra* de un equipo de asistencia para movilidad para personas con debilidad visual.

A continuación, se lleva a cabo una descomposición funcional de la *caja negra* para conocer y describir los elementos que la componen y cómo estos procesos en conjunto podrían llevar a cabo la función general del producto. En este paso todavía no se especifican principios de funcionamiento para el concepto.

En la Figura 2.2 se muestra la descomposición funcional del EAM a partir de la representación de *caja negra*. Los principales subproblemas encontrados en la descomposición son:

- Recibir y almacenar energía.
- Obtener información del entorno.
- Determinar el estado de movimiento del usuario.
- Analizar la información del entorno para encontrar obstáculos.
- Traducir la información de obstáculos en indicaciones para navegación.
- Comunicar al usuario la información para navegación.

2.3.2. Organización de conceptos

Una vez identificados los subprocesos que componen el problema general es posible comenzar a realizar propuestas de diferentes conceptos que den solución a cada subproblema, para que al final la integración de los diferentes conceptos proporcione una solución completa al problema. Estos conceptos pueden proponerse de acuerdo con información externa (conceptos existentes, patentes, entrevistas a usuarios), o a través de información interna (propuestas e ideas dentro del entorno de desarrollo).

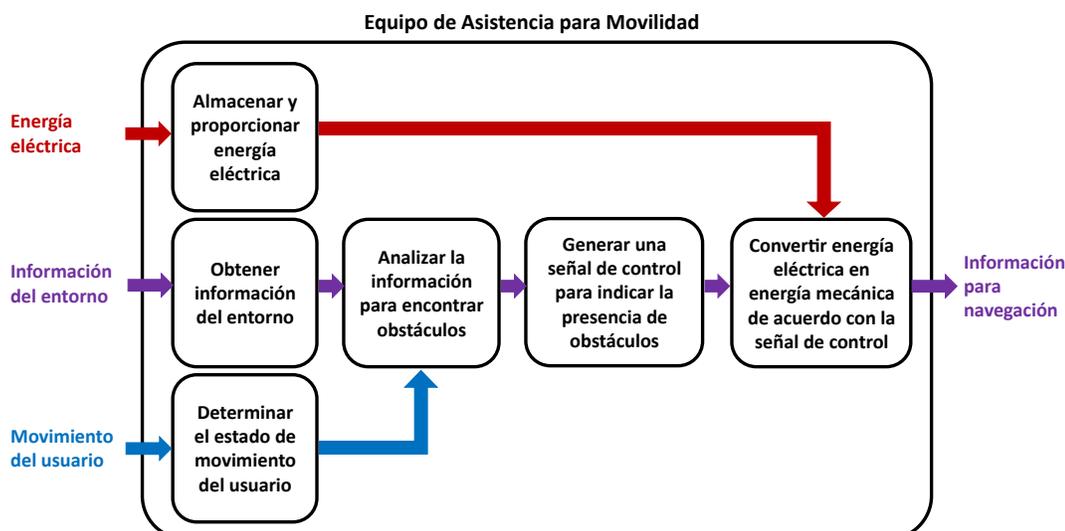


Figura 2.2: Diagrama funcional de un equipo de asistencia para movilidad para personas con debilidad visual.

Las diferentes propuestas de solución para cada subproblema identificado en la Figura 2.2 para el EAM pueden ser organizadas en una tabla de combinación de conceptos como se muestra en la Tabla 2.3. Cada columna muestra los diferentes conceptos propuestos para dar solución al subproblema correspondiente. El concepto que dé solución al problema general estará compuesto por una combinación de soluciones para cada subproblema. El número total de conceptos generales que se pueden obtener a partir de la combinación de soluciones para cada subproblema puede ser elevado. Sin embargo, es posible descartar algunas soluciones que de antemano se pueden considerar poco factibles de acuerdo con las necesidades del usuario ya determinadas previamente, reduciendo así el número total de conceptos finales.

La primera simplificación considerada antes de realizar la combinación de soluciones consistió en no limitar las opciones de alimentación energética del Equipo a un solo tipo de baterías (Li-Ion o Li-Po). Si bien la naturaleza *wearable* del EAM requiere el uso de baterías recargables pequeñas y ligeras, se decidió llevar a cabo el proceso de selección de las baterías una vez que se conozcan los requerimientos energéticos y dimensionales de los diferentes dispositivos que puedan componer el EAM.

Otra simplificación realizada consistió en descartar el uso de GPS para la determinación del estado de movimiento de la persona (detenida, caminando) ya que este sistema puede presentar limitaciones al determinar la ubicación del usuario si este se encuentra dentro de construcciones que no permitan la correcta recepción de las señales de los satélites del sistema como lo son edificios o espacios subterráneos.

Finalmente, se descartó la posibilidad de emplear un cinturón como instrumento de retroalimentación debido al tamaño relativo que este dispositivo podría tener respecto a otros aparatos *wearables* más pequeños como brazaletes, bandas o audífonos.

Las simplificaciones realizadas a las soluciones propuestas en la tabla de combinación de conceptos (Tabla 2.3) redujeron el número de subproblemas con múltiples opciones de solución a un total de cuatro (Tabla 2.4). Con esta información se llevó a cabo el proceso de combinación de soluciones para obtener conceptos que puedan dar solución al problema general del EAM. En la Tabla 2.5 se describen los principales conceptos obtenidos para el diseño de un equipo de asistencia para movilidad para personas con debilidad visual.

Almacenar y proporcionar energía	Obtener información del entorno	Detectar movimiento del usuario	Análisis para encontrar obstáculos	Información de retroalimentación	Retroalimentación al usuario
Baterías Li-Ion	Cámara RGB-D (<i>Kinect</i> o similares) montada en un soporte colocado en el pecho	Obtener información de movimiento empleando una IMU	Búsqueda de objetos empleando Inteligencia Artificial (IA)	Ubicación exacta del obstáculo detectado (dirección, distancia)	Brasaletes (vibración)
Baterías Li-Po	Dos cámaras pequeñas montadas sobre unos lentes o una diadema.	Obtener información a través de la ubicación GPS del usuario	Obtención de una <i>nube de puntos</i> a partir de información de profundidad para buscar objetos	Ubicación relativa del obstáculo detectado (izquierda, derecha, centro)	Bandas (vibración)
	Una cámara pequeña montada sobre unos lentes.		Búsqueda de líneas, formas o patrones en la imagen (geometría)		Audífonos (sonido)

Tabla 2.3: Tabla de combinación de conceptos para el equipo de asistencia para movilidad.

Obtener información del entorno	Análisis para encontrar obstáculos	Información de retroalimentación	Retroalimentación al usuario
Cámara RGB-D (<i>Kinect</i> o similares) montada en un soporte colocado en el pecho	Búsqueda de objetos empleando IA Obtención de una <i>nube de puntos</i> a partir	Ubicación exacta del obstáculo detectado (dirección, distancia) Ubicación relativa del obstáculo detectado (izquierda, derecha, centro)	Brazaletes (vibración) Bandas (vibración)
Dos cámaras pequeñas montadas sobre unos lentes o una diadema.	de información de profundidad para buscar objetos		Audífonos (sonido)
Una cámara pequeña montada sobre unos lentes.	Búsqueda de líneas, formas o patrones en la imagen (geometría)		

Tabla 2.4: Tabla de combinación de conceptos simplificada.

Concepto	Descripción
A	El EAM obtiene información del entorno a través de una cámara pequeña montada sobre unos lentes y emplea IA para detectar obstáculos, el equipo indica al usuario la ubicación relativa de los objetos a través de audio.
B	El EAM obtiene información del entorno a través de una cámara RGB-D colocada sobre el pecho para generar una nube de puntos y encontrar obstáculos, el equipo indica al usuario la ubicación exacta de los objetos a través de vibración en brazaletes.
C	El EAM obtiene información del entorno a través de un arreglo estéreo de cámaras pequeñas montadas sobre unos lentes para generar una nube de puntos y encontrar obstáculos, el equipo indica al usuario la ubicación exacta de los objetos a través de vibración en brazaletes.
D	El EAM obtiene información del entorno a través de una cámara pequeña montada sobre unos lentes y realiza análisis de geometría en la imagen para determinar características del entorno, el equipo comunica al usuario la información de forma relativa a través de vibración en brazaletes.

Tabla 2.5: Tabla de conceptos.

2.4. Selección del concepto

Durante el proceso de selección del concepto se lleva a cabo una evaluación de los conceptos propuestos respecto a las necesidades del usuario así como otros criterios de selección importantes. Se comparan pros y contras de los conceptos y se selecciona alguno para continuar su desarrollo y llevar a cabo pruebas. [30]

2.4.1. Filtrado de conceptos

El primer paso en la selección del concepto es el filtrado de conceptos. En esta etapa se compara el desempeño de las soluciones propuestas respecto a un concepto de referencia, son descartados aquellos conceptos cuyo desempeño general es peor. Esto de acuerdo con criterios de selección propuestos a partir de las necesidades del usuario y requerimientos de desarrollo. La Tabla 2.6 muestra este proceso.

Para el proceso de filtrado de conceptos del EAM se consideró al concepto B como referencia ya que algunos de los equipos analizados en el estado del arte emplean una arquitectura similar, por lo que se tiene información clara sobre su funcionamiento y características. La comparación con los demás conceptos se lleva a cabo anotando en el criterio correspondiente el signo (+) si el concepto se desempeña mejor que la referencia, el signo (−) si el desempeño es peor, o (0) si el desempeño es similar. La evaluación neta obtenida por cada concepto se calcula restando la cantidad de puntos negativos al número de puntos positivos obtenidos. De acuerdo con el puntaje obtenido se asigna un lugar a los conceptos, si un concepto obtiene un puntaje negativo este se descarta.

El proceso de filtrado de conceptos para el EAM que se muestra en la Tabla 2.6 indica que el concepto B puede ser descartado. De acuerdo con la información obtenida a través de las comparaciones se puede observar que, aunque las cámaras RGB-D proporcionan información de profundidad prácticamente lista para ser analizada, el elevado costo del equipo y sus dimensiones pueden representar una limitación en cuanto al costo total del equipo de asistencia y su portabilidad.

Se analizó la posibilidad de modificar o combinar los conceptos del EAM restantes y se determinó que era factible combinar el concepto D con los conceptos A y C para obtener dos conceptos finales. Se realizó esta combinación de conceptos considerando que la información geométrica que se puede obtener del entorno puede complementar la información de objetos detectados con IA o la información de puntos 3D obtenida con cámaras estéreo, ampliando la información que ambos conceptos pueden utilizar para proporcionar retroalimentación al usuario.

2.4.2. Evaluación de conceptos

La evaluación de conceptos en un método más detallado para calificar el desempeño relativo de los conceptos analizados respecto a cada criterio de selección, esta vez asignando a cada criterio una ponderación específica. [30]

En la Tabla 2.8 se muestra el procedimiento de evaluación de conceptos para los conceptos finales del EAM. A cada criterio de selección se le asignó un peso de acuerdo con las necesidades del usuario y su importancia relativa. El criterio al que se le asignó mayor importancia es el relacionado con la calidad de la información (exactitud, confianza, cantidad) que se puede obtener del entorno, ya que se busca proporcionar al usuario información que le permita desplazarse con confianza y certeza.

	Conceptos			
	A	B	C	D
	Cámara simple para análisis por IA con audio	(Referencia) Cámara RGB-D para nube de puntos con vibración en brazaletes	Cámaras estéreo para nube de puntos con vibración en brazaletes	Cámara simple para análisis por geometría con vibración en brazaletes
Criterios de selección				
Portabilidad de las cámaras	+	0	0	+
Costo de las cámaras	+	0	+	+
Complejidad de los algoritmos de análisis	-	0	-	-
Calidad de la información	0	0	0	-
Comodidad del equipo	+	0	+	+
Facilidad para equipar	+	0	+	+
Simplicidad de la retroalimentación	-	0	0	0
Suma +	4	0	3	4
Suma 0	1	7	3	1
Suma -	2	0	1	2
Evaluación neta	2	0	2	2
Lugar	1	4	1	1
¿Continuar?	Sí	No	Sí	Combinar

Tabla 2.6: Matriz de filtrado.

Para llevar a cabo la evaluación de conceptos es necesario definir nuevamente un concepto de referencia, el concepto seleccionado para este fin es el concepto AD, compuesto por la combinación de los conceptos originales A y D. Esta vez, la comparación del desempeño relativo de los conceptos se realiza asignando una calificación en la escala del 1 al 5 de acuerdo con la información de la Tabla 2.7.

Desempeño relativo	Calificación
Mucho peor que la referencia	1
Peor que la referencia	2
Igual que la referencia	3
Mejor que la referencia	4
Mucho mejor que la referencia	5

Tabla 2.7: Tabla de calificación de desempeño relativo. [30]

Después de asignar una calificación a los conceptos para cada criterio de selección, se calcula la evaluación ponderada correspondiente de acuerdo con el peso establecido para cada criterio. La suma de las evaluaciones ponderadas de cada concepto indicará el total de puntos obtenidos por el concepto. El puntaje obtenido en la evaluación de conceptos proporciona una noción del concepto que podría tener más posibilidades de éxito en la satisfacción de las necesidades del cliente.

De acuerdo con la información obtenida en el proceso de evaluación de conceptos resumida en la Tabla 2.8, se concluyó que el concepto CD tiene la capacidad de proporcionar una solución a las necesidades de los usuarios respecto al uso de un equipo de asistencia para movilidad de personas con debilidad visual.

2.5. Concepto seleccionado

El concepto seleccionado para desarrollar y llevar a cabo pruebas de validación es el concepto CD, el cual se describe más a detalle a continuación: El equipo de asistencia para movilidad para personas con debilidad visual obtiene información del entorno frente al usuario a través de un arreglo estéreo de cámaras simples. Las cámaras se encuentran montadas sobre una estructura de forma similar a unos lentes. Una IMU permite determinar el estado de movimiento del usuario. La información del entorno capturada en imágenes, así como la información de aceleración y orientación proporcionada por la IMU, es procesada en un teléfono inteligente empleando algoritmos de visión estéreo para obtener una nube de puntos que permita encontrar obstáculos que puedan representar un riesgo de colisión para el usuario. Para complementar la información espacial que se obtenga del análisis de visión estéreo, se lleva a cabo un análisis de la geometría del entorno presente en las imágenes capturadas para obtener información más detallada sobre los obstáculos que se puedan detectar. La información tridimensional de la ubicación de los obstáculos detectados se comunican al usuario a través de patrones de vibración generados en brazaletes. Estos patrones codifican a través de la distribución y la intensidad de la vibración, la dirección y la distancia en la que se encuentra un obstáculo. Esta información sobre el entorno en el que se encuentra el usuario le permitirá tomar decisiones para desplazarse evitando obstáculos.

		Conceptos			
		AD (Referencia)		CD	
		Cámara simple para análisis por IA y geometría con audio	Cámaras estéreo para nube de puntos y análisis por geometría con vibración en brazaletes		
Criterios de selección	Peso	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Portabilidad de las cámaras	10 %	3	0.30	2	0.20
Costo de las cámaras	10 %	3	0.30	2	0.20
Complejidad de los algoritmos de análisis	15 %	3	0.45	3	0.45
Calidad de la información	20 %	3	0.60	5	1.00
Comodidad del equipo	15 %	3	0.45	2	0.30
Facilidad para equipar	15 %	3	0.45	3	0.45
Simplicidad de la retroalimentación	15 %	3	0.45	4	0.60
Total puntos			3.00		3.20
Lugar			2		1
¿Continuar?			No		Desarrollar

Tabla 2.8: Matriz de evaluación.

A partir de la descripción del concepto seleccionado se pueden identificar tres etapas básicas: la primera etapa consiste en la obtención de información del entorno a través de las cámaras y la IMU, en la segunda etapa se lleva a cabo el análisis de la información para detectar obstáculos y la última etapa consiste en comunicar la información para navegación al usuario. En los capítulos consecuentes se explicará a detalle el proceso de desarrollo del EAM para cada etapa identificada.

Capítulo 3

Dispositivo para Captura de Imágenes Estéreo

El concepto de equipo de asistencia para movilidad de personas con debilidad visual seleccionado y descrito en el capítulo previo consta de tres etapas básicas; obtención de información, procesamiento y retroalimentación al usuario. En este capítulo se describirá el funcionamiento del dispositivo propuesto que se encargará de realizar la primera parte del proceso, la cual consiste en obtener información del entorno a través de imágenes estereo.

Se denomina DCIE al componente del equipo de asistencia propuesto que contiene el arreglo de cámaras estereo. Este dispositivo también tiene la capacidad de obtener información referente a la orientación en la que se encuentra, así como a los cambios de movimiento a los que está sujeto, esto con el objetivo de complementar el análisis que se realice de las imágenes estereo.

El DCIE es un dispositivo que se puede usar de forma similar a unos lentes. La información recopilada por el dispositivo se transmitirá a un teléfono inteligente para su análisis e interpretación en la etapa dos, la transmisión se realizará a través de una conexión inalámbrica con el fin de minimizar el uso de cables que puedan limitar la movilidad del usuario. El DCIE será alimentado a través de una batería recargable montada en una banda colocada alrededor del brazo de la persona.

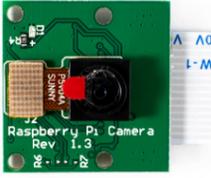
Para llevar a cabo la transmisión de la información recopilada por el DCIE hacia el teléfono inteligente se decidió utilizar la tecnología Wi-Fi. Las conexiones Wi-Fi permiten una mayor velocidad de transmisión de datos en comparación con otras tecnologías inalámbricas comunes como el Bluetooth, por lo que resultan una mejor opción para transmitir grandes cantidades de información [31].

3.1. Selección de componentes

Los componentes básicos necesarios para el funcionamiento del DCIE son dos cámaras, una IMU, un microprocesador, un módulo de comunicación inalámbrica y una batería. Después de la selección de los componentes principales se determinará la selección de componentes complementarios de acuerdo a las necesidades que los primeros establezcan.

3.1.1. Cámaras

Las cámaras que se usen en el DCIE deben cumplir dos características importantes: tener dimensiones pequeñas y ser ligeras. En la Tabla 3.1 se muestran las principales opciones de cámaras consideradas para emplear en el EAM.

	Módulo OV7670	Raspberry Pi Cam Rev 1.3	Módulo ESP32-CAM
			
Resolución de imagen	640 x 480 pixeles	2592 x 1944 pixeles	1600 x 1200 pixeles
Dimensiones ^a	35.4 x 35.4 mm	25 x 20 x 9 mm	48 x 27 x 16 mm
Peso ^a	12 g	3 g	10 g
Precio ^{a,b}	\$69.00 MXN	\$108.00 MXN	\$184.08 MXN

^a Valores aproximados.

^b Precios actualizados en mayo de 2023.

Tabla 3.1: Cámaras [32].

La cámara OV7670 es un módulo que permite capturar imágenes en una resolución de hasta 640 x 480 pixeles, este módulo es usado frecuentemente con tarjetas de desarrollo Arduino. Aunque la cámara OV7670 es un dispositivo relativamente económico, el número de conexiones necesarias para su funcionamiento es elevado, por lo que el circuito de conexión de dos de estos módulos con un microcontrolador resultaría en un circuito complejo.

Las cámaras para Raspberry Pi son otra posible opción para su uso en el DCIE ya que son fáciles de conectar. Estas cámaras emplean un puerto especial para la transmisión de datos que la mayoría de los modelos de Raspberry Pi ya incluyen, sin embargo, las Raspberry Pi sólo disponen de un puerto para la conexión con cámaras. Para dar solución a esta situación es posible emplear un módulo como el adaptador multicámara de Arducam que permite conectar hasta cuatro cámaras. La desventaja que se presenta con esta opción consiste en que el conjunto de la Raspberry Pi, el módulo Arducam y las cámaras tendría dimensiones grandes, por lo que colocar todo el sistema sobre unos lentes podría resultar incómodo para el usuario.

El módulo ESP32-CAM está basado en un microcontrolador ESP32-S de Espressif Systems de 32 bits y doble núcleo a 240 MHz, este módulo incluye una cámara OV2640, Wi-Fi, Bluetooth, un socket para tarjeta microSD y un LED flash. El hecho de que el microcontrolador y los componentes periféricos incluidos en el módulo ESP32-CAM ya estén interconectados reduce considerablemente la necesidad de realizar conexiones entre módulos. Asimismo, la integración de un microcontrolador, una cámara y sistemas de comunicación inalámbrica en un mismo módulo facilita la programación, control y comunicación del dispositivo, además de que las dimensiones totales se mantienen reducidas. Las características del módulo ESP32-CAM lo hacen una excelente opción para implementarlo como cámara, además de que es bastante económico tomando en cuenta todas sus especificaciones y funcionalidades.

3.1.2. IMU

Para obtener información sobre el estado de movimiento del dispositivo, y por lo tanto del usuario, se considera emplear una IMU. Este tipo de dispositivos son módulos que incluyen sensores como acelerómetros, giroscopios, magnetómetros o barómetros los cuales, al trabajar en conjunto, permiten determinar la orientación y aceleración del objeto en el cual estén colocados. En la Tabla 3.2 se muestran algunos de los módulos más utilizados en proyectos electrónicos.

	MPU6050	MPU-9250	GY-87
			
Grados de libertad	6 (Giroscopio y acelerómetro)	9 (Giroscopio, acelerómetro y magnetómetro)	10 (Giroscopio, acelerómetro, magnetómetro y barómetro)
Dimensiones ^a	21 x 16 x 3 mm	26 x 15.5 x 2.6 mm	22 x 17 x 5 mm
Peso ^a	5 g	2 g	6 g
Precio ^{a,b}	\$99.00 MXN	\$207.00 MXN	\$135.00 MXN

^a Valores aproximados.

^b Precios actualizados en mayo de 2023.

Tabla 3.2: Módulos IMU [33][32].

Todos los módulos mostrados en la Tabla 3.2 soportan el protocolo de comunicación I2C (I²C) el cual requiere de dos líneas de comunicación para la transmisión de datos. El microcontrolador del módulo ESP32-CAM permite la implementación del protocolo I2C para la comunicación con periféricos, por lo que cualquiera de las IMUs propuestas puede emplearse en el DCIE. Se seleccionó el módulo MPU6050 ya que los 6 grados de libertad con los que cuenta son suficientes para determinar el estado de movimiento del DCIE, así como la orientación del dispositivo respecto a una posición de referencia horizontal.

3.1.3. Energía

Batería

Para proporcionar energía al DCIE se propuso el uso de baterías recargables. Los principales tipos de baterías que se emplean en proyectos de electrónica son las baterías tipo Li-Ion y las baterías tipo Li-Po.

La batería fue seleccionada una vez que el programa del DCIE fue completado y probado. Se midió el consumo energético del DCIE en funcionamiento y se obtuvo un valor promedio de aproximadamente 300 mAh. Considerando el funcionamiento constante del DCIE durante 8 horas y tomando en cuenta posibles pérdidas energéticas debido a la eficiencia de la transformación de energía, se seleccionó una batería tipo Li-Ion con capacidad de 3000 mAh para alimentar el DCIE durante el tiempo propuesto.

Dado que no hay una restricción importante de tamaño o de peso para la selección de la batería del DCIE porque esta será colocada en una banda alrededor del brazo, se determinó que la batería tipo Li-Ion puede cumplir con los requerimientos energéticos necesarios manteniendo las dimensiones y el peso de la banda en un rango aceptable.

Regulador de voltaje

El módulo ESP32-CAM requiere de un voltaje de alimentación de 5 V. La batería Li-Ion seleccionada proporciona un voltaje nominal de 3.7 V, por lo que es necesario utilizar un módulo boost step-up para obtener el nivel de voltaje requerido por el módulo ESP32-CAM para que funcione correctamente.

Algunos de los módulos elevadores de voltaje disponibles en el mercado se muestran en la Tabla 3.3. Todos los módulos boost step-up revisados pueden proporcionar el voltaje de 5 V requerido cuando se alimentan con una batería Li-Ion. Como el elevador de voltaje seleccionado será incorporado al DCIE es necesario que tenga dimensiones pequeñas y que sea ligero. Se consideró el módulo elevador de voltaje Mini Boost Step-Up como la mejor opción ya que es el módulo más pequeño y de menor peso entre los diferentes elevadores de voltaje analizados.

	Mini Boost Step-Up	MT3608	XL6009
			
Voltaje de salida	5, 8, 9 o 12 V	5 - 28 V	5 - 35 V
Potencia de salida máxima	6 W	6 W	10 W
Dimensiones ^a	22 x 11 x 3.6 mm	36 x 17 x 7 mm	43 x 21 x 14 mm
Peso ^a	1.2 g	5 g	12 g
Precio ^{a,b}	\$14.00 MXN	\$22.00 MXN	\$35.00 MXN

^a Valores aproximados.

^b Precios actualizados en mayo de 2023.

Tabla 3.3: Elevadores de voltaje [32].

Nivel de batería

Originalmente se consideró la opción de utilizar un pin con capacidad ADC del módulo ESP32-CAM para determinar el nivel de voltaje de la batería. Sin embargo, en la etapa de programación se presentó el inconveniente de que no fue posible inicializar correctamente la funcionalidad ADC del módulo ESP32-CAM porque la configuración interna del microcontrolador asocia los pines con capacidad de lectura analógica al módulo Wi-Fi integrado. Dado que se empleó la comunicación Wi-Fi para la transmisión de la información obtenida por el DCIE se descartó la opción de leer el nivel voltaje de la batería directamente desde el módulo ESP32-CAM.

Para dar solución al problema de la incapacidad de realizar lecturas analógicas directamente con el módulo ESP32-CAM se propuso emplear un elemento extra (sensor o microcontrolador) con funcionalidad ADC para llevar a cabo la lectura del nivel de la batería y transmitir la información hacia el módulo ESP32-CAM a través de una interfaz serial o I2C.

Existen módulos ADC como el ADS1115, sin embargo, se decidió acondicionar un microcontrolador ATtiny85 para realizar la lectura analógica del nivel de la batería con uno de sus pines ADC y posteriormente transmitir la información obtenida hacia el módulo ESP32-CAM mediante una interfaz I2C. La principal razón por la cual se seleccionó el ATtiny85 es por su tamaño reducido en comparación con el módulo ADS1115.

3.2. Hardware

Los principales componentes del circuito del DCIE son los módulos ESP32-CAM. Estos dispositivos deben comunicarse entre sí para que las imágenes estéreo sean capturadas al mismo tiempo, si esto no ocurre, no será posible determinar correctamente la información de profundidad de la escena.

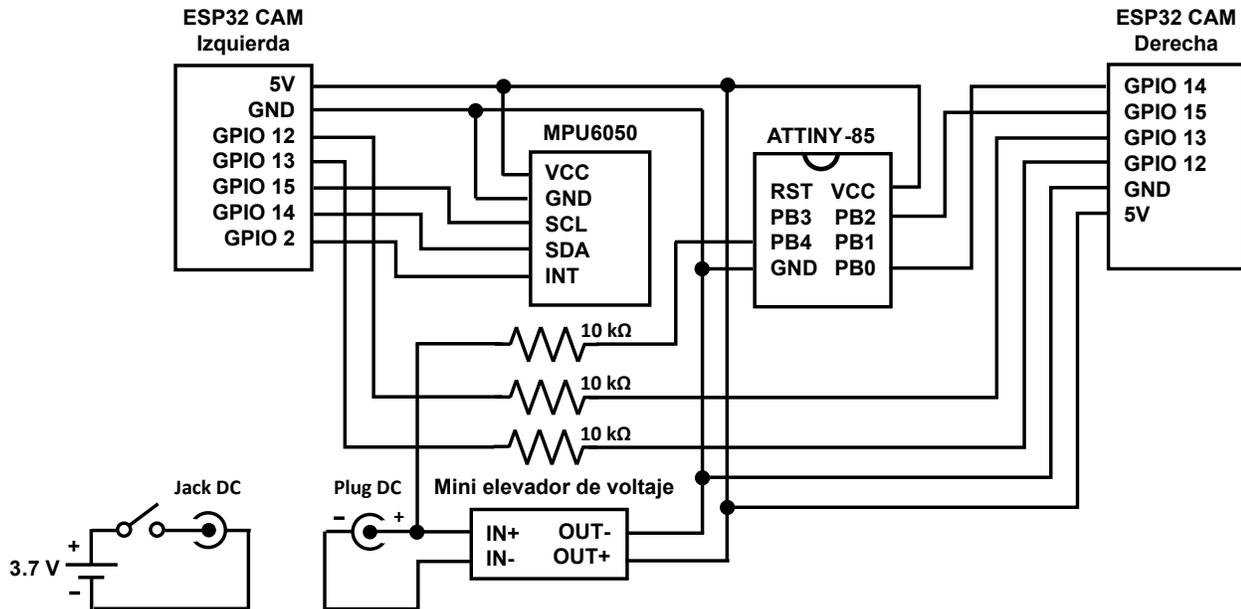
Cada módulo ESP32-CAM mantendrá una conexión Wi-Fi independiente con el teléfono inteligente. Este dispositivo enviará una señal a cada módulo cuando esté listo para recibir un par de imágenes estéreo. Aunque el teléfono inteligente mande la señal simultáneamente, es posible que los módulos ESP32-CAM no reciban el comando al mismo tiempo, por lo que es necesario comunicar los módulos físicamente para sincronizar la captura de imágenes. Esto se puede lograr a través de la activación de interrupciones mutuas de los microcontroladores para que en cuanto los dos módulos reciban la señal cada uno capture una imagen y la envíe al teléfono inteligente. Como cualquiera de los dos módulos ESP32-CAM puede recibir la señal antes que el otro se emplearán dos líneas de interrupción para tener comunicación bidireccional entre los módulos, se agregó un resistor de 10 k Ω en cada línea para protección contra excesos de corriente. Cada módulo ESP32-CAM activa su interrupción a través del pin GPIO 13 y detecta la interrupción del otro módulo en el pin GPIO 12.

Como se mencionó previamente, el módulo MPU6050 y el microcontrolador ATtiny85 seleccionados emplearán una interfaz I2C para comunicarse con los microcontroladores de los módulos ESP32-CAM. Para distribuir la carga de trabajo llevada a cabo por cada microcontrolador se decidió conectar el módulo MPU6050 al módulo ESP32-CAM izquierdo y el ATtiny85 al módulo derecho. Los pines seleccionados para establecer la comunicación I2C en cada microcontrolador son el pin GPIO 15 para la línea de datos SCL (reloj) y el pin GPIO 14 para la línea SDA (datos), adicionalmente, el pin GPIO 2 se asoció al pin de interrupción del módulo MPU6050. Cada módulo ESP32-CAM del DCIE determinará su posición en el sistema de cámaras estéreo de acuerdo con el dispositivo periférico que detecte a través de la interfaz I2C.

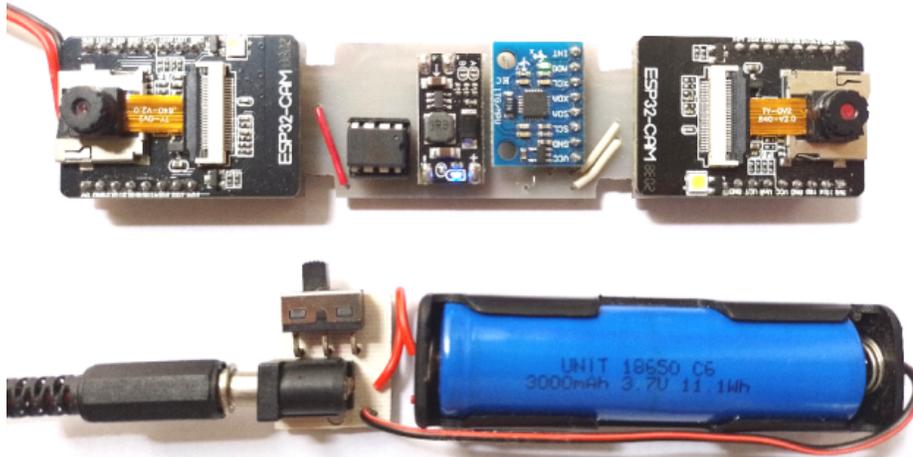
El arreglo de cámaras estéreo se coloca en la cabeza del usuario mientras que la batería del dispositivo se sujeta con una banda alrededor del brazo del usuario. Para facilitar el equipamiento del DCIE se agregó un conector DC tipo barril de 5.5 mm x 2.1 mm a la batería de manera que se permita equipar los dos componentes físicos del DCIE de forma separada. El conector DC también permitirá cargar la batería al conectarla al circuito cargador descrito en el capítulo 6. También se agregó a la batería un interruptor deslizable para encender o apagar el DCIE.

Cuando el interruptor de la batería está cerrado se aplican entre 3.6 V y 4.2 V (de acuerdo con el nivel de carga de la batería) al módulo Mini Boost Step-Up, este dispositivo eleva el voltaje y proporciona una salida constante de 5 V con los cuales se energizan los dos módulos ESP32-CAM, el módulo MPU6050 y el ATtiny85. Para llevar a cabo la lectura análoga del nivel de voltaje de la batería se establece un puente entre la terminal positiva de la batería y el pin PB4 del ATtiny85 a través de un resistor de 10 k Ω .

La Figura 3.1a sintetiza gráficamente las ideas descritas en párrafos anteriores. El diagrama muestra las conexiones entre los diferentes componentes electrónicos del DCIE. Asimismo, en la Figura 3.1b se muestra la disposición de los componentes sobre el circuito impreso. En el Apéndice C de este trabajo se encuentran los diagramas necesarios para llevar a cabo la manufactura de los circuitos impresos de los diferentes dispositivos que componen el EAM.



(a) Diagrama de conexiones del DCIE.



(b) Circuito del DCIE.

Figura 3.1: Diagrama de conexiones del DCIE.

3.3. Software

El programa creado para controlar los módulos ESP32-CAM está escrito en lenguaje de programación C. El proyecto *ESP32 Arduino Core* respaldado por Espressif Systems [34] ayudó en la creación del software del DCIE al facilitar el soporte para el uso de librerías y la infraestructura del IDE de Arduino.

Los dos módulos ESP32-CAM ejecutan el mismo programa desarrollado. A partir de las conexiones con otros elementos electrónicos detectadas por el microcontrolador o la detección de señales producidas por el otro módulo, el programa determina los procedimientos que debe llevar a cabo de acuerdo con el rol establecido (cámara izquierda o cámara derecha).

En el Apéndice B de este trabajo escrito se incluye el diagrama de flujo que sintetiza el funcionamiento del programa de control ejecutado en cada módulo ESP32-CAM del DCIE de acuerdo con lo descrito en esta sección. Asimismo, se incluyen los diagramas de flujo de los programas de control de otros elementos del EAM.

3.3.1. Inicialización del DCIE y conexión inalámbrica con el teléfono inteligente

Cuando el DCIE es encendido se lleva a cabo la configuración inicial de las cámaras, así como la inicialización de la comunicación I2C. Para determinar en qué posición del arreglo estereo de cámaras se encuentra el módulo que está ejecutando el programa se trata de establecer comunicación con el ATtiny85 a través del protocolo I2C, si se obtiene una respuesta desde la dirección 0x64 significa que el ATtiny85 está conectado al microcontrolador y, por lo tanto, el programa se está ejecutando en el módulo ESP32-CAM derecho. Si el programa no recibe la respuesta del ATtiny85 iniciará la comunicación con el módulo MPU6050 empleando la dirección 0x68 y ejecutará las instrucciones correspondientes al módulo ESP32-CAM izquierdo.

Una vez que ya se llevó a cabo el proceso de inicialización de las cámaras y los sensores, el módulo ESP32-CAM tratará de conectarse al punto de acceso Wi-Fi que la aplicación móvil en el teléfono inteligente cree. Siempre que se pierda la conexión Wi-Fi el programa tratará de reconectarse lo más pronto posible.

Cuando el módulo ESP32-CAM ya tenga una conexión Wi-Fi activa con el teléfono inteligente se tratará de establecer una conexión mediante el protocolo TCP con el servidor encargado de recibir la información del DCIE en la aplicación móvil. Si no es posible conectarse al servidor porque el usuario aún no activa el equipo de asistencia, el programa reintentará la conexión con el servidor cada segundo mientras el módulo ESP32-CAM se mantenga conectado al punto de acceso Wi-Fi del teléfono inteligente.

En el momento en que el usuario active el equipo de asistencia la aplicación móvil en el teléfono inteligente iniciará un servidor para recibir la información del DCIE. Cuando el módulo ESP32-CAM logra conectarse a este servidor lo primero que hace es enviar una serie de bytes indicando si es el módulo izquierdo o el módulo derecho del DCIE, esto permitirá a la aplicación móvil interpretar correctamente la información que reciba del programa. En respuesta al proceso de identificación, la aplicación envía configuraciones complementarias para ajustar la captura de imágenes y el flujo de trabajo del programa. Estas configuraciones incluyen, principalmente, el establecimiento de una resolución y calidad específicas para la captura de imágenes, así como la modificación del intervalo de tiempo entre la captura de dos pares de imágenes estereo consecutivos.

3.3.2. Sincronización de la captura de imágenes

Cada vez que la aplicación móvil esté lista para recibir un nuevo par de imágenes estéreo enviará un comando a los dos módulos del DCIE para que envíen su información correspondiente. Como se mencionó en la sección anterior, los módulos ESP32-CAM sincronizan la captura de imágenes a través de interrupciones. Cada módulo controla una salida digital que mantiene en un nivel bajo, cuando un módulo modifica su salida digital a un estado alto la interrupción por flanco de subida establecida en el otro módulo se activa. Para detallar el proceso de sincronización consideremos el ejemplo a continuación:

El módulo ESP32-CAM izquierdo recibió el comando enviado por la aplicación, para determinar si debe capturar una imagen y enviarla de inmediato o esperar a que el módulo derecho también reciba el comando el programa debe verificar si la interrupción asociada al módulo derecho ya ha sido activada. Si es así, significa que el módulo derecho ya recibió el comando y está a la espera de que el módulo izquierdo le indique que también ha recibido el comando para proceder a capturar su imagen y enviarla. El módulo izquierdo entonces activa su interrupción, captura una imagen, envía la información obtenida con el módulo MPU6050, envía la imagen y restablece su interrupción.

Si, por el contrario, el módulo izquierdo recibió el comando pero la interrupción del módulo derecho no ha sido activada debe esperar a que el módulo derecho también reciba el comando, para indicar esto el módulo izquierdo activa su interrupción. Cuando el módulo derecho reciba el comando sabrá que el módulo izquierdo lo está esperando por lo que activará su interrupción y enviará su información. El módulo izquierdo, al detectar la respuesta del módulo derecho, simplemente capturará una imagen, enviará la información y restablecerá su interrupción para la siguiente iteración.

Como resultado final, cada vez que la aplicación móvil solicite información al DCIE, el módulo ESP32-CAM izquierdo enviará datos de aceleración y orientación proporcionados por la IMU así como la imagen izquierda, mientras que el módulo ESP32-CAM derecho enviará datos sobre el nivel de voltaje de la batería y la imagen derecha del sistema estéreo.

3.3.3. Programa para determinar el nivel de voltaje en la batería del DCIE

Se implementó un programa simple e independiente en el microcontrolador ATtiny85 para llevar a cabo la lectura analógica del nivel de voltaje en la batería y transmitir esta información hacia el módulo ESP32-CAM derecho mediante el protocolo I2C. La biblioteca TinyWireS [35] permitió asignar al ATtiny85 el rol de dispositivo esclavo en dicho protocolo.

Cada dos segundos el programa realiza una lectura analógica del nivel de voltaje de la batería. Para reducir la variación de las lecturas se aplica, a manera de filtro, una operación de media ponderada entre el valor acumulado y el valor actualizado del nivel de voltaje. El ATtiny85 envía la información filtrada del nivel de voltaje de la batería cada vez que el módulo ESP32-CAM lo solicita.

3.4. Carcasa y soporte para el dispositivo de captura de imágenes

Para contener y proteger los componentes electrónicos del DCIE se diseñaron dos carcasas con forma de prisma rectangular. La carcasa superior contiene los módulos ESP32-CAM, el módulo MPU6050, el microcontrolador ATtiny85 y el regulador de voltaje; y la carcasa inferior, la batería Li-Ion.

Las carcasas se construyeron con PLA mediante manufactura aditiva con la ayuda de una máquina *Dremel 3D20*. Se empleó el software CAD *Autodesk Inventor* para el diseño de los modelos 3D en formato STL y el programa *Digilab Slicer* para la creación de los códigos G utilizados en la manufactura. Los planos de las carcasas diseñadas se encuentran en el Apéndice D de este trabajo.

