



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

“Construcción de un dispositivo de alerta de proximidad lateral para  
motocicletas con Arduino”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero  
Automotriz

**Línea de investigación:** Producción Industrial y Tecnología Sostenible

**AUTORES:**

Jorge David Gavilima Pilataxi

Darwin Isaac Guzmán Pichogagón

**DIRECTOR:**

Ing. Víctor Javier Montenegro Simancas MSc.

Ibarra-Ecuador

**2026**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

### BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

#### IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Gavilima Pilataxi Jorge David

DATOS DE CONTACTO	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Guzmán Pichogagón Darwin Isaac

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	Construcción de un dispositivo de alerta de proximidad lateral para motocicletas con Arduino
<b>AUTOR (ES):</b>	Gavilima Pilataxi Jorge David, Guzmán Pichogagón Darwin Isaac
<b>FECHA: AAAAMMDD</b>	2026/04/06
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
<b>CARRERA/PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	INGENIERO AUTOMOTRIZ
<b>ASESOR/DIRECTOR:</b>	PhD. Fernando Ramirez / MSc. Victor Montenegro



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



**CONSTANCIAS**

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

Ibarra, a los 06 días del mes de Abril de 2026

**EL AUTOR:**

.....

**Isaac Guzmán**

**EL AUTOR:**

.....

**Gavilima Jorge**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Ibarra, 06 de abril de 2026

MSc. Víctor Montenegro

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f) .....

MSc. Víctor Montenegro

C.C.: 1717035149



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



### APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular “Construcción de un dispositivo de alerta de proximidad lateral para motocicletas con Arduino” elaborado por, Gavilima Pilataxi Jorge David, Guzmán Pichogagón Darwin Isaac previo a la obtención del título de INGENIERO AUTOMOTRÍZ, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f):.....

MSc.Víctor Montenegro

C.C.: 1717035149

(f):.....

PhD. Fernando Ramírez

C.C.:1709992703



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



### DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación, con profundo amor y gratitud, a mi familia, quienes han sido mi pilar fundamental a mis padres quienes han sido un gran apoyo durante toda mi carrera y a mis hermanos quienes me han ayudado incondicional, por los sacrificios silenciosos y por enseñarme que, con esfuerzo y perseverancia, no existen metas inalcanzables cuando se cuenta con el respaldo de una familia.

También a los ingenieros que contribuyeron a mi formación académica. Gracias por su guía, exigencia y dedicación, por compartir sus conocimientos con generosidad y por inspirarme a dar siempre lo mejor. Su influencia ha sido determinante en la culminación de este logro profesional.

-Jorge Gavilima



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



### DEDICATORIA

A Dios, por ser la guía suprema de mi vida y por concederme la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para alcanzar este logro académico.

A mis padres, Isabel Pichogagón y Luis Guzmán, por su invaluable apoyo, sacrificio y formación en principios y valores, constituyéndose en el pilar fundamental de mi desarrollo personal y profesional.

A mis hermanas y a mi hermano, por su constante respaldo y acompañamiento a lo largo de este proceso, siendo una fuente permanente de motivación.

A mis amigos y seres queridos, por su apoyo sincero y por contribuir de manera significativa en la consecución de este objetivo.

A todos ellos, expreso mi más profundo y sincero agradecimiento, pues este logro también les pertenece.

-Isaac Guzmán



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



### AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte por su respaldo académico y por facilitar el acceso a los recursos y herramientas necesarios para el desarrollo de la presente investigación.

De manera especial, agradecemos a nuestro director de tesis, MSc. Víctor Montenegro, y a nuestro asesor, PhD. Fernando Ramírez, por su valiosa orientación, rigor técnico y constante acompañamiento a lo largo de este proceso.

Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento al personal directivo y docente de la carrera de Ingeniería Automotriz, por los conocimientos impartidos y la formación profesional brindada, los cuales fueron fundamentales para la ejecución de este proyecto.

La contribución conjunta de todos ellos ha sido determinante para garantizar la calidad y el rigor académico de esta investigación.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



## **RESUMEN EJECUTIVO**

La presente investigación aborda la alta siniestralidad de motociclistas en Ecuador, derivada de la limitación de visibilidad lateral o "puntos ciegos". El objetivo fue desarrollar y validar un Sistema Avanzado de Asistencia al Conductor (ADAS) de bajo costo. La metodología, de carácter experimental y tecnológico aplicado, integró un sensor LiDAR-Lite v3 para telemetría de precisión y un módulo de visión artificial con el algoritmo YOLOv8, procesados concurrentemente en una Raspberry Pi 4. Las pruebas se llevaron a cabo en el autódromo de Yahuarcocha, donde el sistema fue puesto a prueba siguiendo los criterios estadísticos que establece la norma ISO 5725 para evaluar qué tan exactas y repetibles son las mediciones. En estático, los números acompañaron: el peor error que se registró fue de 5.02 cm a 35 metros, una cifra que, para el tipo de aplicación que se busca, resulta más que aceptable.

Ya en pista y con tráfico real, el sistema aguantó bien el ritmo. Mantuvo una sensibilidad superior al 90% y respondió sin demoras notables en las situaciones más comunes del día a día urbano como cambios de carril a velocidad moderada. Donde la cosa se puso más interesante fue por encima de los 40 km/h. Ahí el sensor de proximidad empieza a quedarse corto por sus propias limitaciones físicas, y fue justamente en ese punto donde la cámara de visión artificial demostró su valor, identificando obstáculos con suficiente anticipación como para que el sistema pudiera actuar a tiempo.

Se concluye que juntar ambas tecnologías no fue un capricho de diseño, sino una decisión que tiene sentido práctico. El sistema cubre los puntos muertos de la moto y reduce genuinamente las posibilidades de un golpe lateral.

**Palabras Clave:** Sistemas ADAS, Detección de Punto Ciego (BSD), Fusión de Sensores, YOLOv8, Prevención de Colisiones.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



## ABSTRACT

This research addresses the high rate of motorcycle accidents in Ecuador, largely associated with limited lateral visibility or blind spots. The objective was to develop and validate a low-cost Advanced Driver Assistance System (ADAS). The methodology, based on an experimental and applied technological approach, integrated a LiDAR-Lite v3 sensor for precise telemetry and a computer vision module using the YOLOv8 algorithm, both processed concurrently on a Raspberry Pi 4. Testing was conducted at the Yahuarcocha racetrack under statistical criteria established by ISO 5725 to assess measurement accuracy and repeatability. In static conditions, the system demonstrated high precision, with a maximum error of 5.02 cm at a distance of 35 meters, which is acceptable for the intended application.

Under dynamic conditions with real traffic scenarios, the system maintained a sensitivity above 90% and showed no significant delays in common urban situations such as lane changes at moderate speeds. Performance limitations appeared at speeds above 40 km/h, where the proximity sensor reached its physical constraints. However, the computer vision module compensated effectively by detecting obstacles with sufficient anticipation, enabling timely system response.

The study concludes that the integration of both technologies is not only justified but essential, as it enhances blind spot coverage and significantly reduces the likelihood of lateral collisions in motorcycles.

**Keywords:** ADAS, Blind Spot Detection (BSD), Sensor Fusion, YOLOv8, Collision Prevention



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



**LISTA DE SIGLAS**

**ANT:** Agencia Nacional de Tránsito

**INEC:** Instituto Nacional de Estadística y Censos

**ADAS:** Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor

**ESC:** Control Electrónico de Estabilidad

**ACC:** Control de Crucero Adaptativo

**AEB:** Frenado de Emergencia Automático

**IMU:** Plataformas Inerciales

**TCS:** sistemas como el control de tracción

**ABS:** sistema de frenos antibloqueo

**EBS:** Sistema de Frenado de Emergencia

**LiDAR:** Detección y medición de distancias por luz

**BSD:** Detección de Punto Ciego



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### Contenidos

<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>12</b>
<b>1. CAPITULO I .....</b>	<b>18</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>18</b>
1.1 Planteamiento del problema .....	18
1.2 Objetivos .....	19
1.2.1 Objetivo general .....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Alcance.....	19
1.4 Justificación.....	20
<b>2. CAPÍTULO II .....</b>	<b>21</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
2.1 Antecedentes .....	21
2.2 Bases Teóricas.....	22
2.2.1 Seguridad vial y motocicletas .....	22
2.2.2 Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor (ADAS) .....	23
2.2.3 Evolución del Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor (ADAS).....	25
2.2.4 Impacto en los vehículos de dos ruedas .....	25
2.2.5 Sensores utilizados en los Sistemas de Asistencia al Conductor (ADAS).....	27
2.2.6 Sensors Light Detection and Ranging (LiDAR) .....	30
2.2.7 Software para Dispositivos LiDAR.....	31
2.2.8 Sensores ultrasónicos .....	33
2.2.9 Comparación de sensores .....	34
2.2.10 Diseño de sistemas electrónicos para motocicletas.....	35
2.2.11 Protección Ante Condiciones Ambientales.....	36
<b>3. CAPÍTULO III.....</b>	<b>37</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>37</b>
3.1 Diseño Experimental .....	37
3.2 Selección de componentes .....	38
3.2.1 Sensor de distancia .....	39



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



3.2.2	Microcomputadora .....	41
3.2.3	Módulo de Cámara .....	42
3.2.4	Interfaz de Visualización (Smartphone + Servidor Web) .....	44
3.2.5	Módulo Zumbador KY-006 Piezoeléctrico .....	46
3.3	Procedimiento de Validación Estática.....	53
3.3.1	Cálculos y fórmulas empleadas .....	54
3.3.1.1	Cálculo de la media aritmética ( $\bar{d}$ ).....	55
3.3.1.2	Sesgo o veracidad (Bias).....	55
3.3.1.3	Desviación estándar ( $\sigma$ ) .....	56
3.3.1.4	Error máximo ( $E_{max}$ ).....	56
3.4	Procedimiento de Validación Dinámica.....	58
3.4.1	Cálculos y Fórmulas Empleadas .....	59
3.4.1.1	Distancia de Primera Detección ( $d_{detección}$ ) .....	59
3.4.1.2	Tiempo de Respuesta ( $t_{respuesta}$ ).....	59
3.4.1.3	Evaluación del Desempeño mediante Matriz de Confusión. ....	60
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>62</b>
	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>62</b>
4.1	Resultados de las pruebas estáticas .....	62
4.2	Resultados Pruebas Dinámicas.....	67
4.2.1	Metodología de Validación Dinámica.....	67
4.3	Evaluación dinámica del sistema BSD a diferentes velocidades de aproximación lateral del vehículo. ....	72
4.3.1	Escenarios de Aproximación Lateral .....	72
4.3.2	Resultados a Velocidad Relativa de 20 km/h .....	73
4.3.3	Resultados a Velocidad Relativa de 30 km/h .....	79
4.3.4	Resultados a Velocidad Relativa de 40 km/h .....	83
4.3.5	Resultados a Velocidad Relativa de 50 km/h.....	88
4.4	Análisis comparativo y caracterización del desempeño dinámico del sistema BSD	92
4.4.1	Análisis de indicadores de desempeño dinámico del sistema BSD.....	93
4.4.2	Discusión técnica del desempeño multisensor del sistema BSD.....	94
4.4.3	Análisis del alcance funcional y condiciones operativas del sistema .....	100
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>101</b>



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>101</b>
5.1 Conclusiones .....	101
5.2 Recomendaciones .....	101



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Parámetros de Velocidad</i> .....	38
Tabla 2. <i>Evaluación de sensores</i> .....	39
Tabla 3. <i>Evaluación de Microcomputadores</i> .....	41
Tabla 4. <i>Evaluación de Cámaras</i> .....	43
Tabla 5. <i>Evaluación de pantallas</i> .....	45
Tabla 6. <i>Evaluación de Zumbadores</i> .....	47
Tabla 7. <i>Sistema de alerta pruebas dinámicas</i> .....	60
Tabla 8. <i>Resultados estadísticos del proceso de validación Estática</i> .....	64
Tabla 9. <i>Verificación del criterio mínimo de distancia de primera detección</i> .....	68
Tabla 10. <i>Evaluación del tiempo de respuesta del sistema</i> .....	69
Tabla 11. <i>Matriz de Confusión del desempeño del sistema BSD</i> .....	72
Tabla 12. <i>Primera Detección (Moto Velocidad Constante 30 km/h)</i> .....	73
Tabla 13. <i>Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 20 km/h, Moto 30 km/h)</i> .....	75
Tabla 14. <i>Matriz de Confusión del desempeño del sistema BSD a 20km/h</i> .....	77
Tabla 15. <i>Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 30 km/h, Moto 30 km/h)</i> .....	80
Tabla 16. <i>Matriz de Confusión del desempeño del sistema BSD a 30km/h</i> .....	82
Tabla 17. <i>Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 40 km/h, Moto 30 km/h)</i> .....	84
Tabla 18. <i>Matriz de Confusión del desempeño del sistema BSD a 40km/h</i> .....	86
Tabla 19. <i>Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 50 km/h, Moto 30 km/h)</i> .....	88
Tabla 20. <i>Matriz de Confusión del desempeño del sistema BSD a 50km/h</i> .....	91
Tabla 21. <i>Indicadores de desempeño dinámico del sistema BSD en función de la velocidad evaluada</i> .....	93



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Ejemplo del conjunto de sensores de un ADAS</i> .....	24
Figura 2. <i>Simulación de los sensores en el ADAS</i> .....	29
Figura 3. <i>Sistema óptico de receptor LiDAR optimizado, simulado en CODE V</i> .....	32
Figura 4. <i>Sistema óptico LiDAR, simulado en LightTools</i> .....	33
Figura 5. <i>LiDAR Lite V3</i> .....	40
Figura 6. <i>Raspberry Pi 4 Model B (8 GB RAM)</i> .....	42
Figura 7. <i>Cámara Raspberry Pi 1.3</i> .....	44
Figura 8. <i>REDMI M2003J15SC</i> .....	46
Figura 9. <i>Zumbador</i> .....	48
Figura 10. <i>Funcionamiento del reconocimiento de YOLO v8</i> .....	49
Figura 11. <i>Visualización del servidor HTTP</i> .....	51
Figura 12. <i>Funcionamiento del programa</i> .....	52
Figura 13. <i>Colocación del Dispositivo</i> .....	54
Figura 14. <i>Validación de las pruebas estáticas</i> .....	58
Figura 15. <i>Proceso de validación dinámica</i> .....	62
Figura 16. <i>Distancias Referenciadas en Metros</i> .....	63
Figura 17. <i>Evaluación del sensor</i> .....	65
Figura 19. <i>Análisis de errores del sensor</i> .....	67
Figura 20. <i>Tiempo de respuesta (Vehículo lateral 30 km/h, Moto 20 km/h)</i> .....	79
Figura 21. <i>Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 40 km/h, Moto 30 km/h)</i> .....	83
Figura 22. <i>Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 50 km/h, Moto 40 km/h)</i> .....	87
Figura 23. <i>Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 60 km/h, Moto 50 km/h)</i> .....	92
Figura 24. <i>Tiempo de respuesta Promedio en Pruebas</i> .....	95
Figura 25. <i>Reconocimiento preventivo</i> .....	97
Figura 26. <i>Alerta de aproximación</i> .....	98
Figura 27. <i>Reconocimiento de un vehículo a corta distancia</i> .....	99
Figura 28. <i>Reconocimiento de un vehículo a larga distancia</i> .....	99
Figura 29. <i>Reconocimiento de varios vehículos</i> .....	100



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



## ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación (1). Cálculo Media aritmética</i> .....	55
<i>Ecuación (2). Sesgo o veracidad (Bias)</i> .....	55
<i>Ecuación (3). Criterio de aceptación</i> .....	56
<i>Ecuación (4). Desviación estándar (<math>\sigma</math>)</i> .....	56
<i>Ecuación (5). Criterio de aceptación</i> .....	56
<i>Ecuación (6). Error máximo (<math>E_{max}</math>)</i> .....	56
<i>Ecuación (7). Criterio de aceptación</i> .....	57
<i>Ecuación (8). Distancia de Primera Detección (<math>d_{detección}</math>)</i> .....	59
<i>Ecuación (9). Criterio de Aceptacion</i> .....	59
<i>Ecuación (10). Tiempo de Respuesta (<math>t_{respuesta}</math>)</i> .....	59
<i>Ecuación (11). Criterio de aceptación</i> .....	60
<i>Ecuación (12). Sensibilidad</i> .....	60
<i>Ecuación (13). Especificidad</i> .....	61
<i>Ecuación (14). xactitud</i> .....	61
<i>Ecuación (15).FNR</i> .....	61
<i>Ecuación (16).FPR</i> .....	61



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



## **1. CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 Planteamiento del problema**

En la actualidad, los motociclistas constituyen uno de los grupos más vulnerables en el tránsito vehicular, debido a las limitaciones inherentes a la visibilidad lateral de las motocicletas, comúnmente denominadas “zonas ciegas”. Diversos estudios han evidenciado que la ausencia de visibilidad en estos ángulos representa un factor determinante en la ocurrencia de siniestros viales, especialmente en entornos urbanos con alta densidad vehicular[1]. La proximidad entre vehículos en condiciones de tráfico intenso incrementa el riesgo de colisiones laterales, ya que el conductor dispone de un campo visual restringido y carece de asistencia tecnológica que le permita detectar objetos o vehículos en movimiento en sus flancos.

Los automóviles llevan años incorporando sensores y sistemas de alerta para advertir la presencia de vehículos en el ángulo muerto, mientras que las motocicletas siguen siendo la excepción: la gran mayoría sale de fábrica sin tecnologías equivalentes, dejando al conductor prácticamente “a ciegas” respecto a lo que ocurre en sus laterales. Esta limitación tiene un costo real, ya que en un impacto lateral en moto las consecuencias rara vez son menores; no existe carrocería ni estructura que absorba la energía del choque, por lo que el cuerpo del conductor es el primero en recibir el golpe. A ello se suma que quienes desean incorporar tecnología de seguridad adicional encuentran pocas opciones en el mercado, y las disponibles no siempre son accesibles ni están diseñadas específicamente para vehículos de dos ruedas. Esta combinación de escasa protección de origen y limitadas alternativas de mejora evidencia que la innovación en seguridad activa para motocicletas aún tiene un amplio margen de desarrollo[2].



## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Implementar un sistema de detección y alerta de obstáculos basado en tecnología LiDAR en motocicletas que detecte la presencia de objetos y vehículos en los ángulos laterales del conductor.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar y seleccionar el sensor LiDAR-Lite v3 y los componentes electrónicos adecuados para su integración en motocicletas.
- Desarrollar e implementar un algoritmo de detección y alerta en tiempo real mediante procesamiento integrado en un Raspberry Pi 4.
- Diseñar un protocolo de pruebas conforme a normativas vigentes para evaluar el desempeño del dispositivo.
- Evaluar la exactitud, el tiempo de respuesta y la sensibilidad del sistema.

## 1.3 Alcance

El presente proyecto consiste en el diseño, implementación y validación de un sistema de alerta lateral para motocicletas, orientado a reducir los riesgos asociados a los puntos ciegos del conductor. El dispositivo integra un sensor LiDAR-Lite v3, encargado de medir distancias con alta exactitud, y una cámara Raspberry Rev 1.3, que amplía el campo de visión y permite identificar objetos en movimiento lateral. Todo el procesamiento recae sobre una Raspberry Pi 4 Model B una microcomputadora compacta que tiene la capacidad suficiente para ejecutar el algoritmo en Python sin dificultad. Cuando se detecta que se acerca demasiado un obstáculo, el sistema alerta: lanzando una alerta visual y otra sonora al mismo tiempo. La idea es darle al conductor unos segundos más de reacción antes de que la situación se complique.

Para verificar el sistema se sometió a una serie de pruebas diseñadas bajo los lineamientos de la norma INTE/ISO 5725-1:2006. No fue un proceso arbitrario: esa norma existe precisamente para medir con criterio las mediciones del dispositivo. Esta establece los principios generales para la determinación de precisión y repetibilidad de métodos de



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



medición, los cuales se aplicarán para analizar la exactitud y consistencia de las lecturas obtenidas por el sensor LiDAR. Los experimentos se desarrollarán en el circuito de Yahuarcocha, bajo condiciones controladas y seguras, evaluando variables como la sensibilidad de detección y el tiempo de respuesta.

Dicho esto, el proyecto tiene sus límites y vale la pena ser claro al respecto. El sistema fue pensado para motos de una sola plaza, no para otro tipo de vehículos, y no se conecta con la electrónica de fábrica ni con redes de comunicación como el CAN Bus; funciona de forma independiente. Las pruebas, además, se hicieron únicamente con autos livianos y en condiciones ambientales favorables, Excluyendo escenarios de Lluvia, polvo o niebla, ese tipo de escenarios quedaron fuera, no porque no importen, sino porque introducen variables que van más allá del alcance definido para esta etapa.

Además, el sistema posee un alcance máximo de detección de 40 metros, conforme a las especificaciones técnicas del LiDAR-Lite v3, y no contempla la evaluación de normas de compatibilidad electromagnética ni certificaciones para uso comercial. Para concluir, esta versión incluye conectividad inalámbrica con dispositivos móviles operando de manera local.

#### **1.4 Justificación**

La seguridad vial es una preocupación crítica, especialmente para los motociclistas, quienes son más vulnerables a los accidentes debido a la falta de protección en comparación con los conductores de automóviles. Los sistemas de asistencia al conductor, conocidos como ADAS, llevan años demostrando que funcionan: en autos, su adopción se ha traducido en menos accidentes y conductores con más información para tomar mejores decisiones al volante. [3].

En tráfico pesado o al cambiar de carril, los golpes laterales son de los accidentes más frecuentes en moto, y muchas veces ocurren simplemente porque el conductor no alcanzó a ver lo que tenía al lado. Un sistema que avise a tiempo cambia esa ecuación: en lugar de reaccionar cuando ya es tarde, el motociclista tiene unos segundos de ventaja para decidir si frenar, mantener la trayectoria o esperar antes de moverse. Esa anticipación es, en el fondo, lo más valioso del dispositivo. No reemplaza al conductor ni toma decisiones por



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



él, pero sí le entrega información del entorno en el momento justo, lo que se traduce en reacciones más rápidas y maniobras más seguras.[4].

Ante ese panorama, desarrollar un sistema de detección y alerta de proximidad para motos deja de ser un lujo tecnológico y pasa a ser una respuesta concreta a un problema real. La tecnología para reducir colisiones laterales existe, pero hasta ahora ha estado pensada casi exclusivamente para autos. Llevarla a las motos no es simplemente copiar y pegar: el tamaño, el costo y la compatibilidad eléctrica son obstáculos que han frenado su adopción, y que cualquier solución orientada a dos ruedas tiene que resolver desde el diseño.[5].

Este proyecto busca tomar tecnología disponible, sensores LiDAR de bajo costo y microcontroladores programables, y adaptarla a la realidad de las motos con criterio de ingeniería. Si funciona, el impacto va más allá del prototipo. Significa que las motos que circulan en Ecuador podrían contar con una capa adicional de seguridad.. [6]

## 2. CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes

El artículo "Advancements in Sensor Technologies and Their Application in Automotive Safety and Automation" examina el uso de tecnologías avanzadas de sensores para mejorar la seguridad y la automatización en el sector automotriz. Estas tecnologías, como LiDAR, Han demostrado ser esenciales para desarrollar sistemas de alerta de proximidad que incrementan la seguridad de conductores y motociclistas al detectar obstáculos en tiempo real y reducir el riesgo de colisiones laterales[7].

Una investigación específica sobre el uso de sensores LiDAR resalta su precisión para medir distancias en diferentes condiciones ambientales, lo que resulta crucial para aplicaciones de proximidad. Estos sensores permiten identificar obstáculos en tiempo real y, gracias a su capacidad de integración con microcontroladores se han convertido en una solución rentable y eficiente para sistemas de alerta en motocicletas[8].



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



Por su parte, un estudio sobre sensores ultrasónicos muestra cómo estos dispositivos pueden calcular con exactitud distancias laterales y generar alertas inmediatas en situaciones de riesgo. Su bajo costo y compatibilidad con plataformas IOT los hacen ideales para sistemas de seguridad adaptados a motocicletas, fortaleciendo la prevención de accidentes en espacios reducidos[9].