Como ya se ha descrito, la parte del DCIE que contiene las cámaras se colocará en la cabeza del usuario a la altura de la frente. Para facilitar su equipamiento se agregaron a la carcasa superior unas estructuras similares a las varillas de unos lentes y un soporte intercambiable que ayuda a sostener el dispositivo sobre unos lentes o directamente sobre la nariz. Las varillas son tipo telescópicas y cuentan con bisagras para hacer que el DCIE sea lo más parecido posible a unos lentes respecto a la manera de equipar y guardar el dispositivo.

La carcasa superior cuenta con dos aberturas en la parte frontal por las cuales sobresalen las cámaras, una abertura posterior a través de la cual sale el cable que conecta la batería y dos aberturas laterales para permitir la ventilación de los módulos ESP32-CAM. La carcasa que contiene la batería tiene una abertura en la parte superior en la cual se ubica un conector para permitir la carga de la batería y la conexión con el DCIE, a un costado hay un espacio que permite el accionamiento del interruptor que activa la batería. Asimismo, para sujetar la batería al brazo de la persona, la carcasa cuenta con asas en los costados que permiten sujetar una correa que rodea el brazo y se fija con velcro. Dado que los objetivos de este trabajo se enfocan en el correcto funcionamiento del algoritmo de detección de obstáculos y en la retroalimentación al usuario, la forma y acabados de las carcasas son muy simples.



Figura 3.2: Carcasas del DCIE.

Capítulo 4

Aplicación móvil

El análisis de la información obtenida por el DCIE y la determinación de las señales de retroalimentación para el usuario se llevarán a cabo a través de una aplicación móvil desarrollada para un teléfono inteligente con sistema operativo Android y escrita en lenguaje de programación Java. El dispositivo móvil empleado para el desarrollo de la aplicación es un teléfono inteligente Motorola Moto G20 con sistema operativo Android 11, el dispositivo cuenta con un procesador Unisoc Tiger T700 de 8 núcleos a 1.8 GHz y 4 GB de memoria RAM.

El software se encargará de llevar a cabo la mayor parte de procesamiento del EAM. La aplicación recibirá las imágenes estéreo y la información de movimiento obtenidas por el DCIE a través de una conexión Wi-Fi, llevará a cabo el procesamiento y análisis necesarios para determinar la presencia de obstáculos en el entorno en el que se encuentra el usuario y producirá señales de control para los brazaletes que serán transmitidas mediante una conexión Bluetooth.

El análisis y procesamiento de las imágenes se llevará a cabo con la ayuda de la biblioteca de código abierto OpenCV [36]. Esta biblioteca es una herramienta empleada en proyectos de visión por computadora que proporciona una gran variedad de algoritmos para procesar y analizar imágenes.

4.1. Conexión inalámbrica del EAM

4.1.1. Conexión con el DCIE

Para llevar a cabo la recepción a través de Wi-Fi de las imágenes estéreo y la información del estado de movimiento del usuario obtenidos por el DCIE se agregó a la aplicación Android la funcionalidad de establecer conexiones inalámbricas con otros dispositivos empleando el estándar Wi-Fi Direct (también conocido como Peer-to-peer (P2P)) [37]. Esta norma permite el intercambio de información entre dispositivos sin la necesidad de que estén conectados al mismo punto de acceso Wi-Fi [38]. De esta manera, el teléfono inteligente puede comunicarse con el DCIE sin desconectarse de alguna red Wi-Fi.

Cada módulo ESP32-CAM del DCIE actúa como un cliente Wi-Fi. La aplicación en el dispositivo Android crea un grupo P2P al cual cada módulo ESP32-CAM se conecta empleando credenciales de acceso definidas en la creación del grupo. Bajo esta configuración, el teléfono inteligente actúa como un punto de acceso Wi-Fi para el DCIE.

4.1.2. Conexión con los brazaletes

Cada brazalete dispone de un módulo Bluetooth HM10 para establecer comunicación con el teléfono inteligente a través de la tecnología Bluetooth Low Energy (BLE). El intercambio de información entre dispositivos con esta tecnología se lleva a cabo de acuerdo con el perfil GATT y el protocolo ATT. Esta manera de transmitir información se basa en el uso de servicios y características. Los datos que se comparten entre dos dispositivos se almacenan en una característica, un servicio puede agrupar a una o más características. Ambos tipos de atributos son identificados a través de una cadena de caracteres llamada UUID [39].

La aplicación móvil establece una conexión con cada brazalete empleando la dirección MAC del módulo HM10 correspondiente. Una vez que la conexión se establece, la aplicación accede al servicio y a la característica predefinidos en el módulo Bluetooth para la transmisión de datos. El acceso de la aplicación móvil a estos atributos de los módulos HM10 le permite comunicarse con el software de los brazaletes para enviar datos para el control de la vibración y para recibir información sobre el nivel de carga de la batería de los dispositivos.

4.2. Intercambio de información con el DCIE

4.2.1. Establecimiento de la comunicación con el DCIE

En el momento en que el DCIE y ambos brazaletes tienen una conexión activa con la aplicación móvil se habilita al usuario la opción de activar el EAM mediante un botón en la interfaz. Cuando el usuario enciende el equipo, se inicia en la aplicación un subproceso encargado de ejecutar y administrar el intercambio de datos con el DCIE a través de un servidor basado en el protocolo TCP/IP. El servidor es accesible para los módulos ESP32-CAM que componen el DCIE a través de la dirección IP del teléfono inteligente y el puerto 8888.

Cuando el servidor acepta una conexión espera a que el cliente (módulo ESP32-CAM) se identifique mediante el envío de una serie de cuatro bytes. Esta información ayuda a la aplicación a reconocer al cliente como parte del EAM y a interpretar correctamente la información este envíe. Los clientes pueden ser reconocidos como *cámara izquierda* y como *cámara derecha*. Cuando el cliente es reconocido por la aplicación, el programa envía como respuesta configuraciones para ajustar los parámetros de la captura de imágenes del DCIE.

4.2.2. Recepción e interpretación de la información obtenida por el DCIE

Cada vez que la aplicación está lista para recibir un nuevo par de imágenes estereo envía un comando a cada módulo ESP32-CAM del DCIE. Cada módulo envía al servidor, después del respectivo proceso de sincronización y captura, una imagen codificada y comprimida en formato JPEG precedida por una serie de bytes extra que contienen datos de orientación y aceleración obtenidos por el módulo MPU6050 en el caso del módulo izquierdo, y datos sobre el nivel de batería del DCIE cuando se trata del módulo derecho.

Los primeros 16 bytes de cada paquete enviado por el módulo ESP32-CAM izquierdo contienen 4 variables tipo float que almacenan las componentes de un cuaternión unitario que representa la orientación del DCIE, los siguientes 12 bytes son las 3 componentes de un vector unitario que indica la dirección de la aceleración de la gravedad en variables tipo float, después se tienen 6 bytes

que contienen 3 variables tipo short que indican la magnitud relativa de la aceleración detectada por el módulo MPU6050 en el rango $\pm 2G$ (± 2 veces la aceleración de la gravedad). Los últimos dos bytes son banderas de control que delimitan la sección (Fig. 4.1).

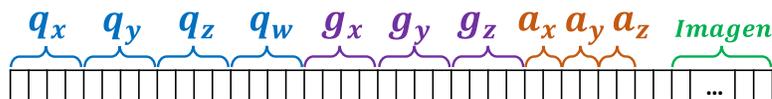


Figura 4.1: Estructura del paquete de datos enviado por la cámara izquierda.

En el caso del módulo ESP32-CAM derecho (Fig. 4.2), el primer byte indica el nivel relativo de voltaje de la batería del DCIE respecto al rango 0 - 5 V, el segundo byte delimita la sección. Cuando se habla de un valor relativo a un rango, se considera que todos los valores que una variable puede tomar de acuerdo a su tipo de dato pueden ser mapeados a valores correspondientes en el rango de salida. Por ejemplo, en el caso del nivel de voltaje de la batería, la variable tipo byte en la que se almacena el dato puede tomar valores desde 0 hasta 255, cada uno de estos posibles valores puede ser mapeado a un valor de voltaje en el rango de 0 V a 5 V.



Figura 4.2: Estructura del paquete de datos enviado por la cámara derecha.

Después de que las variables contenidas en los primeros bytes de cada paquete de datos enviado por los módulos ESP32-CAM ya han sido obtenidas, con el resto de bytes se decodifica la imagen JPEG correspondiente. Las imágenes codificadas en formato JPEG tienen la característica de que los bytes al inicio y al final del archivo no cambian, de manera que es fácil determinar cuando un módulo ESP32-CAM ya ha mandado un paquete de datos completo.

Una vez terminado el proceso de la transmisión de la información obtenida por el DCIE, la aplicación móvil cuenta con un par de imágenes estéreo, además de datos de orientación, aceleración y nivel de voltaje de la batería del dispositivo.

4.2.3. Frecuencia de actualización de la información

Dado el contexto en el que se emplea la Tecnología de Asistencia para movilidad, es de gran importancia que el equipo propuesto proporcione retroalimentación al usuario en el menor tiempo posible una vez que reciba la información del entorno. Esta característica del EAM lo puede catalogar como una aplicación en tiempo real.

Las aplicaciones en tiempo real tienen la característica de que el tiempo que pasa desde que el sistema recibe una entrada y produce una salida es tan pequeño que el usuario percibe la respuesta del sistema como inmediata. Miller [40] indica que el intervalo de tiempo necesario para que esto suceda no debe exceder los 100 ms. Esto establece un límite máximo en el tiempo de procesamiento del EAM que será tomado en cuenta para la implementación de los algoritmos de análisis de las imágenes estéreo.

La tasa de actualización de las señales para proporcionar retroalimentación al usuario es inversamente proporcional al tiempo de procesamiento de cada par de imágenes estéreo. Aunque se espera que el análisis de las imágenes estéreo se lleve a cabo en menos de 60 ms, se decidió procesar 12 pares de imágenes por segundo para mantener moderada la carga computacional del teléfono inteligente y con ello el consumo energético de este.

Con el límite propuesto en el tiempo de procesamiento de las imágenes estéreo se busca que el usuario no note un retraso significativo de la retroalimentación proporcionada por los brazaletes respecto a la información que pudiera obtener por medio de otros sentidos como el oído o el tacto. Asimismo, se espera que la tasa de actualización de las señales de retroalimentación permita al usuario reaccionar a tiempo sobre cualquier cambio repentino en el entorno.

4.3. Preprocesamiento de las imágenes

Cuando el usuario activa el EAM, junto con el subproceso encargado de recibir la información del DCIE, la aplicación móvil inicia un subproceso en el cual se lleva a cabo el procesamiento y análisis de las imágenes estéreo. Ambos subprocesos se mantienen sincronizados para que en el momento en que la aplicación reciba un nuevo par de imágenes estas sean analizadas inmediatamente.

Las imágenes capturadas por el DCIE tienen una resolución de 160 x 120 píxeles (QQVGA) y tres canales de color RGB con un byte de información por cada canal de cada píxel. Se decidió trabajar con esta resolución ya que durante la etapa de desarrollo de este trabajo fue posible observar una reducción en el tiempo de transmisión de las imágenes desde el DCIE, así como una reducción en la carga computacional del dispositivo móvil sin perder calidad en los resultados.

4.3.1. Rectificación y corrección de distorsión

Como se mencionó en el Capítulo 1, para llevar a cabo el análisis de profundidad en sistemas estéreo horizontales es necesario que las imágenes capturadas cumplan con las siguientes características principales: las imágenes deben estar contenidas en un mismo plano paralelo al plano XY del sistema de referencia del sistema estéreo y cada línea de píxeles en una imagen debe estar alineada horizontalmente con la línea de píxeles correspondiente en la vista de la otra imagen.

Cuando se realiza el montaje del arreglo de cámaras estéreo se puede buscar que ambas cámaras queden lo mejor alineadas y derechas, pero aún así es necesario llevar a cabo el proceso de rectificación y corrección de distorsión para asegurar que las imágenes obtenidas cumplen las características necesarias para llevar a cabo correctamente el proceso de análisis estéreo. La biblioteca OpenCV proporciona un algoritmo que permite realizar el proceso de calibración estéreo para así obtener los parámetros necesarios para llevar a cabo la rectificación y la corrección de la distorsión de las imágenes [41].

Para realizar la calibración del sistema de cámaras estéreo se necesita un patrón tipo tablero de ajedrez como el que se muestra en la Figura 4.3a. El patrón de calibración consta de un arreglo de cuadrados negros sobre un fondo blanco, cada punto en el que se tocan las esquinas de dos cuadrados adyacentes se considera como un punto de referencia para la calibración. El patrón tiene un número definido de puntos de referencia así como una distancia vertical y horizontal entre puntos conocida. El patrón de calibración utilizado en este trabajo tiene 9 columnas y 6 filas de puntos de referencia, los cuales están separados horizontal y verticalmente una distancia de 30 mm (Figura 4.3b).

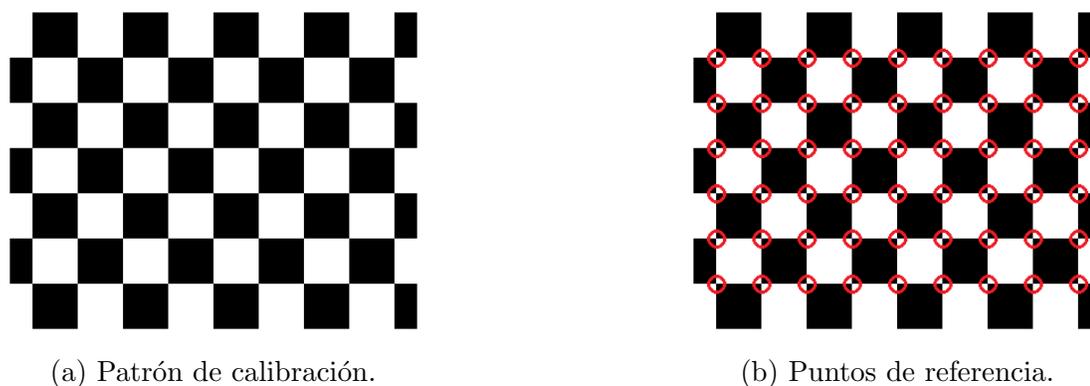


Figura 4.3: Patrón de calibración para el sistema de cámaras estéreo. Los círculos color rojo señalan los puntos de referencia del patrón de calibración.

El patrón de calibración debe ser colocado sobre una superficie plana. Con el arreglo estéreo de cámaras se deben capturar pares de imágenes del patrón cambiando su posición para que pueda ser visto por las dos cámaras desde diferentes perspectivas. Dado que la posición relativa de los puntos del patrón es conocida y se sabe que los puntos se encuentran contenidos en un plano, es posible determinar a partir de la posición de los puntos en las imágenes si estas presentan algún tipo de distorsión producida por las lentes así como los parámetros que producen esa distorsión. De forma similar, con la información conocida de los puntos del patrón y sus proyecciones sin distorsión en las imágenes es posible conocer la disposición geométrica de las cámaras entre sí.

Como resultado del proceso de calibración obtenemos dos tipos de parámetros para el sistema de cámaras estéreo: intrínsecos y extrínsecos. Los parámetros intrínsecos están relacionados con las características propias de cada cámara y la imagen que captura, estos incluyen la distancia focal f , el punto principal (c_x, c_y) y los coeficientes de distorsión de la imagen. Los parámetros extrínsecos describen la posición relativa de las cámaras a través de un vector de traslación y una matriz de rotación.

Una vez que se cuentan con los parámetros intrínsecos y extrínsecos del arreglo estéreo de cámaras se pueden emplear las funciones *stereoRectify()*, *initUndistortRectifyMap()* y *remap()* de la biblioteca OpenCV para remover la distorsión de las imágenes y rectificarlas (Fig. 4.4).

4.3.2. Reducción de ruido

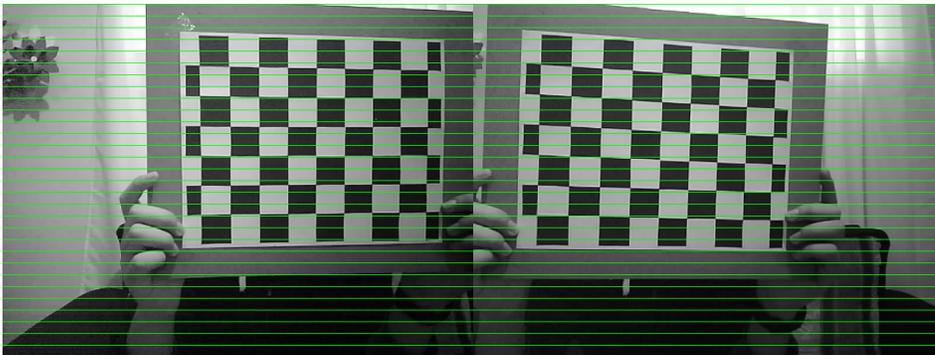
Es frecuente observar en imágenes codificadas en formato JPEG puntos de ruido introducidos por el proceso de compresión. El ruido en las imágenes estéreo puede provocar que las operaciones o análisis que se hagan con ellas se vean ligeramente afectados. Para evitar este efecto negativo se puede tratar de reducir el ruido en las imágenes realizando en ellas un proceso de difuminado, este es uno de los procedimientos de filtrado más simples que se puede aplicar a una imagen.

El proceso de difuminado y, en general, los proceso de filtrado son operaciones en las que se realiza la convolución en dos dimensiones de una matriz llamada kernel o filtro con una imagen. La convolución 2D puede verse como un procedimiento en el cual el valor de cada pixel de la imagen resultante se obtiene a partir de una operación realizada empleando los valores de los pixeles que se encuentran dentro de la región delimitada por el kernel alrededor del pixel correspondiente en la imagen original y los valores del mismo filtro [42]. Se pueden obtener resultados diferentes en el difuminado modificando la magnitud y distribución de los pesos en el kernel o cambiando las dimensiones del mismo.

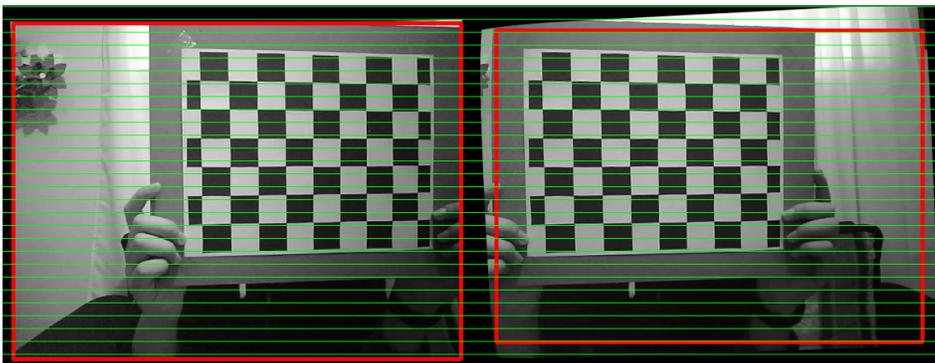
Algunos de los procedimientos de difuminado más comunes son el filtrado simple (promedio) que utiliza un kernel como el que se muestra en la Ecuación 4.1, el filtrado Gaussiano (Ecuación 4.2) y el filtrado por mediana, que no realiza operaciones con el kernel sino que calcula la mediana de los valores de los píxeles dentro del área del filtro [42]. En la Figura 4.5 se muestra el efecto que tienen en el difuminado de una imagen los filtros antes mencionados. Se emplearán algunos de estos métodos en diferentes partes del análisis realizado a las imágenes estéreo para reducir el ruido de las imágenes y con esto obtener mejores resultados.

$$K_m = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$K_g = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$



(a) Imágenes estéreo originales.



(b) Imágenes estéreo rectificadas.

Figura 4.4: Corrección de distorsión y rectificación de un par de imágenes estéreo. Las líneas color verde permiten verificar que los puntos correspondientes de cada imagen rectificadas comparten la misma coordenada vertical y . Los marcos color rojo delimitan la región válida de cada imagen rectificadas.



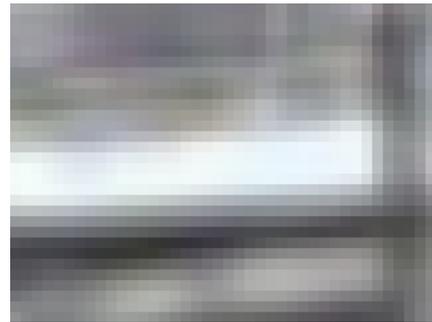
(a) Imagen original.



(b) Detalle de la imagen original.



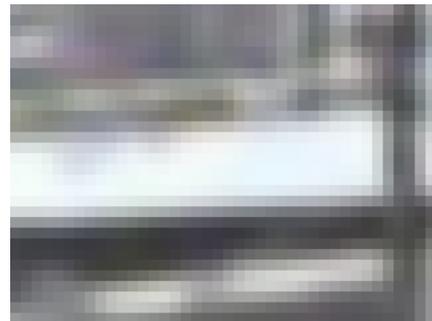
(c) Imagen difuminada con filtrado promedio.



(d) Detalle del filtrado promedio.



(e) Imagen difuminada con filtrado Gaussiano.



(f) Detalle del filtrado Gaussiano.



(g) Imagen difuminada con filtrado por mediana.



(h) Detalle del filtrado por mediana.

Figura 4.5: Difuminado de una imagen con diferentes filtros. El recuadro amarillo indica la zona de detalle mostrada en la segunda columna.

4.3.3. Corrección gamma

La cámara OV2640 incluida en el módulo ESP32-CAM dispone de algunas características de ajuste automático en el control de exposición, en el balance de blancos, en el control de ganancia, entre otras. El autoajuste de estos parámetros produce imágenes con buen balance de iluminación en la mayoría de los casos. Sin embargo, en algunas escenas con un alto contraste entre luz y sombra, los ajustes de la cámara se adaptan a la zona iluminada y hacen que la zona de la imagen con baja iluminación tienda a verse más oscura de lo que es en realidad, dificultando la búsqueda de obstáculos en esa región. Para tratar de compensar este desbalance de iluminación se implementó un proceso de corrección gamma. La corrección gamma es una operación no lineal que se aplica a una imagen para balancear los niveles de iluminación [43]. En este proceso cada pixel en la imagen con iluminación corregida se relaciona con el pixel correspondiente de la imagen original a través de la siguiente ecuación:

$$I'_{x,y} = 255 \left(\frac{I_{x,y}}{255} \right)^\gamma \quad (4.3)$$

donde $I_{x,y}$ es el valor del pixel en la imagen original, $I'_{x,y}$ es el valor del pixel con iluminación corregida, y γ es el parámetro que ajusta el nivel de corrección.

En la Figura 4.6 se muestra el efecto que diferentes valores del parámetro γ tienen en la corrección de la iluminación. Como se puede observar, valores de $\gamma < 1$ incrementan considerablemente la luminosidad de pixeles oscuros al mismo tiempo que mantienen en un nivel similar la luminosidad de pixeles con luz abundante.

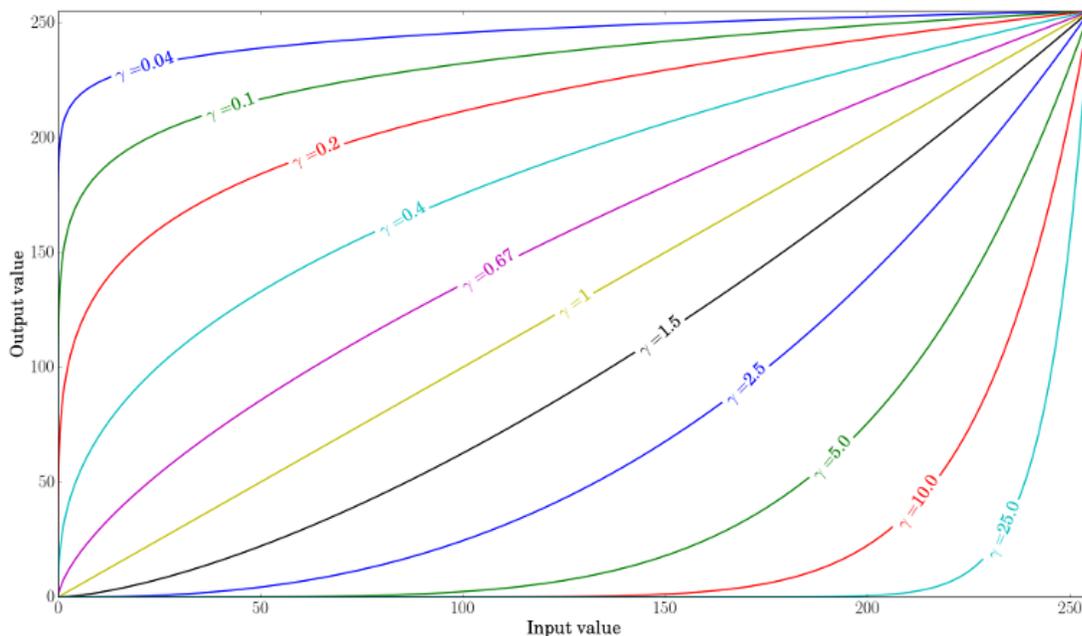


Figura 4.6: Efecto del parámetro γ en la corrección de la iluminación de una imagen. [43]

Durante el desarrollo del proyecto fue posible determinar que un valor de $\gamma = 0.6$ permitía balancear la iluminación de las imágenes estéreo lo suficiente para resaltar detalles de la escena ocultos en zonas muy oscuras (Figura 4.7).



(a) Imagen original.

(b) Imagen con iluminación corregida ($\gamma = 0.6$).

Figura 4.7: Balanceo de la iluminación de una imagen empleando corrección gamma.

4.3.4. Análisis de textura

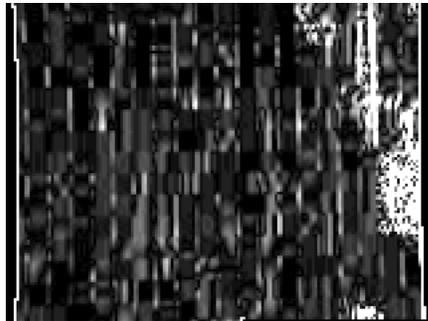
Como se ha mencionado previamente, el análisis estéreo es un proceso que se basa en la capacidad de poder determinar la correspondencia de un mismo objeto o punto visto desde dos imágenes capturadas en perspectivas diferentes para determinar la disparidad que presenta y así conocer su ubicación en el espacio. Cuando las imágenes estéreo no cuentan con información gráfica (textura) suficiente o clara, los algoritmos que se pueden emplear para encontrar correspondencias entre las imágenes tienen dificultades para proporcionar resultados correctos. Esto puede ocurrir con escenas que incluyen regiones de un mismo color o patrones repetitivos.

De acuerdo con el uso del EAM, se pueden presentar situaciones en las cuales la persona se encuentra de frente a una pared. Cuando esto ocurre, es posible que las imágenes capturadas presenten las características mencionadas anteriormente, esto abre la posibilidad de que no se pueda detectar correctamente la pared como un obstáculo y que no se avise de manera oportuna al usuario de esta situación. Para prevenir estos casos, antes de analizar las imágenes en busca de obstáculos se lleva a cabo un proceso para determinar el *nivel de textura* presente en la escena. Cuando este análisis concluye que las imágenes no presentan textura suficiente se determina que el usuario se encuentra frente a una pared y se indica directamente la presencia del obstáculo.

El *nivel de textura* de una escena (Fig. 4.8) se puede determinar a partir de la cantidad de bordes presentes en la imagen. El método empleado para detectar estas características se basa en el filtrado de las imágenes utilizando el operador de Scharr [44] que se muestra en la Ecuación 4.4. El resultado que se obtiene al realizar este procedimiento es una nueva imagen (Figs. 4.8c y 4.8d) en la que la intensidad de cada pixel representa la magnitud del cambio, a lo largo de un mismo eje, de los valores de los pixeles presentes en la imagen original. Los cambios de color en las imágenes normalmente ocurren en los bordes de los objetos, por lo que la nueva imagen destaca estas características.

Para conservar los bordes más representativos de la escena, se descartan de la imagen filtrada los pixeles que indican un cambio de color mínimo en la imagen original. Este nuevo procedimiento produce una imagen binaria en la que los bordes detectados se indican con color blanco (Figs. 4.8e y 4.8f). La proporción del número de pixeles que representan bordes respecto al total de pixeles de la imagen puede interpretarse como un indicador del *nivel de textura* que presenta la escena.

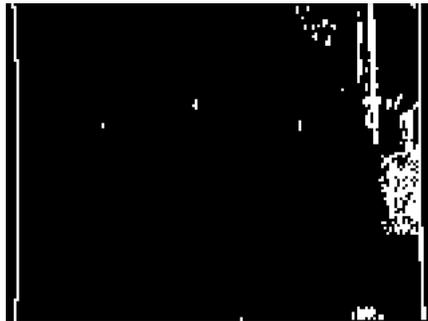
$$K_s = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 3 \\ -10 & 0 & 10 \\ -3 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

(a) Imagen con bajo *nivel de textura*.(b) Imagen con alto *nivel de textura*.

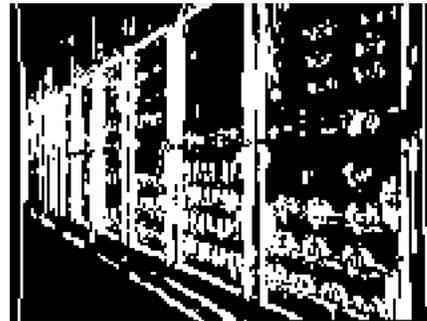
(c) Imagen filtrada con el operador de Scharr en la dirección X (Valores normalizados).



(d) Imagen filtrada con el operador de Scharr en la dirección X (Valores normalizados).



(e) Bordes detectados.



(f) Bordes detectados.

Figura 4.8: Análisis de dos escenas con diferente *nivel de textura*.

4.4. Obtención de mapas de disparidad

Un mapa de disparidad es una matriz asociada a un par de imágenes estéreo en la cual cada elemento indica el valor de disparidad que tiene el pixel en la posición correspondiente de una imagen respecto a la otra. Para visualizar el concepto de disparidad se puede tomar como ejemplo el par de imágenes estéreo rectificadas y sin distorsión mostradas en la Figura 4.9. El punto tridimensional P puede ser visto desde ambas imágenes, sin embargo, su proyección en el plano XY' (ver Figura 1.11) tendrá diferentes coordenadas en el sistema de referencia de cada imagen. En la imagen izquierda estas coordenadas son $(x_l = 35, y_l = 45)$ mientras que en la imagen derecha son $(x_r = 26, y_r = 45)$. La diferencia $d = x_l - x_r = 9$ es el valor de disparidad asociada al punto P que será almacenado en la posición d_{y_l, x_l} de la matriz que representa el mapa de disparidad D . Este procedimiento se lleva a cabo para la mayor cantidad de puntos captados por ambas cámaras.



Figura 4.9: Ejemplo de disparidad.

Para obtener el mapa de disparidad que nos permita reprojectar cada pixel en la imagen izquierda al punto correspondiente en el espacio con la ayuda de las Ecuaciones 1.1 - 1.3 es necesario encontrar todas las correspondencias que existen entre el par de imágenes estéreo. Los seres humanos podemos encontrar dichas correspondencias con facilidad, pero una computadora requiere llevar a cabo análisis complejos para determinar que un determinado pixel (o conjunto de pixeles) en cada imagen representan el mismo objeto en el espacio.

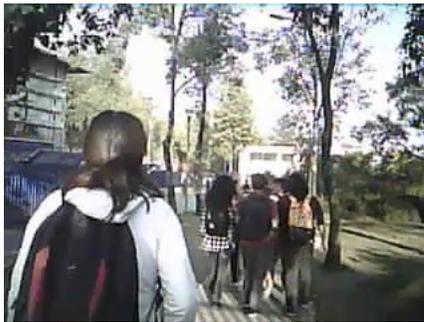
Existen diversos algoritmos que se pueden emplear para obtener mapas de disparidad a partir de pares de imágenes estéreo. Entre los más conocidos y utilizados se encuentran Block Matching (BM) [45], Semi-Global Matching (SGM) [46] y Semi-Global Block Matching (SGBM) [47]. La idea básica de la búsqueda de correspondencias en imágenes estéreo para obtener información de disparidad consiste en tomar una pequeña región de una imagen, a veces un solo pixel, y buscar el mismo patrón en la otra imagen. El área de búsqueda puede estar restringida por la disposición geométrica del arreglo de cámaras estéreo como es el caso cuando las imágenes están rectificadas horizontalmente y sin distorsión. Cuando esto se cumple, la búsqueda del patrón se limita a la región de la imagen que tiene la misma coordenada vertical que la muestra. Se suele asignar un valor de costo a cada posible correspondencia encontrada y se selecciona aquella que minimiza el criterio de costo.

Desde las primeras etapas de desarrollo del proyecto, SGBM fue el algoritmo que más se utilizó para evaluar el funcionamiento del sistema de cámaras estéreo implementado en el EAM. Como alternativa para la obtención de información de disparidad, se consideró la posibilidad de emplear un algoritmo de búsqueda de correspondencias entre imágenes estéreo basado en el emparejamiento de puntos clave [48]. Sin embargo, de acuerdo con las características necesarias de la nube de puntos 3D para llevar a cabo correctamente la búsqueda de obstáculos, se decidió continuar con SGBM. Se seleccionó este algoritmo porque la información de profundidad que se puede obtener a partir del mapa de disparidad presenta la densidad de puntos necesaria para detectar objetos muy específicos en las escenas como lo son las paredes o muros.

4.4.1. Algoritmo SGBM

La biblioteca OpenCV proporciona la implementación del algoritmo SGBM [47] para obtener mapas de disparidad a partir de imágenes estéreo. Los mapas de disparidad que se pueden obtener con este algoritmo tienen un alto nivel de precisión (Fig. 4.10b). Sin embargo, SGBM no está exento de las limitaciones que se pueden presentar en la búsqueda de correspondencias en dos imágenes como lo es la falta de textura o la obstrucción de objetos, y aunque el algoritmo implementa algunas etapas de filtrado, el mapa de disparidad final puede contener algunas regiones de información nula o errónea.

Para mejorar la calidad del mapa de disparidad obtenido con SGBM se puede llevar a cabo una etapa de filtrado adicional empleando un filtro suavizador basado en Mínimos Cuadrados Ponderados (WLS) implementado en la biblioteca OpenCV [49]. Este filtro se apoya de la imagen original para tratar de completar disparidades en regiones donde SGBM no pudo encontrar correspondencias (Fig. 4.10c). Además, la implementación del filtro WLS permite conocer el mapa de confianza asociado al mapa de disparidad filtrado, lo cual ayuda a descartar del mapa de disparidad valores con un nivel elevado de incertidumbre (Fig. 4.10d).



(a) Imagen izquierda original.



(b) Mapa de disparidad obtenido con SGBM.



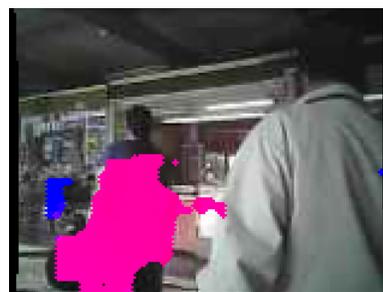
(c) Mapa de disparidad filtrado con WLS.



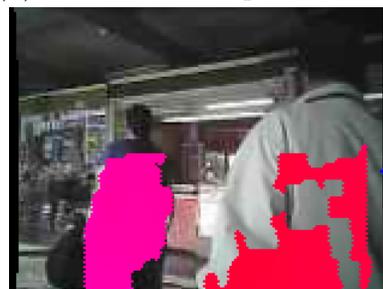
(d) Mapa de disparidad con alto nivel de confianza.

Figura 4.10: Procesamiento del mapa de disparidad obtenido con SGBM.

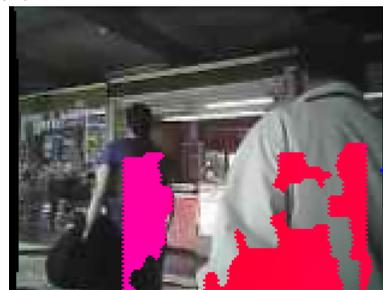
Como se puede observar en la Figura 4.10b, en la parte izquierda del mapa de disparidad hay una región que no tiene información. El ancho de esta región está asociado a un parámetro del algoritmo SGBM llamado *numDisparities* el cual indica, en esta implementación, el valor máximo que se puede presentar en el mapa de disparidad. Este parámetro es importante porque está relacionado con la distancia mínima en la que puede ser detectado un objeto con el arreglo de cámaras estéreo. Mientras este parámetro tenga un valor elevado será posible detectar objetos más cerca de las cámaras como se muestra en la Figura 4.11.

(a) Mapa de disparidad ($numDisparities = 16$).

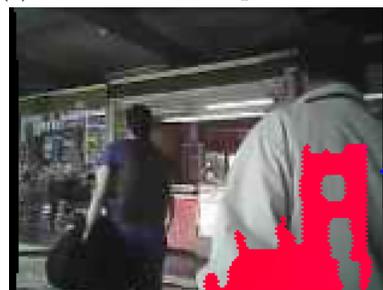
(b) Información de profundidad.

(c) Mapa de disparidad ($numDisparities = 32$).

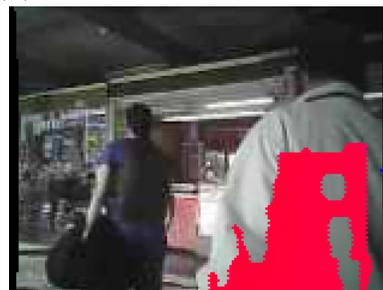
(d) Información de profundidad.

(e) Mapa de disparidad ($numDisparities = 48$).

(f) Información de profundidad.

(g) Mapa de disparidad ($numDisparities = 64$).

(h) Información de profundidad.

(i) Mapa de disparidad ($numDisparities = 80$).

(j) Información de profundidad.

Figura 4.11: Efecto del parámetro $numDisparities$ en la distancia mínima detectada. Los puntos más cercanos al sistema estéreo se indican en color rojo, mientras que los puntos más lejanos en color azul.

Para que no se omita ningún objeto en el análisis realizado por la aplicación móvil para determinar obstáculos es necesario disponer del rango de detección de objetos más amplio posible. Esto implica asignar un valor alto a la disparidad máxima permitida, sin embargo, esto reduce la cantidad de información disponible en el mapa de disparidad obtenido. Una forma de compensar la *pérdida de información* que se produce al modificar este parámetro consiste en llevar a cabo el mismo proceso de emparejamiento y filtrado intercambiando e invirtiendo horizontalmente las imágenes estéreo. Dado que el algoritmo SGBM considera a la imagen izquierda como la referencia para buscar correspondencias en la otra imagen, el mapa de disparidad que se obtiene presenta una región sin información del lado izquierdo (Fig. 4.12a). Al intercambiar e invertir las imágenes se obtendrá otro mapa de disparidad (referente a la vista derecha) ahora con una región inválida del lado derecho (Fig. 4.12b). De esta manera, ambos mapas de disparidad se complementarán y el efecto negativo que se tenía respecto a las regiones sin información de disparidad queda prácticamente anulado.



(a) Imagen izquierda con información de profundidad respecto a la imagen derecha.



(b) Imagen derecha con información de profundidad respecto a la imagen izquierda.

Figura 4.12: Mapas de disparidad complementarios.

Debido a que el cómputo de dos mapas de disparidad incrementa la carga de trabajo de la Aplicación Móvil fue necesario disminuir la resolución de las imágenes estéreo para reducir al mínimo el tiempo de procesamiento requerido en esta etapa. Se determinó que una resolución de imagen de 160 x 120 píxeles (QQVGA) permitía obtener buenos resultados en un intervalo de tiempo relativamente corto. En el dispositivo de desarrollo este intervalo de tiempo es de 25 ms en promedio.

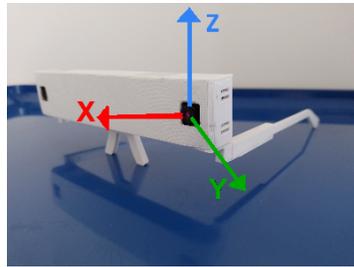
4.5. Detección de obstáculos y señal de retroalimentación

4.5.1. Cálculo de nube de puntos

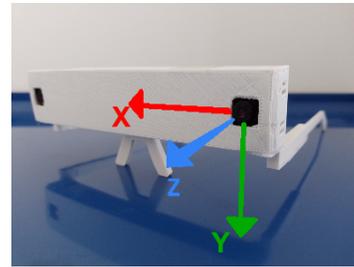
Las Ecuaciones 1.1 - 1.3 descritas en el primer capítulo permiten determinar la ubicación tridimensional, en el sistema de referencia del sistema estéreo (Fig. 1.11), de cada uno de los puntos visibles en la escena a partir del mapa de disparidad obtenido con SGBM.

El análisis de los puntos 3D para la búsqueda de obstáculos se lleva a cabo considerando un sistema de referencia global (Fig. 4.13a). El origen de este sistema de referencia se encuentra ubicado sobre el DCIE, el eje Z sigue la dirección de la aceleración de la gravedad, por lo que el plano definido por los ejes X y Y es un plano horizontal, la dirección de estos últimos ejes es arbitraria pero debe cumplirse que todos los ejes sean ortogonales entre sí.

Para transformar las coordenadas de los puntos 3D del sistema de referencia local del DCIE al sistema de referencia global se emplea la información de orientación proporcionada por el módulo MPU6050. Este sensor permite conocer su rotación respecto a una orientación inicial a través de un cuaternión. En el DCIE, el módulo MPU6050 está colocado de manera que sus ejes coinciden con los ejes del sistema estéreo (Fig. 4.13b). Esta disposición facilita el cambio de coordenadas de los puntos 3D ya que si el dispositivo es inicializado haciendo coincidir su eje Z con la dirección de la aceleración de la gravedad, se pueden emplear las Ecuaciones 1.7 - 1.9 para determinar las coordenadas de los puntos 3D respecto al sistema de referencia global (orientación inicial del DCIE) mediante un proceso de rotación de vectores.



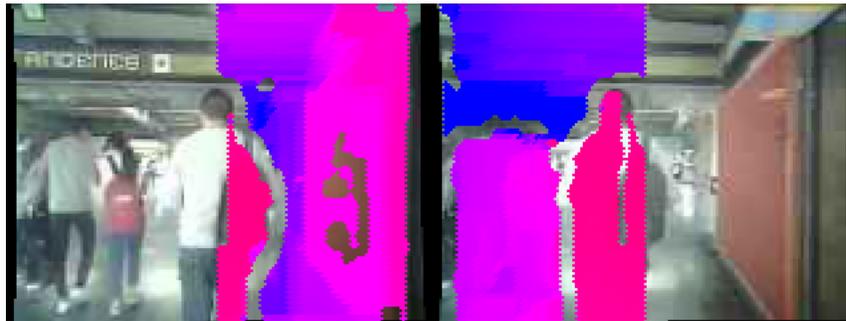
(a) Sistema de referencia global.



(b) Sistema de referencia local.

Figura 4.13: Sistemas de referencia.

El análisis que se realiza para determinar la presencia de obstáculos considera puntos que se encuentren dentro de un rango de altura $[z_{min}, z_{max}]$ alrededor de la persona de acuerdo con el sistema de referencia global. Se decidió realizar este filtrado para evitar que puntos detectados en el suelo o en el techo sean considerados como parte de algún obstáculo (Fig. 4.14).



(a) Información de profundidad sin filtrar.

(b) Información de profundidad para el rango de altura $[z_{min}, z_{max}]$.

Figura 4.14: Filtrado de la información de profundidad obtenida con SGBM.

El análisis de los puntos 3D se enfoca en la búsqueda de obstáculos que representen un riesgo de colisión para la persona. De acuerdo con esta característica, cualquier objeto que sea detectado dentro del rango de análisis vertical $[z_{min}, z_{max}]$ será considerado como un obstáculo y se asumirá que, independientemente de la altura a la que se encuentre, está apoyado sobre el suelo, por lo que la única manera de evitarlo es rodeándolo. Esta consideración permite simplificar la búsqueda de obstáculos ya que no es necesario determinar la altura z en la que se encuentran los objetos, basta con conocer su ubicación en el plano horizontal XY mediante los valores de distancia r y dirección θ . Estos valores son empleados más adelante para determinar los parámetros de control de la vibración de los brazaletes.

4.5.2. Detección de obstáculos sin desplazamiento

La forma más sencilla de determinar la presencia de algún obstáculo consiste en encontrar grupos de puntos y seleccionar entre ellos el grupo más cercano a la persona. Este enfoque facilita el análisis necesario para encontrar obstáculos, pero en algunos casos, como se describirá más adelante, se puede perder continuidad en la retroalimentación proporcionada al usuario.

En las primeras pruebas de funcionamiento del EAM se empleó el método descrito en el párrafo anterior para detectar obstáculos. Este método se desempeñaba muy bien indicando la presencia de objetos al frente de la persona (dentro del rango de visión de las cámaras). Sin embargo, en algunas situaciones, la retroalimentación proporcionada no permitía al usuario hacer coincidir su noción de la posición de los objetos con la vibración generada en los brazaletes. Por ejemplo, si el usuario estaba frente a un obstáculo y volteaba hacia otra dirección en la cual no había ningún objeto, la vibración en los brazaletes se detenía. Esto generaba una pérdida de continuidad en la retroalimentación ya que la vibración en ambos dispositivos le indicaba a la persona que había un objeto al frente, y al voltear hacia otra dirección la persona esperaba que los brazaletes le siguieran indicando la presencia del obstáculo a su costado, acción que en esta primera implementación no ocurría. Esto mismo sucedía con los obstáculos que eran detectados mientras la persona caminaba. Cuando los objetos salían del rango de visión de las cámaras los brazaletes ya no producían ningún tipo de vibración que indicara que los objetos continuaban ahí.

Considerando los comentarios y sugerencias de algunas de las personas participantes en esta primera etapa de pruebas sobre la respuesta del EAM ante las situaciones descritas anteriormente fue posible identificar algunas oportunidades de mejora del equipo en la detección y seguimiento de obstáculos, por lo que se decidió modificar el algoritmo de búsqueda de obstáculos para proporcionar una retroalimentación más *natural* e intuitiva. Para enfocar el análisis realizado en la búsqueda de obstáculos a las características propias de cada situación se planteó realizar diferentes procedimientos de acuerdo con el estado de movimiento de la persona. Las principales situaciones consideradas son cuando la persona se encuentra detenida y cuando la persona camina de frente. En el caso cuando la persona no se desplaza se considera que sí puede dirigir su atención hacia cualquier dirección al rotar sobre el lugar en el que está. Cuando el usuario camina, se asume que lo hace en línea recta de frente y que no gira la cabeza mientras se desplaza.

Se desarrollaron tres métodos de análisis para la detección de obstáculos. Dos de ellos se enfocan en la búsqueda de objetos cuando el usuario no se encuentra en movimiento y el tercero cuando la persona camina. El estado de movimiento del usuario se determina a partir del análisis de la magnitud y el cambio de los valores de aceleración y rotación del DCIE de acuerdo con las consideraciones de movimiento descritas previamente. El usuario puede elegir entre dos modos de funcionamiento cuando no se desplaza de acuerdo con la manera en que quiere recibir información sobre los objetos que se encuentran a su alrededor, el primer modo se denomina *modo global* y

el segundo *modo escáner*. A continuación, se describirán los métodos de análisis empleados en la detección de obstáculos y se definirán los parámetros necesarios para controlar la vibración generada en los brazaletes para comunicar al usuario la información del entorno.

Modo global

En el modo global se lleva a cabo un análisis que permite indicar al usuario la presencia de obstáculos aún cuando estos ya no son visibles para el sistema de cámaras estéreo. Este método utiliza la información de orientación proporcionada por el módulo MPU6050 para estimar la posición de los objetos respecto al sistema de referencia global. Como es posible conocer la dirección en la que el DCIE apunta dentro de este mismo sistema de referencia, se pueden determinar señales de control para los brazaletes considerando esta información y la posición global de los obstáculos detectados.

En este modo de funcionamiento se emplea información de puntos detectados en iteraciones previas para incrementar la cantidad de puntos disponibles para realizar el análisis de búsqueda de obstáculos. Esto se lleva a cabo asignando a cada nuevo punto detectado un *tiempo de vida* en el que puede ser reutilizado. El valor de este parámetro es relativamente corto (500 ms) pero mejora considerablemente la calidad de la nube de puntos disponible para llevar a cabo el análisis (Fig. 4.15). Este tiempo de vida breve solo se asigna a los puntos que permanecen dentro del rango de visión de las cámaras. Cuando la persona cambia de dirección y los puntos dejan de ser visibles se les asigna un nuevo tiempo de vida más prolongado (60 s), esto permite conservarlos en memoria para que puedan ser considerados en la búsqueda de obstáculos aún cuando la persona no esté de frente a ellos.

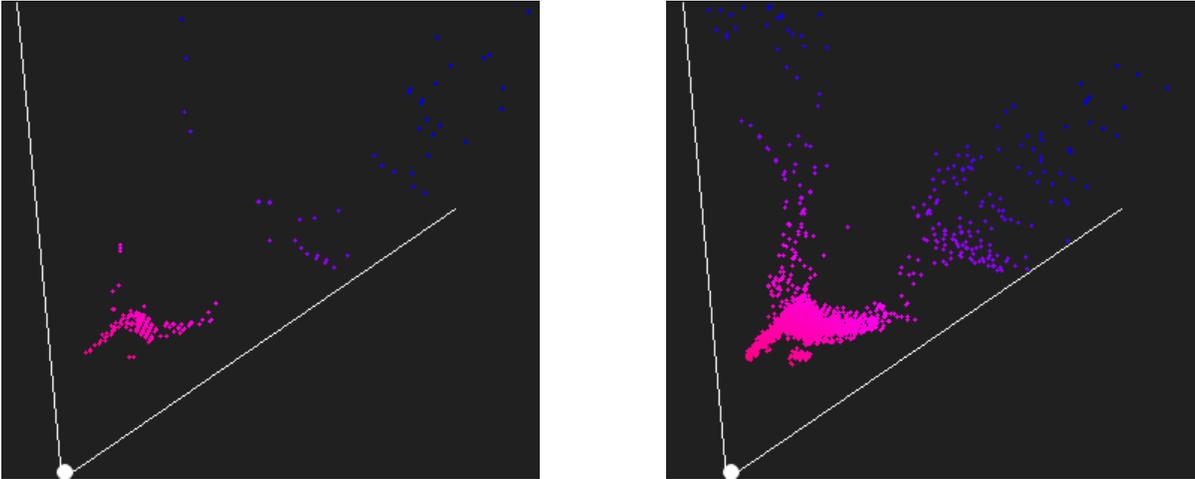
En el modo global y en el modo escáner, la ubicación de los puntos en el plano XY del sistema de referencia global está definida por una distancia $r \in [0, r_{\text{máx}}]$ y una dirección $\theta \in [-\pi, \pi]$. Para simplificar el análisis y filtrar puntos 2D aislados se realiza un proceso de discretización de las coordenadas de los puntos empleando las Ecuaciones 4.5 y 4.6 (el operador $\lfloor \cdot \rfloor$ indica redondeo al número entero más cercano). Se utilizan los parámetros h_r y h_θ para definir el tamaño del paso que cada variable de posición puede tomar. Este procedimiento permite definir un número limitado de posiciones en las que pueden estar ubicados los puntos 2D detectados. Las posiciones definidas mediante la discretización de los puntos están identificadas por un número entero n_k , este valor sigue un orden ascendente y se determina a partir de la Ecuación 4.7. El nivel de distancia r_k en el que se encuentra cada posición permite identificar los puntos que están ubicados a la misma distancia de la persona.

$$r_k = \left\lfloor \frac{r}{h_r} \right\rfloor \quad (4.5)$$

$$\theta_k = \left\lfloor \frac{\theta + \pi}{h_\theta} \right\rfloor \quad (4.6)$$

$$n_k = r_k \frac{2\pi}{h_\theta} + \theta_k \quad (4.7)$$

Es posible visualizar este procedimiento en la Figura 4.16, todos los puntos que se encuentran dentro de cada región delimitada por las líneas grises son discretizados sobre el punto central de color blanco. Cada punto blanco representa una posición, para llevar a cabo el filtrado de puntos aislados se verifica que cada posición cuente con un número mínimo de puntos discretizados y que la proporción de estos respecto al área de la región asociada a la posición sea mayor a un valor mínimo.



(a) Nube de puntos de un instante específico. (b) Nube de puntos con información de iteraciones previas.

Figura 4.15: Nube de puntos para la búsqueda de obstáculos.

Los diagramas muestran una vista superior del plano XY global. El usuario se ubica en el punto blanco, las líneas indican el rango de visión del sistema de cámaras estéreo.

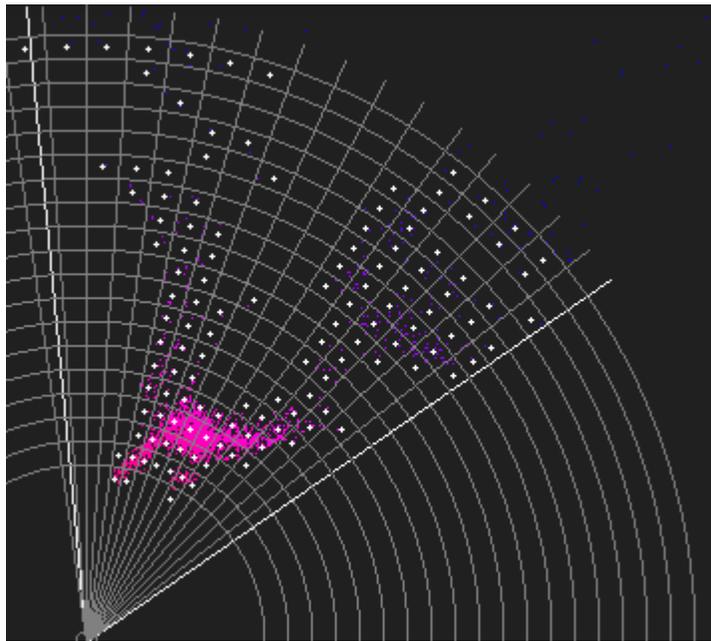


Figura 4.16: Discretización de la nube de puntos para el análisis sin desplazamiento.

El análisis que se realiza para determinar la ubicación de el o los obstáculos más cercanos consiste en identificar el primer nivel de distancia r_k , en orden ascendente, que contiene alguna posición n_k que cuenta con el número mínimo de puntos necesarios para considerar la presencia de un objeto. Todas las posiciones asociadas al mismo nivel de distancia son analizadas para determinar cuáles de ellas contienen puntos que representan un mismo obstáculo. Esto se realiza evaluando si dos posiciones consecutivas cuentan con el número mínimo de puntos válidos respectivo, si es así, se considera que estos puntos son parte de un mismo objeto. La ubicación del obstáculo detectado se obtiene calculando el promedio de las coordenadas de los puntos 2D asociados al objeto.

Es posible que ocurran situaciones en las que existan múltiples obstáculos que se encuentren en el mismo nivel de distancia pero en diferentes direcciones. Para determinar cuál de ellos se considerará como el obstáculo principal se calcula el ángulo que hay entre la ubicación de cada objeto respecto a la proyección del vector de dirección del DCIE en el plano XY y se selecciona el obstáculo con el ángulo menor, es decir, el que se encuentra más al frente de la persona (Fig. 4.17).

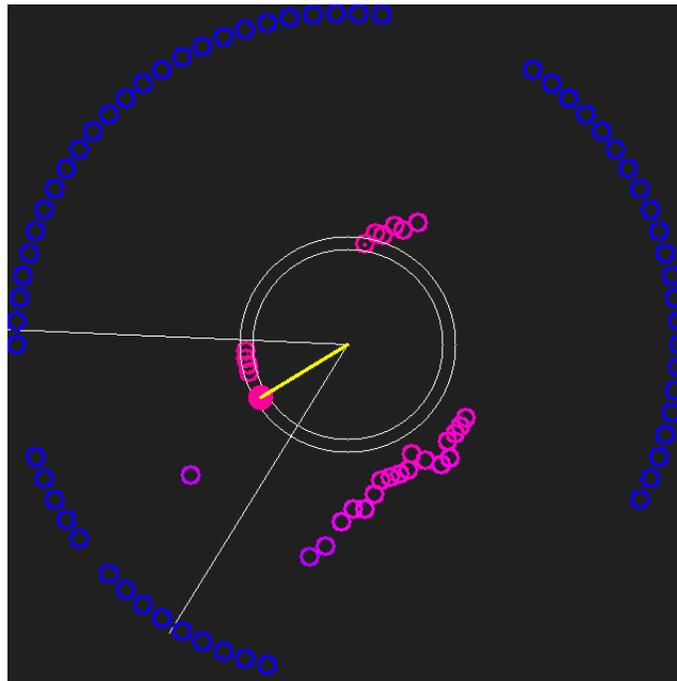


Figura 4.17: Selección del obstáculo principal en el análisis sin desplazamiento.

Para comunicar al usuario la ubicación de los obstáculos detectados se decidió determinar parámetros de control para distribuir la intensidad de la vibración en los brazaletes de acuerdo con la distancia y dirección en la que se encuentran los objetos.

El primer parámetro de control está asociado a la distancia del obstáculo r_{obs} y se determina mediante la Ecuación 4.8, esta ecuación define una *distancia relativa* con la cual es posible indicar a través de un porcentaje la cercanía de un objeto asociando los valores 0% con *muy lejos* y 100% con *muy cerca*. Este porcentaje se puede relacionar directamente con la intensidad de la vibración producida por los brazaletes. El parámetro $r_{\text{máx}}$ permite indicar la distancia en la cual un obstáculo se considera muy alejado.

$$r_{\text{rel}} = \begin{cases} \left(\frac{r_{\text{máx}} - r_{\text{obs}}}{r_{\text{máx}}} \right) \times 100\%, & \text{si } r_{\text{obs}} \leq r_{\text{máx}} \\ 0\%, & \text{si } r_{\text{máx}} < r_{\text{obs}} \end{cases} \quad (4.8)$$

El segundo parámetro de control consiste en la distribución de la intensidad de la vibración asignada a cada brazalete para indicar la dirección en la que se encuentra el obstáculo detectado. Esta distribución se determina a partir del ángulo θ_{obs} que el objeto tiene respecto a la proyección del vector de dirección del DCIE sobre el plano XY de acuerdo con las Ecuaciones 4.9 y 4.10.

$$I_{\text{izq}} = \begin{cases} 0\%, & \text{si } \theta_{\text{obs}} < -\frac{\pi}{6} \\ \left(\frac{\theta_{\text{obs}} + \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} \right) \times 100\%, & \text{si } -\frac{\pi}{6} \leq \theta_{\text{obs}} < 0 \\ 100\%, & \text{si } 0 \leq \theta_{\text{obs}} < \frac{\pi}{2} \\ \left(\frac{\frac{5\pi}{6} - \theta_{\text{obs}}}{\frac{\pi}{3}} \right) \times 100\%, & \text{si } \frac{\pi}{2} \leq \theta_{\text{obs}} < \frac{5\pi}{6} \\ 0\%, & \text{si } \frac{5\pi}{6} \leq \theta_{\text{obs}} \end{cases} \quad (4.9)$$

$$I_{\text{der}} = \begin{cases} 0\%, & \text{si } \theta_{\text{obs}} \leq -\frac{5\pi}{6} \\ \left(\frac{\theta_{\text{obs}} + \frac{5\pi}{6}}{\frac{\pi}{3}} \right) \times 100\%, & \text{si } -\frac{5\pi}{6} < \theta_{\text{obs}} \leq -\frac{\pi}{2} \\ 100\%, & \text{si } -\frac{\pi}{2} < \theta_{\text{obs}} \leq 0 \\ \left(\frac{\frac{\pi}{6} - \theta_{\text{obs}}}{\frac{\pi}{6}} \right) \times 100\%, & \text{si } 0 < \theta_{\text{obs}} \leq \frac{\pi}{6} \\ 0\%, & \text{si } \frac{\pi}{6} < \theta_{\text{obs}} \end{cases} \quad (4.10)$$

Modo escáner

En la primera etapa de pruebas realizada fue posible observar un comportamiento frecuente en los usuarios que dio origen a este modo de funcionamiento. Cuando las personas se detenían porque el equipo les había indicado que se estaban acercando a un obstáculo, giraban la cabeza hacia los lados o se daban la vuelta hasta que los brazaletes dejaban de indicar la presencia del objeto, entonces continuaban caminando. En el modo escáner, el usuario puede hacer un *barrido* de su entorno apuntando el DCIE en diferentes direcciones. El algoritmo de búsqueda de obstáculos determina la distancia del objeto más cercano que se encuentra dentro de la región de análisis. Esto le permite al usuario determinar en qué dirección no hay ningún obstáculo y continuar su camino si así lo desea.

La región de análisis definida para el modo escáner consiste en una porción del espacio estrecha horizontalmente. La forma de esta región trata de simular un haz de luz vertical proyectado desde el frente del DCIE (Fig. 4.18). Para determinar qué puntos 2D se encuentran dentro de esta región es necesario definir un sistema de referencia que permita conocer las coordenadas de estos puntos respecto al frente del DCIE. El nuevo sistema de referencia frontal se encuentra contenido en el plano XY del sistema global y sigue la dirección definida por la proyección del eje Z del DCIE. En este sistema, el eje X siempre apunta hacia el frente, por lo que los puntos considerados para la búsqueda de obstáculos son aquellos cuya distancia al plano XZ frontal es menor a un límite, esto es $|y_f| < y_{\text{máx}}$.

Con los puntos 2D que se encuentran dentro de la región de análisis frontal válida se lleva a cabo el mismo procedimiento de reutilización y filtrado definido para el modo de funcionamiento

global. Una vez que se determina el conjunto de puntos más cercano a la persona se obtiene la ubicación del obstáculo de interés realizando un promedio de las coordenadas de los puntos presentes en el conjunto.

Dado que en este modo de funcionamiento el análisis solo considera puntos al frente de la persona (Fig. 4.19), la dirección del obstáculo detectado siempre será $\theta_{\text{obs}} = 0$, por lo que la distribución de la vibración en los brazaletes se mantendrá en 100% para ambos dispositivos (Ecuaciones 4.9 y 4.10). Por el contrario, la intensidad de la vibración sí se verá modificada de acuerdo con la distancia en la que se encuentra el obstáculo. Se utiliza la Ecuación 4.8 para determinar este parámetro de control.

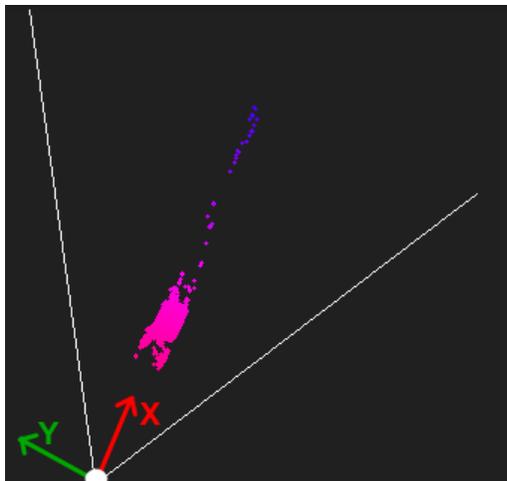


Figura 4.18: Región de análisis para el modo escáner.

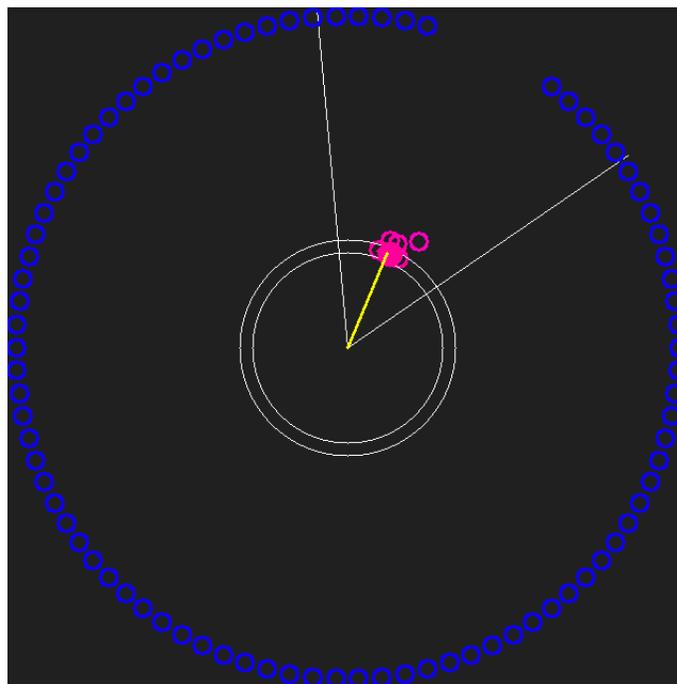


Figura 4.19: Obstáculo principal en el modo escáner.

4.5.3. Detección de obstáculos en movimiento

El análisis que se realiza para detectar obstáculos cuando el usuario se encuentra en movimiento consiste, principalmente, en identificar objetos que se acercan de frente a la persona (o la persona a ellos). En este procedimiento solo se consideran puntos 2D que se encuentran frente al usuario, por lo que el análisis se lleva a cabo en un sistema de referencia frontal similar al empleado en el modo escáner. En este método de análisis se considera que la persona avanza de frente y que no voltea la cabeza mientras camina.

El filtrado de puntos que se lleva a cabo en el análisis en movimiento es similar al que se realiza en el modo de trabajo global. Sin embargo, las posiciones definidas en este método de análisis siguen una forma de cuadrícula y mantienen un orden ascendente hacia el frente de la persona y de derecha a izquierda (Figura 4.20, Ecuaciones 4.11 - 4.13). Esta disposición geométrica permite analizar cada columna de posiciones para determinar en cuáles de ellas hay puntos que representen objetos que se acercan a la persona.

$$x_k = \left\lfloor \frac{x}{h_x} \right\rfloor \quad (4.11)$$

$$y_k = \left\lfloor \frac{y + y_{\text{máx}}}{h_y} \right\rfloor \quad (4.12)$$

$$n_k = x_k \frac{2y_{\text{máx}}}{h_y} + y_k \quad (4.13)$$

Antes de llevar a cabo la búsqueda de los objetos de interés, se realiza un análisis para determinar si el usuario se encuentra caminando junto a una pared o muro. Es posible detectar la presencia de este tipo de objetos en el entorno a través de la distribución de los puntos 2D en una o más columnas (Fig. 4.21). Se considera que los puntos presentes en las posiciones que constituyen una columna forman parte de una pared cuando el total de puntos en la columna excede un valor mínimo y la diferencia entre las posiciones límite que contienen puntos indica una distancia mínima.

En el análisis realizado se considera que las paredes (o cualquier objeto que represente una barrera) es un elemento plano. De acuerdo con esto, se decidió emplear una ecuación de primer grado para representar la posición de las paredes en el sistema de referencia frontal. La ecuación que describe estos objetos se obtiene a través de una regresión lineal realizada con las coordenadas, sin discretizar, de los puntos asociados a las posiciones correspondientes. La presencia de una pared en el entorno se comunica al usuario de la misma forma que cualquier otro obstáculo. La ubicación *exacta* de la pared se determina a partir de las coordenadas del punto sobre la línea más cercano al origen (Fig. 4.21). Cuando se detecta una pared se descartan de análisis posteriores todos los puntos 2D que se encuentran en columnas posteriores.

Para determinar cuáles de los objetos que se encuentran dentro del campo de visión del DCIE se acercan hacia la persona se lleva a cabo un procedimiento en el que se analiza cada columna de las posiciones definidas y se determina el objeto más cercano presente en cada una de ellas (un mismo objeto puede ser detectado en varias columnas consecutivas). En cada caso se analiza el comportamiento de la posición de dicho objeto para determinar si este se encuentra en la misma posición que en la iteración anterior, si se desplazó ligeramente y en qué dirección, o si hay un nuevo objeto más cerca (o más lejos).

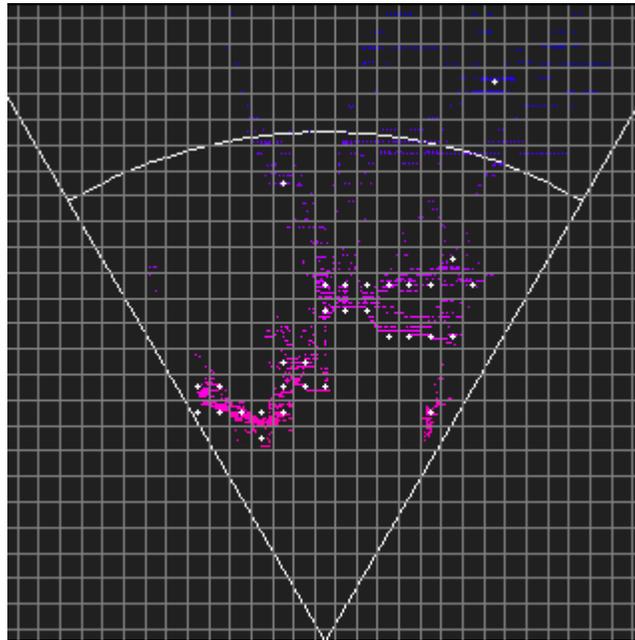


Figura 4.20: Discretización de la nube de puntos para el análisis en movimiento.

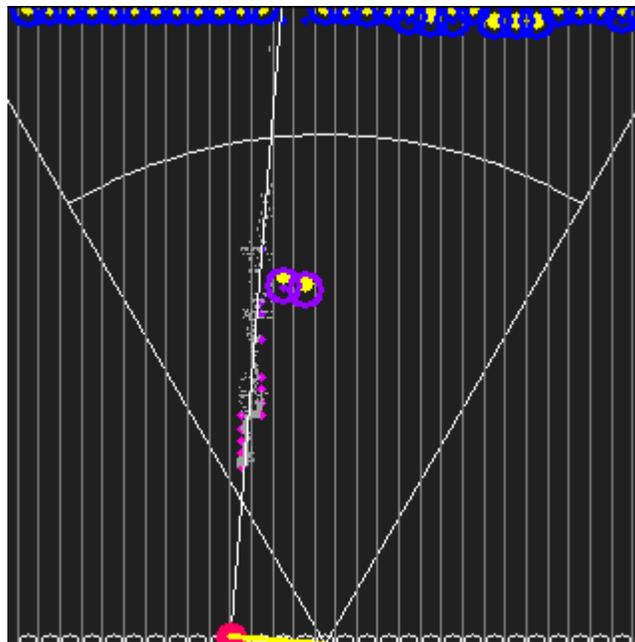


Figura 4.21: Estimación de la ubicación de una pared detectada.

Cada vez que se detecta un nuevo obstáculo en cada columna (más cerca o más lejos que el anterior) se guarda su posición inicial. Si el objeto se desplaza hacia la persona una determinada distancia desde su posición inicial se considera como un obstáculo de interés (Fig. 4.22). Si este objeto se queda detenido o se aleja lo suficiente se descarta de la lista de obstáculos de interés y se restablece su posición inicial para volver a evaluar su comportamiento.

En el sistema de referencia frontal con el que se trabaja, el análisis en movimiento se concentra en los objetos que se desplazan a lo largo del eje X . Dentro de la región de análisis delimitada por el rango de visión del sistema estéreo es posible dar seguimiento a los obstáculos de interés

determinados (Fig. 4.23), pero si estos se desplazan lo suficiente en dirección al usuario la información de su ubicación se puede perder ya que dejan de ser visibles para el DCIE. Para prevenir esto, una vez que los objetos de interés se posicionan sobre una región cercana al límite de la región de análisis, su ubicación es almacenada y en cada nueva iteración es actualizada de acuerdo a la dirección de desplazamiento de la persona. En el momento en que la posición estimada del obstáculo de interés alcanza el eje Y el objeto es descartado.

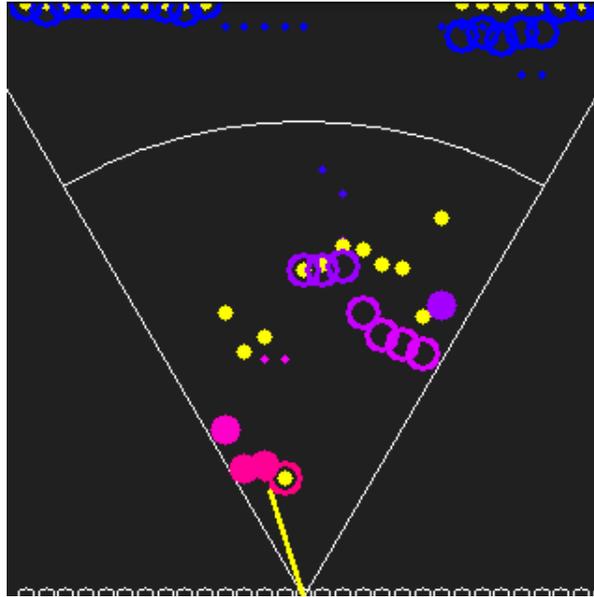


Figura 4.22: Detección de obstáculos de interés.

Los círculos con color de relleno representan los obstáculos de interés, la posición inicial de cada obstáculo detectado se indica con un círculo color amarillo.

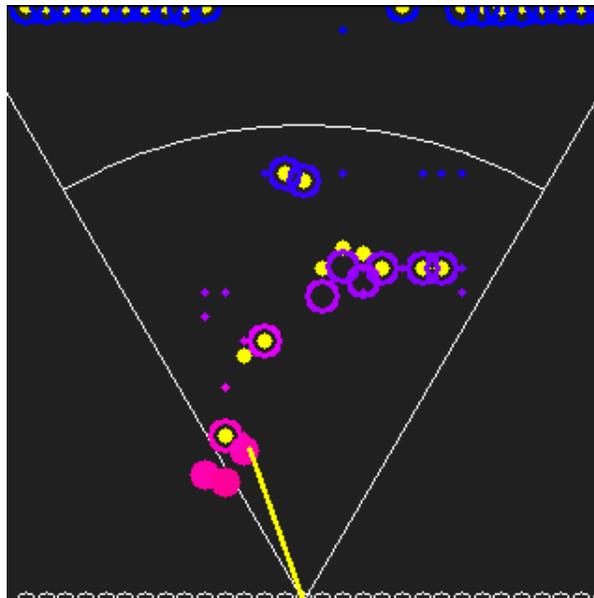


Figura 4.23: Estimación de la posición de los obstáculos de interés detectados.

A pesar de que en este modo de trabajo pueden ser detectados múltiples obstáculos de interés, la retroalimentación proporcionada al usuario solo considerará la ubicación del obstáculo principal. Este obstáculo es el objeto que representa mayor riesgo de colisión para el usuario, en este contexto, aquel se acerca de frente a la persona. Por ejemplo, si el usuario se encuentra caminando a lado de una pared, pero se detecta una persona al frente, aunque la pared esté más cerca, se indicará la presencia de la persona.

Una forma de determinar el obstáculo principal es a través de la evaluación de una característica denominada *importancia relativa* (Ecuación 4.14) que se asigna a cada objeto de interés. Esta propiedad indica la relevancia de cada obstáculo detectado de acuerdo con su posición respecto a la persona. En el cálculo de la importancia relativa se considera la distancia frontal, pero se le da prioridad a los objetos que se encuentran más al frente del usuario (Fig. 4.24). Una vez que ya se determinó esta característica para todos los obstáculos de interés, se selecciona como obstáculo principal el objeto con valor de importancia relativa más alta.

$$\gamma = (\alpha x_{\text{máx}} - x_{\text{obs}})(y_{\text{máx}} - |\beta y_{\text{obs}}|) \quad (4.14)$$

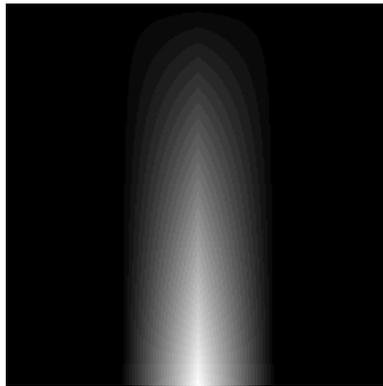


Figura 4.24: Representación gráfica del valor de importancia relativa.

El valor de importancia relativa de los obstáculos depende de su ubicación en el sistema de referencia frontal. La intensidad del color blanco aumenta de acuerdo con el nivel de importancia.

Para comunicar al usuario la posición del obstáculo principal se emplean los mismos parámetros de control definidos en el modo global. La intensidad de la vibración se asocia con la distancia del obstáculo mediante la Ecuación 4.8, mientras que la distribución de la vibración en los brazaletes depende de la dirección del objeto y se realiza de acuerdo con las Ecuaciones 4.9 y 4.10.

4.5.4. Transmisión de datos

Una vez que se determinan los parámetros de control de los brazaletes, estos se envían hacia los dispositivos a través de la actualización de las características de las conexiones BLE. Cuando esta información es recibida por cada brazalete, dependiendo del modo de retroalimentación seleccionado por el usuario, el programa de cada dispositivo genera la señal de control definida por los parámetros para producir la vibración requerida que indique la presencia del obstáculo detectado.

Los dos parámetros de control enviados a cada brazalete son variables tipo byte con valores dentro del rango del 0 al 100, el primer parámetro indica la distancia relativa del obstáculo, y el segundo la proporción de la intensidad total que el brazalete correspondiente debe producir para indicar la dirección en la que se encuentra el objeto.

Capítulo 5

Brazaletes

Para que el usuario del EAM pueda recibir retroalimentación sobre las características del entorno determinadas a partir del análisis de profundidad, es necesario emplear un dispositivo que sea capaz de *traducir* la información en estímulos perceptibles para la persona a través del sentido del tacto o del oído.

Entre diversas opciones de retroalimentación asociadas a los sentidos del tacto y del oído se seleccionó la retroalimentación háptica. Este tipo de retroalimentación consiste en la comunicación de información a través del sentido del tacto, algunos mecanismos comunes para esto son la creación de patrones de vibración, la aplicación de presión o el cambio en las características físicas de una superficie [50].

Se descartó el uso de retroalimentación auditiva tomando en cuenta algunos testimonios encontrados en la literatura [8] que consideran al sentido del oído como un recurso importante en la navegación. Las personas con debilidad visual frecuentemente se basan en los sonidos del entorno a su alrededor para guiarse y desplazarse. De acuerdo con esto, si se empleara retroalimentación auditiva, probablemente se estaría limitando la capacidad del usuario de percibir el entorno más allá del espacio inmediato.

Los dispositivos seleccionados para proporcionar retroalimentación al usuario del EAM son dos brazaletes que se colocan de forma similar a un reloj en las muñecas o antebrazos de la persona. A partir de la información de la ubicación de los obstáculos determinada por la aplicación Android, se generarán en cada brazaletes patrones de vibración acordes a la posición de los obstáculos en el entorno, de manera que el usuario pueda interpretar a través de la vibración la ubicación y distancia a la que se encuentran.

5.1. Selección de componentes

5.1.1. Módulo de vibración

Para producir vibración en los brazaletes se consideró el uso de un motor tipo Masa Giratoria Excéntrica (ERM). Este tipo de motores tienen un eje con masa desbalanceada que, al girar, genera una fuerza centrípeta que hace que todo el motor se mueva produciendo así un efecto de vibración. Existe en el mercado un módulo genérico con un motor de este tipo frecuentemente usado en proyectos con Arduino (Fig. 5.1). Se decidió emplear este módulo vibrador ya que cuenta con la etapa de potencia requerida para controlar el motor a través de una señal PWM generada por un microcontrolador.

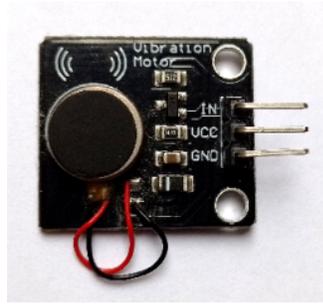


Figura 5.1: Módulo de vibración.

5.1.2. Módulo Bluetooth

La cantidad de información transmitida entre cada brazalete y la aplicación Android es mínima, ya que solo se comparten datos de intensidad y distribución de la vibración, así como el nivel de batería del brazalete. La tecnología de comunicación inalámbrica más apropiada para este fin es el Bluetooth [31]. En la Tabla 5.1 se muestran algunos de los módulos Bluetooth más usados en proyectos de electrónica.

	HC-05	HC-06	HM10
			
Voltaje de operación	3.6 - 6 V	3.3 - 5 V	3.3 - 5 V
Corriente de operación	30 - 50 mA	30 - 40 mA	8.5 mA
Especificación Bluetooth	v2.0 + EDR	v2.0 + EDR	v4.0 BLE
Dimensiones ^a	43 x 16 x 7 mm	43 x 16 x 7 mm	43 x 16 x 7 mm
Peso ^a	10 g	10 g	10 g
Precio ^{a,b}	\$111.00 MXN	\$110.00 MXN	\$105.00 MXN

^a Valores aproximados.

^b Precios actualizados en mayo de 2023.

Tabla 5.1: Módulos Bluetooth [32].

Se descartaron los módulos Bluetooth clásicos HC-05 y HC-06 debido a que utilizan una especificación Bluetooth versión 2.0 que, aunque sigue siendo soportada, carece de las ventajas que otras versiones de Bluetooth más recientes presentan como el protocolo BLE. Se seleccionó el módulo HM10 ya que cuenta con una especificación Bluetooth versión 4.0 que emplea el protocolo BLE, esto permitirá reducir el consumo de energía del brazalete incrementando así la duración de la batería.