Donde también se incluye dispositivos que combinan sensores de infrarrojos y módulos Bluetooth para crear sistemas de alerta con notificaciones visuales y auditivas en motocicletas. Estos dispositivos han demostrado ser eficientes y fáciles de implementar, especialmente en contextos de bajo presupuesto[10].

Algo que también vale mencionar, aunque no tenga relación directa con la detección de proximidad, es el uso de sensores de vibración para identificar fallas mecánicas antes de que se conviertan en un problema mayor. Es un ejemplo más de cómo este tipo de tecnología puede adaptarse a distintos retos dentro del mundo automotriz, desde la seguridad activa hasta el mantenimiento preventivo [11].

Por otro lado, cuando el LiDAR se combina con algoritmos bien diseñados, deja de ser un simple medidor de distancias. Pasa a construir una imagen continua del entorno, actualizándose en tiempo real, lo que le da al motociclista una lectura mucho más completa de lo que está pasando alrededor y le permite anticiparse a situaciones que, de otro modo, tomaría por sorpresa. Este tipo de tecnología no solo mejora significativamente la seguridad en el tráfico, sino que también contribuye a optimizar la experiencia del conductor al proporcionar alertas oportunas y reducir la fatiga asociada a la conducción en condiciones adversas[12].

## 2.2 Bases Teóricas

### 2.2.1 Seguridad vial y motocicletas

La seguridad vial es un pilar esencial para prevenir accidentes y proteger la vida de quienes transitan por las vías. En Ecuador, la Agencia Nacional de Tránsito (ANT) enfatiza la necesidad de implementar políticas específicas que fortalezcan la protección de los motociclistas, un grupo particularmente vulnerable en las carreteras.



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



Según estadísticas obtenidas del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), durante 2023 se registraron 20.994 accidentes de tránsito en el país, dejando un saldo de 18.605 personas lesionadas y 2.373 fallecidas. De manera alarmante, cuatro de cada diez víctimas mortales en accidentes de tránsito eran motociclistas. A partir de estos datos, se puede destacar la importancia de abordar con urgencia las principales causas que son [13]:

- Exceso de velocidad: responsable del 28,4% de los accidentes.
- Maniobras temerarias e imprudentes: contribuyen al 23,2% de los casos.
- Rebasar por lugares no permitidos: factor en el 17,6% de los siniestros.

De acuerdo con el sitio “Primicias”, los motociclistas se enfrentan a diversos riesgos que comprometen gravemente su seguridad e integridad. Entre estas amenazas se encuentran los puntos ciegos de los vehículos pesados, que representan un peligro constante debido a la limitada visibilidad de sus conductores, quienes frecuentemente no logran detectar a una moto que circula en sus proximidades[14].

Algo que también vale mencionar, aunque no tenga relación directa con la detección de proximidad, es el uso de sensores de vibración para identificar fallas mecánicas antes de que se conviertan en un problema mayor. Es un ejemplo más de cómo este tipo de tecnología puede adaptarse a distintos retos dentro del mundo automotriz, desde la seguridad activa hasta el mantenimiento preventivo.

Por otro lado, cuando el LiDAR se combina con algoritmos bien diseñados, deja de ser un simple medidor de distancias. Pasa a construir una imagen continua del entorno, actualizándose en tiempo real, lo que le da al motociclista una lectura mucho más completa de lo que está pasando alrededor y le permite anticiparse a situaciones que, de otro modo, tomaría por sorpresa.

#### **2.2.2 Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor (ADAS)**

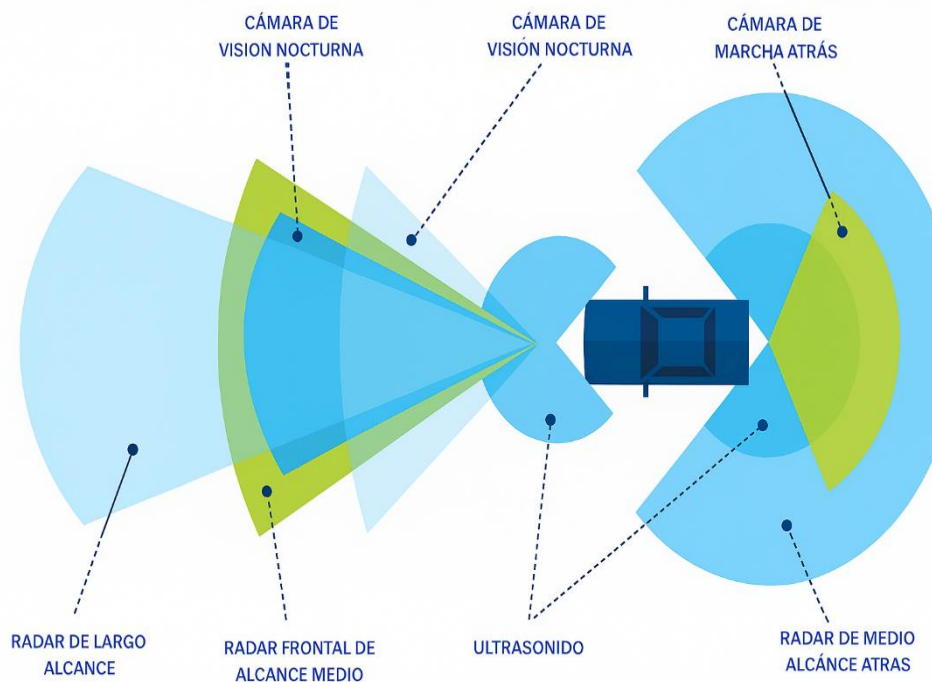
Los Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor (ADAS, por sus siglas en inglés) son un grupo de herramientas y dispositivos creados para aumentar la protección y el confort de quienes manejan vehículos. Estos sistemas pueden controlar automáticamente ciertos aspectos del vehículo, como la velocidad, la dirección o la distancia con respecto a



otros vehículos. Su función principal es asistir al conductor, alertarlo de posibles peligros y, en algunos casos, intervenir directamente para evitar accidentes.

En la **Figura 1** se logra observar cómo distintos sensores, como radares de largo y medio alcance, cámaras de visión nocturna y sensores ultrasónicos, trabajan en conjunto para monitorear el entorno del vehículo en tiempo real. Gracias a esta combinación de tecnologías, los sistemas ADAS pueden detectar obstáculos, advertir sobre riesgos y, si es necesario, actuar para evitar colisiones.

**Figura 1.** *Ejemplo del conjunto de sensores de un ADAS*



*Representación esquemática de la integración multisensor (radar, cámaras y sensores ultrasónicos) en un sistema ADAS para la detección del entorno vehicular en tiempo real*

Tomado de Escobar [15]

En motocicletas, estos sistemas son particularmente relevantes debido a la vulnerabilidad propia de los motociclistas. Sistemas como alertas de proximidad lateral, control de estabilidad y detección de colisiones traseras han demostrado ser efectivos para mejorar la seguridad en condiciones de tráfico complejo.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



### **2.2.3 Evolución del Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor (ADAS)**

Este sistema ha experimentado una evolución significativa desde su introducción, reflejando un progreso destacado en la seguridad vial y la innovación tecnológica en la industria automotriz. Basado en el sitio web “ADASfera”, este ha tenido una evolución [16]:

La evolución de estos sistemas evidencia un progreso sostenido en la integración de tecnologías orientadas a mejorar la seguridad activa y la eficiencia operativa del vehículo. En los noventa, la electrónica en los autos era cosa de ajustes finos: que el vehículo no perdiera estabilidad en una curva como el Control Electrónico de Estabilidad (ESC, con sus siglas en inglés), que el estacionamiento fuera un poco menos tedioso. Nada revolucionario, pero era el primer paso.

Lo que vino en los 2000 ya tenía otra escala. Con radar, cámaras y GPS integrados, los autos empezaron a leer el tráfico y reaccionar solos, como el Control de Crucero Adaptativo (ACC, con sus siglas en inglés). Reducir velocidad cuando el de adelante frenaba, aplicar los frenos antes de que el conductor siquiera notara el peligro como el Frenado de Emergencia Automático (AEB, con sus siglas en inglés). Por primera vez, la máquina intervenía de verdad.

De 2010 en adelante, la cosa se puso más interesante. La inteligencia artificial dejó de ser un concepto de laboratorio y empezó a vivir dentro del auto. Los sistemas aprendían, se adaptaban, reconocían no solo otros vehículos sino también peatones, ciclistas, cualquier cosa que se cruzara. La diferencia ya no era solo velocidad de reacción, sino capacidad de entender lo que estaba pasando.

Hoy el horizonte apunta directo a la autonomía. Maniobras complejas sin tocar el volante, frenado que no depende del reflejo humano, rutas que el vehículo gestiona casi por cuenta propia. No es el futuro, es lo que ya está ocurriendo, de a poco, pero sin pausa.

#### **Impacto en los vehículos de dos ruedas**

A lo largo de la historia, los motociclistas han enfrentado una vulnerabilidad considerable frente a accidentes, debido principalmente a la menor estabilidad y visibilidad



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



inherentes a las motocicletas. Sin embargo, el sector de las motocicletas y otros vehículos de dos ruedas ha vivido un cambio notable en los últimos años, gracias a la incorporación masiva de sistemas avanzados de asistencia al conductor. Este cambio no es menor. La llegada de tecnología pensada específicamente para motos está redefiniendo lo que significa circular con seguridad en dos ruedas.

Sistemas como el control de estabilidad, el frenado asistido y la detección de puntos ciegos han dejado de ser exclusivos de los autos. En moto, donde cualquier error tiene consecuencias más directas, contar con ese respaldo marca una diferencia real. No se trata solo de reducir estadísticas de accidentes, sino de que menos personas lleguen heridas a casa, o no lleguen.

Lo interesante es que este avance no responde únicamente a la lógica del mercado. Hay un compromiso creciente dentro de la industria por nivelar la protección que recibe un motociclista respecto a la de alguien que va en auto. Durante décadas esa brecha fue enorme y casi se daba por inevitable. Mejor estabilidad, mayor control, más visibilidad del entorno: cada una de estas mejoras suma. Y en conjunto, están construyendo una versión de la motocicleta que protege mejor a quien la conduce, sin quitarle lo que la hace atractiva. Según el sitio web “RACE” algunas de las aplicaciones clave incluyen[17]:

- **Plataformas Inerciales (IMU):** Estos sensores son fundamentales para garantizar el equilibrio y la estabilidad de la motocicleta. Al identificar la inclinación y el ángulo de la motocicleta, estos sensores activan de manera automática Mecanismos como el Control de Tracción (TCS, con sus siglas en inglés) o el Sistema de Frenos Antibloqueo (ABS con sus siglas en inglés).
- **Control de Crucero Adaptativo (ACC):** En motos de gama alta, este sistema se encarga de regular la velocidad sin que el conductor tenga que estar pendiente del acelerador. Lee el flujo del tráfico adelante y ajusta el ritmo de forma automática, manteniendo una distancia prudente. En rutas largas de autopista, eso se traduce en menos fatiga y más atención disponible para lo que realmente importa.
- **Sistema de Frenado de Emergencia (EBS con sus siglas en inglés):** Cuando detecta una frenada brusca o un obstáculo demasiado cerca, no espera: activa los frenos por cuenta propia



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



para reducir la velocidad lo antes posible. En situaciones donde el tiempo de reacción humano no alcanza, este sistema puede ser la diferencia entre un susto y algo mucho peor.

- **Monitor de Ángulo Muerto:** Usando sensores y cámaras, avisa cuando hay un vehículo en esa zona que los espejos no cubren. Cambiar de carril sin saber lo que viene por el costado es uno de los errores más comunes en moto, y este sistema existe precisamente para evitarlo.
- **Asistente de Cambio de Carril:** Va un paso más allá del monitor de ángulo muerto. No solo alerta sobre lo que hay al lado, sino que acompaña activamente la maniobra, ayudando a ejecutarla de forma más segura y con mejor información del entorno. Al intervenir en la dirección de la moto, el asistente contribuye a que el motociclista pueda realizar la maniobra de forma más segura y confiable.

Los sistemas de detección de proximidad son cruciales para prevenir colisiones, especialmente en situaciones de tráfico denso o en carreteras con baja visibilidad. Estos sistemas incluyen sensores de radar, cámaras y sensores ultrasónicos que monitorean constantemente el entorno del vehículo. El aporte de estos sistemas a la seguridad vial es concreto y medible. Cuando hay un obstáculo o un vehículo frenando de golpe adelante, el aviso de colisión frontal y el frenado automático reaccionan antes de que el conductor procese lo que está pasando. En situaciones así, cada fracción de segunda cuenta.

Donde más se nota su valor es en condiciones difíciles: niebla densa, lluvia intensa, carreteras oscuras. En esos escenarios, los sentidos del conductor tienen límites claros, y los sensores no. Lo que el ojo no alcanza a ver, el sistema lo detecta igual.

Para maniobras más cotidianas, como estacionar en un espacio justo o dar reversa en un lugar estrecho, los sensores ultrasónicos y las cámaras traseras hacen el trabajo pesado: miden, calculan y avisan antes de que el golpe ocurra. Y en tráfico denso o al momento de adelantar, mantener la conciencia de lo que viene por los costados o por atrás deja de ser algo que depende únicamente de los espejos y la intuición del conductor[18].

#### 2.2.4 Sensores utilizados en los Sistemas de Asistencia al Conductor (ADAS)

Estos sistemas utilizan sensores de última generación para incrementar la seguridad y el confort durante la conducción. Mediante el uso de tecnologías como ultrasonidos, radar, LiDAR, cámaras y otros dispositivos, se mejora la detección del entorno, lo que facilita



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



respuestas ágiles ante emergencias y ayuda a prevenir posibles accidentes. Estos sistemas funcionan mediante algoritmos complejos que procesan en tiempo real los datos captados por los sensores para activar las respuestas correctas, como el sistema de alerta de salida de carril, que puede ofrecer advertencias o intervenciones activas según la situación. Además, existen tecnologías que, aunque no interfieren directamente en la dinámica de conducción, incrementan la seguridad pasiva y el confort, como el asistente de luces de carretera y el limpiaparabrisas automático, que se controlan mediante sensores combinados de lluvia/luz [19].

**La Figura 2** ilustra claramente cómo estos sensores trabajan en conjunto, mostrando la cobertura y funciones de cada uno, entre estas tecnologías se encuentran el control de crucero adaptativo, el frenado de emergencia con detección de peatones, la detección de punto ciego y la asistencia para estacionamiento. Lo que hace especialmente potente a este tipo de plataforma es que no depende de una sola tecnología. Radar de largo alcance, LiDAR, cámaras, ultrasonido: cada uno cubre lo que el otro no puede, y juntos construyen una imagen completa del entorno en tiempo real. El vehículo, en cierto modo, ve en todas direcciones a la vez.

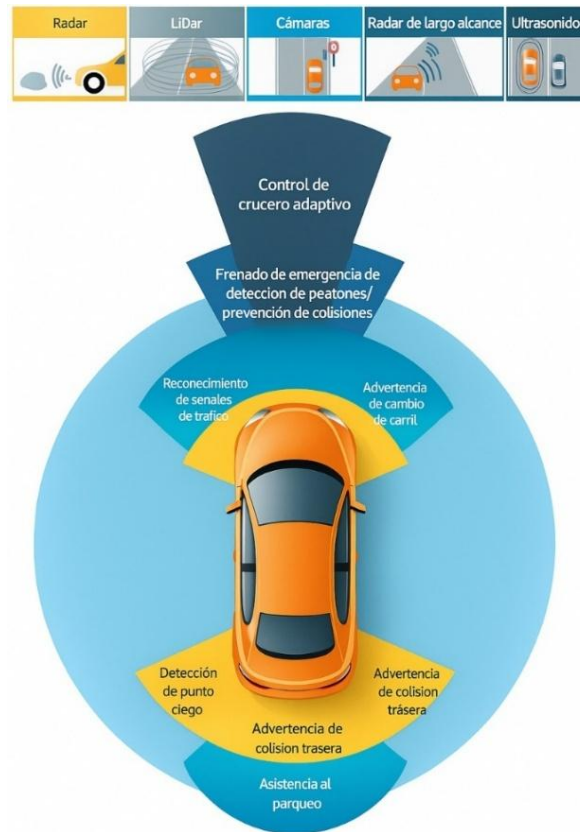
Eso tiene un impacto doble: por un lado, reduce el riesgo de accidentes; por el otro, hace que conducir sea menos agotador. Cuando el sistema se encarga de monitorear los puntos ciegos o de avisar que hay tráfico cruzando en una intersección, el conductor puede concentrarse en lo esencial sin estar pendiente de todo al mismo tiempo. La advertencia de cambio de carril, por ejemplo, es especialmente útil en vías rápidas donde un descuido de segundos puede tener consecuencias serias. La detección de punto ciego, por su parte, convierte una maniobra que siempre implica cierto riesgo en algo bastante más controlado.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



**Figura 2.** Simulación de los sensores en el ADAS



*Simulación gráfica de la cobertura angular y funcional de los sensores ADAS, mostrando el alcance de detección frontal, lateral y posterior del vehículo.*

Tomada de: Gunja [20].

Datos obtenidos del sitio web “SmartSave”, estos sistemas están integrados por una serie de elementos fundamentales que colaboran de manera conjunta para optimizar tanto la seguridad como el confort del vehículo. Entre los componentes más destacados se encuentran[21]:

- **Cámaras:** Incluyen cámaras de visión frontal, envolvente y trasera, que proporcionan información sobre las marcas de carril, señales de tráfico, obstáculos y ayudan en el estacionamiento.
- **Sensores Radar:** Emplea ondas de radio para calcular la distancia y la velocidad de los objetos que se encuentran alrededor. Los radares ubicados en la parte frontal y lateral del



vehículo hacen posibles funciones como el control de cruce adaptativo y la detección de puntos ciegos.

- **Sensores LiDAR:** Emplea rayos láser para crear mapas 3D del entorno, proporcionando alta precisión en la detección de objetos y distancias.
- **Sensores ultrasónicos:** Son útiles en detección de corto alcance, especialmente para estacionamiento y obstáculos a baja velocidad.
- **Sistema de comunicación (CAN Bus, Ethernet):** Facilita la transmisión rápida de datos entre los diferentes componentes del vehículo, garantizando la coordinación y sincronización.

### 2.2.5 Sensores Detección y medición de distancias mediante luz (LiDAR)

La detección de proximidad es un aspecto clave en la implementación de sistemas avanzados de asistencia al conductor ADAS y en la navegación autónoma de vehículos. Los sensores utilizados para esta tarea son fundamentales para el monitoreo y la medición precisa de la distancia a los objetos circundantes, contribuyendo a la seguridad y a la maniobrabilidad del vehículo. Entre los principales sensores para detección de proximidad se encuentran los sensores Light Detection and Ranging (LiDAR, por sus siglas en inglés) y sensores ultrasónicos, cada uno con características técnicas específicas que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones y entornos[22].

Estos sensores operan enviando pulsos de luz láser que, al impactar con un objeto, rebotan y vuelven al sensor. Al medir el tiempo que tarda este proceso, se determina con precisión la distancia entre el sensor y los objetos que lo rodean. Esta tecnología posibilita la creación de mapas tridimensionales del entorno con una resolución espacial y temporal superior, lo que resulta crucial para el desarrollo de modelos precisos en tiempo real.

Esta tecnología es un sistema de teledetección activa, lo que implica que genera su propia energía en forma de luz láser, la cual se emite rápidamente para calcular distancias y rangos precisos de objetos en la superficie terrestre. Según información de "seedstudio", este sensor está compuesto por tres elementos principales [23]:

- **Láser:** Se encarga de enviar y transmitir pulsos de luz.



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



- Escáner: Recibe y registra el tiempo que tarda el pulso de luz en regresar, lo que permite calcular la elevación y distancia.
- Receptor GPS especializado: Proporciona la ubicación exacta del sistema junto con el sensor.

Una de las mayores ventajas técnicas de los sensores LiDAR es su habilidad para producir una gran cantidad de puntos, lo que facilita la detección precisa de objetos diminutos y lejanos. Además, son extremadamente efectivos en condiciones de baja visibilidad o luz escasa, ya que la luz láser utilizada no depende de la iluminación ambiental. Por ello, se han convertido en una opción preferida para aplicaciones en vehículos autónomos y sistemas de asistencia al conductor, donde es fundamental contar con un mapeo detallado del entorno y una percepción precisa de los obstáculos [24].

En términos de alcance, dichos sensores pueden operar a distancias superiores a los sensores ultrasónicos o cámaras, cubriendo un rango de entre 10 metros y 200 metros, dependiendo de la resolución y la potencia del sensor. La precisión de estos sensores se mide en puntos por metro cuadrado, y cuando esa resolución es alta, el nivel de detalle que se obtiene del entorno es notable. No es un mapa aproximado: es una representación tridimensional lo suficientemente fina como para tomar decisiones en fracciones de segundo, que es exactamente lo que necesita un vehículo autónomo[25].

En la práctica, eso se traduce en varias capacidades a la vez: reconstruir el entorno en 3D, identificar obstáculos antes de estar encima de ellos, trazar rutas con precisión y, en entornos urbanos, distinguir entre un auto, una moto o un peatón cruzando la calle. En tráfico denso, donde todo ocurre rápido y cerca, ese rango extendido de percepción no es un extra, es lo que hace posible circular sin colisionar.

#### 2.2.6 Software para Dispositivos LiDAR

El desarrollo y funcionamiento de los sistemas LiDAR dependen en gran medida del software, que es esencial en todas las etapas del diseño y operación. Según información



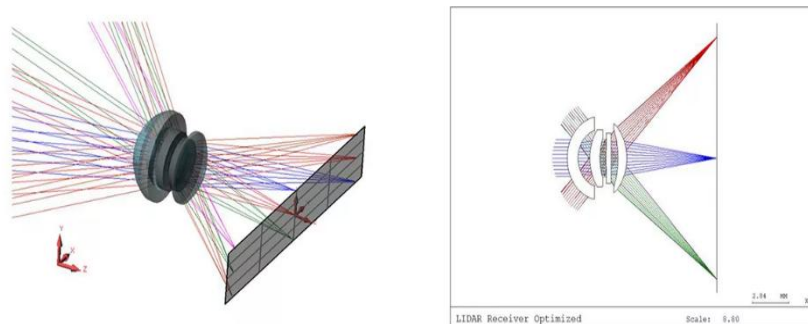
**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



obtenida de “Synopsys” para la creación de estos sistemas existen diversos tipos de softwares:

Para el diseño de la óptica del receptor se utilizó CODE V, un software especializado en simulación óptica. La Figura 3 muestra el resultado de ese proceso: un receptor optimizado donde se puede seguir visualmente el recorrido de los rayos de luz a través del sistema. A la izquierda, el modelo en 3D deja ver cómo se proyectan los haces en distintas direcciones; a la derecha, el esquema detalla cómo están dispuestos los elementos ópticos y de qué manera la separación espectral contribuye a mejorar la precisión del conjunto. Estas simulaciones, realizadas con software como CODE V y LightTools, permiten optimizar la eficiencia del receptor, esencial para aplicaciones en vehículos autónomos, cartografía y sistemas de seguridad.

**Figura 3.** Sistema óptico de receptor LiDAR optimizado, simulado en CODE V



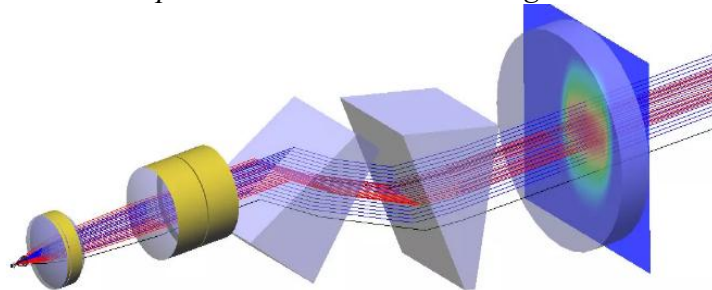
*Modelo óptico simulado que muestra la trayectoria de los rayos láser y la configuración del sistema receptor para optimizar la captación de señal reflejada.*

Tomado de: Gunja [8].

En la **Figura 4** se observa el Software de diseño de iluminación LightTools para el modelado y análisis de sistemas LiDAR.