5.1.3. Microcontrolador

Los brazaletes son dispositivos cuyo funcionamiento es muy sencillo. El microcontrolador que se emplee en cada uno de estos dispositivos solo se encargará de establecer comunicación con el módulo Bluetooth HM10, generar una señal PWM para controlar el módulo de vibración y leer el nivel de voltaje de la batería.

Una opción que se puede considerar en primera instancia es el ATmega328P, este microcontrolador está incluido en tarjetas de desarrollo populares como Arduino Uno y Arduino Nano y dispone de las especificaciones necesarias para llevar a cabo el procesamiento necesario en cada brazaletes. A pesar de ser una buena opción, el número de entradas/salidas disponibles en el microcontrolador ATmega328P excede considerablemente cantidad necesaria de entradas/salidas requeridas para la conexión con los elementos electrónicos del brazaletes. Por esta razón, se buscó otro microcontrolador con especificaciones similares pero tamaño reducido. El ATtiny85 resultó ser la mejor opción para el control de los brazaletes por sus reducidas dimensiones y conexión simple en comparación con el ATmega328P (Fig. 5.2).



Figura 5.2: Comparación de los microcontroladores ATtiny85 y ATmega328P.

5.1.4. Energía

Se decidió emplear una batería tipo Li-Po para proporcionar energía a cada brazaletes ya que este tipo de baterías pueden encontrarse en una amplia variedad de tamaños y capacidades en comparación con las baterías tipo Li-Ion las cuales cuentan con dimensiones establecidas como los modelos 18650.

Para definir la capacidad de la batería Li-Po a emplear se consideró un funcionamiento constante del brazaletes durante 6 horas. De acuerdo con la información del consumo energético de cada uno de los componentes electrónicos del dispositivo, se estimó un consumo total aproximado de 100 mAh. Se seleccionó una batería tipo Li-Po con capacidad de 650 mAh (Fig. 5.3) ya que permitirá proporcionar energía al brazaletes durante el tiempo establecido, además de que el tamaño de la batería permitirá mantener las dimensiones del brazaletes reducidas.



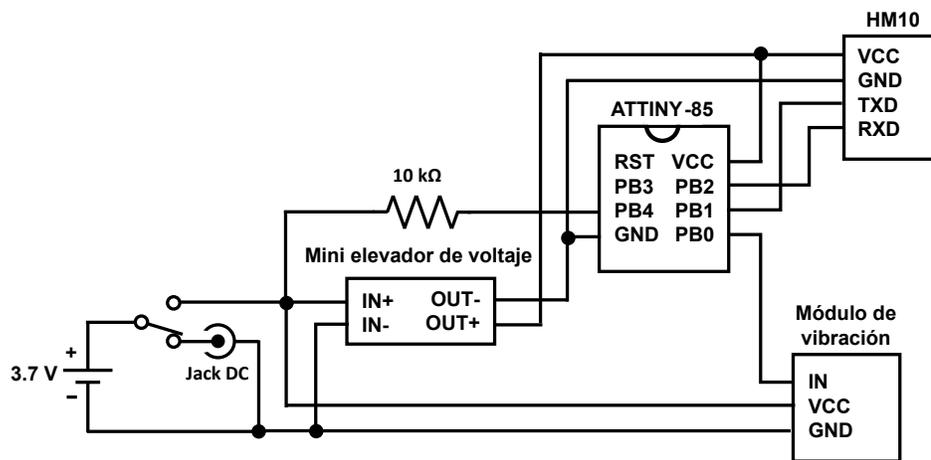
Figura 5.3: Batería seleccionada para los brazaletes.

Se empleó un módulo elevador de voltaje Mini Boost Step-Up para alimentar el ATtiny85 con 5 V de manera que el ADC del microcontrolador tome como referencia este voltaje para realizar lecturas analógicas. Esto permitirá determinar el nivel de carga de la batería respecto al rango 0 - 5 V.

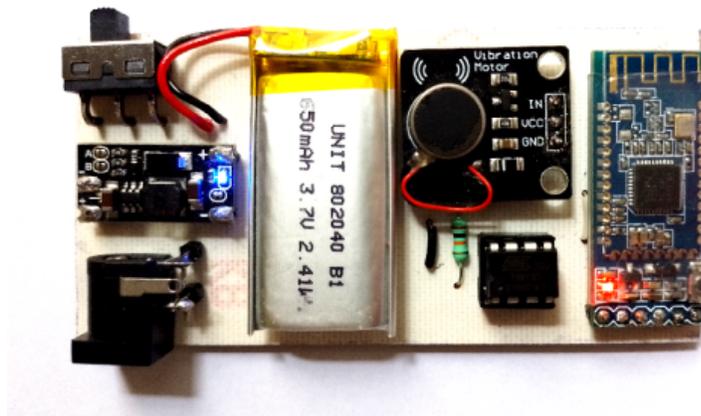
De forma complementaria, se definió el uso de un interruptor de tres posiciones para encender y apagar el brazaletes, así como un conector DC tipo barril para permitir la carga de la batería del brazaletes.

5.2. Hardware

La interconexión de los diferentes componentes electrónicos en cada brazalete se muestra en la Figura 5.4. El microcontrolador ATtiny85 y el módulo Bluetooth HM10 son alimentados con los 5 V proporcionados por el módulo Mini Boost Step-Up, mientras que el módulo de vibración se alimenta directamente del voltaje entregado por la batería Li-Po. El módulo HM10 se comunica con el ATtiny85 empleando un protocolo serial a través de dos líneas de transmisión de datos. El módulo de vibración es controlado mediante PWM desde una salida digital del ATtiny85. Finalmente, la terminal positiva de la batería se conectó a una entrada ADC del microcontrolador para monitorear el nivel de carga de la batería.



(a) Diagrama de conexiones de los brazaletes.



(b) Circuito de los brazaletes.

Figura 5.4: Diagrama de conexiones de los brazaletes.

5.3. Software

Se implementaron dos modos de vibración diferentes en el programa que controla cada brazalete para que el usuario utilice el que le parezca más cómodo. El primer modo simplemente indica a través de la intensidad de la vibración la distancia a la que se encuentra el obstáculo

detectado (mientras más cerca la intensidad es mayor). El segundo modo implementado emplea pulsos de vibración con el mismo nivel de intensidad los cuales ocurren en diferentes intervalos de tiempo de acuerdo con la proximidad del obstáculo (si está cerca el intervalo es menor). En ambos casos, la dirección hacia donde se encuentra el obstáculo se indica repartiendo la vibración proporcionalmente entre los dos brazaletes.

Cuando se enciende el brazaletes, el programa se mantiene a la espera de un comando que será enviado por la aplicación Android indicando que el EAM se activó. Cuando esto ocurra, el programa recibirá también la información del modo de funcionamiento seleccionado por el usuario para generar los patrones de vibración correspondientes.

Cada vez que la aplicación Android finaliza el análisis de un par de imágenes estéreo capturadas por el DCIE, envía a cada brazaletes mediante Bluetooth un paquete de tres bytes de información. El primer byte identifica al conjunto como un comando para actualizar la salida PWM generada por el ATtiny85, el segundo byte indica la distancia relativa D del obstáculo detectado y el tercer byte indica la proporción P de la salida total que el brazaletes debe proporcionar de acuerdo con la dirección en la que se encuentra el obstáculo.

Si el modo de vibración seleccionado por el usuario es el continuo, el microcontrolador generará una señal de control PWM con frecuencia de 30 Hz. El ciclo de trabajo de la señal PWM está definido por la Ecuación 5.1, el efecto de la modificación de este parámetro será perceptible a través de la intensidad de la vibración proporcionada por el brazaletes.

$$PWM = \frac{P}{100} \times D \quad (5.1)$$

Cuando el usuario selecciona el modo de vibración por pulsos, el programa genera una señal PWM de corta duración cada intervalo de tiempo determinado por la Ecuación 5.2, el parámetro t_{max} es el tiempo máximo que puede pasar entre dos pulsos consecutivos. En este modo, el pulso generado mantiene la misma intensidad independientemente de la distancia a la que se encuentra el obstáculo, sólo se distribuye entre los dos brazaletes con la proporción correspondiente ajustando el ciclo de trabajo de la señal PWM mediante la Ecuación 5.3.

$$t_{PWM} = \frac{100 - D}{100} \times t_{max} \quad (5.2)$$

$$PWM = P \quad (5.3)$$

5.4. Carcasa para los brazaletes

De manera similar al DCIE, se diseñaron y manufacturaron carcasas para contener y proteger los componentes electrónicos de los brazaletes (Fig. 5.5). Ambas carcasas tienen un diseño similar con forma de prisma rectangular y dimensiones de 94 mm de largo, 48 mm de ancho y 15 mm de alto. Cada carcasa tiene una abertura lateral por la cual sobresale el conector DC que permite la carga de la batería. En el costado contrario se presenta un espacio que permite encender el brazaletes mediante un interruptor deslizable. Los costados de cada carcasa cuentan con unas asas que sirven como apoyo para una correa con velcro que ayuda a sujetar el brazaletes a la muñeca de la persona.

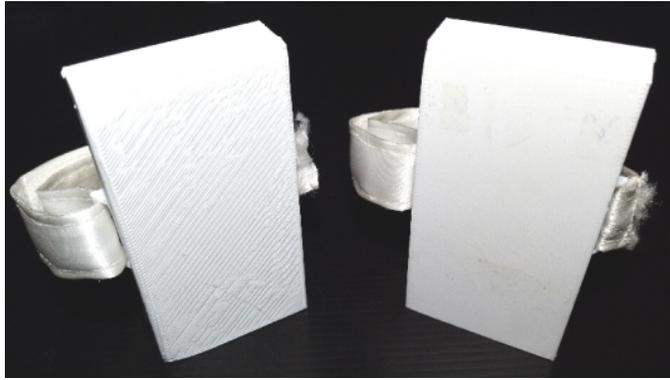


Figura 5.5: Carcasas de los brazaletes.

5.5. Cargador

En la primera versión del prototipo de los brazaletes (Fig. 5.6) se incluía un módulo cargador de baterías Li-Po en cada brazalete. Este componente requería espacio adicional y, principalmente, hacía más complejo el proceso de carga de los brazaletes (en conjunto con el DCIE) ya que si se querían cargar simultáneamente todos los dispositivos era necesario emplear un eliminador de 5 V con conector micro USB para conectar cada elemento del EAM.

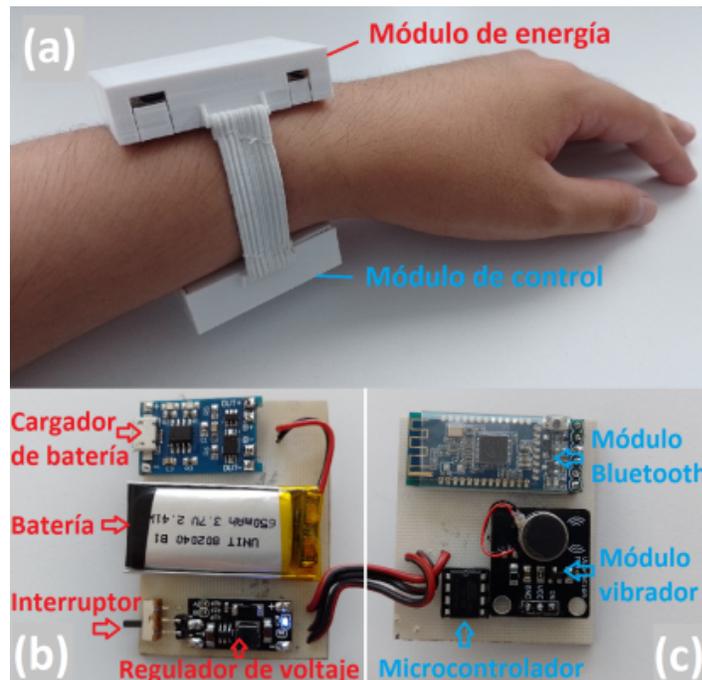


Figura 5.6: Primer prototipo de los brazaletes.

Para facilitar el proceso de carga de los diferentes dispositivos que componen el EAM se diseñó un *Centro de Carga* en el cual se pueden conectar al mismo tiempo los brazaletes y la batería del DCIE. Esto permitió reubicar los módulos cargadores de baterías Li-Po contenidos en cada brazalete a este nuevo dispositivo reduciendo así las dimensiones de los brazaletes.

5.5.1. Selección de componentes

Módulo de carga de baterías Li-Po

Los módulos de carga considerados para proporcionar energía a las baterías de los dispositivos que componen el EAM se muestran en la Tabla 5.2. Los primeros dos módulos incluyen un circuito elevador de voltaje (step-up) que les permite proporcionar un voltaje de salida regulado. Los tres módulos tienen la capacidad de determinar cuando la batería está completamente cargada para detener el proceso de carga, esto ayuda a prevenir daños en la batería. El tercer módulo incluye además un circuito de protección contra sobrecarga, sobredescarga y sobrecorriente, el cual puede ayudar a prolongar el ciclo de vida de la batería.

	Módulo de carga USB TP5400	TP4056 con Boost Step-Up	TP4056 con Protección Dual
			
Corriente de carga	1 A	1 A	1 A
Voltaje de salida	5 V	4 - 27 V	-
Dimensiones ^a	20 x 18.2 x 10.5 mm	33 x 23 x 4.3 mm	27.7 x 17 x 4 mm
Peso ^a	5 g	5 g	2 g
Precio ^{a,b}	\$18.00 MXN	\$22.00 MXN	\$15.00 MXN

^a Valores aproximados.

^b Precios actualizados en mayo de 2023.

Tabla 5.2: Módulos cargadores de baterías [32].

El módulo de carga seleccionado fue el TP4056 con Protección Dual. El principal factor que se consideró para la selección del módulo fue la integración del circuito de protección para la batería ya que se busca prevenir que ocurra algún accidente por sobrecarga o que el desempeño de la batería se vea afectado por un daño producido por una sobredescarga. Aunque los otros módulos podrían facilitar la alimentación de los diferentes componentes electrónicos de los dispositivos del EAM al descartar la necesidad del uso de un módulo step-up adicional, su implementación requeriría integrar el módulo de carga en los brazaletes y en la batería del DCIE, propiciando así la condición que originalmente se buscaba mejorar.

Microcontrolador

El Centro de Carga permite monitorear el nivel de carga de las baterías a través de la Aplicación Móvil. Esta necesidad requiere que el microcontrolador empleado tenga la capacidad de realizar lecturas de voltaje analógicas a través de un ADC, y de establecer comunicación Serial con otros módulos de comunicación inalámbrica. El microcontrolador ATtiny85 es un elemento que ha sido utilizado en los demás dispositivos del EAM para llevar a cabo las acciones descritas previamente por lo que se decidió emplearlo nuevamente en el Centro de Carga. Al igual que con los brazaletes,

se descartó el uso de un microcontrolador ATmega328P por sus dimensiones y el número de pines de entrada/salida que quedarían inutilizados.

Módulo de comunicación inalámbrica

Para establecer comunicación inalámbrica con el teléfono inteligente se seleccionó el módulo Bluetooth HM10 por las mismas razones consideradas para los brazaletes: la información transmitida desde el Centro de Carga hacia la Aplicación Móvil es mínima y el módulo Bluetooth emplea con el protocolo BLE.

Energía

Para que el ATtiny85 pueda realizar la lectura analógica del voltaje en las baterías es necesario que los módulos de carga no se encuentren proporcionando energía a las baterías. Para ello, se buscó un MOSFET de potencia con la capacidad de trabajar con un voltaje de compuerta V_{GS} de nivel lógico para controlarlo directamente desde una salida digital del microcontrolador ATtiny85 y una corriente de drenado continua I_D de al menos 2 A.

Entre las diferentes opciones disponibles se seleccionó el MOSFET MTP2955V. Este elemento permite una I_D de hasta 12 A y un V_{GS} mínimo de 2 V, por lo que la energía proporcionada a las baterías puede ser controlada fácilmente desde una salida digital del ATtiny85.

Finalmente, la corriente de carga que maneja cada módulo cargador de baterías es de hasta 1 A. Para suministrar la energía requerida al Centro de Carga es necesario utilizar una fuente de energía que proporcione una salida de 5 V, 3 A.

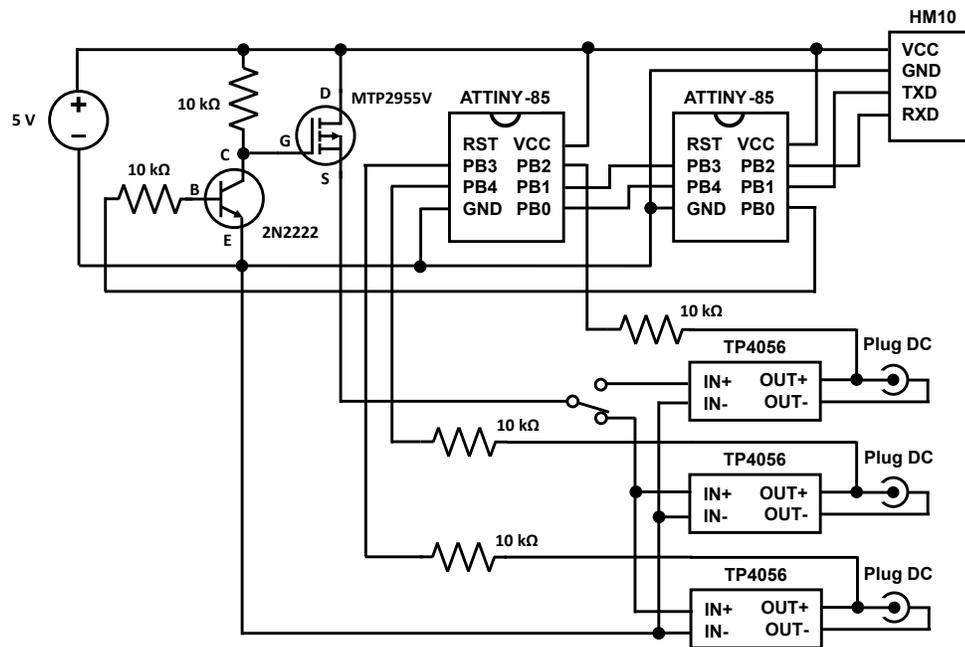
5.5.2. Hardware

El microcontrolador seleccionado para el Centro de Carga es un ATtiny85, este circuito integrado tiene cinco pines de entradas/salidas disponibles. Sin embargo, se requieren seis conexiones: tres para realizar lecturas analógicas del nivel de voltaje de las baterías, dos para establecer comunicación con el módulo Bluetooth HM10 y una para activar el MOSFET que controla los módulos de carga de las baterías. Para solucionar esta situación se propuso utilizar dos microcontroladores ATtiny85 comunicados entre sí mediante un protocolo de comunicación serial (Fig. 5.7).

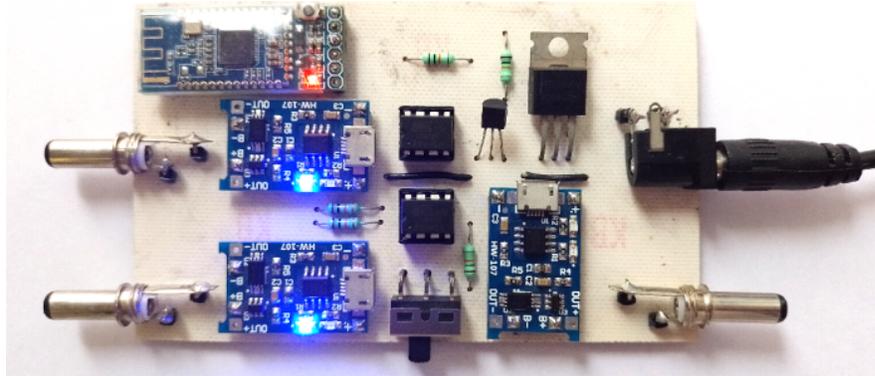
La energía proporcionada por la fuente de 5 V a los módulos de carga está controlada por el MOSFET MTP2955V el cual actúa como un interruptor activado a través de un pin digital del microcontrolador ATtiny85 principal. Este mismo microcontrolador se comunica con el módulo Bluetooth HM10 empleando dos pines en configuración de comunicación serial.

El microcontrolador secundario realiza lecturas de voltaje a través de tres pines ADC que se encuentran conectados a las salidas de alimentación de los módulos de carga TP4056. En cada salida de alimentación se colocó un conector plug DC tipo barril para permitir la conexión del Centro de Carga con los brazaletes y la batería del DCIE.

Para reducir la potencia requerida de la fuente de 5 V que se utilice con el Centro de Carga se agregó un interruptor de dos posiciones que permite llevar a cabo la carga de la baterías de los dos brazaletes o de la batería del DCIE, pero no los tres al mismo tiempo. Esto permite utilizar una fuente de menor potencia (5 V, 2 A) que la indicada originalmente. Sin embargo, si se cuenta con una fuente de 15 W, es posible permitir la carga de los tres dispositivos simultáneamente agregando un puente en el lugar del interruptor.



(a) Diagrama de conexiones del Centro de Carga.



(b) Circuito del Centro de Carga.

Figura 5.7: Diagrama de conexiones del Centro de Carga.

5.5.3. Software

El software del Centro de Carga está constituido por dos programas diferentes ejecutados en cada microcontrolador que trabajan en conjunto para transmitir a la Aplicación Móvil el nivel de carga de las baterías. El programa principal controla la activación de los módulos TP4056 y periódicamente solicita al programa secundario que realice lecturas analógicas del nivel de voltaje de las baterías para transmitir esa información a través del módulo Bluetooth HM10.

Los módulos TP4056 proporcionan un voltaje de carga constante de 4.2 V a las baterías. Este voltaje normalmente representa una carga de 100 % en las baterías seleccionadas [51]. Para determinar el nivel de carga real es necesario pausar el proceso de carga durante un momento para realizar la lectura analógica del nivel de voltaje en la batería.

El programa lleva a cabo este proceso cada 10 minutos. Lo primero que se tiene que hacer es detener la carga de las baterías, esto se logra mediante la desactivación del MOSFET MTP2955V a través de un pin digital del microcontrolador principal. Una vez que las baterías ya no están recibiendo energía, el programa principal envía un comando por comunicación serial hacia el

programa secundario. Este comando le indica al microcontrolador secundario que realice la lectura analógica de los pines ADC a los cuales están conectadas las terminales positivas de las baterías. Cuando ya se tiene la información de los valores de voltaje estos se comunican al microcontrolador principal mediante variables tipo byte que indican el nivel de voltaje relativo al rango 0 - 5 V. En el momento en que el programa principal cuenta con los niveles de voltaje, reanuda la carga de las baterías activando el MOSFET MTP2955V y reenvía los valores de carga a la Aplicación Móvil por medio de Bluetooth.

Los datos enviados desde el Centro de Carga consisten en cuatro bytes; los primeros tres bytes indican los voltajes de la batería del brazalete izquierdo, la batería del brazalete derecho y la batería del DCIE, respectivamente. Mientras que el último byte es una bandera de control. Con esta información, la Aplicación Móvil puede indicar el nivel de carga de las baterías en la interfaz de usuario.

5.5.4. Carcasa

La carcasa del Centro de Carga es un prisma rectangular con dimensiones de 108 mm de largo, 66 mm de ancho y 15 mm de alto. El costado izquierdo de la carcasa cuenta con dos aperturas que permiten la salida de dos plugs DC tipo barril en los cuales se conectan los brazaletes. En el costado derecho se encuentran otras dos aperturas, una permite la salida del conector correspondiente a la batería del DCIE y otra la salida de un jack DC a través del cual se energiza el Centro de Carga con la fuente de 5 V. En la parte inferior de la carcasa hay una ventana que permite cambiar la posición del interruptor selector de carga (si está disponible). Finalmente, en la parte superior hay unas rejillas de ventilación para permitir que el calor liberado por el MOSFET, producto de la carga de las baterías, sea disipado fácilmente. El Centro de Carga está diseñado de manera que, al conectar los brazaletes y la batería del DCIE a los costados, todos los elementos puedan estar apoyados sobre una superficie plana como se muestra en la Figura 5.8.

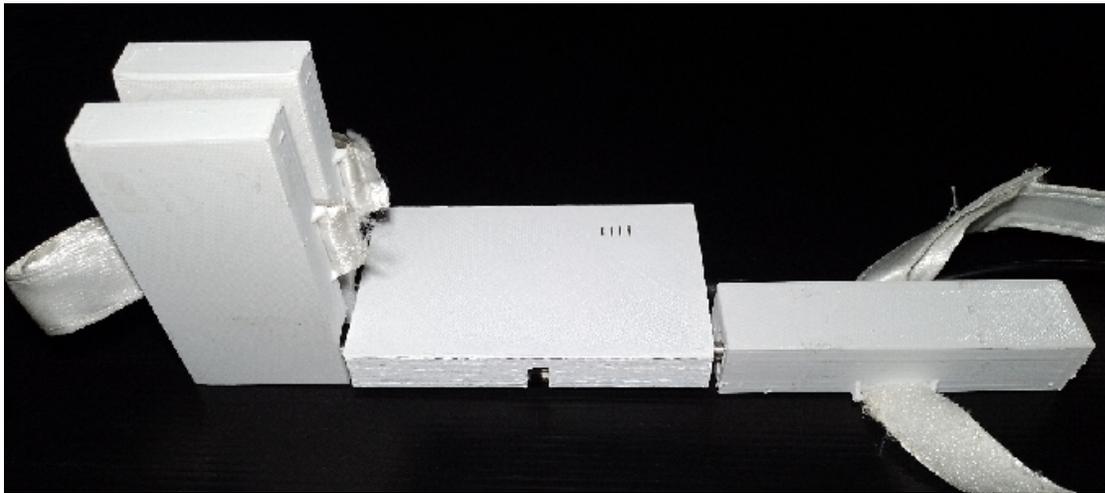


Figura 5.8: Conexión de los brazaletes y la batería del DCIE al Centro de Carga.

Capítulo 6

Pruebas de funcionamiento de los algoritmos de detección de obstáculos

6.1. Detección de puntos 3D en diferentes entornos y condiciones de iluminación

La capacidad de detección de obstáculos del EAM depende totalmente de la disponibilidad y confiabilidad de la información de profundidad determinada a partir del análisis estéreo realizado con la ayuda del algoritmo SGBM. Dado que el funcionamiento del sistema está basado principalmente en el análisis de imágenes es de esperarse que la iluminación de las escenas capturadas tenga un papel importante en la calidad de la información de profundidad obtenida. Sin embargo, este no es el único factor relevante en la obtención de mapas de disparidad con SGBM. Como se ha mencionado previamente, la textura de los objetos, y muchas veces la textura general de las escenas, influye en el proceso de búsqueda de correspondencias entre las imágenes estéreo.

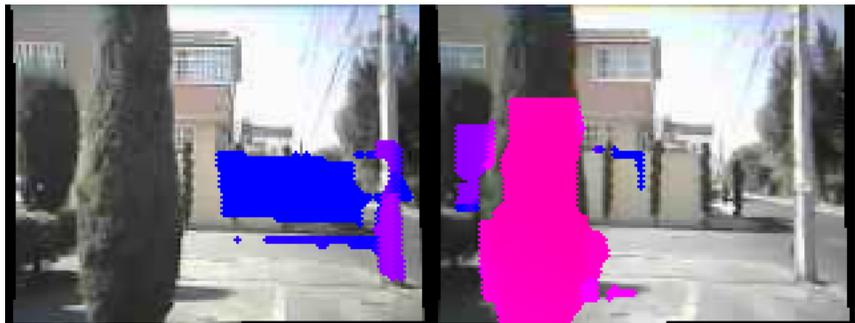
6.1.1. Luz natural

Cuando se capturan imágenes en entornos completamente iluminados con luz natural los bordes de los objetos y las texturas presentes en ellos se aprecian con más detalle. Esto ocurre normalmente en exteriores ya que la luz del sol se puede reflejar en otras superficies, como el suelo, e ilumina los objetos desde más direcciones. Esto facilita la búsqueda de correspondencias entre las imágenes estéreo con SGBM debido a que se cuenta con más información para llevar a cabo el proceso.

En la Figura 6.1 se muestran algunos resultados del análisis de profundidad realizado con SGBM para diferentes escenas iluminadas con luz natural. Las imágenes que se ubican en la segunda y tercera columnas muestran la información de profundidad determinada a partir de la obtención de mapas de disparidad para las cámaras izquierda y derecha, respectivamente. Las imágenes se muestran en la resolución en que se lleva a cabo el análisis estéreo (160 x 120 píxeles). Una imagen con mejor calidad de la vista izquierda se muestra en la primera columna de la figura.



(a) Sendero.



(b) Calle.



(c) Calle peatonal.



(d) Estacionamiento.

Figura 6.1: Información de profundidad obtenida en entornos con luz natural.

El color de cada uno de los puntos dibujados sobre las imágenes estereó indica la distancia en la que se encuentra el punto 3D proyectado sobre la imagen. Los puntos de color azul son aquellos que se encuentran a una distancia igual o mayor que la distancia máxima definida para realizar la búsqueda de obstáculos, en la implementación actual es de 4 m para el análisis sin desplazamiento y 6 m para el análisis en movimiento. Conforme la distancia de los puntos al usuario se reduce, la tonalidad cambia gradualmente a rojo. Este color se utiliza para indicar puntos que se encuentran a una distancia mínima del usuario.

Se puede observar que la distancia estimada de la mayoría de los puntos determinados corresponde correctamente con la posición real de los objetos en la escena. Por lo que la información de profundidad obtenida a través del análisis de imágenes capturadas en entornos con iluminación natural permitirá llevar a cabo el proceso de determinación de obstáculos con un alto nivel de confianza.

6.1.2. Sombra

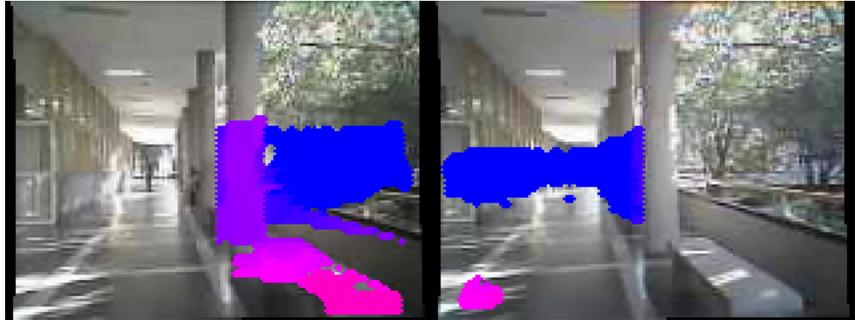
Cuando se capturan imágenes en zonas que se encuentran a la sombra (Fig. 6.2), el contraste de los objetos con el entorno se ve reducido. En algunos casos esto puede ocasionar que la información de profundidad no siga correctamente los bordes de los objetos como se muestra en Figura 6.2b, aunque esto no representa un problema para la detección de obstáculos ya que la luz reflejada desde otras direcciones es suficiente para identificar las principales características de los objetos y obtener un mapa de disparidad válido.

Se pudo observar que algunas veces la sombra producida por los árboles se proyecta sobre otros objetos o el suelo de manera que se generan texturas muy complejas en las escenas (Fig. 6.2d). Esto afecta el desempeño de SGBM en la búsqueda de correspondencias entre las imágenes estereó, por lo que se puede obtener información de profundidad errónea que no permita determinar correctamente la posición y dimensiones de los obstáculos.

6.1.3. Luz artificial

Cuando el usuario se encuentra en lugares cerrados como viviendas, escuelas, tiendas, transporte público u oficinas, se considera que se encuentra en interiores. En este tipo de entornos normalmente no se cuenta con luz natural directa, por lo que se recurre a luz artificial. Cuando la intensidad de la luz es elevada o existen múltiples fuentes de iluminación (Fig. 6.3b), los resultados del análisis de profundidad son similares a los que se obtendrían en un entorno con iluminación natural. Por el contrario, si la iluminación del espacio es muy tenue o proviene de una sola fuente, los bordes de los objetos presentes en las imágenes pueden no distinguirse claramente, lo cual produciría resultados similares a los que se obtendrían en el análisis de entornos con sombra.

Es común encontrar en interiores paredes lisas o paredes de ladrillos. Como se puede observar en la Figura 6.3d, SGBM tiene dificultades para llevar a cabo correctamente la búsqueda de correspondencias entre las imágenes estereó que presentan este tipo de objetos. En estos casos se puede emplear el resultado de análisis de textura realizado en la etapa de preprocesamiento de las imágenes para indicar al usuario cuando se encuentra frente a un objeto de estas características.



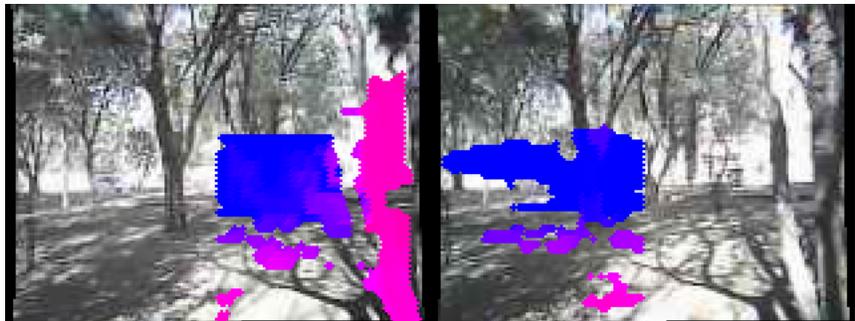
(a) Edificio.



(b) Sendero.



(c) Calle.



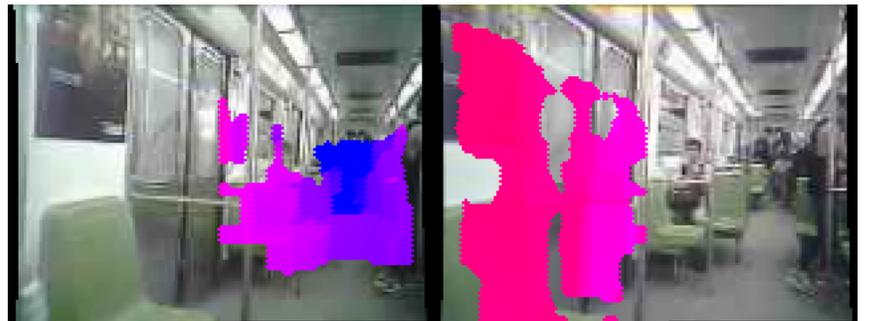
(d) Parque.

Figura 6.2: Información de profundidad obtenida en entornos con sombra.

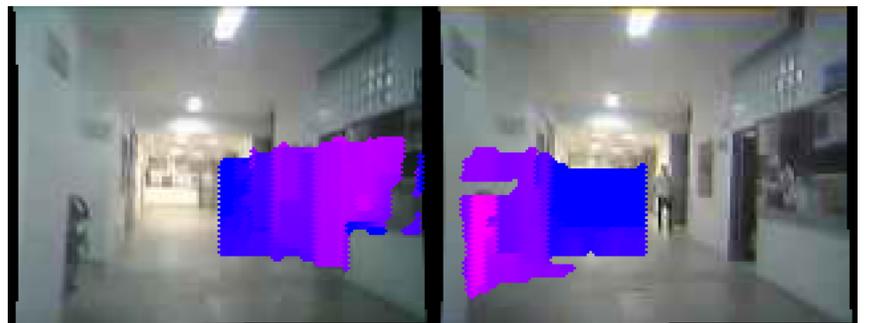
6.1. DETECCIÓN DE PUNTOS 3D EN DIFERENTES ENTORNOS Y CONDICIONES DE ILUMINACIÓN



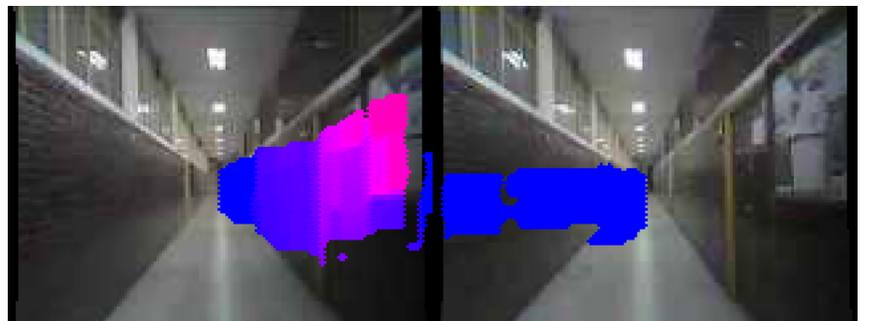
(a) Estación de metro.



(b) Vagón de metro.



(c) Oficinas.



(d) Pasillo.

Figura 6.3: Información de profundidad obtenida en entornos con luz artificial.

6.1.4. Noche

Cuando es de noche, la principal fuente de iluminación en exteriores es la artificial. De acuerdo con esto, se pudo observar que los resultados del análisis de profundidad realizado en imágenes capturadas de noche sigue la misma respuesta que el análisis en entornos con luz artificial. En zonas iluminadas completamente, la distancia de los objetos en la escena puede determinarse de manera correcta 6.4a. Mientras que en entornos con baja iluminación, el reducido nivel de detalle de las imágenes provoca que los bordes de algunos objetos en los mapas de disparidad no se puedan distinguir con claridad 6.4c.

A diferencia de la disposición de las lámparas en entornos interiores, la distribución de las fuentes de luz en la vía pública muchas veces es muy dispersa 6.4d. Esto puede limitar considerablemente la capacidad de detección de obstáculos de los algoritmos implementados, especialmente en movimiento, ya que los análisis se basan en el seguimiento de los objetos en la escena para determinar la presencia de obstáculos. Cuando las fuentes de luz se encuentran muy separadas, no se puede asegurar la continuidad del análisis realizado, por lo que la correcta detección de obstáculos se limita a las zonas que cuentan con iluminación continua.

6.1.5. Contraluz

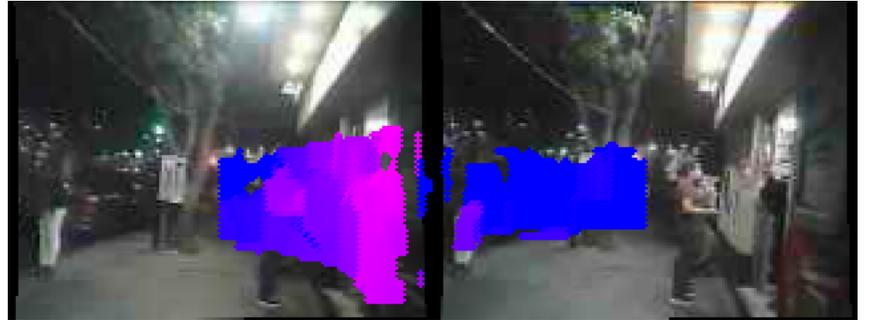
Se identificaron algunas limitaciones en el análisis de profundidad relacionadas especialmente con el funcionamiento de las cámaras. Una de ellas es la captura de imágenes a contraluz.

En ocasiones puede darse el caso de que el usuario camine en la dirección en la que se encuentra el sol sobre el horizonte. Cuando esto sucede, los rayos de luz inciden directamente sobre el sensor de las cámaras produciendo en las imágenes un efecto de sobreexposición (Fig. 6.5). Este efecto incrementa el brillo total de la imagen lo cual, de manera similar a la sombra, reduce el contraste de la escena dificultando la búsqueda de correspondencias entre las imágenes estéreo. Asimismo, es posible que los rayos de luz incidan solo sobre una cámara. En este caso, la diferencia de brillo entre las imágenes puede dificultar la obtención de mapas de disparidad aunque ambas cámaras hayan capturado la misma escena.

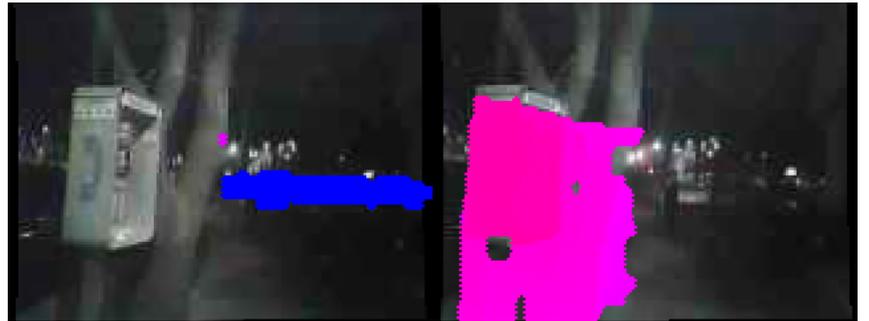
6.1.6. Desbalance en la iluminación

Otra limitación que se pudo identificar consiste en el análisis de imágenes con un alto contraste entre el cielo y el entorno (Fig. 6.6). Por lo general, se capturan imágenes con esta característica al amanecer o al atardecer de días nublados en los que el usuario camina por alguna zona de edificios altos. En estas condiciones, el sol ilumina directamente las nubes y los edificios producen una región de sombra amplia. En las imágenes capturadas de estas escenas el cielo se ve muy brillante mientras que las regiones de las imágenes que contienen zonas de sombra se oscurecen excesivamente. Esto reduce el nivel de detalle del entorno de manera que la información de profundidad no sigue correctamente los bordes de los objetos.