**Figura 4.** Sistema óptico LiDAR, simulado en LightTools



*Simulación del comportamiento de la luz dentro del sistema LiDAR, desarrollada mediante modelado óptico con el objetivo de analizar y ajustar el rendimiento del receptor hasta alcanzar su configuración óptima.*

Tomado de: Gunja [8].

LightTools es un software avanzado de diseño de iluminación que permite a los ingenieros y diseñadores modelar, analizar y optimizar sistemas ópticos complejos. Ofrece herramientas para la simulación precisa de la propagación de la luz, permitiendo evaluar el rendimiento de estos sistemas en diversas condiciones. Además, facilita la creación de prototipos virtuales, reduciendo la necesidad de pruebas físicas y acelerando el proceso de desarrollo.

### **2.2.7 Sensores ultrasónicos**

Los sensores ultrasónicos operan emitiendo ondas sonoras de alta frecuencia, las cuales se reflejan al entrar en contacto con un objeto. Al medir el tiempo que tarda la onda en regresar al sensor, es posible calcular la distancia entre el sensor y el objeto. Estos sensores tienen un alcance efectivo de entre 10 y 5 metros, dependiendo de las condiciones ambientales y de la frecuencia utilizada, lo que los hace ideales para aplicaciones de proximidad y estacionamiento en entornos de baja velocidad.

Los sensores ultrasónicos han sobrevivido tanto tiempo en la industria por razones muy concretas: cuestan poco, ocupan poco espacio y no se inmutan ante la lluvia o la niebla. Para muchas aplicaciones, eso es todo lo que se necesita. Sus limitaciones tampoco son un secreto. No ven lejos, no distinguen objetos pequeños con precisión y en entornos dinámicos



se quedan cortos rápidamente. Nadie los usaría para guiar un vehículo autónomo a alta velocidad, y no tiene sentido pretender lo contrario [26].

Pero hay un territorio donde casi no tienen competencia: el de las distancias cortas y las velocidades bajas. Estacionar en un espacio justo, retroceder sin golpear nada, sortear un obstáculo a paso de hombre. Ahí los ultrasónicos responden bien, de forma consistente y sin complicar la instalación.

### 2.2.8 Comparación de sensores

Al comparar los anteriores sensores en términos de su aplicación en entornos de tráfico, cada uno tiene ventajas y desventajas dependiendo de las condiciones y la distancia a cubrir. Los sensores LiDAR tienen la ventaja de un alcance mayor, capacidad de detección en 3D y mayor resolución, lo que los convierte en la opción preferida para vehículos autónomos que requieren una percepción detallada del entorno a largo alcance. Estos sensores pueden detectar obstáculos a una distancia mayor y en un campo de visión más amplio, lo que permite la anticipación y toma de decisiones en entornos dinámicos [27].

Sin embargo, en la actualidad se realiza una integración de ambos sensores en un sistema híbrido, se están desarrollando enfoques que combinan los puntos fuertes de los sensores para optimizar la detección de obstáculos y mejorar la seguridad en entornos de tráfico. Cuando se combinan los datos de dos sensores distintos, el resultado es mayor que la suma de sus partes. Cada tecnología cubre los puntos ciegos de la otra, y juntas ofrecen una imagen del entorno más completa y confiable. Esa cobertura ampliada es la que le permite al sistema tomar mejores decisiones, con menos margen de error y más rapidez.

En el contexto de los sistemas ADAS, esa fusión ya ha demostrado su valor en vehículos de cuatro ruedas: menos accidentes, conductores mejor informados, maniobras más seguras. La información llega en tiempo real, lo que marca la diferencia entre reaccionar a tiempo o llegar tarde. Al final, de eso se trata: darle al conductor los elementos necesarios para decidir bien, antes de que la situación se le vaya de las manos[3].



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



### **2.2.9 Diseño de sistemas electrónicos para motocicletas**

El progreso tecnológico en la industria automotriz ha impulsado el desarrollo de sistemas electrónicos más avanzados, optimizando el rendimiento, la seguridad y el confort de las motocicletas. Donde se analiza los componentes claves de estos sistemas y los elementos esenciales para su implementación efectiva. Los sensores son dispositivos fundamentales para monitorizar variables operativas como velocidad, temperatura y estado de la batería [28].

En las motocicletas eléctricas, los sensores han pasado a ser parte esencial del funcionamiento del vehículo. No solo registran datos, sino que los entregan en tiempo real para que el sistema pueda anticiparse a fallos, ajustar el rendimiento sobre la marcha y mantener todo dentro de parámetros seguros. Es la diferencia entre una moto que reacciona y una que se adelanta.

Detrás de esa capacidad están los microcontroladores, que procesan toda esa información y traducen los datos en acciones concretas. En motos de competición, las ECU llevan ese rol al extremo: gestionan la inyección de combustible, controlan la tracción y administran funciones críticas donde un error de milisegundos puede costar una carrera, o algo más [28].

En términos prácticos, estas funciones se traducen en tres grandes beneficios: mejor consumo energético gracias a una inyección más precisa, mayor seguridad en condiciones difíciles mediante el control de tracción, y un motor que rinde más con menos desperdicio. Visto en conjunto, la electrónica moderna no es un añadido a la motocicleta, es parte de lo que la hace funcionar bien. Los sensores, microcontroladores y actuadores forman la columna vertebral de estos sistemas. Como lo describe un estudio en ResearchGate, los sensores son elementos clave que recopilan información crucial como velocidad, temperatura y niveles de combustible. Sin estos datos, sería imposible garantizar un funcionamiento eficiente de los sistemas electrónicos en motocicletas [18].

Además, los microcontroladores son los encargados de procesar esta información. Si los sensores son los ojos del sistema, los microcontroladores son su cerebro. Reciben todas las señales, las procesan y las convierten en instrucciones para que el resto del sistema actúe.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



Su rol no es solo ejecutar, sino hacerlo con la sincronización correcta y sin perder estabilidad, incluso cuando las condiciones no son las ideales [19].

Del otro lado están los actuadores, que son quienes le hablan directamente al conductor. Los LED tienen ventajas claras: duran más, consumen menos energía y se adaptan bien a distintos entornos y diseños. Los zumbadores, por su parte, hacen algo que una luz no siempre puede: llamar la atención de forma inmediata, sin importar hacia dónde esté mirando el conductor. Juntos, conforman un canal de alerta que responde rápido cuando la situación lo exige.

Montar todo esto en una motocicleta no es simplemente conectar cables. Requiere precisión: cualquier interferencia entre componentes puede comprometer el funcionamiento del conjunto, y en un sistema pensado para la seguridad, eso no es aceptable. Según un estudio en Dialnet, uno de los mayores desafíos es la organización del cableado, ya que este debe ser lo suficientemente robusto para resistir vibraciones constantes y, al mismo tiempo, fácil de acceder para tareas de mantenimiento [31].

Otro punto crítico del montaje es la calibración de los sensores. En el artículo Optimización de sistemas electrónicos en ambientes de alto estrés, se describe cómo la calibración incorrecta puede causar lecturas imprecisas que afectan todo el funcionamiento del sistema. Además, se destaca que el uso de herramientas avanzadas de diagnóstico puede facilitar la instalación y mantenimiento, garantizando una integración exitosa en el vehículo.

### **2.2.10 Protección Ante Condiciones Ambientales**

Uno de los mayores desafíos en el diseño de sistemas electrónicos para motocicletas es garantizar su resistencia a condiciones ambientales adversas, como lluvia, polvo y vibraciones. En este contexto, un estudio en Ciencia Latina explica que los materiales herméticos y las tecnologías de encapsulación son fundamentales para proteger los componentes electrónicos de daños potenciales. Adicionalmente, se recomienda la aplicación de pruebas de envejecimiento acelerado para simular el desgaste de los componentes en situaciones reales [32].



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



Según el artículo Impacto de las vibraciones en la durabilidad de componentes electrónicos automotrices, Hay problemas que solo se notan cuando ya es tarde, y la vibración es uno de ellos. Kilómetro a kilómetro, el movimiento constante del motor va haciendo su trabajo silencioso sobre los componentes electrónicos, hasta que algo falla. No se puede detener la vibración, eso es parte de cómo funciona un motor, pero sí se puede evitar que llegue a donde hace daño. Los materiales poliméricos que se usan hoy para amortiguación han cambiado bastante ese panorama: no son soluciones espectaculares, pero funcionan, y eso se nota en la durabilidad del sistema a largo plazo [22].

Lo que viene después tampoco es poca cosa. Recargar con energía solar o eólica, usar materiales que ya tuvieron una vida anterior, reducir los residuos del proceso de fabricación. Son cambios que avanzan sin prisa, pero que están transformando la forma en que se concibe y se produce la motocicleta moderna. Un informe de la revista “Automotive Electronics” menciona que estas iniciativas no solo benefician al medio ambiente, sino que también abren nuevas oportunidades de mercado para productos más sostenibles[34].

### **3.CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

##### **3.1 Diseño Experimental**

El diseño metodológico del proyecto es de tipo experimental y tecnológico aplicado, orientado a la validación del desempeño de un sistema de detección y alerta lateral basado en tecnología LiDAR para motocicletas. Se emplea un tipo cuantitativo, donde se analizan parámetros medibles que determinan la precisión y eficiencia del sistema.

Las variables independientes consideradas en este estudio corresponden a la distancia del obstáculo, con valores establecidos de 10 m, 20 m y 40 m, y a la velocidad relativa del vehículo en función de la zona urbana evaluada, de acuerdo con los parámetros definidos por la plataforma de Tránsito del Ecuador, tal como se presenta en la **Tabla 1**[35].



Tabla 1. *Parámetros de Velocidad*

Tipo de vía	Límite máximo	Rango moderado	Fuera del rango moderado
Urbana	50 km/h	>50 km/h – <60 km/h	>60 km/h

*Nota:* Requisitos definidos en función de la normativa vigente de seguridad activa y las condiciones operativas de motocicletas en entorno urbano.

Las variables dependientes son:

- Precisión de detección (cm): diferencia entre la distancia real y la medida por el sensor.
- Tiempo de respuesta (ms): intervalo entre la detección y la emisión de la alerta.

Para saber si el sistema realmente funciona, se diseñaron tres tipos de pruebas, cada una pensada para evaluar un aspecto distinto del desempeño en condiciones que reflejan lo que ocurre en las calles ecuatorianas. La primera es la más básica: moto quieta, obstáculos quietos, distancias variables. El objetivo es simple, establecer qué tan preciso es el sensor cuando no hay movimiento de por medio, una línea de base sin variables que compliquen la lectura. La segunda introduce movimiento, pero solo del lado del obstáculo. La moto se mantiene fija mientras los objetos se aproximan desde distintos ángulos y a diferentes velocidades. Ahí es donde se pone a prueba la capacidad del LiDAR para detectar algo que viene hacia él, ya sea de frente o por el costado, antes de que sea demasiado tarde. Finalmente, se realizarán pruebas dinámicas con ambos elementos en movimiento, simulando condiciones reales de tránsito urbano para analizar la respuesta del sistema ante situaciones de adelantamiento o cruce de vehículos. Estas pruebas permitirán caracterizar la exactitud de medición, la sensibilidad de detección y el tiempo de respuesta del dispositivo en escenarios de creciente complejidad operativa [36].

### 3.2 Selección de componentes

La selección de componentes se basó en criterios de precisión, bajo consumo energético, facilidad de programación, compatibilidad e integración física. Los componentes



seleccionados se detallan a continuación junto con sus especificaciones y motivos de elección:

### 3.2.1 Sensor de distancia

Se realizó un proceso de búsqueda y selección del sensor de distancia definiendo los requisitos críticos del sistema: una alta precisión para una detección fiable de obstáculos, un consumo energético moderado para su uso en un sistema alimentado por una fuente de 5v, un tamaño compacto para una integración física sencilla, y una interfaz de comunicación compatible con microcontroladores modernos. Partiendo de estas necesidades, se realizó una investigación en el mercado que identificó a los sensores LiDAR-Lite v3, TFmini Plus y RPLIDAR A1 como candidatos viables dentro de un rango de costos similar. La evaluación se llevó a cabo de manera sistemática, contrastando las especificaciones técnicas de cada modelo que se muestra en la **tabla 2**.

**Tabla 2.** *Evaluación de sensores*

Criterio	LiDAR-Lite		
	v3	TFmini Plus	RPLIDAR A1
<b>Rango máximo</b>	~40 m	0.1 m a 12 m	0.15 m a 12 m
<b>Precisión</b>	±2.5 cm	±5 cm a 0.1-6 m; ±8 cm a 6-12 m	±3 cm a 3 m; ± 5 cm a 3-5 m; ±8 cm a 5-12 m
<b>Frecuencia de medición</b>	hasta 500 Hz	1-1000 Hz ajustable	5.5Hz
<b>Alimentación</b>	5 V DC	5 V ±0.5V	5 V DC
<b>Corriente típica</b>	105 mA	≤110 mA promedio	~100 mA operando



<b>Ángulo de apertura / FOV</b>	<1°	3.6°	≤1° resolución angular, 360° escaneo
<b>Peso</b>	~22 g	~11-12 g	~170 g

*Nota: Comparación técnica realizada considerando rango máximo, precisión, consumo energético y facilidad de integración en motocicletas.*

Este análisis reveló que el TFmini Plus, si bien tiene una mayor frecuencia de medición y es compacto, tenía un rango de detección (12 m) significativamente menor al requerido. El RPLIDAR A1 ofrecía un escaneo en 360°, pero su gran tamaño, peso y consumo lo descartaban para una aplicación que priorizaba la compacidad. Finalmente, el LiDAR-Lite v3 emergió como la opción óptima, al ser el único que cumplía de forma equilibrada con todos los criterios: superaba en rango (40 m) y precisión ( $\pm 2.5$  cm) a sus competidores directos, mantenía un consumo energético manejable y, gracias a sus interfaces I<sup>2</sup>C/PWM y su reducido tamaño, garantizaba una integración sencilla tanto a nivel de software como de hardware [37]. En la **figura 5** se puede observar el sensor que fue seleccionado ya que fue el más adecuado para nuestro proyecto.

**Figura 5. LiDAR Lite V3**



*Sensor LiDAR-Lite v3 seleccionado para este sistema, utilizado para medición de distancia con precisión centimetrada hasta 40 m.*

Tomado de [37]



### 3.2.2 Microcomputadora

El proceso de selección de la unidad de procesamiento se realizó evaluando las capacidades de distintas plataformas como el Raspberry Pi 4, ESP32 y Arduino Uno contra los requisitos de un sistema que requiere potencia de cálculo sustancial para procesar datos de sensores, gestionar comunicaciones y ejecutar algoritmos de visión.

**Tabla 3.** Evaluación de Microcomputadores

Criterio	Raspberry Pi 4 Model B (8 GB)	ESP32	Arduino Uno R3
<b>Procesador / MCU</b>	Quad-core ARM Cortex-A72 64-bit SoC a 1.8GHz	Dual-core 32-bit LX6 (hasta ~240 MHz)	ATmega328P 8-bit AVR a 16 MHz
<b>Memoria</b>	8 GB RAM	~520 KB SRAM	32 KB Flash
<b>Voltaje de alimentación</b>	5V DC	3.3V DC	5V DC
<b>Interfaces de conectividad</b>	GPIO 40-pin, USB3, USB2, Ethernet, Bluetooth	GPIO numerosos, Wifi + Bluetooth integrados	Digital I/O 14 pines (6 PWM), Análoga input 6 pines, I2C/SPI/UART
<b>Tamaño de integración física</b>	Tarjeta tipo SBC (~88×58×19 mm aprox)	Módulo muy compacto	Dimensiones ~68.6 mm × 53.4 mm, peso ~25g

*Nota: Comparación técnica de los microcomputadores seleccionados para el desarrollo del prototipo, considerando compatibilidad eléctrica y capacidad de procesamiento.*

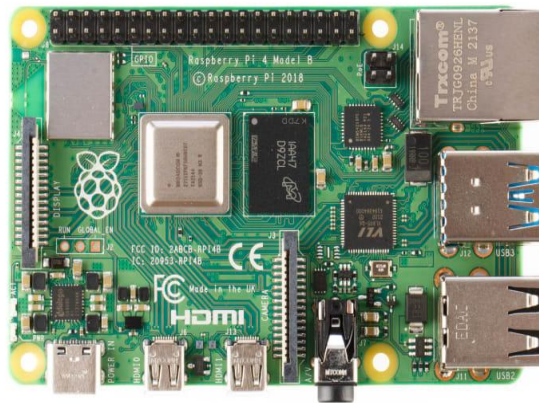
Como se observa en la **tabla 3** se reveló limitaciones críticas en las opciones más simples: el Arduino Uno, con su microcontrolador de 8-bit a 16 MHz y solo 2 KB de RAM, resultaba insuficiente para tareas computacionalmente demandantes. El ESP32, a pesar de su excelente conectividad integrada (Wifi /BT) y bajo consumo, presentaba una restricción



similar debido a su memoria RAM (~520 KB), que podría ser un cuello de botella para aplicaciones avanzadas. Frente a estas alternativas, la Raspberry Pi 4 Model B (8 GB) emergió como la elección correcta. Su potente procesador Quad-core a 1.8 GHz y sus 8 GB de RAM ofrecen un margen de rendimiento comparable al de una computadora, capaz de manejar sistemas operativos y software complejo [38]. Lo que termina de inclinar la balanza a favor de la Raspberry Pi 4 es su versatilidad de conexiones. Pines GPIO en cantidad, puertos USB 3.0 y Ethernet Gigabit: esa combinación permite integrar sensores, periféricos y módulos de visualización sin tener que hacer malabares con adaptadores ni sacrificar rendimiento. Ningún otro modelo del mismo rango ofrece ese nivel de flexibilidad, y para un sistema que necesita comunicarse con varios componentes a la vez, eso no es un detalle menor.

Consume más energía y ocupa más espacio que otras opciones, es cierto. Pero como se aprecia en la **figura 6**, cuando se evalúa todo en conjunto, la Raspberry Pi 4 es la que tiene la capacidad de procesamiento y la compatibilidad necesarias para funcionar como el núcleo del sistema sin comprometer nada en el camino.

**Figura 6.** *Raspberry Pi 4 Model B (8 GB RAM)*



*Microcomputadora empleada como unidad central de procesamiento para la adquisición, procesamiento de datos y ejecución del algoritmo de detección.*

Tomado de Brañez [39]

### 3.2.3 Módulo de Cámara



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



La selección del módulo de cámara se orientó hacia sensores con obturador global (Global Shutter), un requisito indispensable para aplicaciones en movilidad, donde la captura de imágenes sin distorsión de objetos en movimiento rápido es crítica. El proceso de evaluación contrastó tres opciones principales: el módulo con sensor Sony IMX296 (1.58 MP), su variante a color comercializada por Arducam, y una alternativa de mayor resolución basada en el sensor onsemi AR0234 (2.3 MP). Como se observa en la **tabla 4** se evaluó los componentes.

**Tabla 4.** *Evaluación de Cámaras*

<b>Criterio</b>	<b>Cámara Raspberry Pi 1.3</b>	<b>Arducam 1.58 MP IMX296 Color GS</b>	<b>Arducam/otro GS módulo 2.3 MP AR0234</b>
<b>Sensor</b>	Cámara CMOS Global Shutter	Sony IMX296 Global Shutter	onsemi AR0234 Global Shutter CMOS
<b>Resolución</b>	1.58 MP (1456×1088)	1.58 MP (1456×1088)	~2.3 MP (1920×1200)
<b>Velocidad de captura (fps)</b>	Hasta 60 fps	Hasta 60 fps	Hasta 60 fps
<b>Tipo de obturador</b>	Global Shutter	Global Shutter	Global Shutter
<b>Interfaz</b>	MIPI CSI-2 (compatible con Raspberry Pi)	CSI cable para- Raspberry Pi (15-22 pin FFC)	MIPI CSI-2 / módulo adaptado para-Raspberry Pi etc.
<b>Alimentación</b>	3.3 V	3.3 V	3.5-5v

*Nota: Comparación técnica de las diferentes cámaras seleccionadas considerando compatibilidad resolución, fps y compatibilidad eléctrica.*

Si bien el AR0234 ofrecía una resolución superior, esto implicaba un mayor costo, un tamaño físico más grande y una carga computacional significativamente mayor para la



Raspberry Pi, factores desfavorables para la integración en una motocicleta. La elección se decantó finalmente por la Cámara Raspberry Pi 1.3. Como se observa en la **figura 7** esta opción presentó el equilibrio óptimo al ofrecer una resolución suficiente (1456×1088) para la detección de obstáculos, una tasa de captura de hasta 60 fps, y la crucial tecnología de obturador global, todo ello en un factor de forma compacto (~38×38 mm) con interfaz MIPI CSI-2 que garantiza una integración directa y sencilla con la Raspberry Pi 4 seleccionada, cumpliendo así con los exigentes requisitos de tamaño, consumo y rendimiento para el entorno móvil del proyecto [40].

**Figura 7.** Cámara Raspberry Pi 1.3



*Módulo de cámara utilizado para ampliar el campo de visión y complementar la detección de obstáculos mediante procesamiento visual*

Tomado de Gordillo[41]

### **3.2.4 Interfaz de Visualización (Smartphone + Servidor Web)**

Inicialmente se consideró utilizar una pantalla LCD Touch HDMI de 3.5 pulgadas para la visualización del sistema. Sin embargo, durante la etapa de pruebas se determinó que este módulo presentaba limitaciones en tamaño, ergonomía y velocidad de actualización. Por esta razón, se implementó una solución más eficiente basada en un servidor web alojado en la Raspberry Pi, permitiendo que cualquier smartphone se convierta en la pantalla del sistema mediante conexión Wifi.



Tabla 5. Evaluación de pantallas

Criterio	Smartphone (Pantalla del sistema)	Pantalla LCD 3.5" SPI (Raspberry Pi)	Pantalla LCD Touch 3.5" DSI (Raspberry Pi)
Interfaz	Wifi / Hotspot Acceso vía navegador o app (HTTP, VNC)	SPI (GPIO)	DSI (Direct Serial Interface)
Compatibilidad	Compatible con Raspberry Pi 4/3 mediante VNC, servidor web.	Raspberry Pi 3, 2	Raspberry Pi 4, 3
Resolución	720×1080	480×320	480×320
Tamaño	7"	3.5"	3.5"
Touch	Capacitivo multitáctil	Resistivo (GPIO)	Capacitivo (DSI)
Alimentación	Batería interna (no usa energía del Raspberry).	3.3–5V vía GPIO	5V vía DSI / GPIO

*Nota: Comparación técnica de las diferentes pantallas seleccionados para el desarrollo del prototipo, considerando compatibilidad eléctrica y versatilidad.*

Como se observa en la **Figura 8** se optó por utilizar un smartphone como pantalla principal del sistema debido a que ofrece la mayor compatibilidad y simplicidad de integración. La conexión se realiza de forma inalámbrica mediante WiFi, eliminando completamente el uso de cables HDMI, USB o buses SPI/DSI y reduciendo el riesgo de fallas por vibraciones en la motocicleta. Además, el smartphone proporciona una resolución muy superior (720p–1080p), lo que mejora la visualización de alertas y datos en tiempo real.



A diferencia de las pantallas LCD de 3.5", el smartphone no requiere configuraciones adicionales en el Raspberry Pi, no ocupa pines GPIO, y cuenta con un panel táctil capacitivo más preciso y responsivo. Sumado a esto, su alimentación independiente mediante batería evita cargas adicionales sobre el sistema eléctrico de la motocicleta. En conjunto, estas ventajas convierten al smartphone en la opción más eficiente y práctica para la implementación del dispositivo de proximidad lateral.[42].

**Figura 8.** REDMI M2003J15SC



*Dispositivo móvil utilizado como interfaz de visualización remota para el monitoreo del sistema mediante servidor web local.*

Tomado de Fuente propia

### 3.2.5 Módulo Zumbador KY-006 Piezoeléctrico

La selección del zumbador para el sistema de aviso se centró en módulos compactos, de bajo consumo y compatibles con la Raspberry Pi 4, capaces de generar alertas sonoras audibles y fiables. Se evaluaron tres alternativas: el KY-006 Piezoeléctrico, un buzzer activo 5V genérico y un módulo pasivo KY-012, considerando factores como voltaje de trabajo, facilidad de control y nivel de sonido.