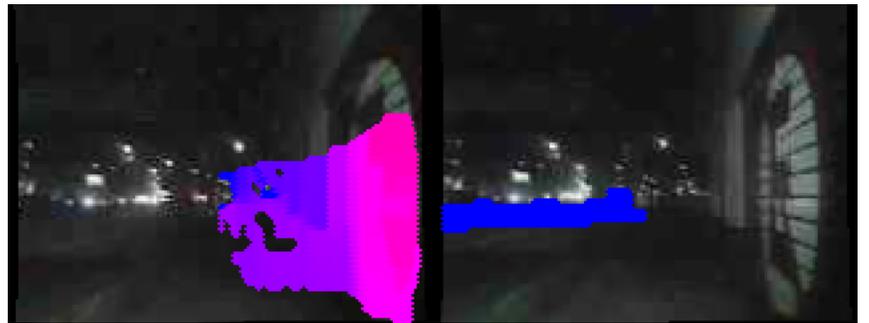
Una forma de reducir el efecto negativo que el desbalance de la iluminación del entorno produce en la búsqueda de correspondencias consiste en llevar a cabo la corrección de la iluminación de las imágenes mediante el procedimiento de corrección gamma descrito en capítulos anteriores.



(a) Establecimiento comercial.



(b) Teléfono en vía pública.



(c) Avenida.



(d) Calle.

Figura 6.4: Información de profundidad obtenida de noche en entornos con luz artificial.



Figura 6.5: Información de profundidad obtenida con imágenes capturadas a contraluz.

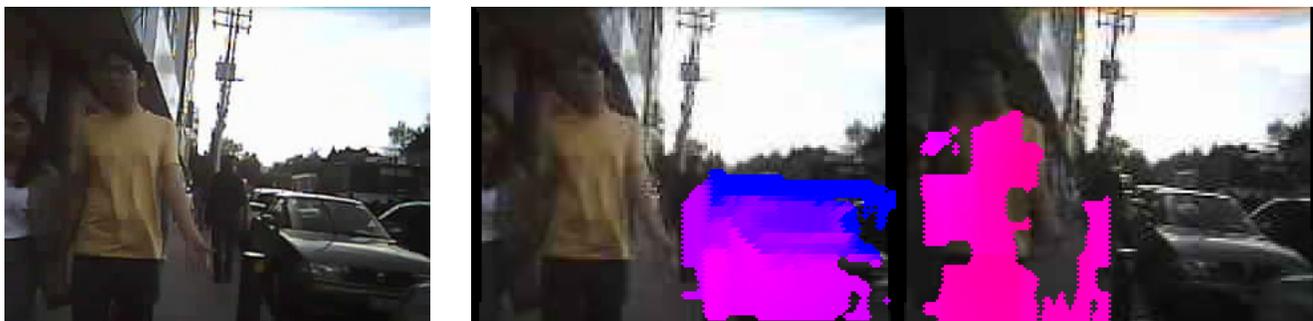


Figura 6.6: Información de profundidad obtenida con imágenes que presentan desbalance en la iluminación.

6.2. Detección de obstáculos sin desplazamiento

La verificación del correcto funcionamiento de los algoritmos de detección de obstáculos implementados en el EAM se llevó a cabo mediante la evaluación de su desempeño en el análisis de la información de profundidad obtenida en espacios amplios con buenas condiciones de iluminación. Como se verá más adelante, cuando el equipo se utiliza en entornos que presentan estas características, los diferentes algoritmos implementados determinan correctamente la ubicación de los obstáculos, por lo que la retroalimentación proporcionada al usuario es muy confiable.

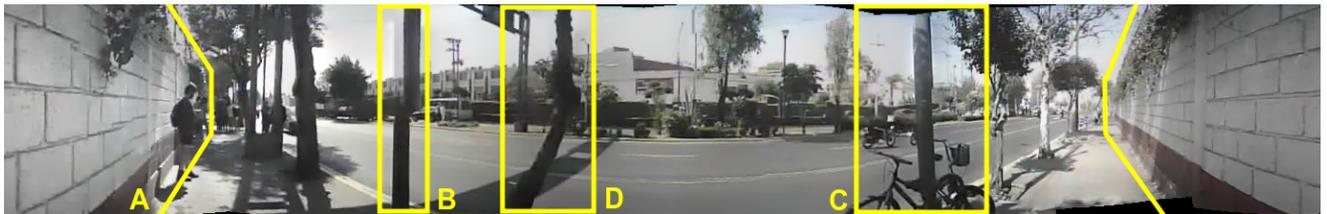
Considerando las características de la información de profundidad obtenida en diferentes entornos y condiciones de iluminación (Figs. 6.1 - 6.6), es posible deducir el desempeño del sistema en la detección de obstáculos en entornos más generales tomando como referencia los resultados que se muestran a continuación.

6.2.1. Modo global

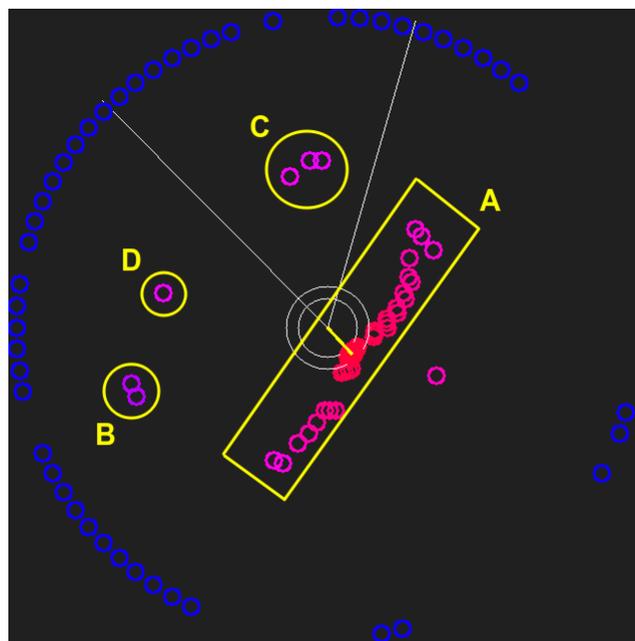
La Figura 6.7a muestra uno de los espacios en los que se llevó a cabo la evaluación del algoritmo de detección de obstáculos en modo global. La ubicación de los obstáculos detectados en la escena se muestra en la Figura 6.7b, la cual es una representación del plano XY del sistema de referencia global. En esta figura se puede observar que el algoritmo determinó correctamente la ubicación de los objetos más cercanos al usuario. Los círculos contenidos en el grupo A representan la pared blanca de ladrillos. Los círculos contenidos en los grupos B, C, y D representan los postes y el árbol correspondientes en la Figura 6.7a.

Se puede observar que el algoritmo determina correctamente cuál de todos los obstáculos detectados en el entorno es el más cercano al usuario aunque este se encuentre orientado en otra dirección. En el instante en que fue capturada la Figura 6.7b, el usuario le está dando la espalda a la pared, sin embargo, la línea amarilla indica que la pared es el obstáculo principal determinado.

En este modo de funcionamiento, la ubicación de un objeto puede ser actualizada mientras se encuentre dentro del rango de visión del sistema estéreo. Sin embargo, si algún obstáculo detectado tiene la capacidad de desplazarse y deja de ser visible para las cámaras no hay una forma de saber si ha cambiado de ubicación, por lo que no se puede asegurar que se mantenga en la última posición en la que fue visto. A pesar de esta limitación en el modo de funcionamiento global, el usuario siempre puede volver a dirigir su atención hacia la zona en la que se indicó que había un obstáculo para comprobar si sigue o no en esa posición si considera que el obstáculo se pudo haber desplazado.



(a) Imagen panorámica de un espacio de evaluación para el modo global.



(b) Obstáculos detectados.

Figura 6.7: Detección de obstáculos en el modo global.

6.2.2. Modo escáner

Uno de los espacios en los que fue evaluado el modo escáner se muestra en la Figura 6.8. En esta escena, el único obstáculo que no permitiría caminar libremente al usuario es el árbol que se encuentra al frente. En la Figura 6.9 se puede observar que el algoritmo utilizado en el modo escáner determina correctamente la posición del obstáculo más cercano al frente del usuario. En cada escena analizada, la línea amarilla dibujada sobre la representación del plano XY global indica la posición de este objeto. Cuando el usuario está de frente al árbol (Fig. 6.9b) se le indica la presencia del obstáculo. En los otros casos, los objetos se encuentran muy lejos por lo que la retroalimentación es nula.

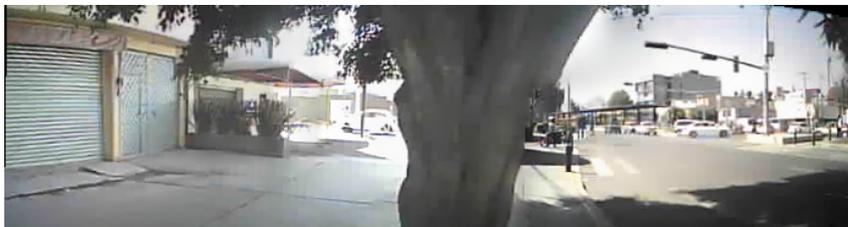


Figura 6.8: Imagen panorámica de un espacio de evaluación para el modo escáner.

6.3. Detección de obstáculos en movimiento

6.3.1. Obstáculos al frente

Las pruebas realizadas para verificar el funcionamiento de este algoritmo proporcionaron resultados muy positivos. Es posible determinar cuando el usuario se acerca de frente a algún obstáculo que representa un riesgo de colisión. En la Figura 6.10 se muestran tres momentos clave, en orden cronológico, del análisis realizado por el algoritmo en un espacio con obstáculos al frente del usuario. Las imágenes en la última columna de la figura muestran la representación del plano XY del sistema de referencia frontal en el que se lleva a cabo el análisis.

En la primera escena (Fig. 6.10a), se puede observar que el algoritmo ha determinado la presencia de objetos al frente del usuario. Sin embargo, ninguno de ellos se considera como un obstáculo de interés por el momento, de manera que la línea amarilla no indica la presencia de algún obstáculo en la región de análisis. Conforme el usuario se acerca a las personas al frente (Fig. 6.10b), el algoritmo las identifica como obstáculos de interés ya que se han desplazado en dirección al usuario lo suficiente respecto a la posición en la que fueron identificadas por primera vez en el sistema de referencia frontal. La línea amarilla ahora indica la posición del obstáculo principal determinado. En la última escena (Fig. 6.10c), se muestra cómo el usuario se ha acercado más a las personas. El algoritmo las sigue identificando como obstáculos de interés y la línea amarilla continua indicando la posición del obstáculo principal.

En otras pruebas realizadas con este mismo algoritmo se pudo observar que, en ocasiones, los objetos que eran detectados en los extremos más alejados al centro del rango de visión del sistema estereó difícilmente eran determinados como obstáculos de interés. Esto se debe a que el área en la que son visibles durante el análisis es muy reducida y se dificulta determinar cuando algún objeto se ha desplazado lo suficiente para considerarlo un obstáculo de interés. Esta limitación en el análisis no afecta a los objetos que se encuentran justo al frente del usuario ya que para ellos la región de análisis es más amplia y permite dar seguimiento a los objetos en un espacio mayor.

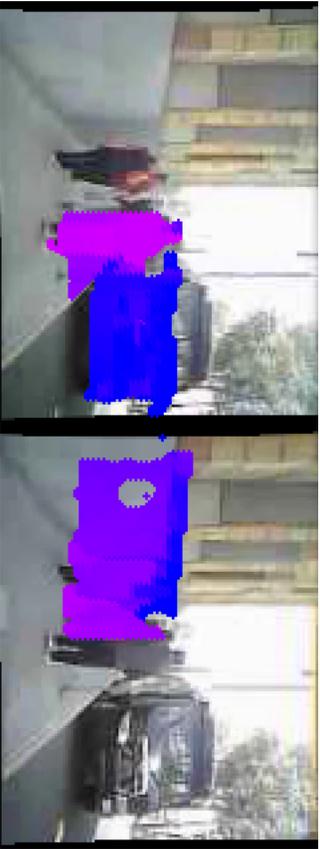


(a) Obstáculo alejado.

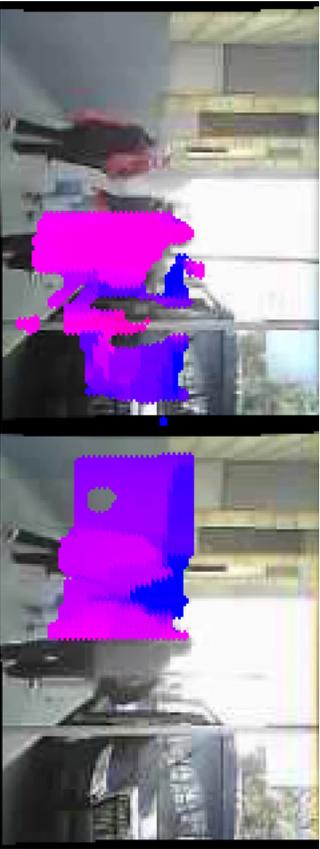
(b) Obstáculo cercano.

(c) Obstáculo alejado.

Figura 6.9: Detección de obstáculos en el modo escáner.



(a) Obstáculos detectados.



(b) Obstáculo de interés detectado.



(c) Seguimiento del obstáculo de interés.

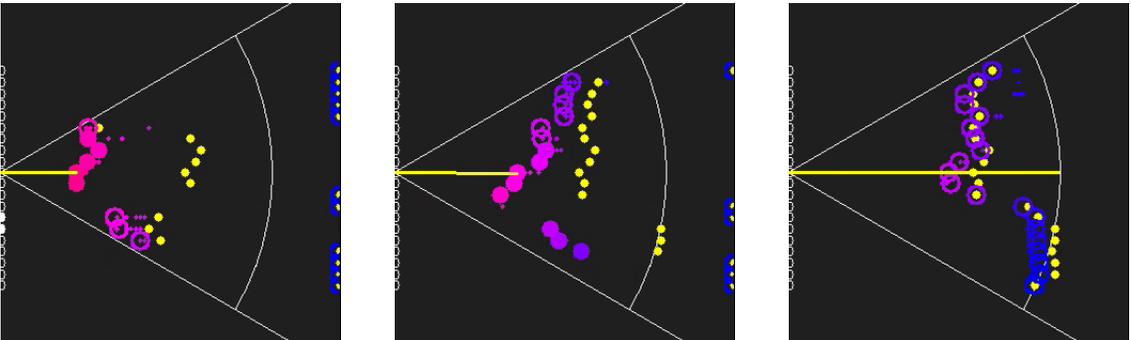


Figura 6.10: Detección de obstáculos al frente.

6.3.2. Detección de paredes

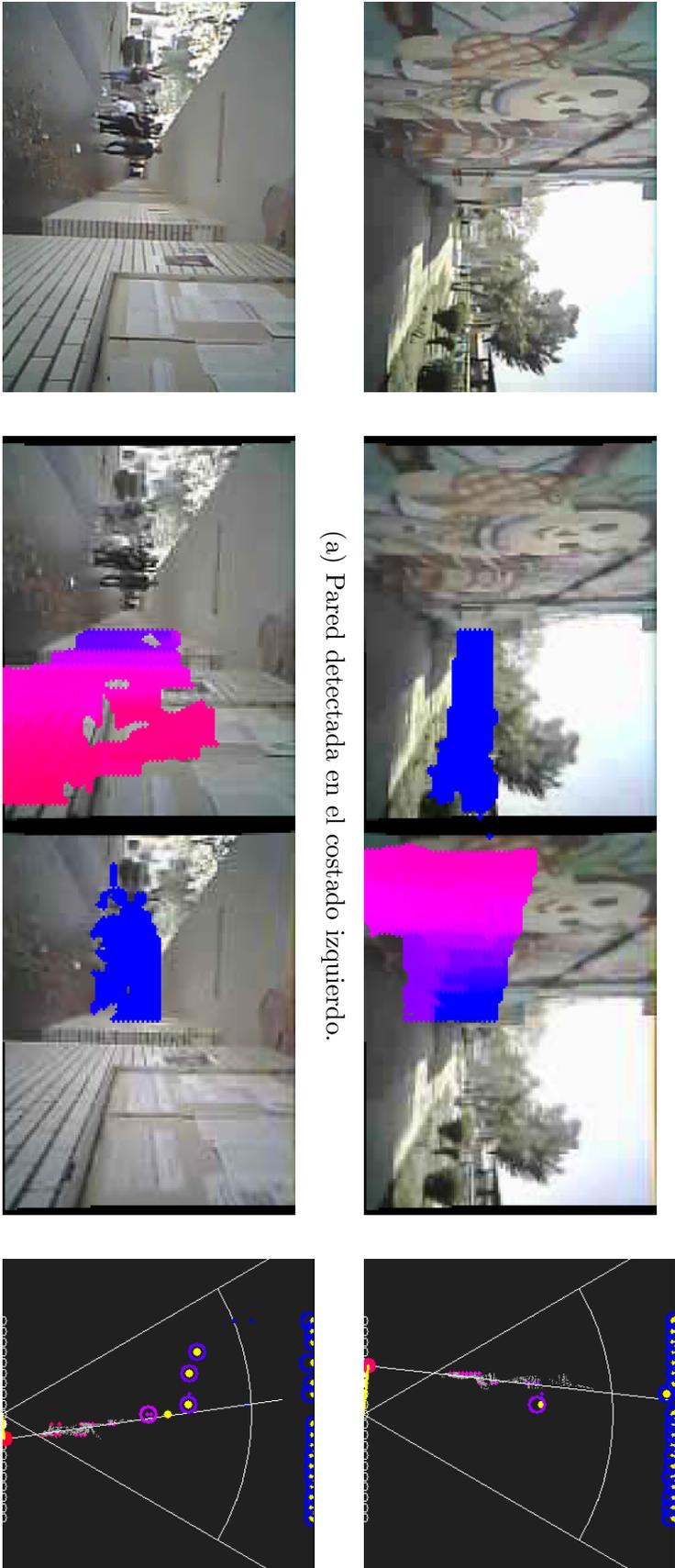
El algoritmo empleado para determinar la presencia de paredes y barreras en las escenas funciona correctamente. Tiene la capacidad de detectar los objetos planos que se encuentran a los costados de la persona. Como se puede observar en la Figura 6.11, y como se ha descrito anteriormente, si la pared contiene objetos como ventanas, carteles o murales que incrementen su textura, el análisis proporciona mejores resultados. Si la pared es de un solo color o presenta patrones repetitivos, el análisis estéreo tiene dificultades para proporcionar información de profundidad correcta, por lo que se dificulta la detección de paredes con esas características.

6.3.3. Seguimiento de obstáculos

El procedimiento utilizado para dar seguimiento a los objetos de interés detectados por el algoritmo de búsqueda de obstáculos al frente proporciona buenos resultados en la mayoría de los casos. En la Figura 6.12 se muestran algunos momentos clave del análisis realizado en un espacio en el que se llevó a cabo el seguimiento de dos obstáculos de interés.

En la primera escena (Fig. 6.12a) se puede observar que la parte frontal del auto visible en la esquina inferior derecha de las imágenes es detectada como el obstáculo principal. Al mismo tiempo, dos personas que se encuentran caminando hacia el costado izquierdo del usuario son detectadas por el algoritmo aunque no son consideradas como obstáculos de interés. Conforme el usuario camina hacia el frente (Fig. 6.12b), el auto deja de ser visible para las cámaras pero su ubicación sigue siendo indicada en el lugar donde fue visto por última vez. En este nuevo cuadro, las personas ya se han desplazado lo suficiente para que el algoritmo las identifique como obstáculos de interés por lo que el sistema se enfoca en ellas como los obstáculos principales. En el último cuadro (Fig. 6.12c), se muestra la ubicación estimada del auto y las personas fuera del rango de visión del sistema estéreo de acuerdo con la dirección de desplazamiento del usuario.

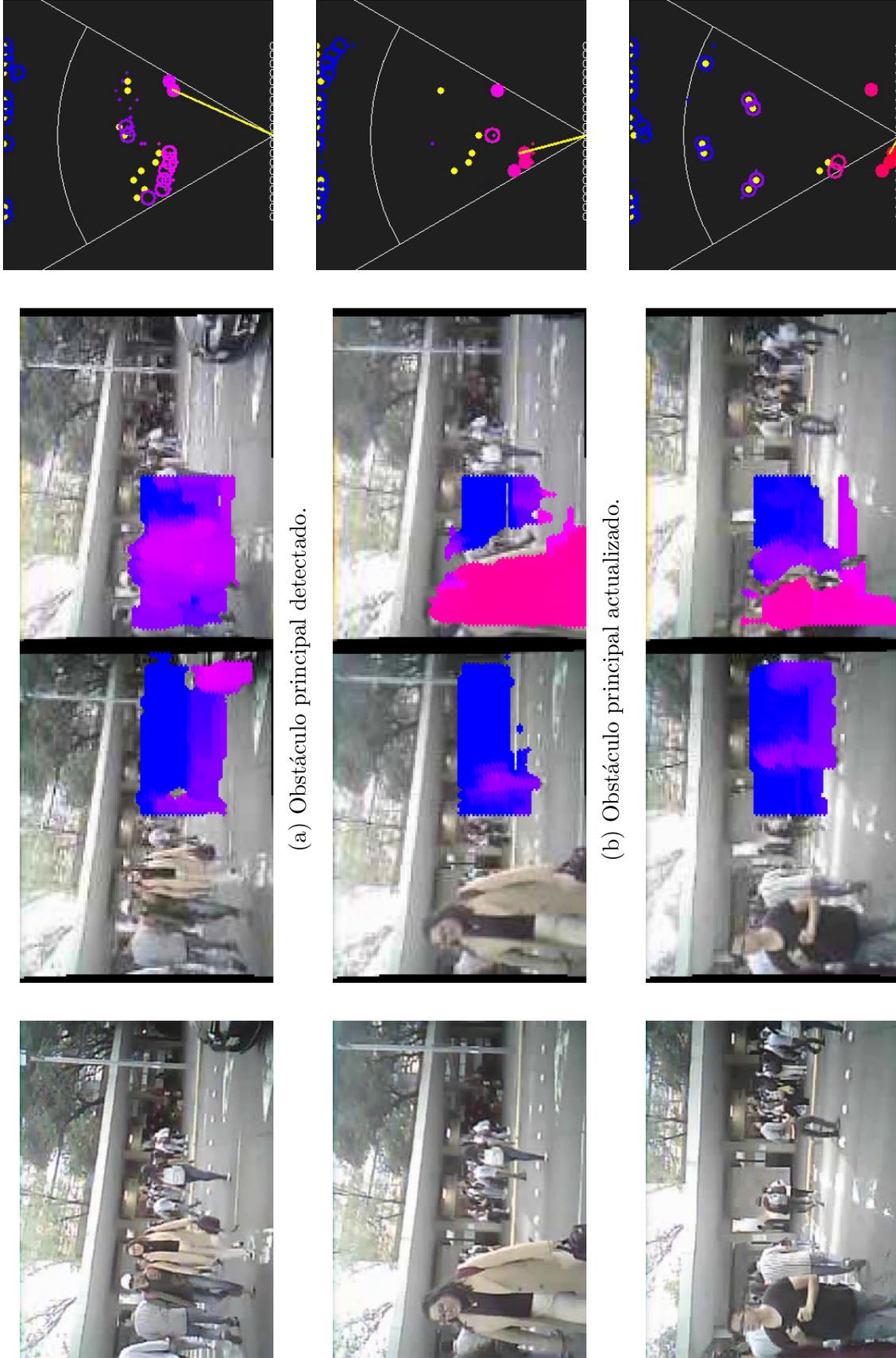
En las diversas pruebas realizadas se pudo observar que cuando el usuario camina más rápido de lo normal, algunos obstáculos de interés que también se desplazan rápidamente pero en dirección opuesta no son detectados correctamente en la región límite del rango de visión del sistema estéreo por lo que no se inicia su seguimiento. Esta limitación está relacionada con el intervalo de tiempo en que se analiza cada par de imágenes, por lo que una manera de evitarla consiste en incrementar la frecuencia de procesamiento de imágenes.



(a) Pared detectada en el costado izquierdo.

(b) Pared detectada en el costado derecho.

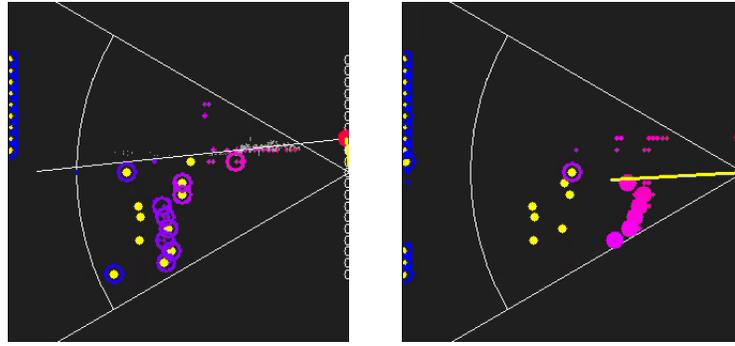
Figura 6.11: Detección de paredes.



6.3.4. Selección del obstáculo principal

Los resultados de las pruebas realizadas para verificar el funcionamiento del algoritmo de detección de obstáculos en movimiento permitieron comprobar que la selección del obstáculo principal tomando como referencia los valores de importancia relativa de los obstáculos de interés determinados en las diferentes etapas del análisis permite determinar correctamente el obstáculo en la escena que representa un riesgo de colisión mayor para el usuario.

En la Figura 6.13 se muestran algunos momentos clave del análisis realizado en un entorno para detectar obstáculos cuando el usuario se encuentra en movimiento. En la primera escena (Fig. 6.13a) se puede observar que el algoritmo detecta correctamente la presencia de un muro a la derecha del usuario. Al mismo tiempo, un grupo de personas que caminan en dirección contraria al usuario es identificado al fondo de la escena. En este instante no se considera a las personas como un obstáculo de interés por lo que el obstáculo principal que se comunica al usuario es el muro. Conforme el grupo de personas se acerca al usuario (Fig. 6.13b), el algoritmo detecta el cambio en su posición y determina que representan un obstáculo de interés. El valor de importancia relativa de este nuevo obstáculo es mayor que el de la pared, de manera que ahora se comunica al usuario la presencia de las personas al frente. En la tercer escena (Fig. 6.13c) el grupo de personas se encuentra más cerca del usuario, casi en la región límite del rango de visión del sistema estéreo. El algoritmo sigue indicando que las personas son el obstáculo principal a pesar de que la pared en el costado derecho del usuario se encuentra a una distancia menor. Finalmente, en la última escena (Fig. 6.13d) se muestra la posición estimada del grupo de personas una vez que deja de ser visible para el sistema de cámaras estéreo.

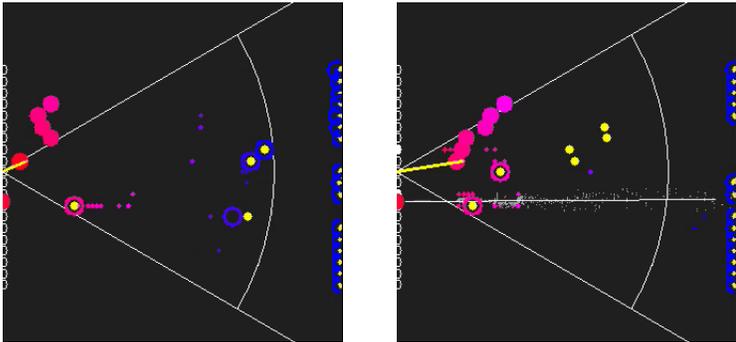
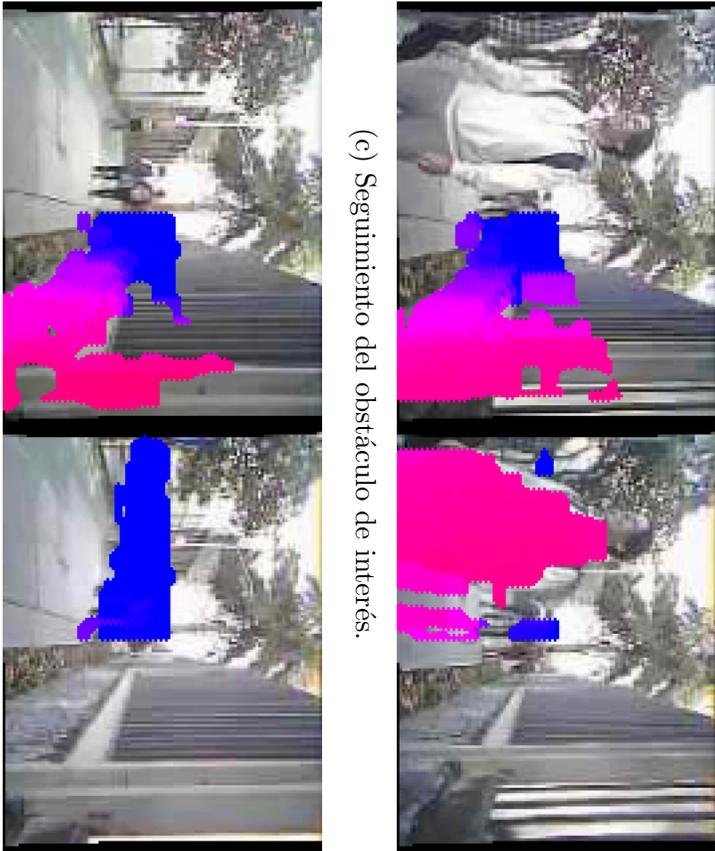


(a) Muro detectado.



(b) Obstáculo de interés detectado.





(c) Seguimiento del obstáculo de interés.

(d) Estimación de la ubicación del obstáculo.

Figura 6.13: Detección de obstáculos en movimiento.

Capítulo 7

Pruebas de uso del EAM

En diversas etapas del desarrollo del proyecto se realizaron algunas pruebas de funcionamiento del EAM con usuarios para determinar si los algoritmos desarrollados respondían correctamente al movimiento de los usuarios y para adaptar diversos parámetros de control. La retroalimentación proporcionada por los usuarios en estas pruebas permitió desarrollar y mejorar los algoritmos empleados en el EAM para la detección de obstáculos. Un ejemplo de ello es el desarrollo del modo global de funcionamiento para el análisis sin desplazamiento y la implementación del concepto de importancia relativa para determinar cuál de los obstáculos detectados representa un riesgo mayor de colisión para el usuario cuando se desplaza.

Las pruebas de funcionamiento finales del prototipo de EAM desarrollado se realizaron siguiendo una metodología para evaluar el desempeño de todas las funciones implementadas en el equipo. En estas pruebas participaron voluntariamente 8 personas de diferentes edades, principalmente personas jóvenes entre 20 y 30 años. Antes de llevar a cabo las pruebas se les explicó a los participantes el objetivo y funcionamiento del Equipo. Asimismo, se les solicitó su permiso para registrar en imágenes y video su uso del Equipo para registrar los resultados en este trabajo. Al finalizar, se invitó a los participantes a contestar un cuestionario para conocer más a detalle su experiencia de uso del EAM.

Las pruebas realizadas se llevaron a cabo en el espacio mostrado en la Figura 7.1. Este lugar es un zona amplia de superficie plana sin escalones o cambios de nivel y buenas condiciones iluminación natural. Las características de este espacio permitieron llevar a cabo la evaluación del funcionamiento de los algoritmos implementados en el EAM en un entorno controlado ya que de esta manera el Equipo se enfocó en la detección de los obstáculos establecidos para cada prueba. A continuación, se describen las pruebas realizadas y se analizan los resultados obtenidos en cada una de ellas.

7.1. Interpretación de las señales de retroalimentación sin desplazamiento

En primera instancia se mostró a los participantes los dos modos de retroalimentación disponibles en los brazaletes: el modo continuo y el modo por pulsos. Se les indicó la forma de interpretar la vibración producida por los brazaletes en cada modo de funcionamiento para determinar la información sobre la distancia y la dirección en la que se encuentra el obstáculo detectado.

Para proceder con las pruebas de detección de obstáculos, se les pidió a los participantes que seleccionaran el modo de vibración que les resultó más sencillo de interpretar al mismo tiempo que



Figura 7.1: Espacio de pruebas.

fuera cómodo para ellos. Quienes seleccionaron el modo de retroalimentación por pulsos indicaron que lo preferían porque les resultaba más fácil identificar el cambio en la frecuencia de los pulsos que el cambio en la intensidad de la vibración. Esto debido a que en el modo continuo, después de un tiempo de funcionamiento, la capacidad de sensibilidad en las muñecas se reducía debido a la vibración constante.

7.1.1. Modo escáner

En la primera prueba realizada se evaluó el desempeño del modo escáner. Para llevar a cabo esta prueba se indicó a los usuarios que habría un obstáculo cercano a ellos en algún lugar a su alrededor. Se les pidió que, sin moverse de su lugar, dirigieran el DCIE en diferentes direcciones para determinar la ubicación del obstáculo mencionado (Fig. 7.2).

Todos los participantes identificaron correctamente la dirección en la que se encontraba el obstáculo indicado. Asimismo, si el obstáculo se acercaba o alejaba de las personas, los usuarios pudieron identificar el cambio en la vibración de los brazaletes correspondiente. En algunas ocasiones, los participantes pudieron percibir la presencia de otros obstáculos alejados en el entorno pero de acuerdo con la información de distancia proporcionada pudieron determinar cuál era el obstáculo más cercano a ellos.

7.1.2. Modo global

La prueba realizada para validar el funcionamiento del modo global fue similar a la del modo escáner. Esta vez se les pidió a los usuarios que una vez que identificaran la dirección en la que se encontraba el obstáculo de prueba, giraran hacia otra dirección e indicaran cuál de los dos brazaletes indicaba la presencia del obstáculo (Fig. 7.3).

En todos los casos los participantes lograron identificar correctamente el brazaletes que indicaba la dirección en la que se encontraba el obstáculo de prueba después de dirigir su atención hacia otro lado. Se pudo observar que, aunque la distribución de la vibración en los brazaletes cambiaba



Figura 7.2: Evaluación del modo escáner.



Figura 7.3: Evaluación del modo global.

gradualmente de acuerdo con la dirección del obstáculo, algunos usuarios solo identificaron tres casos: ambos brazaletes vibran, solo vibra el izquierdo y solo vibra el derecho. Aunque se esperaba que la distribución de la vibración proporcionara una noción más concreta sobre la dirección del obstáculo, los casos identificados por algunos usuarios les permiten determinar sin problema, de manera más general, la ubicación del obstáculo más cercano detectado.

7.2. Interpretación de las señales de retroalimentación en movimiento

Para llevar a cabo la evaluación del EAM cuando el usuario se encuentra en movimiento se solicitó a las personas participantes que caminaran de frente en línea recta en tres ocasiones. Se indicó a los usuarios que en cada prueba habría un obstáculo que podría estar ubicado al centro o en algún costado de su camino (Fig. 7.4). Se les pidió que, una vez que identificaran la presencia del obstáculo, indicaran la dirección en la que consideraban que se encontraba el objeto de acuerdo con la vibración proporcionada por los brazaletes.

En todas las pruebas realizadas los participantes identificaron oportunamente la presencia del obstáculo mientras se desplazaban. En la mayoría de las ocasiones, cuando los usuarios se encontraban a una distancia alejada del obstáculo, indicaban que el objeto estaba ubicado al centro. Pero conforme se acercaban al obstáculo, en los casos cuando estaba ubicado a un costado del camino, pudieron identificar con más claridad la dirección en la que se encontraba el obstáculo.

Al realizar esta prueba se observó un comportamiento muy común entre los usuarios. Cuando las personas no recibían ninguna advertencia sobre la presencia de algún obstáculo en su entorno caminaban a un ritmo constante. En el momento en que los brazaletes les indicaban que se había detectado un obstáculo los participantes hacían una pausa en su desplazamiento y después continuaban caminando a una rapidez menor, esta rapidez en su desplazamiento se continuaba reduciendo conforme se acercaban al objeto. En algunos casos, los usuarios se detenían por completo al ubicarse prácticamente frente al obstáculo.



Figura 7.4: Evaluación del análisis en movimiento.

7.3. Experiencia del usuario

Todos los comentarios y sugerencias de las personas que participaron en las pruebas realizadas en las diferentes etapas del desarrollo del proyecto ayudaron a mejorar el funcionamiento del EAM propuesto y permitieron identificar oportunidades de mejora a futuro en los algoritmos implementados y en los dispositivos. A continuación, se sintetizan las ideas expresadas por los usuarios a partir de la experiencia que tuvieron al utilizar el EAM.

7.3.1. Equipamiento y comodidad del EAM

Las personas participantes coincidieron en que, de manera general, fue sencillo equiparse con los dispositivos que componen el EAM. Sin embargo, algunos usuarios experimentaron dificultades para colocarse la batería del DCIE y los brazaletes debido a que las correas que sujetan estos dispositivos no tenían la longitud necesaria que les permitiera introducir libremente su brazo y muñecas. Esto incrementó el tiempo que les tomó colocarse todos los componentes del Equipo, el cual fue, en promedio, de un minuto.

Los usuarios consideraron que el EAM es cómodo y muy ligero. Coincidieron en que se podría mejorar la forma de sujetar el DCIE sobre la frente del usuario ya que debido a la distribución de la masa del dispositivo, sin una sujeción apropiada, este podría caer si la persona inclina la cabeza hacia abajo.

7.3.2. Desempeño del EAM en la detección de obstáculos

De acuerdo con su experiencia en las pruebas de funcionamiento del EAM en movimiento, los participantes indicaron que el Equipo les ayudó a prevenir choques con obstáculos la mayoría de las veces. Asimismo, consideraron que el rango de detección de obstáculos y el tiempo de respuesta del sistema son apropiados para indicar de manera oportuna la presencia de objetos en el entorno, aunque se pueden mejorar. El nivel de seguridad que tuvieron los usuarios al desplazarse con la ayuda del EAM fue diferente para cada persona pero se mantuvo dentro del rango aceptable-seguro. Ninguna persona consideró que se sintiera totalmente insegura utilizando el Equipo.

En el caso del funcionamiento del Equipo sin desplazamiento, la mayoría de los usuarios prefirieron el modo de funcionamiento global. Al mismo tiempo, consideraron que la funcionalidad de estimación de la posición de obstáculos fuera del rango de visión de las cámaras es útil para mejorar la retroalimentación.

Cerca del espacio donde se llevaron a cabo las pruebas con el EAM había algunas puertas y muros de vidrio. Los participantes coincidieron en que el desempeño del Equipo en la detección de estos obstáculos no fue el mejor. También se observó que algunos objetos de baja altura como bancas o escalones no fueron detectados correctamente.

7.3.3. Interpretación de la retroalimentación

Respecto a la retroalimentación proporcionada por los brazaletes, se observó que los participantes jóvenes pudieron determinar con facilidad la distancia y ubicación de los obstáculos a partir de la vibración, mientras que para las personas adultas mayores esto representó un reto ligeramente mayor. Al disponer los usuarios del control de la intensidad de vibración máxima, no consideraron que la vibración producida por los brazaletes fuera incómoda o molesta.

Para cada usuario la relevancia del sentido del oído en la obtención de información sobre su entorno fue diferente pero, en general, los participantes consideraron que este sentido ayuda a conocer con más detalle las características del espacio en el que se encuentran. Los usuarios indicaron que la acción de interpretar la retroalimentación proporcionada por los brazaletes limitó ligeramente la atención que dieron a su sentido del oído sin que esto representara un problema para su seguridad.

7.3.4. Trabajo a futuro

Las pruebas realizadas con la ayuda de usuarios permitieron identificar diferentes características de los dispositivos y los algoritmos implementados en las que se puede continuar trabajando para proporcionar al usuario una experiencia de uso aún mejor.

Entre las mejoras que se pueden hacer a los dispositivos que componen el EAM se encuentra la opción de hacer que las correas de la batería del DCIE y los brazaletes sean elásticas y que tengan más puntos de sujeción para que puedan adaptarse con más facilidad al brazo y muñecas de la mayor cantidad de usuarios. Asimismo, un diseño más ergonómico de los brazaletes puede mejorar considerablemente su comodidad y permitir un movimiento más libre de las manos.

Otra característica importante que se puede mejorar del EAM es la forma de colocar el DCIE sobre la frente del usuario. Aunque el dispositivo es ligero, sin una forma apropiada de sujetarlo o apoyarlo, este puede caerse o causar cierta incomodidad al usuario ya que siempre se apoya sobre la nariz. El diseño de un apoyo con forma de diadema que se pueda colocar directamente sobre la frente para sujetar el DCIE puede facilitar el equipamiento del dispositivo y dar más comodidad al usuario.

Una manera de lograr que la calidad de la información de profundidad no dependa completamente de la iluminación de la escena o de la disponibilidad de objetos con suficiente textura consiste en la proyección de patrones de luz infrarroja sobre las superficies con la intención de que SGBM pueda utilizar esta información en el proceso de búsqueda de correspondencias. Asimismo, para prevenir casos en los que el análisis estéreo no permita detectar obstáculos con características muy específicas, como las puertas y muros de vidrio, el EAM se podría apoyar de diferentes tipos de sensores de distancia para identificar la presencia de este tipo de objetos en el entorno.

En cuanto a la retroalimentación proporcionada por el EAM, algunos usuarios expresaron que la capacidad de conocer más información sobre los obstáculos detectados les permitiría entender aún más su entorno y tomar mejores decisiones en su movilidad. Algunas de las principales características de los obstáculos que proporcionarían información útil al usuario son en el tipo de objeto detectado, el tamaño que tiene y la altura en la que se encuentra. La comunicación de estas propiedades se puede llevar a cabo mediante la implementación de más patrones de vibración en los brazaletes.

La capacidad del EAM para proporcionar información al usuario sobre su entorno se puede extender con la implementación de retroalimentación auditiva que utilice diferentes sonidos o tonos para indicar la presencia de obstáculos. Inclusive esto se puede realizar de manera más concreta indicando las características de los objetos mediante audio descriptivo.

La información del entorno que se puede obtener con la ayuda de diferentes algoritmos de visión por computadora abre la posibilidad de que se puedan emplear múltiples métodos de análisis y retroalimentación con el fin de que el EAM identifique en el entorno la información más relevante para cada persona y la comunique a través de los métodos de retroalimentación que mejor se adapten a las necesidades del usuario.

Conclusiones

El trabajo realizado en este proyecto cumplió satisfactoriamente con los objetivos establecidos. Fue posible entender, desde un enfoque social y de Derechos Humanos, los retos y limitaciones que las personas con debilidad visual enfrentan día a día en su movilidad. De acuerdo con las necesidades identificadas, se llevó a cabo la propuesta de diseño de un Equipo de Asistencia para Movilidad. Se desarrolló un prototipo del concepto seleccionado y se validó mediante diversas pruebas el correcto funcionamiento del equipo.

Las pruebas realizadas con el prototipo construido permitieron comprobar que los algoritmos implementados en la aplicación móvil tienen la capacidad de detectar obstáculos correctamente en la mayor cantidad de entornos siempre que las condiciones de iluminación permitan a las cámaras capturar imágenes en las que los detalles básicos de los objetos, como los bordes o colores, puedan ser identificados fácilmente.

La validación del funcionamiento de los algoritmos implementados en el prototipo desarrollado abre la posibilidad de que estos procedimientos puedan ser empleados, en conjunto con otros métodos para obtener información de profundidad, no solo en tecnología de asistencia sino también en otras aplicaciones de navegación.

El tiempo promedio de respuesta del sistema en las diferentes pruebas de funcionamiento realizadas se mantuvo alrededor de los 40 ms. El uso de la biblioteca OpenCV y las diversas optimizaciones realizadas en el software para llevar a cabo de manera más eficiente el procesamiento de las imágenes y el análisis de los datos permitieron reducir considerablemente el tiempo de procesamiento del sistema. Este resultado, en conjunto con la verificación del correcto funcionamiento del equipo en la detección de obstáculos, permite confirmar que la aplicación móvil desarrollada puede llevar a cabo la transmisión de datos, el análisis del estado de movimiento del usuario, el procesamiento de las imágenes, la búsqueda de obstáculos y la generación de señales de retroalimentación en tiempo real.

Las pruebas del prototipo de Equipo de Asistencia para Movilidad realizadas con la participación de usuarios permitieron verificar que la retroalimentación háptica proporcionada a través de los brazaletes permite a la mayoría de las personas interpretar correctamente la ubicación de los obstáculos detectados por el equipo. El cambio en la intensidad de la vibración y la variación de la frecuencia de los pulsos fueron dos métodos bastante útiles para indicar de manera intuitiva la distancia en la que se encuentran los obstáculos. Asimismo, el uso de los dos brazaletes permitió que los usuarios identificaran la dirección de la ubicación los obstáculos, principalmente en el modo de funcionamiento global.

Si bien algunos usuarios indicaron que tuvieron ciertas dificultades para identificar con claridad la distribución de la vibración entre los dos brazaletes, también comentaron que con más tiempo de prueba y adaptación al sistema podrían identificar con más facilidad la información de los obstáculos detectados por el equipo.

Finalmente, es importante no dejar de lado que, aunque la tecnología de asistencia para movilidad es una herramienta que puede ayudar a las personas con alguna limitación visual a superar diversas barreras físicas, el Diseño Universal es el punto de partida para facilitar el acceso y la movilidad de todas las personas en diferentes entornos. Cuando el diseño de los espacios públicos, de la tecnología o de los servicios toma en cuenta las necesidades de la mayoría de las personas sin importar sus limitaciones sensoriales o de movilidad, se da a las personas la posibilidad de participar en igualdad de oportunidades y de integrarse de manera autónoma en los diferentes ámbitos sociales de la vida.

Referencias

- [1] Velarde Lizama, V. (2012). Los modelos de la discapacidad: un recorrido histórico. *Revista Empresa y Humanismo*, 15(1), 115-136.
- [2] Comisión Nacional de los Derechos Humanos. (2018). *Las personas con discapacidad ante los nuevos paradigmas*. Consultado el 21 de junio de 2022, desde https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/514169/01_Modelos_historicos_de_discapacidad.pdf
- [3] Barbosa, S. D., Villegas Salazar, F., & Beltrán, J. (2019). El modelo médico como generador de discapacidad (Universidad Militar Nueva Granada, Ed.). *Revista Latinoamericana de Bioética*, 19(2). Consultado el 22 de junio de 2022, desde <https://www.redalyc.org/journal/1270/127063728009/127063728009.pdf>
- [4] Palacios, A. (2008). *El modelo social de discapacidad: orígenes, caracterización y plasmación en la Convención Internacional sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad* (1.ª ed.). Grupo editorial CINCA.
- [5] Instituto para Ciegos y Débiles Visuales. (2022). *Discapacidad visual*. Consultado el 20 de junio de 2022, desde <https://institutoparaciegos.org/acerca/>
- [6] Organización Mundial de la Salud. (2021). *Ceguera y discapacidad visual*. Consultado el 21 de mayo de 2022, desde <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>
- [7] Comisión Nacional de los Derechos Humanos. (2019). *Informe especial sobre el derecho a la accesibilidad de las personas con discapacidad*.
- [8] Hernández Flores, M. (2010). *Recorridos y representaciones espaciales de la Ciudad de México de personas con discapacidad visual: un entorno discapacitante* (Tesis de maestría). Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. Consultado el 27 de junio de 2022, desde <https://ciesas.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1015/524>
- [9] Hernández Flores, M. (2012). Ciegos conquistando la ciudad de México: vulnerabilidad y accesibilidad en un entorno discapacitante. *Nueva antropología*, 25(76), 59-81. Consultado el 1 de abril de 2022, desde http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-06362012000100004
- [10] Hersh, M. A., & Johnson, M. A. (2008). *Assistive Technology for Visually Impaired and Blind People*. Springer.
- [11] Escuela para Entrenamiento de Perros Guía para Ciegos I.A.P. (2022). *¿Cómo se entrenan los perros guía?* Consultado el 3 de julio de 2022, desde <https://www.perrosguia.org.mx/perrosguia>
- [12] Borenstein, J., & Ulrich, I. (1997). The GuideCane — A Computerized Travel Aid for the Active Guidance of Blind Pedestrians. En *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 1283-1288).

- [13] The Lighthouse for the Blind, Inc. (2021). *Everything You Need to Know About White Canes*. Consultado el 5 de julio de 2022, desde <https://lhblind.org/everything-you-need-to-know-about-white-canes/>
- [14] Kramomthong, P., Pintavirooj, C., & Paing, M. P. (2021). Smart Cane for Assisting Visually Impaired People and the Blind. *2021 13th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON)*, 1-5.
- [15] Khan, M. A., Nisar, K., Nisar, S., Chowdhry, B., Lodhi, E., Khan, J., & Haque, M. R. (2021). An Android-based Portable Smart Cane for Visually Impaired People. *2021 IEEE 15th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, 1-6.
- [16] Sujatha Kumari, B. A., Rachana Shree, N., Radha, C., Krishnamurthy, S., & Sahar, S. (2020). Smart Stick for Blind. En J. S. Raj, A. Bashar & S. R. J. Ramson (Eds.), *Innovative Data Communication Technologies and Application* (pp. 586-593). Springer International Publishing.
- [17] Rahman, A., Nur Malia, K. F., Milan Mia, M., Hasan Shuvo, A. M., Hasan Nahid, M., & Zayem, A. M. (2019). An Efficient Smart Cane Based Navigation System for Visually Impaired People. *2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)*.
- [18] Vélez Martínez, C. (2022). *Wearable Devices*. Consultado el 13 de julio de 2022, desde <http://www.ii.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/CapsulasTI/Paginas/wearable.aspx>
- [19] Katzschmann, R. K., Araki, B., & Rus, D. (2018). Safe Local Navigation for Visually Impaired Users With a Time-of-Flight and Haptic Feedback Device. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(3), 583-593.
- [20] Wang, H.-C., Katzschmann, R. K., Teng, S., Araki, B., Giarré, L., & Rus, D. (2017). Enabling independent navigation for visually impaired people through a wearable vision-based feedback system. *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 6533-6540.
- [21] Marzullo, G. D., Jo, K.-H., & Cáceres, D. (2021). Vision-based Assistive Navigation Algorithm for Blind and Visually Impaired People Using Monocular Camera. *2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 640-645.
- [22] Caraiman, S., Zvoristeanu, O., Burlacu, A., & Herghelegiu, P. (2019). Stereo Vision Based Sensory Substitution for the Visually Impaired. *Sensors*, 19(12).
- [23] Barontini, F., Catalano, M. G., Pallottino, L., Leporini, B., & Bianchi, M. (2021). Integrating Wearable Haptics and Obstacle Avoidance for the Visually Impaired in Indoor Navigation: A User-Centered Approach. *IEEE Transactions on Haptics*, 14(1), 109-122.
- [24] Simões, W. C. S. S., Silva, Y. M. L. R., Pio, J. L. d. S., Jazdi, N., & F. de Lucena, V. (2020). Audio Guide for Visually Impaired People Based on Combination of Stereo Vision and Musical Tones. *Sensors*, 20(1).
- [25] Kaehler, A., & Bradski, G. (2017). *Learning OpenCV 3. Computer Vision in C++ with the OpenCV Library*. O'Reilly.
- [26] Szeliski, R. (2022). *Computer Vision: Algorithms and Applications* (2.^a ed.). Springer. <https://szeliski.org/Book>
- [27] Sanderson, G. (2018). *Quaternions and 3d rotation, explained interactively*. <https://www.youtube.com/watch?v=zjMULxRvygQ>
- [28] Sanderson, G., & Eater, B. (2018). *Visualizing quaternions. An explorable video series*. <https://eater.net/quaternions>

- [29] Sanderson, G. (2018). *Visualizing quaternions (4d numbers) with stereographic projection*. <https://www.3blue1brown.com/lessons/quaternions>
- [30] Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. McGraw-Hill.
- [31] Arellano, J. (2019). *Bluetooth vs. Wi-Fi for IoT: Which is Better?* Consultado el 4 de agosto de 2022, desde <https://www.verytechnology.com/iot-insights/bluetooth-vs-wifi-for-iot-which-is-better>
- [32] UNIT Electronics. (2023). *UNIT Electronics*. <https://uelectronics.com/>
- [33] Steren. (2023). *Steren*. <https://www.steren.com.mx/>
- [34] Espressif Systems. (2023). *Arduino core for the ESP32, ESP32-S2, ESP32-S3 and ESP32-C3*. <https://github.com/espressif/arduino-esp32>
- [35] Matalon, N. (2016). *TinyWireS*. <https://github.com/nadavmatalon/TinyWireS>
- [36] Bradski, G. (2000). The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*.
- [37] Android Developers. (2022). *Cómo crear conexiones P2P con Wi-Fi directo*. Consultado el 4 de octubre de 2022, desde <https://developer.android.com/training/connect-devices-wirelessly/wifi-direct>
- [38] Wi-Fi Alliance. (2023). *Wi-Fi Direct*. <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-direct>
- [39] Townsend, K. (2014). *Introduction to Bluetooth Low Energy*. <https://learn.adafruit.com/introduction-to-bluetooth-low-energy>
- [40] Miller, R. B. (1968). Response time in man-computer conversational transactions. *Fall Joint Computer Conference*.
- [41] OpenCV. (2023). *Camera Calibration and 3D Reconstruction*. https://docs.opencv.org/3.4/d9/d0c/group_calib3d.html
- [42] OpenCV-Python Tutorials. (2016). *Smoothing Images*. https://opencv24-python-tutorials.readthedocs.io/en/latest/py_tutorials/py_imgproc/py_filtering/py_filtering.html#filtering
- [43] OpenCV. (2023). *Changing the contrast and brightness of an image!* https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc1/tutorial_basic_linear_transform.html
- [44] OpenCV. (2023). *Sobel Derivatives*. https://docs.opencv.org/3.4/d2/d2c/tutorial_sobel_derivatives.html
- [45] OpenCV. (2023). *StereoBM Class Reference*. https://docs.opencv.org/3.4/d9/dba/classcv_1_1StereoBM.html
- [46] Hirschmuller, H. (2008). Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2), 328-341.
- [47] OpenCV. (2023). *StereoSGBM Class Reference*. https://docs.opencv.org/3.4/d2/d85/classcv_1_1StereoSGBM.html
- [48] González Mendoza, E., & Silva Rico, J. A. (2022). Equipo de asistencia basado en visión estéreo para personas con discapacidad visual (SOMIM, Ed.). *Memorias del 28 Congreso SOMIM*. <https://somim.org.mx/2023/01/03/memorias-del-28-congreso-somim/>
- [49] OpenCV. (2023). *Disparity map post-filtering*. https://docs.opencv.org/3.4/d3/d14/tutorial_ximgproc_disparity_filtering.html
- [50] Blenkinsopp, R. (2019). *What is Haptic Feedback?* <https://www.ultraleap.com/company/news/blog/what-is-haptic-feedback/>
- [51] Adafruit. (2012). *Li-Ion & LiPoly Batteries*. <https://learn.adafruit.com/li-ion-and-lipoly-batteries>
- [52] Kinetronica. (2023). *Kinetronica*. <http://www.kinetroni.com/>

Apéndice A

Lista de precios

Cantidad	Elemento	Precio unitario ^a (MXN) [32][52][33]	Precio total (MXN)
2	Módulo ESP32-CAM	\$179.00	\$358.00
5	Microcontrolador ATtiny85	\$64.00	\$320.00
5	Socket de 8 pines para circuito integrado	\$5.00	\$25.00
1	IMU MPU6050	\$69.00	\$69.00
3	Elevador de voltaje Mini Boost Step-Up	\$18.00	\$54.00
1	Batería Li-Ion 18650 3.7 V, 3000 mAh	\$60.00	\$60.00
1	Porta pila para batería 18650	\$12.00	\$12.00
1	Cable duplex calibre 22 AWG (1 m)	\$8.00	\$8.00
1	Alambre para circuito impreso (1 m)	\$4.00 ^b	\$4.00
4	Interruptor deslizable horizontal	\$8.00	\$32.00
4	Conector Jack DC 5.5 mm x 2.1 mm	\$2.00	\$8.00
4	Conector Plug DC 5.5 mm x 2.1 mm	\$7.00	\$28.00
10	Resistor 10 k Ω , 1/2 W	\$0.60 ^b	\$6.00
2	Módulo de vibración PWM	\$32.00	\$64.00
3	Módulo Bluetooth HM10	\$94.00	\$282.00
2	Batería Li-Po 802040 3.7 V, 650 mAh	\$61.00	\$122.00
3	Cargador de baterías Li-Ion Li-Po TP4056	\$15.00	\$45.00
1	Transistor BJT NPN 2N2222	\$1.00 ^b	\$1.00
1	MOSFET MTP2955V	\$30.00 ^b	\$30.00
1	Placa fenólica de cobre 10 x 15 cm	\$25.00 ^b	\$25.00
1	Placa fenólica de cobre 10 x 10 cm	\$17.00 ^b	\$17.00
5	Hoja de papel transfer A4 para PCB	\$3.20 ^b	\$16.00
1	Cloruro férrico	\$35.00 ^b	\$35.00
1	Soldadura de estaño	\$48.00	\$48.00
1	Pasta para soldar	\$18.00	\$18.00
240	Manufactura aditiva con PLA (1 min)	\$1.20 ^b	\$288.00
13	Tornillo 1/16" x 1/2"	\$1.00 ^b	\$13.00
1	Listón 2 cm ancho (1 m)	\$5.00 ^b	\$5.00
1	Velcro 2 cm ancho (1 m)	\$20.00	\$20.00
1	Carrete de hilo	\$20.00 ^b	\$20.00
			\$2033.00

^a Precio al momento de la compra.

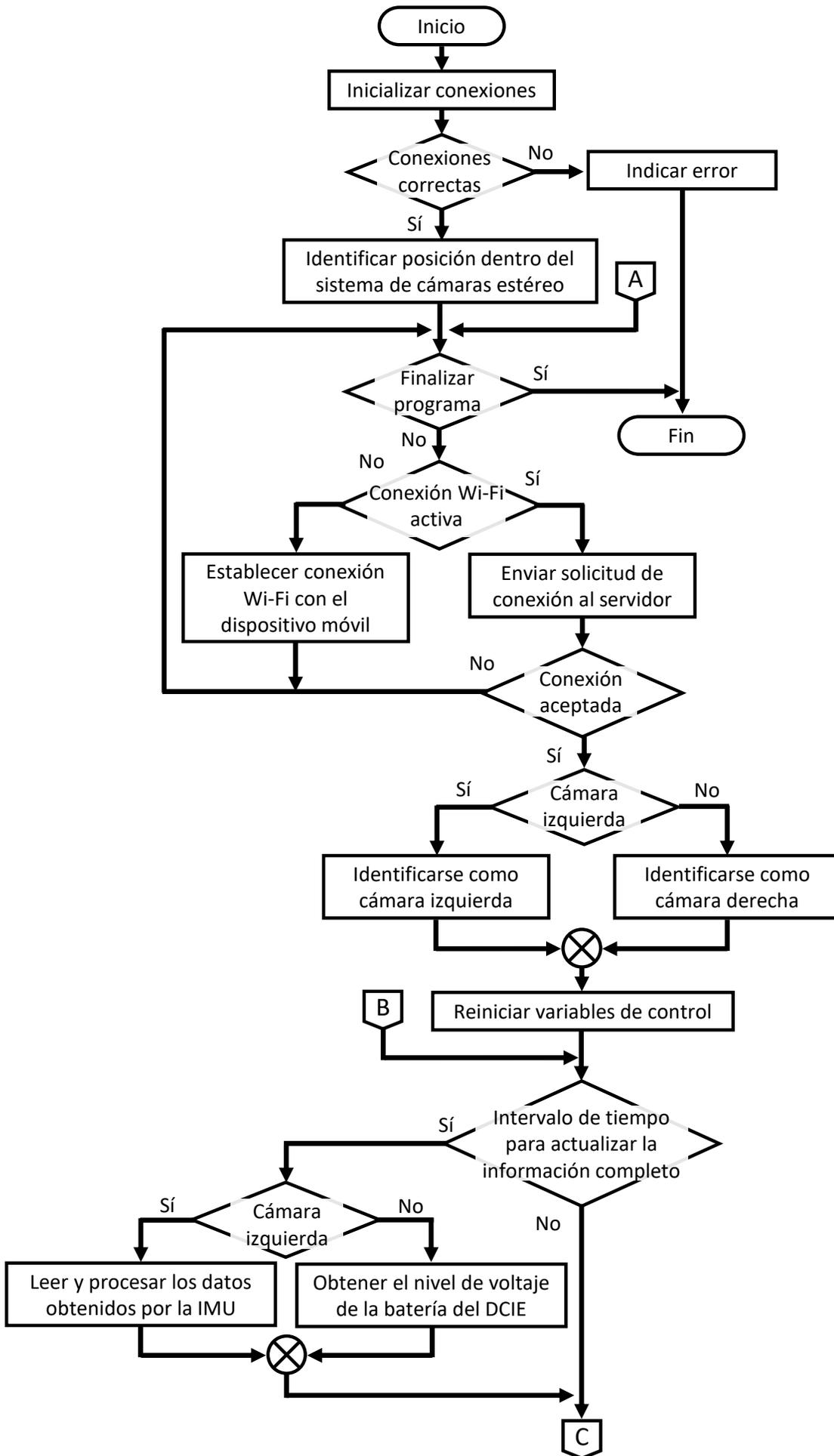
^b Precio actualizado en mayo de 2023.

Tabla A.1: Lista de precios.

Apéndice B

Diagramas de flujo

Diagrama de flujo del programa de control del DCIE



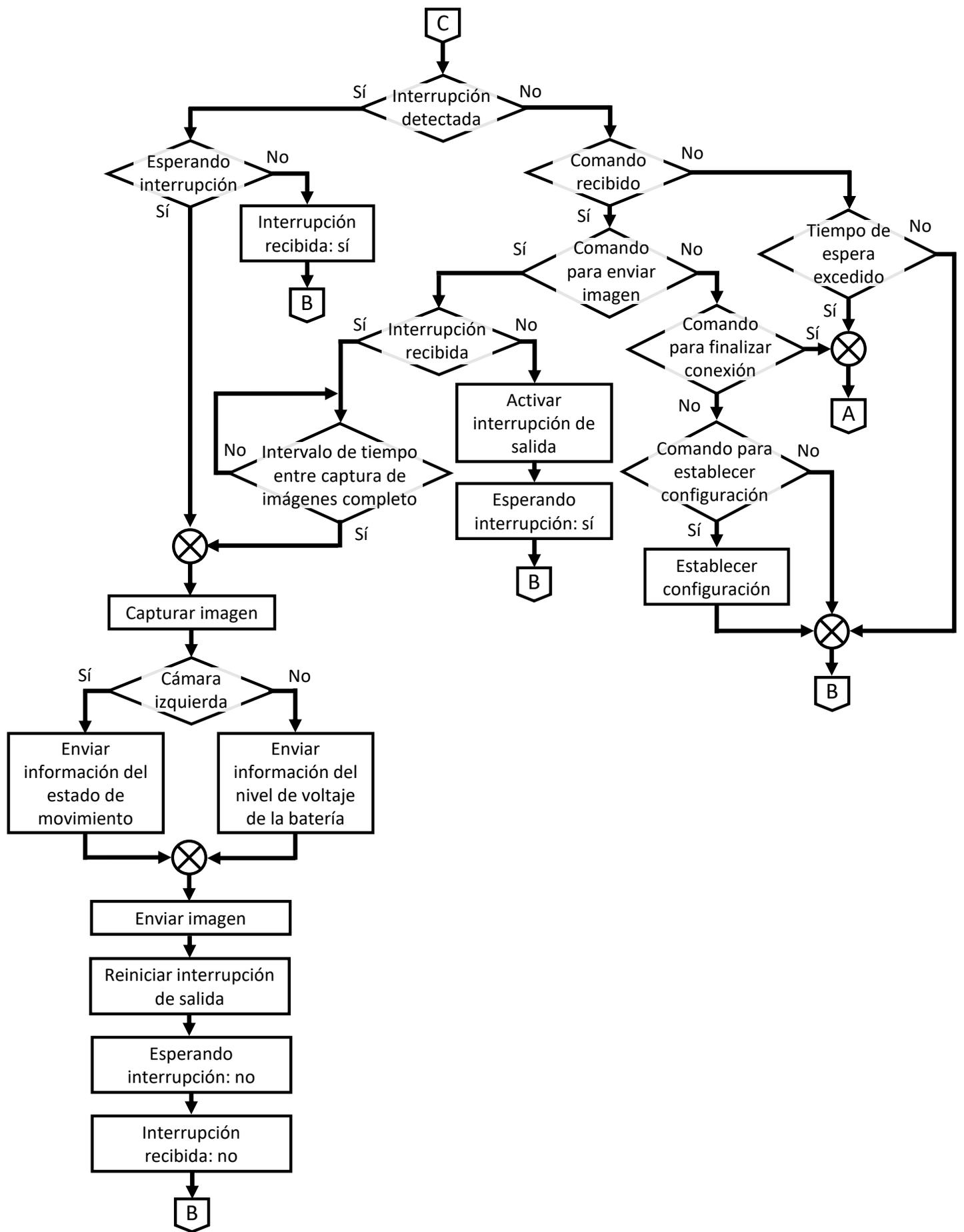


Diagrama de flujo del programa encargado de determinar el nivel de voltaje en la batería del DCIE

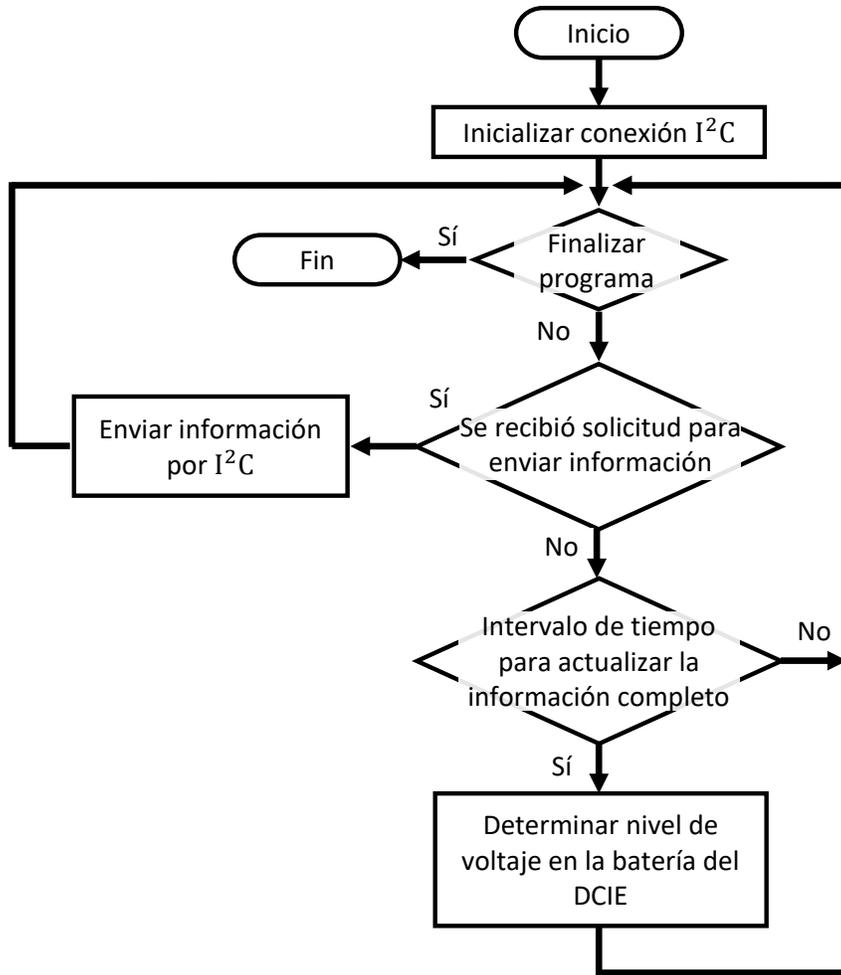
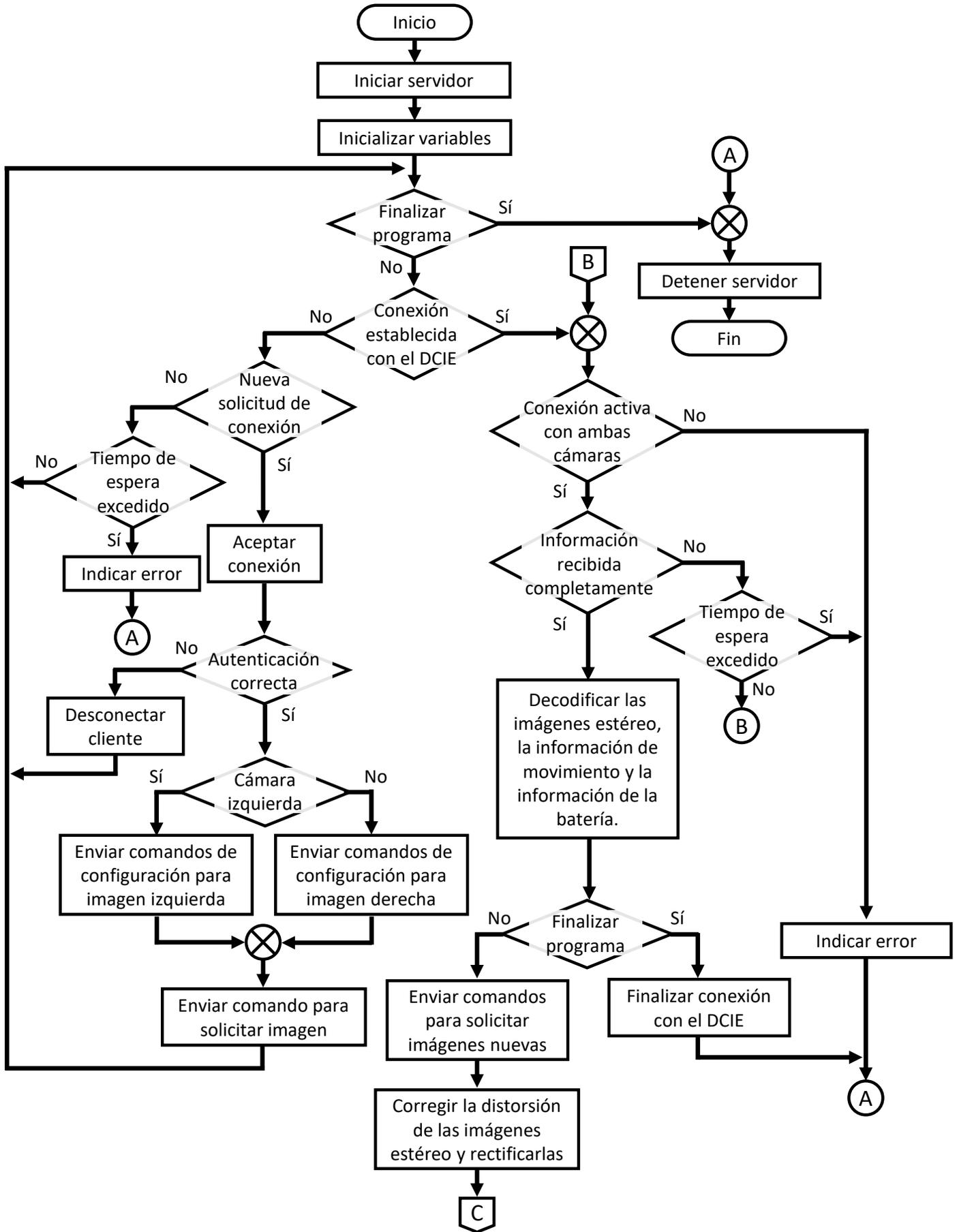
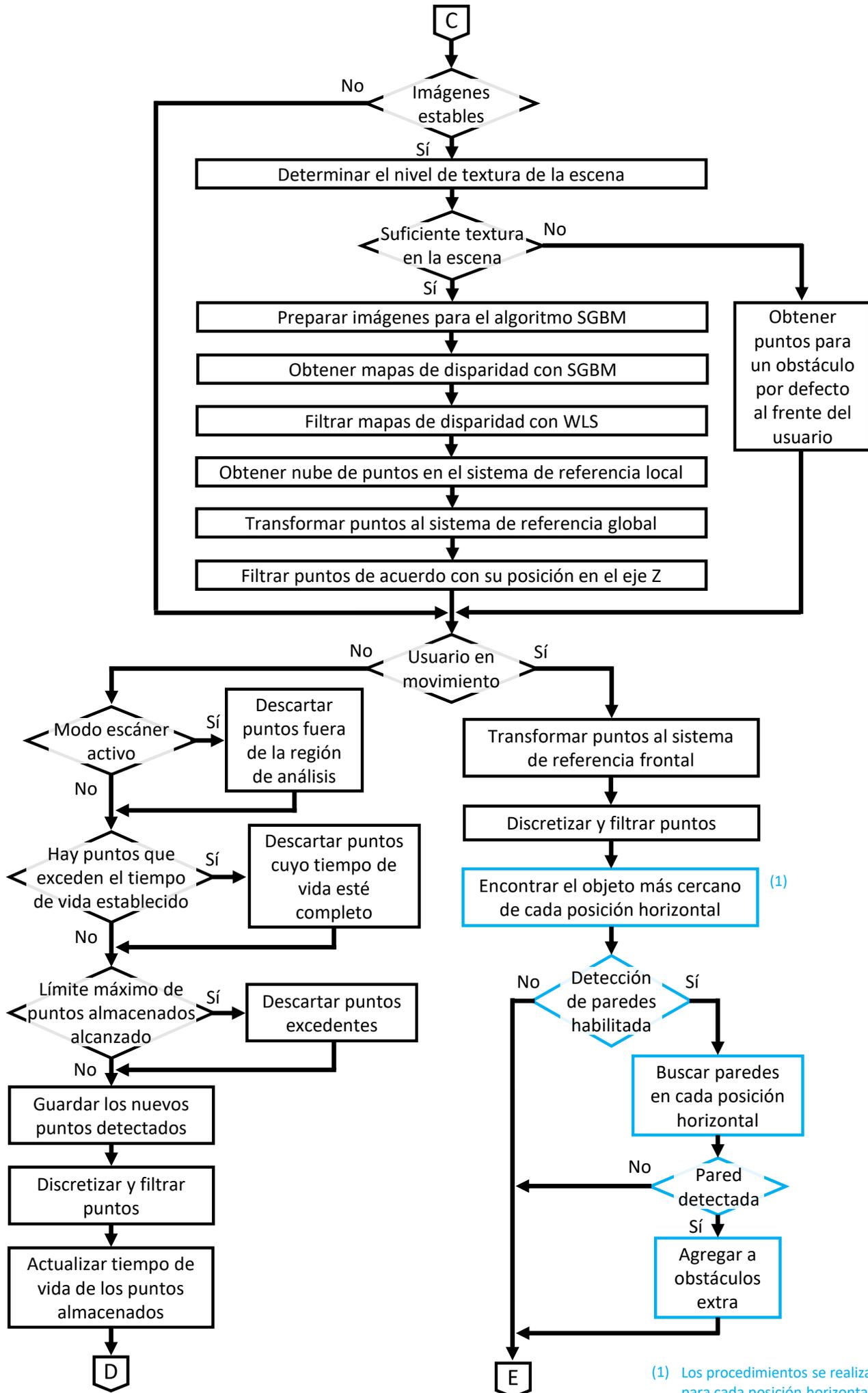
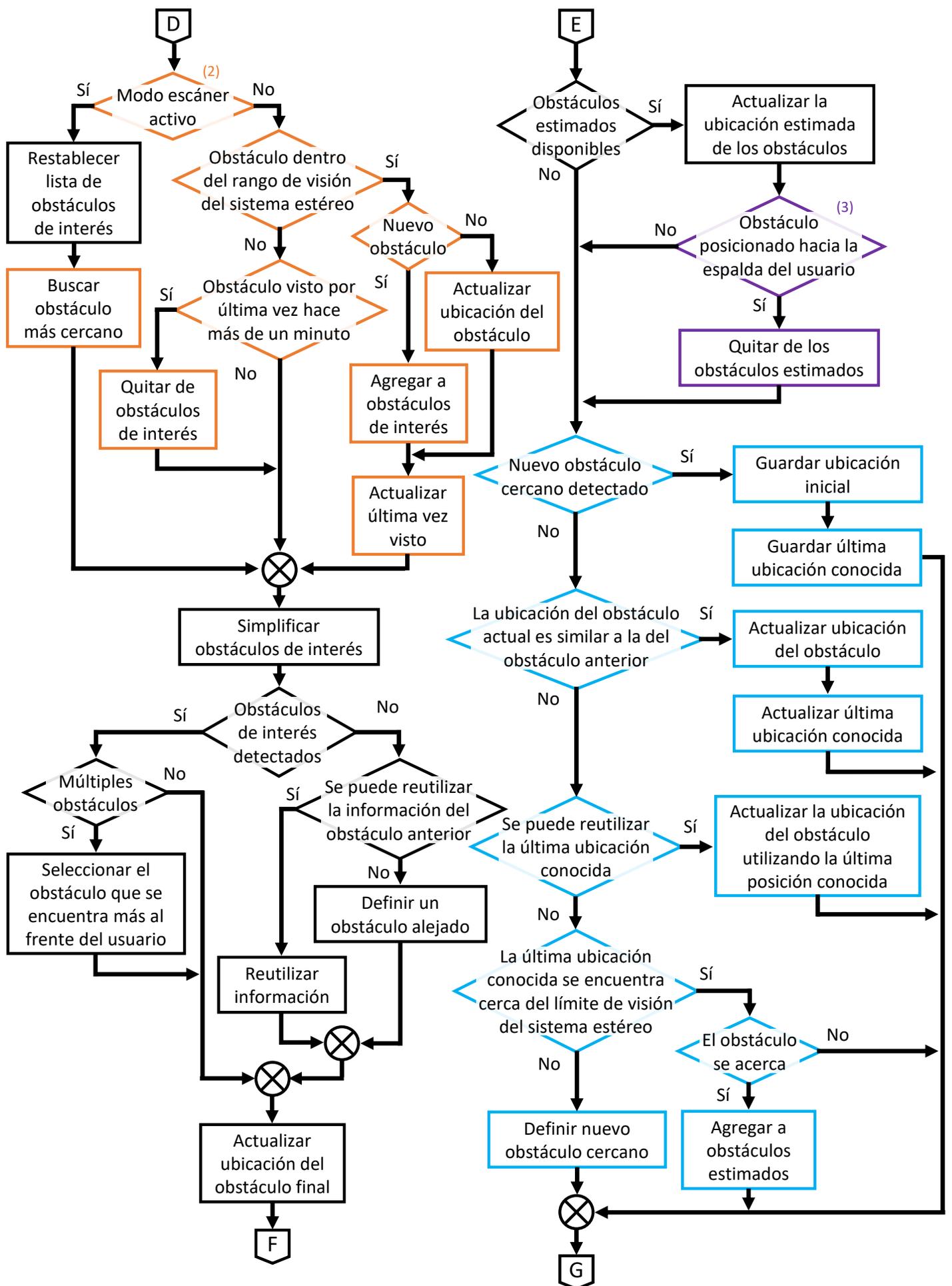