Tabla 6. Evaluación de Zumbadores

Criterio	KY-006 Piezoeléctrico	Módulo Pasivo KY-012
Tipo	Piezoeléctrico pasivo	Pasivo
Voltaje de operación	3.3 V – 5 V	3.3 V – 5 V
Control desde Raspberry Pi	Directo desde GPIO	Requiere señal PWM
Nivel sonoro	~85 dB	~80 dB
Consumo	Bajo (menor a 25 mA)	Bajo (~20 mA)
Facilidad de uso	Alta (compatible con 3.3 V GPIO)	Baja (requiere PWM preciso)

*Nota: Comparación técnica de los diferentes Zumbadores que existen en el mercado considerando compatibilidad eléctrica y facilidad de uso.*

Para las alertas sonoras se eligió el módulo piezoeléctrico KY-006, visible en la **figura 9**. La decisión no fue arbitraria: opera entre 3.3 V y 5 V, lo que permite conectarlo directamente al circuito lógico sin necesidad de amplificadores ni componentes adicionales que compliquen el diseño. Eso simplifica la integración y reduce puntos de falla.

A eso se suma su tamaño reducido y su bajo consumo, dos características que en un sistema embarcado en una motocicleta pesan bastante. Y cuando suena, lo hace con claridad suficiente como para que el conductor lo escuche en condiciones de tráfico real, que es, al final, la única prueba que importa.



**Figura 9.** *Zumbador*



*Módulo piezoeléctrico empleado como sistema de alerta sonora ante la detección de obstáculos en el ángulo muerto.*

Tomado de AllDataSheet [43].

### **3.3 Arquitectura de software del sistema**

El sistema desarrollado implementa una arquitectura de procesamiento en tiempo real basada en la integración de tres componentes principales dentro de una misma plataforma computacional:

1. Percepción visual basada en visión artificial.
2. Percepción de distancia basada en LiDAR-Lite v3.
3. Sistema de visualización, registro y control mediante servidor web local.

Los módulos se ejecutan de manera ininterrumpida dentro de un programa desarrollado en lenguaje Python que se ejecuta una Raspberry Pi 4 Model B con sistema operativo Raspberry Pi OS de 64 bits, el cual corresponde a una distribución basada en Debian optimizada para este hardware. La elección del sistema operativo no fue al azar. Raspberry Pi OS ofrece compatibilidad nativa con la cámara y con la librería Picamera2, se comunica sin problemas con el LiDAR-Lite v3 a través de I<sup>2</sup>C usando smbus2, y soporta modelos de aprendizaje profundo optimizados para arquitecturas ARM64. En pocas palabras, hace bien todo lo que el sistema necesita, sin requerir configuraciones complicadas ni parches de compatibilidad.

La comunicación entre los distintos módulos se resuelve mediante memoria compartida y un esquema de múltiples hilos de ejecución. Eso permite que los procesos corran en paralelo sin pisarse entre sí, manteniendo sincronía y asegurando que las tareas más críticas siempre tengan prioridad. El resultado es un sistema que opera de forma



continua y estable, sin interrupciones ni bloqueos que comprometan su respuesta en el momento que más importa. El entorno de software estuvo conformado principalmente por Python 3 como lenguaje de programación, OpenCV para procesamiento de imágenes, Ultralytics YOLOv8 para detección de objetos y Pandas para el registro de información en archivos Excel.

### 3.4 Módulo de visión artificial: YOLOv8

Como se observa en la **Figura 10** para la detección de objetos en el entorno lateral de la motocicleta se empleó el modelo YOLOv8, basado en redes neuronales convolucionales profundas y diseñado para detección de objetos en tiempo real. Este modelo fue seleccionado debido a su equilibrio entre precisión y velocidad de inferencia, características fundamentales para aplicaciones embebidas. YOLOv8 ofrece alta velocidad de procesamiento, buen desempeño en la detección de personas y vehículos en entornos urbanos, arquitectura optimizada para hardware ARM mediante su versión NCNN y posibilidad de ajustar el umbral de confianza para reducir falsos positivos.

**Figura 10.** *Funcionamiento del reconocimiento de YOLO v8*



*Detección de objetos en tiempo real mediante YOLO v8 donde se identifica personas y una laptop, etiquetando cada objeto reconocido.*

Tomado de Fuente propia

En el sistema implementado se cargó el modelo ligero *yolo11n\_ncnn\_model*, configurando un umbral de confianza de 0.5. Con el objetivo de disminuir la carga



computacional, la inferencia no se ejecuta en cada cuadro capturado, sino cada tres fotogramas. Cuando se detecta un objeto, el sistema extrae su clase, calcula el centroide horizontal de la caja delimitadora y determina si se encuentra en el lado izquierdo o derecho de la imagen, generando indicaciones visuales mediante flechas superpuestas en el video. Este mecanismo permite alertar al motociclista sobre la presencia de vehículos u obstáculos en su punto ciego lateral.

### 3.5 Módulo LiDAR e integración I<sup>2</sup>C

El sensor LiDAR-Lite v3 fue integrado a la Raspberry Pi mediante el bus I<sup>2</sup>C utilizando la librería smbus2. El proceso de medición sigue una secuencia clara: primero se envía una orden de disparo al sensor, luego se espera alrededor de 20 ms para que la lectura se estabilice, y después se leen dos registros de 8 bits, uno con el byte alto y otro con el bajo, que se combinan para obtener la distancia en centímetros. Ese valor se convierte a metros y se muestra directamente sobre el video en tiempo real.

La parte visual es sencilla pero efectiva: mientras la distancia sea segura, el indicador se mantiene en un color neutro. Cuando el objeto detectado está a 2 metros o menos, cambia a rojo. Sin necesidad de leer números, el conductor sabe de inmediato que hay algo demasiado cerca.

### 3.6 Servidor web y visualización en tiempo real

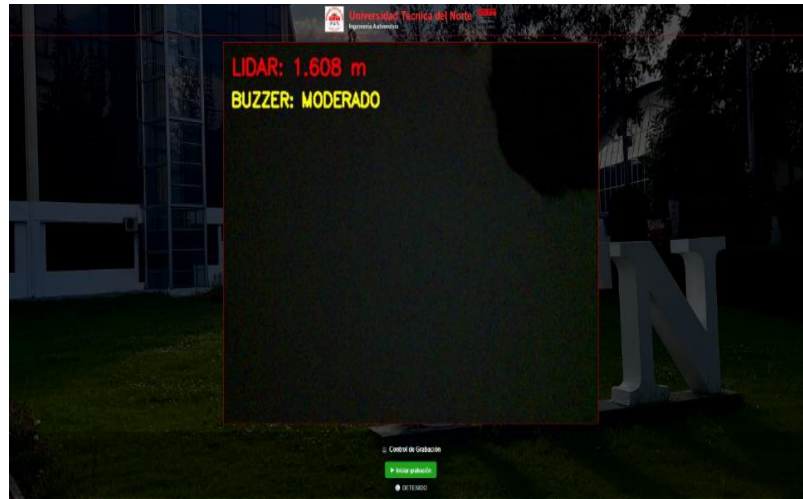
Como se observa en la **figura 11** se implementó un servidor HTTP ligero basado en el módulo http.server de Python, encargado de transmitir el video en formato MJPEG en tiempo real, mostrar controles para iniciar y detener la grabación, visualizar la distancia del LiDAR y presentar una interfaz gráfica personalizada con elementos institucionales. Este enfoque convierte a la Raspberry Pi en un sistema autónomo accesible desde cualquier dispositivo conectado a la misma red local mediante un navegador web, sin necesidad de software adicional.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



**Figura 11.** Visualización del servidor HTTP



*Interfaz del servidor HTTP donde se muestra la distancia, activación del buzzer y una opción donde se puede iniciar la grabación.*

Tomado de Fuente propia

### **3.7 Sistema de registro y almacenamiento de datos**

Cuando el usuario activa la opción de grabación, el sistema almacena temporalmente los cuadros de video y, al finalizar la sesión, genera un archivo de video en formato MP4. De manera simultánea se crea un archivo Excel que contiene el número de fotograma, la marca de tiempo, los objetos detectados por YOLOv8 y la distancia medida por el LiDAR. Este registro estructurado permite realizar análisis posteriores del desempeño del sistema y respalda la validación experimental del prototipo.

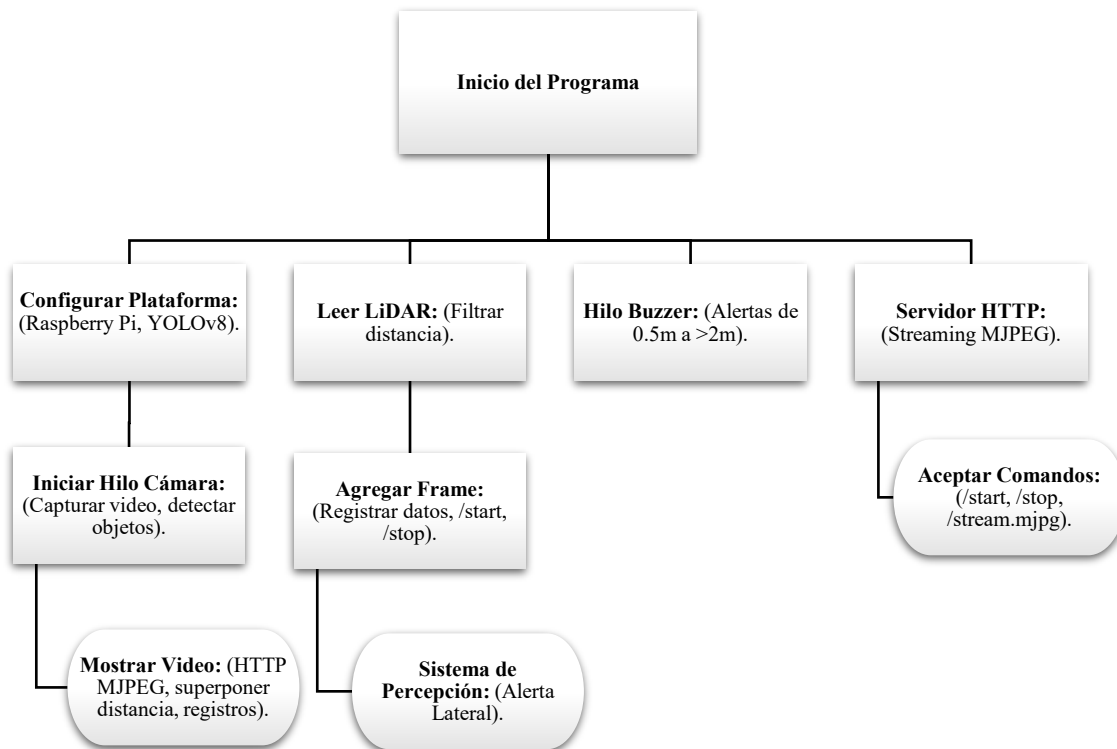
### **3.8 Síntesis técnica de la solución de software**

El software opera bajo una arquitectura multihilo compuesta principalmente por un hilo encargado de la captura de video, la inferencia del modelo YOLOv8 y la adquisición de datos del sensor LiDAR, y un segundo hilo dedicado a la gestión del servidor web. Este esquema de ejecución concurrente evita bloqueos, garantiza la transmisión continua del video y permite que las mediciones de distancia y la detección visual se ejecuten de forma paralela. La solución integra Raspberry Pi OS de 64 bits como plataforma base, un modelo YOLOv8 optimizado para detección de objetos en tiempo real, el sensor LiDAR-Lite v3 para medición precisa de distancia, una interfaz web para visualización y control, y un



sistema de registro de datos orientado a la validación experimental. En conjunto, el software constituye un sistema integrado de percepción y alerta lateral funcional, reproducible y alineado con principios de seguridad activa en motocicletas.

**Figura 12.** *Funcionamiento del programa*



*Diagrama de flujo del sistema propuesto, que describe la inicialización del programa, configuración de la plataforma (Raspberry Pi y YOLOv8), lectura y filtrado del LiDAR, gestión del buzzer, procesamiento de video, servidor HTTP para streaming MJPEG y sistema de percepción con alertas laterales.*

Tomado de Fuente propia

### **3.9 Filtrado de datos y alertas**

Con el fin de mejorar la sensibilidad de las mediciones de distancia en condiciones reales de operación, se implementó una cadena de filtrado digital compuesta por validación de rango físico, control de saltos bruscos, filtro de mediana con ventana deslizante de siete



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



muestras y un suavizado robusto recortado. Esta combinación permite descartar valores físicamente imposibles, eliminar picos aislados, reducir la influencia de valores extremos y mantener una señal estable y coherente, obteniéndose una distancia filtrada adecuada para la toma de decisiones de seguridad en tiempo casi real. Al sistema base se le sumó un buzzer piezoeléctrico conectado al pin GPIO18, que corre en su propio hilo para no interferir con el resto del procesamiento. Su comportamiento varía según qué tan cerca esté el obstáculo: cuando la situación es crítica, emite un tono continuo; en rangos intermedios, cambia a pulsos cuya frecuencia se ajusta con la distancia. Además, desde la interfaz web se puede silenciarlo manualmente cuando la alerta ya cumplió su función.

Para que el buzzer siempre trabaje con datos coherentes, la distancia filtrada se comparte entre hilos mediante una variable protegida con bloqueo. Así se evita que dos procesos intenten acceder al mismo dato al mismo tiempo, lo que podría generar lecturas inconsistentes o comportamientos inesperados. Con la integración del filtrado y la alerta sonora, el sistema evoluciona de un enfoque meramente perceptivo a uno perceptivo-reactivo, combinando detección visual, medición robusta de distancia, retroalimentación auditiva graduada, visualización y registro en tiempo real, lo que incrementa la utilidad práctica del prototipo y fortalece su alineación con los principios de seguridad activa vehicular.

### 3.3 Procedimiento de Validación Estática

Para el proceso de validación estática del sistema de detección, se realizaron mediciones en una calle del sector urbano de la ciudad de Ibarra, con el objetivo de comprobar la precisión del sensor de distancia empleado en el proyecto.

El procedimiento consistió en colocar un obstáculo fijo frente al sistema, variando su posición en diferentes distancias reales medidas con una cinta métrica común, utilizada como instrumento de referencia. Se establecieron puntos de medición a 5 m, 10 m, 20 m y 35 m, verificando en cada uno la lectura entregada por el sensor.

En cada posición se tomaron treinta mediciones seguidas para ver qué tan confiable era el dispositivo y si las lecturas se mantenían consistentes entre sí. Los datos se anotaron a mano y luego se trabajaron en Excel, donde se obtuvo el promedio, el sesgo, la desviación



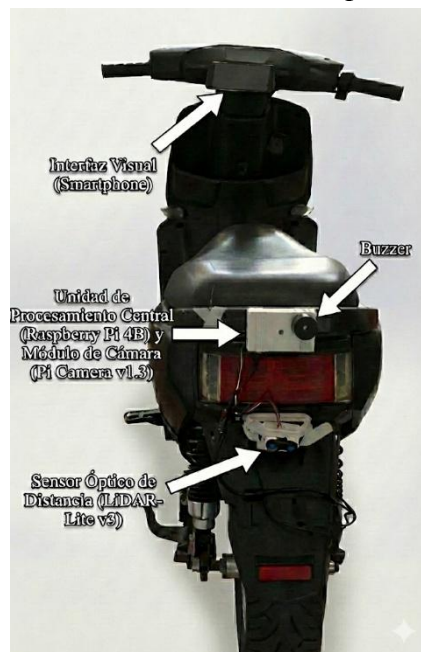
**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



estándar y el error absoluto. Con estos valores fue posible establecer qué tan preciso y confiable resultó ser el sistema de medición, además de minimizar el efecto que pudieran tener los errores aleatorios.

Como se observa en la **figura 13** durante las pruebas se comprobó que el sistema funcionara correctamente frente al objeto de medición, asegurando que las lecturas no se vean afectadas por factores externos o condiciones del entorno que pudieran alterar los resultados.

**Figura 13.** *Colocación del Dispositivo*



*Ubicación estratégica del sistema BSD en la motocicleta, mostrando la orientación del sensor LiDAR y la disposición de los componentes electrónicos para el correcto su correcto funcionamiento.*

Tomado de Fuente propia

### **3.3.1 Cálculos y fórmulas empleadas**

Luego de la obtención de los datos de las mediciones estáticas, se procedió a realizar el respectivo análisis matemático con el fin de determinar la precisión, veracidad y repetibilidad del sistema de medición. Este proceso se desarrolló siguiendo los lineamientos



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



de la norma ISO 5725, que establece los métodos estadísticos para evaluar la exactitud de resultados experimentales.

### 3.3.1.1 Cálculo de la media aritmética ( $\bar{d}$ )

Este parámetro permite conocer el valor promedio de las mediciones realizadas en una misma distancia, proporcionando una referencia central para el análisis estadístico.

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (1)$$

Donde:

- $\bar{d}$ : Media de las mediciones
- $d_i$ : valor individual de cada medición
- $n$  : numero de mediciones realizadas

El promedio representa la tendencia central del conjunto de datos y se utiliza posteriormente para determinar el sesgo del sistema.

### 3.3.1.2 Sesgo o veracidad (Bias)

El sesgo refleja la diferencia entre el valor medio obtenido experimentalmente y el valor real de referencia. Este indicador permite identificar si el sistema presenta un error sistemático, es decir, una tendencia a medir por encima o por debajo del valor verdadero.

$$Sesgo = \bar{d} - d_{real} \quad (2)$$

Donde:

- $\bar{d}$ : media de las mediciones obtenidas.
- $d_{real}$ : distancia real medida con la cinta métrica de referencia.

**Criterio de aceptación:**



$$| \text{Sesgo} | \leq 2.5 \text{ cm} \quad (3)$$

Un sesgo dentro del rango aceptado indica que el sistema posee una buena veracidad y que las mediciones no presentan desviaciones significativas respecto al valor real.

### 3.3.1.3 Desviación estándar ( $\sigma$ )

La desviación estándar determina la precisión del sistema, midiendo la dispersión de los valores registrados respecto al promedio.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}} \quad (4)$$

#### Donde:

- $\sigma$ : desviación estándar.
- $d_i$ : valor individual de cada medición.
- $\bar{d}$ : media de las mediciones.
- $n$ : número total de mediciones.

Cuanto menor sea el valor de la desviación estándar, mayor será la exactitud y consistencia del sistema de medición.

#### Criterio de aceptación:

$$\leq 2.0 \text{ cm} \quad (5)$$

### 3.3.1.4 Error máximo ( $E_{max}$ )

El error máximo representa la mayor diferencia observada entre una medición individual y el valor real de referencia.

$$Error_{max} = \max | d_i - d_{real} | \quad (6)$$

#### Donde:



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



- $Error_{max}$ : error máximo.
- $d_i$ : medición individual.
- $d_{real}$ : valor real de la distancia.

Este indicador permite conocer el peor caso de desviación del sistema durante las pruebas.

Si el error máximo se mantiene dentro del límite establecido, el sistema es confiable para su aplicación práctica.

**Criterio de aceptación:**

$$Error_{max} \leq 5.0 \text{ cm} \quad (7)$$



Figura 14. Validación de las pruebas estáticas.

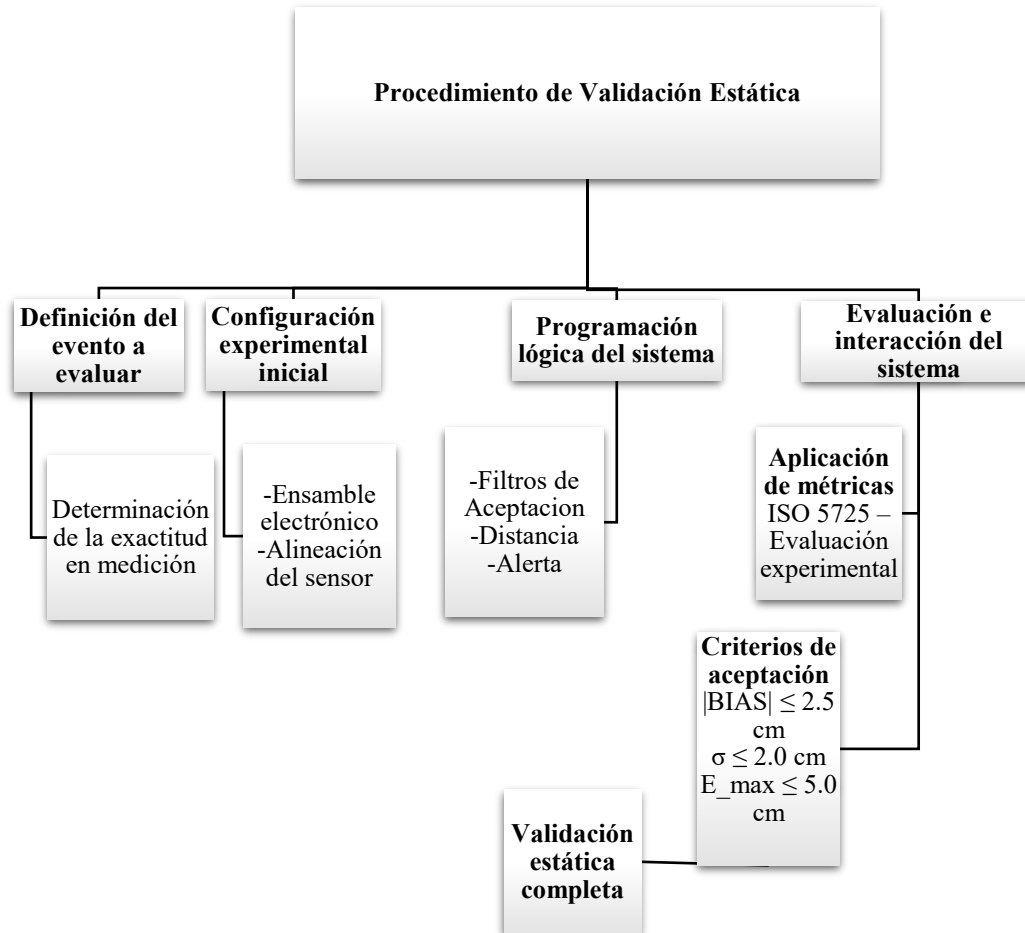


Diagrama del procedimiento de validación estática, que incluye la definición del evento a evaluar, configuración experimental, programación lógica del sistema, aplicación de métricas bajo la norma ISO 5725 y criterios de aceptación (bias, desviación estándar y error máximo), culminando con la validación estática completa del sistema.

Tomado de Fuente propia

### 3.4 Procedimiento de Validación Dinámica

Con el propósito de comprobar el desempeño del sistema de detección en condiciones reales de movimiento, se realizaron pruebas dinámicas en el circuito de Yahuarcocha. Durante las pruebas se realizaron recorridos en los que la motocicleta equipada con el sistema BSD siguió a un vehículo objetivo a distintas velocidades. Las distancias y eventos



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



de alerta fueron registrados mediante video de alta velocidad, lo que permitió calcular los valores reales y compararlos con los medidos por el sistema.

### 3.4.1 Cálculos y Fórmulas Empleadas

#### 3.4.1.1 Distancia de Primera Detección ( $d_{detección}$ )

Este parámetro permite determinar a qué distancia el sistema detecta por primera vez un vehículo dentro de su rango de monitoreo.

$$d_{detección} = d_{real}(t_{primera\ detección}) \quad (8)$$

**Donde:**

- $d_{detección}$ : distancia a la que el sistema emite la primera alerta.
- $d_{real}$ : distancia real calculada a partir del análisis de video.
- $t_{primera\ detección}$ : instante de tiempo en que se activa la detección.

Cuanto mayor sea esta distancia, más anticipada será la advertencia para el conductor, aumentando la seguridad.

**Criterio de aceptación:**

$$d_{detección} \geq 10.0\ m \quad (9)$$

#### 3.4.1.2 Tiempo de Respuesta ( $t_{respuesta}$ )

Evalúa la rapidez del sistema para emitir la alerta después de que el vehículo ingresa al rango de detección.

$$t_{respuesta} = t_{alerta} - t_{entrada\ rango} \quad (10)$$

**Donde:**

- $t_{alerta}$ : tiempo en el que se activa la señal de advertencia.