Diagrama de flujo del programa de control de la aplicación móvil



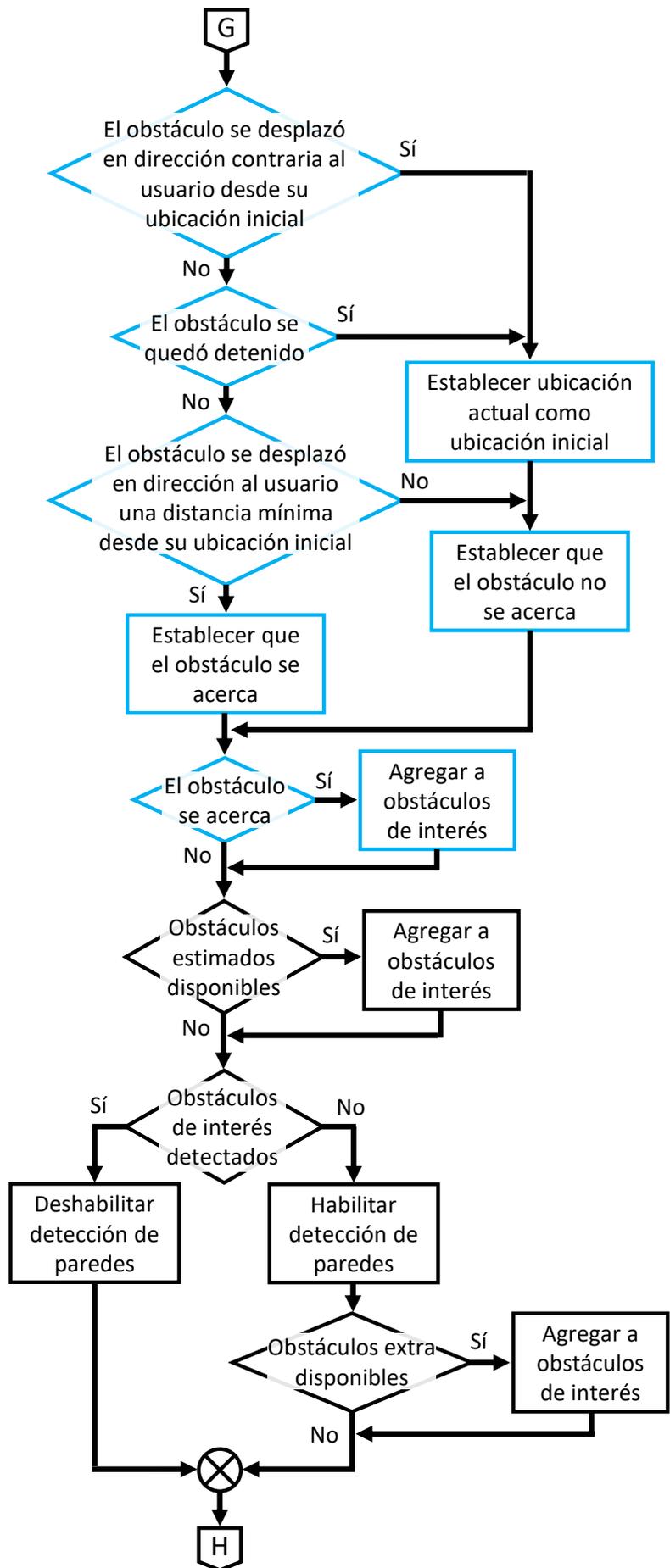


(1) Los procedimientos se realizan para cada posición horizontal



(2) Los procedimientos se realizan para cada posición angular

(3) Los procedimientos se realizan para cada obstáculo estimado



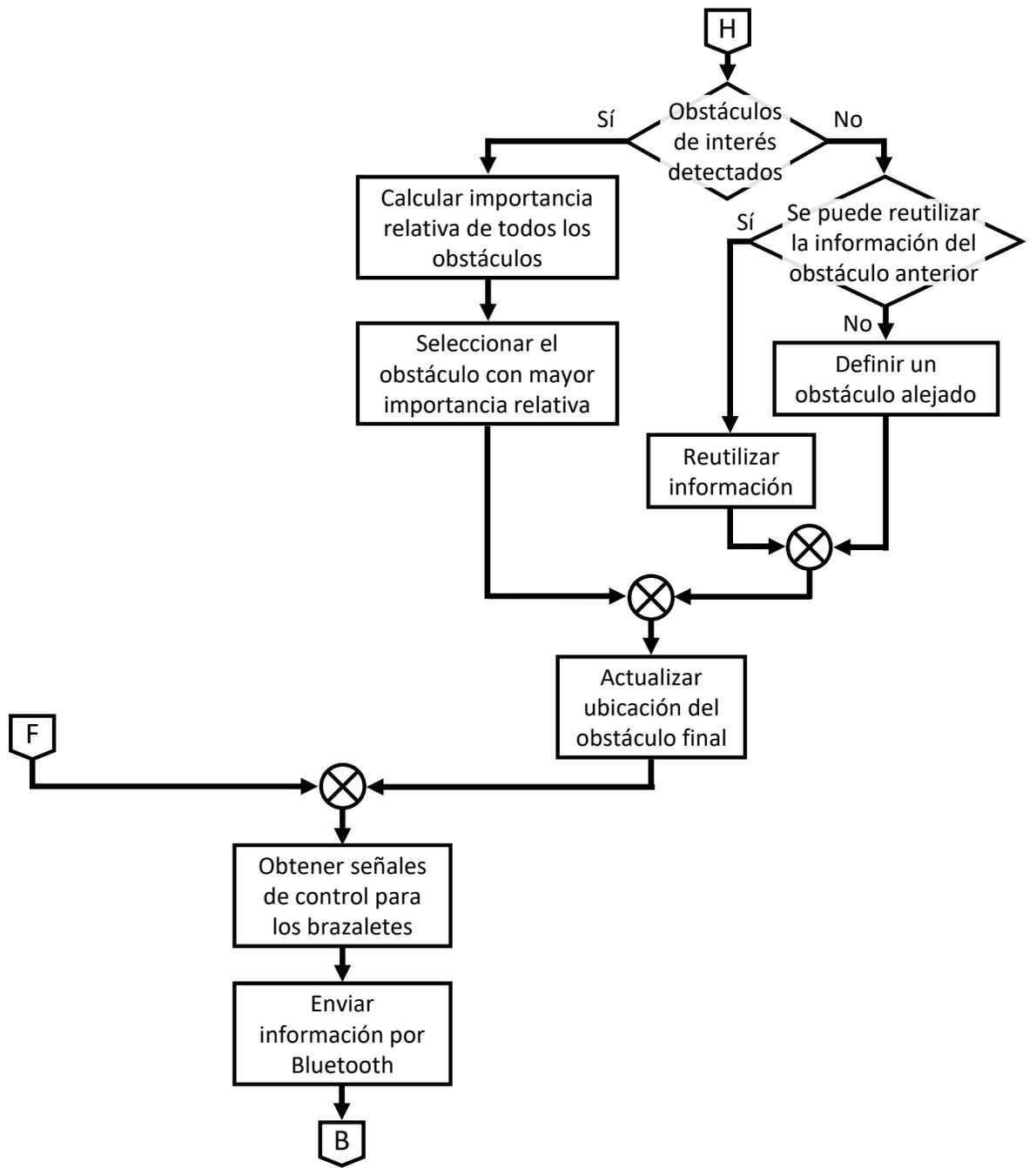


Diagrama de flujo del programa de control de los brazaletes

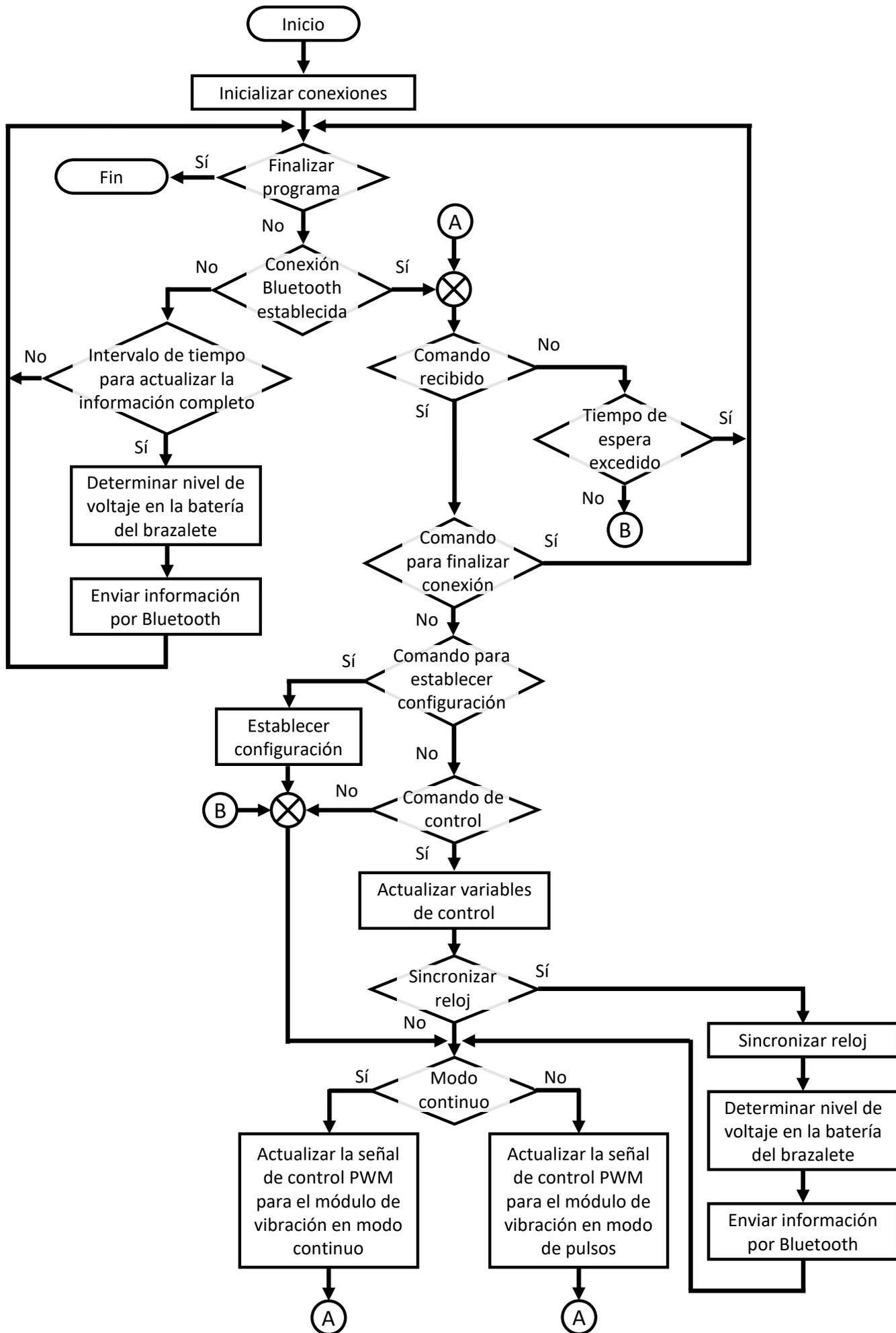
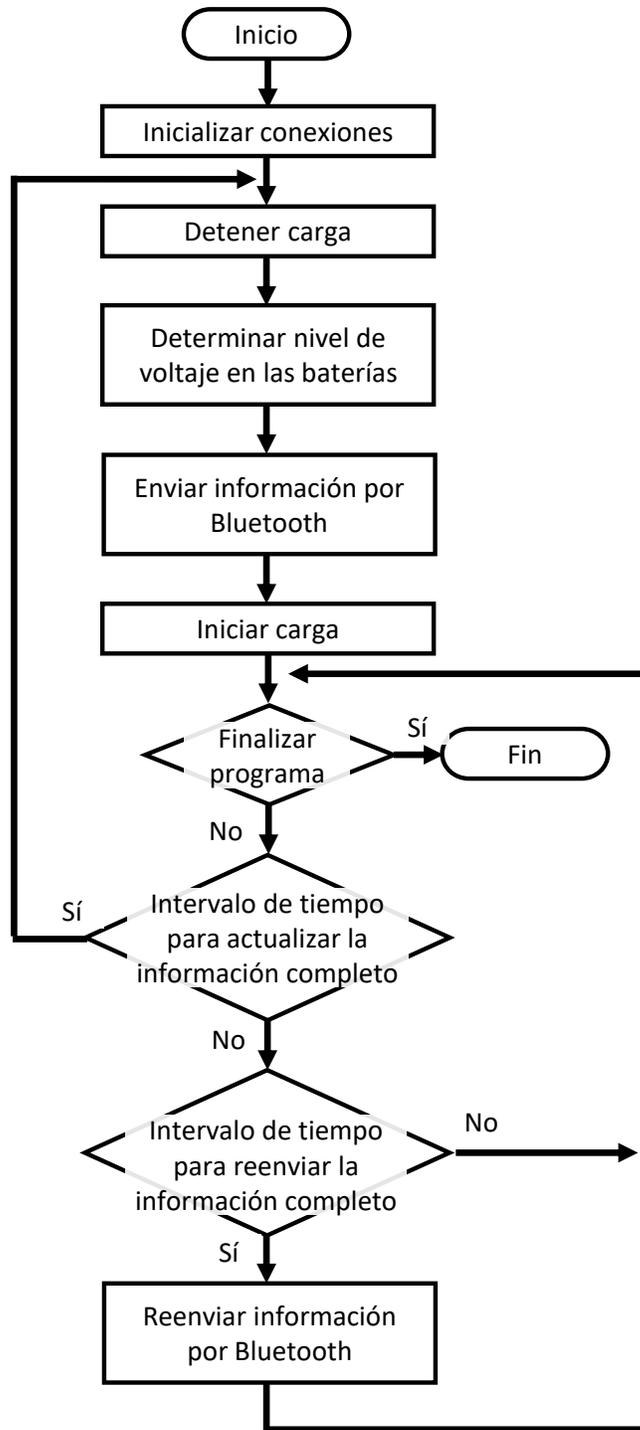


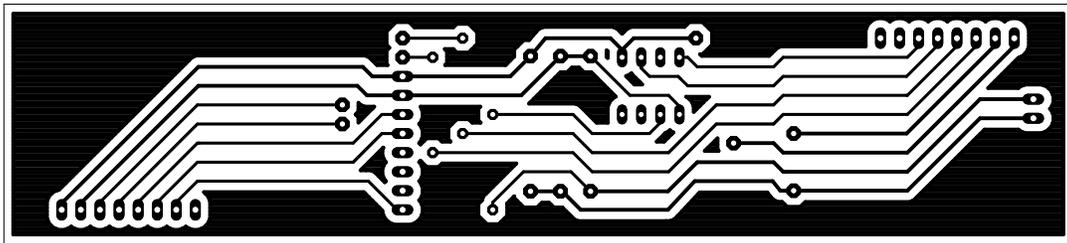
Diagrama de flujo del programa del Centro de carga



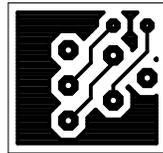
Apéndice C

Placas PCB

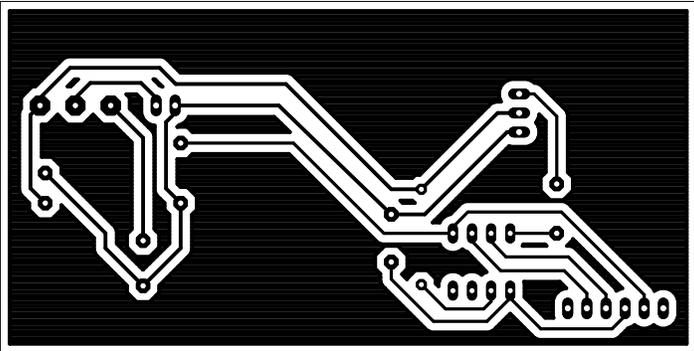
PCB del DCIE



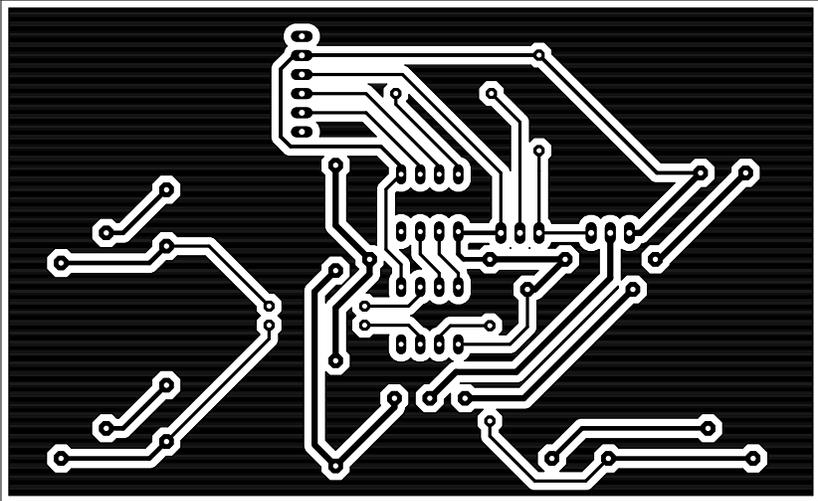
PCB de la batería del DCIE



PCB del brazalete



PCB del Centro de carga



Apéndice D

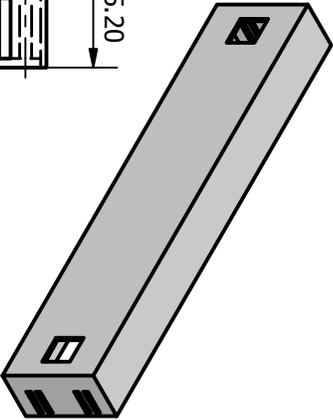
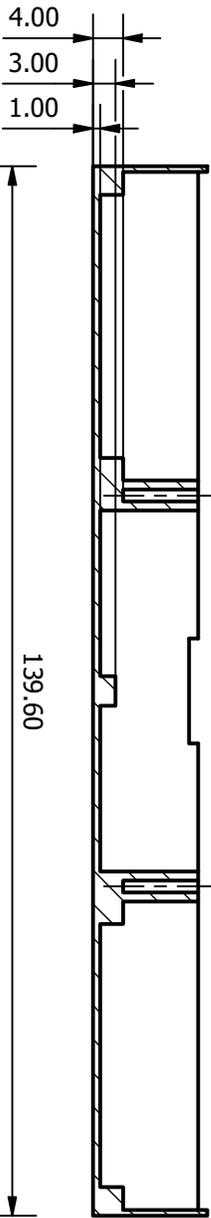
Planos de las carcasas

2

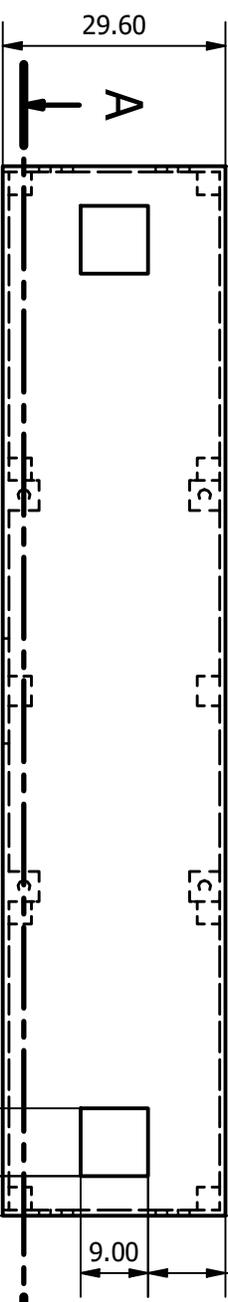


1

A-A (1:1)

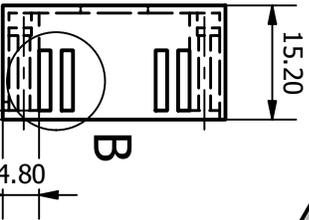


B



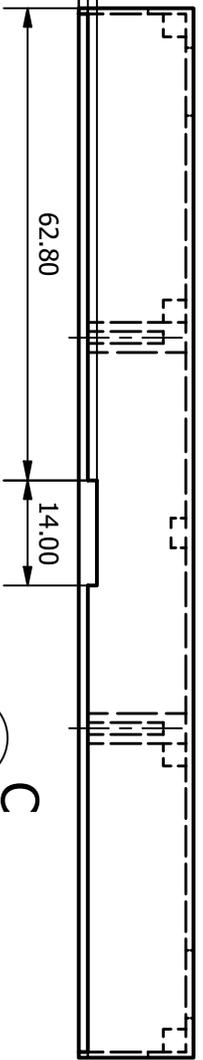
A

A

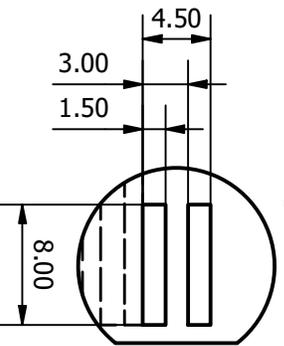


B

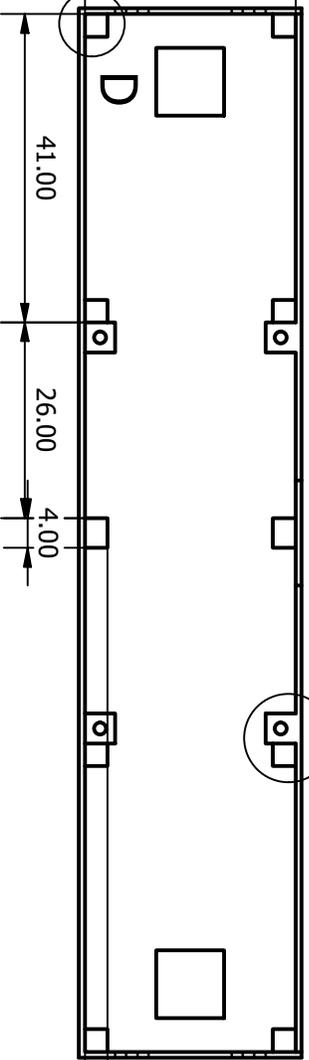
B (2:1)



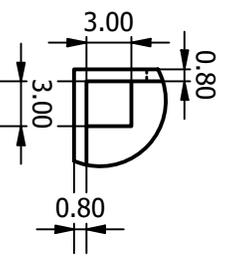
C



C (2:1)



D (2:1)



A



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Carcasa del DCIE

Dibujado por:
Emmanuel González Mendoza

Fecha:
21/04/2023

Escala: 1:1

Revisado por:
Dr. José Antonio Silva Rico



Unidades: mm

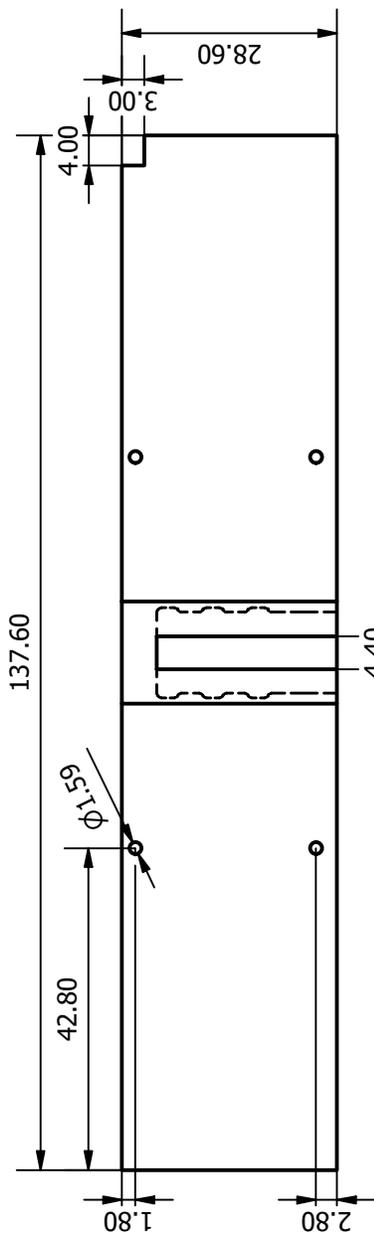
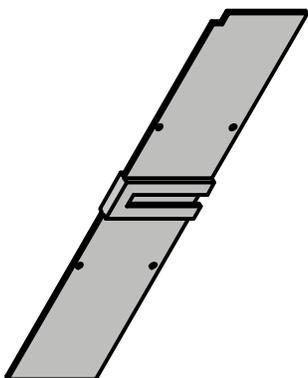
2



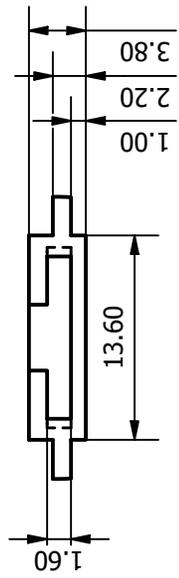
1

1

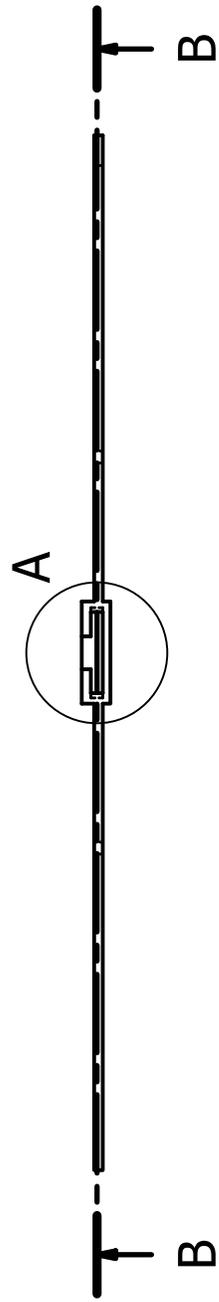
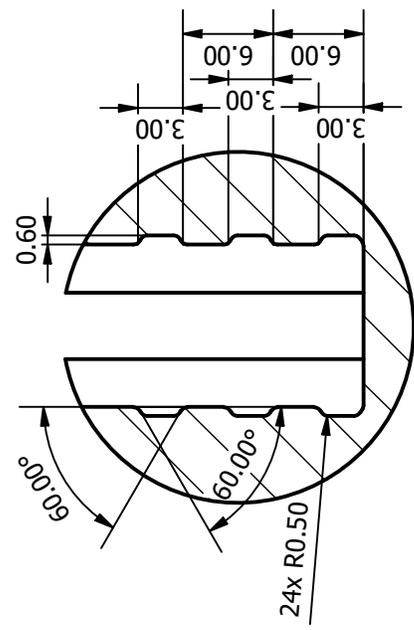
2



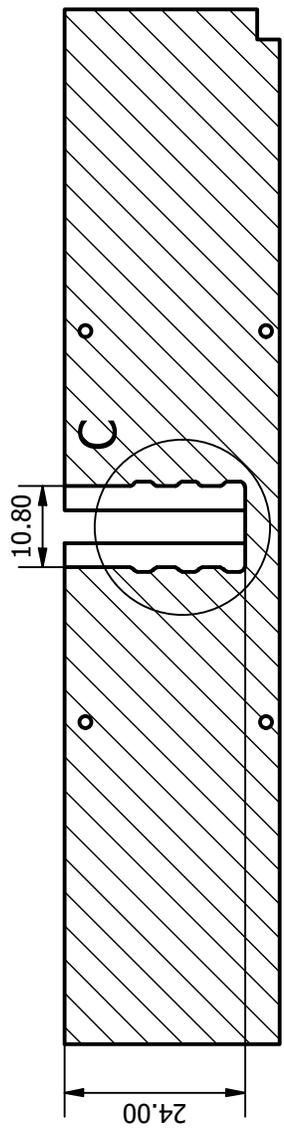
A (2:1)



C (2:1)



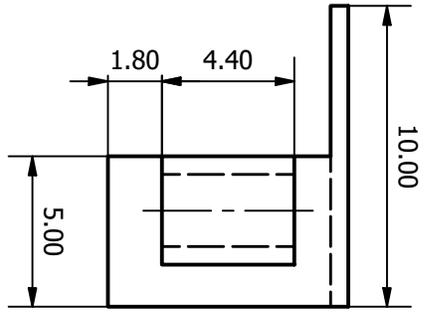
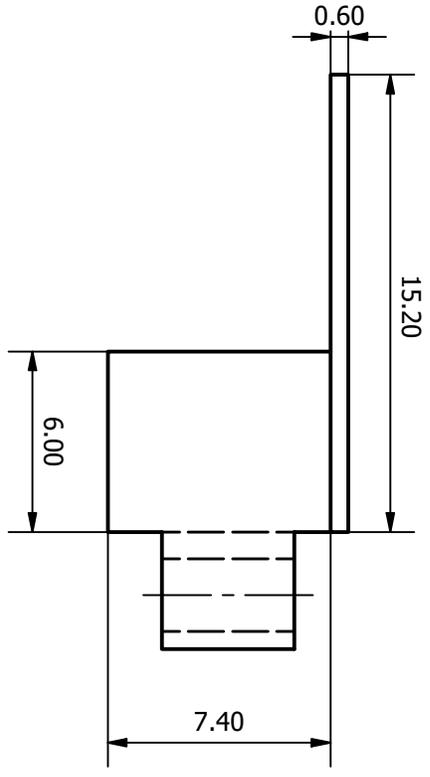
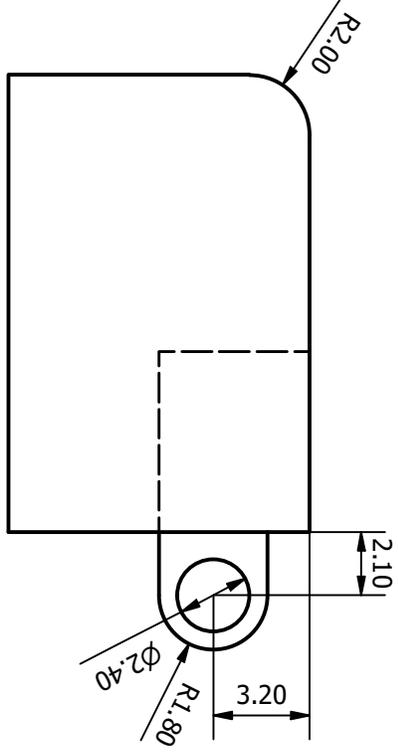
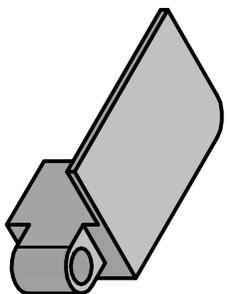
B-B (1:1)



Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería	Tapa de la carcasa del DCIE
Dibujado por: Emmanuel González Mendoza	Fecha: 21/04/2023
Revisado por: Dr. José Antonio Silva Rico	Escala: 1:1
	Unidades: mm

1

2



Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Bisagra derecha 1	
Dibujado por: Emmanuel González Mendoza		Fecha: 21/04/2023	
Revisado por: Dr. José Antonio Silva Rico			
		Escala: 4:1	
		Unidades: mm	

2

1

A

B

A

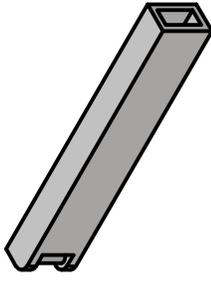
B

1

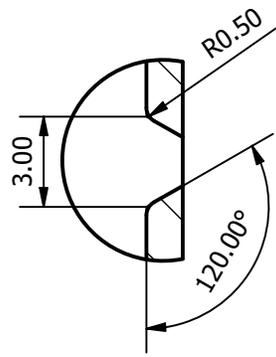
2

B

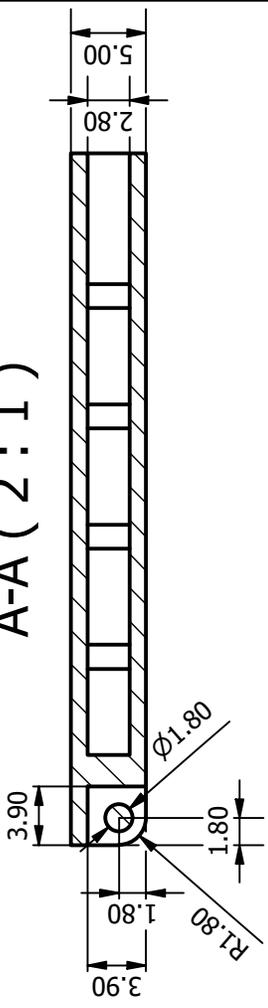
A



C (4:1)

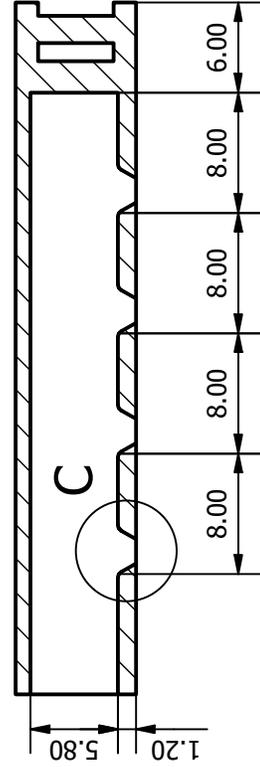


A-A (2:1)



B

B-B (2:1)



A

A

46.00

A

A

5.00

1.50

8.00

Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería	Bisagra derecha 2
Dibujado por: Emmanuel González Mendoza	Fecha: 21/04/2023
Revisado por: Dr. José Antonio Silva Rico	Escala: 2:1
	Unidades: mm

1

2

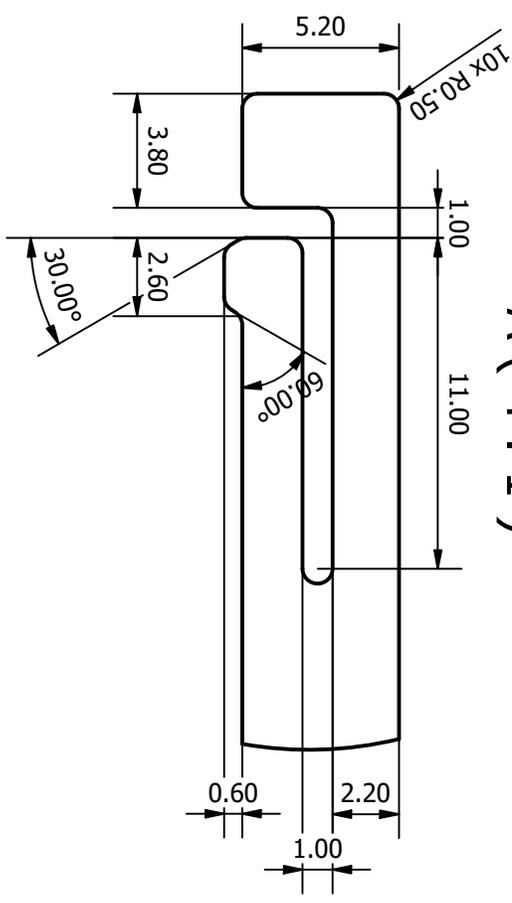
A

2

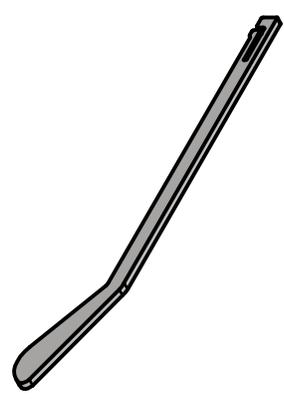
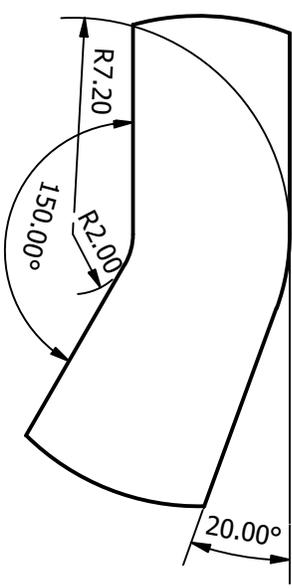


1

A (4 : 1)



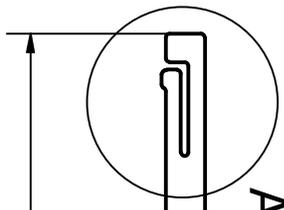
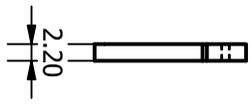
B (4 : 1)



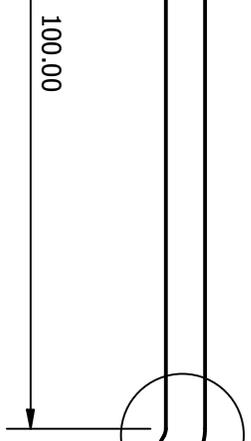
B



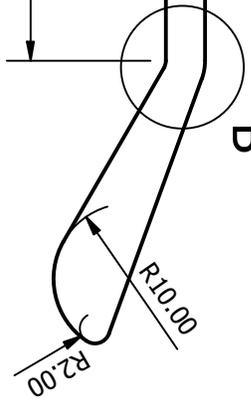
A



A



B



A



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Varilla derecha

Dibujado por:
Emmanuel González Mendoza

Fecha:
15/04/2023

Escala: 1:1

Revisado por:
Dr. José Antonio Silva Rico



Unidades: mm

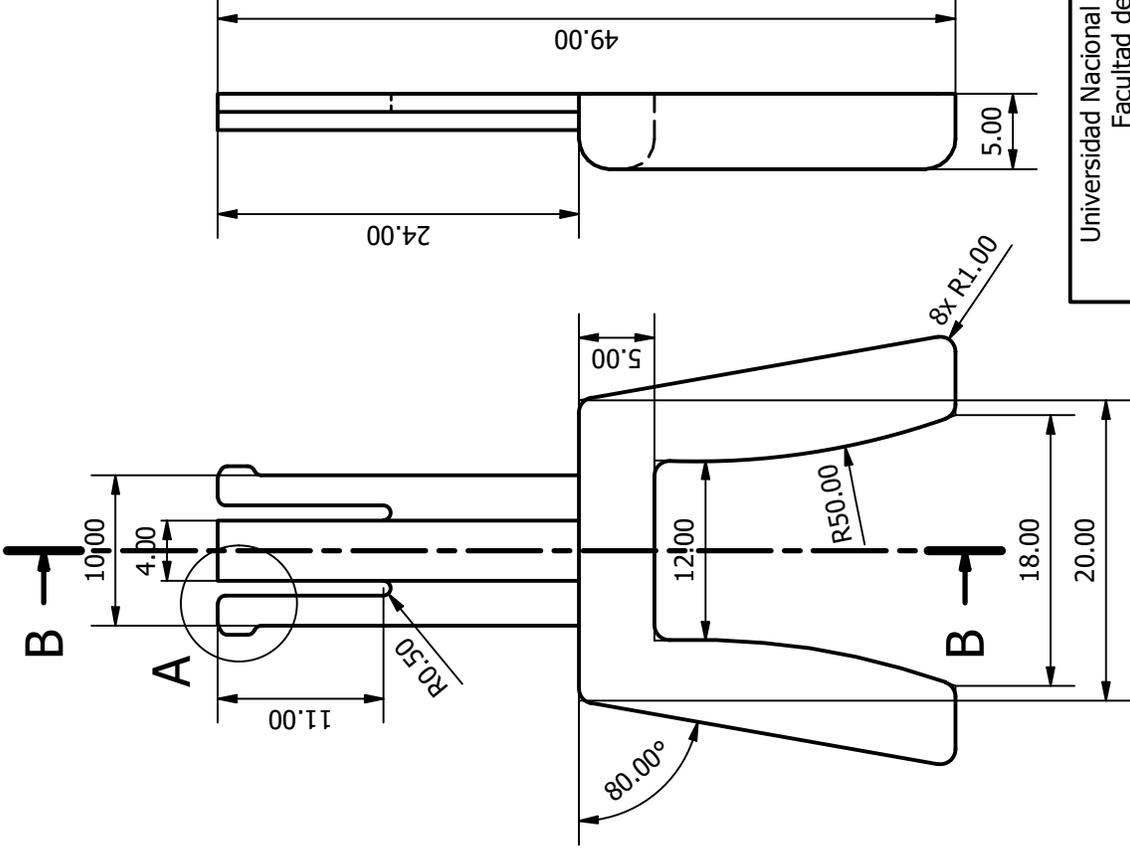
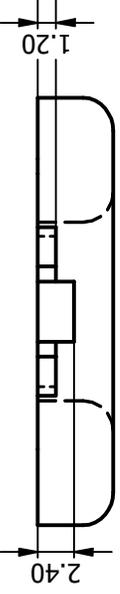
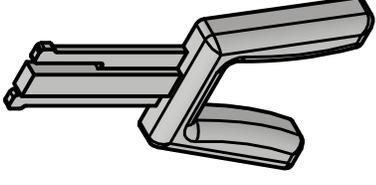
2



1

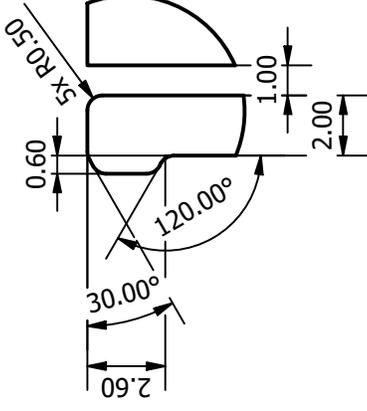
1

2



B-B (2 : 1)

A (4 : 1)



B

A

B

A

Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería	Soporte del DCIE para la nariz
Dibujado por: Emmanuel González Mendoza	Fecha: 15/04/2023
Revisado por: Dr. José Antonio Silva Rico	Escala: 2:1
	Unidades: mm

1

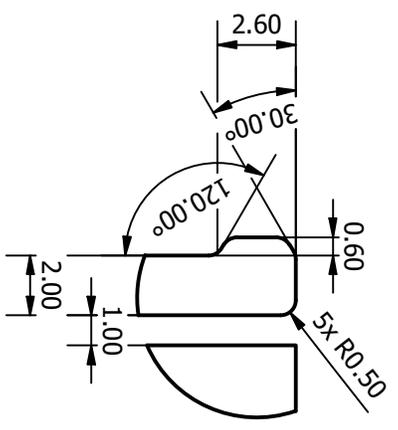
2

2

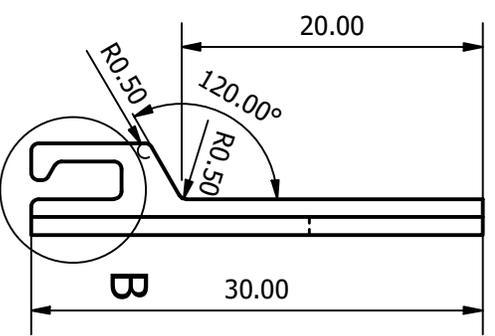
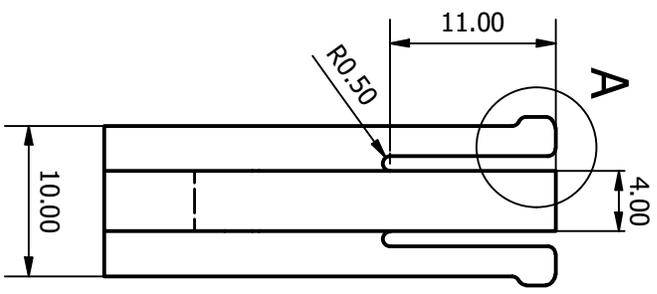
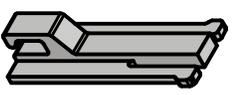
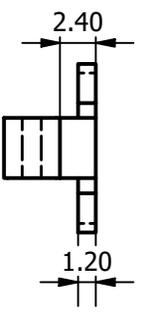
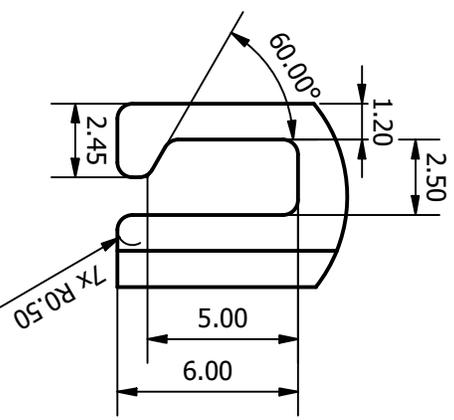


1

A (4:1)



B (4:1)



Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería	SopORTE del DCIE para lentes
---	------------------------------

Dibujado por: Emmanuel González Mendoza	Fecha: 15/04/2023	Escala: 2:1
--	----------------------	-------------

Revisado por: Dr. José Antonio Silva Rico		Unidades: mm
--	--	--------------

2

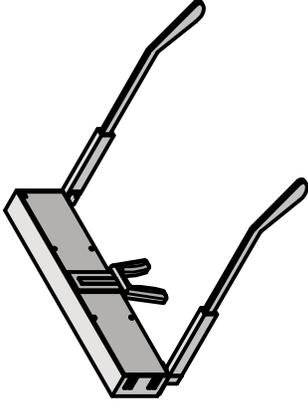


1

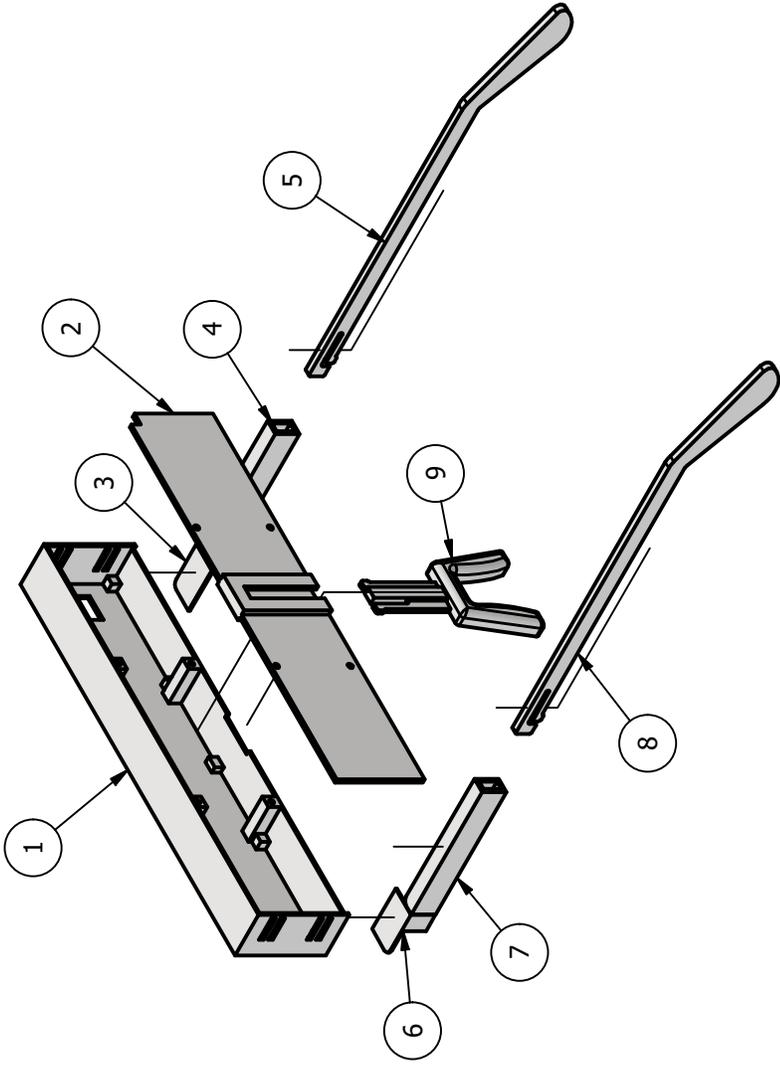
A



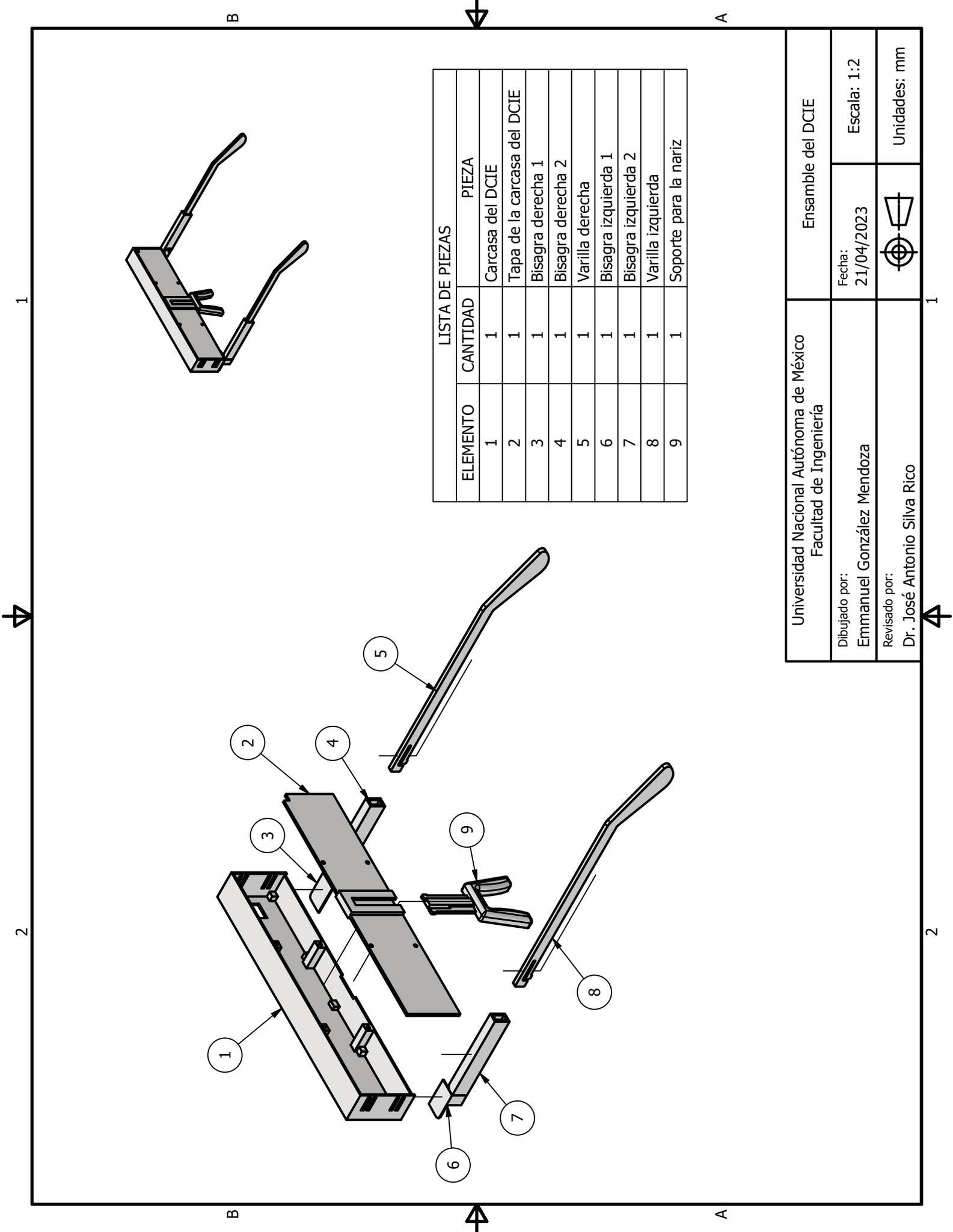
B

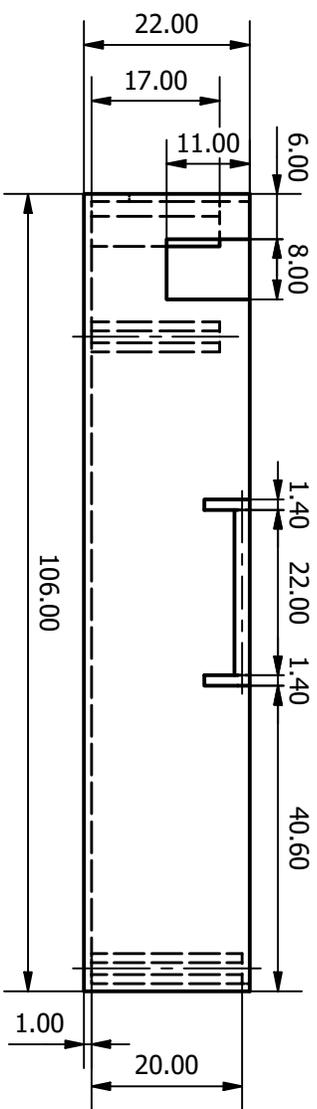
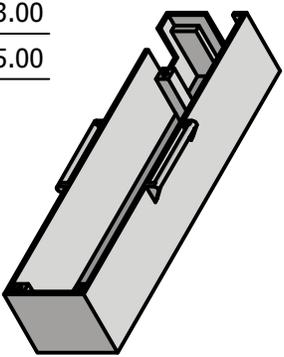
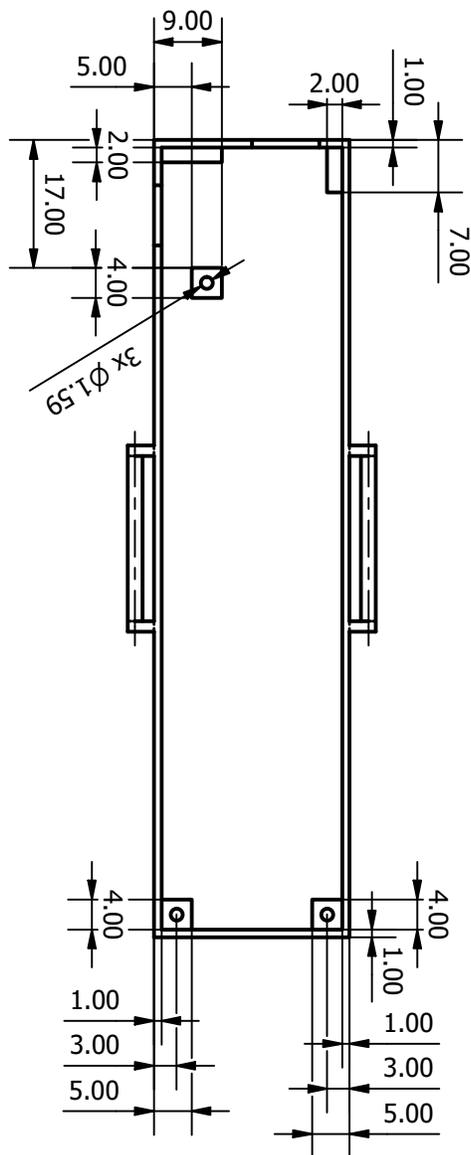
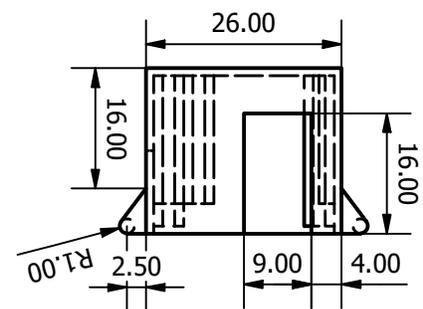


LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CANTIDAD	PIEZA
1	1	Carcasa del DCIE
2	1	Tapa de la carcasa del DCIE
3	1	Bisagra derecha 1
4	1	Bisagra derecha 2
5	1	Varilla derecha
6	1	Bisagra izquierda 1
7	1	Bisagra izquierda 2
8	1	Varilla izquierda
9	1	Soporte para la nariz



Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Ensamble del DCIE	
Dibujado por: Emmanuel González Mendoza		Fecha: 21/04/2023	
Revisado por: Dr. José Antonio Silva Rico		Escala: 1:2	
		Unidades: mm	





Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Carcasa de la batería del DCIE

Dibujado por:
Emmanuel González Mendoza

Fecha:
14/04/2023

Escala: 1:1

Revisado por:
Dr. José Antonio Silva Rico



Unidades: mm

A

B

A

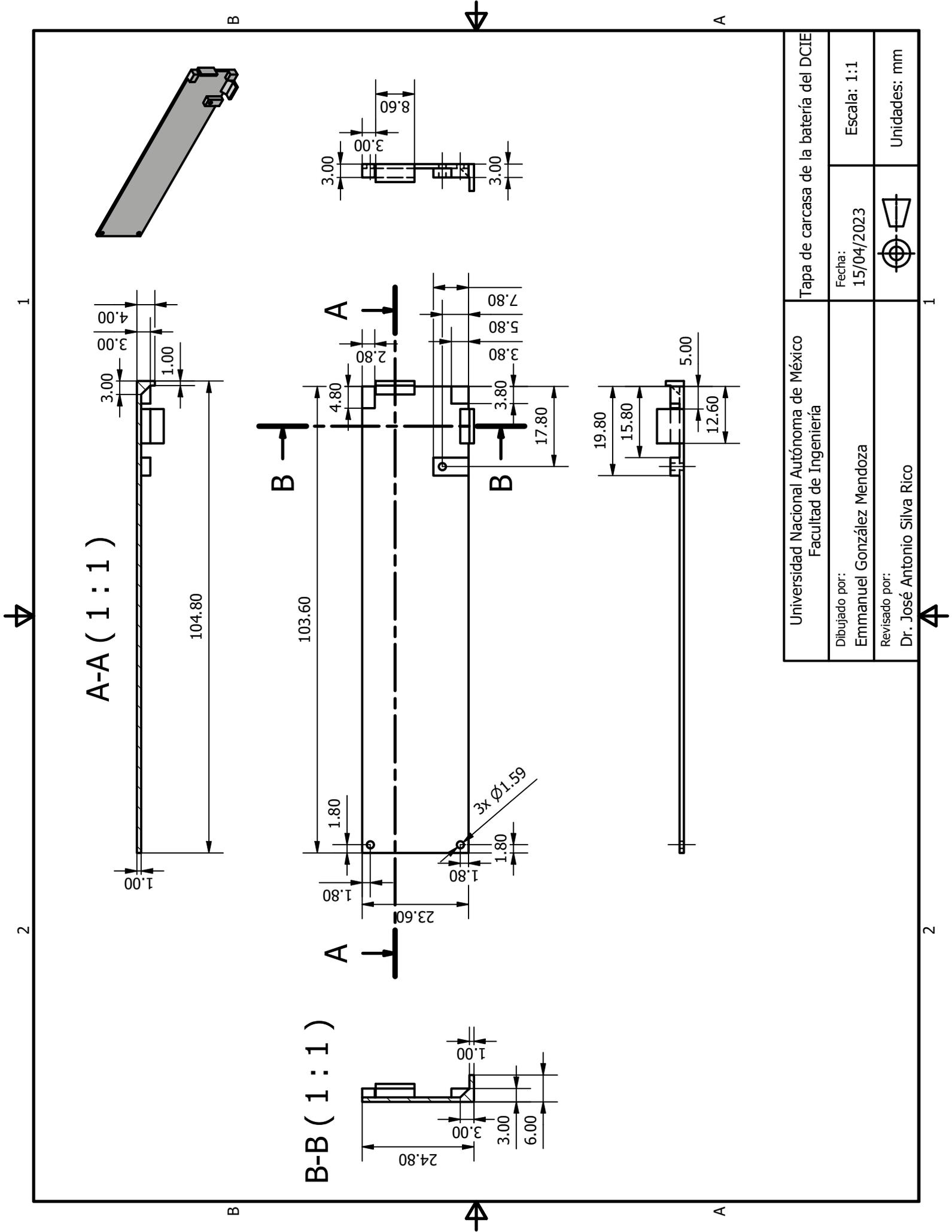
B

2

2

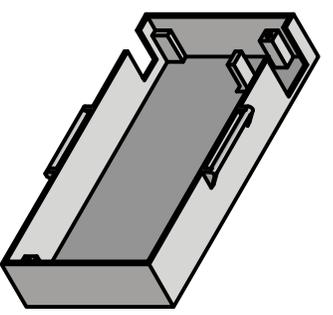
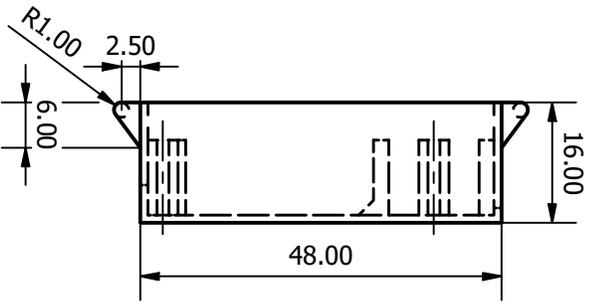
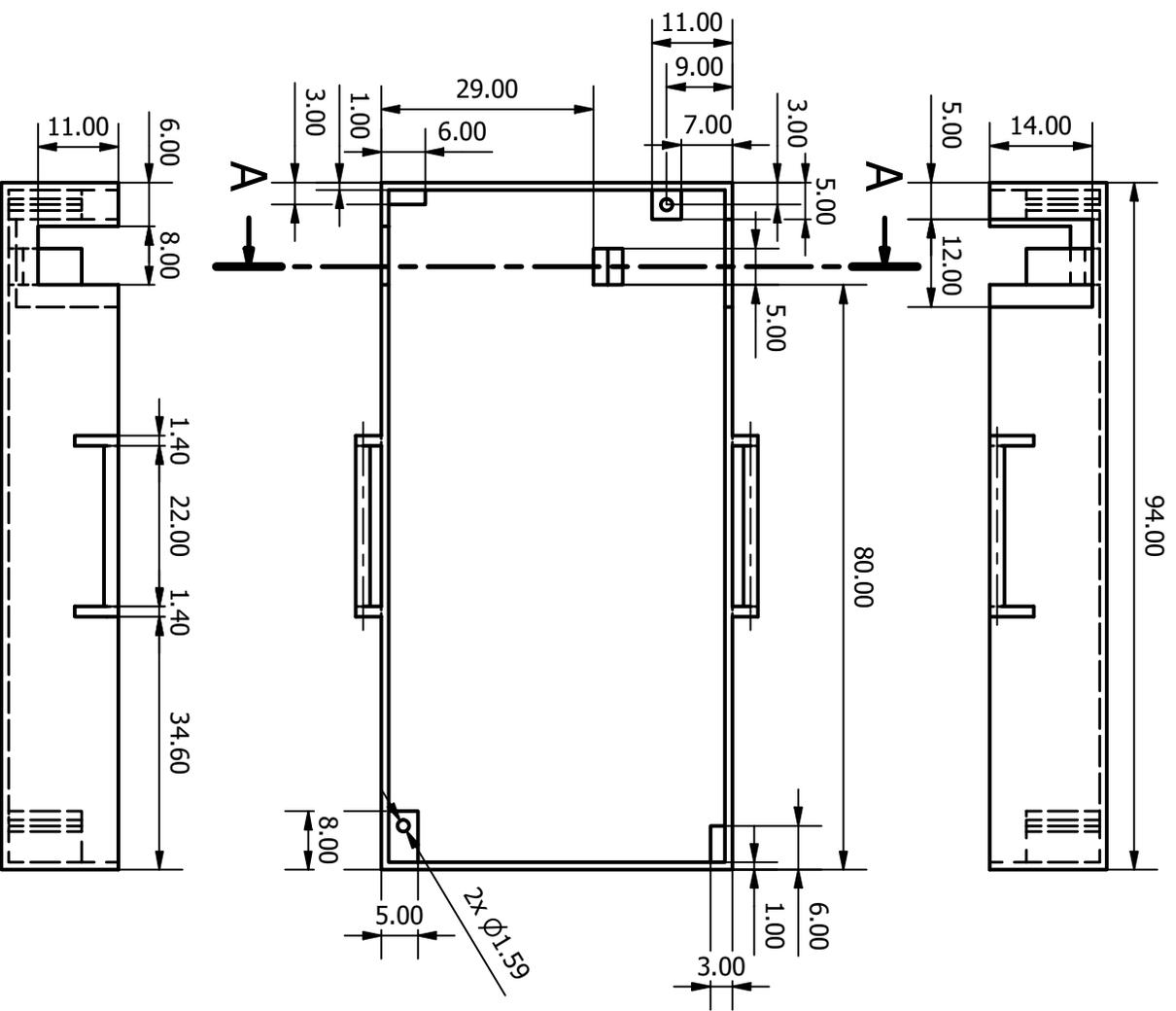
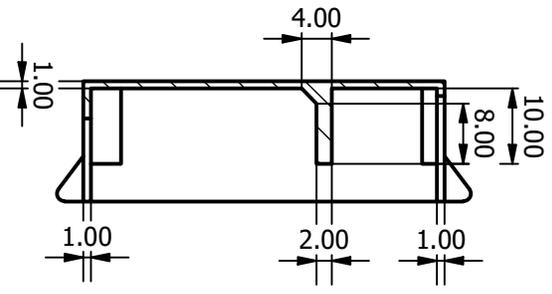
1

1



Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería	Tapa de carcasa de la batería del DCIE	
Dibujado por: Emmanuel González Mendoza	Fecha: 15/04/2023	Escala: 1:1
Revisado por: Dr. José Antonio Silva Rico		Unidades: mm

A-A (1:1)



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Dibujado por:
Emmanuel González Mendoza

Revisado por:
Dr. José Antonio Silva Rico

Carcasa de brazalete

Fecha:
12/04/2023

Escala: 1:1



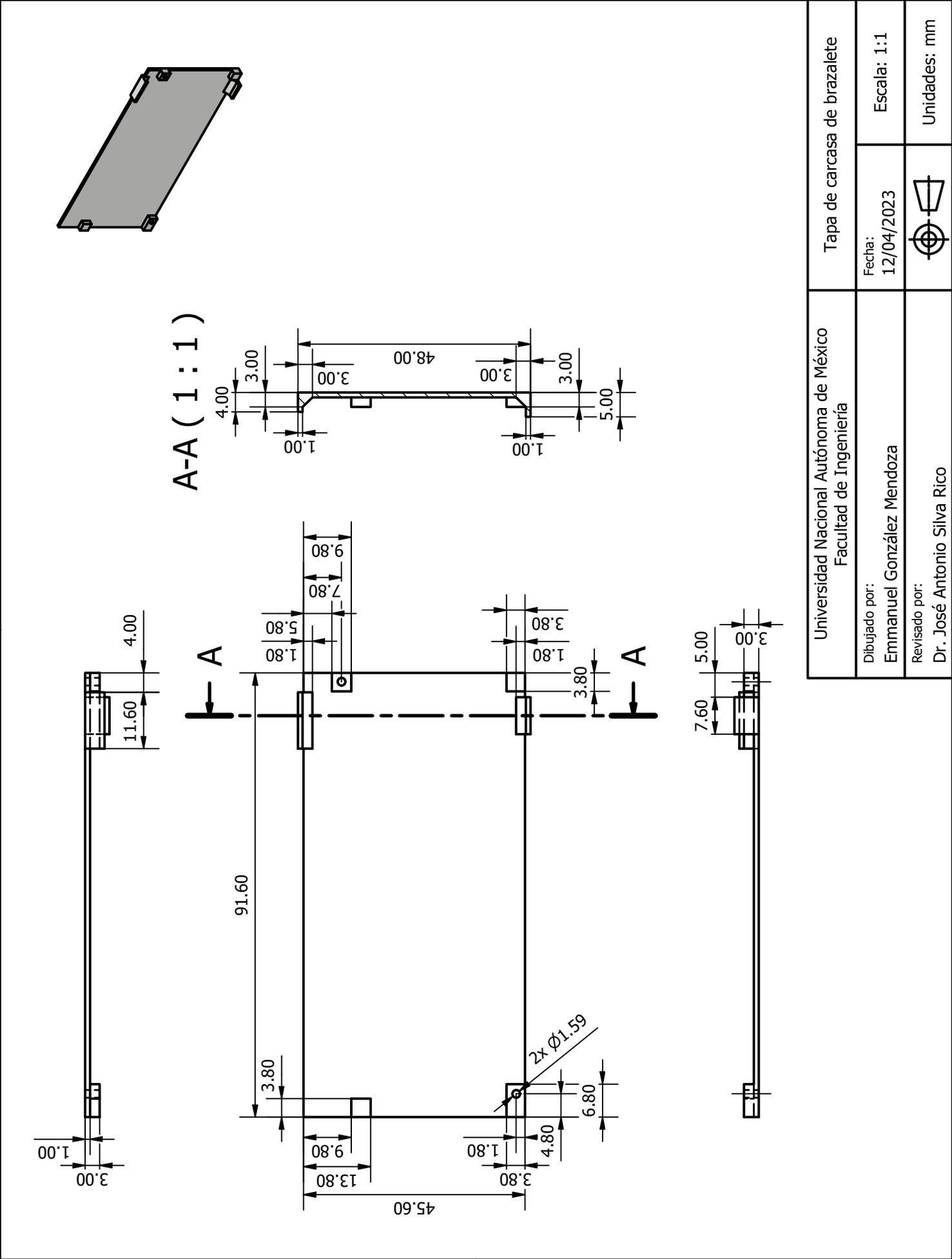
Unidades: mm

1

2

1

2



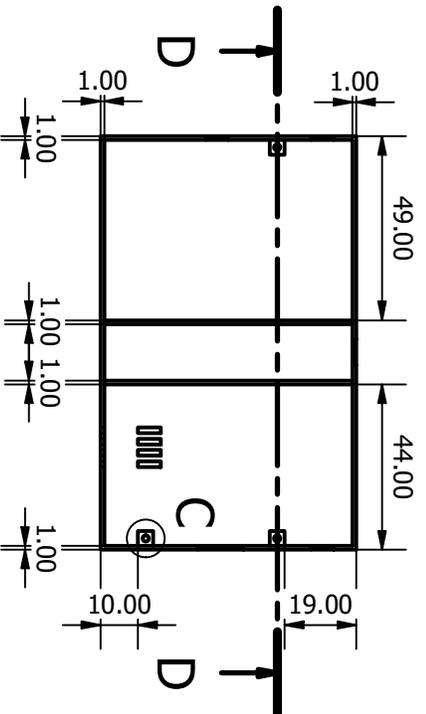
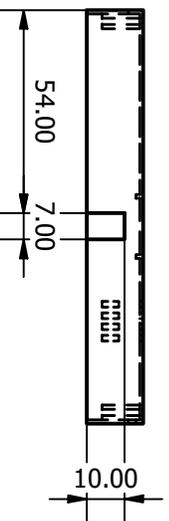
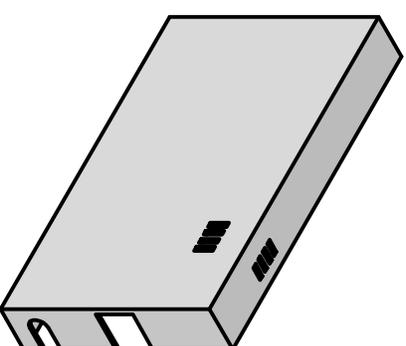
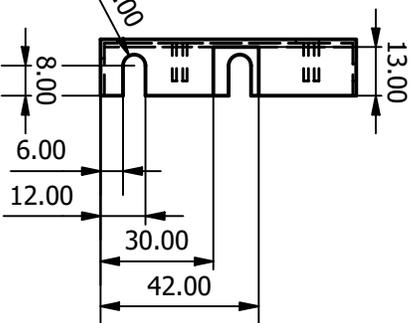
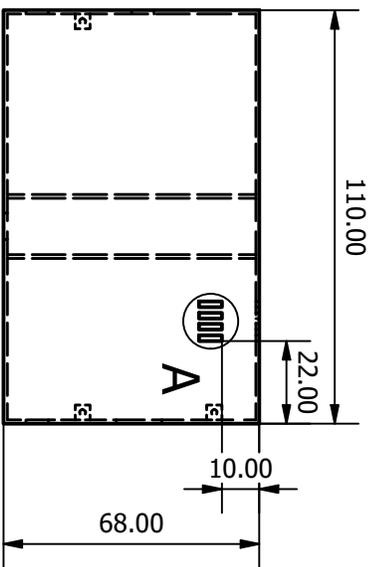
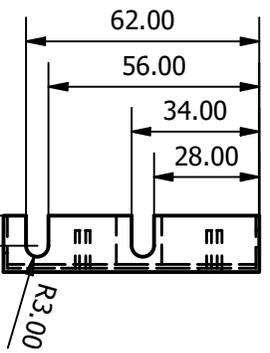
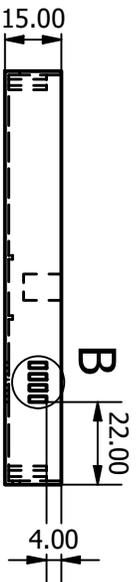
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería	Tapa de carcasa de brazalete
Dibujado por: Emmanuel González Mendoza	Fecha: 12/04/2023
Revisado por: Dr. José Antonio Silva Rico	Escala: 1:1
	Unidades: mm

1

2

1

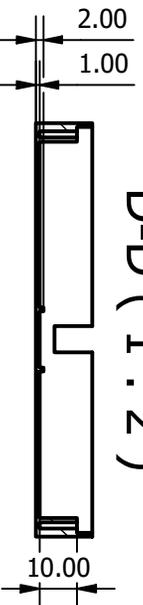
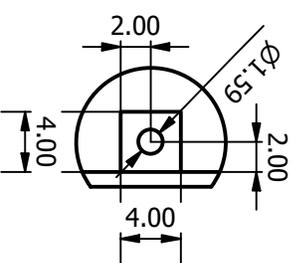
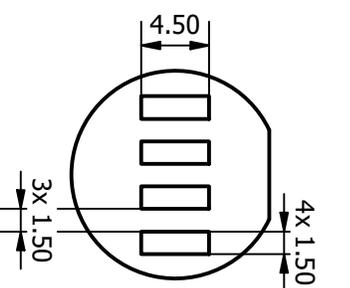
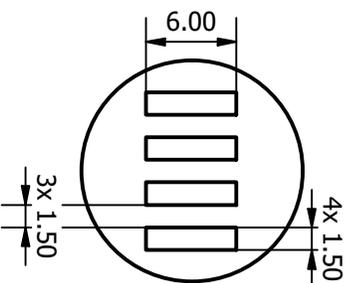
2



A (2:1)

B (2:1)

C (2:1)



D-D (1:2)

2

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Carcasa del cargador

Dibujado por:
Emmanuel González Mendoza

Fecha:
22/04/2023

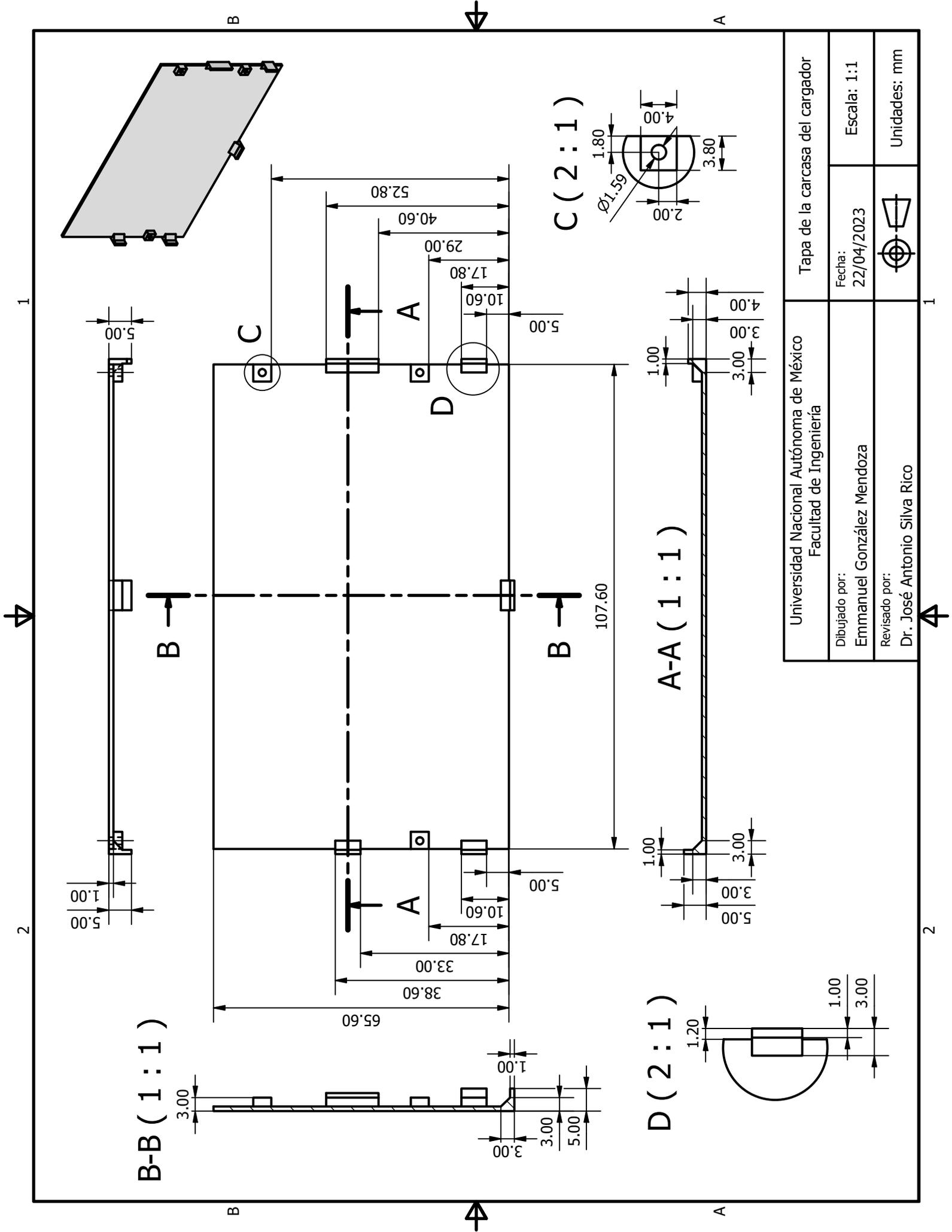
Escala: 1:2

Revisado por:
Dr. José Antonio Silva Rico



Unidades: mm

1



Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería	Tapa de la carcasa del cargador
Dibujado por: Emmanuel González Mendoza	Fecha: 22/04/2023
Revisado por: Dr. José Antonio Silva Rico	Escala: 1:1
	Unidades: mm

Apéndice E

Cuestionario sobre experiencia de uso del Equipo de Asistencia para Movilidad

El presente cuestionario forma parte del trabajo de Tesis de Licenciatura "Propuesta, diseño, desarrollo y evaluación de un prototipo de Equipo de Asistencia para Movilidad para personas con debilidad visual", elaborado por el alumno de Ingeniería Mecatrónica Emmanuel González Mendoza, y asesorado por el Dr. José Antonio Silva Rico.

Las preguntas contenidas en el cuestionario tienen la finalidad de recopilar opiniones, comentarios y sugerencias sobre la experiencia de uso que las personas tuvieron utilizando el Equipo de Asistencia para Movilidad propuesto en este trabajo académico, y así verificar si se han cumplido con los objetivos establecidos para el mismo.

* Respuesta opcional

1. Datos generales

1.1. Nombre*

1.2. Edad

- Menos de 10 años
- 10 a 19 años
- 20 a 29 años
- 30 a 39 años
- 40 a 49 años
- 50 a 59 años
- Más de 60 años

2. Equipamiento del Equipo de Asistencia

2.1. ¿Qué tan fácil es colocarse el Equipo de Asistencia?

- 1 2 3 4 5
- Muy difícil Muy fácil

2.2. Si considera que fue difícil colocarse el Equipo de Asistencia indique por qué.*

2.3. ¿Qué tan cómodo es usar el Equipo de Asistencia?

1 2 3 4 5

Muy incómodo Muy cómodo

2.4. Si considera que fue incómodo, indique por qué.*

2.5. ¿Cómo considera el peso del Equipo de Asistencia?

1 2 3 4 5

Muy pesado Muy ligero

3. Funcionamiento del Equipo de Asistencia**3.1. ¿Qué porcentaje de las veces considera que el Equipo de Asistencia le ayudó a prevenir un choque?**

1 2 3 4 5

Ninguna Todas

3.2. ¿La velocidad de respuesta del equipo es suficiente para indicar oportunamente la presencia de algún obstáculo?

- Sí
- No
- A veces

3.3. ¿Qué nivel de seguridad sentía al desplazarse mientras usaba el Equipo de Asistencia?

1 2 3 4 5

Poca seguridad Mucha seguridad

3.4. ¿Con qué facilidad pudo interpretar la información sobre la ubicación de los obstáculos proporcionada a través de los brazaletes?

1 2 3 4 5

Muy difícil Muy fácil

3.5. Si considera que fue difícil interpretar la información de retroalimentación, indique por qué.*

- 3.6. El rango de detección de obstáculos del Equipo de Asistencia es**
- Apropiado
- Reducido
- Excesivo
- 3.7. ¿Cuál de los dos modos de detección de obstáculos sin desplazamiento le pareció más útil?**
- Modo global
- Modo escáner
- 3.8. La función de estimación de obstáculos fuera del rango de visión de las cámaras es**
- Útil
- Innecesaria
- 3.9. ¿Hubo algún obstáculo que no haya sido detectado correctamente por el Equipo de Asistencia?**
- Ninguno
- Otro _____
- 3.10. Además de la retroalimentación proporcionada por el Equipo de Asistencia, ¿qué tan importante considera que es el sentido del oído para complementar la información que tiene sobre el entorno?**
- Nada importante 1 2 3 4 5 Muy importante
- 3.11. ¿La retroalimentación proporcionada por los brazaletes hizo que limitara su atención a su sentido del oído?**
- Demasiado 1 2 3 4 5 Nada
- 3.12. ¿Qué información adicional sobre los obstáculos considera que le ayudaría a tomar decisiones en su movilidad?***
- Tipo de obstáculo
- Tamaño del obstáculo
- Otro _____

3.13. Si tuviera la oportunidad de agregar otra forma de retroalimentación al Equipo, ¿cuál preferiría?*

- Más patrones de vibración en los brazaletes
- Audio descriptivo
- Audio (Tonos, pulsos)
- Chaleco o cinturón hápticos
- Otro _____

4. Retroalimentación del Equipo

4.1. ¿La retroalimentación proporcionada por el Equipo de Asistencia a través de la vibración en los brazaletes es tolerable?

- Tolerable
- Poco tolerable
- Nada tolerable

4.2. Si considera que no fue tolerable, ¿cómo se podría mejorar?*

4.3. ¿Qué modo de vibración de los brazaletes fue más fácil de interpretar?

- Continuo
- Pulsos

4.4. ¿Qué opciones adicionales para configurar la vibración de los brazaletes agregaría?

- Son suficientes
- Otro _____

5. Comentarios adicionales*

Muchas gracias por su tiempo y disposición en participar en las pruebas realizadas, así como por sus valiosas respuestas y comentarios compartidos en el presente cuestionario.