- $t_{entrada\ rango}$ : tiempo en que el vehículo entra en el rango de detección del sensor.

Un tiempo de respuesta bajo indica una alta eficiencia en el procesamiento de la señal y una detección oportuna del obstáculo.

**Criterio de aceptación:**

$$t_{respuesta} \leq 100\ ms \quad (11)$$

**3.4.1.3 Evaluación del Desempeño mediante Matriz de Confusión.**

Se utiliza para analizar la exactitud y fiabilidad del sistema de detección frente a diferentes eventos de presencia o ausencia de vehículos.

**Tabla 7.** Sistema de alerta pruebas dinámicas

	Obstáculo presente	Obstáculo ausente
Sistema de Alerta	Verdadero Positivo (VP)	Falso Positivo (FP)
Sistema no Alerta	Falso Negativo (FN) (>100MS)	Verdadero Negativo (VN)

*Nota:* Matriz de confusión utilizada para evaluar el desempeño del sistema de detección, donde se comparan las condiciones reales (obstáculo presente o ausente) con la respuesta del sistema (alerta o no alerta), clasificando los resultados en verdaderos positivos, falsos positivos, falsos negativos y verdaderos negativos, tomando en cuenta que un falso negativo también se categoriza cuando cruza el umbral de los 100ms.

*Tomado de Fuente propia*

**A partir de estos valores se calculan los siguientes indicadores:**

$$\text{Sensibilidad} = \frac{VP}{VP + FN} \times 100\% \quad (12)$$



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



$$\text{Especificidad} = \frac{VN}{VN + FP} \times 100\% \quad (13)$$

$$\text{Exactitud} = \frac{VP + VN}{VP + FN + FP + VN} \times 100\% \quad (14)$$

$$FNR = \frac{FN}{VP + FN} \times 100\% \quad (15)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + VN} \times 100\% \quad (16)$$

#### Donde:

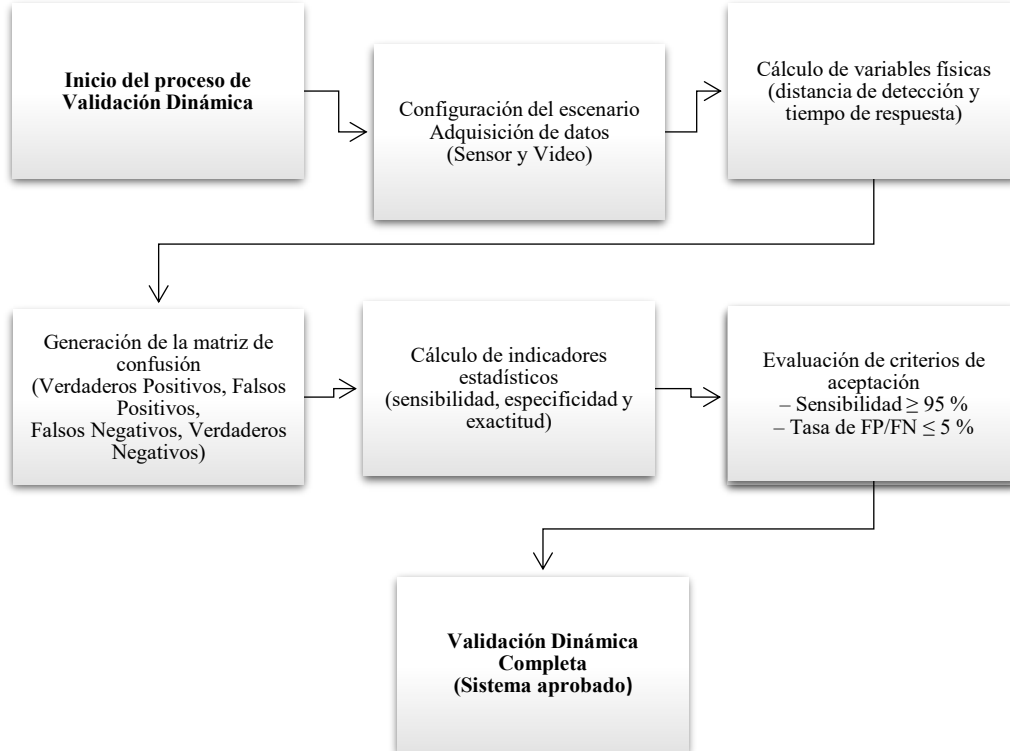
- La sensibilidad mide la capacidad del sistema para detectar correctamente los objetos presentes.
- La especificidad indica su habilidad para no emitir falsas alarmas.
- La exactitud refleja la proporción total de detecciones correctas.

#### Criterios de aceptación:

- Sensibilidad  $\geq 95\%$
- Tasa de falsos positivos  $\leq 5\%$
- Tasa de falsos negativos  $\leq 5\%$



**Figura 15. Proceso de validación dinámica**



*Diagrama del proceso de validación dinámica del sistema, que contempla la configuración del escenario y adquisición de datos, cálculo de variables físicas y generación de la matriz de confusión, análisis de indicadores estadísticos (sensibilidad, especificidad y exactitud), evaluación de criterios de aceptación y culmina con la validación dinámica completa del sistema.*

Tonado de Fuente propia

## 4. CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 4.1 Resultados de las pruebas estáticas

Las pruebas estáticas se efectuaron en un entorno controlado, asegurando condiciones estables de iluminación y superficie plana. El sensor LiDAR se instaló en la



parte trasera de la motocicleta a una altura aproximada de 0,8 metros, garantizando una alineación adecuada con el eje óptico de medición.

#### 4.1.1 Configuración de Distancias de Referencia

Para la evaluación, se dispusieron varios puntos de referencia distribuidos de manera progresiva a lo largo del eje longitudinal de ensayo, abarcando desde cortas hasta largas distancias dentro del rango operativo del sensor. En cada punto se realizaron múltiples mediciones sucesivas, con el propósito de verificar la consistencia y linealidad de la respuesta del sistema frente a distintas separaciones.

Los datos obtenidos fueron registrados y analizados estadísticamente para determinar los parámetros de exactitud, repetibilidad y error absoluto del dispositivo, garantizando una valoración objetiva del desempeño del LiDAR bajo condiciones estáticas.

**Figura 16. Distancias Referenciadas en Metros**



*Escenario de validación dinámica del sistema en entorno real, mostrando la detección de obstáculos laterales durante la circulación de una motocicleta, comparando una representación conceptual de proximidad con una prueba experimental en vía urbana.*

Tomado de Fuente propia

#### 4.1.2 Resultados Estadísticos de la Validación Estática

La **tabla 8** presenta los resultados estadísticos obtenidos en el proceso de validación estática del sistema para distancias reales de 5, 10, 20 y 35 m. Se comparan los valores promedio medidos con la distancia real y se calculan indicadores de desempeño como el sesgo (bias), la desviación estándar y el error máximo, considerando 30 mediciones por cada



punto. El sesgo se mantiene dentro del rango de  $\pm 3.5$  cm, y la desviación estándar no supera 2.3 cm, lo que demuestra una repetibilidad confiable de las mediciones del sistema LiDAR. El error máximo observado de 5.02 cm a 35 m se considera aceptable para aplicaciones de detección de objetos en motocicletas, validando la correcta calibración del sensor.

**Tabla 8.** Resultados estadísticos del proceso de validación Estática

Distancia real (m)	Promedio medido (m)	Sesgo (cm)	Desviación estándar (cm)	Error máximo (cm)	N.º de mediciones
5	4.98	1.29	1.09	3.3	30
10	9.98	1.80	1.42	3.7	30
20	19.96	2.80	1.98	4,5	30
35	34,91	3,50	2,25	5.02	30

*Nota:* Se muestran los resultados de la validación estática a distintas distancias, indicando promedio medido, sesgo, desviación estándar y error máximo (30 mediciones por punto), evidenciando una ligera subestimación con baja variabilidad.

Tomado de Fuente propia

La **figura 17** muestra algo que, en términos de validación, es bastante alentador. Se midieron cuatro distancias de referencia, 5, 10, 20 y 35 metros, y los valores que arrojó el sensor fueron 4.98, 9.98, 19.96 y 34.91 metros respectivamente. Los números hablan solos: el sensor no se desvía, sigue la línea ideal con una consistencia que pocos sistemas logran en condiciones estáticas.

Los errores absolutos son pequeños y van en la misma dirección, desde -0.02 m en las distancias cortas hasta -0.09 m a 35 metros. Hay un sesgo negativo leve que se acumula con la distancia, pero el error relativo máximo no supera el 0.26%, lo que en términos prácticos es marginal. La pendiente de 0.997 confirma que no hay distorsión en la señal ni



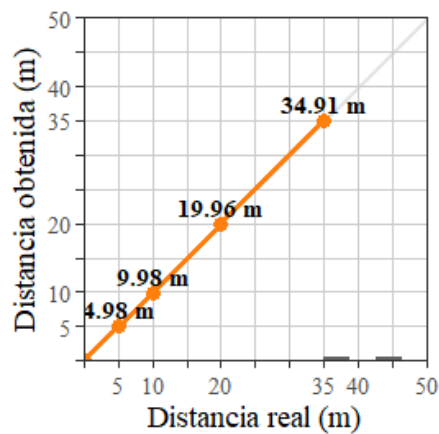
compresión de valores, y el hecho de que no se registrara ningún evento de "Sin Detección" indica que el sensor operó de forma continua sin perder el objetivo en ningún momento.

Dicho esto, la prueba tiene sus límites y vale ser claro al respecto. Solo cubre el rango de 5 a 35 metros, dejando fuera los extremos donde podrían aparecer zonas muertas, no linealidades o saturación. Y al ser una prueba estática, no dice nada sobre cómo se comporta el sensor cuando hay movimiento de por medio, con el ruido, la latencia y la deriva que eso implica. Dentro del rango evaluado y en condiciones controladas, el desempeño es sólido. Lo que ocurre más allá de esos límites es territorio que aún queda por explorar

Figura 17. Evaluación del sensor

### Evaluación de Medición del Sensor (ESTÁTICA)

Parámetros — Medición (m) — Sin Detección



*El sensor presenta una medición altamente precisa y lineal entre 5 y 35 m, con errores inferiores al 0.3% respecto a la distancia real, siguiendo casi perfectamente la recta ideal  $y = x$  en condiciones estáticas.*

Tomado de fuente propia.

La **figura 18** resume el comportamiento del sensor a lo largo del rango evaluado, y lo que muestra es un patrón claro: a mayor distancia, mayor error, en los tres parámetros analizados. El error máximo pasa de 3.3 cm a 500 cm hasta 5.02 cm a 3500 cm, un incremento del 52% que no sorprende. A medida que la señal viaja más lejos, se atenúa y se



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



dispersa, y eso se traduce inevitablemente en lecturas menos precisas. Es un comportamiento esperado en este tipo de sensores, no una falla del sistema.

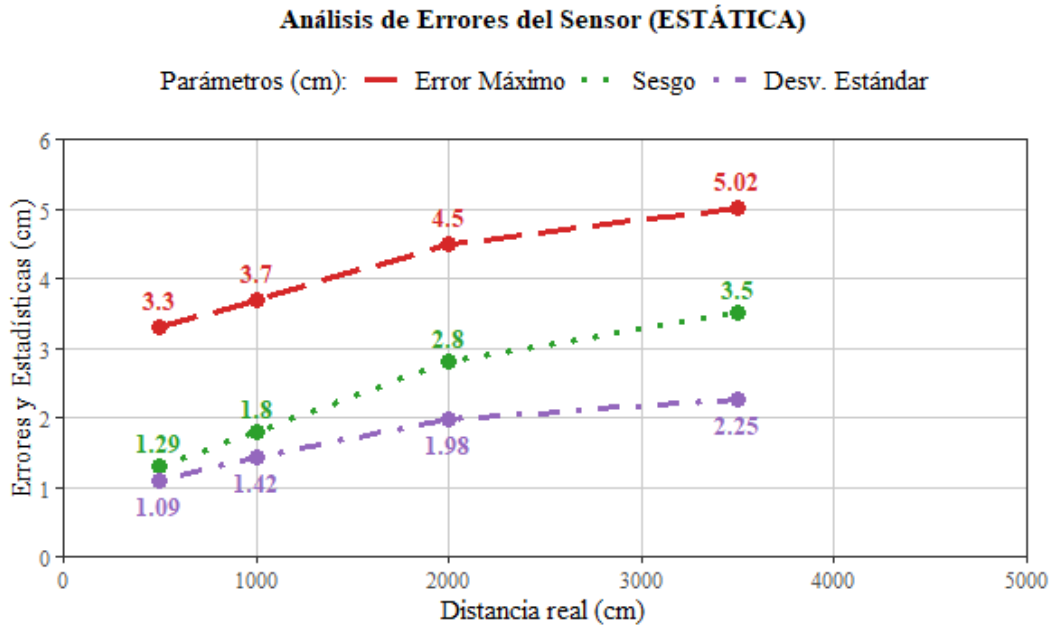
Lo que sí llama más la atención es el sesgo, que crece un 171%, de 1.29 a 3.5 cm. Ese aumento tan pronunciado apunta a un error sistemático que se va acumulando con la distancia, probablemente relacionado con latencias de procesamiento o con una calibración que no cubre bien los rangos más largos. Lo preocupante no es solo que crezca, sino que su peso relativo frente al error total también aumenta: en distancias largas, el componente sistemático empieza a dominar sobre el aleatorio.

La desviación estándar también sube, un 106%, pero de forma más moderada. Eso es una buena señal: significa que la repetibilidad del sensor se mantiene relativamente estable, aunque la distancia aumente. El sensor puede equivocarse de forma consistente, lo cual es mucho más manejable que equivocarse de forma impredecible.

En todos los puntos evaluados se cumple la relación esperada: error máximo por encima del sesgo, y el sesgo por encima de la desviación estándar. La jerarquía es consistente y las brechas entre parámetros son proporcionales, lo que da confianza en la coherencia de las mediciones.



Figura 18. Análisis de errores del sensor



El sensor muestra errores crecientes con la distancia: el error máximo va de 3.3 a 5.02 cm, el sesgo de 1.29 a 3.5 cm y la desviación estándar de 1.09 a 2.25 cm entre 500 y 3500 cm, siendo el error sistemático el factor dominante y susceptible de corrección por calibración.

Tomado de fuente propia.

## 4.2 Resultados Pruebas Dinámicas

### 4.2.1 Metodología de Validación Dinámica

La validación dinámica del sistema se realizó mediante recorridos controlados, en los cuales la motocicleta equipada con el dispositivo de detección circuló junto a un vehículo objetivo en movimiento. El sistema integra un algoritmo de visión artificial basado en YOLO para la detección anticipada del vehículo y un sensor de proximidad para la verificación precisa de la distancia lateral.

Durante cada ensayo se verificó que la primera detección del vehículo objetivo ocurriera a una distancia igual o superior a 10 m. A partir de este punto, cuando el vehículo cruzaba el umbral de los 10 m y entraba al rango crítico (por ejemplo, 9,98 m), se iniciaba el registro del tiempo de respuesta del sistema.



El tiempo de respuesta se calculó como la diferencia entre el instante en que el sensor detectaba al vehículo dentro del rango crítico ( $\leq 10$  m) y el momento en que se activaba la alerta audible. Este procedimiento se repitió para velocidades de 20, 30, 40 y 50 km/h, con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones dinámicas.

Adicionalmente, cada evento fue clasificado mediante la matriz de confusión (VP, FP, FN y VN), permitiendo obtener los indicadores de sensibilidad, especificidad y exactitud, y comprobar que el sistema responde de forma adecuada una vez superado el umbral crítico de detección.

#### 4.2.2 Verificación del Criterio Mínimo de Primera Detección ( $\geq 10$ m) (Moto estática, Velocidad del automóvil 30 km/h)

La **Tabla 9** presenta la verificación experimental del criterio mínimo de distancia de primera detección, establecido en  $\geq 10$  m como requisito de desempeño del sistema. En esta prueba, la motocicleta se mantuvo en condición estática, mientras que el vehículo de prueba se desplazó a una velocidad constante de 30 km/h en dirección a la misma. En los diez ensayos realizados, las distancias registradas superaron el umbral definido, confirmando el cumplimiento del criterio técnico. Se observa un valor cercano al límite mínimo (10,55 m); sin embargo, las demás mediciones presentan márgenes superiores, lo que evidencia consistencia y sensibilidad en la capacidad de detección temprana del sistema bajo las condiciones evaluadas.

**Tabla 9.** Verificación del criterio mínimo de distancia de primera detección

N.º	d_primera_detección (m)	Cumple $\geq 10$ m	Observación
1	10.55	Si	Límite mínimo
2	12.36	Si	Correcto
3	14,84	Si	Correcto



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



4	16,23	Si	Correcto
5	19,17	Si	Correcto
6	19,86	Si	Correcto
7	20,76	Si	Correcto
8	20.85	Si	Correcto
9	20.87	Si	Correcto
10	21.96	Si	Correcto

---

*Nota: La tabla presenta la evaluación experimental del parámetro de distancia de primera detección, verificando el cumplimiento del criterio técnico  $\geq 10$  m. Los resultados obtenidos en los diez ensayos superan el umbral establecido, confirmando la conformidad del sistema con el requisito de desempeño definido.*

Tomado de Fuente propia

## 5 Evaluación del Tiempo de Respuesta del Sistema

La Tabla 10 muestra los tiempos de respuesta del sistema, entendidos como la diferencia entre el instante en que ocurre el evento ( $t_{\text{entrada}}$ ) y el instante en que el sistema lo registra ( $t_{\text{detección}}$ ). En los casos de detección exitosa, el tiempo de respuesta estuvo entre 20 ms y 115 ms, clasificándose en su mayoría como Verdaderos Positivos (VP); se presentó además un caso de Falso Negativo (FN), correspondiente a una situación en la que el vehículo se encontraba dentro del campo de detección —confirmado durante el ensayo— pero el sistema no generó la alerta dentro del intervalo esperado, lo cual pudo deberse a condiciones del entorno que afectaron la lectura del sensor en ese instante. Del mismo modo, se obtuvo un Verdadero Negativo (VN), en el que no había presencia de evento alguno y el sistema respondió correctamente sin emitir alerta, lo que en conjunto permite valorar la especificidad, exactitud y sensibilidad del sistema bajo condiciones reales de prueba.



Tabla 10. Evaluación del tiempo de respuesta del sistema.

N.º	t_entrada (ms)	t_deteccion(ms)	Tiempo de respuesta (ms)	Clase de detención
1	1000	1065	65	VP
2	2300	2380	80	VP
3	3450	3525	75	VP
4	4120	4190	70	VP
5	5340	5360	20	VP
6	6010	6075	65	VP
7	7180	7250	70	VP
8	9110	9225	115	FN
9	-	-	0	VN
10	8340	8415	75	VP

*Nota:* La tabla muestra los tiempos de respuesta del sistema, calculados entre el evento de entrada y su detección, evidenciando respuestas mayoritariamente efectivas (VP), con un caso de FN y un VN, permitiendo evaluar la rapidez y desempeño temporal del sistema.

Tomado de Fuente propia

## 6 Cálculo de Indicadores de Desempeño del Sistema BSD

Cálculo de Indicadores del Sistema (con reemplazo de valores)

Sensibilidad (%)

$$\text{Sensibilidad} = \frac{8}{8 + 1} \times 100 = \frac{8}{9} \times 100 = 88.9\%$$



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



**Especificidad (%)**

$$\text{Especificidad} = \frac{1}{1 + 0} \times 100 = \frac{1}{1} \times 100 = 100\%$$

**Exactitud (%)**

$$\text{Exactitud} = \frac{8 + 1}{8 + 1 + 0 + 1} \times 100 = \frac{9}{10} \times 100 = 90\%$$

**FNR**

$$FNR = \frac{1}{8 + 1} \times 100 = \frac{1}{9} \times 100 = 11.1\%$$

**FPR**

$$FPR = \frac{0}{0 + 1} \times 100 = 0\%$$

**7 Matriz de Confusión del Desempeño Global del Sistema**

La **tabla 11** presenta la matriz de confusión correspondiente al desempeño del sistema BSD, mostrando 8 Verdaderos Positivos (VP), 1 Falso Negativo (FN), 0 Falsos Positivos (FP) y 1 Verdadero Negativo (VN). A partir de estos valores se calculan los indicadores de desempeño, obteniéndose una sensibilidad del 88,9%, especificidad del 100% y exactitud global del 90%. Asimismo, la tasa de falsos positivos (FPR) es 0%, mientras que la tasa de falsos negativos (FNR) es 11,1%, evidenciando una alta capacidad de detección con ausencia de falsas alarmas y un bajo porcentaje de omisiones.



**Tabla 11.** *Matriz de Confusión del desempeño del sistema BSD*

Parámetro	Valor
Verdaderos Positivos (VP)	8
Falsos Negativos (FN)	1
Falsos Positivos (FP)	0
Verdaderos Negativos (VN)	1
Sensibilidad	88.9%
Especificidad	100%
Exactitud	90%
FPR	0%
FNR	11.1%

*Nota:* La tabla muestra la matriz de confusión del sistema BSD, evidenciando alta sensibilidad (88,9%), especificidad del 100% y exactitud del 90%, sin falsos positivos y con un bajo porcentaje de falsos negativos (11,1%).

Tomado de Fuente propia

## **4.2 Evaluación Tercer Prueba dinámica del sistema BSD a diferentes velocidades de aproximación lateral del vehículo.**

### **4.3.1 Escenarios de Aproximación Lateral**

Con el objetivo de caracterizar el desempeño del sistema de detección de punto ciego (BSD) bajo condiciones dinámicas reales de operación, se llevaron a cabo pruebas controladas de aproximación lateral del vehículo objetivo a diferentes velocidades relativas. Durante los ensayos, la motocicleta equipada con el sistema BSD se desplazó a una velocidad longitudinal constante de 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h y 50 km/h, condición seleccionada para representar un escenario típico de circulación urbana y garantizar exactitud en la adquisición de datos.



De manera simultánea, el vehículo lateral ejecutó maniobras de adelantamiento a velocidades aproximadas de 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h y 60 km/h, con el fin de simular distintos niveles de severidad en la dinámica de aproximación al punto ciego. Esta variación permitió analizar la influencia de la velocidad relativa del vehículo objetivo sobre la distancia de primera detección y el tiempo de respuesta del sistema.

Para cada repetición se verificó que la primera detección ocurriera a una distancia igual o superior a los 10 m, conforme a los criterios normativos establecidos para sistemas de advertencia temprana. Asimismo, se registraron los instantes correspondientes a la entrada del vehículo al rango crítico de detección y a la activación de la alerta audible, permitiendo calcular el tiempo de respuesta del sistema y evaluar su cumplimiento respecto al límite máximo de 100 ms.

Los eventos obtenidos fueron posteriormente clasificados mediante una matriz de confusión (VP, FP, FN y VN), lo que permitió cuantificar el desempeño global del sistema en términos de sensibilidad, especificidad y exactitud, así como identificar posibles limitaciones operativas bajo condiciones dinámicas más exigentes.

#### 4.3.2 Resultados a Velocidad Relativa de la moto a 20 km/h y el vehículo a 30 km/h

**Tabla 12.** *Primera Detección (Moto Velocidad Constante 20 km/h vehículo a 30km/h)*

N.º	Distancia primera detección (m)	Cumple $\geq 10$ m	Observación
1	11.84	Sí	Correcto
2	12.36	Sí	Correcto
3	13.18	Sí	Correcto
4	13.21	Sí	Correcto
5	13.85	Sí	Correcto



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



6	14.57	Sí	Correcto
7	14.69	Sí	Correcto
8	14.54	Sí	Correcto
9	14,77	Si	Correcto
10	15.15	Sí	Correcto
11	15.25	Sí	Correcto
12	15.65	Sí	Correcto
13	15.90	Sí	Correcto
14	15.92	Sí	Correcto
15	18.05	Sí	Correcto

---

*Nota: La tabla muestra que en los 15 ensayos realizados a velocidad relativa de 20 km/h y el vehículo a 30km/h, el sistema cumplió el criterio  $\geq 10$  m en todos los casos, confirmando una detección temprana consistente en condiciones dinámicas.*

Tomado de Fuente propia

La **Tabla 12** presenta los resultados de la primera detección lateral del dispositivo desarrollado durante pruebas dinámicas realizadas a una velocidad constante de 20 km/h y el vehículo a 30km/h. En las 15 veces que se repitió la prueba, el sistema siempre detectó el vehículo a 10 m o más de distancia, lo que significa que cumplió al 100% con el mínimo requerido, sin excepción. Eso es bastante significativo, porque quiere decir que en ningún intento el sistema se quedó corto ni dejó pasar el vehículo sin detectarlo a tiempo. Los datos además se mantuvieron bastante consistentes entre sí, lo que es una buena señal de que el sensor no solo funciona, sino que lo hace de manera estable y predecible cada vez que se activa junto al algoritmo de detección visual YOLO.

En conjunto, estos resultados dejan claro que el sistema tiene la capacidad de identificar vehículos en el punto ciego con suficiente anticipación, incluso cuando todo está en movimiento y el margen de reacción es reducido.



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



En cuanto a los tiempos de respuesta, la **Tabla 13** muestra cómo se comportó el sistema en un escenario donde el vehículo que adelantaba a 30 km/h y la motocicleta a 20 km/h. Ese tiempo se mide desde que el vehículo entra a la zona de detección hasta que suena la alerta, y es uno de los indicadores más importantes para saber si el sistema realmente sirve en condiciones reales. Pues bien, en casi todos los 30 ensayos el sistema respondió correctamente Clasificados como Verdadero Positivo (VP), con tiempos que estuvieron entre los 63 ms y los 99 ms. Todos estos valores están por debajo del límite de 100 ms, lo que confirma que el sistema no solo detecta bien, sino que lo hace con la velocidad necesaria para alertar al conductor a tiempo Se registran dos Falsos Negativos (FN), uno asociado a un retardo leve (105 ms) y otro sin generación de alerta, así como un Falso Positivo (FP) y un Verdadero Negativo (VN). En conjunto, los resultados muestran un desempeño mayoritariamente estable, con tiempos de reacción inferiores a 110 ms en condiciones dinámicas controladas.

**Tabla 13.** *Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 30 km/h, Moto 20 km/h)*

N°	Vel. Moto (km/h)	Tiempo entrada rango (ms)	Tiempo alerta (ms)	Tiempo respuesta (ms)	Clase	Observación
1	20	1021	1084	63	VP	Correcto
2	20	1146	1212	66	VP	Correcto
3	20	1268	1336	68	VP	Correcto
4	20	1391	1465	74	VP	Correcto
5	20	1517	1594	77	VP	Correcto
6	20	1643	1718	75	VP	Correcto
7	20	1769	1842	73	VP	Correcto
8	20	1892	1970	78	VP	Correcto



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



N°	Vel. Moto (km/h)	Tiempo entrada rango (ms)	Tiempo alerta (ms)	Tiempo respuesta (ms)	Clase	Observación
9	20	2018	2103	85	VP	Correcto
10	20	2145	2227	82	VP	Correcto
11	20	2271	2354	83	VP	Correcto
12	20	2397	2486	89	VP	Correcto
13	20	2524	2618	94	VP	Correcto
14	20	2652	2751	99	VP	Correcto
15	20	2781	2886	105	FN	Retardo
16	20	2910	2994	84	VP	Correcto
17	20	3036	3121	85	VP	Correcto
18	20	3164	3253	89	VP	Correcto
19	20	3292	3380	88	VP	Correcto
20	20	3419	3504	85	VP	Correcto
21	20	3546	3632	86	VP	Correcto
22	20	–	3749	–	FP	Alerta vehículo
23	20	3791	3875	84	VP	Correcto
24	20	3918	4007	89	VP	Correcto
25	20	4046	4134	88	VP	Correcto
26	20	4173	4263	90	VP	Correcto

sin



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



N°	Vel. Moto (km/h)	Tiempo entrada rango (ms)	Tiempo alerta (ms)	Tiempo respuesta (ms)	Clase	Observación
27	20	4302	4396	94	VP	Correcto
28	20	4431	–	–	FN	No se generó alerta
29	20	–	–	–	VN	Sin vehículo
30	20	4574	4658	84	VP	Correcto

*Nota: La tabla muestra que, la moto a 20 km/h y un vehículo a 30km/h, el sistema presentó tiempos de respuesta entre 63 ms y 105 ms, predominando los VP, con dos FN, un FP y un VN, evidenciando un desempeño dinámico rápido y mayormente consistente.*

Tomado de Fuente propia.

La **tabla 14** presenta la matriz de confusión del sistema BSD bajo una condición dinámica con velocidad relativa de 20 km/h y un vehículo a 30km/h. Con todos los datos recolectados, se calcularon los principales indicadores de desempeño del sistema. La sensibilidad alcanzó un 92,9 %, lo que refleja una alta capacidad para detectar eventos reales de forma correcta. La especificidad se situó en el 50 %, un resultado que debe interpretarse con cautela dado el bajo número de casos negativos presentes en las pruebas, lo cual limita la representatividad estadística de este valor. La exactitud global fue del 90 %, ofreciendo una perspectiva general positiva sobre el rendimiento del sistema. Respecto a las tasas de error, la FPR alcanzó el 50 %, también condicionada por la escasez de negativos, mientras que la FNR se mantuvo en un 7,1 %, reflejando un bajo nivel de omisión. Estos indicadores, considerados en conjunto, permiten concluir que el sistema opera de manera favorable bajo condiciones dinámicas con la moto a 20 km/h y un vehículo a 30km/h.



Tabla 14. *Matriz de Confusión del desempeño del sistema BSD a 20km/h.*

Parámetro	Valor
Verdaderos Positivos (VP)	26
Falsos Negativos (FN)	2
Falsos Positivos (FP)	1
Verdaderos Negativos (VN)	1
Sensibilidad	92.9 %
Especificidad	50 %
Exactitud	90 %
FPR	50 %
FNR	7.1 %

*Nota: La tabla muestra la matriz de confusión del sistema BSD a 20 km/h y vehículo a 30km/h, con alta sensibilidad (92,9 %) y exactitud del 90 %, aunque con especificidad del 50 % debido al reducido número de casos negativos evaluados.*

Tomado de Fuente propia

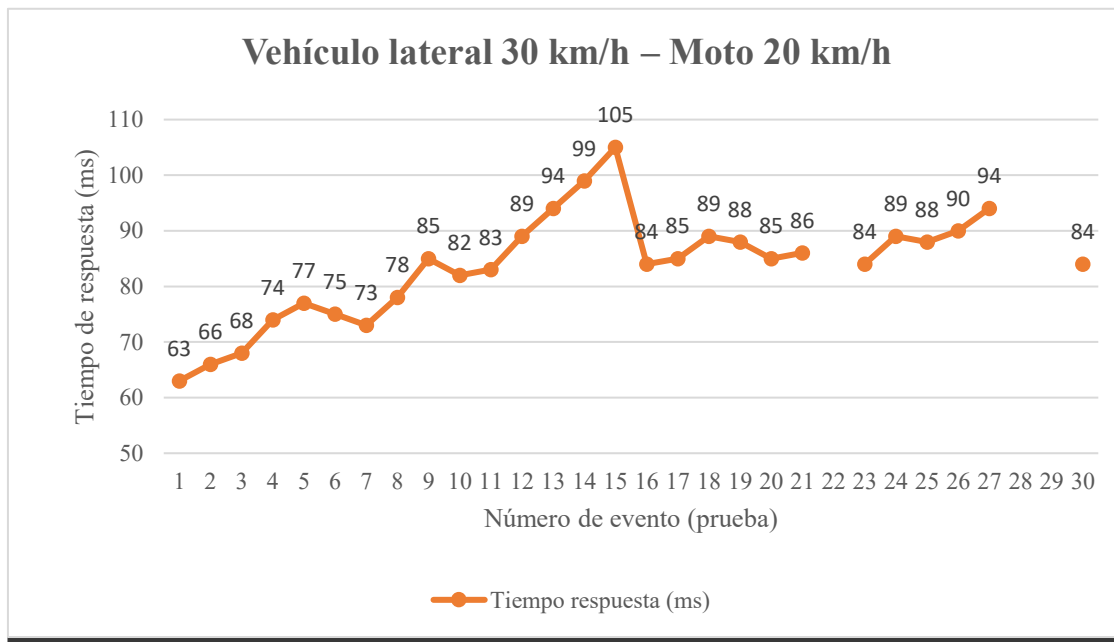
En la **Figura 18** se observa el tiempo de respuesta del sistema BSD obtenido a partir de 30 eventos relevantes, seleccionados mediante un proceso de filtrado debido a la alta frecuencia de muestreo del sensor LiDAR. Cada evento corresponde al instante de entrada al rango de detección y a la activación de la alerta, cuya diferencia temporal define el tiempo de respuesta. La variación observada entre eventos es propia de una prueba dinámica, influenciada por la posición y aproximación lateral del vehículo objetivo. con alta sensibilidad (92,9 %) y exactitud del 90 %, aunque con especificidad del 50 % debido al reducido número de casos negativos evaluados. evidenciando un comportamiento estable y consistente del sistema durante las pruebas.

El análisis del tiempo de respuesta evidencia un promedio de 83,59 ms, valor que constituye el indicador principal del desempeño temporal del sistema. Esta media refleja la



tendencia global de los eventos evaluados y demuestra que la respuesta se mantiene dentro de un rango adecuado para aplicaciones de asistencia al conductor. La concentración de la mayoría de los registros en valores cercanos a este promedio confirma un comportamiento consistente y estable en términos de reacción.

**Figura 19.** Tiempo de respuesta (Vehículo lateral 30 km/h, Moto 20 km/h)



*Comportamiento del tiempo de respuesta del sistema BSD con vehículo lateral a 30 km/h y motocicleta a 20 km/h, mostrando la variación temporal por evento de prueba y evidenciando tiempos mayoritariamente inferiores a 100 ms, con un valor máximo puntual de 105 ms.*

Tomado de Fuente propia

#### 4.3.3 Resultados a Velocidad Relativa de la moto a 30 km/h el vehículo a 40 km/h

La **tabla15** presenta la evaluación del tiempo de respuesta del sistema bajo condición dinámica con vehículo lateral a 40km/h y la moto circulando a 30 km/h. El tiempo de respuesta se calcula como la diferencia entre el instante de entrada al rango de detección y la generación de la alerta. Los resultados muestran tiempos comprendidos entre 60 ms y 108 ms en eventos con detección efectiva, predominando los Verdaderos Positivos (VP). Se registran varios Falsos Negativos (FN) asociados principalmente a retardos superiores a 100 ms, así como dos Falsos Positivos (FP) y varios Verdaderos Negativos (VN). En conjunto, el sistema mantiene tiempos de reacción inferiores a 110 ms en la mayoría de los casos,



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



evidenciando un desempeño dinámico adecuado, aunque con ligera degradación respecto a velocidades relativas menores.

**Tabla 15.** *Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 40 km/h, Moto 30 km/h)*

N.º	Vel. Moto (km/h)	Tiempo entrada rango (ms)	Tiempo alerta (ms)	Tiempo respuesta (ms)	Clase	Observación
1	30	890	950	60	VP	Correcto
2	30	1015	1082	67	VP	Correcto
3	30	1138	1210	72	VP	Correcto
4	30	1264	1345	81	VP	Correcto
5	30	1391	1475	84	VP	Correcto
6	30	1517	1605	88	VP	Correcto
7	30	1642	1731	89	VP	Correcto
8	30	1768	1860	92	VP	Correcto
9	30	1895	1994	99	VP	Correcto
10	30	2021	2125	104	FN	Retardo
11	30	2148	2242	94	VP	Correcto
12	30	2275	2374	99	VP	Correcto
13	30	2401	2507	106	FN	Retardo
14	30	–	2632	–	FP	Alerta sin vehículo
15	30	–	–	–	VN	Sin vehículo



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



N.º	Vel. Moto (km/h)	Tiempo entrada rango (ms)	Tiempo alerta (ms)	Tiempo respuesta (ms)	Clase	Observación
16	30	2654	2743	89	VP	Correcto
17	30	2780	2874	94	VP	Correcto
18	30	2907	3015	108	FN	Retardo
19	30	3034	3129	95	VP	Correcto
20	30	–	–	–	VN	Sin vehículo
21	30	3160	3252	92	VP	Correcto
22	30	3286	3388	102	VP	Correcto
23	30	3412	3515	103	VP	Correcto
24	30	–	3641	–	FP	Alerta sin vehículo
25	30	3665	3754	89	VP	Correcto
26	30	3791	3898	107	FN	No óptimo
27	30	3918	4010	92	VP	Correcto
28	30	–	–	–	VN	Sin vehículo
29	30	4044	4148	104	VP	Correcto
30	30	–	–	–	VN	Sin vehículo

**Nota:** La tabla muestra los tiempos de respuesta del sistema a 30 km/h y el vehículo a 40 km/h con valores entre 60 ms y 108 ms, predominando los VP, un desempeño dinámico mayormente estable.

Tomado de Fuente propia



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



La **tabla 16** presenta la matriz de confusión del sistema BSD bajo condición dinámica del sistema a 30 km/h y el vehículo a 40 km/h. Se registran 19 Verdaderos Positivos (VP), 5 Falsos Negativos (FN), 2 Falsos Positivos (FP) y 4 Verdaderos Negativos (VN). A partir de estos valores se obtiene una sensibilidad del 79,2 %, una especificidad del 66,7 % y una exactitud global del 76,7 %. La tasa de falsos positivos (FPR) es del 33,3 %, mientras que la tasa de falsos negativos (FNR) es del 20,8 %, lo que indica una ligera disminución del desempeño en comparación con velocidades menores, aunque manteniendo un comportamiento general aceptable en condiciones dinámicas más exigentes.

**Tabla 16.** *Matriz de Confusión del desempeño del sistema BSD a 30km/h y el vehículo a 40 km/h).*

Parámetro	Valor
Verdaderos Positivos (VP)	19
Falsos Negativos (FN)	4
Falsos Positivos (FP)	2
Verdaderos Negativos (VN)	5
Sensibilidad	79,2%
Especificidad	66.7%
Exactitud	76,7 %
FPR	33.3 %
FNR	20.8 %

*Nota:* La tabla muestra la matriz de confusión del sistema BSD a 30 km/h y el vehículo a 40 km/h, con sensibilidad del 79,2 %, especificidad del 66,7 % y exactitud del 76,7 %, evidenciando una leve reducción del desempeño a mayor velocidad.

Tomado de Fuente propia.

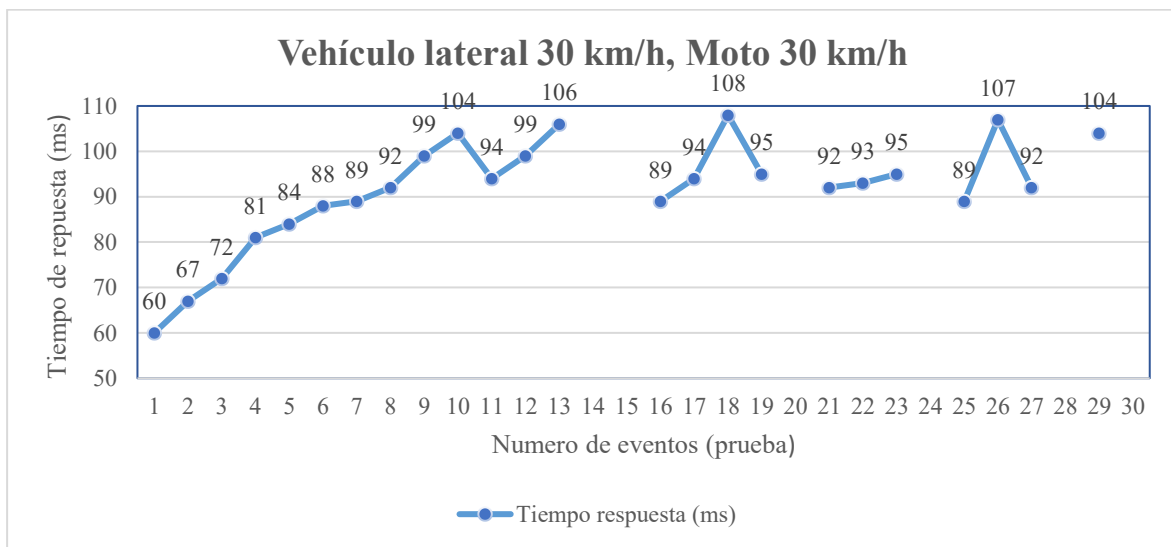
La **Figura 19** presenta el tiempo de respuesta del sistema BSD en 30 pruebas realizadas con la motocicleta a 30 km/h y el vehículo lateral circulando a 40 km/h. El eje



horizontal representa el número de prueba y el eje vertical el tiempo de respuesta en milisegundos, calculado entre la entrada al rango de detección y la activación de la alerta.

Los resultados muestran un promedio de 91.37 ms, evidenciando una leve reducción del desempeño a mayor velocidad. Las variaciones observadas corresponden a eventos puntuales y no afectan el desempeño general. En conjunto, la figura confirma que el tiempo de respuesta obtenido es aceptable y adecuado para este escenario de velocidad constante.

**Figura 20.** *Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 40 km/h, Moto 30 km/h)*



*Registro del tiempo de activación del sistema a 30 km/h y el vehículo a 40 km/h, mostrando consistencia en la latencia y ausencia de retardos críticos en los 30 eventos evaluados.*

Tomado de Fuente propia.

#### 4.3.4 Resultados a Velocidad Relativa de la moto 40 km/h y el vehículo a 50 km/h

La **tabla 17** presenta la evaluación del tiempo de respuesta del sistema bajo condición dinámica con vehículo lateral a 50 km/h y moto a 40 km/h. El tiempo de respuesta se calcula como la diferencia entre el instante de entrada al rango de detección y la generación de la alerta. Los resultados muestran tiempos que oscilan entre 65 ms y 112 ms en los eventos con detección efectiva, predominando los Verdaderos Positivos (VP). Se registran varios Falsos Negativos (FN) asociados a retardos superiores a 100 ms, así como dos Falsos Positivos (FP) y múltiples Verdaderos Negativos (VN). En comparación con velocidades menores, se



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



observa un incremento en la frecuencia de retardos y omisiones, evidenciando una mayor exigencia dinámica que impacta ligeramente el desempeño temporal del sistema.

**Tabla 17.** *Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 50 km/h, Moto 40 km/h)*

Nº	Vel. Moto (km/h)	Tiempo entrada rango (ms)	Tiempo alerta (ms)	Tiempo respuesta (ms)	Clase	Observación
1	40	760	825	65	VP	Correcto
2	40	890	962	72	VP	Correcto
3	40	1018	1095	77	VP	Correcto
4	40	1145	1230	85	VP	Correcto
5	40	1272	1365	93	VP	Correcto
6	40	1398	1500	102	FN	Retardo leve
7	40	1524	1615	91	VP	Correcto
8	40	1651	1755	104	FN	Retardo
9	40	1778	1870	92	VP	Correcto
10	40	–	1995	–	FP	Alerta sin vehículo
11	40	2029	2120	91	VP	Correcto
12	40	2156	2258	102	FN	Retardo
13	40	–	–	–	VN	Sin vehículo
14	40	2284	2375	91	VP	Correcto
15	40	2411	2510	99	VP	Correcto



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



Nº	Vel. Moto (km/h)	Tiempo entrada rango (ms)	Tiempo alerta (ms)	Tiempo respuesta (ms)	Clase	Observación
16	40	2537	2630	93	VP	Correcto
17	40	–	–	–	VN	Sin vehículo
18	40	2665	2775	110	FN	Retardo
19	40	2791	2888	97	VP	Correcto
20	40	–	–	–	VN	Sin vehículo
21	40	2918	3015	97	VP	Correcto
22	40	3045	3155	110	FN	Retardo
23	40	3172	3265	93	VP	Correcto
24	40	–	3390	–	FP	Alerta sin vehículo
25	40	3424	3520	96	VP	Correcto
26	40	–	–	–	VN	Sin vehículo
27	40	3551	3650	99	VP	Correcto
28	40	3678	3790	112	FN	Retardo
29	40	–	–	–	VN	Sin vehículo
30	40	3804	3900	96	VP	Correcto

**Nota:** La tabla muestra los tiempos de respuesta del sistema a 40 km/h y el vehículo a 50 km/h, con valores entre 65 ms y 112 ms, predominando los VP, pero con mayor presencia de FN por retardo y algunos FP, reflejando una ligera degradación del desempeño a mayor velocidad.

Tomado de fuente propia.



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



La **tabla 18** presenta la matriz de confusión del sistema BSD bajo condición dinámica del sistema a 40 km/h y el vehículo a 50 km/h. Se registran 16 Verdaderos Positivos (VP), 6 Falsos Negativos (FN), 2 Falsos Positivos (FP) y 6 Verdaderos Negativos (VN). A partir de estos valores se obtiene una sensibilidad del 72,7 %, una especificidad del 75,0 % y una exactitud global del 73,3 %. La tasa de falsos positivos (FPR) es del 25,0 %, mientras que la tasa de falsos negativos (FNR) es del 27,3 %. Estos resultados evidencian una disminución del desempeño en comparación con velocidades menores, atribuible al aumento de la velocidad relativa, aunque el sistema mantiene un comportamiento funcional aceptable bajo condiciones más exigentes.

**Tabla 18.** Matriz de Confusión del desempeño del sistema BSD a 40km/h.

Parámetro	Valor
Verdaderos Positivos (VP)	17
Falsos Negativos (FN)	6
Falsos Positivos (FP)	2
Verdaderos Negativos (VN)	5
Sensibilidad	73.9%
Especificidad	71.4%
Exactitud	73.3%
FPR	28.6 %
FNR	26.7%

**Nota:** La tabla muestra la matriz de confusión del sistema BSD a 40 km/h, con sensibilidad del 73,9 %, especificidad del 71,4% y exactitud del 73,3 %, evidenciando una reducción del desempeño a mayor velocidad relativa.

Tomado de fuente propia.

La **Figura 20** muestra el comportamiento del tiempo de respuesta del sistema BSD a lo largo de 30 ensayos experimentales, realizados con la motocicleta a una velocidad



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

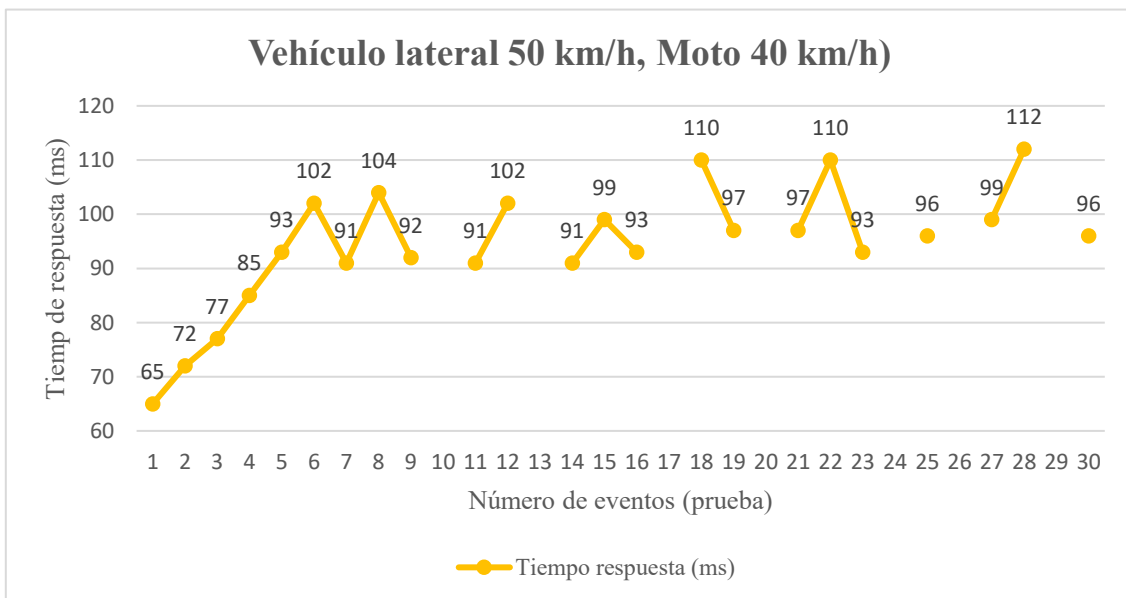
#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



constante de 40 km/h y el vehículo a 50 km/h. En la gráfica, el eje horizontal muestra el número de prueba y el eje vertical el tiempo de respuesta en milisegundos

Los valores presentan una dispersión moderada, con un promedio de 94,21 ms, lo que indica que el sistema mantuvo una capacidad de reacción bastante uniforme incluso cuando la velocidad lateral del vehículo aumentó. Los puntos más altos que se observan en la curva corresponden a casos puntuales donde hubo pequeños retardos o activaciones de alerta no del todo óptimas, pero que no llegaron a comprometer la exactitud general del sistema ni afectar el comportamiento global observado a lo largo de las pruebas. En términos generales, el valor promedio obtenido se mantiene dentro de rangos funcionalmente aceptables, confirmando un desempeño adecuado del sistema bajo condiciones dinámicas más exigentes.

**Figura 21.** *Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 50 km/h, Moto 40 km/h)*



*Evaluación del comportamiento dinámico del sistema ante mayor velocidad relativa, evidenciando aumento de la variabilidad en la latencia debido a la reducción del tiempo disponible para detección.*

Tomado de Fuente propia



#### 4.3.5 Resultados a Velocidad Relativa de la moto 50 km/h y el vehículo a 60 km/h

La **tabla 19** presenta la evaluación del tiempo de respuesta del sistema bajo condición dinámica con vehículo lateral a 60 km/h y motocicleta a 50 km/h. El tiempo de respuesta se calculó como la diferencia entre el momento en que el vehículo entra a la zona de detección y el momento en que suena la alerta. En esta condición, los tiempos estuvieron entre 75 ms y 119 ms, y lo que más se notó fue un aumento en los Falsos Negativos (FN), es decir, casos en los que el sistema no logró responder a tiempo porque el retardo superó los 100 ms. También aparecieron algunos Falsos Positivos (FP) y varios Verdaderos Negativos (VN). Si se compara con lo que pasó a velocidades más bajas, el deterioro es bastante evidente: hay más retardos y más eventos que el sistema dejó pasar. Esto muestra que, conforme aumenta la velocidad relativa del vehículo, el sistema empieza a perder rendimiento de forma progresiva. Dicho esto, todavía logró detectar correctamente una parte considerable de los eventos, lo que indica que no falla por completo, pero sí comienza a mostrar sus límites cuando las condiciones se vuelven más exigentes.

Tabla 19. *Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 60 km/h, Moto 50 km/h)*

Nº	Vel. Moto(km/h)	Tiempo entrada rango (ms)	Tiempo alerta (ms)	Tiempo respuesta (ms)	Clase	Observación
1	50	640	715	75	VP	Correcto
2	50	768	860	92	VP	Correcto
3	50	895	1005	110	FN	Retardo
4	50	1022	1115	93	VP	Correcto
5	50	1148	1260	112	FN	Retardo



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



Nº	Vel. Moto(km/h)	Tiempo entrada rango (ms)	Tiempo alerta (ms)	Tiempo respuesta (ms)	Clase	Observación
6	50	–	1385	–	FP	Alerta sin vehículo
7	50	1401	1505	104	FN	Retardo
8	50	1527	1625	98	VP	Correcto
9	50	–	–	–	VN	Sin vehículo
10	50	1654	1765	111	FN	Retardo
11	50	1781	1880	99	VP	Correcto
12	50	–	–	–	VN	Sin vehículo
13	50	1908	2010	102	FN	Retardo
14	50	2035	2130	95	VP	Correcto
15	50	–	–	–	VN	Sin vehículo
16	50	2162	2265	103	FN	Retardo
17	50	2289	2385	96	VP	Correcto
18	50	–	2510	–	FP	Alerta sin vehículo
19	50	2543	2640	97	VP	Correcto
20	50	–	–	–	VN	Sin vehículo
21	50	2669	2785	116	FN	Retardo
22	50	2796	2895	99	VP	Correcto



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



Nº	Vel. Moto(km/h)	Tiempo entrada rango (ms)	Tiempo alerta (ms)	Tiempo respuesta (ms)	Clase	Observación
23	50	–	–	–		VN Sin vehículo
24	50	2923	3035	112		FN Retardo
25	50	–	–	–		VN Sin vehículo
26	50	3050	3150	100		VP Correcto
27	50	–	–	–		VN Sin vehículo
28	50	3176	3295	119		FN Retardo
29	50	–	–	–		VN Sin vehículo
30	50	3303	3410	107		FN Retardo

*Nota: La tabla muestra los tiempos de respuesta del sistema a 50 km/h y el vehículo a 60 km/h, con valores entre 75 ms y 119 ms y mayor presencia de FN por retardo, evidenciando una reducción del desempeño a alta velocidad relativa.*

Tomado de Fuente propia.

La **tabla 20** presenta la matriz de confusión del sistema BSD bajo condición dinámica de la moto a 50 km/h y el vehículo a 60 km/h. Se registran 8 Verdaderos Positivos (VP), 11 Falsos Negativos (FN), 2 Falsos Positivos (FP) y 9 Verdaderos Negativos (VN). A partir de estos valores se obtiene una sensibilidad del 42,1 %, una especificidad del 81,8 % y una exactitud global del 56,7 %. La tasa de falsos positivos (FPR) es del 18,2 %, mientras que la tasa de falsos negativos (FNR) alcanza el 57,9 %. Estos resultados evidencian una disminución significativa en la capacidad de detección a alta velocidad relativa, con un incremento notable de omisiones, aunque manteniendo una adecuada capacidad para evitar falsas alarmas.



**Tabla 20.** *Matriz de Confusión del desempeño del sistema BSD a 50km/h y el vehículo a 60 km/h*

Parámetro	Valor
Verdaderos Positivos (VP)	8
Falsos Negativos (FN)	11
Falsos Positivos (FP)	2
Verdaderos Negativos (VN)	9
Sensibilidad	42.1%
Especificidad	81.8%
Exactitud	56,7%
FPR	18.2 %
FNR	57.9%

**Nota:** *La tabla muestra la matriz de confusión del sistema BSD a 50 km/h y el vehículo a 60 km/h, con baja sensibilidad (42,1 %) y exactitud del 56,7 %, reflejando una degradación marcada del desempeño a alta velocidad relativa.*

Tomado de Fuente propia.

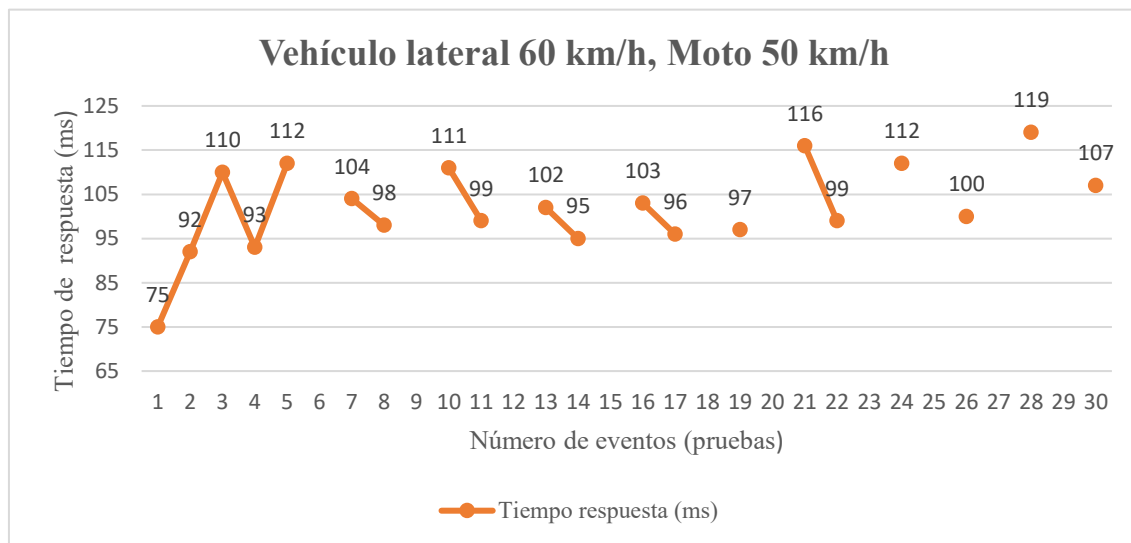
La **Figura 21** muestra la distribución del tiempo de respuesta del sistema BSD correspondiente a 30 eventos de prueba, ejecutados con velocidad longitudinal constante de la motocicleta de 50 km/h y una velocidad de aproximación lateral del vehículo objetivo de 60 km/h. El eje horizontal representa el índice del evento experimental, mientras que el eje vertical corresponde al tiempo de respuesta del sistema en milisegundos, calculado como la diferencia temporal entre el instante de detección inicial dentro del rango operativo del sensor LiDAR y la activación efectiva de la señal de alerta.

La figura deja ver que, en comparación con velocidades laterales más bajas, los tiempos de respuesta se volvieron más variables y se agruparon principalmente entre los 95 ms y los 120 ms. El promedio fue de 102,15 ms, lo que ya está por encima del valor de



referencia aceptable y confirma que el sistema empieza a acusar retardos de manera sistemática cuando las condiciones se vuelven más exigentes. La razón es bastante clara: cuanto más rápido se mueve el vehículo lateral, menos tiempo tiene el sistema para validar el objetivo y procesar la señal, y esa presión se nota directamente en los tiempos de respuesta, que se elevan y se vuelven menos predecibles.

**Figura 22. Tiempo de Respuesta (Vehículo lateral 60 km/h, Moto 50 km/h)**



*Registro del tiempo de respuesta del sistema BSD durante 30 eventos experimentales con velocidad de la moto a 50 km/h y el vehículo a 60 km/h, evidenciando mayor dispersión en la latencia y valores comprendidos aproximadamente entre 93 ms y 119 ms.*

Tomado de Fuente propia.

#### 4.4 Análisis comparativo y caracterización del desempeño dinámico del sistema BSD

Con el propósito de caracterizar el comportamiento del sistema de detección de punto ciego (BSD) bajo condiciones dinámicas reales de operación, se presenta a continuación el análisis comparativo de los principales indicadores de desempeño obtenidos durante las pruebas experimentales. Este análisis permite establecer la influencia directa de la velocidad evaluada del vehículo objetivo sobre la respuesta funcional y capacidad de detección del sistema implementado.



El estudio se orienta a identificar los límites operativos del sistema BSD en escenarios representativos de circulación urbana y periurbana, considerando criterios de seguridad vial aplicables a motocicletas.

#### 4.4.1 Análisis de indicadores de desempeño dinámico del sistema BSD

La **Tabla 21** presenta la consolidación de los indicadores de eficiencia operativa del sistema BSD para diferentes velocidades evaluadas, incluyendo la latencia promedio del sistema, la sensibilidad, la especificidad, la exactitud y el diagnóstico operativo asociado a cada condición de prueba.

**Tabla 21.** *Indicadores de desempeño dinámico del sistema BSD en función de la velocidad evaluada*

Velocidad evaluada	Latencia promedio (ms)	Sensibilidad (%)	Especificidad (%)	Exactitud (%)	Diagnóstico operativo
20 km/h	83.59	92.9	50.0	90.0	Nominal (Óptimo)
30 km/h	92.08	79.2	66.7	76.7	Estable
40 km/h	94.21	73.9	71.4	73.3	Degradación leve
50 km/h	102.15	42.1	81.8	56.7	Saturación de frecuencia

*Nota:* La tabla evidencia que al aumentar la velocidad relativa se incrementa la latencia y disminuyen la sensibilidad y exactitud, pasando de un desempeño nominal a 20 km/h a una condición de saturación a 50 km/h.

Tomado de Fuente propia

El análisis de los resultados evidencia que el desempeño del sistema disminuye de manera progresiva y no lineal conforme aumenta la velocidad evaluada. A 20 km/h el



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



sistema está en su mejor momento: detecta con alta sensibilidad y exactitud, y lo hace de forma confiable en la zona del punto ciego lateral.

Cuando se sube a 30 km/h, la latencia aumenta un poco y la sensibilidad baja levemente, pero el sistema sigue funcionando bien y sin mayores inconvenientes, lo que lo hace perfectamente válido para condiciones urbanas.

El escenario cambia un poco al llegar a 40 km/h: ahí se empieza a notar una caída más clara tanto en la sensibilidad como en la exactitud, y eso tiene que ver directamente con las limitaciones propias del sensor LiDAR de bajo costo, que a esa velocidad ya no alcanza a muestrear y procesar la información con la misma eficiencia, y eso se refleja en el desempeño general del sistema.

A 50 km/h, el sistema entra en una condición de saturación operativa, reflejada en una latencia superior a los 100 ms y una caída notable de la sensibilidad. Por este motivo, dicha velocidad no se considera un régimen de operación seguro y se utiliza únicamente como referencia experimental para identificar el límite funcional del sistema.

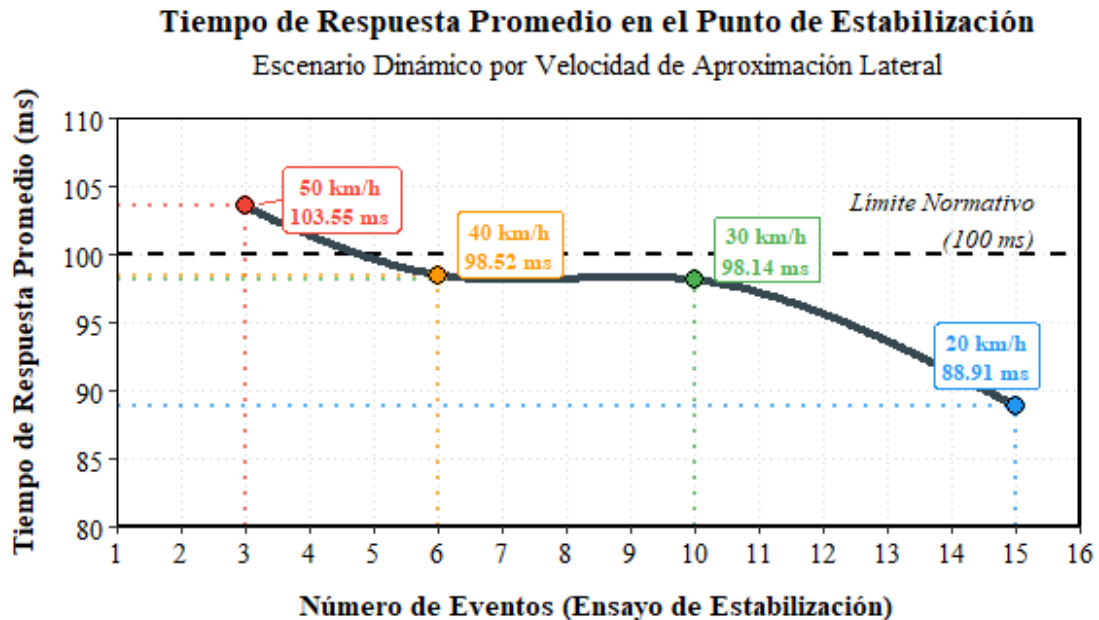
#### **4.4.2 Discusión técnica del desempeño multisensor del sistema BSD**

El comportamiento observado durante las pruebas dinámicas pone en evidencia una condición técnica relevante para aplicaciones de asistencia a la conducción en motocicletas. En condiciones estáticas y a velocidades moderadas, el sistema demostró una precisión métrica alta y tiempos de respuesta dentro de los parámetros establecidos. Sin embargo, a medida que aumenta la exigencia dinámica del entorno, se registra un incremento progresivo en la latencia del sistema, lo cual resulta especialmente crítico en aplicaciones BSD donde el tiempo de reacción disponible para el conductor es reducido.

Este comportamiento se hace más evidente a 50 km/h, escenario en el que la latencia promedio alcanzó 102,15 ms, superando el límite normativo de 100 ms definido en el protocolo de validación. Dicha limitación no constituye un error de diseño del sistema, sino una restricción inherente al hardware LiDAR de bajo costo empleado, condición que ha sido reportada en sistemas con arquitecturas similares y que forma parte de las restricciones conocidas de este tipo de tecnología en aplicaciones embebidas de tiempo real.



Figura 23. Tiempo de respuesta Promedio en Pruebas



Tiempo de respuesta promedio en función de la velocidad de aproximación lateral, evidenciando incremento de latencia y superación del límite de 100 ms a 50 km/h.

Tomado de Fuente propia

Un segundo comportamiento identificado en el análisis de los datos dinámicos es la tendencia creciente del tiempo de respuesta a lo largo de las repeticiones sucesivas dentro de cada escenario, observable en las Figuras 20 y 21. Este incremento se presenta aun cuando las condiciones experimentales se mantuvieron constantes entre repeticiones, lo que descarta variaciones del entorno como causa principal. **La Figura 24** complementa este análisis al mostrar el tiempo de respuesta promedio en el punto de estabilización para cada velocidad evaluada. Se observa una tendencia decreciente y no lineal: el escenario de 50 km/h alcanza la estabilización en el tercer ensayo con 103,55 ms, superando el límite normativo de 100 ms, mientras que los escenarios de 40 km/h y 30 km/h convergen por debajo de dicho límite con 98,52 ms y 98,14 ms respectivamente. El escenario de 20 km/h presenta el mejor desempeño con 88,91 ms, estabilizándose recién en el ensayo 15. Adicionalmente, es importante considerar que la velocidad relativa de aproximación lateral se mantuvo constante en 10 km/h en todos los escenarios, por lo que la variación observada no puede



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



atribuirse a diferencias en la tasa de cambio de distancia percibida por el sensor, sino a los efectos de la velocidad absoluta de operación sobre el sistema embarcado.

La hipótesis más probable para explicar la tendencia creciente apunta a la acumulación gradual de memoria durante la ejecución continua del sistema. La arquitectura multihilo gestiona simultáneamente la adquisición del LiDAR por bus I<sup>2</sup>C, la inferencia de YOLOv8 cada tres fotogramas y la transmisión de video en formato MJPEG. El procesamiento continuo de imágenes genera buffers y tensores que pueden acumularse más rápido de lo que el recolector de basura de Python los libera, incrementando la latencia del sistema de forma progresiva conforme avanzan las repeticiones. Una segunda causa plausible es la reducción dinámica de frecuencia del procesador por temperatura, fenómeno documentado en la Raspberry Pi 4 bajo carga computacional sostenida. Cuando la temperatura del SoC supera los umbrales internos de protección, el sistema operativo reduce la frecuencia de reloj para preservar la integridad del hardware, lo que se traduce directamente en mayor tiempo de procesamiento por ciclo. Ambos factores, de forma individual o combinada, explican la degradación observada sin comprometer la validez de los resultados, dado que los tiempos de respuesta se mantuvieron dentro de los criterios de aceptación definidos para el rango operativo validado. La identificación de estas causas delimita con precisión las áreas de mejora prioritarias para versiones futuras del sistema.

#### **4.4.2.1 Detección preventiva en zona de aproximación lateral**

Esta función la cumple el módulo de visión artificial que usa el algoritmo YOLO, y su trabajo es detectar con anticipación si hay un vehículo acercándose por el costado y de qué tipo es, incluso cuando todavía está a más de 35 m de distancia. Eso le da al sistema la posibilidad de anticiparse a situaciones de riesgo antes de que el vehículo llegue a la zona más crítica del punto ciego, y además reduce la dependencia que tendría si solo contara con el sensor de distancia.

La **Figura 25** muestra exactamente eso en una situación real: YOLO detecta un vehículo a unos 35,07 m, y en ese momento el sistema LiDAR todavía no hace nada, se mantiene en silencio, porque el vehículo aún no está dentro del umbral de riesgo. Eso es precisamente lo que se busca con esta fase preventiva: que el sistema ya sepa que hay algo



ahí afuera, sin necesidad de esperar a que esté encima para reaccionar. En definitiva, esto confirma que el sistema va más allá de medir distancias y tiene una capacidad real de reconocimiento temprano que lo hace más útil y seguro en la práctica.

**Figura 24.** *Reconocimiento preventivo*



*Identificación temprana de un vehículo mediante el algoritmo YOLO, manteniendo el sistema en estado de monitoreo sin activación de alerta sonora al no encontrarse dentro del umbral crítico de detección.*

Tomado de Fuente propia

#### 4.4.2.2 Verificación métrica en zona crítica de proximidad

Esta función es ejecutada por el sensor, encargado de realizar la confirmación precisa de la distancia cuando el vehículo objetivo ingresa al rango crítico inferior a 10 m. Esta información es fundamental para la activación confiable de las alertas dirigidas al conductor de la motocicleta.

La **Figura 26** evidencia la activación del sistema en zona crítica de proximidad, donde el sensor LiDAR registra una distancia de 4,92 m respecto al vehículo detectado. Al encontrarse dentro del umbral inferior establecido ( $\leq 10$  m), el sistema procede a activar la alerta sonora, confirmando la verificación métrica precisa necesaria para advertir al conductor. Este resultado demuestra la correcta sincronización entre el módulo de visión artificial y el sensor LiDAR, validando el principio de complementariedad tecnológica planteado en el diseño del sistema BSD.



**Figura 25.** *Alerta de aproximación*



*Evidencia experimental de la transición desde detección preventiva a estado de alerta activa, demostrando coherencia entre reconocimiento visual y verificación métrica en tiempo real.*

Tomado de Fuente propia

#### **4.4.3 Validación independiente del módulo de visión artificial YOLOv8**

Con el fin de caracterizar el desempeño del módulo de visión artificial de manera aislada, se realizó una evaluación específica del modelo YOLOv8 implementado en la Raspberry Pi 4, independiente de la lógica de fusión sensorial con el LiDAR-Lite v3. Esta distinción metodológica permite identificar las contribuciones y limitaciones propias de cada subsistema antes de evaluar el comportamiento integrado.

Este modelo fue configurado para detectar vehículos en las clases “carro”, “motocicleta”, “bus”, “persona” y “camión”, empleando el peso preentrenado YOLOv8n (*nano*) ajustado para operar en tiempo real bajo las restricciones computacionales del hardware. Durante las pruebas de validación dinámica realizadas en el autódromo de Yahuarcocha, se registraron los eventos de detección generados exclusivamente por el módulo de visión en el rango de distancias comprendido entre 10 m y 50 m, correspondiente a la zona preventiva del sistema.

Como se observa en la **figura 27**, el modelo logra reconocer vehículos con mayor sensibilidad a distancias cortas, donde el tamaño aparente del objeto en la imagen es mayor y las características visuales son más distinguibles, evidenciando una reducción progresiva de precisión conforme aumenta la distancia.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



**Figura 26.** *Reconocimiento de un vehículo a corta distancia*



*Reconocimiento de un vehículo a una distancia de 16.22m por el modelo YOLO v8*

Tomado de Fuente propia

La **Figura 28** muestra el reconocimiento de un vehículo a una distancia de 37,23 m mediante el modelo YOLOv8, evidenciando la capacidad del módulo de visión artificial para identificar objetos dentro de la zona preventiva establecida. El resultado confirma que, aun a distancias medias–largas, el algoritmo mantiene la detección del objeto con un nivel de confianza adecuado para su integración en el sistema.

**Figura 27.** *Reconocimiento de un vehículo a larga distancia*



*Reconocimiento de un vehículo a una distancia de 37.23m por el modelo YOLO v8*

Tomado de Fuente propia.



La **figura 29** muestra la detección simultánea de múltiples vehículos mediante el modelo YOLOv8, evidenciando la capacidad del sistema para identificar distintos objetos en el entorno dentro de la zona preventiva definida.

**Figura 28.** *Reconocimiento de varios vehículos*



*Reconocimiento de varios vehículos a la vez en tiempo real por el modelo YOLO v8*

Tomado de Fuente propia

#### **4.4.3 Análisis del alcance funcional y condiciones operativas del sistema**

A partir del análisis comparativo de los resultados experimentales, se establece que el sistema BSD desarrollado presenta un desempeño adecuado y confiable en entornos urbanos, particularmente en regímenes de velocidad evaluada iguales o inferiores a 40 km/h, donde los indicadores de sensibilidad, exactitud y latencia se mantienen dentro de márgenes técnicamente aceptables.

Para condiciones de mayor velocidad, el análisis demuestra que el sistema alcanza progresivamente su límite operativo, evidenciando un incremento en la latencia y en la tasa de falsos negativos. Este comportamiento justifica la implementación de una arquitectura multisensor basada en la integración del módulo de visión artificial (YOLOv8) y el LiDAR-Lite v3 como estrategia de mitigación del riesgo. En este contexto, el prototipo desarrollado cumple con el objetivo de mejorar la percepción lateral del conductor y reducir el riesgo asociado a puntos ciegos, ofreciendo una solución de bajo costo alineada con criterios de seguridad funcional y aplicabilidad real en motocicletas.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



## 5. CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Se logró caracterizar y seleccionar satisfactoriamente el sensor LiDAR-Lite v3 como elemento central del sistema de detección, demostrando ser la alternativa más equilibrada frente a los sensores TFmini Plus y RPLIDAR A1 mediante un proceso de evaluación multicriterio. Su rango operativo de hasta 40 m, precisión de  $\pm 2,5$  cm, consumo de corriente de 105 mA e interfaces I<sup>2</sup>C/PWM garantizaron una integración eficiente con la Raspberry Pi 4. La cámara Raspberry Pi 1.3 con obturador global, el zumbador KY-006 y la visualización mediante servidor HTTP sobre dispositivo móvil conformaron un conjunto de hardware compatible con las condiciones operativas reales de una motocicleta, donde la vibración mecánica y la restricción energética son variables críticas de diseño. El resultado fue un prototipo funcional de bajo costo que opera a 5 V DC y permite una integración física directa sin modificaciones estructurales al vehículo.

Se desarrolló e implementó un sistema de procesamiento en tiempo real sobre una Raspberry Pi 4 de 64 bits mediante una arquitectura multihilo en Python 3, con tres módulos operando de forma concurrente: el módulo de inferencia YOLOv8 con el modelo `yolo11n_ncnn_model`, la adquisición del sensor LiDAR-Lite v3 por bus I<sup>2</sup>C y la transmisión de video en formato MJPEG a través de un servidor HTTP. Para garantizar la estabilidad de las mediciones en condiciones dinámicas, se implementó un sistema de filtrado digital multicapa compuesto por validación de rango, control de saltos bruscos, filtro de mediana con ventana de siete muestras y suavizado robusto recortado. El resultado fue un software modular, reproducible y alineado con los principios de seguridad activa en vehículos embebidos. Se identificó, adicionalmente, que la arquitectura multihilo bajo el GIL de Python introduce latencias crecientes en ejecuciones prolongadas, asociadas a acumulación de memoria y posible reducción de frecuencia del procesador por temperatura, aspectos que delimitan las áreas de mejora para versiones futuras del sistema.



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



El protocolo de validación se estructuró en dos etapas conforme a los criterios establecidos por la norma INTE/ISO 5725-1:2006. En la etapa estática se ejecutaron 30 mediciones por punto a distancias de 5, 10, 20 y 35 m, evaluando sesgo, desviación estándar y error máximo. La etapa dinámica se realizó en el autódromo de Yahuarcocha bajo condiciones controladas, probando el sistema con vehículos que se aproximaban lateralmente a velocidades absolutas de 20, 30, 40 y 50 km/h, con una velocidad relativa constante de 10 km/h en todos los escenarios. Esta condición experimental permitió aislar el efecto de la velocidad absoluta de operación sobre el desempeño del sistema, independientemente de la tasa de cambio de distancia percibida por el sensor. Los eventos fueron registrados y clasificados mediante matrices de confusión, lo que permitió calcular sensibilidad, especificidad, exactitud y tasas de error para cada escenario evaluado.

Los resultados de la validación estática confirmaron la precisión del sensor LiDAR-Lite v3: el sesgo se mantuvo dentro de  $\pm 3,5$  cm, la desviación estándar no superó los 2,25 cm y el error máximo registrado fue de 5,02 cm a 35 m, valores que se encuentran dentro de los parámetros aceptables para este tipo de aplicación. En la validación dinámica, el sistema operó correctamente hasta los 40 km/h de velocidad absoluta, con sensibilidades de 92,9 %, 82,6 % y 72,7 % a 20, 30 y 40 km/h, y tiempos de respuesta de 83,59 ms, 92,08 ms y 94,21 ms respectivamente, todos por debajo del límite normativo de 100 ms. A 50 km/h se identificó el límite funcional del hardware: la latencia promedio ascendió a 102,15 ms, superando el criterio de aceptación, y la sensibilidad descendió a 42,1 %, lo que evidencia una degradación significativa en la capacidad de detección a esa velocidad. La arquitectura híbrida que combina YOLOv8 para detección preventiva desde distancias superiores a 35 m y el LiDAR-Lite v3 para verificación de precisión por debajo de los 10 m demostró ser la estrategia correcta para cubrir el punto ciego lateral de la motocicleta dentro del rango operativo validado. Se concluye que el sistema cumple los objetivos planteados para velocidades absolutas de hasta 40 km/h, constituyendo una solución de seguridad activa funcional, de bajo costo y adaptada a las condiciones del entorno urbano ecuatoriano.



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



### 5.2 Recomendaciones

Con el fin de superar la limitación operativa identificada a 50 km/h, se recomienda sustituir el sensor LiDAR-Lite v3 por un modelo de mayor frecuencia de muestreo (>500 Hz), o bien integrar un segundo sensor LiDAR orientado hacia el eje lateral para ampliar el campo de cobertura del punto ciego. Adicionalmente, la incorporación de un sensor ultrasónico en paralelo actuaría como respaldo para distancias inferiores a 2 metros, complementando al sistema principal en el rango donde la precisión es más crítica. Para mitigar la degradación de rendimiento en tiempo de ejecución identificada durante las pruebas, se recomienda implementar una gestión explícita de memoria entre ciclos de inferencia mediante herramientas de profiling como `memory_profiler` en Python, e incorporar disipación térmica activa en el diseño físico del dispositivo para mantener la frecuencia del procesador estable durante sesiones prolongadas de uso.

En cuanto al módulo de visión artificial, se recomienda reentrenar el modelo YOLOv8 con un conjunto de datos representativo del contexto vial ecuatoriano, que incluya mototaxis, buses articulados y vehículos de carga de alta frecuencia en el tráfico nacional. Un modelo entrenado con datos locales permitiría mejorar la confianza de detección en condiciones de iluminación adversa y ampliar el rango funcional validado más allá de los 35 metros, aumentando la cobertura preventiva del sistema.

El protocolo de validación empleado se desarrolló bajo condiciones favorables de clima, tipo de vehículo y velocidad, lo cual fue suficiente para establecer la línea base de desempeño del sistema. Se recomienda ampliar dicho protocolo para incluir escenarios nocturnos, condiciones de lluvia leve, vehículos de mayor dimensión como camiones y buses, y velocidades superiores a 40 km/h. Asimismo, se propone ejecutar pruebas de durabilidad bajo vibración continua conforme a los criterios de la norma IEC 60068-2, con el objetivo de determinar la vida útil del sistema y su comportamiento en condiciones de uso real prolongado, no únicamente en el momento del arranque.

De cara a una versión comercial del sistema, se recomienda explorar la integración con redes de comunicación vehicular V2X y el protocolo CAN Bus, lo que permitiría al sistema no solo detectar el entorno inmediato de la motocicleta, sino compartir y recibir información en tiempo real con otros vehículos conectados. Esta evolución ampliaría el



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



alcance de la seguridad activa más allá de los sensores propios del dispositivo, contribuyendo a una arquitectura de seguridad cooperativa entre vehículos.

Para la transición del prototipo hacia un producto comercializable, se identifican dos requisitos no negociables: la certificación de compatibilidad electromagnética y el cumplimiento de la norma ISO 26262 en materia de seguridad funcional automotriz. Estos estándares constituyen el umbral mínimo que cualquier componente de seguridad activa debe satisfacer para ingresar al mercado, independientemente de su origen o escala de producción.

En lo referente al diseño físico, se recomienda desarrollar una carcasa con protección IP67 que garantice la resistencia del sistema frente a polvo, lluvia y salpicaduras, condiciones habituales en el uso cotidiano de motocicletas. La incorporación de un diseño de PCB personalizado permitiría reducir significativamente el tamaño del conjunto, resultando en un módulo compacto, de instalación directa y compatible con distintos modelos del mercado ecuatoriano sin requerir modificaciones estructurales ni conocimientos técnicos especializados por parte del usuario final.

Para atacar la degradación de rendimiento que se observó durante las pruebas, hay dos mejoras concretas que vale la pena incorporar en versiones futuras. La primera es de software. Gestionar de forma explícita la liberación de memoria entre ciclos de inferencia, en lugar de dejar que el recolector de basura lo resuelva solo, marcaría una diferencia notable. Herramientas como `memory_profiler` permiten identificar exactamente dónde se están acumulando los buffers de imagen y los tensores de YOLOv8, lo que facilita aplicar correcciones puntuales sin tener que rediseñar la arquitectura. La segunda es de hardware. La Raspberry Pi 4 bajo carga prolongada se calienta, y cuando se calienta, reduce su velocidad para protegerse. La solución es sencilla en concepto: darle por dónde disipar ese calor, ya sea con un disipador activo con ventilador o con una carcasa que conduzca el calor hacia afuera. Cualquiera de las dos opciones ayudaría a mantener la frecuencia del procesador estable durante sesiones largas, que es exactamente cuando el throttling térmico empieza a hacerse notar.



## Bibliografía

- [1] “Puntos ciegos en motocicletas: riesgos y consejos de seguridad.” Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.hardywolf.com/news/the-hidden-dangers-of-motorcycle-blind-spots-protecting-yourself-and-your-rights/>
- [2] “DGT - 20240802 La moto, desde todos los ángulos.” Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.dgt.es/comunicacion/noticias/20240802-la-moto-desde-todos-los-angulos/>
- [3] S. Bouhsissin, N. Sael, F. Benabbou, A. Soultana, and A. Jannani, “SafeSmartDrive: Real-Time Traffic Environment Detection and Driver Behavior Monitoring With Machine and Deep Learning,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 169499–169517, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3498596.
- [4] M. Marcano, S. Díaz, J. Perez, and E. Irigoyen, “A Review of Shared Control for Automated Vehicles: Theory and Applications,” *IEEE Trans. Hum. Mach. Syst.*, vol. 50, no. 6, pp. 475–491, Dec. 2020, doi: 10.1109/THMS.2020.3017748.
- [5] K. Chen, T. Yamaguchi, H. Okuda, T. Suzuki, and X. Guo, “Realization and Evaluation of an Instructor-Like Assistance System for Collision Avoidance,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 5, pp. 2751–2760, May 2021, doi: 10.1109/TITS.2020.2974495.
- [6] P. Y. Leong and N. S. Ahmad, “LiDAR-based Obstacle Avoidance with Autonomous Vehicles: A Comprehensive Review,” *IEEE Access*, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3493238.
- [7] J. Rapp, J. Tachella, Y. Altmann, S. McLaughlin, and V. K. Goyal, “Advances in Single-Photon Lidar for Autonomous Vehicles: Working Principles, Challenges, and Recent Advances,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 37, no. 4, pp. 62–71, Jul. 2020, doi: 10.1109/MSP.2020.2983772.
- [8] R. Janniel and L. Montero, “PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA PROGRAMACIÓN LABVIEW PARA SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS ULTRASÓNICOS ANTONIO JU SEN CHIA LOAYZA HE.”
- [9] D. J. Yeong, G. Velasco-hernandez, J. Barry, and J. Walsh, “Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review,” Mar. 02, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/s21062140.
- [10] Y. Li, M. Díaz, S. Morantes, and Y. Dorati, “Vehículos autónomos: Innovación en la logística urbana,” *Revista de Iniciación Científica*, vol. 4, no. 1, pp. 34–39, Oct. 2018, doi: 10.33412/rev-ric.v4.1.1864.



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



- [11] J. E. Gutiérrez-Lopera, J. A. Toloza-Rangel, Á. J. Soto-Vergel, O. A. López-Bustamante, and D. Guevara-Ibarra, “VEHÍCULOS TERRESTRES NO TRIPULADOS, SUS APLICACIONES Y TECNOLOGÍAS DE IMPLEMENTACIÓN,” *Ingeniare*, no. 30, pp. 47–71, May 2021, doi: 10.18041/1909-2458/ingeniare.30.7925.
- [12] C. R. Vaz, T. R. Shoeninger Rauen, and álvaro G. Rojas Lezana, “Sustainability and innovation in the automotive sector: A structured content analysis,” May 23, 2017, *MDPI*. doi: 10.3390/su9060880.
- [13] INEC, “Estadísticas de Transporte (ESTRA),” May 2024. Accessed: Jan. 21, 2025. [Online]. Available: [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2024/i\\_trimestre/2024\\_RESULTADOS\\_SINIESTROS\\_IT.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2024/i_trimestre/2024_RESULTADOS_SINIESTROS_IT.pdf)
- [14] EFE / Redacción Primicias and Para hacer uso de este contenido cite la fuente y haga un enlace a la nota original en <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/ant-estudio-muertes-accidentes-transito-motociclistas-ecuador/>, “Cuatro de cada 10 muertos en accidentes de tránsito son motociclistas, revela la ANT.” Accessed: Jan. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/ant-estudio-muertes-accidentes-transito-motociclistas-ecuador/>
- [15] D. por and V. Monedero Rafael, “RUBÉN LAENCINA ESCOBAR Diseño de un Sistema Avanzado de Asistencia al Conductor (ADAS) basado en Visión Artificial para predicción del Tiempo-de-Colisión (TTC).”
- [16] “La Evolución de los Sistemas ADAS: Del Sueño a la Realidad - Mundo ADAS.” Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: <https://adasfera.com/la-evolucion-de-los-sistemas-adas-del-sueno-a-la-realidad/>
- [17] RACE, “¿Cuáles son los sistemas ADAS que tienen las motos? | RACE.” Accessed: Jan. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.race.es/sistema-adas-motos>
- [18] “Los 9 ADAS de las motos: qué son y cómo funcionan.” Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.autobild.es/noticias/9-adas-motos-son-como-funcionan-1072797>
- [19] HELLA TECH WORLD, “Tipos de sensores para sistemas de asistencia al conductor.” Accessed: Jan. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.hella.com/techworld/es/Lounge/Resumen-de-tipos-de-sensores-para-sistemas-de-asistencia-al-conductor-79885/>
- [20] “¿Qué es el LiDAR y cómo funciona? | Sinopsis.” Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-lidar.html>



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



- [21] SmartSafe, “Comprensión de los sistemas ADAS: tecnologías y funciones clave de los sistemas ADAS.” Accessed: Jan. 21, 2025. [Online]. Available: <https://newsSMARTSAFE.com/industry-news/sistemas-adas>
- [22] E. Cabrera-Bustamante, R. Moreno-Leal, and M. Torres-Rivera, “Integración de tecnología lidar en vehículo para escaneo con ros,” *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 10, no. Especial6, pp. 42–45, Nov. 2022, doi: 10.29057/icbi.v10iespecial6.9010.
- [23] “¿Qué es un sensor LiDAR? - Tecnología, Usos, Proyectos - Últimas Tecnologías Abiertas de Seeed.” Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/12/31/what-is-a-lidar-sensor-technology-uses-projects/>
- [24] D. Carlota Gómez Diego and D. D. Juan Carlos Aguado Manzano Adrián Mazaira Hernández, “Guiado de vehículo autónomo mediante tecnología LiDAR.”
- [25] R. Strässer *et al.*, “Collision Avoidance Safety Filter for an Autonomous E-Scooter using Ultrasonic Sensors,” Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ifacol.2024.07.313.
- [26] G. Aguillon, “SISTEMA DE SENSORES PARA CONTROL DEL VEHÍCULO AUTÓNOMO ELÉCTRICO Experiment Findings · March 2021 CITATIONS 0.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/349703633>
- [27] “84911685008 SENSOR ULTRASONICO PROXIMIDAD”.
- [28] O. DE Del Título, “UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABÍ FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS CARRERA DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA.”
- [29] A. M. Santiago, “Sensores Automotrices”, doi: 10.13140/RG.2.2.11558.98883.
- [30] F. R. Paraná UTN, “4to Congreso Virtual de Microcontroladores y sus Aplicaciones,” *AJEA*, no. AJEA 40, Dec. 2024, doi: 10.33414/ajea.1757.2024.
- [31] E. M. Fernández, J. Portilla, and B. Enrique, “DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO DE UNA MOTOCICLETA ELÉCTRICA DE COMPETICIÓN SEPTIEMBRE 2023.”
- [32] “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA.”
- [33] “Classified as Internal.”
- [34] C. Alfonso, F. Roldan, A. Miyer, and S. Castrillón, “Revista digital de Semilleros de Investigación REDSI MANUFACTURA ADITIVA EN MATERIALES POLIMÉRICOS POR PROCESO 3D FDM ADDITIVE MANUFACTURING IN POLYMERIC MATERIALS BY 3D FDM PROCESS”.



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



- [35] “Límites de Velocidad - Multas - Rango Moderado - Portal de Tránsito Ecuador.” Accessed: Oct. 24, 2025. [Online]. Available: <https://transitoecuador.com/multas/limites-de-velocidad/>
- [36] H. Montes, C. Salinas, J. Sarria, J. Reviejo, and M. Armada, “Automatic control of a large articulated vehicle,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer Verlag, 2014, pp. 427–441. doi: 10.1007/978-3-319-03653-3\_32.
- [37] V. Sreekanth and P. Kulkarni, “Comparison of V4 and V3 CALIOP (L3) aerosol products: A global perspective,” *Remote Sens. Appl.*, vol. 20, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.rsase.2020.100412.
- [38] “DATASHEET Raspberry Pi 4 Model B,” 2024. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org>
- [39] A. I. A. Brañez, F. P. A. López, M. J. C. Huaycho, C. N. A. S. Rodriguez, E. A. Iriarte, and S. R. Belmonte, “Development of a low-cost Raspberry Pi-based electric piezocone system for cone penetration testing,” *Soils and Rocks*, vol. 49, no. 1, Dec. 2026, doi: 10.28927/SR.2026.005425.
- [40] “Raspberry Pi Global Shutter Camera,” 2023.
- [41] “Procesamiento de imágenes Raspberry Pi,” 2016.
- [42] “TFT-DISPLAY DATASHEET.” [Online]. Available: [www.hy-line.de/computer](http://www.hy-line.de/computer)
- [43] “DATASHEET Buzzer” 2022. [Online].



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



ANEXOS A

Código fuente del programa de alerta de proximidad lateral

<https://github.com/jorton69c-tech/Tesis-UTN.git>

ANEXOS B

Protocolo pruebas ISO 5725

<https://1drv.ms/b/c/07376a6b1e2a79f5/IQC7kJykdcrMTbwbcUCZvMO3AZAaPjCGEaBjFgVrAc1Mczo?e=dbU5fa>

ANEXOS C

SOLIDOS DE LA CARCASA SOLIDWORKS

<https://1drv.ms/f/c/07376a6b1e2a79f5/IgAv6277HtgMT4kKbQkzke7eAf1RPYC3ceuDtpq5YnX7HOA?e=aRLMOX>



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**



ANEXOS D

Planos Carcasas del dispositivo



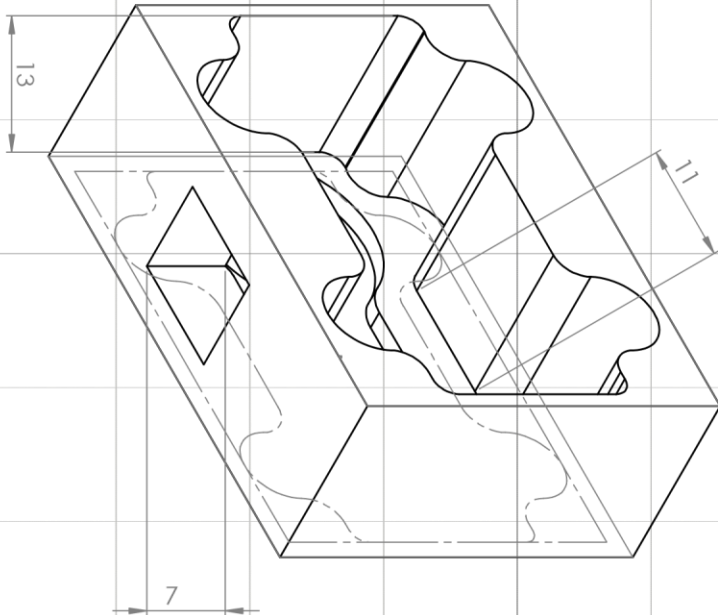
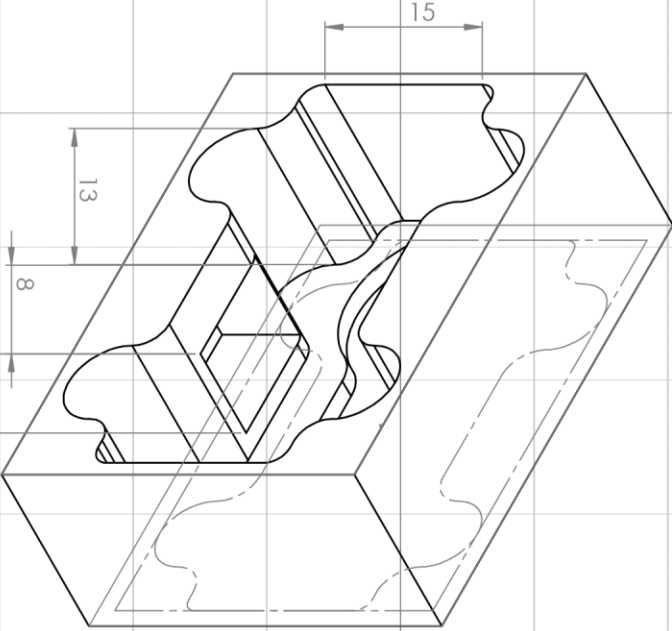
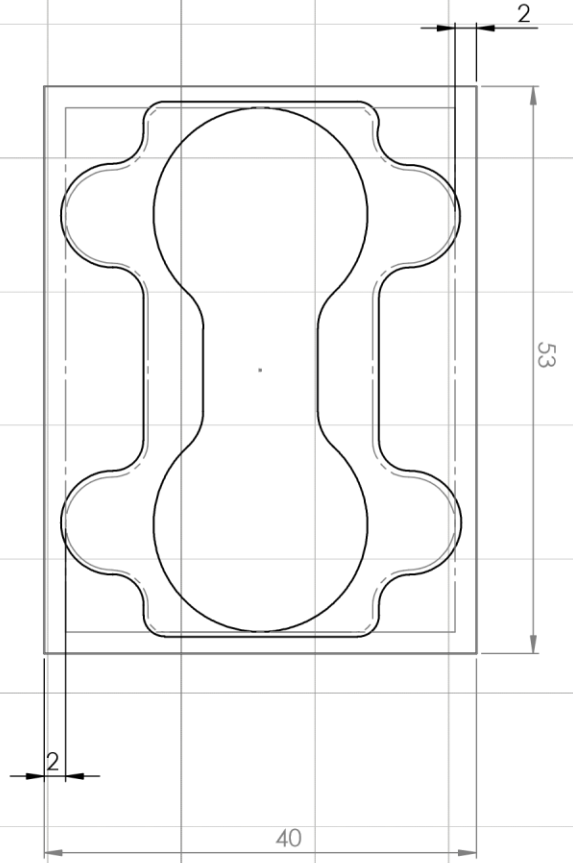


# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



Edición	Modificaciones	Fecha	Nombre	Firma	Materiales	Escala
					PLA	2:1
					Denominación	
					Carcasa LIDAR	
					Número de Dibujo	
					2	
					MMGS	
						Marca de registro

Tolerancia	Peso	Fecha	Nombre
± 1mm	0,2 Kg	18/01/2026	Gaifilina J. & Guamaní
		26/02/2026	MSc. Montenegro V.
		26/02/2026	MSc. Montenegro V.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**





# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

